

Comparaison de la performance d'un cycle DAR fonctionnant avec le couple ammoniac/eau et avec un mélange d'hydrocarbures

Nessrine SOLI *

Département de Génie Chimique-Procédés

**UR11ES83. Environnement, Catalyse et Analyse des Procédés,*

Ecole Nationale d'Ingénieurs de Gabès

Rue Omar Ibn El Khattab - Zrig - 6029 - Gabès, Tunisie

Résumé— Dans les dernières années le changement climatique mondial vari progressivement, selon le dernier rapport du (GIEC) ,19 pays subissent un stress hydrique particulièrement élevé. Plusieurs d'entre eux se situent en Afrique. Dans ce cadre, la 22ème session de la Conférence des Parties de la Convention-Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (COP22) se tiendra à Marrakech du 7 au 18 novembre 2016. Dans ces axes, et on visant la recherche des frigorigènes non nocif pour l'environnement, notre travail consiste à la comparaison de la performance d'une machine de faible puissance frigorifique (300 W) qui mette en jeu des mélanges d'hydrocarbures avec celles travaillant avec le couple ammoniac /eau, tout en utilisant un refroidissement au niveau du condenseur et de l'absorbeur par l'air ambiant à 35 °C. On a utilisé l'hélium comme gaz inerte.

Mots clés — machine à absorption- diffusion ; propylène ; ammoniac ; eau ; Hélium.

I. INTRODUCTION

Aujourd'hui l'industrie frigorifique est touchée de plein fouet par les directives consécutives au protocole de Montréal (1987) et aux accords de Kyoto (1997) sur l'utilisation des fluides frigorigènes.

En effet, l'utilisation des CFC (chlorofluorocarbures) est interdite et celle des HCFC (hydro chlorofluorocarbures) est soumise à une réglementation de plus en plus sévère du fait de leur contribution à la diminution de la couche d'ozone. C'est dans ce contexte général que se développent des recherches de solutions alternatives. Une alternative s'oriente vers le développement de nouveaux fluides possédant une efficacité énergétique intéressante tout en restant neutres vis-à-vis de l'environnement, d'autre recherche vise la mise au point de développement d'autres systèmes frigorifiques.

Au cours des années, un certain nombre de chercheurs ont effectué des études théorique et expérimentale de cycle de réfrigération d'absorption - diffusion,

Munoz et Al [6] avaient été présentés dans son travail un examen de la situation actuelle de la technologie de réfrigération de diffusion-absorption, commençant par le début de cette technologie comprenant des procédés de

réfrigération, des fluides de fonctionnement principaux, l'équipement de base et des tendances de courant.

Ils ont conclu que la technologie est attrayante puisqu'elle a des avantages, une fois comparée à la compression conventionnelle de vapeur de la petite capacité de refroidissement parce qu'ils n'ont pas les pièces mobiles.

Zohar et Al [3] avaient fait des simulations sur ordinateur afin d'examiner l'exécution d'une configuration de système simplifiée de DAR actionnée avec les fluides de fonctionnement organiques. Les fluides de fonctionnement examinés ont été basés sur DMAC comme absorbant et cinq réfrigérants différents. Les résultats ont été comparés à un circuit de refroidissement d'ammoniac fonctionnant aux conditions semblables. On l'a constaté que la plus grande valeur de COP (0.298) ont été réalisées par le système de l'ammoniac-eau. Le rapport de circulation est bas, la pression de système est intermédiaire (15.5 bar), les températures de générateur doit être au-dessus de la température du 150°C et température d'évaporateur au-dessus de -18 °C.

Nous considérons dans ce travail des mélanges des hydrocarbures comme fluides de travail de notre installation. Ils sont des composée thermiquement stables dans le domaine des températures de l'utilisation, non-toxique et non corrosifs [2,4].

Le composé volatil plus, le propylène est choisi comme le réfrigérant et l'hexane et l'heptane comme absorbent.

La configuration étudiée (fig. 1) est une machine de réfrigération à absorption - diffusion.

II. MATERIALS ET METHODES

A. Machine frigorifique à absorption-diffusion :

La machine frigorifique à absorption-diffusion a été inventée par Von Platen et al. (1928) [1].

Elle utilise trois fluides de fonctionnement: l'ammoniac (réfrigérant), l'eau (absorbant) et l'hydrogène comme un gaz inerte. Cette machine se caractérise par un fonctionnement silencieux et une grande fiabilité à long durée de vie.

