



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département : Maintenance en Electromécanique

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electromécanique

Spécialité : Maintenance en Electromécanique

Thème

**Simulation Numérique du Stockage d'Énergie Solaire
Thermique d'une Installation Thermodynamique**

Présenté et soutenu publiquement par :

Chekaba Aimad

et

Bouguerra Amina

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
M. ADJELOUA Abdelaziz	MAA	Université d'Oran 2	Président
M. DARRAMDA NE Mohamed Zouhir	MCB	Université d'Oran 2	Encadreur
M. ACHACHE Habib	MCA	Université d'Oran 2	Examineur

Année 2019/2020

SOMMAIRE

Nomenclature-----1

Introduction générale-----4

Chapitre I : Généralité sur les énergies renouvelables

I.1 Introduction----- 5

I.2 Le développement des énergies renouvelables dans le monde----- 5

 I.2.1 La nécessité d'une transition vers les énergies renouvelables ----- 5

 I.2.2 Etat actuel et perspectives ----- 7

I.3 Les énergies renouvelables ----- 8

 I.3.1 Les sources des énergies renouvelables ----- 8

 I.3.1.1 L'énergie éolienne----- 9

 I.3.1.1.1 Avantages de l'énergie éolienne -----10

 I.3.1.1.2 Inconvénients de l'énergie éolienne -----10

 I.3.1.2 L'énergie hydraulique-----10

 I.3.1.2.1 Les autres types de l'énergie hydraulique-----11

 I.3.1.2.2 Avantages de l'énergie hydraulique -----11

 I.3.1.2.3 Inconvénients de l'énergie hydraulique -----11

 I.3.1.3 La géothermie -----12

 I.3.1.3.1 Avantages de la géothermie-----13

 I.3.1.3.2 Inconvénients de la géothermie-----13

 I.3.1.4 La biomasse -----13

 I.3.1.4.1 L'utilisation de la biomasse -----13

 I.3.1.4.2 Avantages de la biomasse -----14

 I.3.1.4.3 Inconvénients de la biomasse -----14

 I.3.1.5 L'énergie solaire-----14

I.4 Conclusion-----15

Chapitre II : Energie solaire et système de stockage

II.1 Introduction	16
Le rayonnement direct :	16
Le rayonnement diffus :	16
Le rayonnement global :	16
II.2 Les différents types d'énergie solaire	17
II.2.1 L'énergie solaire thermique	17
II.2.1.1 La technologie solaire « active » :	17
II.2.1.2 La technologie solaire « passive »	18
Les capteurs plans non vitrés :	19
Les capteurs plans vitrés :	19
Les capteurs à tubes sous vides :	19
II.2.1.3 Le solaire thermodynamique	19
1. Les héliostats et centrales à tour :	20
2. Les collecteurs à réflecteurs linéaires de Fresnel :	20
3. Les disques paraboliques en forme d'assiettes,	20
4. Les réflecteurs cylindro-paraboliques	21
II.2.2 Le solaire photovoltaïque	21
II.2.2.1 Les principales applications de photovoltaïque	21
Les générateurs autonomes :	21
Les générateurs raccordés au réseau :	22
II.3 Avantages de l'énergie solaire	22
II.4 Inconvénients de l'énergie solaire	23
II.5 Stockage de l'énergie solaire	24
II.5.1 Le stockage mécanique	24
II.5.1.1 Hydraulique gravitaire	24
II.5.1.2 Stockage d'énergie par air comprimé	25
II.5.1.2.1 CAES classique	25
II.5.1.2.2 Stockage adiabatique d'énergie par air comprimé (AA-CAES)	26
II.5.1.3 Volant d'inertie	27
II.5.2 Le stockage chimique	27
II.5.2.1 Batterie	27
II.5.2.2 Hydrogène	28

II .6 Le stockage thermique -----	30
II .6.1 Stockage par chaleur sensible-----	30
II .6.2 Stockage par chaleur latente-----	31
II.6.3 Stockage par voie thermochimique -----	33
II.7. Conclusion : -----	35

Chapitre III : Modèles de calculs

III.1 Introduction-----	36
III.2 Rappels sur les éléments d'échanges thermiques -----	36
III.2.1 Gradient de température et flux de chaleur -----	36
III.2.2 Mode de transfert de chaleur-----	37
III.2.2.1 Transfert de chaleur par conduction -----	38
III.2.2.2. Transfert de chaleur par convection-----	38
III.2.2.2.1. Convection naturelle (ou libre) -----	38
III.2.2.2.2. Convection forcée -----	39
III.2.2.2.3 Régime d'écoulement-----	40
III.2.2.2.3.1 Régime laminaire-----	40
III.2.2.2.3.2 Régime turbulent -----	40
III.2.2.3 Transfert de chaleur par Rayonnement-----	41
III.3 Rappels sur les cycles thermodynamiques à vapeur-----	41
III.3.1 Première Loi Appliquée pour les Systèmes Ouverts -----	41
III.3.2 Les composants d'une Turbine à Vapeur -----	41
III.3.3. Calcul du cycle à vapeur-----	42
III.4. Les méthodes numériques en régime instationnaire -----	43
III.4.1. Résolution de système avec la méthode de différence finie -----	43
III.4.1.1. Formulation explicite-----	43
III.4.1.2. Formulation implicite -----	43
III.4.1.2.1 Pour un nœud interne -----	44
III.4.1.2.2 Pour un nœud frontière -----	45
III.4.1.2.3 Pour un nœud symétrique -----	45
III.5. Programme de calcul de la quantité de chaleur stockée -----	46
III.5.1 Simulation numérique avec Fortran 90 et l'algorithme de calcul -----	47
III.6 Modélisation du système étudié -----	51
III.6.1 Description de la configuration étudiée -----	51

III.6.1.1 Domaine de calcul	53
III.7 Estimation du nombre de modules de stockage	55
III.8 Conclusion :	56

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1 Validation de calcul	57
IV.1.1 Le choix du pas d'espace	57
IV.1.2. Le choix de pas de temps	58
IV.2 Influence de la vitesse	59
IV.2.1 Influence de la vitesse sur la distribution de température	59
IV.2.2. Influence de la vitesse sur la quantité de chaleur stockée	60
IV.3 Cycles de stockage dans différents matériaux solides	61
IV.3.1 Stockage dans le béton	61
IV.3.2 Stockage dans la roche	61
IV.3.3. Stockage dans le sable	62
IV.4 Quantité de chaleur stockée	63
IV.5 Le déstockage de l'énergie thermique	64
IV.5.1 La répartition de température dans le solide	64
IV.5.2 Quantité de chaleur déstockée	65
IV.6 Conclusion	67
Conclusion générale	68

Nomenclature

Q	<i>quantité de chaleur</i>	J
L	<i>chaleur latente spécifique</i>	$J.Kg^{-1}$
m	<i>masse</i>	Kg
S	<i>surface</i>	m^2
\dot{m}	<i>le débit massique</i>	$kg.s^{-1}$
E	<i>puissance</i>	W
C_p	<i>capacité thermique massique</i>	$J.kg^{-1}.k^{-1}$
T	<i>température du solide/fluide</i>	K
h	<i>le coefficient d'échange convectif</i>	$W.m^{-2}.C^{-1}$
u	<i>vitesse moyenne du fluide</i>	$m.s^{-1}$
D	<i>diamètre</i>	m
l	<i>distance</i>	m
t	<i>temps</i>	s
g	<i>accélération de la pesanteur</i>	$m.s^{-2}$
z	<i>hauteur</i>	m
W	<i>travail</i>	J
A	<i>surface</i>	m^2
h	<i>enthalpie spécifique</i>	J/kg
N	<i>nombre</i>	—

Symboles grecs

α	<i>Diffusivité thermique du fluide</i>	$m^2.s$
η	<i>rendement</i>	—
ρ	<i>masse volumique</i>	$kg.m^{-3}$

τ	<i>la constante de temps</i>	—
λ	<i>conductivité thermique</i>	$W.K^{-1}.m^{-1}$
β	<i>coefficient de dilatation thermique</i>	K^{-1}
α	<i>Diffusivité thermique</i>	$m^2.s$
μ	<i>Viscosité dynamique du fluide</i>	$Pa.s$
ν	<i>Viscosité cinématique</i>	m^2/s
Φ	<i>Flux de chaleur</i>	W

Nombre sans dimension

G_r	<i>nombre de Grashof</i>	—
Re	<i>nombre de Reynolds</i>	—
Pr	<i>nombre de Prandtl</i>	—
Nu	<i>nombre de Nusselt</i>	—
Pe	<i>nombre de Péclet</i>	—
Fo	<i>nombre de Fourier</i>	—
Bi	<i>nombre de Biot</i>	—

Indices

i : indice d'un point de maillage suivant x

j : indice d'un point de maillage suivant y

S : solide

∞ : fluide

f : fluide

GV : générateur de vapeur

mod stk : module de stockage

Reg : générateur de vapeur

des : déstockée

tube : tube

v : vapeur

T : turbine

Opérateur mathématique

Δ *variation*

∂ *dérivée partielle*

$\frac{\partial}{\partial n}$ *dérivée le long de l normale*

\vec{n} : *Vecteur unitaire de la normale*

« محاكاة عددية لتخزين الطاقة الحرارية الشمسية لتركيب ديناميكي حراري »

المخلص

يتضمن العمل الحالي محاكاة عددية للسلوك الحراري والديناميكي لنظام التخزين اليومي للطاقة الحرارية الحساسة في التركييب الديناميكي الحراري الشمسي. يتم استخدام طريقة الفروق المحدودة لحل معادلة التوصيل غير المستقرة بنموذج أحادي البعد ومخطط ضمني.

في هذه الدراسة تم عرض تأثير سرعة مائع نقل الحرارة وكذلك توزيع درجة الحرارة وكمية الحرارة المنقولة إلى وسط التخزين الصلب للمواد المختلفة. تظهر نتائج الحساب أن الخرسانة تعطي أداءً واعدًا من حيث كمية الحرارة المتبادلة وكذلك إمكانية وجود تطبيقات بسيطة يمكن تحقيقها بسهولة على نطاق صناعي مقارنة بالتكوينات الأخرى. سمحت لنا هذه الدراسة بالتنبؤ بعدد وحدات التخزين المقدر لتشغيل التوربينات البخارية لمحطة الطاقة الحرارية الشمسية. وحدة التخزين المقترحة $6.4 \times 6.4 \times 10$ م مع 25 أنبوبًا.

« Simulation Numérique du Stockage d'Énergie Solaire Thermique d'une Installation Thermodynamique »

Résumé

Le présent travail porte à une simulation numérique du comportement thermique et dynamique d'un système de stockage journalier de l'énergie thermique sensible dans une installation thermodynamique solaire. La méthode de différences finies est utilisée pour la résolution de l'équation instationnaire de la conduction avec un modèle unidimensionnel et un schéma implicite.

Dans cette étude l'influence de la vitesse du fluide caloporteur ainsi que la distribution de la température et la quantité de chaleur transférée dans le milieu solide de stockage pour différents matériaux sont présentés. Les résultats de calcul montrent que le béton donne des performances prometteuses en termes de quantité de chaleur échangée ainsi que la possibilité d'avoir des simples applications facilement réalisables à l'échelle industrielle par rapport à d'autres configurations. Cette étude nous a permis de prédire le nombre de module de stockage estimé pour entraîner une turbine à vapeur d'une centrale thermodynamique solaire. Le module de stockage proposé est de dimension $6,4 \times 6,4 \times 10$ m comportant 25 tubes.

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1. Principaux organes du système de conversion éolien.

Figure I.2. Eolienne offshore.

Figure I.3. Eolienne onshore.

Figure I.4. Illustration du principe de fonctionnement d'une centrale hydroélectrique

Figure I.5. Processus de géothermie profonde.

Chapitre II

Figure II.1. Les différents types de rayonnement solaire

Figure II.2. Chauffe-eau solaire.

Figure II.3. Les quatre technologies principales de production d'électricité d'origine solaire par voie thermodynamique.

Figure II.4. Installation photovoltaïque autonome.

Figure II.5. Installation photovoltaïque raccordé à un réseau.

Figure II.6. Schéma d'une installation de stockage hydraulique gravitaire.

Figure II.7. Stockage par air comprimé – CAES

Figure II.8. Schéma de principe du « CAES isochore adiabatique souterrain » ou AA-CAES

Figure II.9. Une unité de stockage inertiel de 25 kWh

Figure II.10. Fonctionnement d'une batterie à flux

Figure II.11. L'électrolyse de l'eau.

Figure II.12. Pile à combustible.

Figure II.13. Principe du stockage sensible dans une centrale thermodynamique

Figure II.14. Principe du stockage thermique par changement de phase.

Figure II.15. Principe du stockage thermique par voie thermochimique.

Chapitre III

Figure III.1. Isotherme et gradient thermique.

Figure III.2. Transfert thermique par convection entre la paroi chaude et le fluide froid.

Figure III.3. Régime écoulement interne laminaire.

Figure III.4 Régime écoulement interne turbulent.

Figure III.5. Cycle d'une turbine à vapeur.

Figure III.6. Cycle de Rankine.

Figure III.7. Bilan thermique d'un nœud interne.

Figure III.8. Nœud frontière.

Figure III.9. Nœud symétrique.

Figure III.10. Schéma d'installation d'une centrale électrique parabolique, avec système de stockage dans le béton.

Figure III.11. Module de stockage de béton et banque de tubes.

Figure III.12. Dimensionnement du module de stockage.

Figure III.13. Section transversale du module de stockage et le domaine de calcul.

Figure III.14. L'emplacement des nœuds dans le domaine de calcul.

Chapitre IV

Figure IV.1. Distribution de la température pour différentes valeurs de pas de Δx .

Figure IV.2. Distribution de la température selon différents Δt .

Figure IV.3. Influence de la vitesse sur le profil de température.

Figure IV.4. Influence de la vitesse sur la quantité de chaleur stockée.

Figure IV.5. La variation de la température dans le béton pendant plusieurs cycles.

Figure IV.6. La variation de la température dans la roche pendant plusieurs cycles.

Figure IV.7. La quantité de chaleur stockée en fonction du temps pour les 3 différents sols.

Figure IV.8. Distribution de température de déstockage pour plusieurs durées de stockage.

Figure IV.9. Quantité de chaleur stocké et déstockée pour différentes durées de stockage.

Figure IV.10. Quantité de chaleur déstockée après différentes durées de stockage.

Liste des graphes

Chapitre IV

Figure IV.1 Distribution de la température pour différentes valeurs de pas de Δx .

Figure IV.2 Distribution de la température selon différents Δt .

Figure IV.3 Influence de la vitesse sur le profil de température.

Figure IV.4 Influence de la vitesse sur la quantité de chaleur stockée.

Figure IV.5 La variation de la température dans le béton pendant plusieurs cycles.

Figure IV.6 La variation de la température dans la roche pendant plusieurs cycles.

Figure IV.7 La variation de la température dans le sable pendant plusieurs cycles.

Figure IV.8 La quantité de chaleur stockée en fonction du temps pour les 3 différents sols.

Figure IV.9 Distribution de température de déstockage pour plusieurs durées de stockage.

Figure IV.10 Quantité de chaleur stocké et déstockée pour différentes durées de stockage.

Figure IV.11 Quantité de chaleur déstockée après différentes durées de stockage.

Introduction générale

Les technologies vertes ont changé la façon dont nous produisons l'énergie. Les éoliennes ou l'énergie solaire sont des armes essentielles contre le réchauffement climatique, contrairement aux énergies conventionnelles comme le charbon ou le pétrole dont les réserves sont géographiquement concentrées.

Les énergies renouvelables sont des énergies fondées sur l'utilisation des éléments naturels (terre, eau, vent, lumière du soleil), renouvelées ou régénérées naturellement et considérée inépuisables à l'échelle du temps humain citant la biomasse, l'éolienne, l'hydraulique et l'énergie solaire qui devraient devenir en 2025 la première source de production électrique dans le monde, devant le charbon, estime l'Agence Internationale de l'Energie (AIE). Cependant ces sources d'énergies renouvelables sont en général intermittentes puisqu'elles ne sont pas disponibles en permanence et de façon continue, problématique qui exige un système de stockage performant.

Pour stocker l'énergie sous forme de chaleur, il existe trois principes élémentaires : le stockage par chaleur sensible, par chaleur latente et le stockage thermo-chimique. La technologie de stockage sensible est considérée comme simple, économique et relativement mature, ce qui lui permet d'être exploitée, en revanche le choix du matériau de stockage est primordial.

Dans le présent travail la simulation numérique du stockage de l'énergie thermique sensible dans un milieu solide avec la méthode des différences finies en utilisant le langage de programmation Fortran 90 est réalisé. Le travail s'articule autour de quatre chapitres :

Dans le premier chapitre nous allons commencer par une analyse de la nécessité d'une transition énergétique, et les différentes formes des énergies renouvelables actuellement disponible ainsi que leur importance dans les années à venir.

Le second chapitre aborde les différents types d'énergie solaire et les diverses technologies de stockage.

Le troisième chapitre traite la description du modèle de calcul par la présentation des éléments d'échange thermique et de cycle thermodynamique à vapeur ainsi que la formulation implicite des équations avec la méthode des différences finies. Nous avons ensuite proposé l'algorithme de calcul et le cas d'étude.

Le quatrième chapitre est consacré à la discussion des résultats obtenus.

I.1 Introduction

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ainsi que les pays en voie de développement ne cessant de se multiplier. Cette production a triplé depuis les années 60 à nos jours. La totalité de la production mondiale d'énergie provient de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. De plus le recours excessif au stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures. Les énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire, la biomasse et l'énergie hydroélectrique, sont des solutions prometteuses pour suppléer les sources d'énergie de masse telle que l'énergie fossile et nucléaire. On entend par énergie renouvelable, des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. À la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée [1].

I.2 Le développement des énergies renouvelables dans le monde

Le 20ème siècle voit l'émergence au sein de la sphère publique des préoccupations d'environnement global : le changement climatique ainsi que celle de développement durable. Cette prise de conscience marque ainsi le passage progressif de l'idée d'un développement qui s'impose comme une nécessité à un concept où les préoccupations d'environnement font face aux préoccupations économiques et sociales. Ce constat s'est établi selon trois étapes :

- Un signal d'alarme venant de la communauté scientifique ;
- Une prise de conscience populaire ;
- Des actions politiques à l'échelle internationale ;

I.2.1 La nécessité d'une transition vers les énergies renouvelables

En 1886, le prix Nobel de chimie suédois Svante August Arrhenius propose un calcul de l'effet de serre faisant le lien entre les températures terrestres et la concentration en dioxyde de carbone CO₂ dans l'atmosphère. Il faut toutefois attendre 1958, grâce au scientifique américain Charles Keeling, pour commencer à démontrer l'impact de l'activité humaine sur l'environnement.

Parallèlement à ces préoccupations de la part de la communauté scientifique, une part grandissante de la population commence à se soucier de l'impact du mode de vie des sociétés développées et industrielles sur notre écosystème. Cette prise de conscience populaire comprend deux composantes :

- Un besoin de changement du mode de fonctionnement des sociétés dont l'économie et le développement se basent sur les énergies fossiles.
- La nécessité de préserver notre environnement.

Le débat sur la transition énergétique montre que les réponses aux questions d'environnement global n'apparaissent plus seulement comme indissociables des questions sociales et économiques, mais bien comme une source des évolutions sociétales à venir. L'urgence de préserver notre environnement grâce aux énergies renouvelables (ER) est renforcée par les diverses catastrophes environnementales générées par les sources d'énergies traditionnelles.

En effet les nombreuses marées noires et la catastrophe de Tchernobyl font apparaître ces énergies non seulement comme désastreuses pour la planète étant donné leur utilisation, mais également lors de leur production ainsi que leur transport. En 2013, le rapport du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), en reconnaissant une corrélation forte entre certains événements météorologiques et le renforcement des émissions de gaz à effet de serre, accélère la prise de conscience de la gravité de la situation qui s'affirme dans la société civile.

Cependant, après le constat des sociétés scientifique et civile, les réactions politiques internationales se font attendre. En 1992, lors du Sommet de la Terre de Rio au Brésil, il a été décidé d'adopter le « Convention-Cadre des Nations Unies sur le changement climatique » qui se rassemblera une fois par an à partir de 1995. Au sommet de la Terre succède le protocole de Kyoto en 1997 où 38 pays industriels s'engagent à réduire le total des émissions de gaz à effet de serre de 5% par rapport au niveau de 1990 [2].

En ce début du 21^{ème} siècle notre planète est illuminée comme jamais, le monde est entrain de subir de grandes métamorphoses, les nouvelles technologies et la science transforment nos vies à une vitesse parfois déroutante. Utiliser avec intelligence ses innovations ouvre les portes d'une nouvelle ère aux possibilités extraordinaires.

Cette révolution nourrit la créativité et l'imaginaire des femmes et d'hommes aux quatre coins du monde scientifique, ingénieur ou passionnés, ces visionnaires repensent nos modèles, ils inventent et mettent en œuvre de nouvelles solutions. Près de 85% de notre énergie viennent des carburants fossiles, ils alimentent nos habitations, nos transports, nos usines ... partout la demande explose et d'ici 2050 quand nous serons plus de 9 milliards nos besoins énergétiques vont doubler. Les stocks de gaz et de charbon sont aussi limités. Comment préserver la planète tout en continuant à faire tourner la machine monde ?

Le développement et la recherche des ER apparaissent alors comme une nécessité. Les réserves d'ER techniquement accessibles dans le monde sont suffisamment importantes pour fournir environ six fois plus d'énergie que ce que le monde consomme actuellement, et ce pour toujours. [3]

I.2.2 Etat actuel et perspectives

D'après le rapport de 2018 de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), les énergies renouvelables représentent 16.4% de la consommation finale d'énergie dans le monde. C'est environ 1% de plus qu'en 1990 (15.5%). En regardant ces chiffres, on pourrait se dire que la progression des énergies renouvelables dans le monde est très faible : moins de 1% en plus de 25 ans.

En effet, depuis les années 1990, parmi les différents types d'énergie renouvelable, certaines ont un peu baissé alors que d'autres ont fortement augmenté, la biomasse par exemple, représente une part moins importante de la consommation d'énergie aujourd'hui qu'en 1990, mais dans le même temps l'énergie éolienne, solaire et même hydro-électrique ont considérablement augmenté. La production d'énergie éolienne par exemple est passée de 3.4 TWh en 1990 à 790 TWh en 2016, Pour le solaire, ce sont les mêmes ordres de grandeur : en 1990, on consommait 0.58 TWh d'électricité d'origine solaire, pour 279 TWh en 2016. Cela prouve que depuis près de 30 ans, les énergies renouvelables et notamment l'électricité d'origine renouvelable n'a cessé d'augmenter.

Aujourd'hui, de nombreuses énergies renouvelables sont utilisées à travers le monde : biomasse, géothermie, hydro-électricité, éolien et solaire, mais aussi solaire thermique... En 2016, toujours selon l'AIE, la part des différentes énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie se répartissait ainsi :

- Biomasse et déchets : 11.6%

- Hydroélectricité : 3.1%
- Éolien : 0.7%
- Géothermie et solaire thermique : 0.5%
- Solaire photovoltaïque : 0.2%

Si l'énergie renouvelable représente environ 16.4% de la consommation finale d'énergie de la planète, ce chiffre devrait continuer à augmenter dans les prochaines années. En effet, des conditions favorables ont permis depuis plusieurs années un développement conséquent des infrastructures d'énergie renouvelable partout dans le monde. La baisse des coûts des énergies renouvelables, l'amélioration technologique continue et le développement de la prise de conscience écologique ont poussé les énergies renouvelables vers le haut.

Les énergies renouvelables devraient d'ailleurs continuer à se développer partout sur la planète, d'ici 2023, l'énergie renouvelable devrait être le secteur avec la croissance la plus rapide au sein de la production d'électricité. Elle devrait représenter environ 30% de la demande globale en électricité d'ici 4 ans. La chaleur issue de l'énergie renouvelable devrait passer de 10.5 à 12% d'ici 2023 également, d'après l'AIE. [4]

I.3 Les énergies renouvelables

Une énergie renouvelable est une énergie exploitée par l'Homme, de telle manière que ses réserves ne s'épuisent pas. En d'autres termes, sa vitesse de formation doit être plus grande que sa vitesse d'utilisation.

