

UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA

Faculté de Technologie
Département de Mécanique

MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : Energétique

ETUDE D'UN SYSTEME DE REFROIDISSEMENT A BASE D'HYDRURES

Par

Abdelwahhab MOUDJEB

Devant le jury composé de :

Y. Benkheda	Professeur, Université de Blida	Président
A. Khelaf	Directeur de Recherche CDER	Rapporteur
A. Hamid	Maitre de conférences (A), Université de Blida	Examineur
D. Semmar	Maitre de Conférence, Université de Blida.	Examineur

Blida, Juin 2013

DEDICACE

A chacune des personnes qui m'entourent et qui m'ont toujours solidement soutenu le long de ce long parcours.

A mes **chers parents** qui m'ont toujours éclairé le chemin de la vie en me tendant la main tout au long de mes années d'études « que dieu me les garde ».

A toute ma **famille**.

Je dédie ce modeste travail.

REMERCIEMENTS

Je remercie toute personne m'ayant aidé de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

En particulier :

Mon encadreur monsieur **A. Kellaf**, Directeur de Recherche au Centre de développement des énergies renouvelables, qui a accepté de diriger mon travail, a toujours répondu présent pour tout problème rencontré, pour ses précieux conseils et ses encouragements.

TABLE DES MATIERES

Remerciement	
TABLE DES MATIERES	
Listes des illustrations graphiques et tableaux	
Chapitre I, Introduction	01
Introduction.....	02
Chapitre 1, Les hydrures	12
1.1. Les hydrures métalliques.....	12
1.2. Les composés intermétalliques	13
1.2.1. Les composés de type AB ₅	13
1.2.2. Les composés de type AB.....	13
1.2.3. Les composés de type AB ₂	13
1.3. Préparation d'hydrure.....	14
1.4. Les propriétés thermodynamiques des hydrures.....	15
1.4.1. Synthèse des hydrures.....	15
1.4.2. Courbes isothermes PCT.....	16
1.4.2.1 Comportement idéal.....	16
1.4.2.2. Comportement réel.....	17
1.5. Travaux sur les réacteurs d'hydrures.....	18
1.6. Les pompes à chaleur à base d'hydrure.....	22
1.6.1. Types des pompes à chaleur à base d'hydrure.....	23
Chapitre 2, Modélisation	27
2.1 Présentation du système	28
2.1.1. La partie solaire.....	29
2.1.2. Le système à base d'hydrure	30
2.2. Le principe de fonctionnement.....	31
2.3. Modélisation.....	34
2.3.1. Modélisation du système de concentration d'énergie solaire.....	34
2.3.1.1. Potentiel solaire.....	34
2.3.1.2. Système de poursuite des rayons solaires.....	40
2.3.1.3. Energie Absorbé par le collecteur.....	40
2.3.1.4. Transfert de chaleur vers le fluide.....	42
2.3.1.5. Perte de chaleur par convection.....	45

2.3.1.6. Perte de chaleur par rayonnement.....	47
2.3.1.7 Le coefficient global d'échange de chaleur.....	48
2.3.1.8. Efficacité du collecteur.....	48
2.3.1.9. Puissance du collecteur et la température de sortie d'eau.....	49
2.3.2. Modélisation du système à base d'hydruure.....	50
2.3.2.1. Chauffage et refroidissement.....	50
2.3.2.2. La Désorption(Absorption)	52
2.3.2.3. Coefficient de performance COP.....	56
Chapitre 3, Résultats et discussion.....	58
3.1. Résultats et discussion.....	59
3.2. Evaluation du potentiel solaire.....	59
3.3. Energie absorbée par le concentrateur	60
3.4. Système à base d'hydrures.....	62
3.4.1. Influences de la température T_h	67
3.4.2. Influences de la température moyenne T_m sur les performances du système	74
3.5.1. Etude de refroidissement du local.....	77
3.6. Energie utile absorbée par le fluide caloporteur.....	82
Conclusion et recommandations.....	85
Conclusion.....	86
Recommandations	86
Annexes	87

LISTES DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure 1.1	Tableau périodiques des éléments	12
Figure 1.2	Cinétique d'absorption mesurée sous 3MPa d'hydrogène à différentes température par la poudre de magnésium	14
Figure 1.3	Cinétique d'absorption de désorption d'hydrure de magnésium	15
Figure 1.4	(a) courbes pression-composition-température, (b) courbe pression en fonction de l'inverse de la température.	16
Figure 1.5	Représentation schématique des courbes isothermes d'absorption et de désorption présentant une hystérésis et une inclinaison de plateau.	18
Figure 1.6	(a) le comportement de LaNi ₅ (b) le comportement de LaNi _{4.75} Al _{0.25}	19
Figure 1.7	L'influence de Th sur la quantité d'hydrogène libérée MmNi _{4.6} Fe _{0.4} (b) MmNi _{4.6} Al _{0.4} .	21
Figure 1.8	L'influence du coefficient d'échange globale sur la quantité d'hydrogène libérée (a) MmNi _{4.6} Fe _{0.4} (b) MmNi _{4.6} Al _{0.4} .	22
Figure 1.9	cycle de fonctionnement – système à deux réservoirs	24
Figure 1.10	Le système à quatre réservoirs d'hydrure	24
Figure 1.11	Système de refroidissement à double étage	25
Figure 1.12	Cycle de fonctionnement d'un système à double étage.	25
Figure 1.13	Cycle de fonctionnement système multi-hydrure à vague thermique	26
Figure 1.14	Température du profile II, système multi-hydrure à vague Thermique	26
Figure 3.6	Influence du Th sur le coefficient de performance- Masse 2Kg	68
Figure 3.7	Influence du Th sur le coefficient de performance- Masse 4Kg	69
Figure 3.8	Influence du Th sur le pouvoir de refroidissement- Masse 2 Kg	70
Figure 3.9	Influence du Th sur la durée de cycle- Masse 2 Kg	70
Figure 3.10	Influence du Th sur la durée de cycle- Masse 4 Kg	71
Figure 3.11	Influence du Th sur le pouvoir de refroidissement- Masse 4 Kg	72

Figure 3.12	Influence de T_h sur la chaleur échangé dans le réacteur MH2	73
Figure 3.13	Influence de T_c sur le temps de désorption d'hydrogène dans MH2	74
Figure 3.14	Influence du T_m sur le coefficient de performance	75
Figure 3.15	Influence du T_m sur la durée de cycle	76
Figure 3.16	Influence du T_m sur le pouvoir de refroidissement	76
Figure 3.17	Influence du T_h sur la température du local	78
Figure 3.18	Influence du T_c sur la température du local	78
Figure 3.19	Influence de la mase d'hydrure sur la température du local	79
Figure 3.20	Variation de nombre de cycle avec la température T_h - volume 15 m ³	81
Figure 3.21	Variation de nombre de cycle avec la température T_h - volume 27 m ³	81
Figure 3.22	Puissance nécessaire d'activation d'hydrure MH1	83
Figure 3.23	Différence entre puissance absorbée et puissance utile	84
Tableau 1.1	Travaux sur les systèmes à base d'hydrure	23
Tableau 2.1	Les valeurs des coefficients de la méthode de Hottel	39
Tableau 3.1	paramètres d'entrées du système solaire	61
Tableau 3.2	Paramètres d'entrées du système d'hydrure	63

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

A	Altitude	m
A_i	Section de passage	m ²
C	Coefficient de concentration	-
C_p	Chaleur spécifique	kJ/kg.K
C_{pf}	Chaleur spécifique du fluide caloporteur	kJ/kg.K
COP	Coefficient de performance	-
D_{ci}	Diamètre intérieur de la couche de verre	m
D_{co}	Diamètre extérieur de la couche de verre	m
D_{ti}	Diamètre intérieur du tube	m
D_{to}	Diamètre extérieur du tube	m
E_d	Energie d'activation pour l'absorption	kJ/kg
E_a	Energie d'activation pour la désorption	kJ/kg
Fr	Efficacité du collecteur	-
H	Enthalpie	kJ/kg.K
H_{rtc}	Coefficient d'échange de chaleur par rayonnement	
I_b	Intensité des radiations directes	W/m ²
I_d	Intensité des radiations diffuses	W/m ²
I_{so}	Intensité des radiations solaires	W/m ²
K	Coefficient d'échange global	W/m ² .k
K_e	Coefficient d'extension du verre	1/m
L	Longueur du collecteur	M
MW	Masse molaire d'hydrure	g/mol
Nuf	Nombre de Nusselt	-
NUT	Unité de transfert d'un d'échangeur de chaleur	-
P	Pression instantanée	bar
P_{eq}	Pression d'équilibre	bar
Pr	Nombre de Prandtl	-
Ql	Chaleur échangé entre le fluide et l'hydrure 2	kJ
Qh	Chaleur échangé entre le fluide et l'hydrure 1	kJ

Q_{nom}	Puissance nominale	kW
R	Constante des gaz parfait	kJ/mol.K
R_{ef}	Nombre de Reynolds pour le fluide caloporteur	-
S_b	Chaleur absorbé par le collecteur	kJ
T_{fo}	Température de sortie du fluide	°C
T_{fi}	Température d'entrée du fluide	°C
T_{cm1}	Température intérieure de la couche de verre	°C
T_{cm2}	Température extérieure de la couche de verre	°C
T_h	Température d'activation d'hydrure	K
T_m	Température intermédiaire	K
T_c	Température de refroidissement	K
T_{-local}	Température du local	K
U	coefficient global d'échange de chaleur	W/m ² .K
U_f	La vitesse du fluide à l'intérieur du tube	m/s
W	Largeur du collecteur	m
X	Concentration d'hydrogène dans l'hydrure	H/M
f	Distance focale	m
h	Coefficient d'échange de chaleur par convection	W/m ² .K
\dot{m}	Débit du fluide caloporteur	kg/s
m_{mh}	Masse d'hydrure	kg
r_e	Rayon extérieur	M
r_i	Rayon intérieur	M
t_{ch}	Temps de la phase de chauffage du deuxième hydrure	s
t_c	Durée de cycle	s
t_{des}	Temps de la phase de désorption du deuxième hydrure	s

Grecque

Φ	Latitude	°
δ	Déclinaison	°
θ_z	Angle zénith	°
γ	Angle d'azimut	°
β	Angle d'inclinaison du plan	°
ω	Angle horaire	°

θ	Angle incidente	°
τ_b	Transmittance de l'atmosphère basé sur les radiations directes	-
τ_d	Transmittance de l'atmosphère basé sur les radiations diffus	-
θ_2	Angle de la réfraction de la radiation solaire à travers le verre	°
ρ_1	Réflectivité	-
ρ_c	Réflectivité du collecteur	-
ξ_c	Coefficient d'émission du verre	-
ξ_t	Coefficient d'émission de tube	-
α_t	Absorptivité de tube	-
γ_f	Viscosité cinématique du fluide caloporteur	m ² /s
ρ_f	Densité du fluide caloporteur	kg/m ³
σ	Coefficient de Boltzmann	W/m ² .K ⁴
η_o	coefficient d'efficacité optique	--
λ_{tube}	Conductivité de tube	W/m.K
λ_{cover}	Conductivité couche de verre	W/m.K
ΔH_f	Enthalpie de formation	kJ/kg
ΔS	Entropie de formation	kJ/mol.K

ABREVIATION

PAC : pompe à chaleur

CFC : Chlorofluorocarbures

HCFC : Hydrochlorofluorocarbures

GES : gaz à effet de serre

CSP : système de concentration d'énergie solaire

MH : Métal hydrure

MHHP : pompe à chaleur à base d'hydrure

INTRODUCTION

L'hydrogène est l'élément chimique le plus abondant dans l'Univers. Sur terre, la molécule d'hydrogène n'existe pas à l'état naturel, on le trouve lié à d'autres atomes comme l'oxygène pour former de l'eau ou le carbone pour former par exemple du gaz naturel.

Dans ces dernières années l'utilisation des énergies renouvelables est devenu incontournable, l'impacts sur l'écosystème produit par les énergies fossiles évolue jours après jours. De ce fait, l'hydrogène est parmi les solutions prometteuse, l'important aussi que la combustion d'hydrogène est presque non polluante, aussi les autres énergies renouvelables comme solaire par exemple sont utilisée pour produire l'hydrogène. Une fois produit, il peut être stocké, transporté et utilisé.

Propriétés générales

Découvert par le chimiste anglais Henry Cavendish, l'hydrogène doit son nom au français Antoine Lavoisier. Dérivé de la langue grecque, le nom vient des deux mots : hydro = eau, et gène = générateur, donc le mot hydrogène signifie « générateur d'eau ». En effet, l'anglais Cavendish fut le premier chimiste à démontrer que lorsque l'hydrogène et l'oxygène sont combinés, ils forment de l'eau.

Les caractéristiques qui font l'hydrogène un important vecteur énergétique pour le futur sont :

- l'hydrogène est un élément chimique simple, léger (plus que l'air), stable, peu réactif à température ambiante.
- il est facile à transporter.
- il peut être produit en quantités presque illimitées.

L'hydrogène est un gaz très volatil, incolore, inodore, et non-polluant.

Techniques de production

Dans la production d'hydrogène il faut prendre en considération trois axes principaux, la matière première, la source d'énergie et le procédé de production.

L'eau, les hydrocarbures comme le méthane sont utilisées comme matière première dans la production d'hydrogène. L'apport de l'énergie dans la production d'hydrogène est assuré par plusieurs types d'énergies, conventionnelles, nucléaires et renouvelables. Concernant le procédé de production plusieurs procédés sont proposés comme la photolyse, électrolyse ou la thermochimie.

Production à partir des énergies renouvelables

La production d'hydrogène à partir des ressources renouvelables présente un véritable avantage qui contribue dans la politique mondiale de la protection de la terre et l'atténuation des impacts d'effet de serre. L'important dans quelques énergies renouvelables qu'elles ont double effets, par exemple dans le cas d'énergie éolienne on peut utiliser la cinétique du vent pour pomper l'eau vers le électrolyseur et aussi de générer l'électricité utiliser par l'électrolyseur aussi.

Dans le cas d'utilisation de l'énergie géothermique la vapeur d'eau des puits qui est à haute température chauffe l'eau utilisé dans l'électrolyseur, cette solution aide à conserver une partie de la puissance électrique ce qu'est influe positivement sur les couts de production d'hydrogène par cette méthode. Aussi on peut utiliser la vapeur d'eau produite dans les puits géothermique pour générer de l'électricité consommée par l'électrolyseur, ceci aide aussi à améliorer les performances du processus.

L'énergie éolienne est parmi les énergies renouvelables les plus utilisé depuis longtemps, elle peut couvrir des vastes régions dans le monde, l'important est d'utilisé cette énergie dans la production d'hydrogène, en effet le travaille n'est pas

que produire l'hydrogène qui peut être utilisé comme vecteur énergétique mais aussi il est considéré comme moyen de stockage d'énergie éolienne. L'énergie éolienne a double rôles dans la production d'hydrogène, elle peut engendrer une énergie électrique et aussi pomper l'eau vers l'électrolyseur.

L'énergie la plus connu et quelle est opérationnelle depuis longtemps est bien l'énergie solaire, c'est une énergie qu'on peut l'utiliser dans plusieurs procédés, elle est gratuite et non polluante. Dans la production d'hydrogène cette énergie est utilisée par deux formes principales, photovoltaïque et thermodynamique.

Les cellules photovoltaïques sont utilisées pour avoir l'énergie électrique nécessaire dans l'électrolyseur, dans cette application trois équipements sont utilisés, les modules photovoltaïques pour convertir l'énergie solaire en énergie électrique, un dispositif de conditionnement du courant électrique produit, et l'électrolyseur pour produire de l'hydrogène à partir de l'eau. [1]

Le procédé thermodynamique consiste à convertir l'énergie solaire en énergie thermique. Il y a deux types d'équipement les panneaux plans ou les concentrateurs, ces deux équipements sont utilisés pour produire de l'énergie thermique présenté en vapeur d'eau, cette vapeur est introduit dans un processus thermodynamique permet d'engendrer de l'électricité par les turbines à vapeur.

Cette énergie est utilisée par deux voix directe ou indirecte. Processus indirecte consiste à produire l'électricité par l'intermédiaire des turbines à vapeur, l'électrolyseur consomme le courant électrique produit, ou un processus direct consiste à utiliser l'énergie thermique pour libérer la molécule d'hydrogène d'eau, mais cette méthode est difficile à appliquer par ce que la température nécessaire est très élevée. [2]

Transport de l'hydrogène

Les modalités de transport de l'hydrogène varient avec son mode de production. Sous forme gazeuse, il est transporté par gazoduc. Sous forme liquide, il peut être transporté par la route, par le rail ou par bateau exactement comme les combustibles liquides usuels.

Stockage de l'hydrogène

Une fois produit, l'hydrogène, doit être stocké pour pouvoir ensuite être distribué. Le principal obstacle lié au stockage de l'hydrogène et lié au fait qu'il est l'élément le plus léger dans le tableau périodique. Il peut être stocké par trois manières différentes : gazeuse, liquide ou solide. Ces trois méthodes de stockage diffèrent par leurs densités volumiques, leurs aspects sécuritaires et leurs coûts.

Les méthodes conventionnelles sont les plus utilisées. Par le stockage sous pression l'hydrogène reste toujours en état gazeux, la pression de stockage peut atteindre le niveau de 350 bars, la densité d'hydrogène à cette pression est presque 11 Kg/m³, c'est 130 fois plus que la densité d'hydrogène à la pression normale. Le stockage d'hydrogène sous forme liquide est très pratique pour le secteur de transport, la liquéfaction d'hydrogène se réaliser à une température de 20K à cette température la densité devient 71 Kg/m, le problème dans cette méthode est qu'il est très difficile de garder la température d'hydrogène dans ce niveau très bas. [2]

Le stockage d'hydrogène dans les solides apparait comme la méthode la plus sécuritaire, car l'hydrogène fait une liaison avec les molécules du solide et se localise dans les pores. Il existe deux méthodes :

- Dans des hydrures métalliques dans lesquels l'hydrogène est absorbé (chimisorption) par des métaux appropriés, ces métaux ont la tendance d'absorber l'hydrogène sous des pressions modérées.

- Dans des composés carbonés dans lesquels l'hydrogène est adsorbé sur les surfaces de ces composés (physisorption), pour améliorer cette méthode de stockage il faut développer les surfaces latérales des pores.

La climatisation

La climatisation est la technique qui consiste à contrôler la température d'un local pour des raisons de confort ou pour des raisons techniques. La climatisation fonctionne essentiellement par le principe de fonctionnement des pompes à chaleur et se trouve de plus en plus associé dans un même appareil, un climatiseur réversible qui a double fonction, climatisation en été, et chauffage en hiver. La climatisation essaie de mettre la température d'un local plus confortable, l'augmentation de la température est due à l'apport de la chaleur externe par le soleil, et un apport interne par les équipements utilisés dans ce local ou par l'éclairage interne.

Dans la climatisation conventionnelle on utilise des fluides caloporteurs nommées les fluides frigorigènes. Un fluide frigorigène (ou réfrigérant) est un [fluide](#) pur ou un mélange de fluides purs. La principale propriété des fluides frigorigènes est de s'évaporer à une faible température sous [pression atmosphérique](#).

Le fluide frigorigène est choisi principalement pour leur absorption de la chaleur, mais aussi il faut que le fluide frigorigène obéisse à quelques critères de sécurité, par exemple il ne doit pas être polluant ou offensif pour l'homme en cas de fuite, aussi la pression de fonctionnement soit modérée. Il y a plusieurs types des fluides frigorigènes on va juste les citer.

- les [chlorofluorocarbures](#) (CFC) ;
- les [hydrochlorofluorocarbures](#) (HCFC) ;
- les [hydrofluorocarbures](#) (HFC) ;
- les [perfluorocarbures](#) (PFC) ou hydrocarbures perfluorés;

- les composées [inorganiques](#) comme l'[ammoniac](#).

Les machines frigorifiques d'origine renouvelable

L'utilisation des énergies renouvelables dans ces dernières années est devenue une politique mondiale, cette politique a encouragé l'avancement et le développement des nouvelles sources d'énergie. Certains systèmes utilisent l'absorption et la désorption du fluide frigorigène pour avoir l'effet de refroidissement, mais ces systèmes ont besoin toujours d'une quantité de chaleur pour être activé, l'intéressant est que avec le développement des énergies renouvelables l'apport de chaleur pour ces systèmes est d'origine renouvelables, par exemple l'utilisation de l'énergie solaire.

Les machines à sorption

Contrairement à la climatisation électrique traditionnelle qui produit du froid en comprimant un fluide, dans les machines à sorption, la compression mécanique est remplacée par une compression thermique. Ces systèmes utilisent également un fluide frigorigène et ses changements de phase (liquide/vapeur) mais provoquent ces changements grâce à un apport de chaleur. Le fluide frigorigène est dans ce cas de l'eau mélangé avec un second composant. Si ce dernier est un liquide, on parle alors d'absorbant et de machine à absorption, si c'est un solide poreux, on parle alors d'adsorbant et de machine à adsorption.

L'eau chaude dont la température doit être comprise entre 65 à 80 °C permet au fluide réfrigérant de se vaporiser et de se séparer de l'adsorbant dans le premier compartiment avant de rentrer dans le cycle classique condenseur (condenser)/détendeur/évaporation (évaporateur) et de s'adsorber dans le second compartiment. Au fur et à mesure, le premier compartiment se vide de fluide

frigorigène tandis que le second se remplit. Il suffit ensuite d'inverser le phénomène et ainsi de suite.

Une machine frigorifique est énergétiquement efficace si elle demande peu d'énergie pour fournir une puissance frigorifique donnée. On évalue son efficacité par le calcul du coefficient de performance (COP) rapport entre la puissance frigorifique produite et la puissance fournie au compresseur. Dans le cas d'une machine frigorifique traditionnelle, la puissance fournie est électrique. Le COP d'une telle machine peut atteindre la valeur de 3 voire plus. Dans le cas d'une machine frigorifique à absorption, le COP thermique tourne autour de 0,7 ; celui d'une machine à adsorption varie entre 0,5 et 0,6.

Ces machines à sorption sont déjà répandues dans le secteur industriel car certains processus libèrent une chaleur importante dont il est possible de tirer une puissance frigorifique utile par ailleurs. Dans le secteur du bâtiment, l'idée est de coupler ces machines avec des panneaux solaires. La chaleur nécessaire pour séparer les deux produits proviendrait par conséquent de panneaux solaires thermiques.

Les machines à base d'hydrure

Avec le même principe de fonctionnement, les systèmes à base d'hydrure fonctionnent, sauf que le fluide frigorigène est l'hydrogène; les hydrures sont des alliages métalliques ont la possibilité d'absorption et la désorption d'hydrogène, ces deux phénomènes s'accompagnent avec un transfert de chaleur, la désorption est endothermique et l'absorption est exothermique. Pour rendre les systèmes à base d'hydrure des systèmes qui contribuent dans la protection d'environnement il faut activer l'hydrure par une quantité de chaleur d'origine renouvelable, par exemple le solaire. Concernant ce type de machine, il sera le sujet de cette étude, et on va présenter les différents hydrures utilisés, types de machine, principe de fonctionnement, et les performances de ces systèmes dans les chapitres qui se suivent.

Objectif du travail

L'objectif est de contribuer à l'étude de l'utilisation de l'hydrogène dans des applications résidentielles, dans la présente étude nous nous intéresserons au cas de ses utilisations dans les systèmes de chauffage et climatisation. Nous considérant le cas de la climatisation d'un local utilisant un système à base d'hydrure, l'étude se fait sur la forme la plus simple d'un système à base d'hydrure.

L'apport de chaleur est assuré par l'énergie solaire, plusieurs formes sont proposées, dans cette présente étude nous utilisons les collecteurs cylindro-parabolique. Le système fonctionne entre trois température caractéristiques « T_h , T_m et T_c », nous étudions l'influences de T_h sur les performances du système spécialement le coefficient COP.

La présente étude est divisée en trois chapitres. Dans le chapitre 1 nous allons présenter les hydrures et leurs caractéristiques et aussi les travaux réalisés avant. En chapitre 2 nous décrivons les composants du système et le principe de fonctionnement. En ce chapitre aussi nous faisons une modélisation mathématique des deux parties du système, la partie du solaire avec le collecteur cylindro-parabolique, et la deuxième partie qui contient les deux réservoirs d'hydrures. En chapitre 3 nous présenterons les résultats obtenues à l'aide du code de programmation Matlab ; et nous discuterons ces résultats.

CHAPITRE 1

LES HYDRURES

1.1. Les hydrures métalliques

Certains éléments métalliques, dits de type A possèdent une forte affinité avec l'hydrogène. Ceux-ci forment alors un hydrure thermodynamiquement stable à pression et température ambiante. Leur décomposition n'est possible qu'à haute température. Les éléments de transition de fin de période, dits de type B possèdent une faible affinité avec l'hydrogène. L'hydrure formé est thermodynamiquement instable et ne peut se former qu'à haute pression. La figure 1.1 présente les différents type d'éléments A et B qui forment des hydrures stables comme MgH_2 ou des hydrures instables par exemple $NiH_{0.8}$.

IA	IIA	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIIB	-----	VIII	-----	IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VA	VIIA	VIIIA
H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	We
Cs	Ba	La-Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac-Lr															

La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Atomes type A

Atomes type B

Figure 1.1 : Tableau périodiques des éléments [3]

1.2. Les composés intermétalliques

Les composés intermétalliques obtenus en combinant les deux types d'éléments A et B peuvent former des hydrures de stabilité intermédiaire à pression et à température ambiante. Les caractéristiques des composés intermétalliques AB_n dépendent de la nature des métaux mis en jeu ainsi que de la stœchiométrie du composé qui peut varier entre $n=1$ et $n=5$.

1.2.1. Les composés de type AB_5

Les remarquables propriétés d'hydruration des composés de type AB_5 ont été découvertes vers 1969, tout d'abord avec le composé $SmCo_5$, puis avec $LaNi_5$. Ce dernier peut être aisément substitué par toutes les terres rares en toute proportion sur le site A et par le manganèse, le fer, le cobalt, le cuivre, l'aluminium ou encore l'étain sur le site B dans des proportions assez importantes. Ces composés présentent un excellent comportement en milieu potassique (utilisation en électrochimie) et des capacités très proches de ce que laissent prévoir les caractéristiques mesurées en réaction solide-gaz. $LaNi_5$ absorbe jusqu'à 6 H/M dans des conditions de pression et de température proches de l'ambiante [4].

1.2.2. Les composés de type AB

Le premier composé de type AB étudié pour ses propriétés d'absorption de l'hydrogène a été $ZrNi$. D'autres composés de type AB absorbant l'hydrogène comme $TiFe$, $TiNi$, $ZrCo$,... ont aussi été étudiés. Leur capacité en réaction solide-gaz est comprise entre 2 et 3 H/M. Cependant, ces alliages ont une surface assez sensible aux impuretés présentes dans l'hydrogène commercial et leurs propriétés de stockage se dégradent rapidement au cours de leur utilisation. De plus, leur

activation est relativement complexe et nécessite des cycles à haute température (400°C) et haute pression (50 bars) [4].

1.2.3. Les composés de type AB₂

Les composés intermétalliques de type AB₂ forment une très grande famille structurale et de nombreuses substitutions par des éléments réduisant ou augmentant le volume de maille sont possibles. Le site A est occupé en général par un élément du groupe IVA (Ti, Zr ou une terre rare) et le site B est occupé par un élément de transition de la première rangée (i.e. du vanadium au cuivre). Le pouvoir d'absorption d'hydrogène varie entre 0.77 à 1.8. [3]

1.3. Préparation d'hydrure

Les hydrures sont utilisés sous forme poudre. L'hydrure est un ensemble de plusieurs éléments au moins deux éléments. Il y a un élément primaire et les autres sont des éléments secondaires ou des additifs.

La poudre de l'élément primaire « brute » n'absorbe que très lentement l'hydrogène à des hautes températures, même lorsqu'elle est finement broyée. Cette poudre n'est pas utilisable telle quelle est dans un réservoir. Afin d'améliorer les cinétiques de sorption de l'hydrogène, une préparation spécifique de la poudre est nécessaire. L'utilisation de poudres fines est contraignante. Un grand volume de poudre doit être tamisé pour ne récupérer environ que 2 % de poudre fine. De plus, l'oxydation de ces poudres fines est rapide. Il est donc préférable d'utiliser des poudres fraîchement broyées, sans quoi les performances finales de sorption de l'hydrogène sont diminuées. Afin d'activer la

poudre d'hydrure, des heures de broyage sont nécessaires avec l'ajout des additifs. La poudre finale d'hydrure intermétallique ainsi produite est alors très fine.

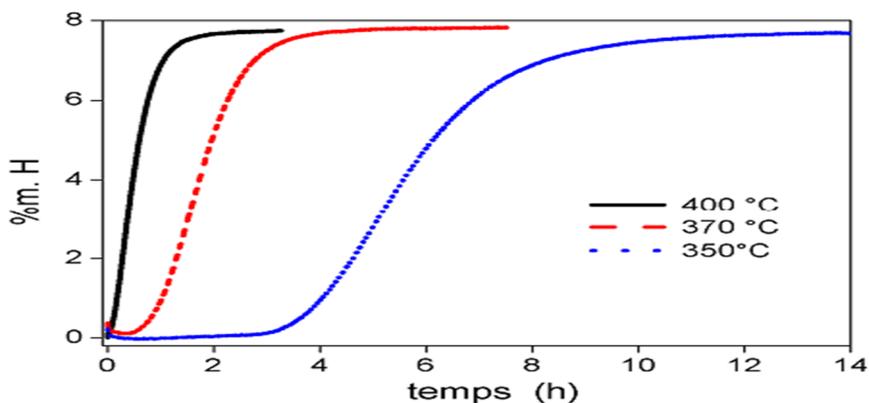


Figure 1.2 : Cinétique d'absorption mesurée sous 3MPa d'hydrogène à différentes température par la poudre de magnésium [5]

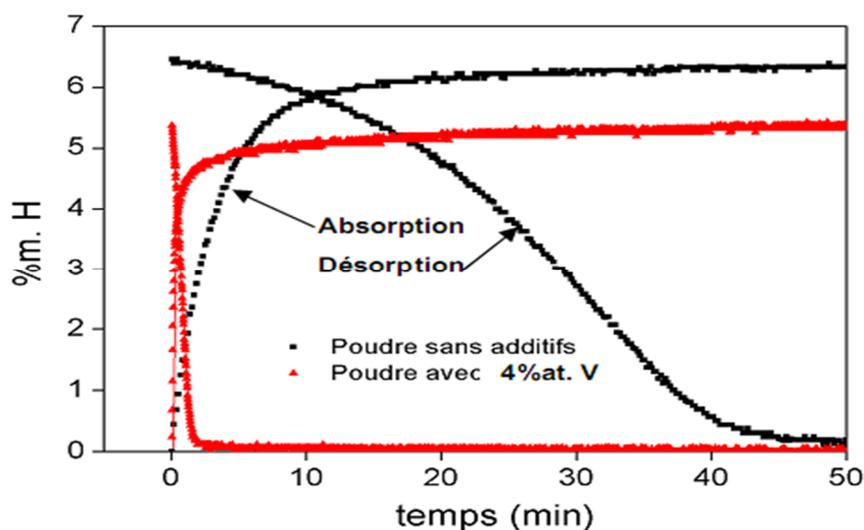


Figure 1.3 : Cinétique d'absorption de désorption d'hydrure de magnésium. [5]

1.4. Les propriétés thermodynamiques des hydrures

1.4.1. Synthèse des hydrures

Le processus d'hydruration en réaction solide-gaz peut être décrit par quatre étapes réversibles:

- (a) L'adsorption des molécules d'hydrogène gazeux à la surface du composé.
- (b) La dissociation de l'hydrogène adsorbé en deux atomes adsorbés.
- (c) L'absorption des atomes d'hydrogène dans le composé.
- (d) La diffusion de l'hydrogène dans le composé.

1.4.2. Courbes isothermes PCT

1.4.2.1 Comportement idéal

Les propriétés thermodynamiques des hydrures sont généralement obtenues en mesurant la pression d'hydrogène en fonction de la quantité d'hydrogène absorbée à une température donnée. Une courbe pression-composition (ou isotherme) est alors obtenue à une température donnée (Figure 1.4).

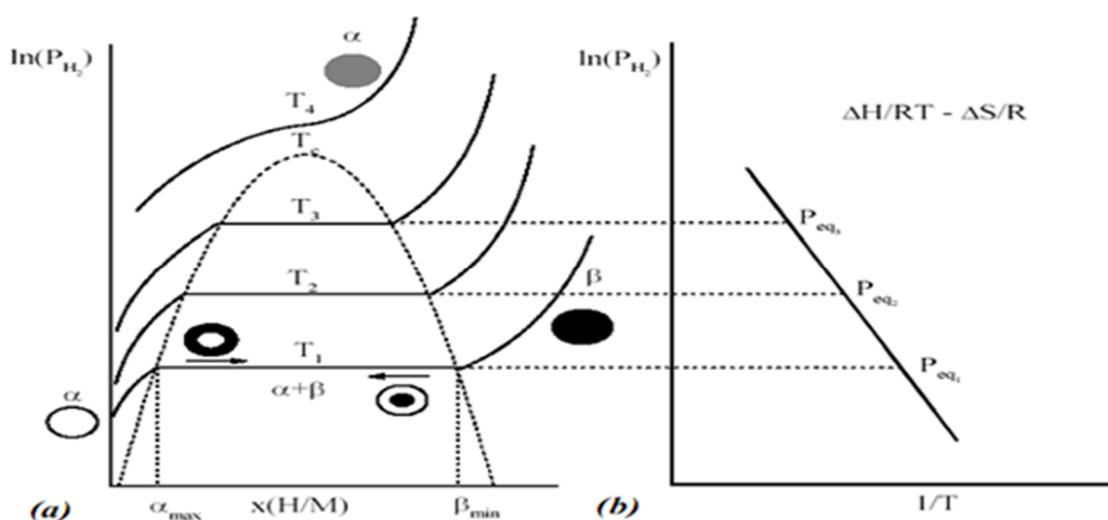


Figure 1.4 : (a) courbes pression-composition-température, (b) courbe pression en fonction de l'inverse de la température. [3]

La courbe isotherme peut être décrite en trois parties :

- Formation de la solution solide α :

Pour de faibles concentrations d'hydrogène, les atomes s'insèrent dans le réseau métallique, une solution solide appelée phase α est alors formée. Dans cette partie de la courbe, deux constituants coexistent (l'hydrogène et le composé intermétallique). Aucune constante d'équilibre ne lie les phases, et deux phases sont en présence (gaz et solide). A température constante, la pression varie avec la concentration d'hydrogène.

- Formation de la phase hydrure β :

Lorsque la limite de solubilité de l'hydrogène dans le métal est atteinte (x), tout nouvel apport d'hydrogène sert à la formation de la phase hydrure β , la phase α diminue. Dans cette partie de la courbe, les deux phases α et β coexistent. À température constante la réaction ne peut se produire qu'à une pression donnée. Cette pression, dite pression de plateau, reste inchangée tant que la réaction n'est pas complète d'où l'apparition d'un plateau.

- Dissolution de l'hydrogène dans la phase β :

Lorsque la phase α est totalement convertie en phase β , celle-ci continue de s'enrichir en hydrogène quand la pression augmente. La pression varie avec la concentration d'hydrogène. Figure 1.4 (a) montre l'évolution de la pression d'équilibre de l'hydrure en fonction de la température. On constate qu'elle augmente avec la température, alors que la largeur du plateau diminue jusqu'à une température critique T_c . Au-delà de cette température T_c , le domaine de non-miscibilité n'existe plus et une solution solide homogène d'hydrogène est observée pour le composé intermétallique.

1.4.2.2. Comportement réel

Toutefois des écarts à l'idéalité sont quelques fois observés (Figure 1.5). Expérimentalement, il y a deux phénomènes qui ne concordent pas avec la théorie :

- une légère inclinaison du palier de pression qui peut être expliquée par des gradients de composition au sein de la phase intermétallique, la pression de palier étant très sensible à la stœchiométrie. La valeur de la pression d'équilibre est alors mesurée au milieu du palier de pression.
- une hystérésis entre les pressions d'absorption et de désorption, les pressions de désorption étant plus faibles. Ce phénomène peut être expliqué par différents processus, notamment le relâchement des contraintes lors de la désorption, la création de défauts dans la matrice métallique, ou l'existence de défauts de mise à l'équilibre.

Les courbes PCI alors obtenues sont similaires à celle reportée en Figure 1.5.

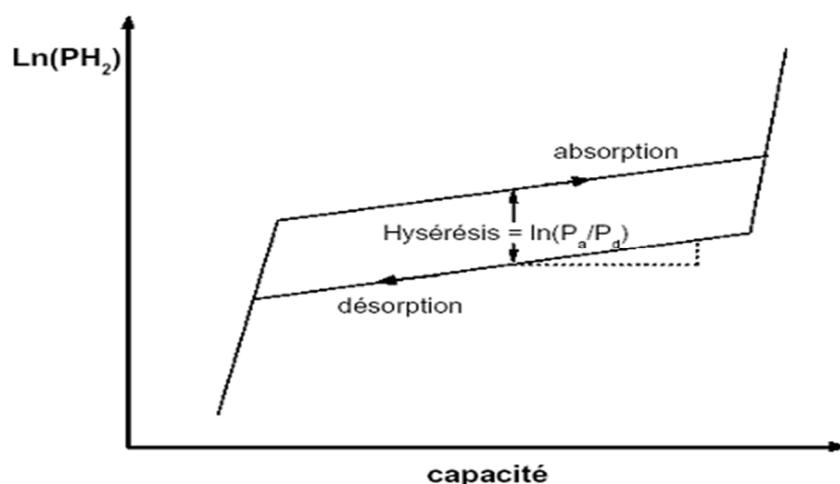


Figure 1.5. Représentation schématique des courbes isothermes d'absorption et de désorption présentant une hystérésis et une inclinaison de plateau. [3]

1.5. Travaux sur les réacteurs d'hydrures

Le réacteur d'hydrure est l'élément principal dans une machine de refroidissement à base d'hydrure. Dans le réacteur d'hydrogène se déroulent tous les phases de fonctionnement à partir du chauffage jusqu'à l'absorption passant par le refroidissement et la désorption. La détermination des performances ainsi que les

caractéristiques d'hydrure est très importantes pour le bon fonctionnement du système. Dans ce contexte beaucoup de travaux ont été mener.

L'importance des additifs a été montrée par Il-Seok-Park et al [6], la comparaison entre LaNi_5 et $\text{LaNi}_{4.75}\text{Al}_{0.25}$ donne une idée sur l'influence des additifs sur la cinétique de la réaction. Figure 8 montre que l'absorptivité de $\text{LaNi}_{4.75}\text{Al}_{0.25}$ est bien supérieure à celle de LaNi_5 , et par conséquent $\text{LaNi}_{4.75}\text{Al}_{0.25}$ peut être utilisé pour le stockage de la chaleur. Mais cela a aussi un autre effet la désorption de l'hydrogène par $\text{LaNi}_{4.75}\text{Al}_{0.25}$ est moins rapide, parce que l'atome d'hydrogène peut s'échapper de la structure d'hydrure LaNi_5 facilement si nous comparons avec la $\text{LaNi}_{4.75}\text{Al}_{0.25}$. [6]

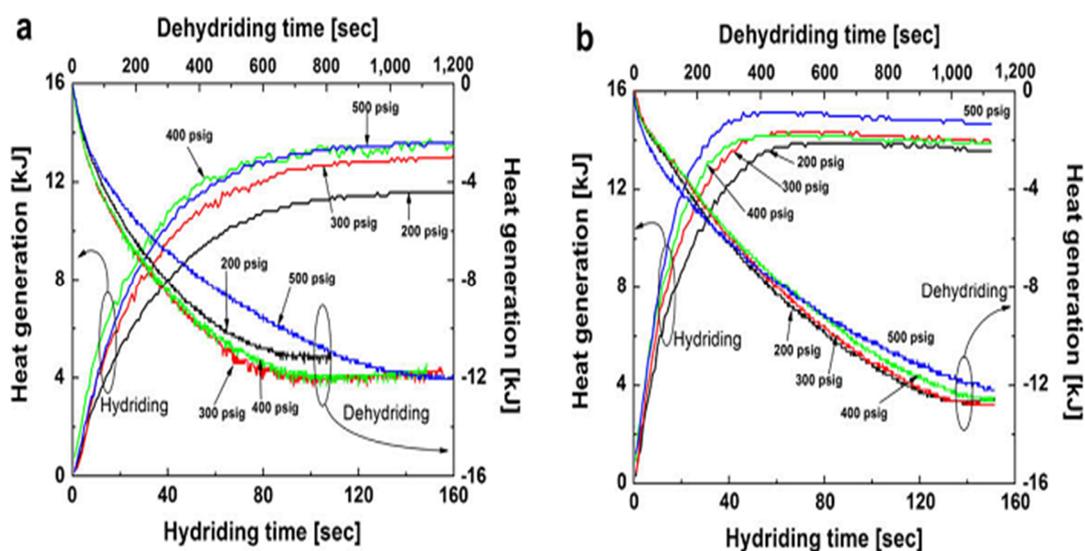


Figure 1.6. (a) le comportement de LaNi_5 (b) le comportement de $\text{LaNi}_{4.75}\text{Al}_{0.25}$ [6]

Muthukumar et al [7] ont proposés un modèle mathématique qui prévoit la variation de la quantité de désorption d'hydrogène en fonction de la température T_h du fluide caloporteur. Le modèle montre que la quantité d'hydrogène libéré augmente énormément avec T_h . Le modèle a été appliqué aux deux hydrures $\text{MmNi}_{4.6}\text{Fe}_{0.4}$ et $\text{MmNi}_{4.6}\text{Al}_{0.4}$. Les résultats sont reportés en Figure 1.7.

Un autre facteur physique qui a aussi des influences sur la quantité d'hydrogène libéré est le coefficient global d'échange de chaleur. Muthukumar et al [8] ont réalisés des expériences sur les mêmes hydrures utilisés dans [7].

Le coefficient global d'échange « U » est une combinaison entre les résistances de convection et de conduction. Muthukumar et al ont changés la valeur de « U » en changeant les propriétés du fluide caloporteur. D'après les expériences menées n'a aucune influence sur la désorption mais l'intéressent est que ce facteur influe sur l'absorptivité, cela est expliqué par la capacité du fluide à évacuer la chaleur de la réaction. . Les résultats sont reportés en Figure 1.8.

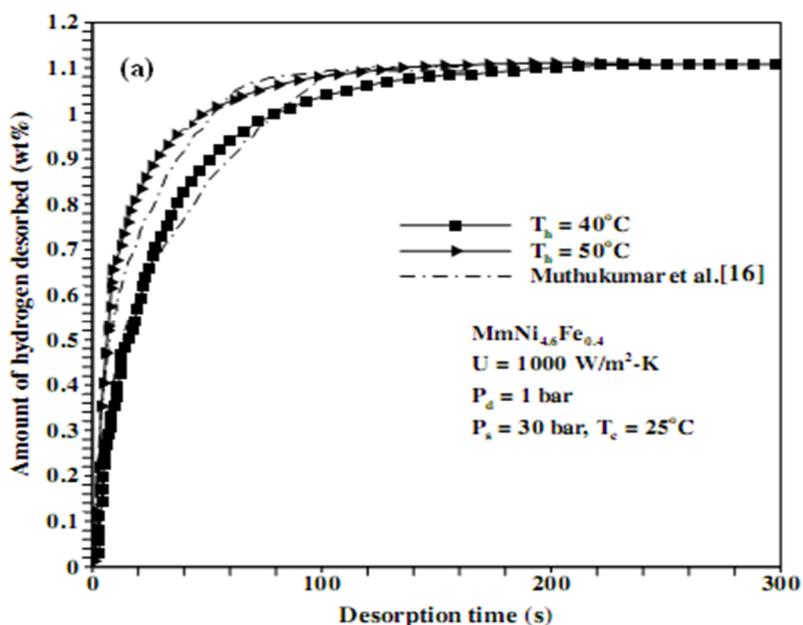
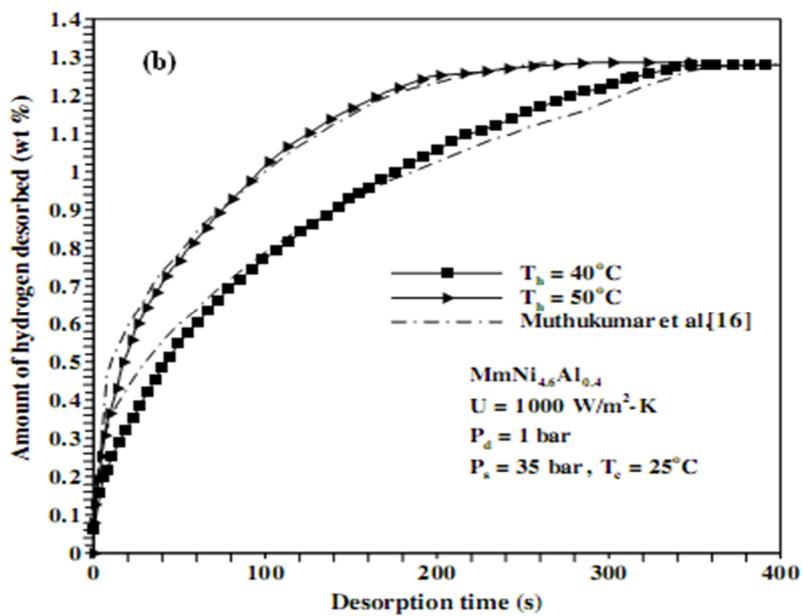
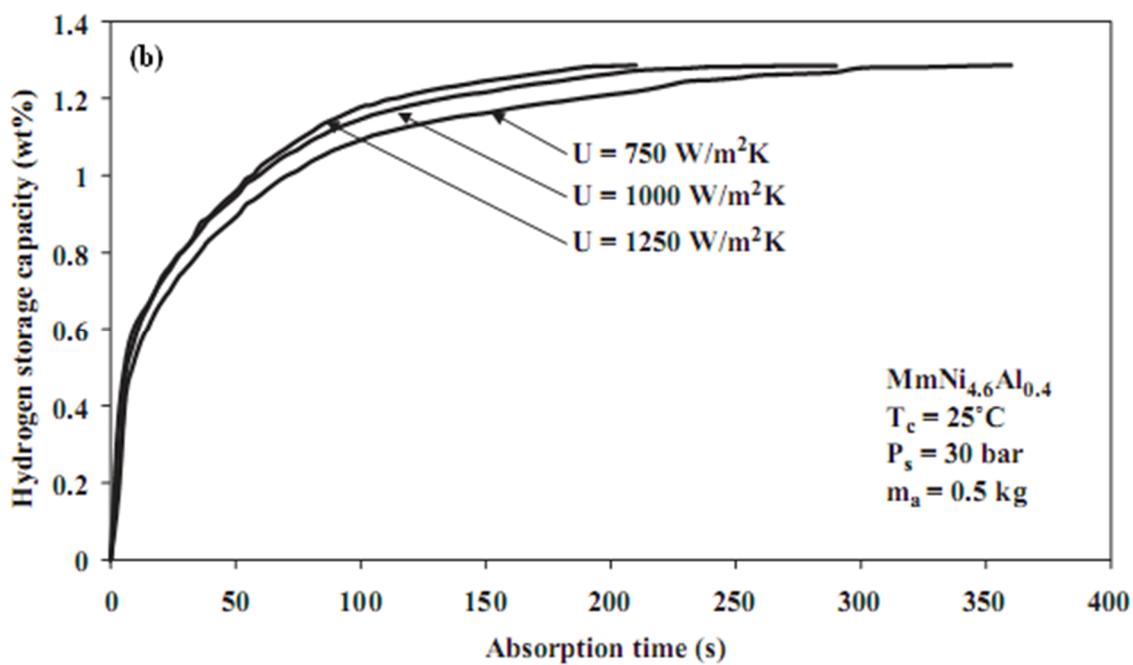