Le caractère renouvelable d'une énergie dépend de la vitesse à laquelle la source se régénère, mais aussi de la vitesse à laquelle elle est consommée. Le pétrole ainsi que tous les combustibles fossiles ne sont pas des ER, les ressources étant consommées à une vitesse bien supérieure à la vitesse à laquelle ces ressources sont naturellement créées. [5]

I.3.1 Les sources des énergies renouvelables

Les technologies énergétiques renouvelables varient beaucoup dans leur maturité technique et économique, mais les sources sont nombreuses et offrent de plus en plus d'options intéressantes. Ces sources comprennent l'énergie éolienne, la biomasse, l'énergie solaire photovoltaïque et thermique, la géothermie et l'énergie hydraulique. Elles ont pour point commun de ne produire que peu ou pas de gaz à effet de serre, et d'utiliser comme "matière première" des ressources naturelles quasiment inépuisables. Certaines de ces technologies sont déjà compétitives. Leur

viabilité économique va s'améliorer encore à mesure qu'elles s'amélioreront techniquement, que les prix des combustibles fossiles continueront de grimper et que les émissions de dioxyde de carbone qu'elles permettront d'éviter se verront attribuer une valeur monétaire. [6]

I.3.1.1 L'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). Les principaux facteurs qui déterminent la viabilité économique d'une éolienne sont les caractéristiques des pales, le rendement du générateur et surtout la vitesse moyenne du vent. [7]

Le principe de l'énergie éolienne est vieux comme les moulins à vent. En effet, la force du vent est utilisée, depuis longtemps, pour moudre le blé et pomper l'eau. Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Ensuite cette énergie est transformée en énergie électrique par l'intermédiaire d'une machine électrique. Le SCE (Système de Conversion Eolien) est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique comme représenté sur la figure I.1.

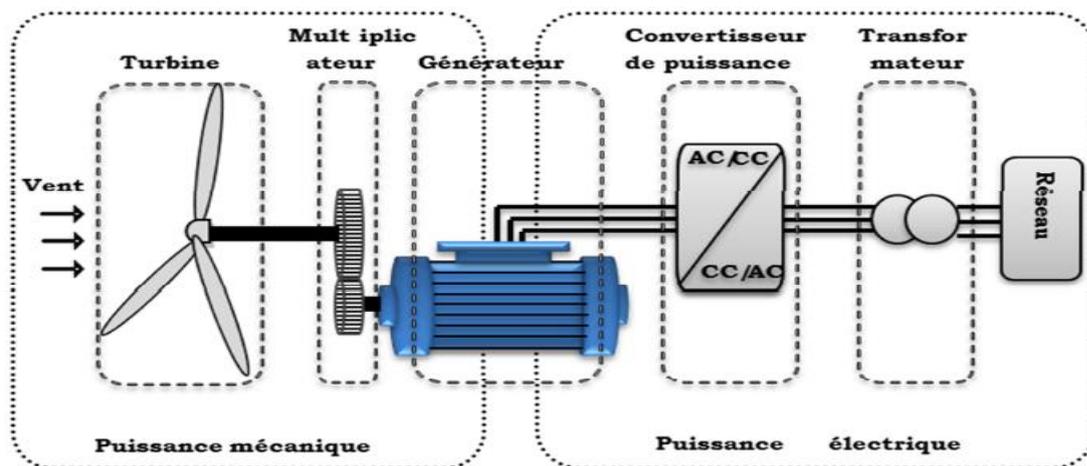


Figure I.1. Principaux organes du système de conversion éolien.

Les termes « parc éolien » ou « ferme éolienne » sont utilisés pour décrire les unités de production groupées, installées à terre « onshore » ou dans la mer « offshore », voir figure I.2 et I.3. Le grand avantage de l'éolienne onshore c'est que l'installation est beaucoup moins coûteuse que l'éolienne en mer. L'électricité propre est directement produite à l'endroit où l'on en a besoin.



Figure I.2.éolienne offshore.



Figure I.3.éolienne onshore.

I.3.1.1.1 Avantages de l'énergie éolienne

- L'énergie éolienne ne libère aucun dioxyde de carbone au cours de son cycle de vie.
- Il n'y a pas besoin de carburant.

I.3.1.1.2 Inconvénients de l'énergie éolienne

- Affecte le paysage environnant et cause du bruit.
- Dépendant du vent.
- Des coûts d'investissement énormes. [8]

I.3.1.2 L'énergie hydraulique

C'est une source d'énergie propre et non polluante de l'environnement, économique, fiable et renouvelable. Son principe ressemble à celui de l'énergie éolienne, mais c'est le cycle d'eau qui est indispensable et non pas le vent. Sous l'action du soleil, l'eau des océans et de la terre s'évapore. Elle se condense en nuages qui se déplacent avec le vent. La baisse de température au-dessus des continents provoque des précipitations qui alimentent l'eau des lacs, des rivières et des océans.

L'énergie hydraulique permet de fabriquer de l'électricité, dans les centrales hydroélectriques, grâce à la force de l'eau. Cette force dépend soit de la hauteur de la chute d'eau (centrales de haute ou moyenne chute), soit du débit des fleuves et des rivières (centrales au fil de l'eau).

Autrement dit, l'énergie potentielle de l'eau retenue dans le réservoir se transforme en énergie cinétique, ce qui entraîne la rotation de la turbine hydraulique. La turbine est couplée à un alternateur qui va produire à son tour de l'électricité. (Voir figure I.4)

- Une centrale hydraulique est composée de 3 parties :
- Le barrage qui retient l'eau.
- La centrale qui produit l'électricité.
- Les lignes électriques qui évacuent et transportent l'énergie électrique. [9]

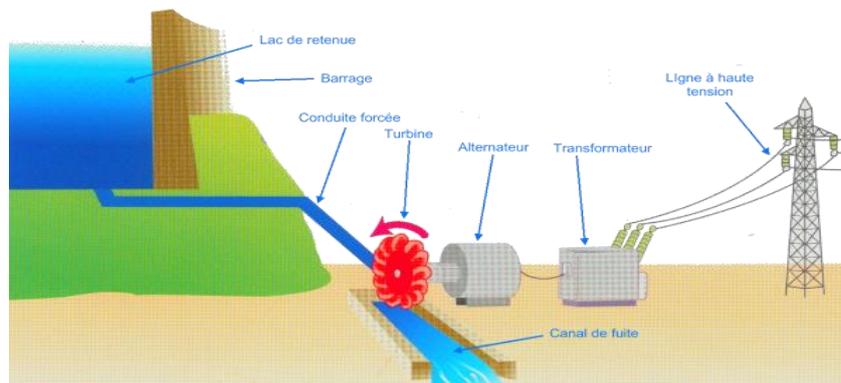


Figure I.4. Illustration du principe de fonctionnement d'une centrale hydroélectrique.

I.3.1.2.1 Les autres types de l'énergie hydraulique

- Energie des vagues : Utilise la puissance du mouvement des vagues,
- Energie marémotrice : Issue du mouvement de l'eau créée par les marées (variations du niveau de la mer, courants de marée).
- Energie hydrolienne : Les hydroliennes utilisent les courants sous-marins,
- Energie thermique des mers : Produite en exploitant la différence des températures entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans.
- Energie osmotique : La diffusion ionique provoquée par l'arrivée d'eau douce dans l'eau salée de la mer est source d'énergie. [10]

I.3.1.2.2 Avantages de l'énergie hydraulique

- L'énergie hydroélectrique n'entraîne généralement aucun impact climatique ou environnemental.
- Fournit une génération d'électricité stable et à grande échelle.
- Il n'y a pas besoin de carburant.
- Les centrales hydroélectriques ont une longue durée de vie économique.

I.3.1.2.3 Inconvénients de l'énergie hydraulique

- Les centrales hydroélectriques impliquent une ingérence majeure dans le paysage et affectent les écosystèmes.
- De grands investissements sont nécessaires pour construire une centrale hydroélectrique. [11]

I.3.1.3 La géothermie

Boule de matière très chaude à l'origine, la terre ne s'est pas entièrement refroidit plus on approche à son centre plus la température est élevée à 40 kilomètres de profondeur la température de la roche atteint 1000° C, mais selon les zones géographiques cette chaleur peut affleurer les bords de l'écorce terrestre, les volcans où les sources d'eau chaude en sont les manifestations les plus visibles. Cette chaleur, cette énergie propre disponible et quasiment inépuisable fait l'objet de recherche d'expérimentation et de développement prometteur, on l'appelle la géothermie.

Le mode d'exploitation le plus connu en est la pompe à chaleur, il s'agit d'un système de chauffage pour maisons individuelles qui repose sur la récupération de l'énergie contenue dans le sol ou dans des nappes phréatiques de faible profondeur.

Les zones de roches chaudes et imperméables offrent elles aussi d'immenses ressources mais leur exploitation n'en n'est qu'à ses débuts. Dans les zones volcaniques ou aux frontières des plaques tectoniques la température peut s'élever de 10° tous les 100 mètres, l'objectif est donc d'utiliser la chaleur du sous-sol pour produire l'électricité.

Pour récupérer de l'énergie thermique dans le sous-sol on injecte de l'eau en grande profondeur , cette eau se charge en calories en circulant dans les roches chaudes, remonter en surface sa température avoisine les 200°, elle passe alors dans un échangeur où elle libère ses calories avant de retourner dans le sous-sol pour se recharger, ce circuit primaire fonctionne en circuit fermé ; le circuit secondaire qui a récupéré les calories du circuit primaire à l'aide de l'échangeur libère ensuite son énergie en alimentant une turbine à vapeur qui fait tourner un alternateur qui produit de l'électricité comme le montre la figure I.5. [12]

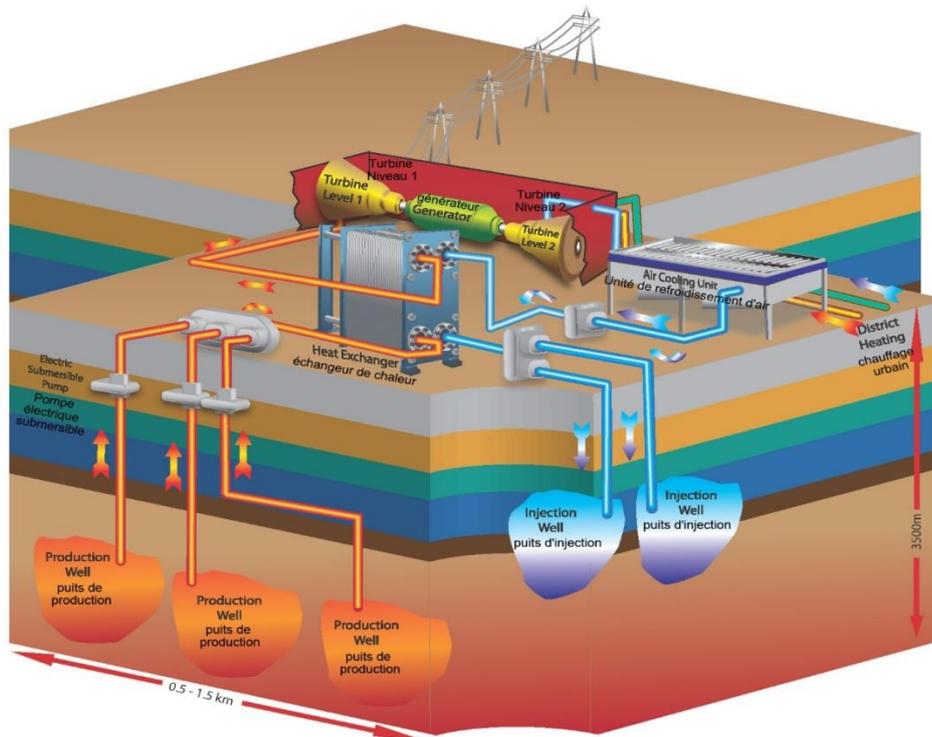


Figure I.5. processus de géothermie profonde.

I.3.1.3.1 Avantages de la géothermie

- La géothermie ne dépend pas des conditions atmosphériques.
- Elle n'a pas besoin d'être évacuée, et pas besoin d'être stockée.
- Elle ne dégage que peu de gaz à effet de serre et ne laisse aucun déchet après utilisation.

I.3.1.3.2 Inconvénients de la géothermie

- Les coûts de forage s'accroissent très rapidement avec la profondeur. [13]

I.3.1.4 La biomasse

La biomasse se compose de l'ensemble des matières organiques issus du vivant le monde animal et le monde végétal ; le bois, la paille constitue d'importantes ressources de biomasse pouvant être utilisées pour faire de l'énergie.

La biomasse est la plus ancienne des énergies, elle a été de tout temps utilisée pour cuire des aliments, se chauffer et s'éclairer, depuis les technologies ont beaucoup progressé et permettent aujourd'hui d'utiliser cette ressource précieuse. [14]

1.3.1.4.1 L'utilisation de la biomasse

En général, la biomasse est utilisée de trois façons principales. Ce sont les suivantes :

1.3.1.4.1.1 La bioénergie, qui transforme les hydrates de carbone en sources de biomasse afin de créer de la chaleur, de fabriquer des carburants et de produire de l'électricité.

1.3.1.4.1.2 Les biocarburants, qui utilisent des sources de biomasse pour produire des carburants liquides tels que l'éthanol, le méthane, le biodiésel et la bio-huile.

1.3.1.4.1.3 Les bioproduits, qui utilisent les sources de biomasse afin de créer des produits commerciaux et industriels (lubrifiants, solvants, adhésifs). Pour qu'elle produise de la bioénergie, la biomasse peut être transformée en carburant solide, liquide ou gazeux. Il est alors possible de créer de la chaleur et/ou de l'électricité, par différents procédés : combustion, gazéification, pyrolyse, processus biochimiques.

- La combustion : Il s'agit de brûler la biomasse afin de créer des gaz de combustion chauds qui peuvent ensuite être utilisés dans des chaudières afin de produire de la vapeur pour alimenter des engins (turbogénérateurs) électriques.
- La gazéification utilise des températures élevées en présence d'oxygène afin de transformer la biomasse solide en gaz qui alimentera une turbine produisant de l'électricité.
- La pyrolyse est la décomposition de la biomasse sans présence d'air à des températures supérieures à 250°. Des produits liquides et solides en résultent, faciles à entreposer et à transporter, notamment de la bio-huile, qu'il est ensuite possible d'utiliser comme matière de base pour la production d'électricité. [15]

1.3.1.4.2 Avantages de la biomasse

- En utilisant la biomasse dans la production d'électricité au lieu des combustibles fossiles, les émissions de CO₂ sont considérablement réduites.
- Si la biomasse est bien manipulée, elle est neutre en carbone à long terme.

1.3.1.4.3 Inconvénients de la biomasse

- Livraison de plus grands volumes difficile à sécuriser.
- L'utilisation de la biomasse pour produire de l'électricité est actuellement plus coûteuse que l'utilisation de sources d'énergie telles que le charbon, le gaz et l'énergie nucléaire. [16]

I.3.1.5 L'énergie solaire

Le soleil est notre grand, et presque unique, pourvoyeur d'énergie sur Terre. Bien sûr, le soleil nous chauffe et nous éclaire, mais il est aussi responsable du déplacement des masses d'air (l'énergie éolienne). Il est le moteur du cycle de l'eau, qui actionne les turbines de nos barrages hydro-électriques. Enfin, grâce aux plantes qui utilisent sa lumière pour convertir les éléments minéraux en aliments, l'énergie solaire entre dans toutes les chaînes alimentaires. [17]

I.4 Conclusion

Les réserves des combustibles fossiles sont mal connues, car les opérateurs et les spécialistes déclarent des chiffres plus politiques que techniques. Donc, le pic de la production du principal combustible qui est le pétrole est prévu entre 2020 et 2050, ce qui pose un problème de la satisfaction de la demande mondiale en énergie du fait de son caractère non renouvelable.

La contribution des énergies renouvelables dans la régularisation de ce déficit est primordiale. C'est pour cela, il est fortement indispensable de s'intéresser à ce type d'énergie durable en développant les technologies nécessaires pour assurer une bonne exploitation de celle-ci, dans le but d'arriver à un rendement efficace. Aussi la contribution des énergies renouvelables nous permet d'une part, de garder un environnement propre et sain et d'autre part, pour assurer la protection de la biodiversité.

-
- [1] BIDI Manel : « Conception d'une centrale photovoltaïque pour recharge de voitures », MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER En Génie Mécanique, Université de M'sila, 2018 /2019.
- [2] Baptiste Gadellier : « Etude d'un système de stockage d'énergie solaire thermique répondant aux besoins en chauffage d'une habitation unifamiliale », Mémoire de fin d'étude Master Ingénieur Civil Architecte, Faculté des Sciences appliquées, 2018/2019.
- [3] Onu programme pour l'environnement : « Rapport 2019 sur l'écart entre les besoins et les perspectives en matière de réduction des émissions », Résumé analytique.
- [4] www.ekwateur.fr
- [5] SVT-Diaporama sur les énergies renouvelables. 1,839. Learn about Prezi. GU. guillaume ubeda. Updated 8 June 2011.
- [6] Sven Teske, Arthouros Zervos, Oliver Schäfer, Rapport révolution énergétique, Primavera Quint, Pays-Bas, 2010.
- [7] F. POITIERS, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », thèse de doctorat de l'université de Nantes, le 19 décembre 2003.p11
- [8] www.vattenfall.fr
- [9] www.edf.fr
- [10] ATMANIA Hanane, « la stratégie d'implantation des énergies renouvelables en Algérie cas de la photovoltaïque », mémoire de magister en management, 2014 /2015.
- [11] www.vattenfall.fr
- [12] www.edf.fr
- [13] www.consoglobe.com
- [14] www.edf.fr
- [15] <https://scribe.libergier.fr/campus/claroline/course/index.php?cid=EDD>
- [16] www.vattenfall.fr
- [17] www.mtaterre.fr

II.1 Introduction

L'énergie solaire est l'énergie la plus répandue et la plus répartie dans le monde. En une année, l'humanité entière consomme 10 milliards de Tonnes équivalent pétrole (TEP). Cette quantité représente moins de 3 % de ce que le soleil nous envoie gratuitement chaque jour. En raison de la dispersion dans l'atmosphère, le rayonnement solaire a deux composantes, direct et diffus, figure II.1.

❖ Le rayonnement direct :

Il s'agit d'une composante normale du rayonnement solaire qui se propageant le long de la ligne joignant la surface de réception et le soleil. C'est le type de rayonnement qui est utilisé dans les systèmes à concentration telles que les fours solaires et les centrales solaires thermodynamiques.

❖ Le rayonnement diffus :

Le rayonnement solaire diffus arrive sur le plan récepteur après avoir été réfléchi par les nuages, les poussières, les aérosols et le sol, et subissant le phénomène de multi-réflexions. Ils contribuent à l'éclairage, mais ne peuvent pas être concentrés (à l'inverse du rayonnement direct).

❖ Le rayonnement global :

La somme des deux rayonnements directs et diffus donne le rayonnement global.

Le rayonnement global est le rayonnement maximal qu'il est possible d'avoir sur un plan récepteur. C'est celui-ci qui est utilisé pour faire fonctionner les panneaux solaires thermiques et photovoltaïques.

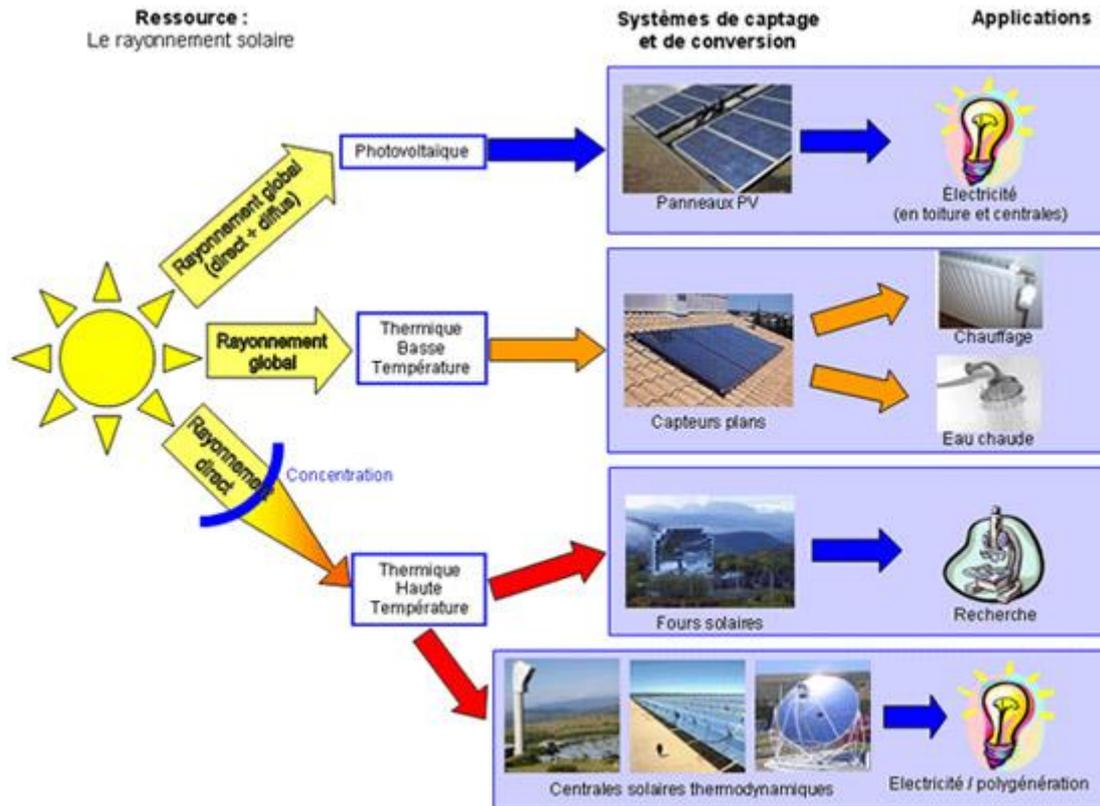


Figure II.1. Les différents types de rayonnement solaire. [18]

II.2 Les différents types d'énergie solaire

II.2.1 L'énergie solaire thermique

Un système solaire thermique exploite le rayonnement du Soleil afin de le transformer directement en chaleur (énergie calorifique).

On distingue trois types de technologies permettant d'exploiter l'énergie solaire thermique : la technologie solaire thermique à basse température (active, passive), la technologie solaire thermique à haute température (thermodynamique).

II.2.1.1 La technologie solaire « active » :

Traditionnellement, ce terme désigne les applications à basse et moyenne température. La chaleur est utilisée afin de produire de l'eau chaude sanitaire ou bien encore chauffer des locaux.

Le principe du chauffe-eau est simple : l'énergie du rayonnement solaire est absorbée par des capteurs plans fonctionnant selon le principe de l'effet de serre. La chaleur emmagasinée est

ensuite transportée au sein d'un circuit « primaire » contenant un mélange caloporteur d'eau et d'antigel.

Grâce à un échangeur thermique, le liquide caloporteur contenu dans le circuit primaire transmet son énergie thermique à de l'eau sanitaire contenue dans le réservoir (un « ballon ») d'un second circuit isolé, dit « secondaire ». Le liquide caloporteur refroidi repart ensuite vers les capteurs afin d'être réchauffé. Lorsque l'eau chauffée dans le ballon est utilisée, elle est remplacée par de l'eau froide du réseau, réchauffée selon le même principe, comme le montre la figure II. 2.

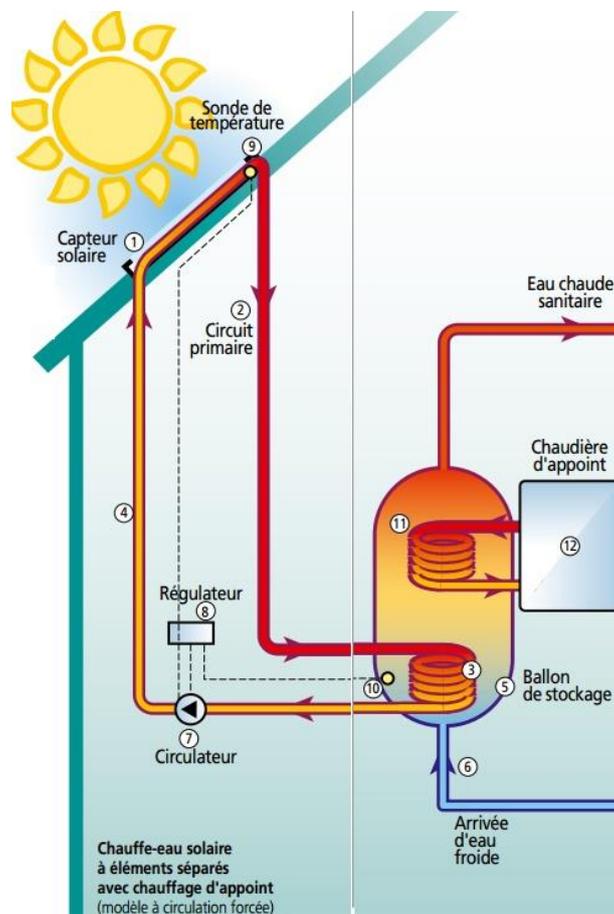


Figure II.2. Chauffe-eau solaire.

II.2.1.2 La technologie solaire « passive »

Toujours dans le domaine de la basse température, on peut également citer les installations solaires passives. Par opposition aux applications précédentes, celles-ci ne requièrent pas de composants dits actifs (les capteurs solaires). Ces applications reposent sur des concepts de génie civil et climatique impliquant une architecture adaptée et l'emploi de matériaux spéciaux.

L'utilisation passive de l'énergie du Soleil permet de chauffer, d'éclairer ou de climatiser des locaux.