Figure 1.7. L'influence de T_h sur la quantité d'hydrogène libérée

(a) $\text{MmNi}_{4.6}\text{Fe}_{0.4}$ (b) $\text{MmNi}_{4.6}\text{Al}_{0.4}$. [7]

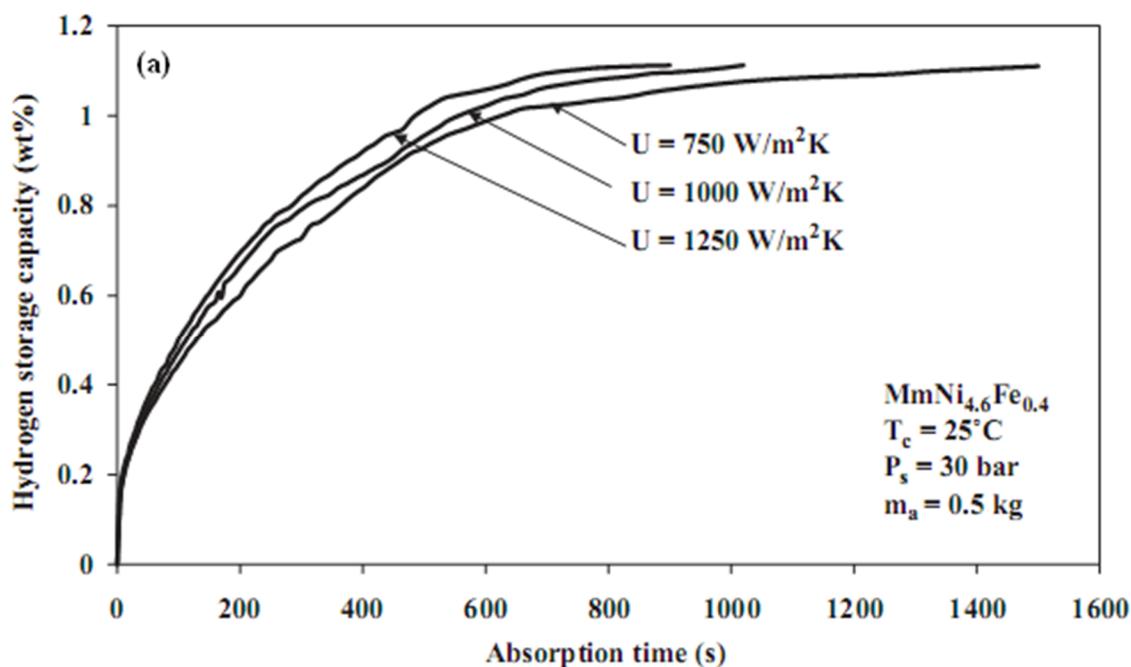


Figure 1.8. L'influence du coefficient d'échange globale sur la quantité d'hydrogène libérée (a) $\text{MmNi}_{4.6}\text{Fe}_{0.4}$ (b) $\text{MmNi}_{4.6}\text{Al}_{0.4}$. [8]

1.6. Les pompes à chaleur à base d'hydrure

L'hydrure a la capacité d'absorber la chaleur en libérant l'hydrogène contenu dans les pores du métal. Nous pouvons profiter de cette caractéristique pour produire du froid. Les problèmes du choix des hydrures, le nombre des réservoirs, les performances et la fiabilité du système ont été le sujet de recherche pour déterminer les caractéristiques convenables pour un système de climatisation. Le tableau 1.1 résume quelques travaux réalisés jusqu'à ce jour.

Tableau 1.1. Travaux sur les systèmes à base d'hydrure. [9]

Institue, pays	hydrures sujet de recherche	Année
IIT Madras, Inde	ZrMnFe/MmNi _{4.5} Al _{0.5}	1999
TED Inc. USA	Ca _{0.4} Mm _{0.6} Ni ₅	1998
IKE, Allemagne	HT :LaNi _{4.5} Al _{0.29} Mn _{0.21} ;LaNi _{4.7} Sn _{0.3} ; LaNi _{4.75} Al _{0.25} ; LaNi _{4.85} Al _{0.15} ; LaNi ₅ LT: La _{0.555} Co _{0.03} Pr _{0.12} Nd _{0.295} Ni ₅ ; Ti _{0.99} Zr _{0.01} V _{0.43} Fe _{0.09} Cr _{0.05} Mn _{1.5}	1999
KAIST, Korai de sud	Zr _{0.9} Ti _{0.1} Cr _{0.55} Fe _{1.45}	2002
SRISIA, Russie	LaNi _{4.6} Al _{0.4} /MmNi _{4.15} Fe _{0.85}	2002
IRCE, China	LaNi _{4.61} Mn _{0.26} Al _{0.13} /La _{0.6} Y _{0.4} Ni _{4.8} Mn _{0.2}	2007
IKE, Allemagne	LmNi _{4.91} Sn _{0.15} / Ti _{0.99} Zr _{0.01} V _{0.43} Fe _{0.09} Cr _{0.05} Mn _{1.5}	2009

1.6.1. Types des pompes à chaleur à base d'hydrure

Selon le nombre des réservoirs et la façon de relier ces réservoirs entre eux, plusieurs systèmes de refroidissement ont été étudiés.

Le système le plus simple est composé de deux réservoirs d'hydrure, « single stage effect ». Beaucoup de travaux sont réalisés suivant cette forme. Les deux réservoirs contiennent deux hydrures différents.

Satheesh et al [10] ont travaillé sur le couple $\text{MmNi}_{4.6}\text{Al}_{0.4}$ and $\text{MmNi}_{4.6}\text{Fe}_{0.4}$. Le système réalisé fonctionne entre trois température caractéristique $T_h=363\text{K}$ / $T_m=298\text{K}$ / $T_c=278\text{K}$ et suivant quatre phases de fonctionnement (Figure 1.9). Abraham et al [11] ont fait une étude sur le couple $\text{Zr}_{0.9}\text{Ti}_{0.1}\text{CrFe}$ and $\text{Zr}_{0.7}\text{Ti}_{0.3}\text{CrFe}$. Mais cette fois ils ont utilisés quatre réservoirs (Figure 1.10). La différence que la production dans le deuxième système est continue alors que dans le système à deux réservoirs il faut attendre trois phases de fonctionnement pour voir l'effet de refroidissement dans la quatrième phase.

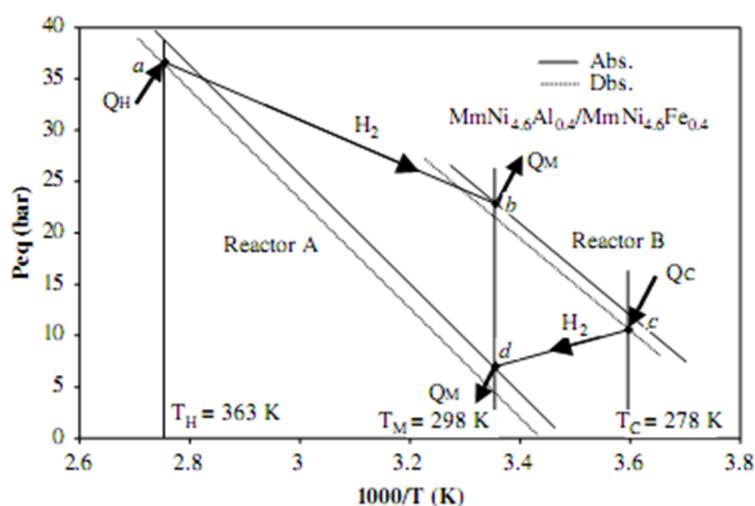


Figure 1.9 : cycle de fonctionnement – système à deux réservoirs. [10]

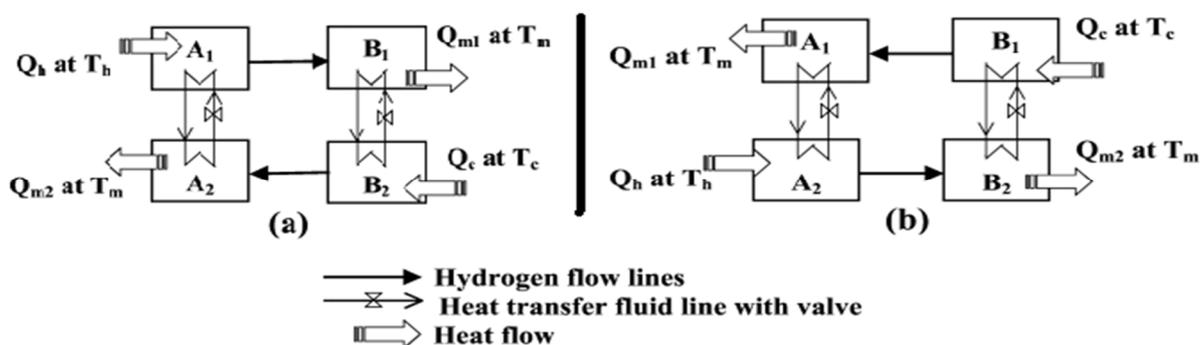


Figure 1.10 : Le système à quatre réservoirs d'hydrure. [11]

Les systèmes à double étage fonctionnent par trois différents hydrures et avec deux réservoirs pour chaque hydrure, c'est-à-dire que le système contient six réservoirs reliés par une méthode appelée star-scheme [12]. Le fonctionnement se déroule selon deux demi-cycle. Willers et Groll [12] ont donné la forme du système et le cycle de fonctionnement (Figure 1.11 ; Figure 1.12).

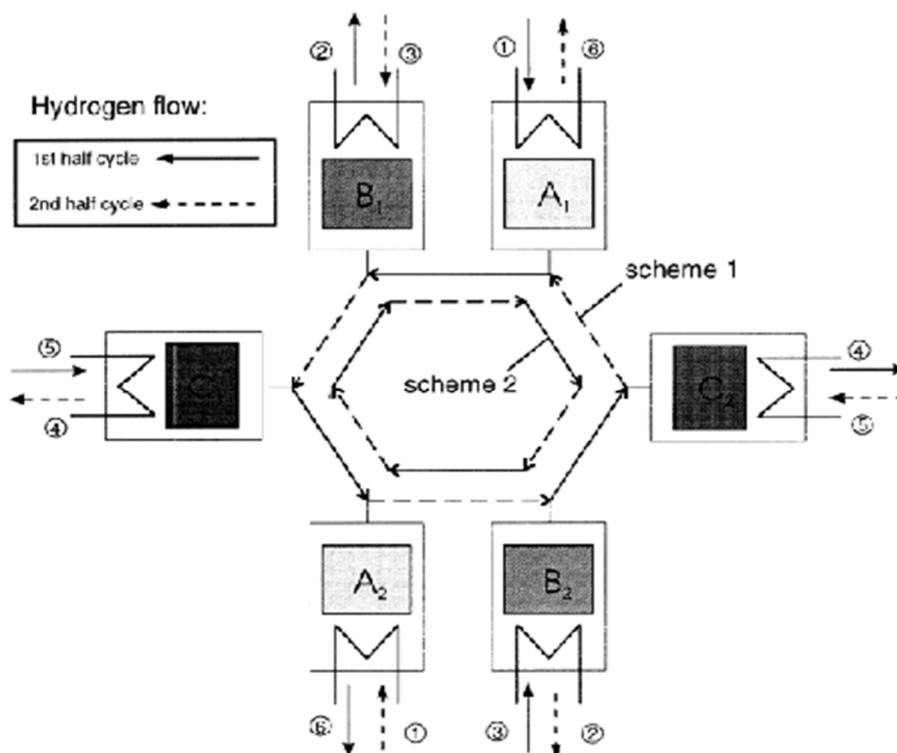


Figure 1.11: Système de refroidissement à double étage. [12]

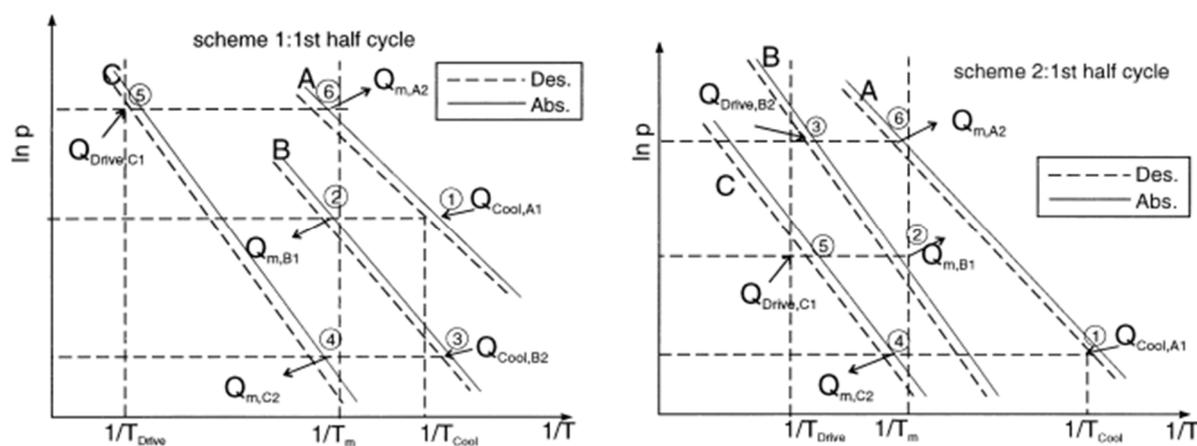


Figure 1.12: Cycle de fonctionnement d'un système à double étage. [12]

Willers et Groll [12] ont donnés aussi un autre système appelé Le système multi-hydrure à vague thermique, le système proposé fonctionne avec neuf réservoirs chaque réservoir contient un différent hydrure. Le mot vague représente la forme du cycle de fonctionnement de ce système (Figure 1.13),

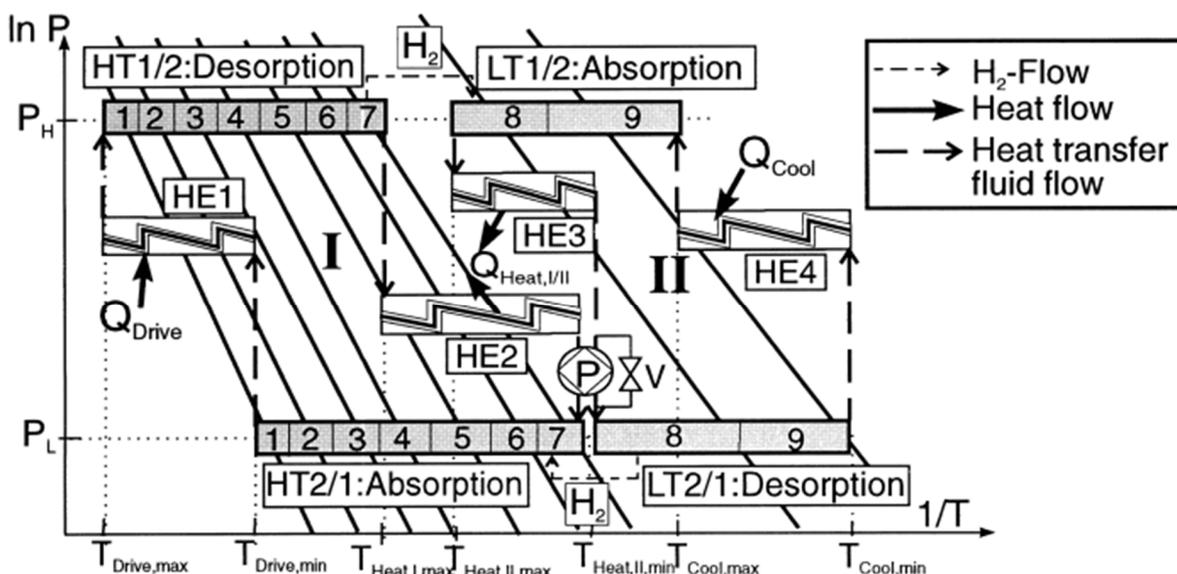


Figure 1.13 : Cycle de fonctionnement système multi-hydrure à vague thermique. [12]

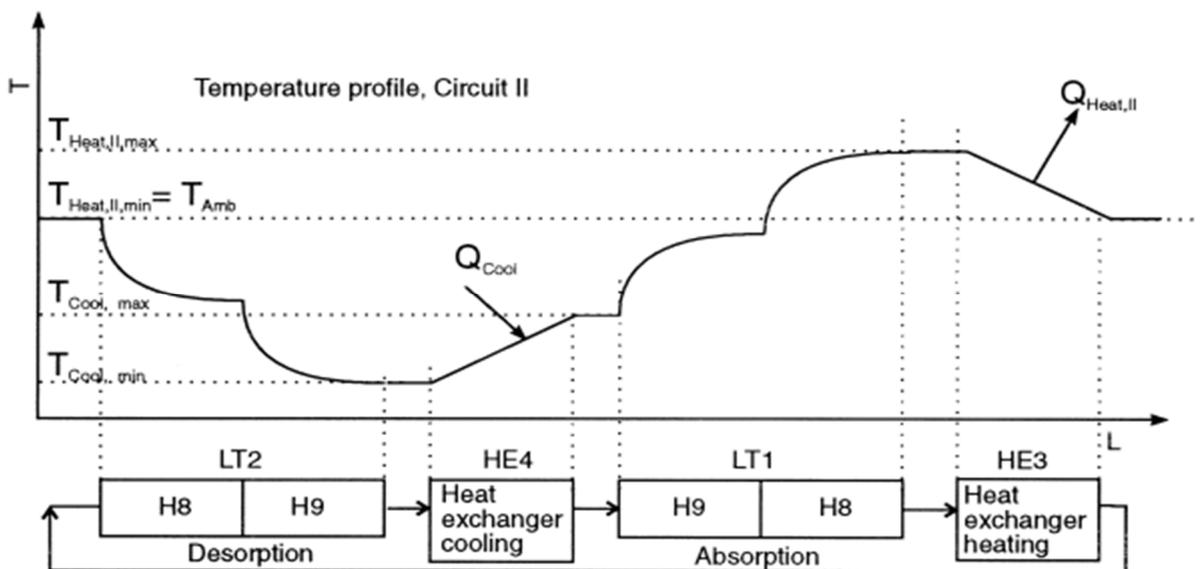


Figure1.14: Température du profil II, système multi-hydrure à vague Thermique.[12]

CHAPITRE 2

MODELISATION

2.1. Présentation du système

Comme il a été mentionné précédemment, l'objectif de notre travail est de modéliser un système de refroidissement d'un local en utilisant un système à base d'hydrure pour générer le froid, et un système solaire pour fournir l'énergie nécessaire pour le fonctionnement du système de refroidissement.

Notre système de refroidissement est composé comme le montre la figure 2.1, de deux parties.

Partie solaire consiste à assurer l'énergie thermique pour le fonctionnement du système d'hydrure. Cette partie capte et concentre l'irradiation solaire utilisant des miroirs, un fluide caloporteur absorbe cette énergie, qu'elle est après transférer vers le système à base d'hydrure pour l'activer.

Partie d'unité de réfrigération composée de deux réservoirs d'hydrures, ces deux réservoirs sont interconnectés pour permettre la circulation d'hydrogène au cours de fonctionnement. Les pressions caractéristiques de fonctionnement exigent un niveau de température bien défini. Ce niveau est assuré par l'énergie générée par la partie solaire.

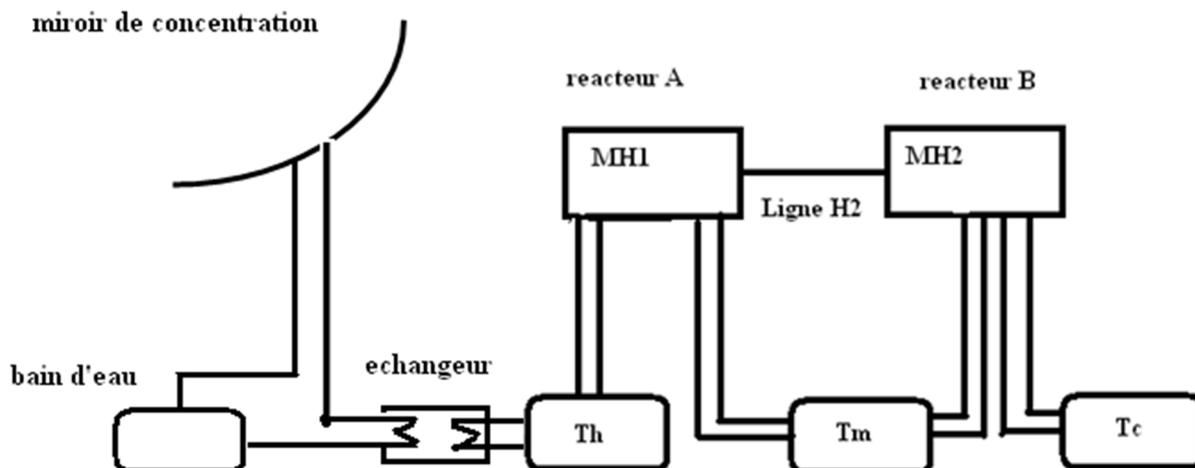


Figure 2.1: Schéma du système

2.1.1 La partie solaire

L'énergie solaire est l'énergie la plus prometteuse dans le domaine des énergies renouvelables, c'est une énergie propre et gratuite. L'énergie solaire doit être captée et concentrer à cause de la forme diffus des rayons solaire, plusieurs techniques de concentration sont proposées, les tours solaire, les cheminées solaire, les dishes et les cylindro-paraboliques.

Notre choix est porté sur les systèmes cylindro parabolique pour la maturité industrielle de la méthode et le niveau de température obtenu. En figure 2.2 un concentrateur cylindro- parabolique est représenté.

Au centre du concentrateur s'écoule un caloporteur, généralement deux types de caloporteur sont utilisés, l'eau ou l'huile synthétique. Le caloporteur sert à transférer la chaleur concentrer vers le lieu d'utilisation.

Le caloporteur circule dans un tube absorbant. Pour réduire les pertes de chaleur à travers les parois de ce tube, il est entouré par une couche de verre. Cet ensemble de verre et de tube absorbant est situé dans la ligne focale du cylindro-parabolique.

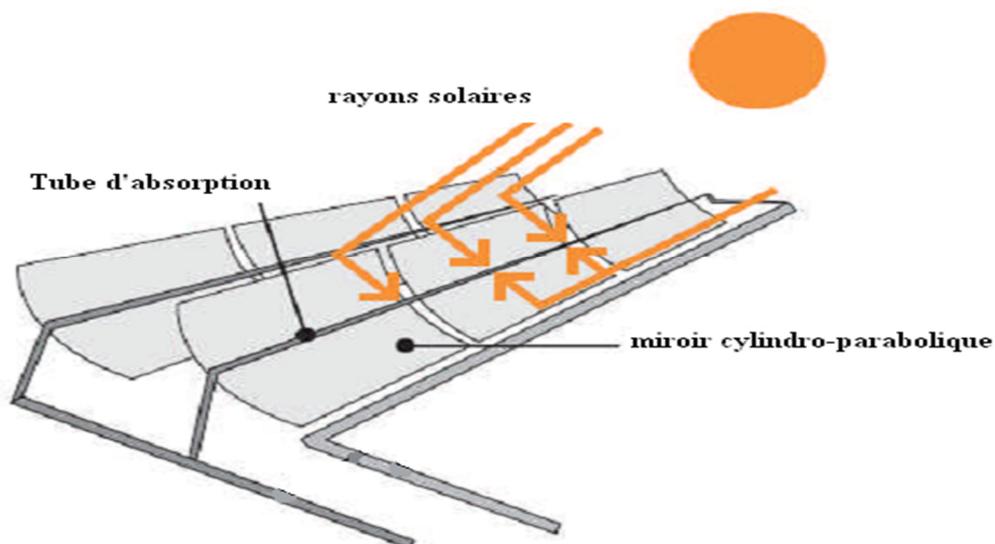


Figure 2.2 : Schéma d'un système de concentration

2.1.2. Le système à base d'hydrure

La pompe à chaleur à base d'hydrure est composée par deux réservoirs A et B. Le réservoir A est rempli par l'hydrure $\text{MmNi}_{4.5}\text{Al}_{0.4}$ (MH1) et le réservoir B est rempli par l'hydrure $\text{MmNi}_{4.2}\text{Al}_{0.1}\text{Fe}_{0.7}$ (MH2). A et B sont connectés par une canalisation qui permet le transfert d'hydrogène entre eux.

Chaque réservoir est relié à deux bains de fluide caloporteur de températures différentes. Pour l'hydrure MH1 le fluide caloporteur est l'eau, et Pour l'hydrure MH2 le fluide caloporteur est l'air.

Les deux réservoirs sont de dimensions identiques, de longueur L et de diamètre externe R_{ext} , dans chaque réservoir le fluide caloporteur s'écoule à l'extérieur du réacteur pour améliorer l'échange de chaleur entre le fluide caloporteur et l'hydrure. L'hydrogène s'écoule dans un tube à l'intérieur du réacteur, un filtre empêche les particules d'hydrure de s'écouler avec l'hydrogène.

Quand l'effet de refroidissement commence à apparaître un système de régulation permet l'écoulement du fluide caloporteur vers le local à refroidir. Ceci permet l'échange de chaleur entre le fluide caloporteur et l'air de notre local.

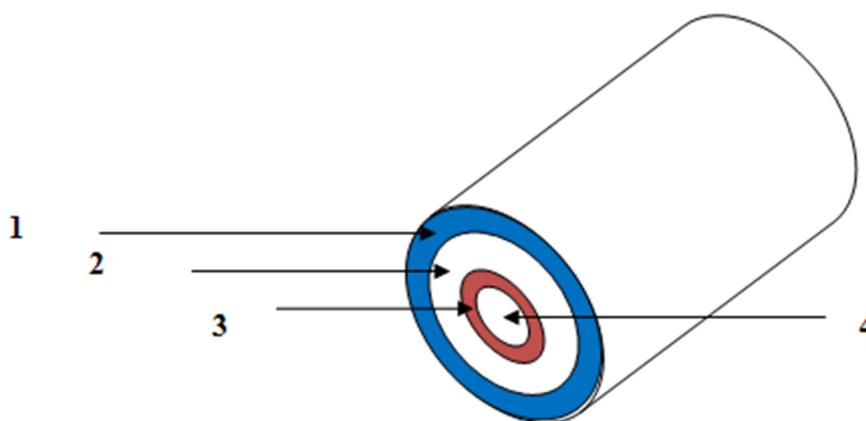


Figure 2.3: Schéma simplifié d'un réacteur d'hydrure

- 1- le fluide caloporteur
- 2- l'hydrure métallique
- 3- filtre
- 4- l'hydrogène

2.2. Le principe de fonctionnement

La MHHP est caractérisé par les températures de fonctionnement T_h - T_m - T_c . Le système auxiliaire assure l'énergie suffisante pour atteindre ce niveau de température.

Au début le réservoir A contient une quantité maximal d'hydrogène et pour le réservoir B le niveau d'hydrogène est minimal.

Le processus de fonctionnement est divisé en quatre phases. Deux phases où l'échange de chaleur s'accompagne par un transfert de masse, et deux autre phases où il n'y qu'un échange de chaleur.

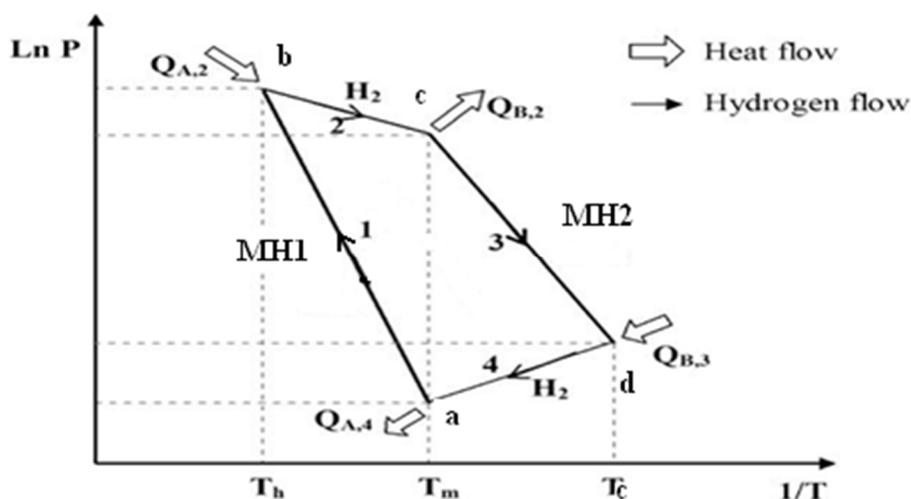


Figure 2.4: cycle de fonctionnement.[13]

Le cycle de fonctionnement du système est représenté en figure 2.4. Les quatre phases sont :

Processus ab:

Dans cette partie les deux réservoirs A et B sont chauffés à T_h et T_m respectivement. A ce niveau de température, la pression d'équilibre P_{eq_A} au niveau du réservoir A est supérieure à celle du réservoir B P_{eq_B} .

Processus bc:

Après l'ouverture de la vanne, l'hydrure MH1 commence la désorption d'hydrogène et comme $P_{eq_A} > P_{eq_B}$, l'hydrogène s'écoule de A vers B. La désorption est endothermique, donc le MH1 absorbe l'énergie de fluide caloporteur.

En même temps B absorbe l'hydrogène mais il rejette une quantité de chaleur au fluide caloporteur parce que l'absorption est exothermique, l'opération s'arrête après le transfert d'une quantité définie d'hydrogène.

Processus cd :

Cette phase consiste à préparer l'hydrogène de s'écouler de MH2 vers :MH1. Pour cela il faut que la pression d'équilibre de B devienne supérieure à celle de A. Pour atteindre cette différence en pression les deux hydrures MH1 et MH2 sont refroidis à T_m et T_c respectivement par le moyen des bains d'eau reliés à ces deux hydrures.

Processus da :

A l'ouverture de la vanne, MH2 commence la désorption de l'hydrogène à une température T_c . Comme la pression d'équilibre en MH2 est supérieure à la pression d'équilibre en MH1, l'hydrogène s'écoule de B vers A.

La désorption est un processus endothermique, parce que l'hydrogène est besoin d'une quantité d'énergie pour se libérer et quitter les pores du métal d'hydride. Le transfert d'énergie est du fluide caloporteur vers l'hydrure MH2. Ici la

température du fluide diminue, et la quantité transférée est appelée le pouvoir de refroidissement.

2.3. Modélisation

Pour assurer le fonctionnement du cycle de refroidissement par hydrure, il y a lieu de fournir de l'énergie à ce système. Dans la présente étude, on a considéré un concentrateur solaire de type cylindro-parabolique.

2.3.1. Modélisation du système de concentration d'énergie solaire

Le but de cette partie d'étude est de déterminer la température d'eau et la puissance de chauffage à la sortie du collecteur. Pour réaliser ce but, il faut déterminer l'énergie solaire absorbée par le collecteur. Mais avant calculer l'énergie absorbée, il faut déterminer le potentiel solaire au site choisi.

2.3.1.1. Potentiel solaire

La valeur du flux de rayonnement solaire reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (soit à environ 80 km d'altitude) varie au cours de l'année avec la distance Terre/Soleil. Sa valeur moyenne I_{sc} est appelée la **constante solaire**, elle vaut $I_{sc}=1367 \text{ w/m}^2$. [Duffie 1991]

La terre tourne autour du soleil dans une orbite elliptique. Ce mouvement résulte en variation la distance du terre-soleil. Par conséquent, l'énergie solaire atteignant la terre varie aussi. Cette variation est calculée par la formule suivante. [Duffie 1991]

$$I_{so} = I_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360}{365} N \right) \quad 2.1$$

I_{sc} : la constante solaire qui vaut 1367 w/m²

N : le numéro du jour de l'année. Il varie de $N=1$ pour le 1 janvier à $N=365$ pour le 31 décembre.

Le rayonnement arrivant à la surface de la terre est divisé en deux parties, rayonnement direct, et rayonnement diffus.

- Le rayonnement direct est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications.

- Le rayonnement diffus est la part du rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère.

- Le rayonnement global est la somme du rayonnement direct et diffus. Figure 2.5

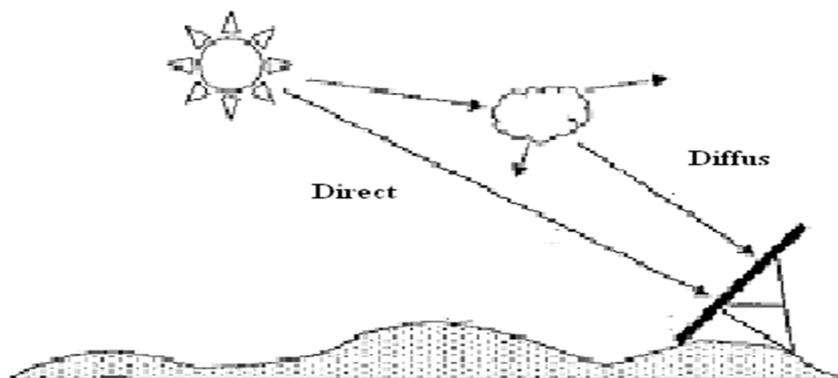


Figure 2.5: composant du rayonnement solaire au sol

La relation entre un plan de captation d'énergie solaire et les rayons solaires arrivant sur ce plan est définie par plusieurs angles géométriques.

- Latitude Φ : La latitude d'un lieu correspond à l'angle avec le plan équatorial, que fait le rayon joignant le centre de la terre à ce lieu. L'équateur terrestre est donc caractérisé par une latitude égale à 0° , le pôle nord par la latitude $+90^\circ$ et le pôle sud par la latitude -90° .
- Déclinaison δ : l'angle que fait le plan de l'équateur terrestre avec la direction terre-soleil est appelé la déclinaison. Cet angle varie tout au long de l'année de façon symétrique entre $-23^\circ 26'$ et $+23^\circ 26'$.

La valeur de la déclinaison peut être calculée avec une bonne précision par la formule de Cooper. [Duffie et Beckman1991]

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \quad 2.2$$

- Angle de Zénith θ_z : l'angle entre le vecteur d'incidence du rayonnement et la normale sur la surface horizontale.
- Angle Azimut γ : c'est l'angle que fait la direction de la projection du Soleil sur le plan horizontal avec la direction Sud, cet angle étant orienté positivement vers l'Ouest.
- Angle β : angle entre le plan incliné en question et la surface horizontale - $90 < \beta < 90$.
- Angle horaire ω : L'angle horaire du soleil est l'angle formé par le plan méridien du lieu et celui qui passe par la direction du soleil si l'on prend comme origine le méridien de Greenwich, l'angle horaire est compris entre 0°

et 360° La valeur de l'angle horaire est nulle à midi solaire, négative le matin, positive dans l'après midi et augmente de 15° par heure.

$$\omega = (\text{Hour} - 12) * 15$$

2.3

- Angle d'incidence θ : l'angle d'incidence est l'angle entre un rayon arrivant directement du soleil et la normale du plan quelconque qui fait un angle β avec l'horizontale. On peut calculer l'angle d'incidence par la formule suivante [Duffie 1991].

$$\begin{aligned} \cos\theta = & \sin(\delta) * \sin(\Phi) * \cos(\beta) - \\ & \sin(\delta) * \cos(\Phi) * \sin(\beta) * \cos(\gamma) + \cos(\delta) * \cos(\Phi) * \cos(\beta) * \cos(\omega) + \\ & \cos(\delta) * \sin(\Phi) * \sin(\beta) * \cos(\omega) * \cos(\gamma) + \cos(\delta) * \sin(\beta) * \sin(\omega) * \sin(\gamma); \end{aligned} \quad 2.4$$

Pour la surface horizontale $\beta=0$ l'angle d'incidence est égal à l'angle de Zenith.

$$\cos\theta = \cos(\delta) * \sin(\Phi) * \cos(\omega) + \sin(\delta) * \sin(\Phi) \quad 2.5$$

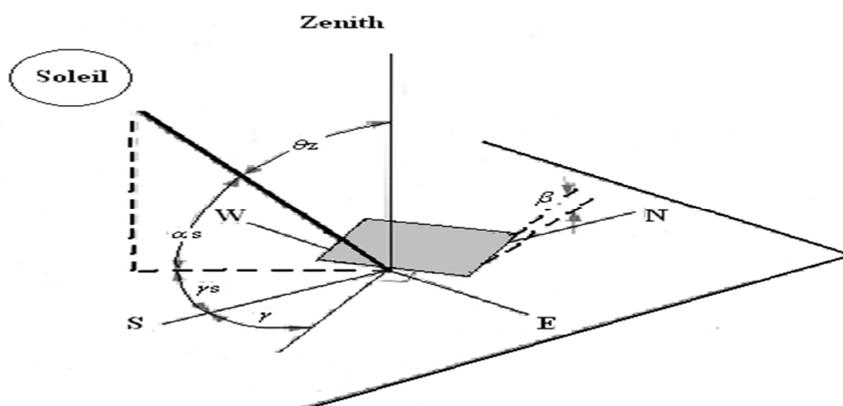


Figure 2.6 : Les angles solaires

Les rayons solaires arrivant sur terre sont influencés par deux phénomènes qui varient l'intensité des rayons, la dispersion des rayons et l'absorption du spectre.

Les radiations traversant l'atmosphère entre interagissent avec les molécules d'air. Ces particules dispersent ou absorbent les rayons solaires. La dispersion dépend du nombre, dimensions molécules, et le temps. L'absorption est due à la présence du dioxyde de carbone et la vapeur d'eau par exemple. Les ondes courtes sont presque totalement absorbées, jusqu' à le niveau de 0.35 μm où il n'y pas d'absorption. [Duffie 1991]

Avec l'atténuation d'énergie solaire au niveau de l'atmosphère, plusieurs modèles existent pour l'estimation du rayonnement solaire. Le modèle le plus simple et le plus utiliser est celui de Hottel.

Dans ce modèle, des corrélations sont présentées pour estimer la transmission de l'atmosphère pour quatre différents types de climat, les corrélations prennent en considération l'angle de zenith et l'altitude.

La transmittance τ_b de l'atmosphère pour les radiations directes est donnée par

$$\tau_b = a_0 + a_1 \exp\left(\frac{K_s}{\cos(\theta_z)}\right) \quad 2.6$$

La transmittance τ_d de l'atmosphère pour les radiations diffus est donnée par

$$\tau_d = 0.271a_0 - 0.2939\tau_b \quad 2.7$$

a_0 , a_1 et K_s sont pour des conditions de ciel clair.

Pour calculer a_0 , a_1 et K_s à des conditions différentes, le modèle présente des corrections concernant les paramètres a_0 , a_1 , et K_s .

$$a_0^* = 0.4237 - 0.00821(6.5 - A)^2 \quad 2.8$$

$$a_1^* = 0.5055 - 0.00595(6.5 - A)^2 \quad 2.9$$

$$K_s^* = 0.2711 - 0.01858(2.5 - A)^2 \quad 2.10$$

Après

$$a_0 = a_0^* \cdot r_0 \quad 2.11$$

$$a_1 = a_1^* \cdot r_1 \quad 2.12$$

$$K_s = K_s^* \cdot r_{Ks} \quad 2.13$$

Les valeurs de r_0 , r_1 et r_{ks} sont données dans le tableau suivant :

Tableau 2.1: Les valeurs des coefficients de la méthode de Hottel

Type de climat	r_0	r_1	r_{Ks}
Tropique	0.95	0.98	1.02
Été	0.97	0.99	1.02
Hiver	1.03	1.01	1.00

Les facteurs d'Hottel sont utilisés pour déterminer l'intensité des radiations directes I_b et radiations diffus I_d .

$$I_b = I_{so} \tau_b \cos(\theta_z) \quad 2.14$$

$$I_d = I_{so} \tau_d \cos(\theta_z) \quad 2.15$$

2.3.1.2. Le système de poursuite des rayons solaires

Afin d'augmenter l'énergie solaire concentrer, le système solaire subit un mouvement de poursuite solaire. Le système tourne autour un axe orienté suivant la

direction Nord-Sud. Le concentrateur suit le mouvement du soleil. Le mouvement est caractérisé par l'angle (β), c'est l'angle limité par le plan horizontal et le plan incliné du concentrateur. Cette angle est donnée dans le cas de notre poursuite par l'équation suivante [14].

$$\beta_{\text{opt}} = \tan^{-1}\left(\frac{-\cos(\delta)\sin(\omega)}{\cos(\theta_z)}\right) \quad 2.16$$

Ou

δ , ω , θ_z sont respectivement, la déclinaison, angle horaire, et angle zénith déterminées par les équations 2.2, 2.4 et 2.5.

2.3.1.3. Energie Absorbé par le collecteur

Il est nécessaire de calculer le coefficient d'efficacité optique pour déterminer l'énergie absorbé par le collecteur. Le tube où circule le fluide caloporteur est entouré par une couche de verre pour réduire les pertes de chaleur. Les coefficients de réflectivité, absorptivité et la transmission ont abordées ailleurs (Duffie et Backman 1991).

Angle θ' de réfraction du rayonnement solaire est donnée par :

$$\theta' = \sin^{-1}\left(\frac{\sin(\theta)}{n_2 / n_1}\right) \quad 2.17$$

Où

θ : angle d'incidence du rayonnement solaire.

n_2/n_1 est égale à 1.562

La transmission du verre d'isolation de la radiation direct est donnée par :

$$\tau_a = \exp\left(\frac{-K_e \delta_c}{\cos(\theta')}$$

Où

K_e est le Coefficient représentant la qualité du verre, et dont la valeur varie entre 4 m^{-1} et 32 m^{-1}

La réflectivité est donnée par

$$\rho_1 = \frac{(1 - n_1 / n_2)^2}{(1 + n_1 / n_2)^2} \quad 2.19$$

La transmission du verre d'isolation de la radiation diffus est donnée par :

$$\tau_r = \frac{(1 - \rho_1)}{(1 + \rho_1)} \quad 2.20$$

La transmission globale du verre vaut :

$$\tau = \tau_a \cdot \tau_r \quad 2.21$$

Le coefficient d'efficacité optique est donné par :

$$\eta_o(\theta) = \rho_c \cdot \alpha_p \cdot \tau_r \quad 2.22$$

α_p : Absorptivité du tube

ρ_c : réflectivité du tube

Finalement la puissance générée par le collecteur est donnée par : (Duffie et Backman 1991)

$$S_b = I_b \cdot \eta_o(\theta) \cdot \cos(\theta) \cdot \xi(\theta) \quad 2.23$$

Avec

θ donnée par l'équation 3.4.

$\xi(\theta)$: coefficient de correction sa formule est présentée au dessous [21]:

$$\xi(\theta) = 1 - \left(\frac{f}{L}\right) \left(1 + \frac{W^2}{48.f^2}\right) \cdot \tan(\theta) \quad 2.24$$

Où

W : La largeur du collecteur

L : La longueur du collecteur

f : la distance focale

Cette partie de calcul consiste à déterminer le potentiel solaire dans le site, une fois le potentiel est calculé, des équations sont utilisées pour déterminer l'énergie absorbée par le collecteur qu'elle est donnée par l'équation 2.23. Dans la partie suivante, on détermine l'énergie effective absorbé par le caloporteur car l'énergie absorbée par le collecteur subit des pertes thermiques à travers le corps du concentrateur.

2.3.1.4. Transfert de chaleur vers le fluide

Le transfert de chaleur dans le concentrateur cylindro parabolique se fait par deux méthodes, par convection et par rayonnement. Le tube de circulation du fluide caloporteur est entouré par une couche de verre pour minimiser les pertes de chaleur, l'espace entre la couche isolante et le tube est sous vide, donc le transfert dans cette partie est assuré par rayonnement. La convection se présente dans

deux régions, à l'intérieur de tube où il circule l'eau et autour la couche isolante qu'elle est en contact avec l'air environnant.

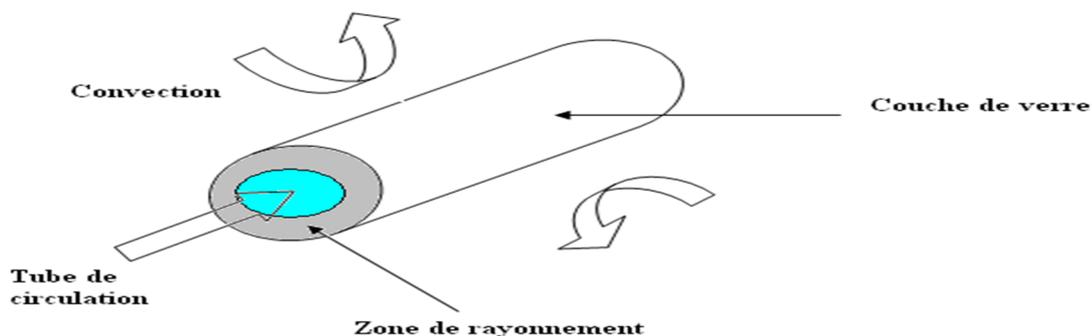


Figure 2.7 : Les modes de transfert de chaleur dans le concentrateur.

Le débit de masse est assumé pour être constant, il est calculé en basant sur la production de champ solaire.

$$m^* = \frac{Q_{nom}}{(H_{ff} - H_{fi})} \quad 2.25$$

Avec

Q_{nom} : la puissance véhiculé par le caloporteur.

H : enthalpie du fluide caloporteur (ff : final, fi : initiale).

Les propriétés d'eau sont prises ici dans la température moyenne, et sont reportées en annexe.

Le fluide caloporteur circule dans le tube absorbant, la section de passage est donnée par :

$$A_i = \frac{\pi D_{ti}^2}{4} \quad 2.26$$

Avec

D_{ti} : Diamètre intérieur de tube

La vitesse à l'intérieur du tube est :

$$U_f = \frac{4 \dot{m}}{\rho_f \cdot A_i} \quad 2.27$$

Avec

\dot{m} : Débit du fluide caloporteur

A_i : Section de passage

ρ_f : La densité du fluide caloporteur

Pour déterminer la nature du régime d'écoulement, on calcul le nombre de Reynolds à partir de la relation suivante :

$$R_{ef} = \frac{U_f \cdot D_{ti}}{\gamma_f} \quad 2.28$$

Avec

γ_f : La viscosité cinématique du fluide caloporteur

U_f : La vitesse d'écoulement

D_{ti} : Diamètre intérieur du tube

Le calcul du coefficient d'échange de chaleur par convection est donné selon le régime d'écoulement :

Si $Re < 2300$

$$Nuf = 3,7 \quad 2.29$$

Si $Re > 2300$

$$Nuf = 0.021 \cdot Re_f^{0.8} \cdot Pr_f^{0.43} \frac{Pr_f}{Pr_w} \quad 2.30$$

P_{rf} : nombre de Prandtl à la température moyenne du fluide

P_{rw} : nombre de Prandtl à la température de tube

R_{ef} : Nombre de Reynolds pour le fluide caloporteur

Et

$$h_f = \frac{Nu_f \cdot K_f}{D_{ti}} \quad 2.31$$

K_f est la conductivité de tube de circulation

Nu_f : Nombre de Nusselt

2.3.1.5. Perte de chaleur par convection

Il est nécessaire d'évaluer le coefficient d'échange de chaleur par convection entre la couche d'isolation et l'air environnant. La couche isolante a deux parties, partie extérieure coté du l'air environnant et partie intérieure coté du tube de circulation, les deux faces sont caractérisées par deux différentes températures T_{cm1} et T_{cm2} . Une première approximation est donnée pour les deux températures de la coche de verre isolante.