Un capteur solaire thermique est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie provenant du Soleil et la transmettre à un fluide caloporteur. Il existe plusieurs systèmes de captage qui se différencient par leur structure :

- ***Les capteurs plans non vitrés :***

Leur structure est assez simple, puisque composée d'un réseau de tubes plastiques noirs où circule le fluide caloporteur. Ils sont utilisés essentiellement pour le chauffage de l'eau des piscines en été ;

- ***Les capteurs plans vitrés :***

Le fluide caloporteur, très souvent de l'eau mélangée à un antigel, passe dans un circuit en serpentin placé derrière une vitre.

- ***Les capteurs à tubes sous vide :***

Le fluide caloporteur circule à l'intérieur d'un double tube sous vide. Le principe est le même que pour les capteurs plans vitrés, l'isolation étant simplement assurée par l'absence de molécules d'air (sous vide)

[19]

II.2.1.3 Le solaire thermodynamique

Le solaire thermodynamique (ou CSP pour Concentrated Solar Power) est l'une des valorisations du rayonnement solaire direct. Comparé au photovoltaïque, le solaire thermodynamique est plus polyvalente dans ses usages. La technologie consiste à concentrer le rayonnement solaire pour chauffer un fluide à haute température (entre 200 et 500 °C) et produire de la vapeur qui sera valorisée sous forme d'électricité, de froid, de chaleur industrielle ou dans des applications plus spécifiques comme le dessalage d'eau de mer.

Tout dépend de la technologie utilisée, le point où se concentre le rayonnement peut atteindre des températures extrêmement élevées, jusqu'à 1000 degrés Celsius. Plus le point focal est petit, plus la chaleur est intense. Il existe plusieurs types de centrales à énergie solaire thermodynamique représentés dans la figure II.3 :

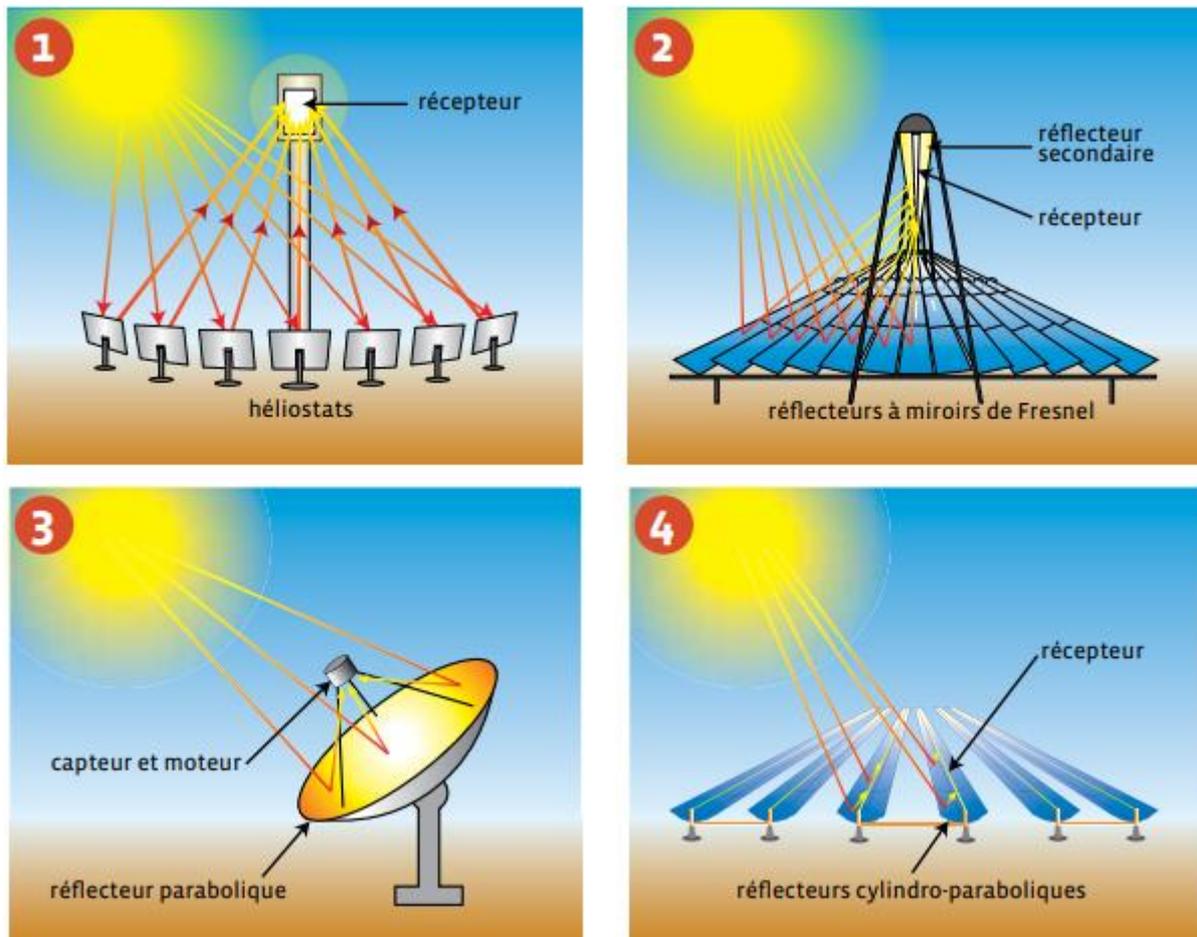


Figure II.3. Les quatre technologies principales de production d'électricité d'origine solaire par voie thermodynamique.

1. ***Les héliostats et centrales à tour :***

Des centaines, voire des milliers de miroirs (héliostats) équipés d'un système de suivi du soleil (deux axes de rotation) concentrent ses rayons sur un récepteur central placé au sommet d'une tour.

2. ***Les collecteurs à réflecteurs linéaires de Fresnel :***

Sont composés d'une succession de miroirs plans qui suivent la courbe du soleil (un axe de rotation) et redirigent ses rayons sur un tube absorbeur (récepteur). L'utilisation de réflecteurs non incurvés permet d'abaisser considérablement le coût, comparativement aux collecteurs cylindro-paraboliques, malgré un rendement inférieur.

3. ***Les disques paraboliques en forme d'assiettes,***

Suivent la course du soleil (deux axes de rotation) et concentrent les rayonnements vers un récepteur situé au point focal de la parabole. Au point focal se trouve une enceinte à

l'intérieur de laquelle un gaz entraîne un moteur Stirling. Peu d'industriels dans le monde portent cette technologie.

4. *Les réflecteurs cylindro-paraboliques*

Miroirs en forme d'auges, concentrent les rayons du soleil vers un tube (récepteur) placé sur la ligne focale.

Un des principaux avantages du solaire thermodynamique est qu'il offre la possibilité de produire de l'électricité en continu grâce aux systèmes de stockage thermique auxquels il peut être associé. Cela permet de couvrir des pics de consommation situés avant le lever ou après le coucher du soleil. L'autre avantage est l'hybridation. Ce principe consiste à associer une centrale solaire à une autre source de chaleur issue d'énergie fossile ou de la biomasse, garantissant ainsi une production continue. Cela peut permettre des systèmes de cogénération (production simultanée d'électricité et de chaleur) qui peuvent améliorer la rentabilité des projets. [20]

II.2.2 Le solaire photovoltaïque

Parmi toutes formes d'utilisations de l'énergie solaire, c'est probablement les cellules photovoltaïques qui sont les plus connues. Cette technologie exploite la lumière du soleil pour la convertir directement en électricité. C'est le physicien français Antoine-César Becquerel qui a observé la réaction photovoltaïque pour la première fois en 1839 lorsque des éléments conducteurs ont généré un courant en présence de lumière (photons). Le principe est le suivant : la collision entre un photon et un matériau semi-conducteur génère des charges électriques positives et négatives qui engendrent un faible courant. Cette réaction est produite par plusieurs matériaux, mais c'est actuellement le silicium

II.2.2.1 Les principales applications de photovoltaïque

- *Les générateurs autonomes :*

L'un des atouts de l'énergie photovoltaïque réside dans la possibilité de fournir une autonomie de fonctionnement à un appareil nécessitant une source d'électricité indépendante (télécommunication, éclairage public, pompage d'eau, habitat isolé...). Ce système se base sur un chargement d'une batterie et sert de « réservoir » d'énergie en permanence, il fournit une puissance donnée variable selon la saison, mais que l'on ne peut dépasser, au risque de détruire la batterie par décharge profonde (voir figure II.4).

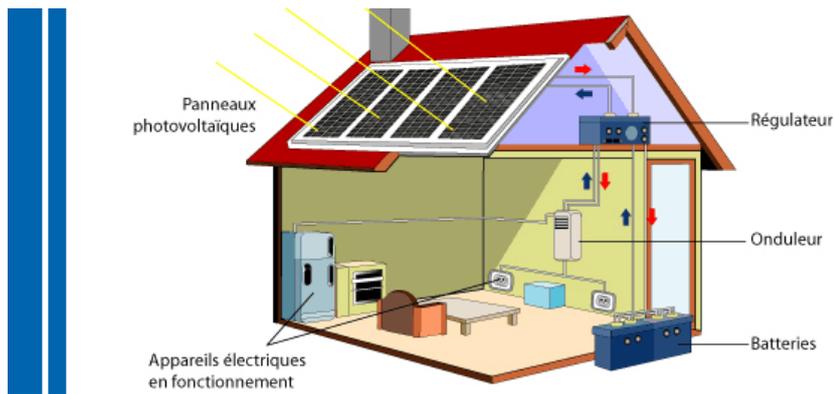


Figure II.4. Installation photovoltaïque autonome.

- ***Les générateurs raccordés au réseau :***

Un tel système s'installe sur un site raccordé au réseau, généralement sur des habitations ou des entreprises qui souhaitent recourir à une forme d'énergie renouvelable et qui bénéficient d'un bon ensoleillement. L'énorme avantage de cette solution est l'absence de batterie. On ne stocke plus l'énergie, on l'injecte directement dans le réseau local ou nationale (voir figure II.5). [21]

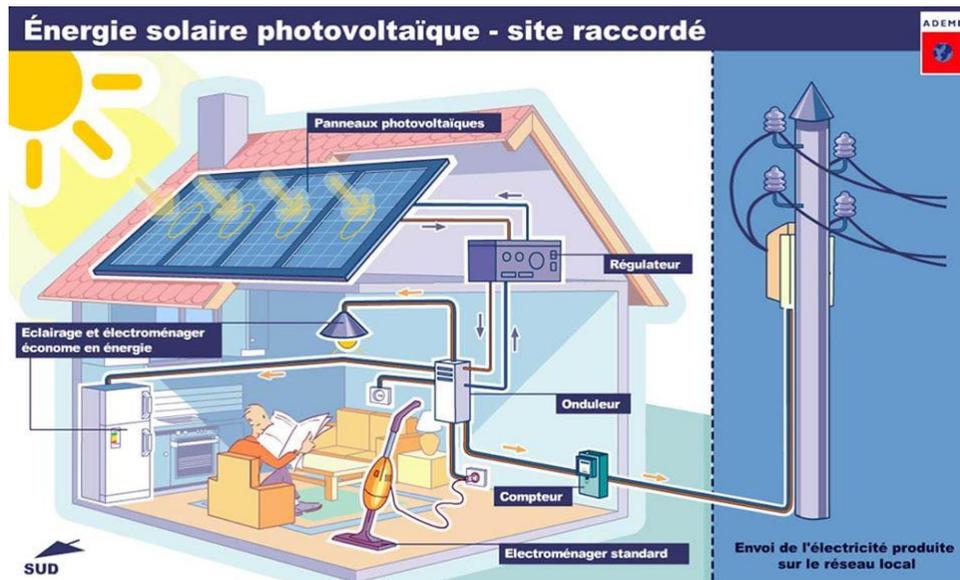


Figure II.5. Installation photovoltaïque raccordé à un réseau.

II.3 Avantages de l'énergie solaire

- Une ressource illimitée, contrairement aux combustibles fossiles.
- Une énergie inépuisable et propre.
- C'est une source d'économie.
- Une énergie qui assure l'éclairage, la cuisine et le chauffage de l'eau.
- L'exploitation de l'énergie solaire permet la conservation des vaccins, le pompage et l'épuration d'eau et l'électrification rurale.
- Les systèmes solaires sont faciles à installer et nécessitent très peu de maintenance.
- Les systèmes de cellules solaires ont une longue durée de vie – environ 25 ans.
- L'énergie solaire permet la production d'électricité et les télécommunications.

II.4 Inconvénients de l'énergie solaire

- L'énergie solaire est intermittente, la production d'électricité dépend du soleil brillant.
- La lumière du soleil varie selon l'endroit et la saison. Les prévisions sont plus incertaines que les combustibles fossiles (mais meilleures que celles du vent).

Combinaison non réglable et faible entre la production et la demande – le soleil produit plus en été, alors que l'électricité est plus nécessaire en hiver.

II.5 Stockage de l'énergie solaire

Comme il a été mentionné, l'inconvénient majeur de l'énergie solaire est qu'il s'agit d'une source intermittente (nuit, soleil occulté par les nuages) et qui est parfois en inadéquation avec les besoins d'un point de vue spatial, temporel, en puissance ou en température. La solution est donc de stocker l'énergie solaire pour répondre aux besoins énergétiques au moment et à l'endroit où ceux-ci se manifestent. [22]

Les technologies de stockage de l'énergie se déclinent selon le type d'énergie mis en œuvre :

1. *Stockage mécanique :*

- Hydraulique gravitaire.
- Air comprimé (CAES : Compressed Air Energy Storage).
- Volant d'inertie.

2. *Stockage chimique :*

- Batteries.
- Hydrogène.

3. *Energies thermique et thermochimique :*

- Chaleur sensible.
- Chaleur latente.
- Energie thermochimique.

II.5.1 Le stockage mécanique

II.5.1.1 Hydraulique gravitaire

Ce système, lié à l'énergie hydraulique, fonctionne sur le principe de deux réserves d'eau à des hauteurs différentes. Lorsque l'électricité est produite en excès, l'eau du bassin inférieur est pompée via une conduite forcée vers le bassin supérieur, qui devient un réceptacle d'énergie potentielle. Lorsque le besoin se fait ressentir, une partie du réservoir supérieur, est vidée et par gravité, l'eau passe dans une turbine qui produit l'électricité. C'est un système réversible qui associe pompe et turbine (voir Figure II.6).

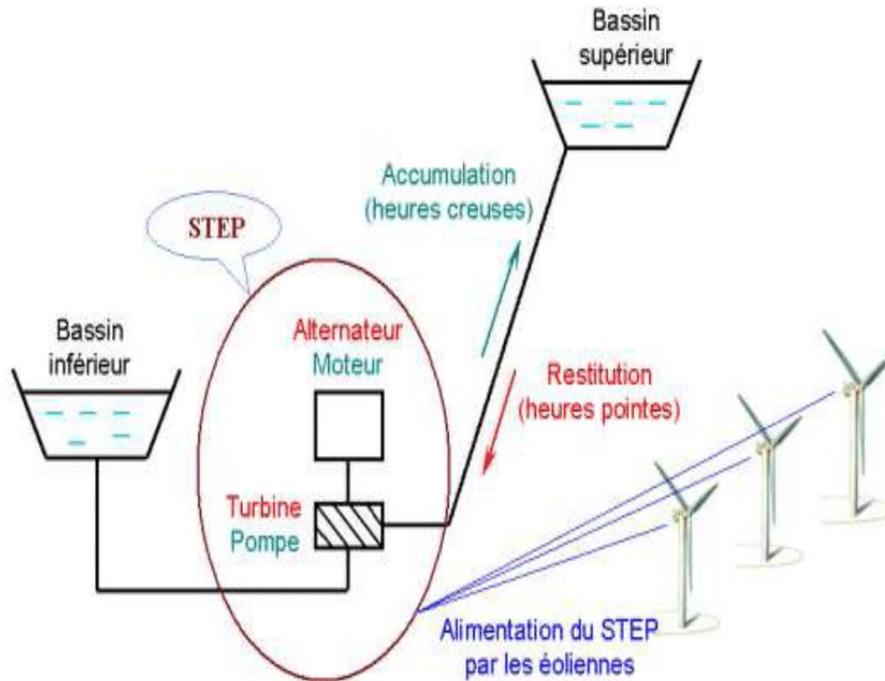


Figure II.6. Schéma d'une installation de stockage hydraulique gravitaire. [23]

II.5.1.2 Stockage d'énergie par air comprimé

Le principe du stockage d'énergie par air comprimé (CAES) repose sur l'élasticité de l'air : l'air est d'abord comprimé via un système de compresseurs, à très haute pression (100 à 300 bars) pour être stocké dans un réservoir (cavités souterraines par exemple). Pour récupérer cette énergie potentielle, l'air est détendu dans une turbine qui entraîne un alternateur. Comme l'air se réchauffe pendant sa compression, la chaleur à la sortie du compresseur peut être récupérée via des échangeurs et stockée afin d'être utilisée pour réchauffer la turbine. Deux types de stockage à air comprimé sont à considérer : le CAES et le stockage par air comprimé adiabatique avancé (AA-CAES).

II.5.1.2.1 CAES classique

Le système fonctionne pratiquement comme une centrale à gaz sauf que les phases de compression et de détente sont séparées et décalées dans le temps. Ce système met en œuvre une turbine à gaz ; la chaleur produite n'est pas stockée mais seulement récupérée et le stockage de l'air comprimé se fait dans des cavernes souterraines (Figure II.7). [25]

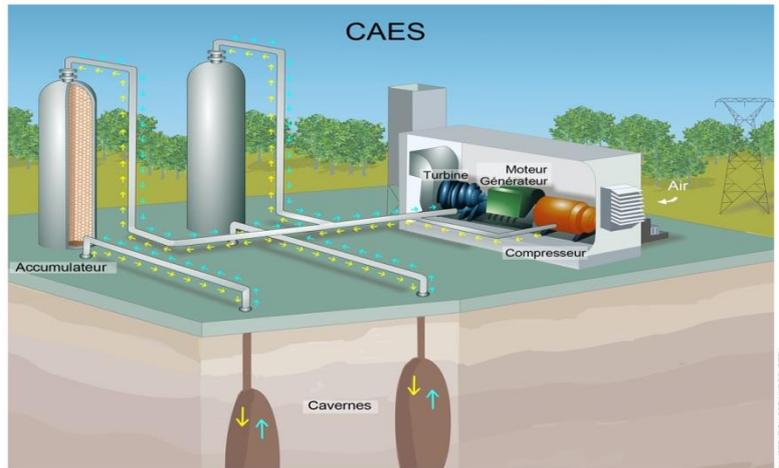


Figure II.7. Stockage par air comprimé – CAES [24].

II.5.1.2.2 Stockage adiabatique d'énergie par air comprimé (AA-CAES)

Cette technologie est une amélioration de la technologie CAES dont l'objectif est d'améliorer la réversibilité du système de stockage, cette fois sans apport de gaz naturel. En effet la chaleur due à la compression de l'air est stockée lors de la phase de charge. À la détente (phase de détente), l'air est réchauffé permettant d'utiliser une turbine à air pour restituer l'électricité avec un rendement correct et sans émissions directes. La majeure partie de l'énergie dissipée pendant la compression est ainsi préservée (voir Figure II.8). [25]

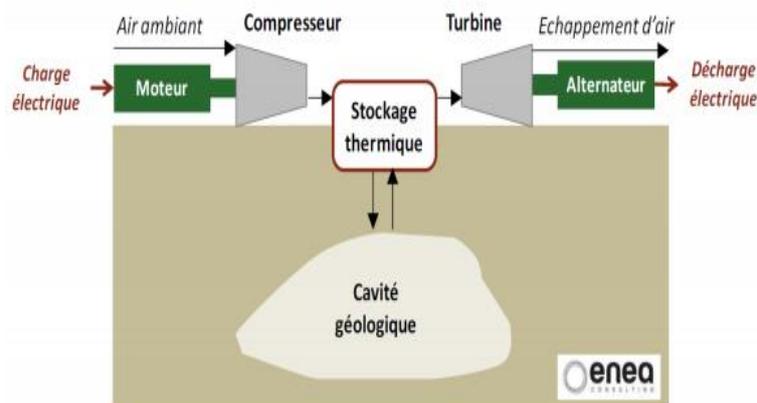


Figure II.8. Schéma de principe du « CAES isochore adiabatique souterrain » ou AA-CAES (d'après ENEA Consulting, 2012).

II.5.1.3 Volant d'inertie

Un volant d'inertie moderne est constitué d'une masse (anneau ou tube) en fibre de carbone entraînée par un moteur électrique.

L'apport d'énergie électrique permet de faire tourner la masse à des vitesses très élevées (entre 8000 et 16000 tour/min pour le modèle illustré sur la Figure II.9) en quelques minutes. Une fois lancée, la masse continue à tourner, même si plus aucun courant ne l'alimente.

L'énergie est alors stockée dans le volant d'inertie sous forme d'énergie cinétique, elle pourra ensuite être restituée instantanément en utilisant le moteur comme génératrice électrique, entraînant la baisse de la vitesse de rotation du volant d'inertie.

Le système est monté sur roulements magnétiques et confiné sous vide dans une enceinte de protection afin d'optimiser le rendement du dispositif (temps de rotation) et ainsi prolonger la durée de stockage. [26]

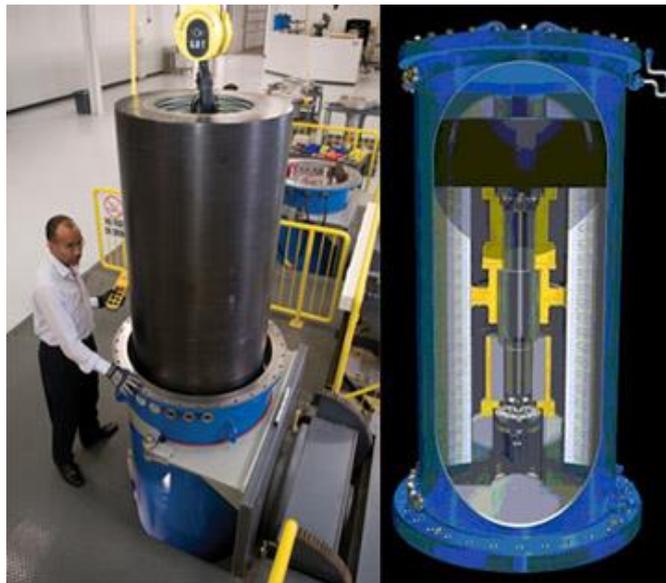


Figure II.9. Une unité de stockage inertiel de 25 kWh

Crédit : [Beacon Power](#).

II.5.2 Le stockage chimique

II.5.2.1 Batterie

Les batteries électrochimiques permettent de convertir l'énergie d'une réaction chimique en énergie électrique. Rechargeables (à la différence des piles), elles tirent parti de réactions électrochimiques : transfert de charge (électrons, ions) entre deux matériaux conducteurs, les électrodes (anode et cathode) via un milieu, l'électrolyte. [27]

De nombreuses technologies électrochimiques existent, présentant divers compromis performances/coût et une maturité variable, citons, entre autres, les technologies plomb-acide, nickel-cadmium (NiCd), nickel-métal-hydrures (NiMH), lithium-ion (nombreuses variantes) et sodium-soufre (haute température : 350°C).[28]

Batterie à flux circulants (Redox flow) : L'énergie est stockée suivant le même mode que pour les piles à combustibles. Elles sont constituées de deux demi-cellules, l'une pour l'oxydation, l'autre pour la réduction, séparées par une membrane échangeuse d'ions (Figure II.10). La puissance fournie est fonction de la taille de la membrane tandis que la quantité d'énergie dépend de la taille du réservoir d'électrolyte. Les batteries à flux ont l'avantage de nécessiter peu de maintenance et d'avoir une durée de vie importante. [29]

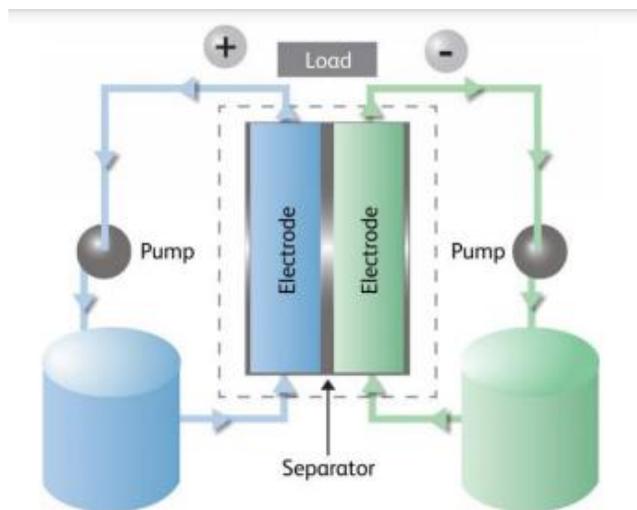


Figure II.10. Fonctionnement d'une batterie à flux (Source : www.extremetech.com).