Où T_{cm1} et T_{cm2} sont la température intérieure et la température extérieure de la couche du verre qui sont calculées par les formules suivantes :

$$T_{cm1} = T_{cm} + 2 \quad 2.32$$

$$T_{cm2} = T_{cm} - 2 \quad 2.33$$

Avec

$$T_{cm} = \frac{T_{pm} + T_a}{2} \quad 2.34$$

T_{pm} : Température moyenne du Concentrateur cylindro- parabolique

Les propriétés d'air sont données à la température T_a . Et sont reportées en annexe

$$R_{ea} = \frac{U_a \cdot D_{co}}{\gamma_a} \quad 2.34$$

γ_a : La viscosité d'air

U_a : La vitesse d'air

Le nombre de Nusselt est donnée selon le nombre du Raynolds par:

Si $Re < 1000$

$$Nu_c = 0.5(R_{ea}^{0.5}) P_{ca}^{0.38} \left(\frac{P_{ca}}{P_c} \right)^{0.25} \quad 2.35$$

Avec

P_{ca} est le nombre de Prandtl donné à la température T_{cm2}

P_c est le nombre de Prandtl donné à la température T_a

Si $1000 < Re < 200000$

$$Nu_{uc} = 0.26(R_{ea}^{0.6}) P_{ra}^{0.38} \left(\frac{Pr_{ca}}{Pr_c} \right)^{0.25} \quad 2.36$$

Et si $Re > 200000$

$$Nu_{uc} = 0.23(R_{ea}^{0.8}) Pr_{ca}^{0.4} \left(\frac{Pr_{ca}}{Pr_c} \right)^{0.25} \quad 2.38$$

Donc

$$h_{ca} = \frac{Nu_{ca} \cdot K_{cover}}{D_{co}} \quad 2.39$$

h_{ca} : C'est le coefficient d'échange de chaleur par convection entre le l'air ambiant et la couche isolante.

K_{cover} : La conductivité de la couche d'isolation

D_{co} : Le diamètre extérieur de la couche isolante

2.3.1.6. Perte de chaleur par radiation

Le coefficient d'échange de chaleur par radiation entre le tube et le verre d'isolation est donné par

$$H_{rtc} = \frac{\sigma \cdot (T_{pm}^2 + T_{Cm1}^2) \cdot (T_p + T_{Cm1})}{\frac{1 - \varepsilon_t}{\varepsilon_t} + \frac{(1 - \varepsilon_c) \cdot D_{to}}{\varepsilon_c \cdot D_{ci}} + \frac{1}{F_{12}}} \quad 2.40$$

Avec:

σ : coefficient de Boltzmann

ξ : émissivité (t : pour tube, c : pour la couche d'isolation).

F_{12} : Facteur de forme

Le coefficient d'échange de chaleur par radiation entre le verre d'isolation et l'atmosphère est donné par :

$$H_{ra} = \sigma \cdot \varepsilon_c \cdot (T_{sky}^2 + T_{Cm2}^2) \cdot (T_{sky} + T_{Cm2}) \quad 2.41$$

Avec

$$T_{sky} = 0,0552 \cdot T_a^{3/2} \quad 2.42$$

2.3.1.7 Le coefficient global d'échange de chaleur

Il est utile de déterminer les pertes de chaleur au cours de fonctionnement du système solaire. Les pertes sont dues au trois modes de transfert thermique, la conduction dans la couche isolante, autour la couche de verre, et le rayonnement entre le verre et l'atmosphère d'une part, et le rayonnement entre le tube absorbant et le verre d'autre part. Les pertes sont caractérisées par le coefficient d'échange global qui est donnée par la formule suivante :

$$U_L = \frac{1}{\frac{D_{to}}{(hc_{ca} + hr_{ca}).D_{co}} + \frac{1}{2.K_{cover}} \cdot \ln\left(\frac{D_{co}}{D_{ci}}\right) + \frac{1}{hr_{tc}}} \quad 2.43$$

2.3.1.8. Efficacité du collecteur

L'efficacité du collecteur est définie comme le rapport entre le gain réel du collecteur au cours de fonctionnement et le gain maximal. La formule 2.44 présente tous les phénomènes définis dans l'étude de modélisation du collecteur. [Duffie 1991]

$$F_r = \frac{m C_{pf}^*}{U_L A_p} \cdot \left(1 - \exp\left[-\frac{A_p}{U_L + \frac{D_{to}}{2.K_{tube}} \ln\left(\frac{D_{to}}{D_{ti}}\right) + \frac{D_{to}}{D_{ti}.h_f}}\right] \cdot m \cdot C_p^*\right) \quad 2.44$$

2.3.1.9. Puissance du collecteur et la température de sortie d'eau

La puissance produite par le concentrateur d'énergie solaire est défini comme la différence entre l'énergie absorbée par le collecteur et les pertes de chaleur par différentes modes de transfert. La puissance est donnée par la formule suivante :

$$Q_u = Fr.(W - D_{to}).L.M.(S_b - U_L \frac{(T_{fi} - T_a)}{C}) \quad 2.46$$

Avec

$$C = \frac{W - D_{to}}{\pi D_{to}} \quad 2.47$$

Où W est la largeur du concentrateur cylindro-parabolique.

Et finalement La température de sortie d'eau est donnée par :

$$T_{fo} = T_{fi} + \frac{Q_u}{m \cdot C_p} \quad 2.48$$

Dans cette partie de calcul, on a déterminé l'énergie utile générer par le système. L'irradiation incidente subit deux types de pertes, elle est réduit premièrement au niveau des collecteur, après elle subit des pertes thermiques par différents mode de transfert de chaleur qu'ils sont quantifiées par le terme du coefficient d'échange globale donnée par l'équation 2.43.

2.3.2. Modélisation du système à base d'hydrure

Le système est composé de deux réacteurs d'hydrures, selon le principe de fonctionnement, le système subit quatre phases de fonctionnement : chauffage, désorption, refroidissement et absorption. Au cours des phases d'absorption et de désorption, les transferts de masse et de chaleur se déroulent en même temps. La difficulté de la formulation mathématique exige quelque simplification. Le modèle étudié ne prend pas en considération les variations spatiales des paramètres. Par exemple la température et la pression sont données comme valeur moyenne qu'elles sont introduites dans le calcul de la température finale du fluide caloporteur.

Les propriétés physiques d'hydrure sont considérées constantes. Afin de simplifier la formulation des équations. Les deux réacteurs sont considérés bien isolés pour empêcher le transfert de chaleur entre le réacteur et l'espace qui entoure l'hydrure. À n'importe quel instant la température d'hydrure est considérée égale à la température du réacteur.

2.3.2.1. Chauffage et refroidissement

Le processus du chauffage et du refroidissement sert à préparer les deux hydrures pour les phases d'absorption et de désorption. Les équations sont similaires pour les deux phases.

la variation de l'enthalpie par rapport au temps.

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial t}$$

2.50

La variation de la température d'hydrure est donnée par :

$$m_{MH} C_{P,r} \frac{dT}{dt} = \dot{m}_f C_{Pf} (T_{f,out} - T_{f,in}) \quad 2.51$$

Où

$$C_{P,r} = \sum m_i C_{p,i} \quad 2.52$$

m_{MH} : Masse d'hydrure

$C_{P,r}$: Chaleur spécifique du réacteur

\dot{m}_f : Débit du fluide caloporteur

$T_{f,out}$: Température finale du fluide caloporteur

$T_{f,in}$: Température d'entrée du fluide caloporteur

La chaleur échangée entre le fluide de transfert et le métal hydride est égale à la variation énergie interne de l'eau qui s'écoule dans le tube.

$$\frac{(T_{f,out} - T)}{(T_{f,in} - T)} = \text{EXP}(-NUT) \quad 2.53$$

Avec

NUT est le nombre d'unité de transfert

La variation d'énergie transférer par le caloporteur est donnée par :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \dot{m}_f c_{Pf} (T_{f,in} - T)(1 - \text{EXP}(-NUT)) \quad 2.54$$

On substitue cette relation dans l'équation (3.51) on aura à la fin :

$$m_{MH} C_{PMH} \frac{dT}{dt} = \dot{m}_f C_{P,f} (T_{f,in} - T) (1 - \text{EXP}(-NUT))$$

2.55

2.3.2.2. La Désorption(Absorption)

Ces deux réactions se réalisent en même temps, c'est-à-dire si le réacteur MH1 libère l'hydrogène, Le réacteur MH2 absorbe cette quantité. L'absorption et la désorption s'accompagnent par un transfert continu de chaleur, parce que l'absorption est réaction exothermique, et la désorption est une réaction endothermique.

La chaleur échangée dans cette phase de fonctionnement est divisée en trois termes :

- la chaleur de la réaction chimique(Q1).
- la chaleur échangée entre le fluide caloporteur et le métal hydride (Q2).
- la chaleur évacuée par l'hydrogène qui circule entre les deux réacteurs (Q3).

- / La chaleur de la réaction est donnée par les lois du transfert de masse [13] :

$$\frac{\partial Q_1}{\partial t} = - \frac{\Delta H}{MW_f} \frac{dm_{H_2}}{dt}$$

2.56

Avec

ΔH : Enthalpie de la réaction

MW : Masse molaire du fluide

mH2 : Masse d'hydrogène.

La variation de la masse d'hydrogène dans le métal hydride dépend de la quantité d'hydrogène dégagée au cours de la désorption, ou absorbée au cours de l'absorption, elle est donnée par [13].

$$\frac{d m_{H_2}}{d t} = a_x \frac{d x}{d t} \quad 2.57$$

Avec

x : est la concentration d'hydrogène donnée en unité molécule d'hydrogène par molécule d'hydrure.

a_x : est un facteur donnée par la formule suivante [13]:

$$a_x = \frac{N m_{MH}}{2} \left(\frac{M W_{H_2}}{M W_{MH}} \right) \quad 2.58$$

Où

N : nombre d'atome de métal dans chaque molécule

MW : masse molaire, H_2 pour l'hydrogène et MH pour l'hydrure.

La concentration d'hydrogène dans chaque hydrure dépend de deux paramètres importants, la température et la pression d'équilibre. La concentration augmente dans l'absorption et diminue au cours de la désorption.

$$\frac{d X}{d t} = k_d \exp \left(\frac{-E_d}{R T} \right) \ln \left[\frac{P_{eq}}{p} \right] X \quad (\text{Pour la désorption})$$

2.59

$$\frac{dX}{dt} = k_a \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \ln\left[\frac{P_{eq}}{p}\right] (X_t - X) \quad (\text{Pour l'absorption})$$

2.60

Avec

P : la pression instantané d'hydrogène.

E : Energie d'activation, (a) absorption et (d) désorption

Peq : La pression d'équilibre. Si on néglige le terme qui représente l'hystérésis qui est due à l'irréversibilité de la réaction, la pression d'équilibre est calculée par l'équation de Van't hoff donnée au dessous [15].

$$\ln(P_{eq}) = \frac{\Delta H}{RT} - \frac{\Delta S}{R} \quad 2.61$$

Avec

ΔH : Enthalpie de la réaction

ΔS : Entropie de la réaction

La quantité d'hydrogène qui existe dans l'hydrure à chaque instant est donnée par :

$$X = \frac{2 n M W_{M H}}{N m_{M H}} \quad 2.62$$

*- / L'échange de chaleur entre le fluide caloporteur et le réacteur doit être continu pour assurer le niveau de température et de pression nécessaire pour le

fonctionnement. La formule d'échange de la chaleur entre l'eau et l'hydride est la même que la formule donnée dans la partie de chauffage.

$$\frac{\partial Q_2}{\partial t} = \dot{m}_f c_{Pf} (T_{f,in} - T)(1 - \text{EXP}(-NUT)) \quad 2.63$$

*- / L'hydrogène qui s'écoule entre les deux réacteurs va transporter une certaine quantité de chaleur, l'hydrogène prend la température du réacteur qu'il quitte. La chaleur évacuée par l'hydrogène est donnée par :

$$\frac{\partial Q_3}{\partial t} = \dot{m}_{H_2} C_{P,H_2} (T_B - T_A) \quad 2.64$$

Si on applique le théorème de Bernoulli dans le tube d'écoulement d'hydrogène, on peut calculer le débit d'hydrogène libéré. Le débit est calculé par la formule suivante :

$$\dot{m}_{H_2} = S \sqrt{2 \rho_{H_2} (P_B - P_A)} \quad 2.65$$

La température d'hydrure dépend de tous les échanges de chaleur ayant lieu dans le réacteur. L'échange de chaleur qui contrôle le niveau de température, c'est la chaleur de la réaction d'absorption ou la désorption. La somme des trois termes de transfert donne la formule suivante :



2.66

2.3.2.3. Coefficient de performance COP

Le coefficient de performance donne le rapport entre l'énergie de refroidissement obtenu avec l'énergie fournie. Il est très important de connaître le niveau de qualité du système.

$$C O P = \frac{Q_c}{Q_h} \quad 2.67$$

Avec

Q_c : la quantité d'énergie échangée entre MH2 et le fluide caloporteur dans les phases 3et4, donnée par :

$$Q_c = n_{B,d} \Delta H_{B,d} - m_h \cdot C_{pB} \cdot (T_m - T_c) \quad 2.68$$

Où

$n_{B,d}$ est le nombre de mole d'hydrogène libérer par l'hydrure du réacteur MH2

Q_h : la quantité d'énergie échangée entre MH1 et le fluide caloporteur dans les phases 1et2. donnée par :

$$Q_h = n_{A,d} \Delta H_{A,d} - m_h \cdot C_{pA} \cdot (T_h - T_m) \quad 2.69$$

$n_{A,d}$ est le nombre de mole d'hydrogène libérer par l'hydrure du réacteur MH1.

Le pouvoir de refroidissement est le terme qui représente la quantité de chaleur qu'on peut enlever d'un local. Il dépend de la masse d'hydrure et le temps de cycle. Il est donnée par la formule suivante :

$$q = \frac{Q_1}{m_{MH2} t_c} \quad 2.68$$

m : masse de MH2

t_c : durée de cycle de fonctionnement.

La température du local à refroidir est donnée par :

$$T_{local} = - \frac{Q}{V \rho_{air} C p_{air}} + T_{amb} \quad 2.69$$

$$Q = q t_{des} \quad 2.70$$

V : volume de la chambre à refroidir

ρ : densité d'air

C_p : chaleur spécifique d'air

T_{amb} : température ambiante

t_{des} : durée de la phase de désorption

Dans la partie précédente on a calculé les performances du système à base d'hydrure en utilisant les différentes équations de transfert de masse et de chaleur. La complexité de la formulation du problème nous a amène à faire quelques simplification.

CHAPITRE 3

RESULTATS et DISCUSSION

3.1 Résultats et discussion

Pour déterminer les propriétés thermophysiques du système, les relations mathématiques reportées dans le chapitre précédent ont été utilisées. A cette fin, un programme sous MATLAB a été mis au point. L'organigramme de ce programme est reporté en annexe. Le système de refroidissement à base d'hydruure à été d'abord considéré. Pour les hydrures, on a pris le couple $MmNi_{4.6}Al_{0.4}/MmNi_{4.6}Fe_{0.4}$. Les températures sont, 363K pour la température de régénération T_h , 298 K pour la température moyenne T_m , et 278 K pour la température de climatisation. Par la suite, on a déterminé la température finale d'un local à climatiser et l'influence des différents paramètres sur cette température.

3.2. Evaluation du potentiel solaire

Le potentiel solaire est déterminé par la méthode de Hottel, Les calculs sont faits pour une zone de 36° pour latitude. Trois jours sont choisis pour estimer leurs potentiels solaires afin de comparer les différents résultats. Les calculs montrent l'intensité du potentiel direct et aussi le potentiel diffus. Les résultats sont reportés dans les figures 3.1, 3.2.

Suivant la figure 3.1, on peut voir la différence entre l'intensité direct et diffus, cette différence évolue au cours de la journée et atteint sa valeur maximale à midi.

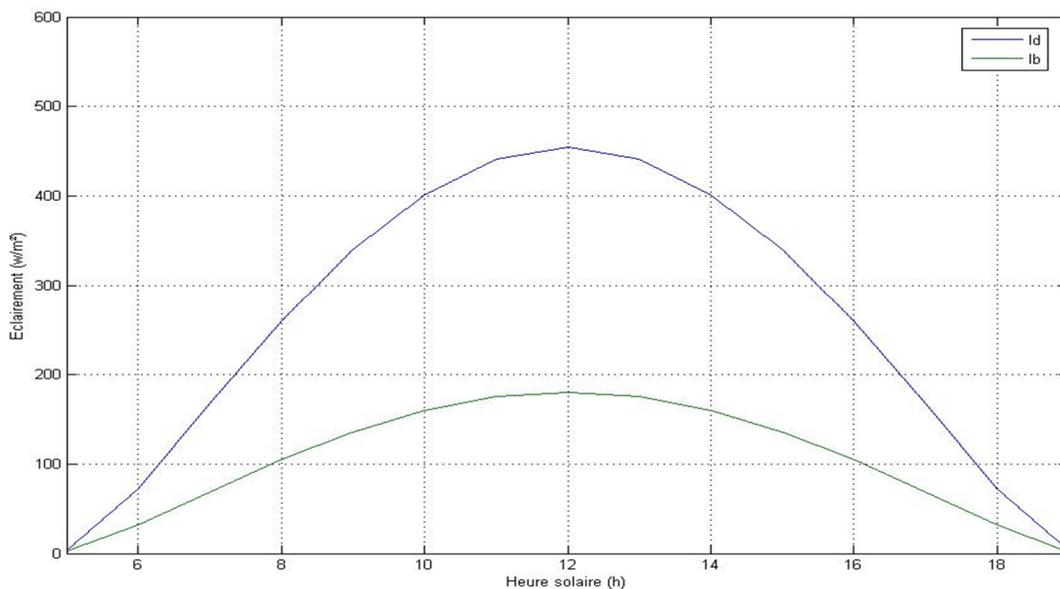


Figure 3.1. Potentiel direct et diffus, résultats pour 01 Juillet

3.3. Energie absorbée par le concentrateur

Le système de concentration d'énergie solaire est le moyen pour assurer l'énergie d'activation nécessaire de fonctionnement. Ce système est composé par un concentrateur cylindro parabolique où les paramètres sont présentés dans le tableau 3.1.

Dans le paragraphe 3.1 on a présenté le potentiel solaire du site, le concentrateur capte l'énergie solaire en suivant le mouvement du soleil pour augmenter les performances du système. Le concentrateur absorbe une partie de cette énergie, l'autre partie est perdue par l'effet optique

Tableau 3.1. Paramètres d'entrées du système solaire.

Paramètre		valeur	unité
Altitude	A	100	m
Latitude	Φ	36	degré
Longueur du collecteur	L	10	m
Largeur du collecteur	W	3.5	m
Distance focale	F	1	m
Diamètre intérieur de tube	D _{to}	0.05	m
Diamètre extérieur de tube	D _{ti}	0.07	m
Epaisseur couche de verre	D _{ci}	0.0025	m
Diamètre extérieur couche de verre	D _{co}	0.09	m
Conductivité de tube	λ tube	45	W/m°C
Conductivité couche de verre	λ cover	0.78	W/m°C
Réflectivité du collecteur	ρ c	0.90	-
Absorptivité de tube	α_t	0.94	-
Coefficient d'émission de tube	ξ_t	0.19	-
Coefficient d'émission du verre	ξ_c	0.88	-
Coefficient d'extension (verre)	Ke	12.5	1/m
Coefficient de Boltzmann	Σ	5.67E(-8)	W/m ² K ⁴

La figure 3.2 présente l'évolution de l'énergie absorbée par le collecteur, cette énergie atteint sa valeur maximale à midi. Ce qu'on remarque aussi que l'énergie absorbé diffère entre les périodes de l'année. Et cela bien sûr est expliqué par le potentiel solaire qui existe pour chaque période.

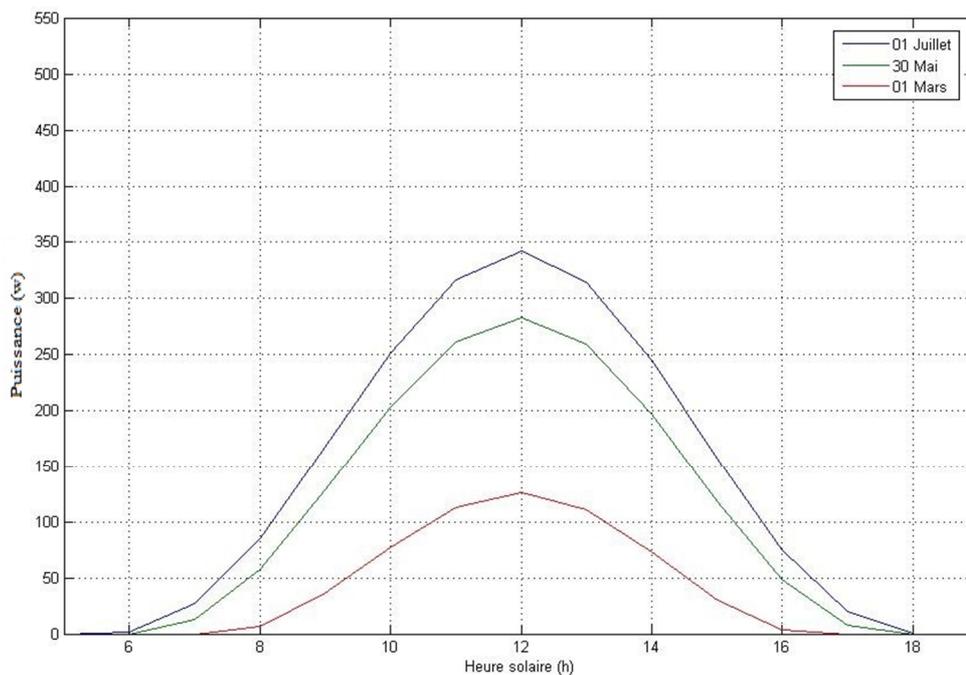


Figure 3.2. Puissance absorbée par le concentrateur.