Aujourd'hui, deux des trois plus grandes installations de batteries à flux pour le stockage à grande échelle sont japonaises. Les deux ont une puissance de 15 MW chacune et sont à Hokkaido. [30]

Ainsi que, les meilleurs accumulateurs actuels sont à base de lithium – ion, ils présentent une meilleure énergie spécifique, une meilleure durée de vie et est construit à partir des matériaux moins chers. [31]

II.5.2.2 Hydrogène

Il est possible de produire de l'hydrogène en utilisant de l'eau et de l'électricité. Ensuite il est possible de faire l'opération inverse et de récupérer de l'électricité en transformant l'hydrogène en eau. Cette transformation étant réversible, on peut donc utiliser l'hydrogène pour stocker de l'électricité.

Grâce à un électrolyseur, qui utilise beaucoup d'énergie, il est possible de transformer de l'eau en hydrogène (Figure II.11), selon l'équation suivante :

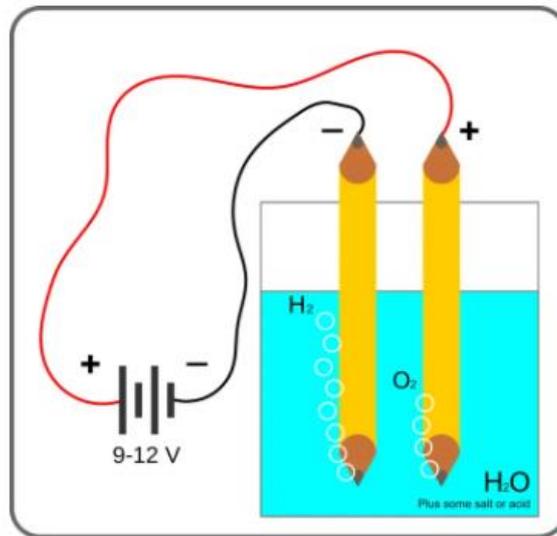


Figure II.11. L'électrolyse de l'eau.

Le stockage de l'hydrogène peut s'effectuer sous formes gazeuse (haute pression), ou liquide cryogénique, ou solide hydrure dans un réservoir.

En phase de déstockage l'hydrogène se transforme facilement en eau en absorbant une molécule d'oxygène et en produisant de l'électricité. Cette opération est réalisée dans une pile à combustible (voire Figure II.12). [32]

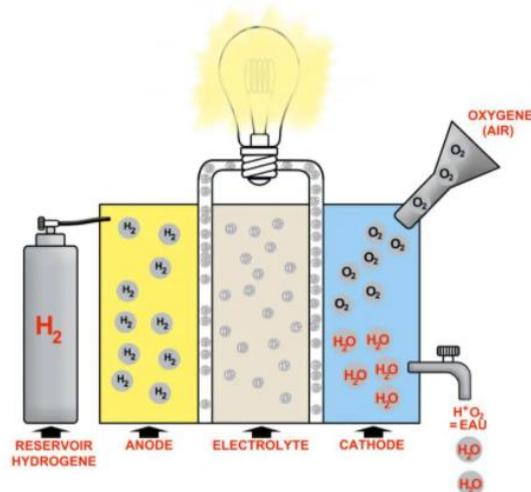


Figure II.12. Pile à combustible.

II .6 Le stockage thermique

Le stockage de l'énergie thermique ou de chaleur est réalisé en exploitant des phénomènes induits au sein du matériau de stockage. Le phénomène correspond à l'augmentation ou à la diminution de l'énergie interne d'une substance par chauffage ou refroidissement. L'énergie thermique est stockée dans les matériaux qui sont classés selon la méthode par laquelle ils stockent l'énergie. Les différentes méthodes de stockage de l'énergie thermique sont le stockage par chaleur sensible, latente ou thermochimique. [33]

II .6.1 Stockage par chaleur sensible

Parmi l'ensemble des techniques d'accumulation de chaleur, le stockage par chaleur sensible est la solution la plus ancienne pour stocker la chaleur. Il s'agit d'apporter de la chaleur à un matériau (solide, liquide, ou gazeux) pour faire évoluer sa température sans changement d'état. Le matériau est caractérisé par sa capacité calorifique, notée C_p et exprimée en $J/(kg.K)$, qui traduit sa capacité à emmagasiner de la chaleur (J) par unité de masse (kg) et de température (K). L'énergie stockée répond alors à la formule suivante :

$$E = m\Delta h = mC_p\Delta T \quad (1)$$

Avec m la masse du matériau soumis au changement de température, h l'enthalpie massique, C_p la capacité calorifique du matériau, et ΔT la différence de température de fonctionnement du stockage ($T_{\text{chaud}} - T_{\text{froid}}$). Le stockage sensible se retrouve régulièrement dans notre vie courante. Il est possible de stocker du froid, comme dans un réfrigérateur par exemple, ou du chaud, comme dans un ballon d'eau chaude sanitaire domestique. [34]

Ce type de stockage est efficace dans le cas de systèmes fonctionnant dans de larges intervalles de température, Dans le cadre des procédés solaires à concentration, les gammes de températures sont qualifiées de moyenne et haute température. Les températures, comprises entre 100 et 500°C, appartiennent au domaine des moyennes températures et au-delà on parle de haute température. [35]

Le stockage par chaleur sensible peut être réalisé par un média solide (systèmes de stockage passifs) ou liquide (systèmes de stockage passifs ou actifs). Avec un média solide, le stockage a lieu dans un lit compact qui requiert un fluide caloporteur pour l'échange de chaleur. Pour un média liquide (sels fondus, huiles naturelles et synthétiques, eau) le stockage se fait en général dans des thermoclines ou dans des réservoirs de stockage. Ce type de stockage est utilisé industriellement dans plusieurs centrales solaires thermodynamiques, Comme le montre la figure ci-dessous [36]:

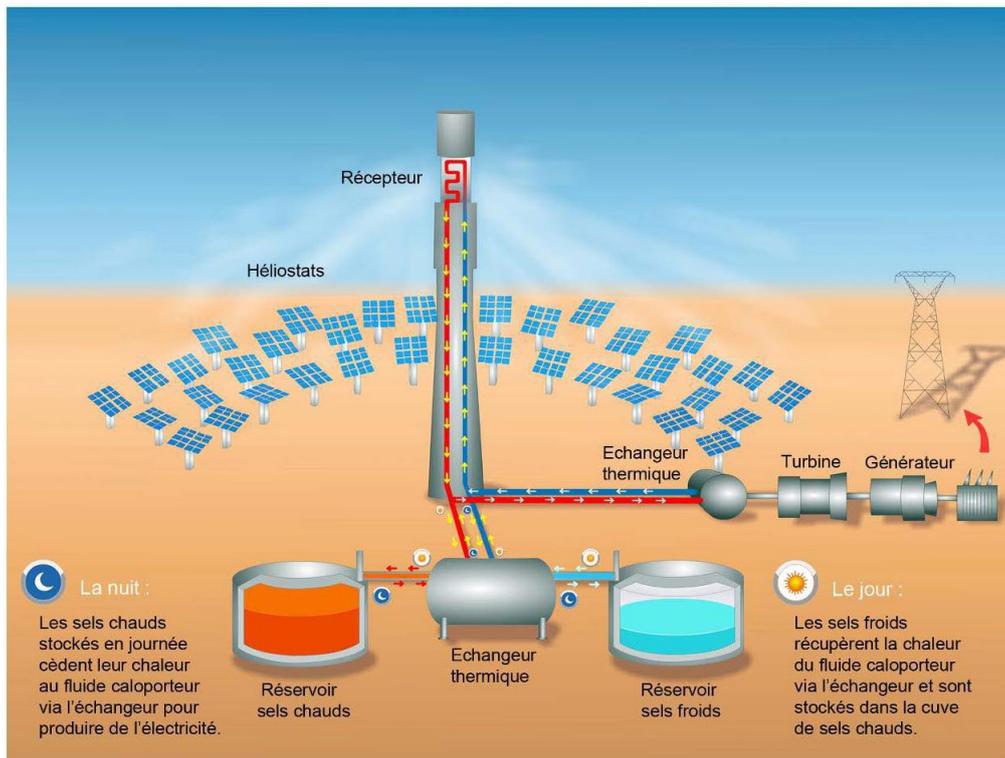


Figure II.13. Principe du stockage sensible dans une centrale thermodynamique

Dans le cas d'une centrale thermodynamique, il s'agit de stocker la chaleur emmagasinée au cours de la journée d'ensoleillement. Le fluide caloporteur (qui transporte la chaleur) circule jusqu'à un échangeur thermique relié à deux réservoirs de sels fondus. Les sels fondus froids passent à travers l'échangeur et emmagasinent à leur tour la chaleur du fluide, ils sont ensuite stockés dans un réservoir de sels chauds. Au coucher du soleil, le circuit s'inverse et les sels chauds circulent, à travers l'échangeur, vers le réservoir à sels froids. La chaleur est ainsi cédée au fluide caloporteur (autour de 500°) et permet d'alimenter une turbine pour produire de l'électricité. [37]

II .6.2 Stockage par chaleur latente

L'intérêt de la chaleur sensible est de pouvoir stocker directement le fluide caloporteur dans un grand volume. Pour stocker la chaleur sensible de façon indirecte, un fort gradient de température est nécessaire. Une solution pour gagner de la place et réduire l'intervalle de température du stockage est d'utiliser la chaleur latente [38]. Lors de la chauffe, le matériau à changement de phase (MCP) accumule d'abord une quantité d'énergie sensible lui permettant d'atteindre sa température de changement de phase du solide au liquide et vice versa, lors de laquelle la chaleur ne sert plus à augmenter la température du matériau mais sert à fournir

l'énergie nécessaire au changement de phase. A ce moment-là, le système est isotherme et stocke l'énergie thermique lors de la réaction. Cela signifie qu'en stockant la chaleur latente, on stocke également une partie de chaleur sensible. [39]

La quantité d'énergie latente stockée (Q) pendant le processus peut être évaluée par la relation :

$$Q = m \times L$$

Où m est la masse de matériau et L est la chaleur latente spécifique.

Les MCP peuvent être classifiés en deux catégories majeures : les matériaux organiques paraffines et non-paraffines et les matériaux inorganiques comme les métaux et les sels hydratés. [40]

Le stockage latent implique des difficultés techniques supplémentaires (encapsulation des matériaux, variation de volume et de pression...) qui, couplées au prix des matériaux, rendent cette solution moins accessible économiquement que le stockage sensible pour de petites installations comme le chauffage d'une habitation. [41]

Le principe du stockage latent est illustré dans la figure suivante :

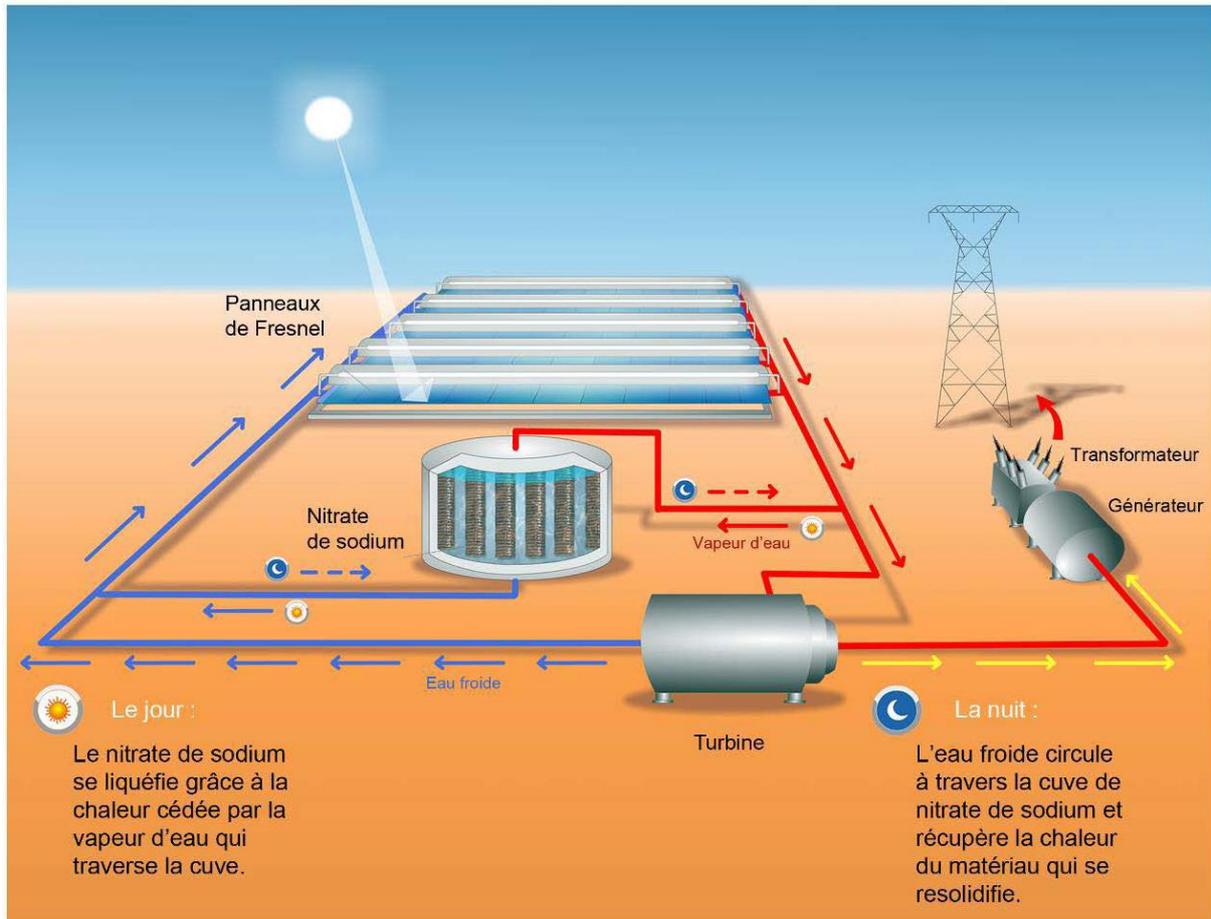


Figure II.14. Principe du stockage thermique par changement de phase.

Par exemple, la paraffine. Placée dans une cuve de stockage sous forme solide à température ambiante, elle est traversée par des tuyaux en cuivre dans lesquels circule de l'eau. Lorsque l'eau chaude arrive, la paraffine se réchauffe et passe de la forme solide à liquide. A l'inverse, la paraffine va céder sa chaleur en se solidifiant à nouveau si c'est de l'eau froide (autour de 15°C) qui circule dans le tube.

Une installation classique consiste à mettre le MCP dans un grand réservoir au milieu duquel passent des tubes pour transporter le fluide caloporteur. Le MCP et le fluide peuvent être différents suivant la production de chaleur qui lui est associée, et donc la température ou quantité de chaleur que l'on souhaite stocker. [42]

II.6.3 Stockage par voie thermochimique

Les systèmes de stockage par voie thermochimique sont basés sur une réaction thermochimique réversible du matériau de stockage avec un fluide. La réaction thermochimique consomme ou libère de la chaleur par dissociation ou combinaison de deux réactifs. Les réactions solide-gaz sont particulièrement adaptées pour pouvoir facilement séparer et stocker les réactifs, sans

perdes, pour de longues durées. Plus délicat à maîtriser, les systèmes de stockage thermochimique peuvent atteindre en théorie des densités de stockage intrinsèques supérieures à celles des systèmes par chaleur sensible ou latente. De plus, ils permettent d'ajuster la température de réaction en régulant la pression de gaz réactif. Suivant le choix du réactif, ces systèmes de stockage peuvent être utilisés dans de nombreuses applications de stockage ayant des gammes de température différentes. [43]

La figure ci-dessus explique le principe du stockage par voie thermochimique,

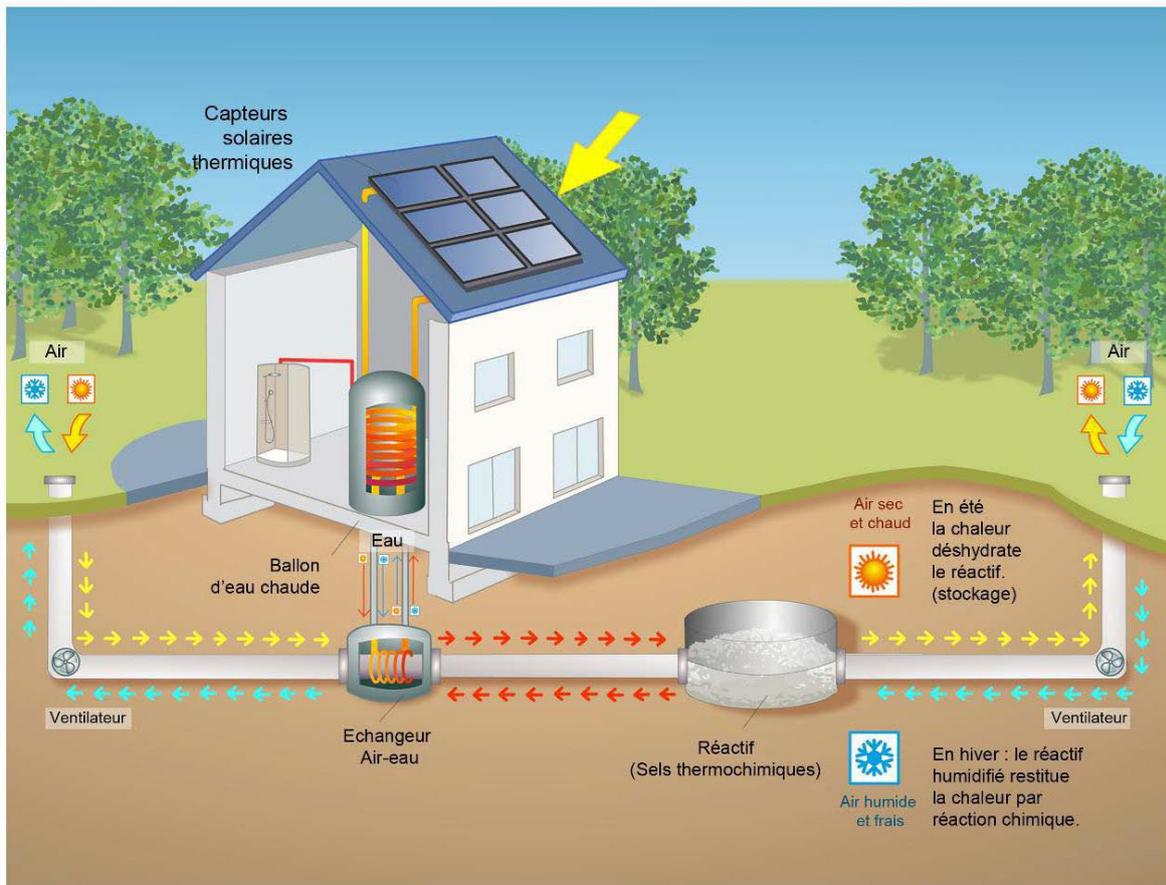


Figure II.15. Principe du stockage thermique par voie thermochimique.

Le principe repose sur l'utilisation d'un réactif (bromure de strontium pour des installations dans l'habitat), stocké dans une cuve. En période estivale, l'eau chaude apportée par le système solaire combiné va céder sa chaleur à l'air apporté de l'extérieur via l'échangeur eau-air. Cet air chaud va ensuite permettre d'assécher le réactif. Le réactif peut être conservé sec pendant plusieurs mois. En période hivernale, le circuit est inversé, l'air extérieur frais et humide circule à travers le réactif qui, en s'humidifiant à nouveau, va dégager de la chaleur grâce à une réaction

chimique exothermique. L'air ainsi chauffé (autour de 70°C) passe dans l'échangeur et cède sa chaleur à l'eau qui va circuler jusqu'au ballon et permettre une utilisation sanitaire.

II.7. Conclusion :

Dans ce chapitre on a montré que l'énergie solaire est une technologie très prometteuse pour le chauffage de nos habitats et aussi pour la production de l'électricité verte dans les années à venir. Les diverses méthodes permettant de tirer profit de la chaleur et de la lumière du soleil ont également été présentées (solaire passif, actif, thermodynamique, photovoltaïque et éclairage naturel), toutes ces applications visent à réduire les émissions de gaz à effet de serre et servent à de meilleures fonctions énergétiques, économiques et politiques.

Néanmoins, l'énergie solaire ne possède pas que des avantages, l'intermittence et les fluctuations imposent l'utilisation d'un moyen performant et efficace pour combler les besoins énergétiques par meilleur rendement possible, c'est le stockage d'énergie.

Il existe différentes technologies pour le stockage d'énergie, le stockage mécanique (hydraulique gravitaire, air comprimé et volant d'inertie), le stockage chimique (batteries, hydrogène), et le stockage thermique.

Le stockage thermique peut s'effectuer en trois formes principales, sous forme de chaleur sensible (eau, huile, béton... etc.), sous forme de chaleur latente (eau, paraffine, sels, ...etc.), ou par voie thermochimique (réactifs), le choix étant en fonction des besoins économiques et techniques ainsi que de la durée du stockage désirée.

Donc, vue l'importance d'énergie solaire, la place qu'elle peut occuper dans l'énergétique future, son stockage thermique économe et efficace, il est amplement justifié de concentrer les efforts de recherche pour améliorer le rendement du stockage des systèmes actuels et de chercher de nouvelles technologies de stockage.

-
- [18] www.mtaterre.fr
- [19] www.connaissancedesenergies.org (énergie thermique).
- [20] Observ'ER Le Baromètre 2019 des énergies renouvelables électriques en France
- [21] Anne LABOURET, Michel VILLOZ, énergie solaire photovoltaïque, 3ème édition DUNOD, Paris 2006 p10.
- [22] Pincemin,S, « Elaboration et caractérisations de matériaux composites à hautes performances énergétiques pour l'intégration d'un stockage thermique dans les centrales électro-solaires », Thèse de Doctorat de l'Université de Perpignan, (2007).
- [23] Haisheng Chen, Thang Ngoc Cong, Wei Yang, Chunqing Tan, Yongliang Li, Yulong Ding. Progress in electrical energy storage system: A critical review. Progress in Natural Science. July 2008.
- [24] www.cea.fr
- [25] Hélène HORSIN MOLINARO – Bernard MULTON, « Technologies des systèmes de stockage de l'énergie électrique », culture science de l'ingénieur école normale supérieur Paris-Saklay, 2019.
- [26] www.ecosources.info.com
- [27] ADEME, « Les systèmes de stockage d'énergie », Feuille de Route Stratégique, 2011.
- [28] Hélène HORSIN MOLINARO – Bernard MULTON, « Technologies des systèmes de stockage de l'énergie électrique », culture sciences de l'ingénieur, 2019.
- [29] Richard LAVERGNE et Ilarion PAVEL, « STOCKAGE STATIONNAIRE D'ELECTRICITE Synthèse et recommandations du thème de l'année 2018 de la Section ICM du CGE », Rapport, conseil général de l'économie de l'industrie, de l'énergie et de technologie, 2019.
- [30] Ibrahim AYED, « Principales technologies du stockage d'énergie au Japon », Rapport sur le stockage d'énergie au Japon, AMBASSADE DE FRANCE AU JAPON SERVICE POUR LA SCIENCE ET LA TECHNOLOGIE, 2016.
- [31] Richard LAVERGNE et Ilarion PAVEL, « STOCKAGE STATIONNAIRE D'ELECTRICITE Synthèse et recommandations du thème de l'année 2018 de la Section ICM du CGE », Rapport, conseil général de l'économie de l'industrie, de l'énergie et de technologie, 2019.
- [32] www.comwatt.com
- [33] E. Clarke, « Le stockage thermique aux États-Unis: bientôt une évidence », CSP Today, 18 décembre 09.
- [34] David Verdier-Gorcias, « Stockage thermique de protection à chaleur latente intégré à un récepteur solaire à air pressurisé », Thèse de Doctorat de l'Université de PERPIGNAN VIA DOMITIA, 2016.
- [35] Jean-Francois Hoffmann, « Stockage thermique pour centrale solaire thermodynamique à concentration mettant en œuvre des matériaux céramiques naturels ou recyclés », Thèse de Doctorat de l'Université de PERPIGNAN VIA DOMITIA, 2015.
- [36] M. PIERRE PARDO, « DEVELOPPEMENT D'UN PROCEDE DE STOCKAGE D'ENERGIE THERMIQUE HAUTE TEMPERATURE PAR VOIE THERMOCHIMIQUE. », Thèse de Doctorat de l'Université de TOULOUSE, 2013.
- [37] Www.sitelyceejdarc.org
- [38] David Verdier-Gorcias, « Stockage thermique de protection à chaleur latente intégré à un récepteur solaire à air pressurisé », Thèse de Doctorat de l'Université de PERPIGNAN VIA DOMITIA, 2016
- [39] Laurie Andre, « Stockage thermo-chimique de l'énergie solaire concentrée à partir de matériaux innovants par réactions solide-gaz réversibles », Thèse de Doctorat de l'Université de PERPIGNAN VIA DOMITIA, 2017.

[40] Larysa Mikolaivna Okhrimenko, « Stockage d'énergie thermique par un composite zéolite/MgSO₄-H₂O : étude thermocinétique du système MgSO₄ – H₂O et étude expérimentale des composites », THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON, 2018.

[41] Baptiste Gadellier : « Etude d'un système de stockage d'énergie solaire thermique répondant aux besoins en chauffage d'une habitation unifamiliale », Mémoire de fin d'étude Master Ingénieur Civil Architecte, Faculté des Sciences appliquées, 2018/2019.

[42] [www. sitelyceejdarc.org](http://www.sitelyceejdarc.org)

[43] Ali H. Abedin and Marc A. Rosen, A Critical Review of Thermochemical Energy Storage Systems, Faculty of Engineering and Applied Science, University of Ontario Institute of Technology, Oshawa, Ontario, L1H 7K4, Canada.

III.1 Introduction

Le but de l'analyse des transferts de chaleur est d'identifier quels sont les modes de transfert mis en jeu au cours de la transformation. On distingue trois modes de transfert thermique, la conduction ayant lieu dans les solides, la convection se rencontre spécialement dans les fluides et le rayonnement par les ondes électromagnétiques.

Pour déterminer quantitativement comment varie la température en chaque point du système au cours du temps, il faut définir le problème physique par des équations de dérivées partielles. En général, Ces équations n'admettent pas de solutions analytiques sauf dans des cas très simplifiés. C'est pourquoi un recours aux méthodes de résolution numériques s'avère nécessaire. Il existe différentes méthodes numériques telles que la méthode des différences finies, la méthode des volumes finis, et la méthode des éléments finis. Chaque méthode d'un problème continu comporte une phase de maillage et une phase de discrétisation des équations aux dérivées partielles suivi ensuite par la résolution numérique.

III.2 Rappels sur les éléments d'échanges thermiques

Les transferts d'énergie sont déterminés à partir de l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température. La valeur instantanée de la température en tout point de l'espace est un scalaire appelé champ de température. Nous distinguerons deux cas :

- Champ de température indépendant du temps : le régime est dit permanent ou stationnaire.
- Evolution du champ de température avec le temps : le régime est dit variable, instationnaire ou transitoire.

III.2.1 Gradient de température et flux de chaleur

En réunissant tout point de l'espace de la même température, on obtient une surface dite surface isotherme. La variation de température par unité de longueur est maximale le long de la normale à la surface isotherme. Cette variation est caractérisée par le gradient de température illustrée dans la Figure III.1.

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier où la densité de flux est proportionnelle au gradient de température.

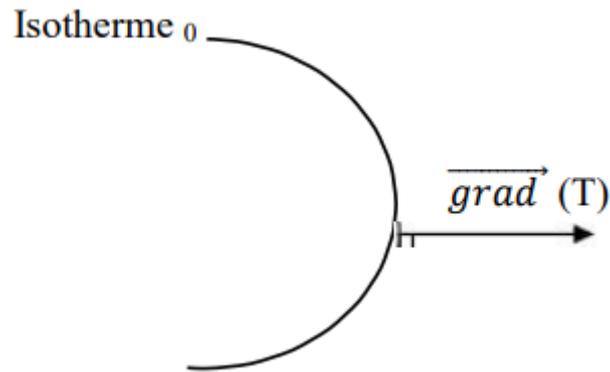


Figure III.1. Isotherme et gradient thermique.

Le gradient de température des hautes vers les basses températures provoque un écoulement de la chaleur. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur, et elle est proportionnelle au gradient de température. L'équation de flux de chaleur s'écrit comme suit :

$$\varphi = -\lambda \text{grad}(T) = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (1)$$

Où

$$\overrightarrow{\text{grad}}(T) = \vec{n} \frac{\partial T}{\partial n} \quad (2)$$

Avec :

\vec{n} : Vecteur unitaire de la normale.

$\frac{\partial T}{\partial n}$: Dérivée de la température le long de la normale.

III.2.2 Mode de transfert de chaleur

La thermique (ou thermocinétique) se propose de décrire quantitativement, dans l'espace et dans le temps, l'évolution des grandeurs caractéristiques du système, notamment la température, entre deux états d'équilibre (initial et final). La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température par conduction des hautes vers les basses températures. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur [44].

Les systèmes solaires mettent en jeu simultanément les trois modes de transfert thermique, la convection, le rayonnement et la conduction [45].

III.2.2.1 Transfert de chaleur par conduction

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts ; une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres. En absence d'hypothèses simplificatrices, la propagation de la chaleur est un phénomène tridimensionnel et la forme générale de l'équation de la conduction en régime instationnaire avec une puissance volumétrique interne q s'écrit :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + q \quad (3)$$

Dans le cas d'un flux est unidimensionnel ($\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0$) sans puissance volumétrique interne, l'équation de la conduction s'écrit :

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (4)$$

III.2.2.2 Transfert de chaleur par convection

Le terme « convection » est utilisé pour décrire le transfert d'énergie entre une surface solide et un fluide en mouvement par rapport à cette surface. Pour ce transfert, le transport d'énergie par conduction a toujours lieu, néanmoins le mode dominant est celui dû aux mouvements de particules fluides et elle est décrite par la loi de refroidissement de Newton :

$$\Phi = hS(T_s - T_\infty) \quad (5)$$

Suivant la nature du mécanisme qui provoque le mouvement du fluide on distingue :

III.2.2.2.1 La convection naturelle (ou libre)

La convection naturelle est provoquée par les forces massiques dans le fluide dues aux différences de température et donc de masse volumique du fluide. La circulation naturelle du fluide est caractérisée par le nombre de Grashof, il est défini comme le rapport entre la force de flottabilité et la force visqueuse agissant sur un fluide dans la couche limite. Son rôle dans la convection naturelle est identique à celui du nombre de Reynolds en convection forcée [46] [47], Il s'écrit

$$Gr_{L_{ref}} = \frac{g\beta \Delta T L_{ref}^3}{\nu^2} \quad (6)$$

III.2.2.2.2 La convection forcée

La convection forcée est créée quand le mouvement du fluide par une différence de pression (pompe, soufflerie) comme présenté dans la Figure III.2. Le coefficient de transfert de chaleur par convection h est fonction de la nature du fluide, de sa température, de sa vitesse et des caractéristiques géométriques de la surface de contact solide/fluide. [48]

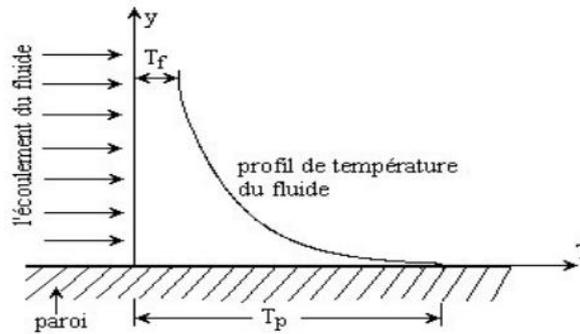


Figure III.2. Transfert thermique par convection entre la paroi chaude et le fluide froid.

La méthode d’analyse dimensionnelle est connue sous le nom de théorème de Vaschy– Buckingham ou théorème de groupements π , permettra de déterminer de manière simple le coefficient d’échange convectif pour la plupart des problèmes rencontrés dans la pratique.

Les nombres qui caractérisent les écoulements et les transferts d’énergie associés sont des grandeurs sans dimensions [49] :

Le nombre de Reynolds, Re , compare les forces d’inertie et les forces visqueuses, il caractérise le régime d’écoulement et s’écrit

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \tag{7}$$

Le nombre de Prandtl, Pr , compare la diffusion de masse devant la diffusion thermique et s’écrit

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda_f} \tag{8}$$

Le nombre de Nusselt, Nu , compare le transfert par convection devant le transfert par conduction dans le fluide et caractérise le type de transfert de chaleur, il s’écrit

$$Nu = \frac{hD}{\lambda_f} \tag{9}$$

Il est donné par les relations suivantes [50] :

- Pour un régime laminaire : $Nu = \frac{hD}{\lambda} = 4,36$
- Pour un écoulement turbulent dans un tube circulaire : $Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,3}$

Le nombre de Péclet, P_{eL} , compare le transfert par diffusion et par convection dans le fluide, il s'écrit

$$P_e = Re_L Pr_L = \frac{ul}{\alpha_f} \tag{10}$$

III.2.2.2.3 Régime d'écoulement

L'importance du flux de chaleur échangé par convection va dépendre du régime d'écoulement sous lequel se produisent les échanges : régime laminaire ou turbulent.

III.2.2.2.3.1 Régime laminaire

Un écoulement laminaire est un écoulement caractérisé par des lignes de courant bien identifiables parallèles aux parois. (Voir Figure III.3)

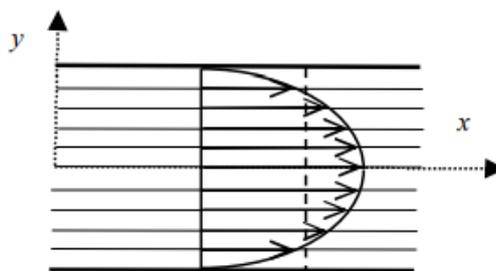


Figure III.3. Régime écoulement interne laminaire.

III.2.2.2.3.2 Régime turbulent

Un écoulement turbulent est caractérisé par des structures tourbillonnaires qui favorisent le brassage du fluide et donc les échanges de chaleur. (Voir Figure III.4)

Pour certaines configurations, comme par exemple l'écoulement le long d'une plaque plane, l'écoulement peut évoluer d'un régime laminaire à un régime turbulent en passant par une phase de transition.

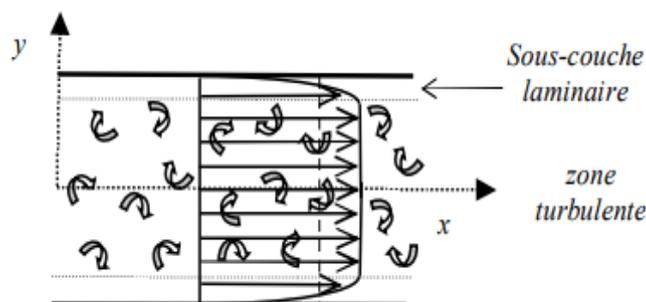


Figure III.4 Régime écoulement interne turbulent.

En fonction du critère de Reynolds on observe les processus de transfert suivants [51] :

- Convection en régime laminaire, quand $Re < 2300$;
- Ecoulement turbulent lisse, quand $2300 < Re < 3000$;
- Convection en régime turbulent, quand $Re > 3000$;

III.2.2.3 Transfert de chaleur par Rayonnement

Les atomes, les molécules et les électrons libres des corps peuvent céder une partie de leur énergie thermique par émission d'un rayonnement électromagnétique. Le rayonnement thermique, comme toutes les radiations électromagnétiques, n'exigent aucun support matériel pour se propager et représente la seule possibilité d'échanges de chaleur entre des corps distants placés dans le vide. Tous les corps qui ont une température supérieure au zéro absolu (0K) émettent un rayonnement électromagnétique.

III.3 Rappels sur les cycles thermodynamiques à vapeur

III.3.1 Première loi appliquée pour les systèmes ouverts

Dans le cas d'un système ouvert où il existe un transfert de la matière (pompes, compresseur, turbine, échangeur de chaleur...) en plus du transfert de chaleur et du travail, le fluide est en mouvement. Il faut donc tenir compte de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle du fluide. L'équation de l'énergie en termes de transfert de chaleur et de travail effectués par unité de masse du fluide s'écrit :

$$Q_{12} - W_{12} = h_2 - h_1 + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \quad (11)$$

III.3.2 Les composants d'une Turbine à Vapeur

Le cycle de Rankine c'est le cycle de base d'une turbine à vapeur. Le fluide utilisé est généralement l'eau. Dans ce cycle, il existe un circuit haute pression qui comprend le générateur de vapeur où se produit un changement de phase et un circuit basse pression où se produit la condensation, voir Figure III.5. Ces deux circuits sont connectés par une pompe d'alimentation et d'autre part la turbine récupère l'énergie de la vapeur pendant la phase de détente.

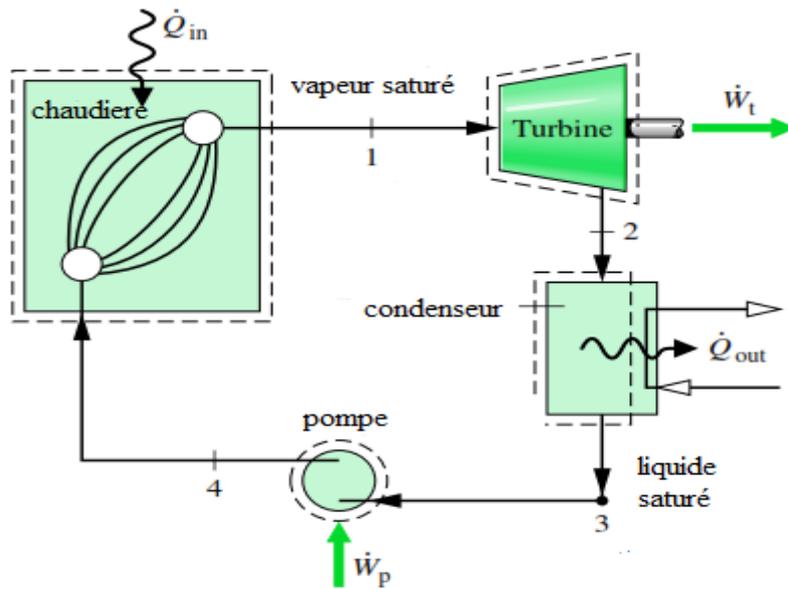


Figure III.5. Cycle d'une turbine à vapeur.

III.3.3 Calcul du cycle à vapeur

Le diagramme température-entropie d'une centrale à vapeur (Figure III.5) fonctionnant suivant le cycle de Rankine est illustré sur la figure III.6.

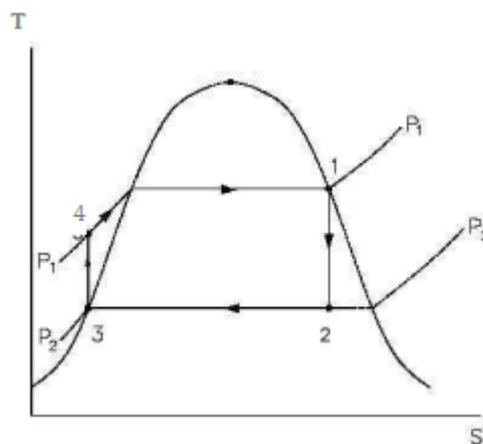


Figure III.6. Cycle de Rankine.

La turbine et la pompe sont des machines qui échangent un travail avec le milieu extérieur. Le transfert de chaleur de ces dispositifs est généralement négligeable puisque la surface d'échange de chaleur est très faible et ils sont généralement bien isolés. Pour la turbine l'équation de l'énergie est écrite comme suit :

$$W_{12} = h_1 - h_2 \tag{12}$$

Le générateur de vapeur et le condenseur ne comportent généralement pas d'échange de travail avec le milieu extérieur, et la variation de l'énergie cinétique et potentielle entre l'entrée et la sortie de ces dispositifs est négligeable. L'équation de l'énergie pour le générateur de vapeur est écrite comme suit :

$$Q_{41} = h_1 - h_4 \quad (13)$$

III.4 Les méthodes numériques en régime instationnaire

III.4.1 Résolution de système avec la méthode de différence finie

III.4.1.1 Formulation explicite

La température d'un nœud intérieur à l'instant $t+\Delta t$ est obtenue en fonction de la température du nœud considéré et de celles de ses voisins, toutes prises à l'instant t .

La formulation explicite de la dérivée temporelle s'écrit

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_i^t = \frac{T_i^{t+\Delta t} - T_i^t}{\Delta t} \quad (14)$$

La dérivée seconde en espace s'écrit

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)_i^t = \frac{T_{i+1}^t - 2T_i^t + T_{i-1}^t}{\Delta x^2} \quad (15)$$

La discrétisation de l'équation de la conduction instationnaire et unidimensionnelle (4) pour un nœud intérieur

$$T_i^{t+\Delta t} = F_0 T_{i-1}^t + (1 - 2F_0) T_i^t + F_0 T_{i+1}^t \quad (16)$$

Avec : $F_0 = \alpha \frac{\Delta t}{\Delta x^2}$

La méthode explicite a certains inconvénients, chaque type d'équation du nœud utilisé doit satisfaire à son critère de stabilité, ceci a pour conséquence que si on choisit un Δx petit pour obtenir une distribution de température précise, il faut choisir aussi un Δt très petit pour respecter le critère de stabilité. Ceci conduit à effectuer de nombreux calcul pour arriver au temps recherché. Dans les problématiques instationnaires impliquant de grandes valeurs de temps, on préfère la méthode implicite.

III.4.1.2 Formulation implicite

La méthode implicite au contraire n'impose pas de critère de stabilité et utilise les différences arrière, les températures de premier membre sont toutes évaluées à l'instant $t+\Delta t$.

La formulation implicite de la dérivée temporelle s'écrit

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_i^{t+\Delta t} = \frac{T_i^{t+\Delta t} - T_i^t}{\Delta t} \tag{17}$$

La dérivée seconde en espace s'écrit

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)_i^{t+\Delta t} = \frac{T_{i+1}^{t+\Delta t} - 2T_i^{t+\Delta t} + T_{i-1}^{t+\Delta t}}{\Delta x^2} \tag{18}$$

La discrétisation temporelle et spatiale établie en utilisant le bilan thermique pour chaque région du domaine de calcul de l'équation de la conduction instationnaire et unidimensionnelle (équation.4) donne :

III.4.1.2.1 Pour un nœud interne

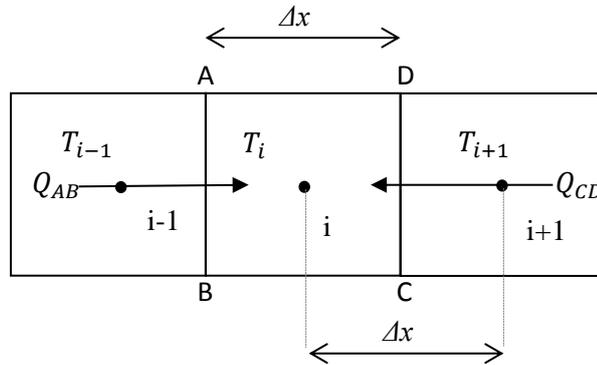


Figure III.7. Bilan thermique d'un nœud interne.

$$Q_{AB} \cdot S + Q_{CD} \cdot S = mC_p \frac{dT}{dt}$$

$$-\lambda \frac{T_i^{t+\Delta t} - T_{i+1}^{t+\Delta t}}{\Delta x} \cdot S + -\lambda \frac{T_i^{t+\Delta t} - T_{i-1}^{t+\Delta t}}{\Delta x} \cdot S = mC_p \frac{T_i^{t+\Delta t} - T_i^t}{\Delta t}$$

La température au nœud interne est calculée en fonction de l'équation

$$(1 + 2F_0)T_i^{t+\Delta t} - F_0(T_{i+1}^{t+\Delta t} + T_{i-1}^{t+\Delta t}) = T_i^t \tag{19}$$

III.4.1.2.2 Pour un nœud frontière

Un nœud frontière est en contact avec un fluide qui impose sa température

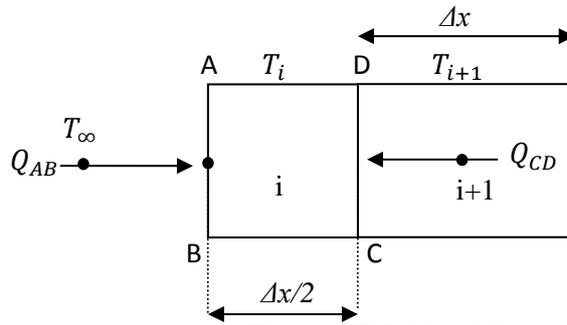


Figure III.8. Nœud frontière.

$$Q_{AB} \cdot S + Q_{CD} \cdot S = m C_p \frac{dT}{dt}$$

$$-\lambda A \frac{T_i^{t+\Delta t} - T_{i+1}^{t+\Delta t}}{\Delta x} - hA(T_i^{t+\Delta t} - T_{\infty}^{t+\Delta t}) = m C_p \frac{T_i^{t+\Delta t} - T_i^t}{\Delta t}$$

$$-T_i^{t+\Delta t} + T_{i+1}^{t+\Delta t} - \frac{h\Delta x}{\lambda} (T_i^{t+\Delta t} - T_{\infty}^{t+\Delta t}) = \frac{\rho C_p \Delta x^2}{\lambda \Delta t} \frac{1}{2} (T_i^{t+\Delta t} - T_i^t)$$

La température au nœud frontière est calculée en fonction de l'équation

$$[1 + 2F_0(1 + Bi)T_i^{t+\Delta t}] - 2F_0T_{i+1}^{t+\Delta t} = 2F_0BiT_{\infty}^{t+\Delta t} + T_i^t \tag{20}$$

Avec Bi le nombre de Biot [52] :

$$Bi = h \frac{dx}{\lambda}$$

III.4.1.2.3 Pour un nœud symétrique

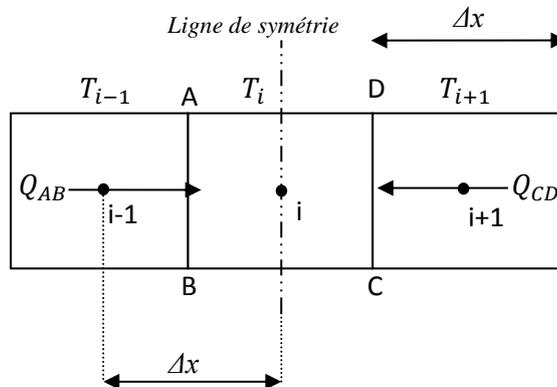


Figure III.9. Nœud symétrique.

$$Q_{AB} \cdot S + Q_{CD} \cdot S = mC_p \frac{dT}{dt}$$

$$-\lambda \frac{T_i^{t+\Delta t} - T_{i+1}^{t+\Delta t}}{\Delta x} \cdot S + -\lambda \frac{T_i^{t+\Delta t} - T_{i-1}^{t+\Delta t}}{\Delta x} \cdot S = mC_p \frac{T_i^{t+\Delta t} - T_i^t}{\Delta t}$$

Pour la condition de symétrie la température du nœud $T_{i-1} = T_{i+1}$ donc

$$(1 + 2F_0)T_i^{t+\Delta t} - F_0(T_{i-1}^{t+\Delta t} + T_{i+1}^{t+\Delta t}) = T_i^t$$

Finalement la température au nœud symétrique est calculée en fonction de l'équation

$$(1 + 2F_0)T_i^{t+\Delta t} - 2F_0(T_{i-1}^{t+\Delta t}) = T_i^t \tag{21}$$

Pour mettre les équations précédentes sous forme matricielle, ou les inconnues sont les températures à l'instant $t+\Delta t$, tandis que les températures à l'instant t sont connues, il faut réarranger les équations sous forme respective. Nous avons affaire à un système de n équations et n inconnues, voir l'équation.22.

$$\begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_1^{t+\Delta t} \\ \vdots \\ T_n^{t+\Delta t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} \tag{22}$$

Il existe deux méthodes pour résoudre ce système, soit par les méthodes de traitement directes ou indirectes d'un système d'équations algébriques simultanées. Nous avons choisi la méthode d'élimination de Gausse pour résoudre ce system d'équations. La distribution de température obtenue dans chaque calcul représente le champ de température initial de l'itération suivante.

III.5. Programme de calcul de la quantité de chaleur stockée

De nombreux comportements physiques sont régis par des équations aux dérivées partielles. Ces équations étant insolubles analytiquement, la méthode de calcul par différence finie permet de les résoudre numériquement. Aujourd'hui une large gamme d'outils numériques est disponible. Elle repose sur la mise en œuvre des modèles théoriques, citant : Ansys CFX, Autodesk, Inventor, Abaqus, Fortran...etc

La simulation numérique est devenue un élément indispensable dans le domaine technologique et de l'ingénierie. Elle permet de comprendre et de suivre le fonctionnement des modèles physiques complexes, et d'étudier les propriétés du système modélisé ainsi qu'à en prédire son évolution.

III.5.1 Simulation numérique avec le Fortran 90 et l'algorithme de calcul

Fortran est un langage de programmation pensé dans les années 50 pour le calcul scientifique. Il continue à être largement utilisé dans le domaine de la recherche scientifique pour le calcul intensif. Contrairement à des langages plus évolués, le déroulement des opérations individuelles en machine reste relativement contrôlable dans le langage, ce qui permet d'écrire des codes relativement efficaces en termes de calcul. Le Fortran a beaucoup évolué ces dernières années avec l'apparition de la norme Fortran 90 (puis 95, 2003, 2008) qui a profondément 'modernisé' par rapport aux anciennes normes Fortran 66 et 77. Nous avons utilisé le **Fortran 90** comme outil d'aide dans la réalisation du programme de calcul et de l'estimation de la quantité de chaleur sensible stockée récupéré d'un milieu solide.