3.4. Système à base d'hydrures

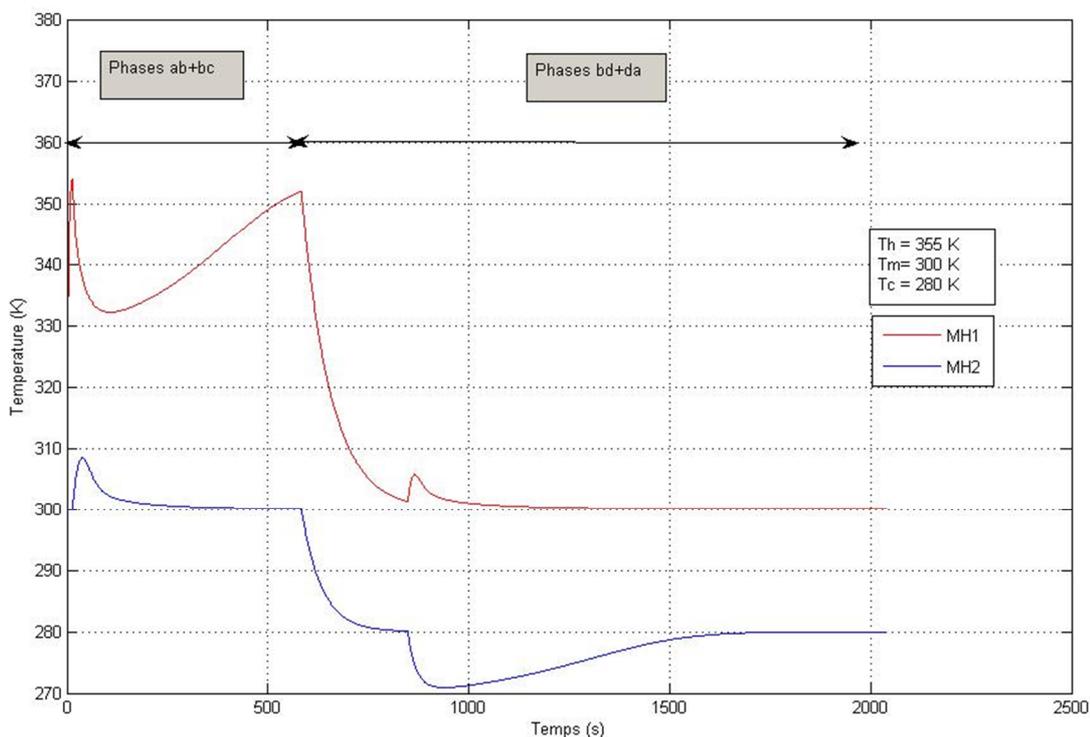
Le code de calcul mis au point sous MATLAB a été utilisé pour déterminer les différents paramètres de fonctionnement du système à base d'hydrure. Le code est appliqué sur le couple $MmNi_{4.6}Al_{0.4}/MmNi_{4.6}Fe_{0.4}$. Une étude similaire a été menée ultérieurement [10].

Les trois températures caractéristiques ont été choisies de tel façon les performances sont optimales. Les paramètres caractéristiques-température, pression, concentration- sont utilisés pour déterminer le coefficient de performance (COP), et le pouvoir de refroidissement (q). Différents calculs étaient faits pour étudier l'influence des paramètres caractéristiques sur les performances du système.

Tableau 3.2. Paramètres d'entrées du système d'hydrure [16]

Paramètre		MmNi4.6Al0.4	MmNi4.6Fe0.4
Masse d'hydrure (Kg)	m	2	2
Masse moléculaire	M	418	429
Nombre d'atome de métal	N	6	6
Chaleur spécifique (KJ/KgK)	Cp	0.5	0.5
Volume d'hydrure (m3)	V	2.18E(-4)	2.18E(-4)
Unité de transfert (NUT)	NUT	0.4	0.4
Chaleur spécifique du fluide (KJ/KgK)	Cpf	4.18	1.2
Coefficients	Ka	7.00E(7)	8.00E(7)
	Kd	1.42E(6)	1.32E(8)
Energie d'activation (KJ/mole)	Ea	30000	31500
	Ed	29000	28500
Enthalpie de la réaction (KJ/Kg)	ΔH_a	14500	12600
	ΔH_d	13900	12350
Entropie de la réaction (KJ/mole K)	ΔS_a	108.7	104.5
	ΔS_d	107.2	105.5
Densité d'hydrogène (Kg/m3)		0.0838	0.0838
Chaleur spécifique d'hydrogène (KJ/KgK)	Cph	14.4	14.4
Constante des gaz parfaits (KJ/moleK)	R	8.314	8.314

Dans un premier temps, l'évolution dans le temps des températures des deux hydrures du système est étudié. Les résultats sont reportés dans la figure 3.3. Ces résultats sont similaires avec celle de Satheesh[10]. Dans la figure on distingue deux parties de fonctionnement



La première partie représente les deux premières phases de fonctionnement – ab et bc-. La Phase (ab)représente le chauffage d'hydrure, et la phase (bc) représente la désorption d'hydrogène par l'hydrure du réacteur MH1.

La deuxième partie représente les deux dernières phases –cd et da-, qui sont la phase (cd) de refroidissement des hydrures, et la phase (da) de la désorption d'hydrogène par l'hydrure du réacteur MH2.

La pression d'équilibre est le paramètre qui assure la circulation 'hydrogène entre les deux hydrures. L'évolution dans le temps de cette pression est reporté en figure 3.4. Les calculs sont faits pour $T_h = 355$ K, $T_m = 300$ K et $T_c = 280$ K. On peut constater que dans la première partie du cycle que la pression dans l'hydrure du

réacteur MH1 est supérieure à celle d'hydrure du réacteur MH2, ce qui permet le transfert d'hydrogène à partir du réacteur MH1 vers le réacteur MH2. Après le refroidissement des hydrures, la pression de MH2 devient supérieure à celle de MH1.

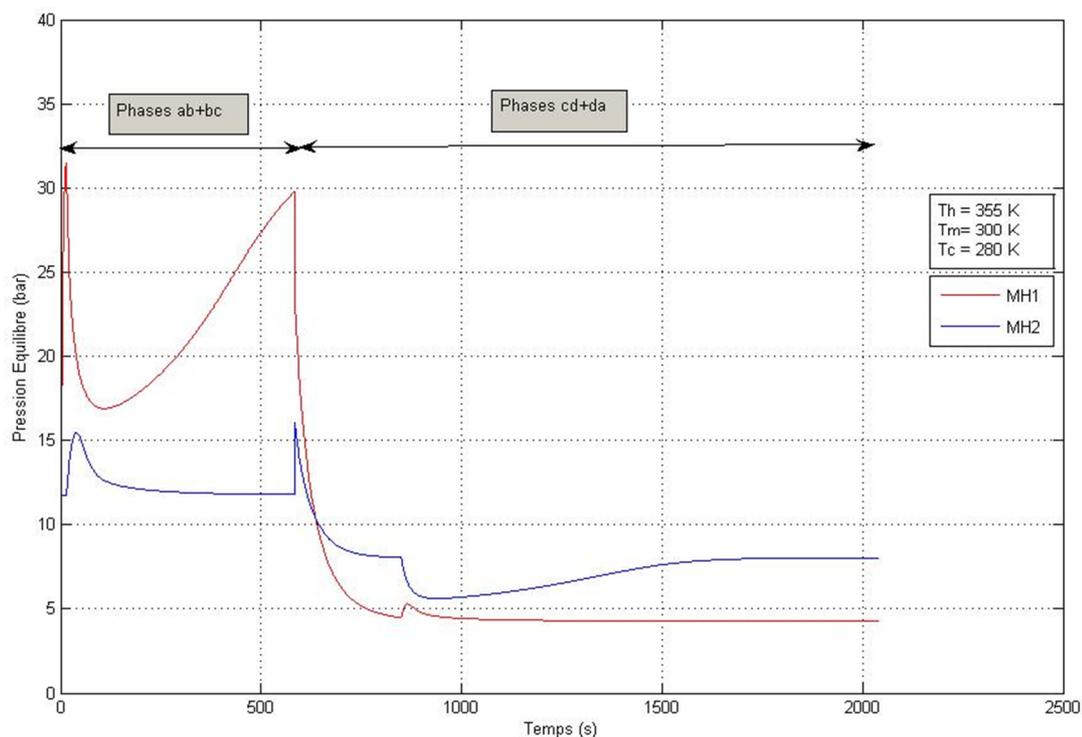


Figure 3.4. Evolution de la pression d'équilibre au cours du cycle.

La concentration d'hydrogène représente la quantité d'hydrogène qu'elle existe dans l'hydrure, cette quantité est un rapport entre le nombre de mole d'hydrogène et le nombre de mole d'hydrure. L'évolution dans le temps de cette concentration est reportée dans la figure 3.5.

Suivant la figure 3.5, l'évolution de la concentration a le même comportement avec celle reportée par Satheesh[10]. L'évolution est partagée aussi en deux zones, chaque zone représente deux phases de fonctionnements. Comme il est représenté dans la figure 3.5, le transfert d'hydrogène dans la deuxième zone est plus lent, et

cela dû à la faible différence de pression entre les deux hydrures dans cette partie de fonctionnement.

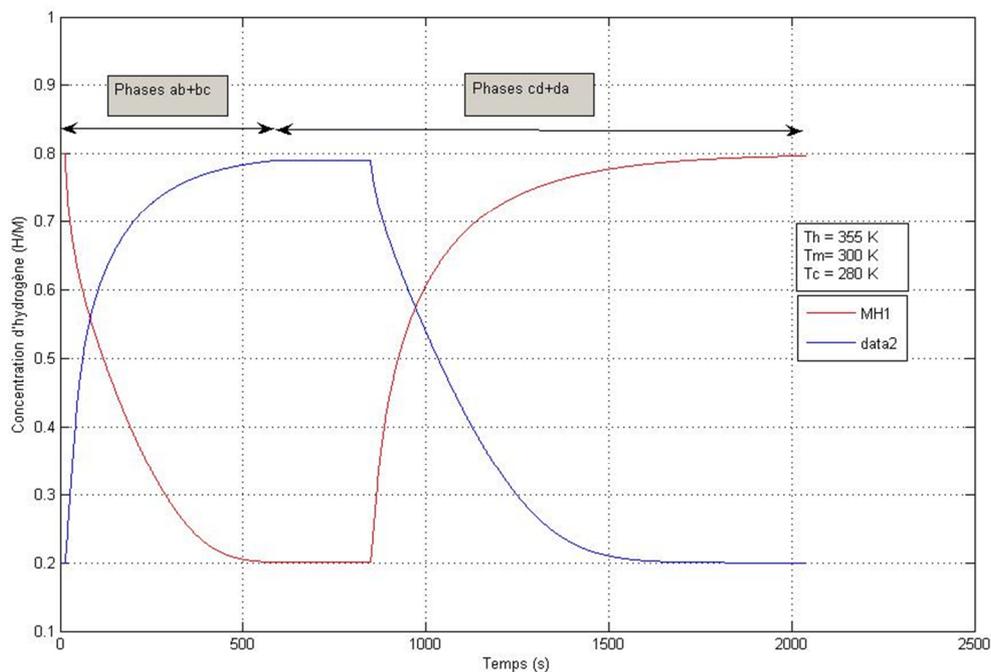


Figure 3.5. Evolution de la concentration au cours du cycle.

Le réacteur MH1 est chauffé jusqu'à la température 353 K, par le caloporteur (eau) qui y circule. Le réacteur MH2 est maintenu à la température 300 K. A ce niveau de température il est clair comme le montre la figure 3.4 que la pression d'équilibre d'hydrure MH1 devient supérieure à celle d'hydrure MH2. L'hydrure MH1 commence alors la désorption d'hydrogène, après l'ouverture de la vanne de contrôle. L'hydrogène commence s'écouler d'hydrure MH1 vers l'hydrure MH2. La circulation est assurée par la différence de pression. Cette phase de fonctionnement s'arrête lorsque l'hydrure MH1 atteint le niveau définie de concentration d'hydrogène, comme il est présenté dans la figure 3.5.

Après la désorption de la quantité définie d'hydrogène, les deux réacteurs sont préparés pour commencer les deux dernières phases de fonctionnement. Les deux hydrures MH1 et MH2 sont refroidies jusqu'à les températures 300 K et 280 K

respectivement. La pression d'équilibre d'hydrure MH2 devient supérieure à celle d'hydrure MH1 malgré que la température d'hydrure MH1 est supérieure à celle d'hydrure MH2. Ici apparaît l'importance des hydrures, après l'ouverture de la vanne l'hydrogène libéré s'écoule vers l'hydrure MH1. La désorption est endothermique, l'apport de chaleur est assuré par le fluide caloporteur, l'effet de refroidissement apparaît car le transfert de chaleur est du fluide caloporteur vers l'hydrure MH2. Le processus s'arrête lorsque l'hydrure MH2 libère la même quantité d'hydrogène absorbé dans la première partie de fonctionnement.

3.4.1. Influence de la température de régénération T_h

Le système à base d'hydrure est chauffé jusqu'à un niveau qui permet la désorption d'hydrogène. La température T_h est la température de la source d'apport de chaleur. Cette température affecte les performances du système. En figure 3.6, l'évolution du COP avec la température T_h est reportée.

Comme le montre la figure 3.6, le COP augmente avec l'augmentation de T_h , il atteint sa valeur optimale à la température 363. L'augmentation de T_h signifie une pression élevée, ce qui permet d'avoir un large écart de pression entre les deux hydrures, et cela aide à accélérer le transfert d'hydrogène entre les deux réacteurs, ce qui affecte la cinétique de l'absorption dans l'hydrure du réacteur MH2, et cela influe sur la quantité de chaleur échangé entre l'hydrure du réacteur MH2 et le fluide caloporteur. La diminution de COP avec l'augmentation de T_c est due à la réduction de l'écart de pression entre les deux hydrures, ce qui rend le transfert de chaleur moins important.

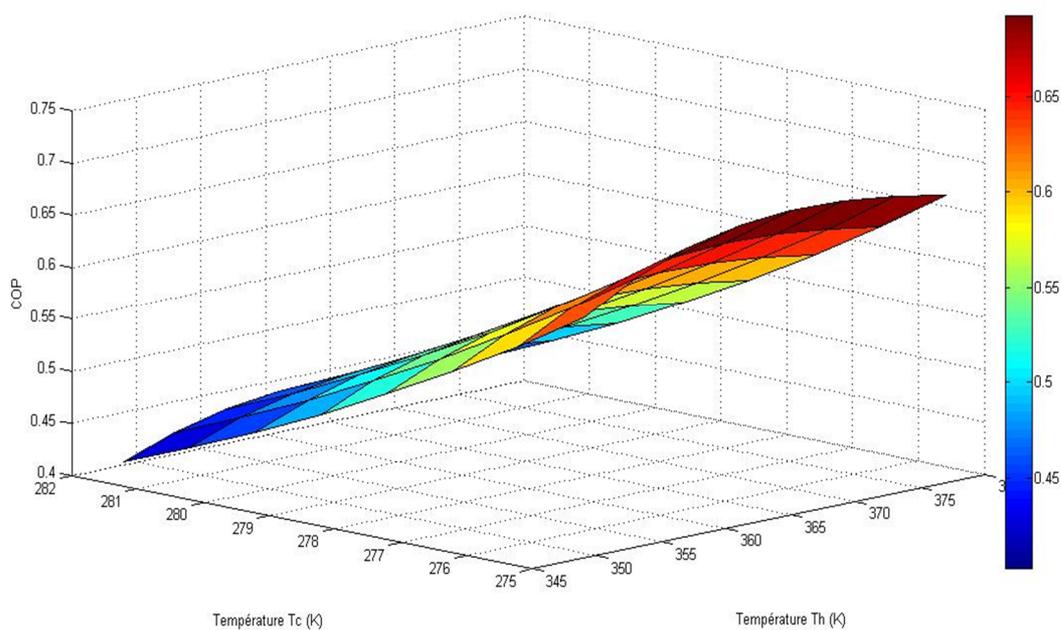


Figure 3.6. Influence du Th sur le coefficient de performance- Masse 2Kg.

La figure 3.7 montre la variation du COP avec la température de régénération Th, la différence entre la figure 3.6 et 3.7 est que la masse d'hydrure dans les réacteurs vaut 4Kg. Suivant la figure 3.7 le COP suit la même évolution décrite dans la figure 3.6, et cela dû à la stabilité du rapport entre la chaleur échangé avec l'hydrure MH2 et l'hydrure MH1, C'est-à-dire que la chaleur échangé entre le fluide caloporteur et l'hydrure augmente avec la masse, mais le rapport entre les deux quantités de chaleur échangées reste la même.

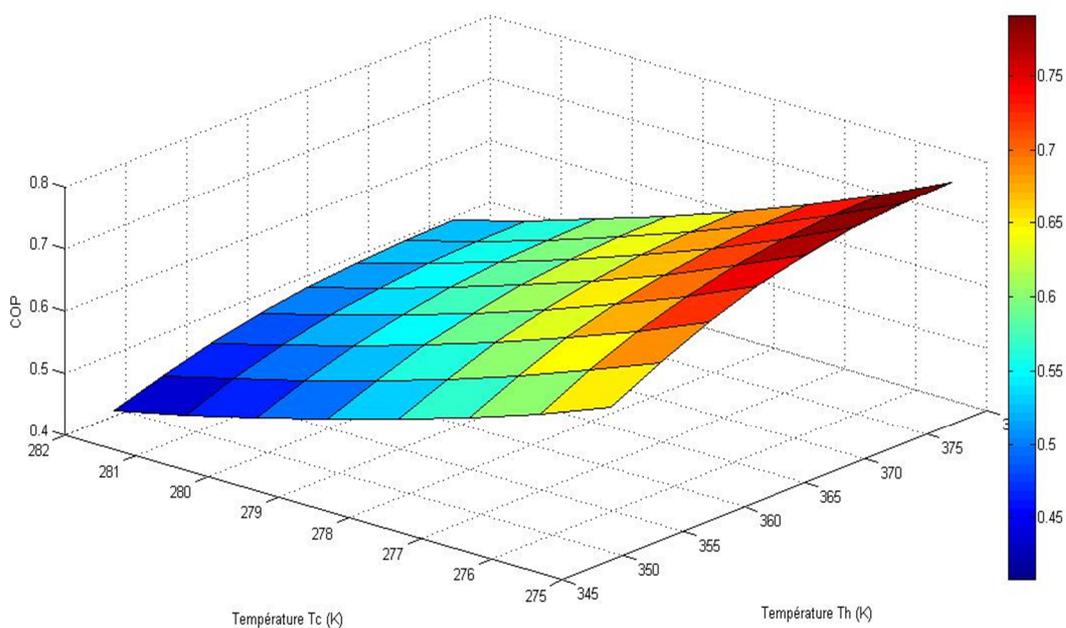


Figure 3.7. Influence du Th sur le coefficient de performance- Masse 4Kg.

En figure 3.7, l'effet de la température Th sur le pouvoir de refroidissement est représentés. Le pouvoir de refroidissement augmente avec l'augmentation de Th. Cette évolution est due à l'influence de Th sur la durée de cycle. Une température Th supérieure signifie un apport de chaleur important, ce qui réduit le temps de chauffage comme le montre la figure 3.8.

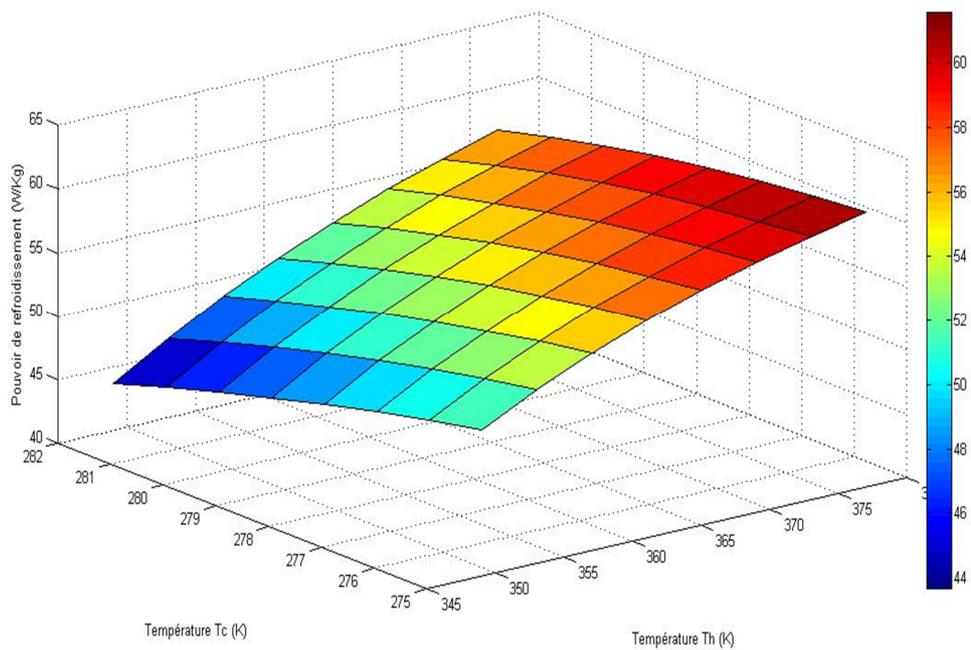


Figure 3.8. Influence du Th sur le pouvoir de refroidissement- Masse 2 Kg.

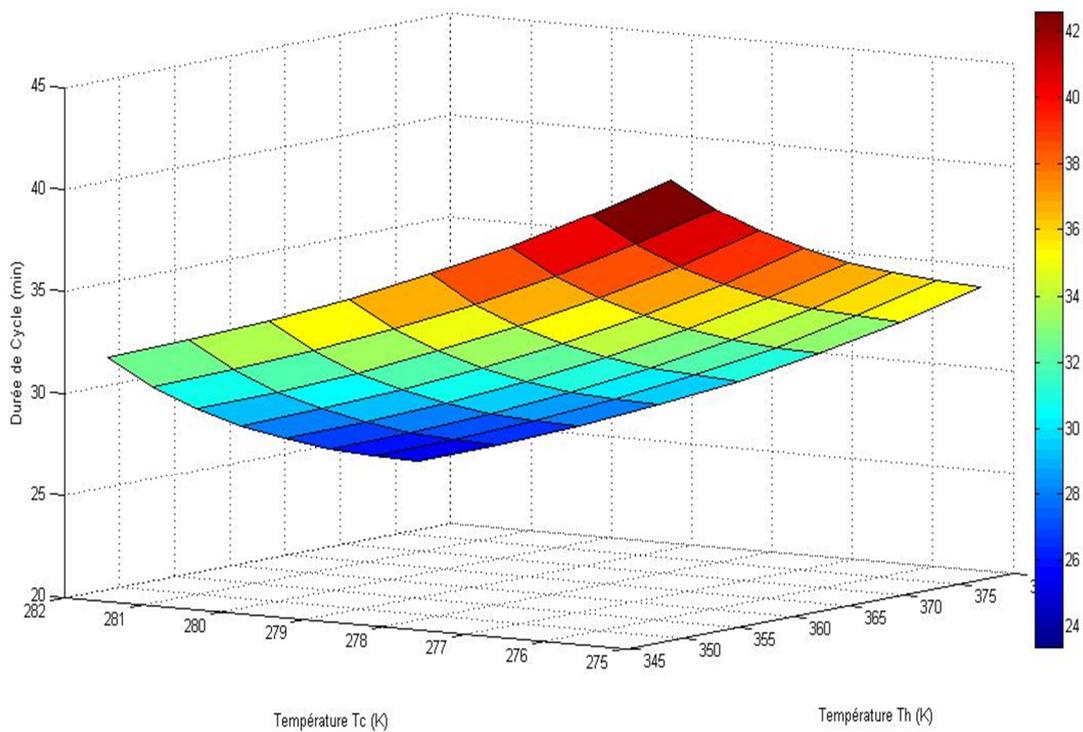


Figure 3.9. Influence du Th sur la durée de cycle- Masse 2 Kg.

En figure 3.10, l'évolution du pouvoir de refroidissement est représenté. On mentionne toujours que la masse pour cette série de calcul vaut 4 Kg. Suivant la figure 3.10, on constate que le pouvoir de refroidissement augmente avec l'augmentation de T_h , sauf que la puissance par unité de masse est moins importante, si on compare avec les résultats pour 2 Kg, et cela peut s'expliquer par l'influence de la masse sur la durée d'échange de chaleur, une masse importante signifier une quantité d'hydrogène importante et par conséquent plus de temps pour transférer l'hydrogène de réacteur MH2 vers le réacteur MH1. Ce qui est représenté dans la figure 3.11.