Nous avons suivi les étapes suivantes dans l'élaboration de l'algorithme :

1. Introduction des données, telle que

La longueur, le nombre de nœuds, le pas du temps, la température initiale, la température du fluide, la masse volumique, la chaleur massique, le nombre d'itérations, le coefficient de convection, la conductivité thermique du solide, la vitesse du fluide, le diamètre, la viscosité dynamique, le nombre de Prandtl, les conditions de travail de la turbine (puissance, enthalpie dans des endroits clés).

Calcul des valeurs constantes

Pas de l'espace Δx avec l'équation : $\Delta x = \frac{l}{n_i - 1}$

La diffusivité thermique α par l'équation : $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}$

Le nombre de Reynolds R_e par l'équation : $R_e = \frac{\rho u D}{\mu}$

Nombre de Nusselt par la condition

$$\text{Si } R_e \leq 2300 \text{ donc : } Nu = \frac{hD}{\lambda} = 4,36$$

$$\text{Sinon : } Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,3}$$

Le coefficient de convection h : $h = \frac{\lambda_f Nu}{D}$

Le nombre de Fourier F_0 avec l'équation : $F_0 = \alpha \frac{\Delta t}{\Delta x^2}$

Le nombre de Biote Bi avec l'équation : $Bi = h \frac{dx}{\lambda}$

2. Remplissage de vecteur de température initiale, la matrice a et du vecteur b

Remplissage du vecteur b de température initial par la boucle

De $i=1$ jusqu'au nombre de nœuds n $T(i)$ égale valeur de température initiale.

Remplissage de la matrice a par les boucles

De $i=3$ jusqu'à n et de $j=1$ jusqu'à $i-2$: $a(i, j) = 0$ et $a(j, i) = 0$

De $i=1$ jusqu'à n :

$$a(i, i) = 2F_0 + 1;$$

$$a(i, i+1) = -F_0 ;$$

$$a(i+1, i) = -F_0 ;$$

$$a(1, 1) = 1 + 2F_0(1 + Bi)$$

$$a(1, 2) = -2F_0$$

$$a(n, n-1) = -2F_0$$

Remplissage du vecteur b

$$b(1) = T(1) + 2BiF_0T_\infty$$

$$\text{De } i=1 \text{ jusqu'à } n: b(i) = T_i^t$$

3. Solution par la méthode d'élimination Gauss

Ecriture de la matrice a sous forme triangulaire par

La boucle de $k=1$ jusqu'à $n-1$

De $i=k+1$ jusqu'à n

$$b(i) = b(i) - a(i, k) \frac{b(k)}{a(k, k)}$$

$$\text{De } j=k+1 \text{ jusqu'à } n: a(i, j) = a(i, j) - a(i, k) \frac{a(k, j)}{a(k, k)}$$

De $i=k+1$ jusqu'à n

De $j=1$ jusqu'à k

$$a(i, j) = 0$$

Calcul des températures par

$$\text{L'équation } x(n) = \frac{b(n)}{a(n, n)}$$

La boucle de $i=n-1$ jusqu'à 1 en décrémentant le i de 1 :

$$\text{somme} = \text{somme} + a(i, j) * x(j)$$

$$X(i) = \frac{b(i) - \text{somme}}{a(i, i)}$$

4. Calcul de la quantité de chaleur stockée par l'équation :

$$Q(k) = Q(k) + h(T_{\infty} - T(1)) * \Delta t$$

5. Affichage des résultats de stockage dans un fichier.**6. Calcul de la quantité de chaleur déstockée suivant la même procédure citée ci-dessus à partir de la troisième étape avec les nouvelles conditions :**

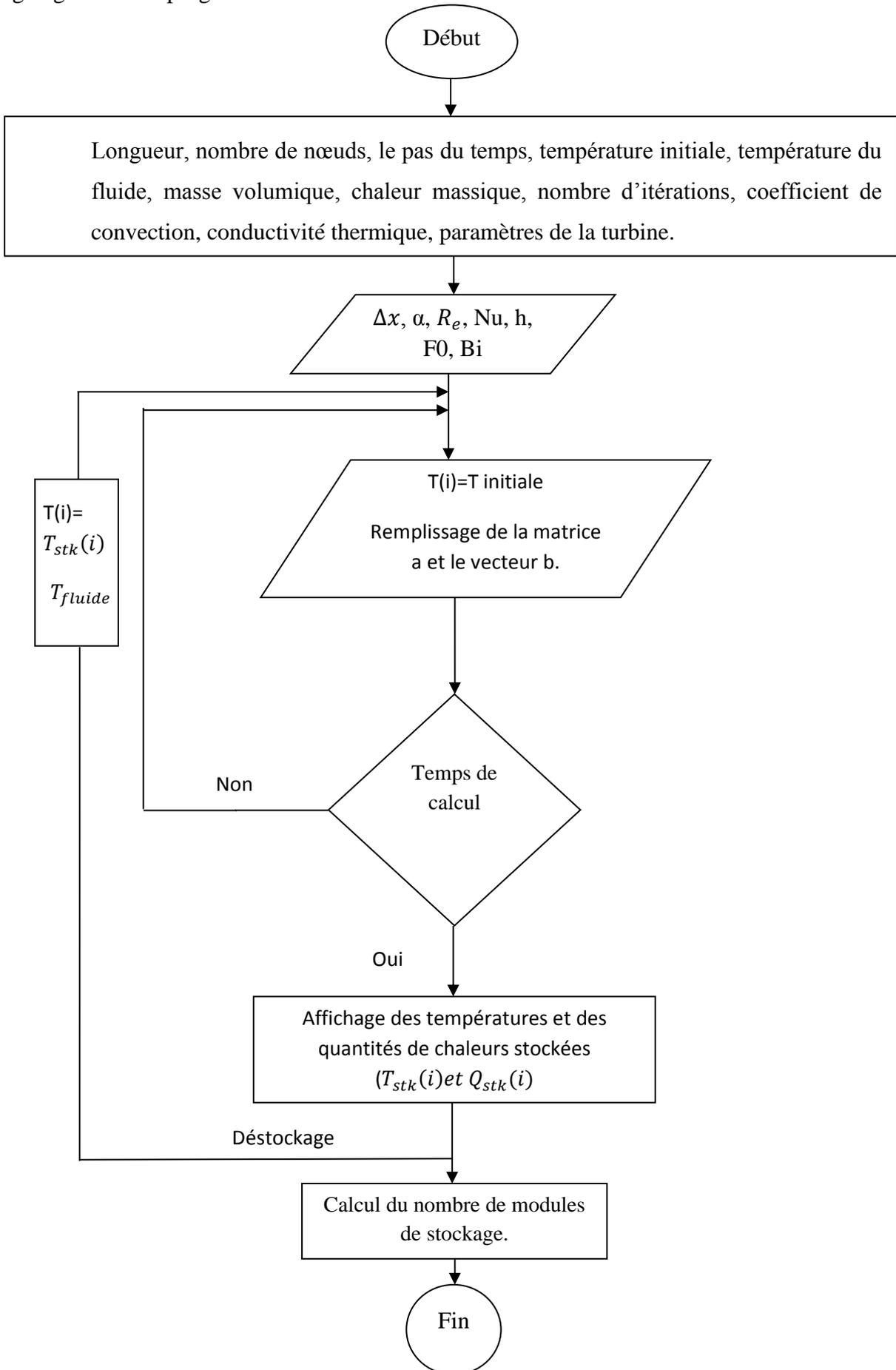
- a. La température du fluide caloporteur est 34°C.
- b. Le vecteur de température initial devient la distribution de température de la dernière itération pendant la période le stockage.

7. Affichage des résultats de déstockage dans un fichier.**8. Estimation du nombre de modules de stockage**

$$N_{mod\ stk} = \frac{\dot{E}_{GV}}{\dot{E}_{mod\ stk} \cdot \eta_{Reg}}$$

L'interprétation des résultats à l'aide du logiciel Origin

L'organigramme du programme de calcul



III.6 Modélisation du système étudié

Dans une installation solaire thermodynamique de production d'électricité, des capteurs solaires à concentration de rayonnement solaire sont utilisés pour la production de la vapeur qui alimente la turbine à vapeur. Simultanément, un circuit secondaire est installé pour le transport du fluide caloporteur à haute température vers le module de stockage de l'énergie thermique sensible dans un milieu solide, voir figure III.10, afin d'utiliser cette énergie la nuit ou lorsque les conditions météorologiques ne permettent pas de capter l'énergie solaire.

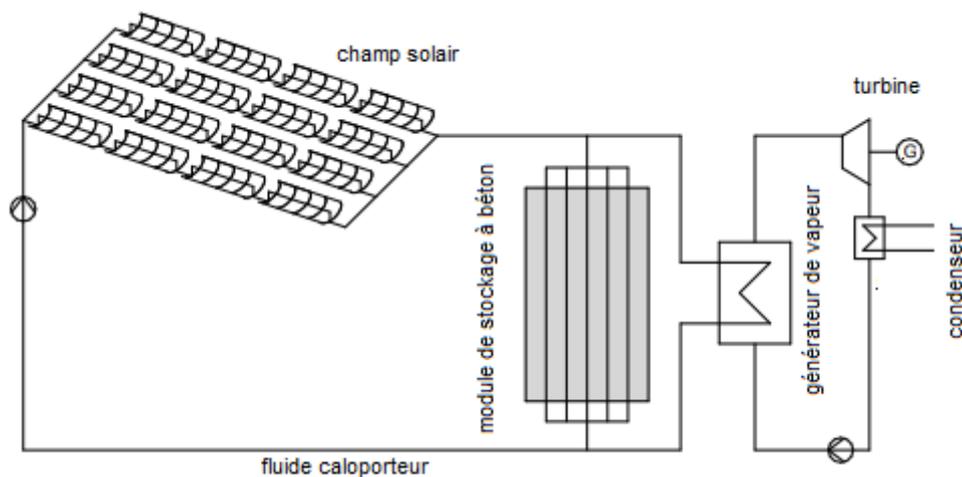


Figure III.10. Schéma d'installation d'une centrale électrique parabolique, avec un système de stockage dans le béton. [53]

Notre étude vise à étudier le module de stockage de la chaleur sensible à haute température et à comparer le comportement dynamique du fluide caloporteur ainsi que le comportement thermique des différents matériaux du milieu solide utilisé tel que le béton, la roche et le sable.

III.6.1 Description de la configuration étudiée

Le module de stockage de l'énergie thermique sensible utilise un fluide caloporteur qui échange de la chaleur lorsque le fluide s'écoule à travers des tubes dans une configuration similaire à un échangeur de chaleur tubulaire intégré dans le matériau de stockage solide. La figure III.11 montre un exemple réel d'un module de stockage d'énergie thermique, étude de Yongfang J. et all.



Figure III.11. Module de stockage de béton et banque de tubes. [54]

Dans notre étude, nous avons considéré un module de 25 tubes. Le fluide caloporteur circule dans les tubes où chaque trois tubes forment les sommets d'un triangle équilatéral de longueur $2L$ égale à 160cm. Le diamètre de chaque tube est 2cm et le module de stockage est d'une largeur et hauteur de 640cm chacune, et d'une longueur de 10m, voir figure III.12.

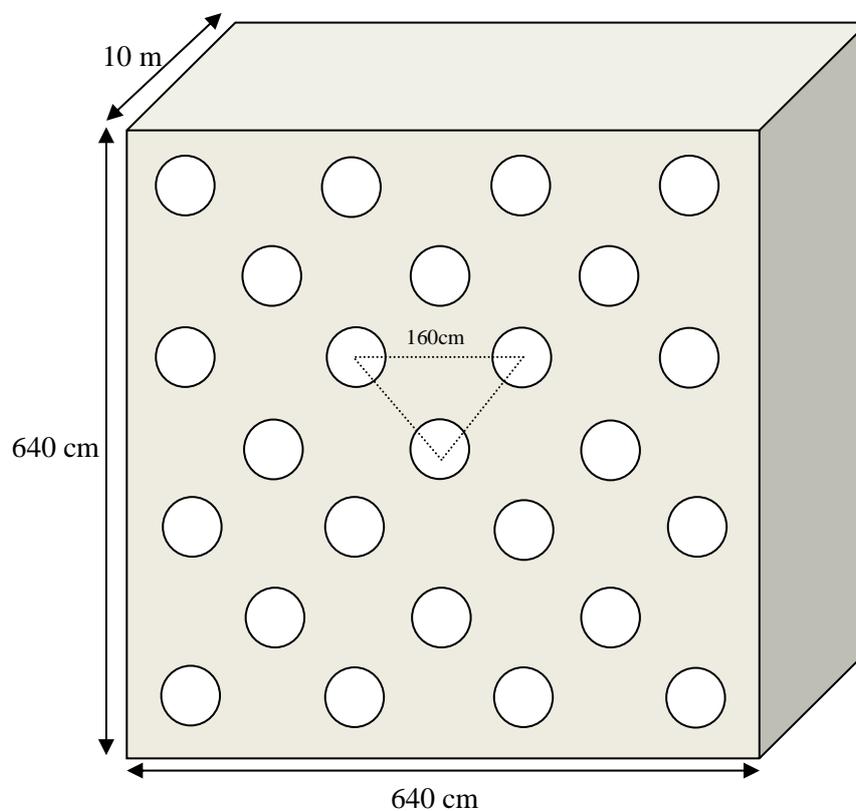


Figure III.12. Dimensionnement du module de stockage.

La distribution des tubes présentés permet à un stockage maximum de l'énergie thermique et qui crée des zones symétriques la raison qui conduit à simplifier le domaine de calcul en un domaine linéaire de longueur L pour résoudre l'équation de la conduction unidimensionnelle et en régime instationnaire, voir la figure III.13.

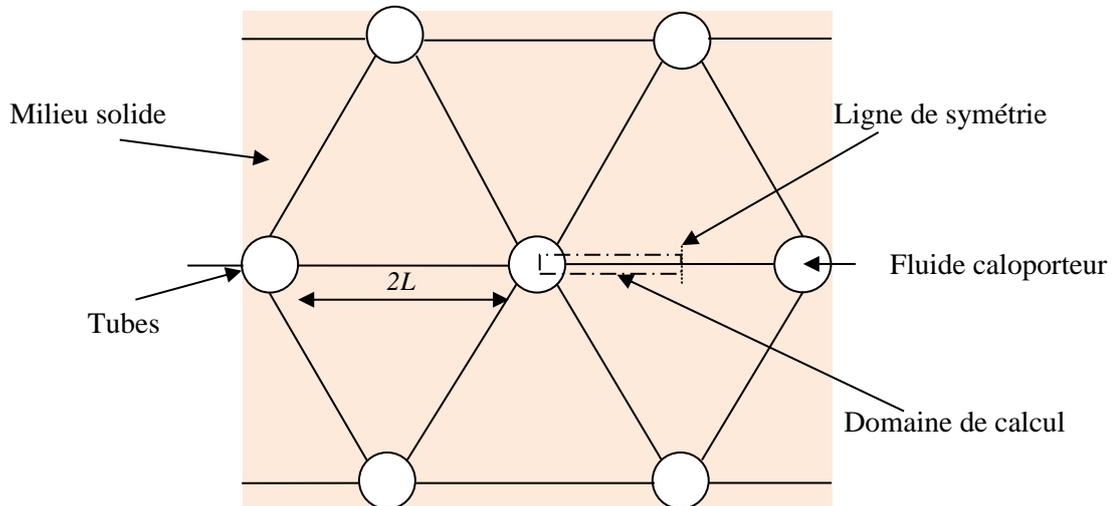


Figure III.13. Section transversale du module de stockage et le domaine de calcul.

III.6.1.1 Domaine de calcul

Le domaine de calcul représente une ligne de milieu solide de stockage de l'énergie thermique de longueur L . Le domaine de calcul est divisé uniformément par des distances Δx qui représente le pas de l'espace comme illustré sur la figure III.14.

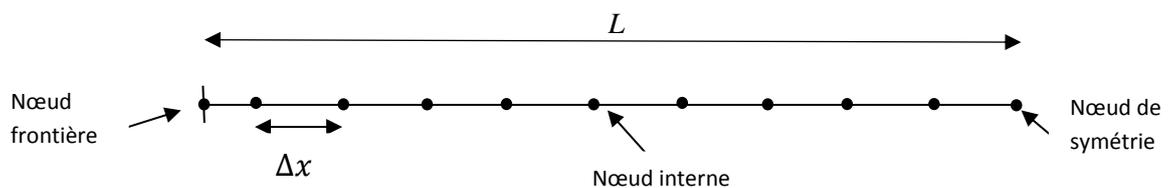


Figure III.14. L'emplacement des nœuds dans le domaine de calcul.

Les conditions aux limites imposées sont les suivantes :

- Pour le nœud de symétrie la condition de symétrie
- Pour le nœud frontière une température du fluide caloporteur de 400°C qui représente la valeur moyenne de température générée par un capteur de concentration de rayonnement solaire.

Les conditions initiales : la distribution initiale de température dans le milieu de stockage est 20°C.

Les propriétés thermo-physiques du solide et du fluide caloporteur sont prises constantes et elles sont illustrées sur le tableau III.1 et III.2

Les propriétés des matériaux utilisés comme milieu de stockage sont données dans le tableau suivant [55][56]:

Tableau III.1 : propriétés de quelques matériaux de stockage sensible.

Matériau	Chaleur spécifique ($KJ/Kg.K$)	Masse volumique (Kg/m^3)	Conductivité thermique ($W/m.K$)
Béton	880	2200	1,5
Sable	920	1555	1
Roches argileuses limoneuses	879	2560	2,2

Nous avons utilisé une huile comme fluide de caloporteur de propriétés suivantes [57] :

Tableau III.2 : propriétés du fluide caloporteur

Fluide caloporteur	Chaleur spécifique (C_p), ($KJ/Kg.K$)	Masse volumique(ρ), (Kg/m^3)	Conductivité thermique(K), ($W/m.K$)	Viscosité dynamique ($MPa.s$)	Viscosité cinématique (mm^2/s)
Huile	2,628	694	0,0756	0,146	0,211

L'équation de la conduction unidimensionnelle et en régime instationnaire est résolu par la méthode des différences finis en utilisant un schéma implicite sous logiciel de calcul Fortran.

III.7 Estimation du nombre de modules de stockage

Lors de l'exécution du programme, la chaleur déstockée du module de stockage est calculée et accumulée à chaque pas de temps par l'équation suivante

$$Q_{des} = Q_{des} + h \cdot \Delta T \cdot \Delta t \quad (22)$$

La puissance d'un module de stockage est donnée par l'équation

$$\dot{E}_{mod\ stk} = Q_{destk} * A * N_{tube} * \dot{m}_f \quad (23)$$

Avec

N_{tube} : Nombre de tubes.

A : la surface du module de stockage, $A = \pi D_{tube} L_{tube}$

\dot{m}_f : le débit du fluide caloporteur, $\dot{m}_f = \rho \cdot \frac{\pi \cdot D_{tube}^2}{4} \cdot u$

La puissance de la turbine est calculée par l'équation

$$\dot{E}_T = W_{turbine} * \dot{m}_v \quad (24)$$

Alors le débit de la vapeur circulant dans le générateur de vapeur est

$$\dot{m}_v = \frac{\dot{E}_T}{W_{turbine}}$$

L'efficacité du générateur de vapeur exprimée en fonction de la puissance thermique absorbée par la vapeur par rapport à la puissance thermique maximale reçue par les modules de stockage en absence de pertes thermiques est donnée par l'équation

$$\eta_{Reg} = \frac{\dot{E}_{GV}}{\dot{E}_{mod\ stk} * N_{mod\ stk}} = \frac{\dot{m}_v \cdot Q_{GV}}{\dot{E}_{mod\ stk} * N_{mod\ stk}} \quad (25)$$

Donc le nombre de modules de stockage est

$$N_{mod\ stk} = \frac{\dot{E}_{GV}}{\dot{E}_{mod\ stk} \cdot \eta_{Reg}} = \frac{\dot{m}_v \cdot Q_{GV}}{\dot{E}_{mod\ stk} \cdot \eta_{Reg}} \quad (26)$$

III.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur les différents modes de transfert de chaleur (conduction, convection et rayonnement) en se basant sur la conduction et la convection, voire leur importance dans notre cas d'étude.

Nous avons donné un aperçu sur la méthode de différence finie et présenté le programme de calcul élaboré et le cas étudiant. Les résultats obtenus sont présentés dans le quatrième chapitre.

-
- [44] Maifi Lyes, « Etude et modélisation d'un panneau solaire thermique photovoltaïque », diplôme de Doctorat en science de physique UNIVERSITE FRERES MENTOURI CONSTANTINE 1, 2018.
- [45] AghilasBrahimi, « Etude de performances d'un capteur solaire plan à eau », Mémoire de Master 2 Génie des procédés UNIVERSITE DE LORRAINE. 2016
- [46] Sophie Mergui, « TRANSFERTS THERMIQUES », LICENCE DE MECANIQUE 2 EME ANNEE MODULE 2A101, UPMC SORBONNE université.
- [47] www.thermal-engineering.org
- [48] Sophie Mergui, « TRANSFERTS THERMIQUES », LICENCE DE MECANIQUE 2 EME ANNEE MODULE 2A101, UPMC SORBONNE université.
- [49] Jean-Luc Battaglia, « INTRODUCTION AUX TRANSFERTS THERMIQUES Cours et exercices corrigés », Dunod, Paris, 2010.
- [50] Yunus A. Çengelet AFSHIN J. GHAJAR, «HEAT AND MASS TRANSFER: FUNDAMENTALS & APPLICATIONS», 2008.
- [51] Yunus A. Çengel et AFSHIN J. GHAJAR, «HEAT AND MASS TRANSFER: FUNDAMENTALS & APPLICATIONS», 2008.
- [52] Sophie Mergui, « TRANSFERTS THERMIQUES », LICENCE DE MECANIQUE 2 EME ANNEE MODULE 2A101, UPMC SORBONNE université.
- [53] Thomas Bauer, Wolf-Dieter Steinmann, Doerte Laing, Rainer Tamme, «Thermal energy storage materials and systems », 2012.
- [54] YongfangJian, FengwuBai, Quentin Falcoz, Chao Xu, Yan Wang, ZhifengWang, « Applied Thermal Engineering», 2014.
- [55] EricKendaNitedem, « Stockage thermique à base d'éco-matériaux locaux pour centrale solaire à concentration : cas du pilote CSP4AFRICA », thèse de doctorat UNIVERSITE DE PERPIGNAN VIA DOMITIA, 2017.
- [56] www.intechopen.com
- [57] EASTMAN, « THERMINOL VP-1 heat transfer fluid » 12° to 400°C.

IV.1 Validation de calcul

Pour montrer l'influence du pas d'espace et de temps sur les résultats obtenus, la distribution de température est vérifiée pour plusieurs valeurs de pas d'espace et de temps.

IV.1.1 Le choix du pas d'espace

La figure IV.1 représente la distribution de la température dans le solide pour plusieurs valeurs de pas d'espace Δx .

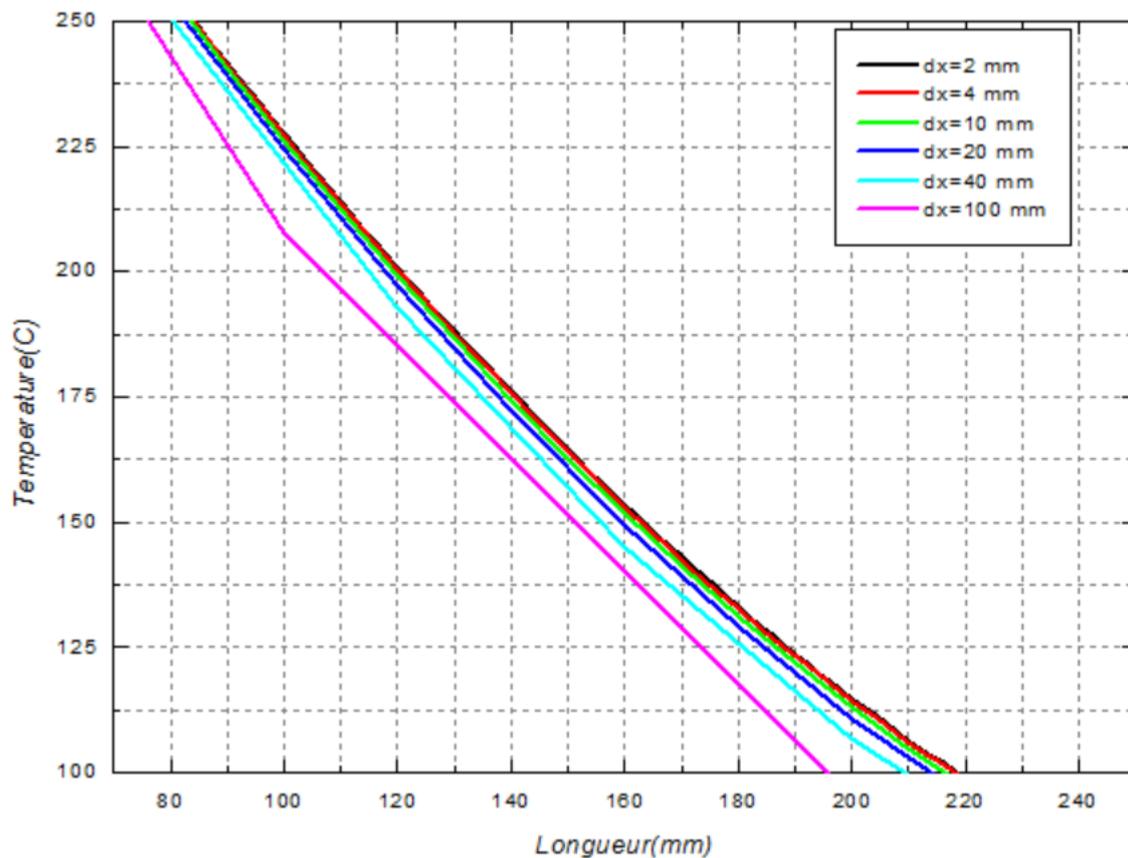


Figure IV.1. Distribution de la température pour différentes valeurs de pas de Δx .

La figure IV.1 montre que la distribution de la température dans le solide varie proportionnellement au pas d'espace. Elle diminue avec la diminution de la valeur de Δx et elle devient non significative pour les valeurs inférieures à 20mm. On constate qu'il n'y a pas de variation de la distribution de température pour un pas d'espace inférieur ou égal à 4 mm et nous avons opté pour cette valeur dans notre calcul.

IV.1.2. Le choix du pas de temps

La figure IV.2 représente la distribution de température en fonction de la longueur pour plusieurs valeurs de pas de temps.

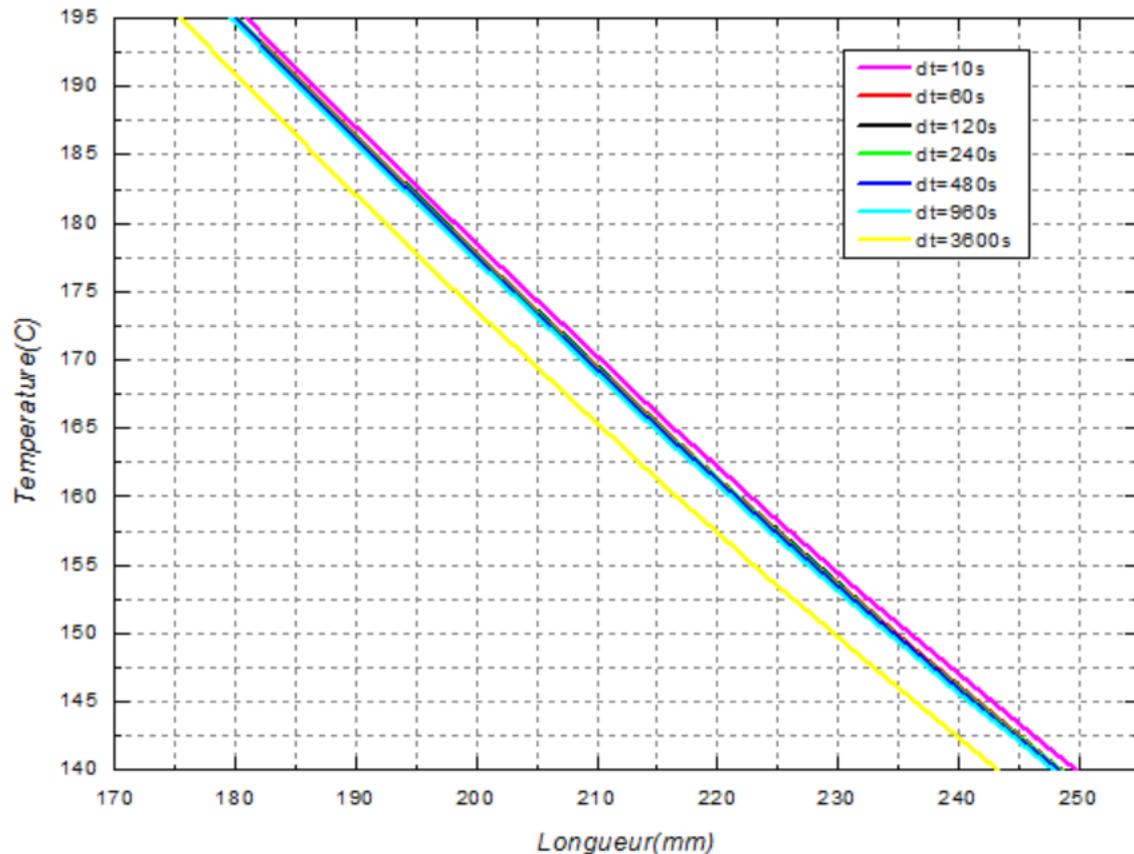


Figure IV.2. Distribution de la température selon différents Δt .

D'après le graphe l'écart dans la distribution de température est important entre la courbe qui correspond à un pas de 3600s et celles des pas inférieurs à 960s. Cet écart diminue avec la diminution du pas de temps, et devient presque nul pour des valeurs inférieure ou égale à 60s.

Par conséquent, il est inutile d'avoir un pas d'espace inférieur à 4 mm et un pas de temps inférieur à 60 s car un tel changement n'affecte pas les résultats et conduit au contraire, à une augmentation des efforts de calcul.

IV.2 Influence de la vitesse

IV.2.1 Influence de la vitesse sur la distribution de température

La vitesse du fluide caloporteur circulant dans les tubes détermine le régime d'écoulement qui à son tour a un impact important sur le coefficient de convection. L'influence de la vitesse dans les tubes sur le profil de température est illustrée sur la figure IV.3. Les résultats obtenus montrent que les courbes de la distribution de température qui correspondent aux valeurs de vitesses allant de 0.04 à 1m/s sont très proches par rapport à celle de la valeur de vitesse de 0.02m/s.

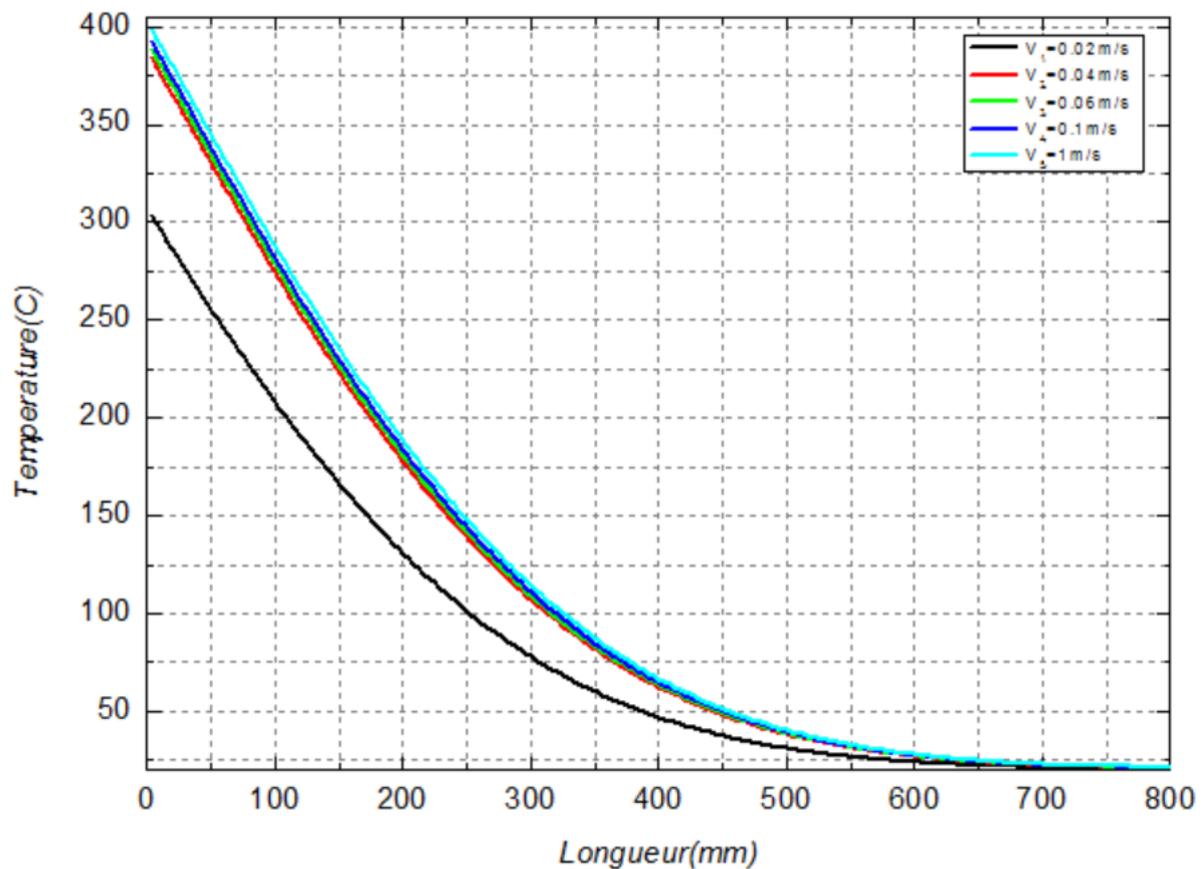


Figure IV.3. Influence de la vitesse sur le profil de température.

IV.2.2 Influence de la vitesse sur la quantité de chaleur stockée

La figure IV.4 représente la quantité de chaleur stockée pendant une journée pour différentes vitesses du fluide caloporteur dans le tube.

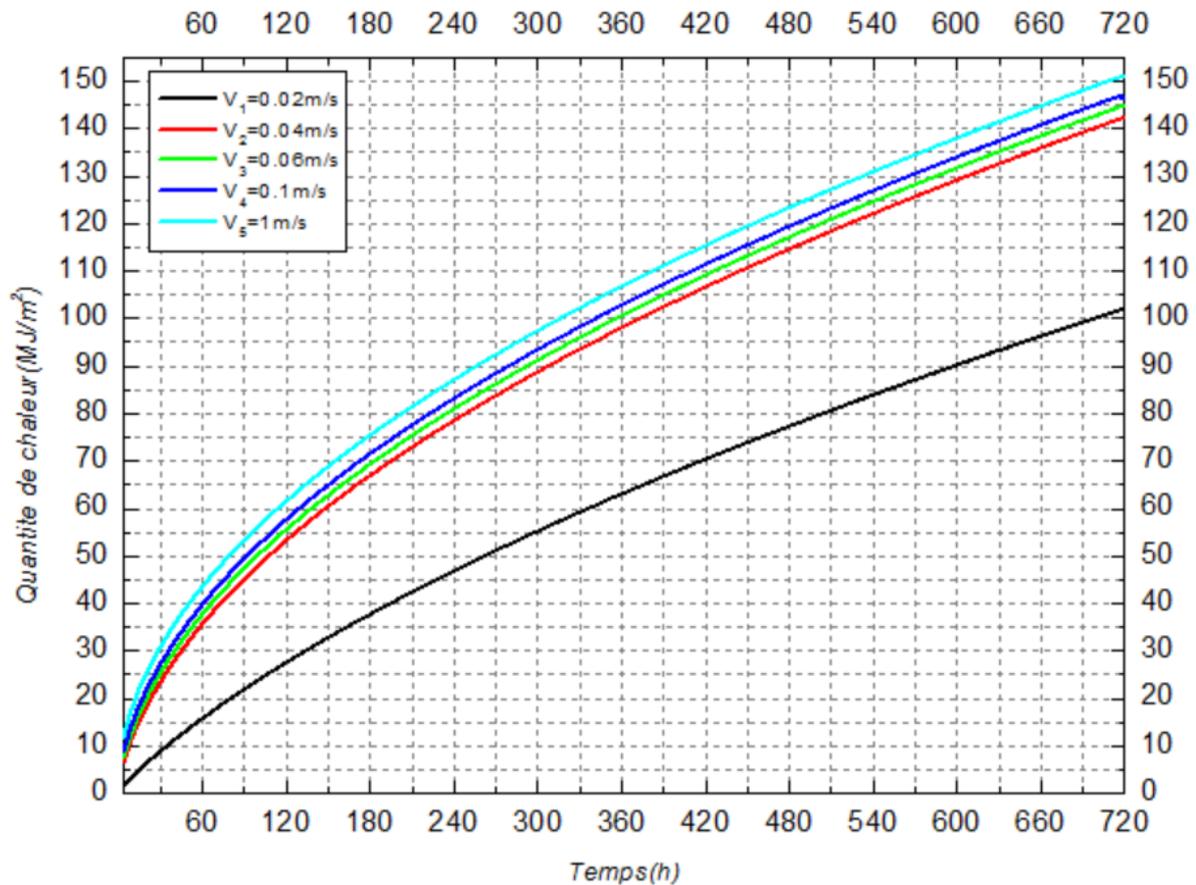


Figure IV.4. Influence de la vitesse sur la quantité de chaleur stockée.

D'après la figure IV.4, la quantité de chaleur stockée pendant une journée avec la vitesse de 0.02m/s qui correspond à un régime d'écoulement laminaire est égale à 101,68 MJ/m². La courbe de cette valeur est loin et inférieure par rapport aux courbes des valeurs de vitesse correspondant à un régime d'écoulement turbulent allant de 0.04 à 1m/s dont lesquelles la quantité de chaleur atteint 146,76 MJ/m². La vitesse élevée du fluide crée un stockage d'une quantité de chaleur consistante, cependant cette vitesse entraîne une grande quantité de perte de charge raison pour laquelle nous avons choisi une vitesse de 0,06 m/s dans notre simulation.

IV.3 Cycles de stockage dans différents matériaux solides

Le champ de température dans le module de stockage est uniforme et constant à l'instant initial $t=0$ qui correspond à l'instant du premier démarrage. À ce moment-là, on a considéré uniquement l'opération de stockage, pour voir la variation du champ de température dans le module de stockage dans différents matériaux solides.

IV.3.1 Stockage dans le béton

La figure IV.5 montre la variation de la répartition de température dans le béton pour plusieurs jours.

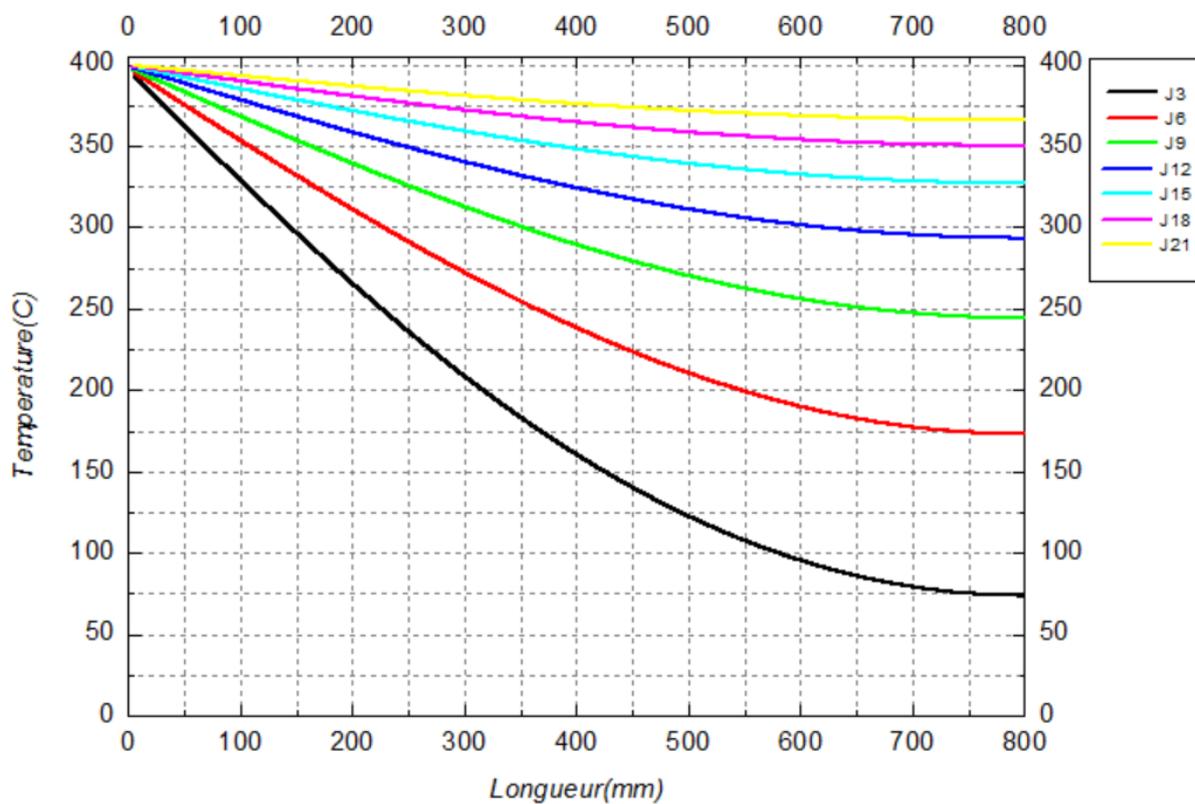


Figure IV.5. La variation de la température dans le béton pendant plusieurs cycles.

La température augmente chaque jour, au bout de trois jours le point de symétrie atteint 55°C puis sa température s'est évoluée excessivement et il finit après 21 jours à la température de 356°C.

IV.3.2 Stockage dans la roche

La procédure de calcul est la même pour le stockage dans la roche avec le même nombre de fourrier et la même vitesse du fluide caloporteur. Les résultats sont illustrés dans la figure IV.6.

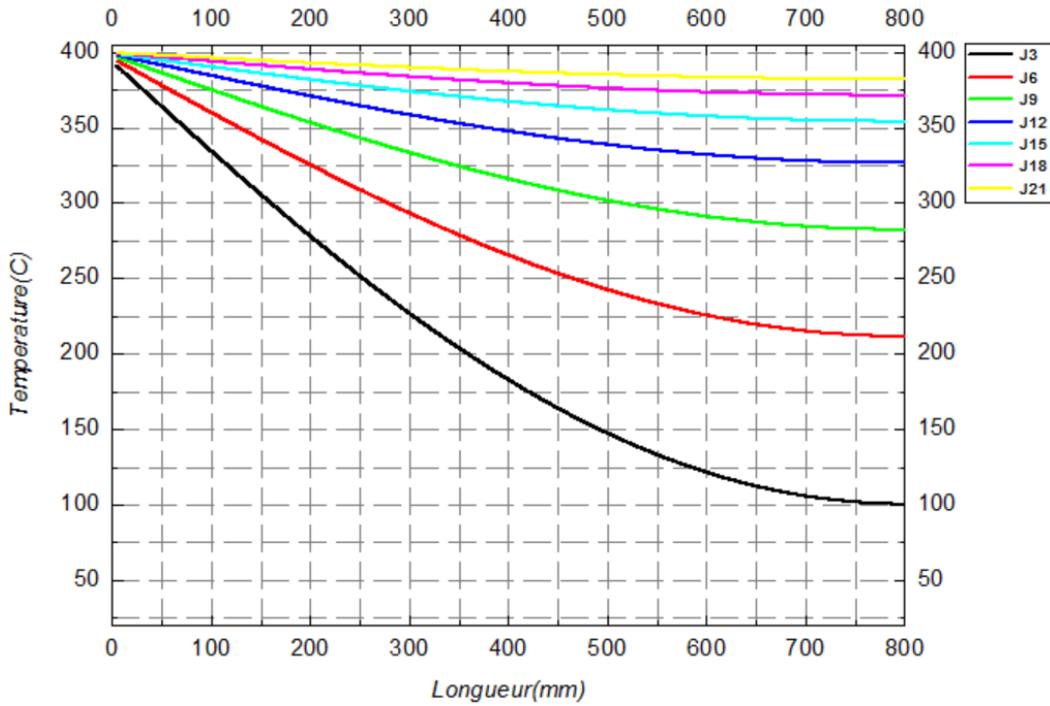


Figure IV.6. La variation de la température dans la roche pendant plusieurs cycles.

La figure IV.6 donne la variation de température de la roche pendant plusieurs cycles de stockage. La température de stockage augmente chaque jour, à partir du 18^{ème} jour l'évolution ralentie et les courbes se rapprochent. La température maximale stockée est de 388°C.

IV.3.3 Stockage dans le sable

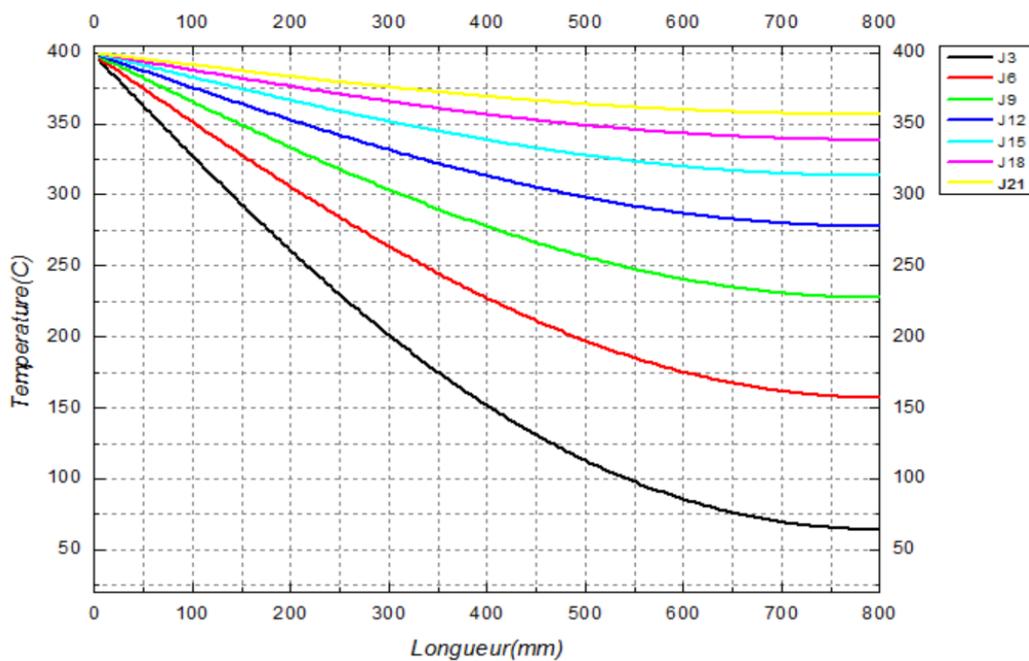


Figure IV.7 : La variation de la température dans le sable pendant plusieurs cycles.

La figure IV.7 montre la distribution de la température durant le stockage de la chaleur dans le sable. Chaque jour la température du sable augmente le long du domaine de stockage, durant 21 jours la température stockée a évolué jusqu'à 350°C.

Pour tous les matériaux et après un certain nombre de jours (d'itération de calcul correspondant à 21 jours) la répartition de température dans le solide se stabilise suivant une certaine allure qui influe sur la quantité de chaleur stockée.

IV.4 Quantité de chaleur stockée

La Figure IV.8 représente la quantité de chaleur stockée dans les trois matériaux de stockage durant 21 jours.

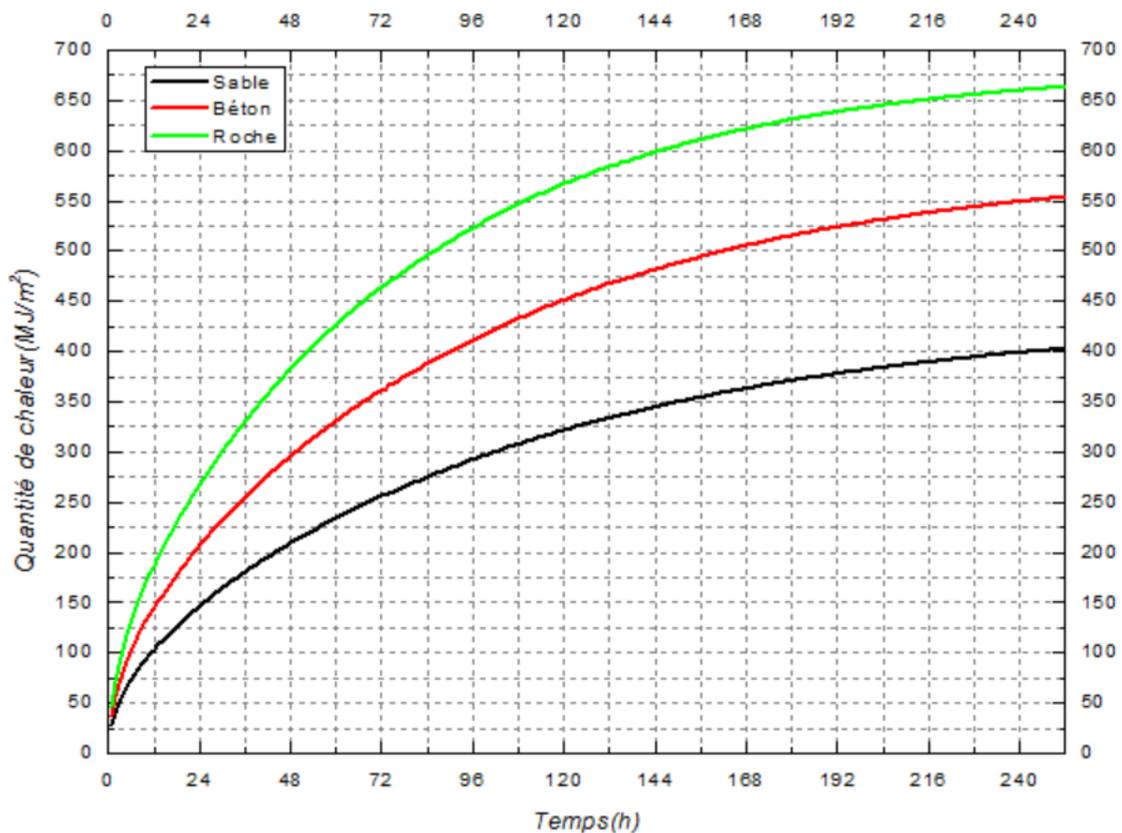


Figure IV.8 La quantité de chaleur stockée en fonction du temps pour les 3 différents sols.