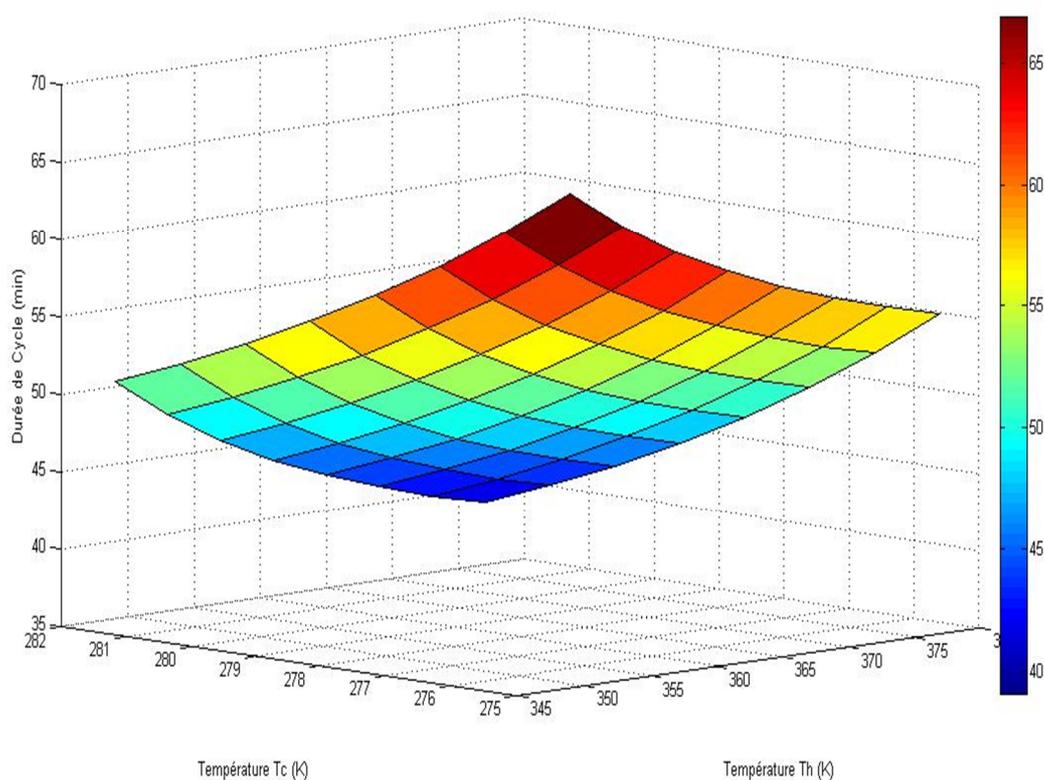


Figure 3.10. Influence du T_h sur la durée de cycle- Masse 4 Kg.

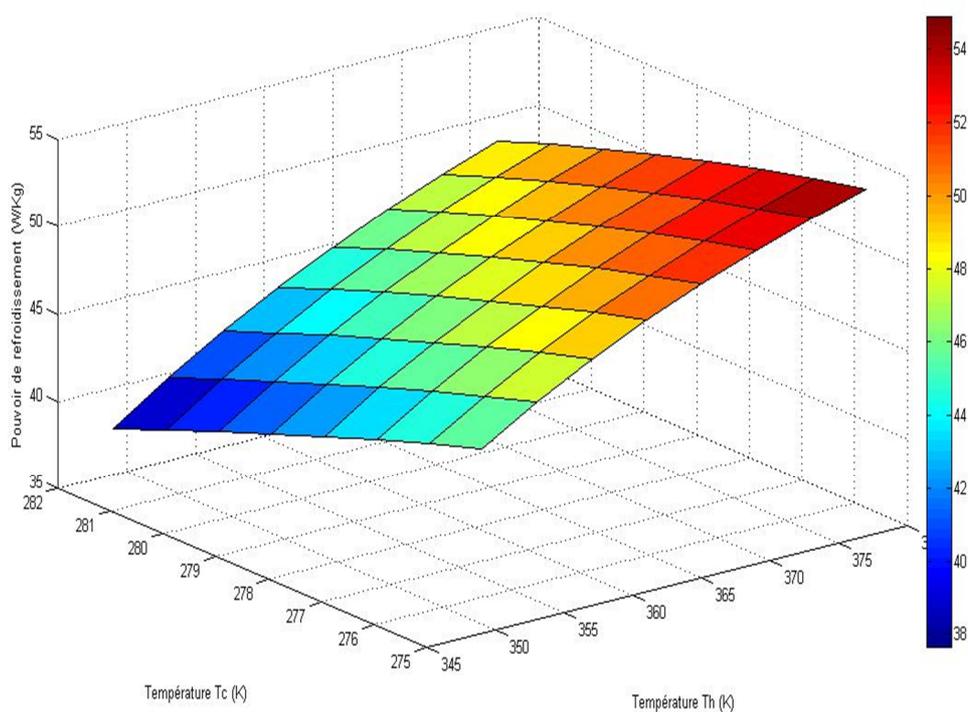


Figure 3.11. Influence du Th sur le pouvoir de refroidissement- Masse 4 Kg.

Comme il est expliqué précédemment, la température de régénération T_h influe sur la chaleur échangé entre l'hydrure du réacteur MH_2 et le caloporteur. On peut constater dans la figure 3.12 que l'échange est maximal au niveau du couple ($T_h=375K$, $T_c=278K$). La température contrôle le niveau de pression dans les réacteurs, et un écart important de pression entre les deux réacteurs favorise le transfert d'hydrogène, et chaque fois l'écart de pression augmente, le transfert d'hydrogène devient rapide, et par conséquent un échange de chaleur important entre l'hydrure du réacteur et le caloporteur.

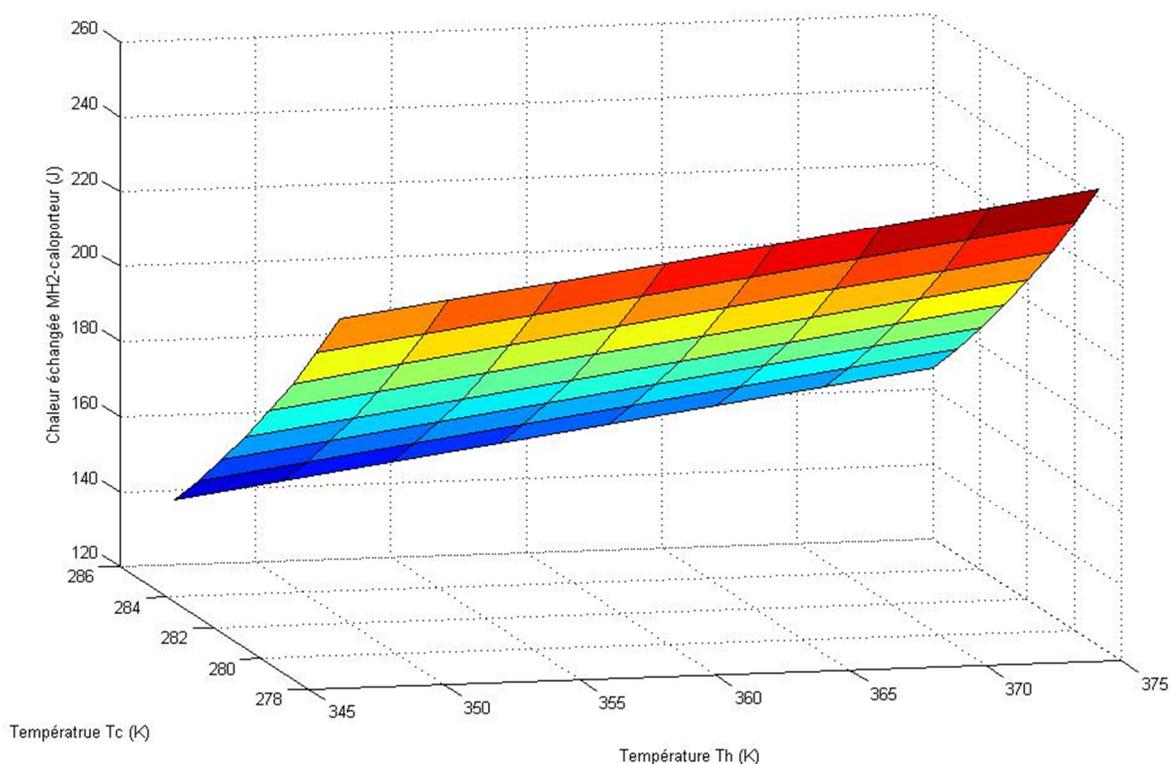


Figure 3.12. Influence de T_h sur la chaleur échangé dans le réacteur MH2.

Comme le montre la figure 3.5, la désorption d'hydrogène dans l'hydruire du réacteur MH2 est plus lente. La température de refroidissement T_c est la température caractéristique du réacteurMH2. Dans la figure 3.13, l'évolution de la durée de désorption d'hydrogène dans l'hydruire du réacteur MH2 est reportée. Suivant la figure 3.13, l'augmentation de T_c réduit le temps de désorption d'hydrogène, et cela peut être expliqué par la faible pression d'équilibre qui ralentisse la cinétique de désorption d'hydrogène dans l'hydruire. Aussi suivant la figure la température T_m n'influe pas sur la durée de désorption et cela dû à la faible variation de pression dans l'hydruire du réacteur MH1.

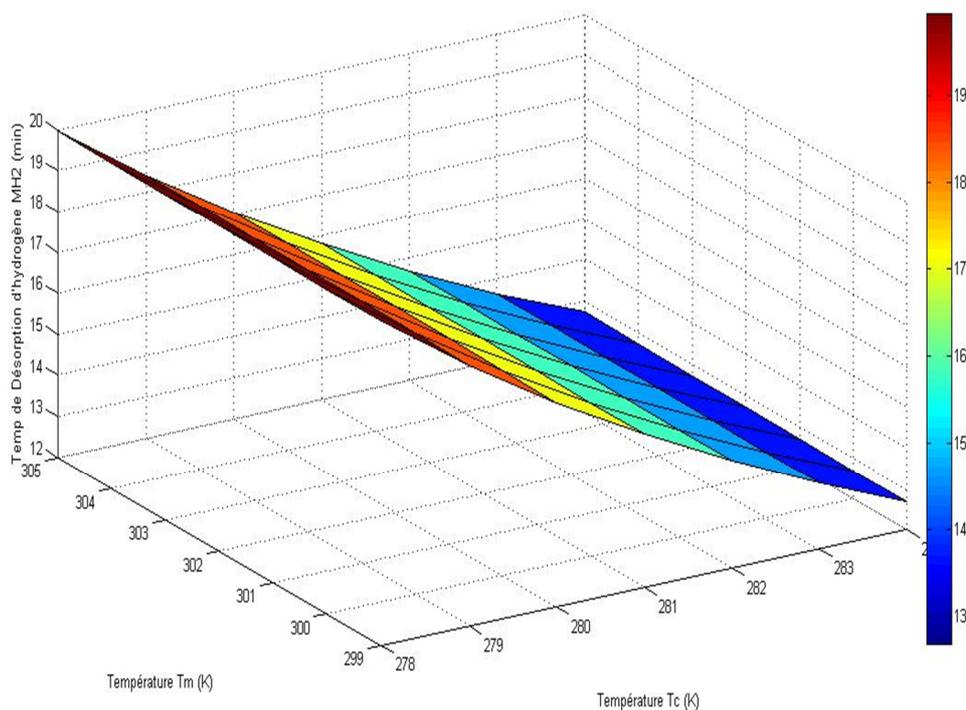


Figure 3.13. Influence de T_c sur le temps de désorption d'hydrogène dans MH2.

3.4.2. Influences de la température moyenne T_m sur les performances du système :

La température moyenne T_m est la température du réacteur MH1 au cours de la deuxième phase de fonctionnement.

Dans la figure 3.14, la variation de COP avec l'évolution de la température moyenne T_m est reportée. Suivant cette figure, on peut voir que le COP ne varie pas avec T_m . La même remarque pour l'évolution du pouvoir de refroidissement et la durée de cycle. Les résultats sont reportées dans la figure 3.15 et 3.16 respectivement. Ce comportement est dû à la faible variation de pression d'équilibre d'hydrure du réacteur MH1, et comme la variation de la pression est négligeable, la quantité de chaleur échangée reste presque dans le même niveau.

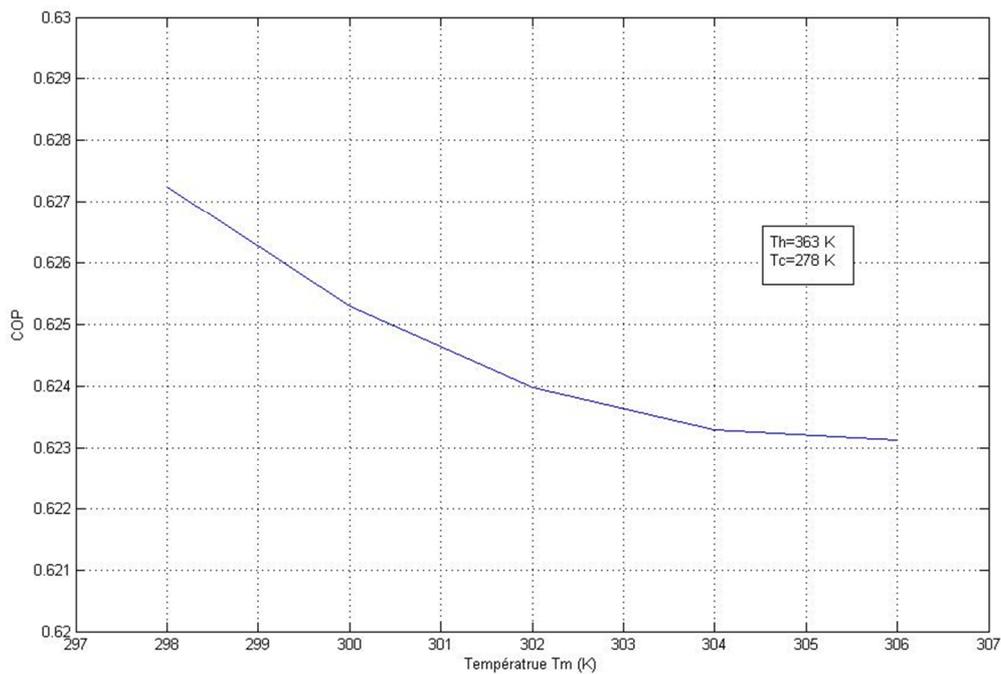


Figure 3.14. Influence du T_m sur le coefficient de performance.

L'évolution de la durée de cycle avec la variation de T_m est représentée dans la figure 3.15, on constate suivant cette figure que la durée de cycle reste presque invariable, ce qui stabilise la production du froid qu'elle est représentée par unité de masse dans la figure 3.16.

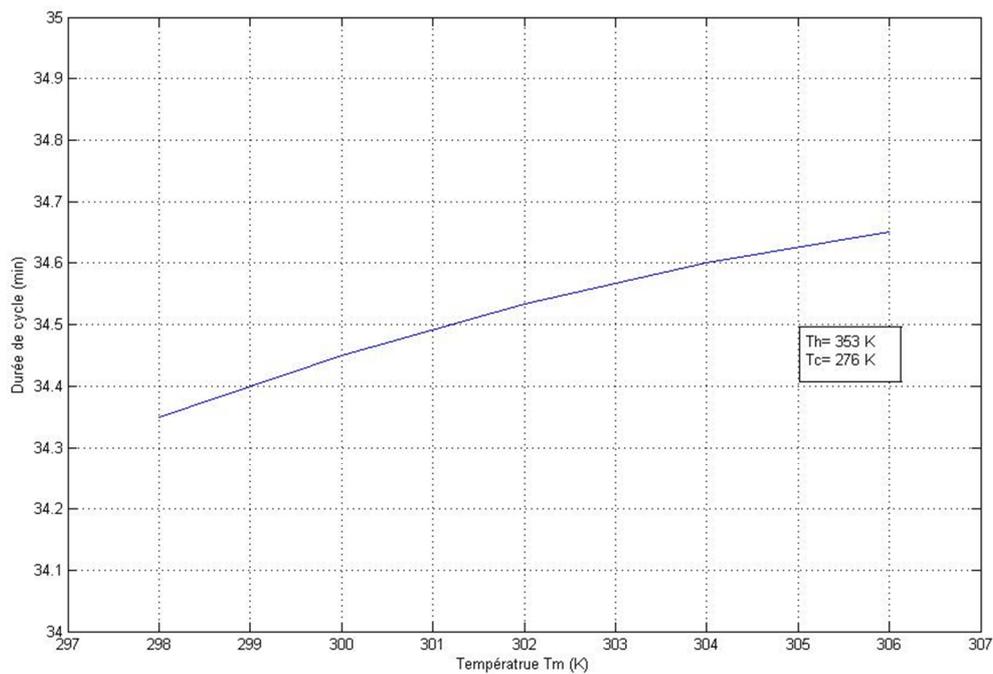


Figure 3.15. Influence du T_m sur la durée de cycle.

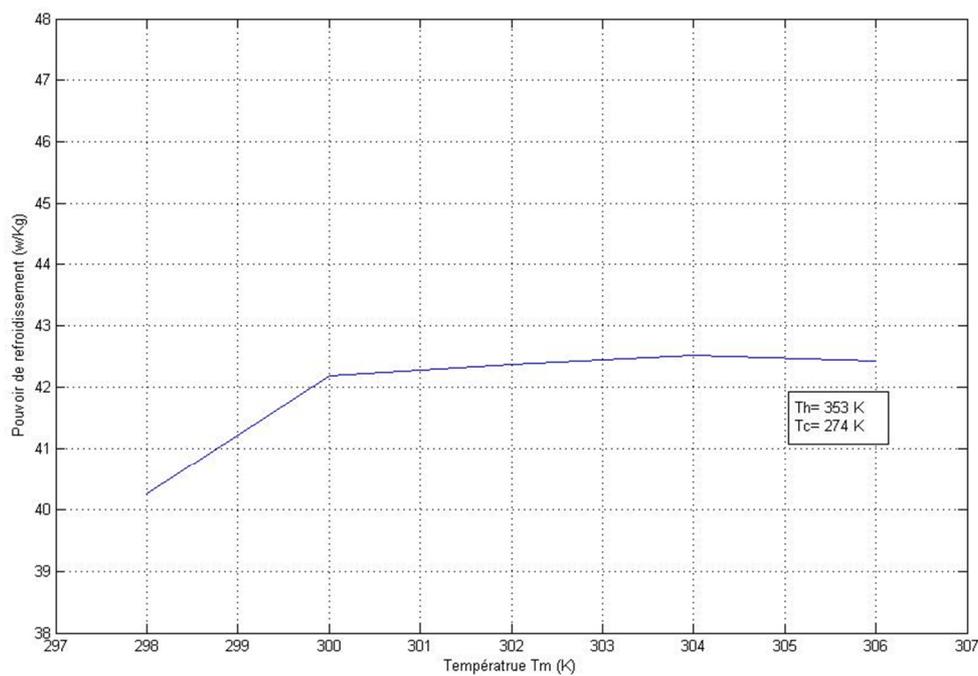


Figure 3.16. Influence du T_m sur le pouvoir de refroidissement.

3.5. Etude de refroidissement du local

Le système à base d'hydrure est destiné à refroidir un local de 15 m^3 de volume. La température initiale du local est fixée au 320 K.

Utilisant les équations présentées dans le chapitre III, un programme sous MATLAB a été mis au point pour évaluer la température du local à refroidir à la fin de cycle de fonctionnement.

La température de régénération T_h est parmi les trois températures caractéristiques du système. Précédemment on a montré l'influence de cette température sur le pouvoir de refroidissement. L'augmentation de T_h implique une augmentation du pouvoir de refroidissement. Ce pouvoir est représenté la quantité de chaleur échangé par unité de temps entre le système et le caloporteur, plus cette chaleur devient importante, la température du local diminue, comme il était présenté dans la figure 3.12. La figure 3.17 représente l'influence de T_h sur la température du local.

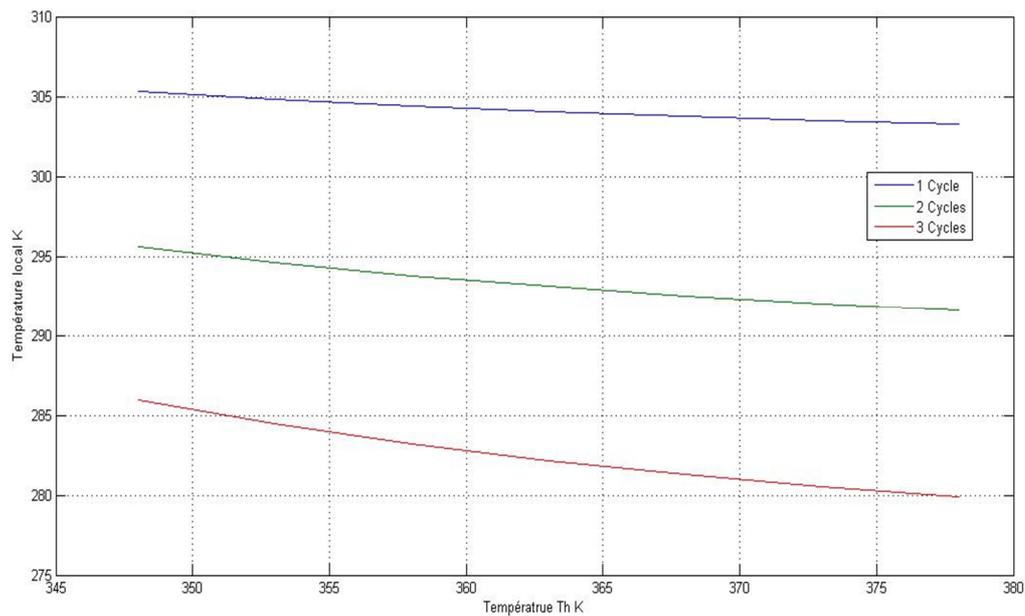


Figure 3.17. Influence du T_h sur la température du local

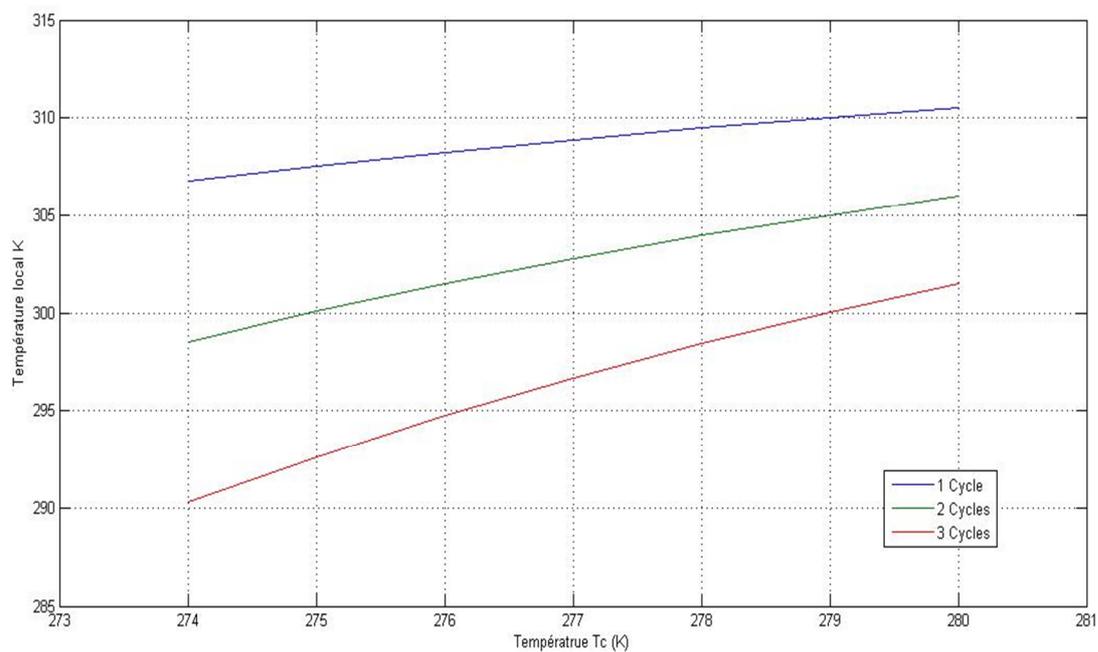


Figure 3.18. Influence du T_c sur la température du local.