La quantité de chaleur maximale stockée dans le sable est de 400MJ/m² pendant la durée de 21 jours, alors que le béton stocke 552,8 MJ/m² et la roche stocke 662 MJ/m² pendant la même durée. Le stockage de la chaleur varie selon le matériau du stockage utilisé. Selon ce résultat, le

matériau qui a une conductivité thermique importante est susceptible de stocker une grande quantité de chaleur.

Le matériau utilisé dans la simulation de déstockage de l'énergie thermique est le béton, en raison de son faible coût et de sa disponibilité. La conductivité thermique du béton étant élevée assure un cycle de charge et de décharge performant qui permet une puissance de génération de vapeur de l'ordre de KW jusqu'à MW pour un module de stockage bien dimensionné.

IV.5 Le déstockage de l'énergie thermique

IV.5.1 La répartition de température dans le solide

Les figures IV.9.a, b, c et d montrent la distribution du champ initial de température dans le béton et la distribution de température après 12 heures de déstockage. Pour la figure IV.8.a, la période de stockage est d'un jour et elle est d'une semaine, deux semaines et trois semaines pour les figures IV.8.b, c et d respectivement.

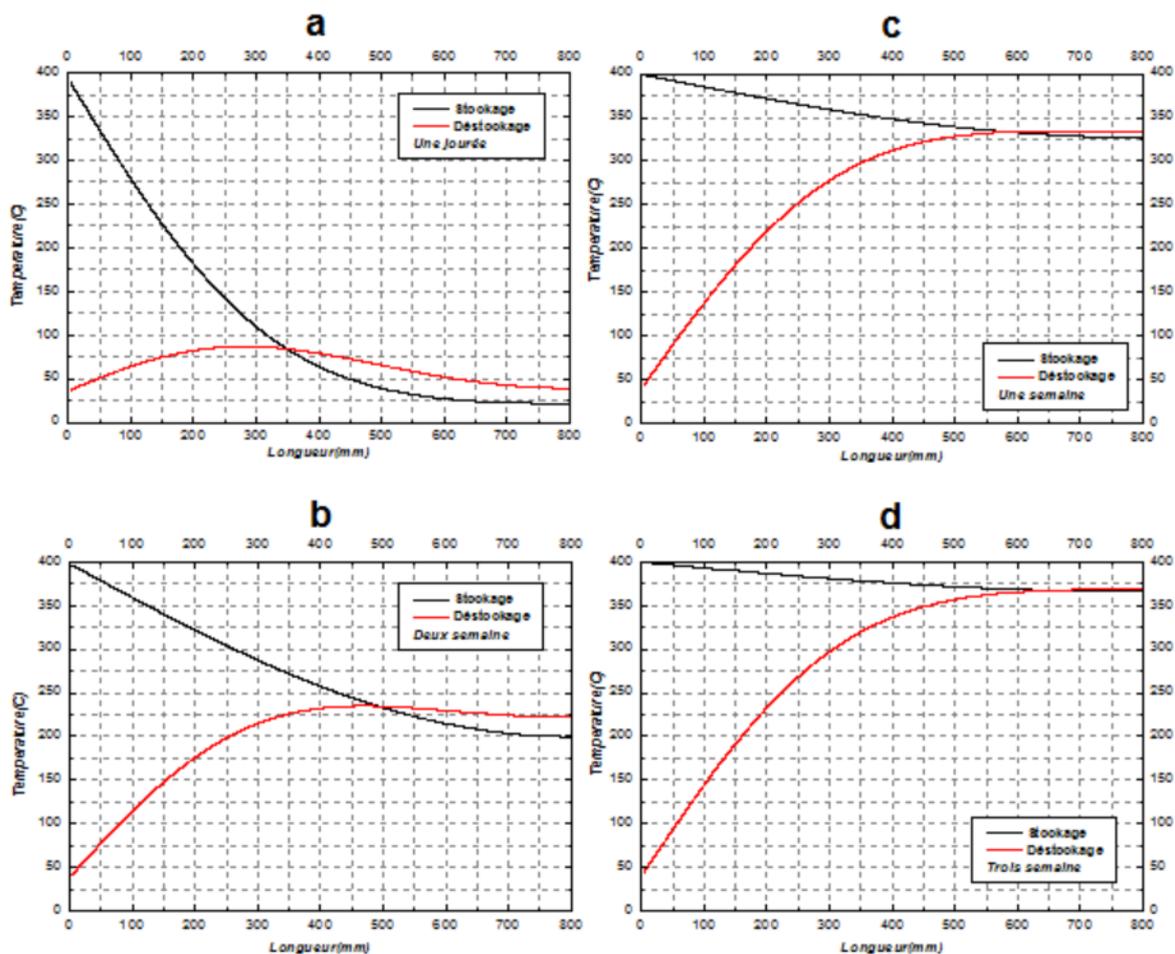


Figure IV.9 Distribution de température de déstockage pour plusieurs durées de stockage.

La figure IV.9.a montre une chute de température dans le béton, avec une valeur maximale moins de 100°C après 12h de déstockage. Les valeurs des températures dans le solide augmentent pour les autres durées de stockage et elles atteignent le maximum après trois semaines.

IV.5.2 Quantité de chaleur déstockée

La figure IV.10.a, b, c et d représente la quantité de chaleur stockée et déstockée pour différentes durées de stockage.

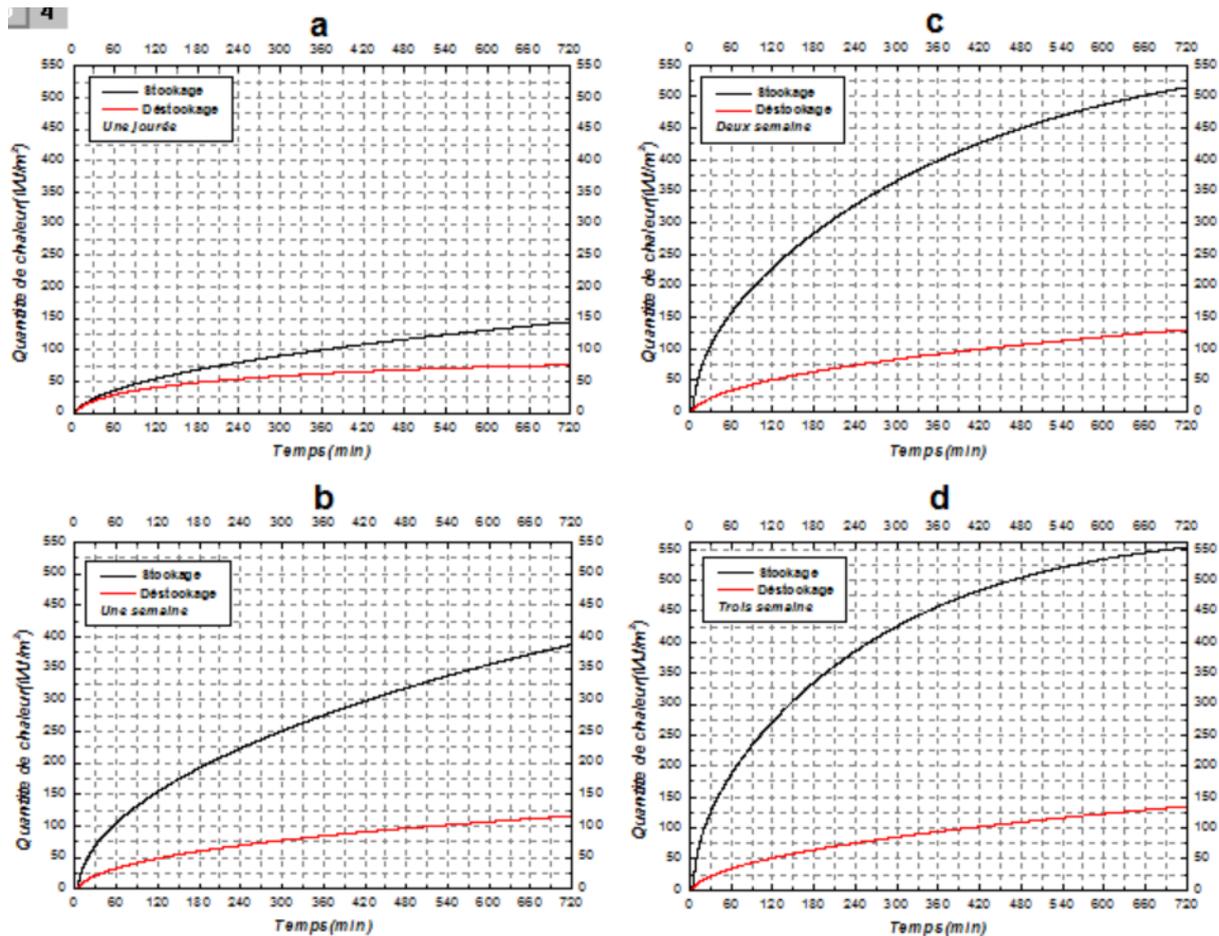


Figure IV.10 Quantité de chaleur stocké et déstockée pour différentes durées de stockage.

D’après la figure IV.10.a, la quantité de chaleur déstockée égale à 75 MJ/m² après le stockage d’une quantité de 140 MJ/m² pendant une journée. Après une semaine de stockage la quantité de chaleur atteint une valeur de 380 MJ/m² et de 110 MJ/m² lors de déstockage. Tandis qu’elle a bien augmenté après deux et trois semaines de stockage à 514 puis 555 MJ/m², respectivement. Alors qu’elle a augmenté légèrement en phase de déstockage de 130 à 135 MJ/m². Cette différence d’évolution est illustrée dans la figure IV.11.

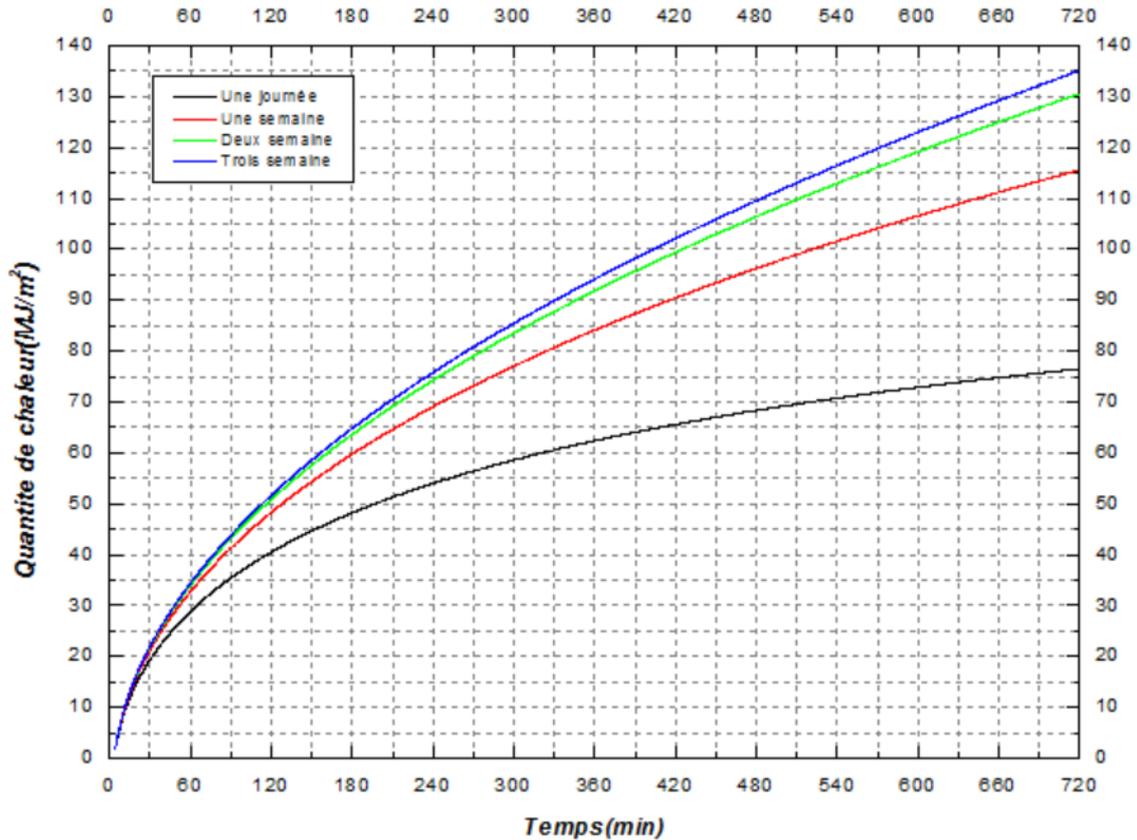


Figure IV.11 Quantité de chaleur déstockée après différentes durées de stockage.

Après l'exécution du programme de calcul élaboré on introduit :

Les paramètres de la turbine à vapeur :

- La puissance est de 5,22 MW,
- La pression et la température à l'entrée de la turbine 80 bar, 350°C respectivement,
- La pression à la sortie de la turbine 0.06 bar,
- L'enthalpie à l'entrée de la turbine 2988.4 kJ/kg,
- L'enthalpie à la sortie de la turbine 1887.5 kJ/kg,
- L'enthalpie à la sortie du condenseur $h=151.53$ kJ/kg,

Ainsi que les paramètres du fluide caloporteur telle que :

- La vitesse moyenne dans les tubes de 0.06m/s,
- La température de 400°C pendant le stockage,
- La température de 36°C pendant le déstockage,

Nous avons trouvé que la quantité de chaleur déstockée depuis notre module de stockage supposé égale à 115,8 MJ/m². Un seul module de stockage génère une puissance de 13,4 MW et il répond aux besoins de la turbine proposée.

IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté les résultats obtenus de simulation numérique de l'équation instationnaire et unidimensionnelle de conduction. Cette simulation numérique a été étudiée pour mettre en évidence le nombre de Fourier qui dépend lui-même du pas de temps et d'espace. Un bon choix de ces paramètres améliore les résultats de distribution de température dans un milieu solide et optimise le temps de calcul.

Suite aux résultats obtenus on note que la vitesse du fluide caloporteur influence sur la distribution de température et la quantité de chaleur échangée. Un écoulement à grande vitesse crée de fortes pertes de charge, pour cela il faut mettre au point une vitesse abordable.

De plus ce modèle a permis de prédire les performances qui caractérisent un tel système de stockage tel que la durée et le matériau utilisé comme milieu de stockage.

Conclusion générale

La technologie des capteurs à concentration d'énergie solaire thermique est une technique d'énergie renouvelable émergente où l'intégration d'un système de stockage thermique (TES) est essentielle à sa compétitivité.

La plupart des centrales thermodynamiques en projet ou en construction sont équipées de TES, ce qui permet à la centrale de continuer à produire de l'électricité après le coucher du soleil, tout au long de la soirée.

Le travail abordé dans ce mémoire a permis d'étudier la simulation numérique du stockage journalier de l'énergie thermique par chaleur sensible en utilisant la méthode des différences finies. Pour mieux concerner le problème, il était utile de présenter les capteurs solaires à concentration ainsi que les modes de stockage de l'énergie thermique et la méthode de simulation du model étudié.

Les résultats numériques présentés dans cette étude attestent que le stockage thermique à haute température dans le béton est une technologie attrayante dans le domaine industriel.

Annexe

Programme Fortran élaboré pour les calculs théorique

Pour stockage :

```
Program Emplicit1D
Parameter (nmax=20000) !the value of nmax cannot be changed during program execution
Dimension a(nmax,nmax),x(nmax),tetold(nmax),tetn(nmax), b(nmax), q(nmax), qq(nmax), qp(nmax)
Amu=0.000146
Akf=0.075
Pr=5.075
write(*,*)'please provide: diameter,velocity'
read(*,*)D,v
Re=694.*D*v/Amu
if (re<=2300) then
ANu=4.36
else
ANu=0.023*(Re**0.8)*(Pr**(1/3.))
endif
h=ANu*Akf/D
write(*,*)Re,ANU,h
pause
! write(*,*)'please provide: Length, Number of node, Timesteps, Initial T, Tlound, masse volumiq,
chaleur mas, Number of iterations,coef convection,conductivite therm'
!read(*,*)Al,ni,tt,Ti,Tlound,ro,Cp,nn,h,Thc
Al=0.8
ni=200
tt=60
Ti=20
Tlound=34
ro=2200
Cp=880
nn=5040
```

```
!h=151.2
Thc=1.5
Dx=Al/(ni-1) !DELTA X
      Alfa=Thc/(ro*Cp)
F0=Alfa*tt/Dx**2
n=ni! Number of nodes without BL nodes
!do i=1,n
!tetold(i)=Ti
!end do
Open(3,file='destockage.txt')
      do i=1,ni
      read(3,30)tetold(i)
      enddo
close(3)
! CALCULATION GRID
!ni <= nmax
Dx=Al/(ni-1) !DELTA X
Bi=h*Dx/Thc
!GRID VECTOR
x(1)=0.0
Do i=2,ni
x(i)=x(i-1)+Dx
Enddo
do k=1,nn
! FILLING MATRIX a
do i=3,n
      do j=1,i-2
            a(i,j)=0
            a(j,i)=0
      enddo
enddo
Do i=1,n
```

```

    a(i,i)=2*F0+1
    a(i,i+1)=-F0
    a(i+1,i)=-F0
Enddo
a(1,1)=1+2*F0*(1+Bi)
a(1,2)=-2*F0
a(n,n-1)=-2*F0
!a(n,n)=1+2*F0
!FILLING VECTOR b
b(1)=tetold(1)+2*Bi*F0*Tlound
Do i=2,n
    b(i)=tetold(i)
enddo
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
! Verification
!Do I=1,n
!write(*,*) 'b('i,')=',b(i)
!Do j=1,n
!write(*,*) 'a('i,','j,')=',a(i,j)
!enddo
!enddo
!      Stop
!      !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!solution
call Tri (a,b,tetn,n)
    t=(k*tt)/60
!Displaying results on the screen
!      write(*,20)t
Write(*,*)(tetn(i),i=1,n)
do i=1,n
    tetold(i)=tetn(i)
enddo

```

$q(k)=q(k)+(h*(tetn(1)-T_{cloud})*tt)/1000000$

!writing results to an output file

Open(1,file='IMPLICI.txt')

write(1,20)t

do i=1,n

Write(1,30)tetn(i)

enddo

!open(4,file=")

!do i=1,ni

!write(*,*)tetn(i)

!enddo

enddo

Close(1)

qq(0)=0

write(*,*)qq(1)

do L=1,nn

qq(L)=q(L)+qq(L-1)

write(*,*)qq(L)

enddo

do i=1,nn,28

qp(i)=qq(i)

Open(2,file='quantite.txt')

!write(2,20)t

!write(2,*)q(L)

write(2,*)qp(i)

enddo

write(*,*)q(1)

close(2)

!!!

30 Format (f8.2,10f8.3,/)

10 Format (/ ,2x,3A8,/)

20 Format (2x,3f10.3)

```
end
Subroutine Tri (a,b,x,n)
Parameter (nmax=20000)
Dimension a(nmax,nmax),b(nmax),x(nmax)
!triangular form
Do k=1,n-1
Do i=k+1,n
b(i)=b(i)-a(i,k)*b(k)/a(k,k)
Do j=k+1,n
a(i,j)=a(i,j)-a(i,k)*a(k,j)/a(k,k)
Enddo
Enddo
Do i=k+1,n
Do j=1,k
a(i,j)=0
Enddo
Enddo
Enddo
!Solution
x(n)=b(n)/a(n,n)
Do i=n-1,1,-1
somme=0
Do j=i+1,n
somme=somme+a(i,j)*x(j)
Enddo
x(i)= (b(i)-somme)/a(i,i)
Enddo
Return
End
```

Pour déstockage :

Program Explicit1D

Parameter (nmax=20000) !the value of nmax cannot be changed during program execution

Dimension a(nmax,nmax),x(nmax),tetold(nmax),tetn(nmax), b(nmax), q(nmax), qq(nmax), qp(nmax)

Amu=0.000146

Akf=0.075

Pr=5.075

Et=5.22*10**6

Pentr=80*10**5

Tentr=350

Psrt=0.06*10**5

h1=2988.4*10**3

h2=1887.5*10**3

h4=151.53*10**3

Pi=3.14159265

Ltube=10

write(*,*)'please provide: diameter,velocity'

read(*,*)D,v

Re=694.*D*v/Amu

if (re<=2300) then

ANu=4.36

else

ANu=0.023*(Re**0.8)*(Pr**(1/3.))

endif

h=ANu*Akf/D

write(*,*)Re,ANU,h

pause

! write(*,*)'please provide: Length, Number of node, Timesteps, Initial T, Tlound, masse volumiq, chaleur mas, Number of iterations,coef convection,conductivite therm'

!read(*,*)Alni,tt,Ti,Tlound,ro,Cp,nn,h,Thc

```
Al=0.8
ni=200
tt=60
Ti=20
Tlound=34
ro=2200
Cp=880
nn=5040
!h=151.2
Thc=1.5
Dx=Al/(ni-1) !DELTA X
  Alfa=Thc/(ro*Cp)
  F0=Alfa*tt/Dx**2
  n=ni! Number of nodes without BL nodes
  !do i=1,n
  !tetold(i)=Ti
!end do
Open(3,file='destockage.txt')
do i=1,ni
read(3,30)tetold(i)
enddo
close(3)
! CALCULATION GRID
!ni <= nmax
  Dx=Al/(ni-1) !DELTA X
  Bi=h*Dx/Thc
!GRID VECTOR
  x(1)=0.0
  Do i=2,ni
  x(i)=x(i-1)+Dx
  Enddo
do k=1,nn
```

```
! FILLING MATRIX a
do i=3,n
do j=1,i-2
a(i,j)=0
a(j,i)=0
enddo
enddo
Do i=1,n
a(i,i)=2*F0+1
a(i,i+1)=-F0
a(i+1,i)=-F0
Enddo
a(1,1)=1+2*F0*(1+Bi)
a(1,2)=-2*F0
a(n,n-1)=-2*F0
!a(n,n)=1+2*F0
!FILLING VECTOR b
b(1)=tetold(1)+2*Bi*F0*Tlound
Do i=2,n
b(i)=tetold(i)
enddo
call Tri (a,b,tetn,n)
t=(k*tt)/60
!Displaying results on the screen
Write(*,*)(tetn(i),i=1,n)
do i=1,n
tetold(i)=tetn(i)
enddo
q(k)=q(k)+(h*(tetn(1)-Tlound)*tt)/1000000
!writing results to an output file
Open(1,file='IMPLICI.txt')
write(1,20)t
```

```

do i=1,n
Write(1,30)tetn(i)
  enddo
enddo
Close(1)
qq(0)=0
write(*,*)qq(1)
do L=1,nn
qq(L)=q(L)+qq(L-1)
write(*,*)qq(L)
  enddo
do i=1,nn,28
qp(i)=qq(i)
Open(2,file='quantite.txt')
!write(2,20)t
!write(2,*)q(L)
write(2,*)qp(i)
  enddo
write(*,*)q(1)
  close(2)
  wturbine=h1-h2
  qgv=h4-h1
mv=Et/wturbine
Egv=mv*qp(nn)
A=Pi*D*Ltube
mf=(ro*V*? *Dtube**2)/4
Emod stk=qp(nn)*A*25*mf
ET=wturbine*mv
Nmodstk=mv*qgv/0,9
  write(*,*)Nmodstk
30 Format (f8.2,10f8.3,/)
10 Format (/ ,2x,3A8,/)

```

20 Format (2x,3f10.3)

end

Subroutine Tri (a,b,x,n)

Parameter (nmax=20000)

Dimension a(nmax,nmax),b(nmax),x(nmax)

!triangular form

Do k=1,n-1

Do i=k+1,n

b(i)=b(i)-a(i,k)*b(k)/a(k,k)

Do j=k+1,n

a(i,j)=a(i,j)-a(i,k)*a(k,j)/a(k,k)

Enddo

Enddo

Do i=k+1,n

Do j=1,k

a(i,j)=0

Enddo

Enddo

Enddo

!Solution

x(n)=b(n)/a(n,n)

Do i=n-1,1,-1

somme=0

Do j=i+1,n

somme=somme+a(i,j)*x(j)

Enddo

x(i)= (b(i)-somme)/a(i,i)

Enddo

Return

End