La figure 3.18 représente l'évolution de la température du local. Cette température augmente avec l'augmentation de T_c . La chaleur échangée entre l'hydrure MH2 et le fluide caloporteur devient moins importante à des températures T_c élevée. Suivant la figure 3.12, la chaleur est minimale au niveau de la température $T_c=286$ K, et cela signifie une température du local élevée au niveau de cette température T_c .

La masse de chaque hydrure est importante de point de vue dimension du système. Une masse importante donne plus d'espace pour l'hydrogène, cette quantité d'hydrogène besoin plus de temps pour se transféré entre les deux réacteurs. Si le système fonctionne par les mêmes températures caractéristiques, la quantité de chaleur échangée devient importante et cela implique une température basse. La figure 3.19 représente la relation entre la masse de chaque hydrure et la température du local.

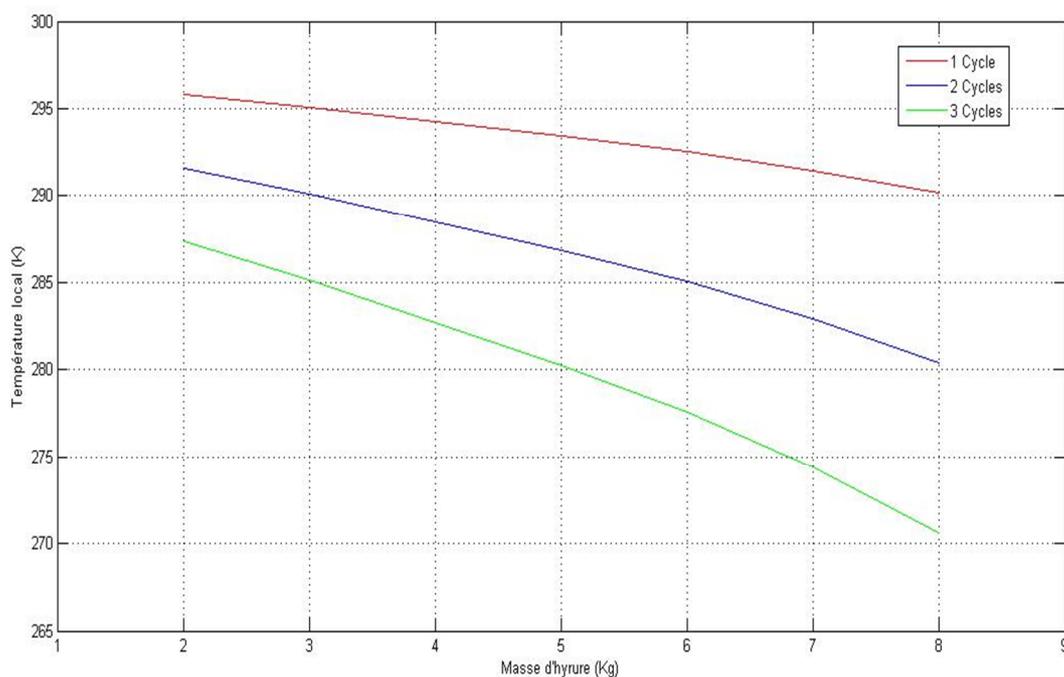


Figure 3.19. Influence de la mase d'hydrure sur la température du local.

3.5.1. Le nombre de cycle:

D'après la description du fonctionnement du système à base d'hydrure décrit dans le chapitre III, il est clair que la production du froid n'est pas permanente, et suivant le principe de fonctionnement, il nous faut plusieurs cycles pour atteindre la température désirée. Le nombre de cycle dépend de deux paramètres importants, la température de régénération T_h , et le volume de l'espace à refroidir.

Dans les figures 3.20 et 3.21, la relation entre le nombre de cycle et la température de régénération T_h est représenté. Les résultats donnés dans la figure 3.20 sont calculées pour un espace de 15 m^3 , et les résultats de la figure 3.21 sont calculées pour un espace de 27 m^3 . Suivant les deux figures le nombre de cycle diminue avec l'augmentation de T_h , cela peut être expliqué par l'augmentation de la puissance de refroidissement avec la température T_h .

Aussi on remarque qu'on est besoin de plus de cycle pour refroidir un espace plus large, ce qu'est prouvé par la figure 3.21.

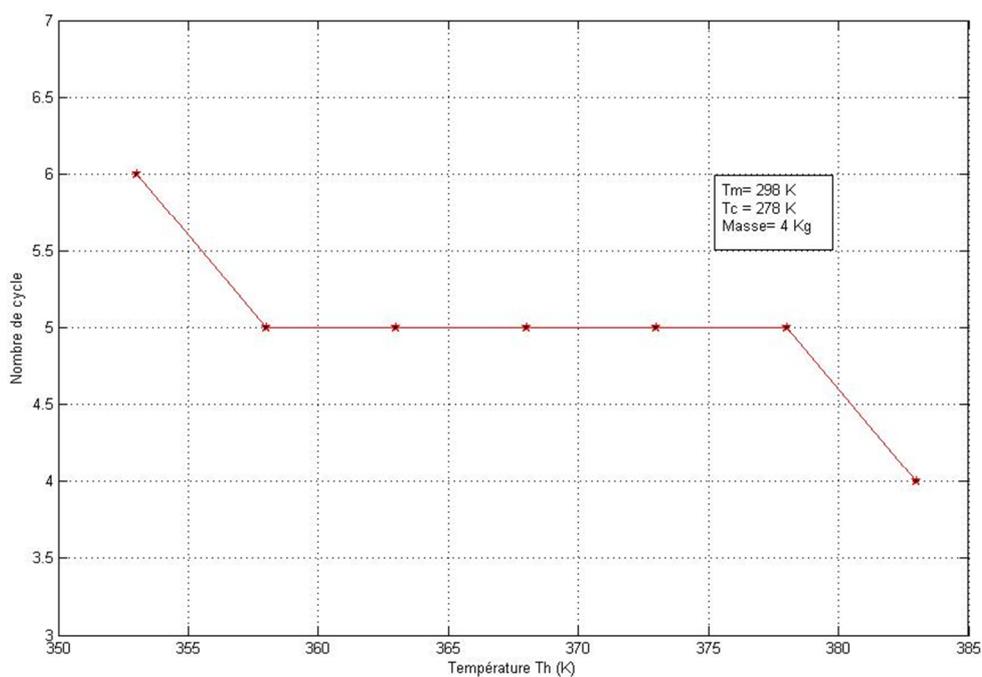
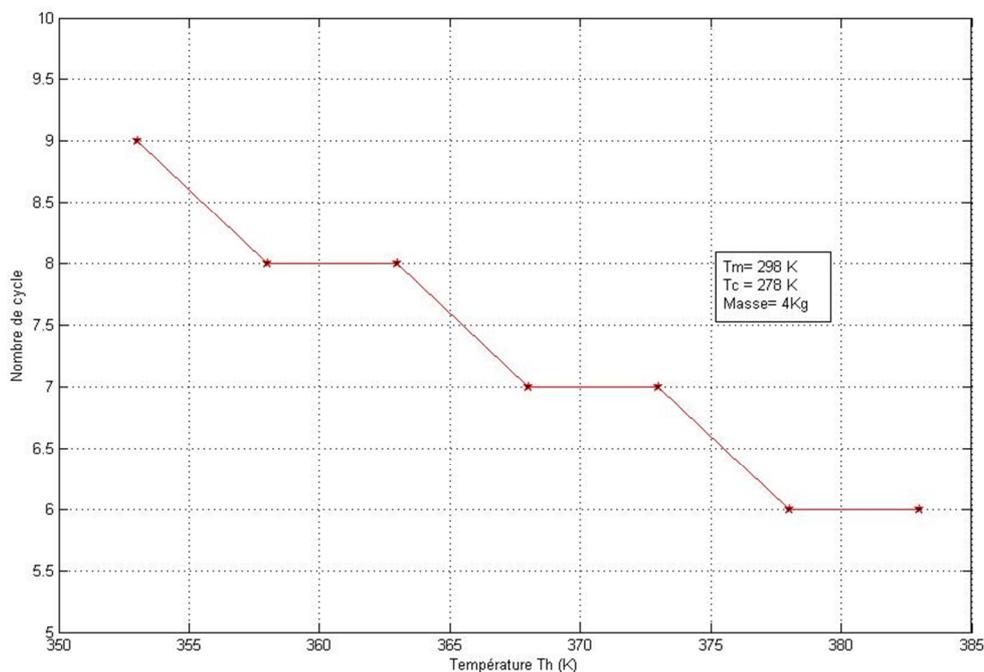


Figure 3.20. Variation de nombre de cycle avec la température T_h - volume 15 m^3 .Figure 3.21. Variation de nombre de cycle avec la température T_h - volume 27 m^3 .

D'après tous les résultats qu'on a obtenus, on peut voir la complexité du système, et cela dû à l'influence de chaque terme sur les performances. La variation de tous les paramètres, température, pression, et masse implique un changement significatif dans le fonctionnement du système. L'important est que la cinétique du système doit être bien contrôlée pour avoir des performances optimales.

3.6. Energie utile absorbée par le fluide caloporteur

Les radiations solaire avant d'être absorbés par le caloporteur subissent plusieurs influences. Premièrement au niveau d'atmosphère où elles sont absorbées ou dispersé par les molécules d'air. Lorsqu'elles arrivent au concentrateur, elles subissent des pertes optiques. Finalement au niveau de l'absorbeur, où il y a pertes d'énergie par conduction, convection et rayonnement.

Pour assurer le bon fonctionnement du système de refroidissement, il faut bien quantifier l'apport nécessaire de chaleur pour activer l'hydrure du réacteur MH1. L'hydrure MH1 est chauffé à la température T_h , pour maintenir ce niveau de température il faut que l'apport de chaleur soit continu. Cette énergie est fournie par le système de concentration qu'on a décrit au chapitre III. Afin de quantifier cet apport on a utilisé les équations reportées dans le chapitre III. Un programme sous MATLAB a été mis à cette fin écrit. La figure 2.22 représente la puissance nécessaire de fonctionnement pour un cycle, cette chaleur augmente chaque fois la température augmente.

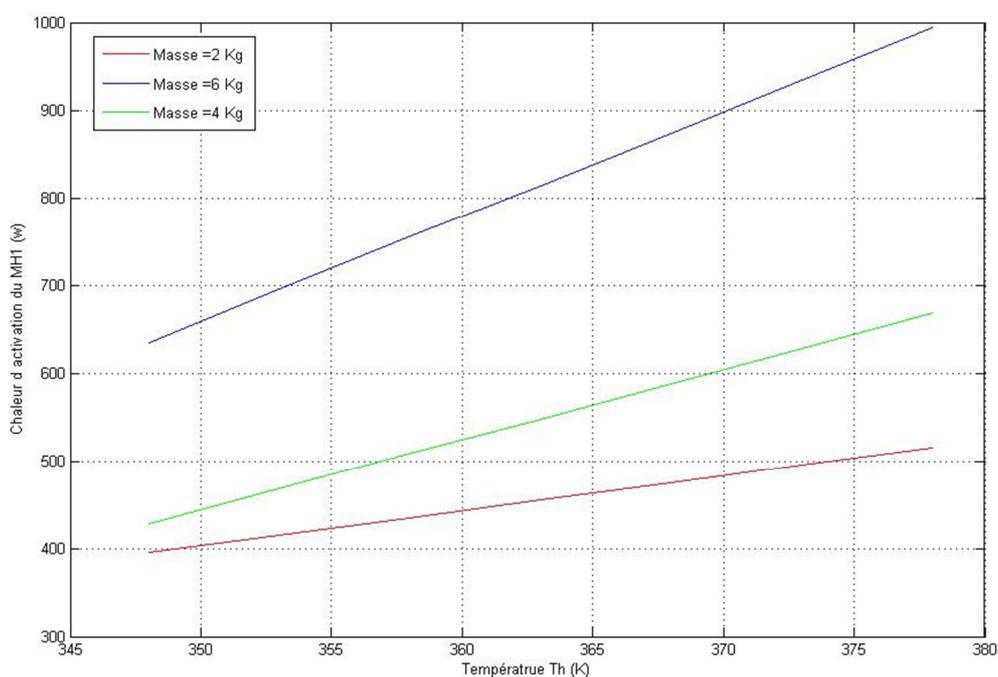


Figure 4.22. Puissance nécessaire d'activation d'hydrure MH1.

L'apport de chaleur est assuré par la concentration d'énergie solaire. Comme il y a variation de l'intensité du rayonnement solaire, cette énergie n'a pas une valeur moyenne fixe, elle est variable au cours de la journée. Les pertes thermiques réduisent l'énergie absorbée par le collecteur. La figure 4.23 montre la différence entre l'énergie absorbée et l'énergie utile.

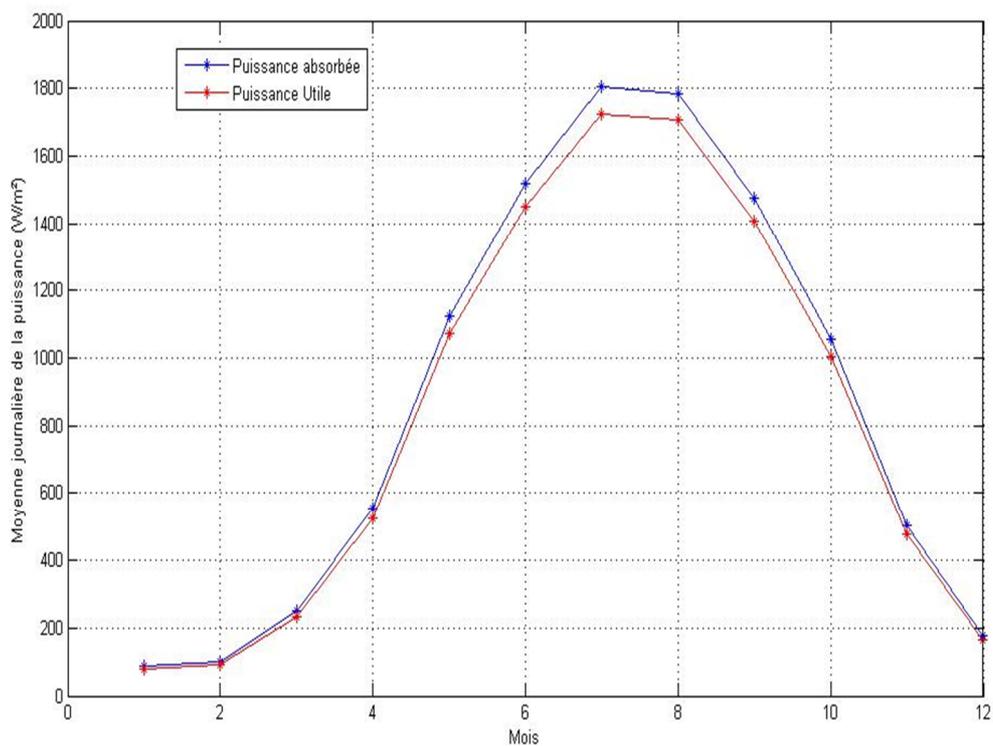


Figure 4.23. Différence entre puissance absorbée et puissance utile.

L'importance du système de concentration d'énergie solaire est primordiale; et la maîtrise de cette partie d'unité assure un bon fonctionnement du système de refroidissement. Il faut fournir l'énergie nécessaire de fonctionnement pour ne pas perturber la production du froid.

CONCLUSION Et RECOMONDATION

Conclusion

D'après cette étude nous pouvons tirer quelques remarques. Le choix des températures caractéristiques est critique, ces températures ont des influences sur la capacité de refroidissement et le coefficient de performance, pour cette raison il faut essayer de trouver une valeur optimale pour la température d'activation.

Le système à un seul étage est un système simple, il ne contient que deux réservoirs d'hydrure mais cet avantage a un coût, la production du froid n'est pas continue.

Le système de refroidissement à base d'hydrure est besoin d'une quantité de chaleur pour fonctionner, l'apport de chaleur doit être continu et stable et cela n'est pas le cas ici parce que nous avons utilisé un système de concentration d'énergie solaire, et comme l'énergie solaire à travers la journée n'est pas fixe, le système à base d'hydrure est besoin d'un système de stockage d'énergie.

Recommandations

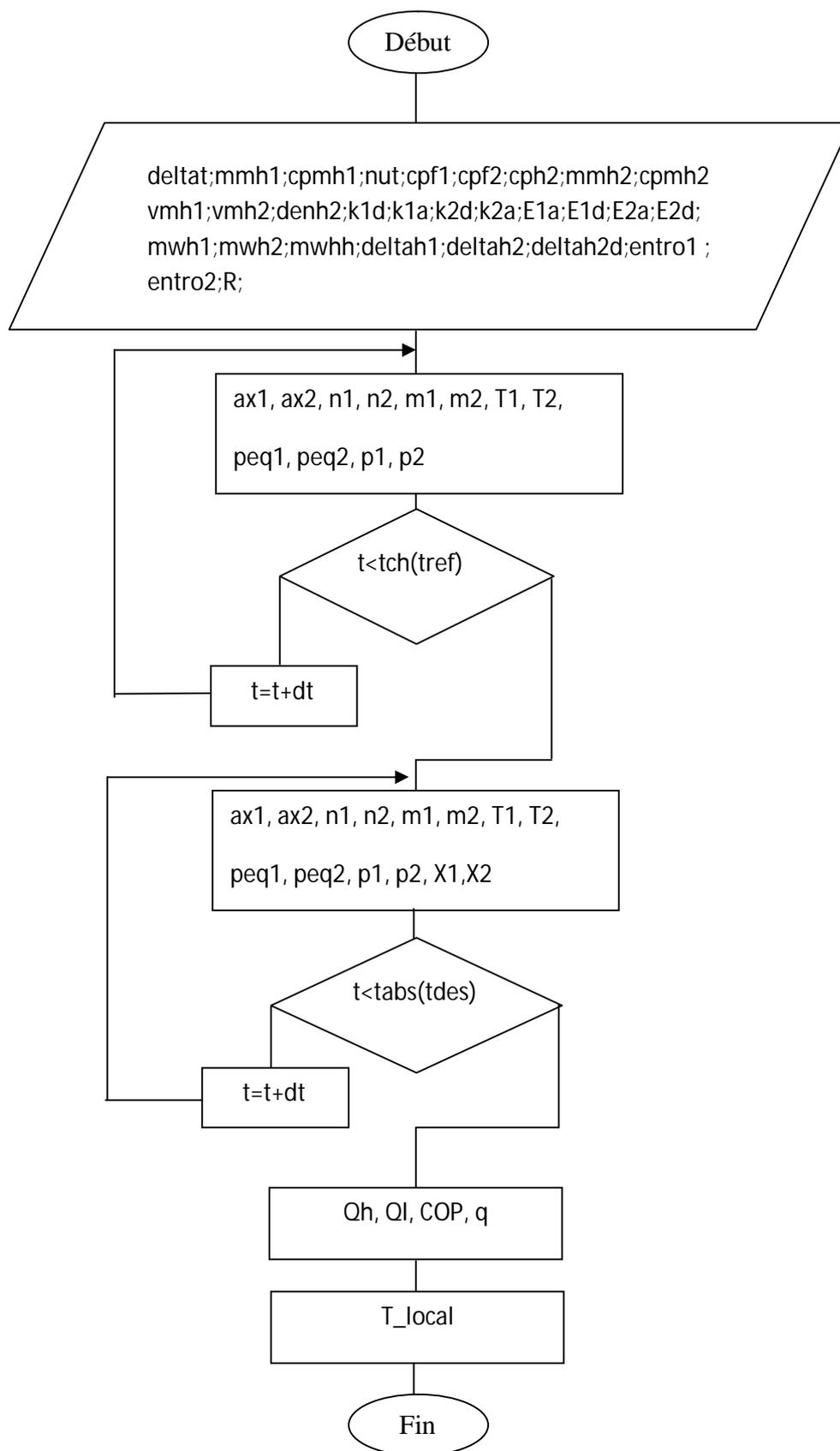
Il est clair que ce système à un seul étage doit être amélioré, mais aussi nous pouvons contribuer dans ce domaine important par d'autres études.

Nous suggérons d'étudier un système à double étage ou d'autres types de système à base d'hydrure que nous avons cité dans le chapitre II.

Il y a plusieurs hydrures, pour produire un système de refroidissement il faut bien choisir le couple d'hydrure et cela peut être fait par les études sur plusieurs couples d'hydrures.

Le point plus inquiétant dans l'avenir de ces systèmes est la durée de cycle de refroidissement, il faut aussi donner une grande importance à la cinétique que nous

pouvons l'améliorer par l'amélioration des propriétés physiques et chimiques des hydrures.



Organigramme de calculs des performances du système à base d'hydrure

REFERENCES

- 1 R. Boudries-Khellaf et A. Khellaf, Estimation de la Production de l'Hydrogène Solaire au Sud Algérien, *Revue des Energies Renouvelables* (2003) 73-77
- 2 R.Boudries, R.Dizène, A.Khellaf and M.Belhamel, Hydrogen as an Energy Carrier, *Clean Energy: Resources, production and Developments*. 2010
- 3 Marie Amélie, Elaboration et caractérisation d'alliages hydrures de Types AB_x (A=La, Mg ; B=Ni ET $x=3$ À 4) en vue de leur utilisation comme matière active pour électrode négative d'accumulation NI-MH.
- 4 Cristina Iuliana, Phase et nouveaux composés à base de magnésium pour le stockage de l'hydrogène, Thèse de Doctorat, université de Bordeaux, 2008.
- 5 Albin Chaise, Etude expérimentale et numérique de réservoirs d'hydrure de magnésium, Thèse de Doctorat, université Josef Fourier-Grenoble 1, 2008.
- 6 Il-Seok Parka, Jin-Kyeong Kima, Kwang J. Kima, Jixi Zhanga, Chanwoo Parka, Keith Gawlikb, *International journal of hydrogen energy* 34 (2009) 5770–5777.
- 7 P. Muthukumar, A. Satheesh, U. Madhavakrishna, Anupam Dewan. Numerical investigation of coupled heat and mass transfer during desorption of hydrogen in metal hydride beds. *Energy Conversion and Management* 50 (2009) 69–75
- 8 P.Muthukumar, M. PrakashMaiya, S. SrinivasaMurthy. Experiments on a metal hydride- based hydrogen storage device. *International Journal of Hydrogen Energy* 30 (2005) 1569 – 1581.
- 9 P. Muthukumarer M. Groll, Metal hydride based heating and cooling systems: A review, *international journal of hydrogen energy* 35 (2010) 3817–3831.
- 10 A. Satheesh, P. Muthukumar, Anupam Dewan, Computational study of metal hydride cooling system, *International journal of hydrogen energy* 34 (2009) 3164–3172

- 11 Kevin Abraham, M. Prakash Maiya, S. Srinivasa Murthy, Performance analysis of a single stage four bed metal hydride cooling system, part B: influence of heat recovery, *International Journal of Thermal Sciences* 42 (2003) 79–84.
- 12 E. Willers, M. Groll, Evaluation of metal hydride machines for heat pumping and cooling applications, *International Journal of Refrigeration* 22 (1999) 47±58
- 13 S. Mellouli et al, Parametric studies on a metal-hydride cooling system, *international journal of hydrogen energy* 34 (2009) 3945–3952.
- 14 Kamel Elsaket, Simulating the integrated solar combined cycle power plants application in Libya, Master of Science thesis, Cranfield University, 2007
- 15 M. Gambini et al, Numerical analysis and performance assessment of metal hydride-based hydrogen storage systems, *international journal of hydrogen energy* 33 (2008) 6178–6187.
- 16 A. Satheesh, P. Muthukumar. Performance investigations of a single-stage metal hydride heat pump, *international journal of hydrogen energy* 35 (2010) 6950-6958.