A.1. Modélisation thermodynamique d'une machine frigorifique à absorption-diffusion :

A.1.1. Mise en équation des différents organes de machine :

En utilisant la figure suivante (figure 1) on va déterminer les bilans matières et les bilans énergétiques de tous les composants de l'installation :

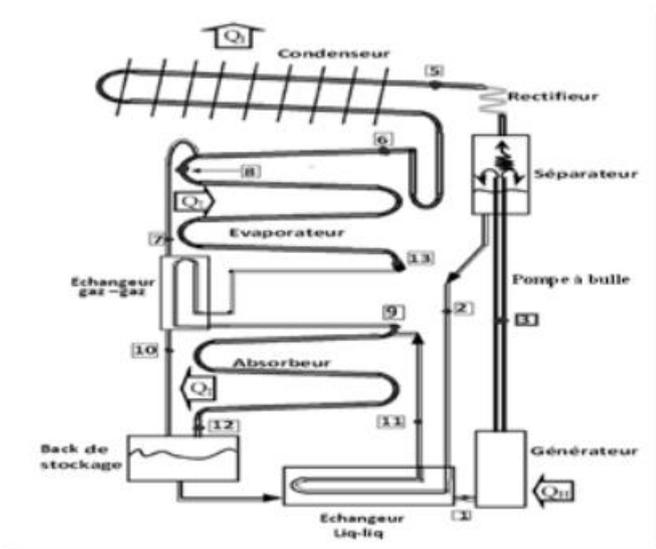


Schéma d'un cycle de réfrigération par absorption-diffusion

A.1.1.1. Générateur + Séparateur :

Bilan global de matière :

$$\dot{m}_3 + \dot{m}_2 = \dot{m}_1 + \dot{m}_4$$

Bilan partiel sur le frigorigène :

$$\dot{m}_3 Y_3 + \dot{m}_2 X_2 = \dot{m}_1 X_1$$

Bilan énergétique :

$$\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_4 h_4 = Q_{Gén}$$

A.1.1.2. Rectifieur :

Bilan global de matière :

$$\dot{m}_5 + \dot{m}_4 = \dot{m}_3$$

Bilan partiel sur frigorigène :

$$\dot{m}_3 Y_3 = \dot{m}_5$$

Bilan énergétique :

$$\dot{m}_3 h_3 - \dot{m}_5 h_5 - \dot{m}_4 h_4 = Q_{Rec}$$

A.1.1.3. Condenseur :

Bilan global de matière :

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_6$$

Bilan partiel sur frigorigène :

$$\dot{m}_5 Y_5 = \dot{m}_6 X_6$$

Bilan énergétique :

$$\dot{m}_5 h_5 - \dot{m}_6 h_6 = Q_{Con}$$

A.1.1.4. Évaporateur :

Bilan de matière global :

$$\dot{m}_7 + \dot{m}_6 = \dot{m}_8$$

Bilan partiel sur frigorigène :

$$\dot{m}_6 X_6 + \dot{m}_7 Y_7 = \dot{m}_8 Y_8$$

Bilan partiel sur l'hélium :

$$\dot{m}_7 Y_{7he} = \dot{m}_8 Y_{8he}$$

Bilan énergétique :

$$\dot{m}_8 h_8 - \dot{m}_6 h_6 - \dot{m}_7 h_7 = Q_{Evap}$$

A.1.1.5. Échangeur gaz-gaz :

Bilan de matière global :

$$\dot{m}_9 + \dot{m}_7 = \dot{m}_{10} + \dot{m}_8$$

Bilan partiel sur frigorigène :

$$\dot{m}_9 Y_9 + \dot{m}_7 Y_7 = \dot{m}_{10} Y_{10} + \dot{m}_8 Y_8$$

Bilan partiel sur l'hélium :

$$\dot{m}_9 Y_{9he} + \dot{m}_7 Y_{7he} = \dot{m}_{10} Y_{10he} + \dot{m}_8 Y_{8he}$$

Bilan énergétique :

$$\dot{m}_9 h_9 + \dot{m}_7 h_7 - \dot{m}_8 h_8 - \dot{m}_{10} h_{10} = Q_{EGG}$$

A.1.1.6. Absorbeur :

Bilan de matière global :

$$\dot{m}_9 + \dot{m}_{11} = \dot{m}_{12}$$

Bilan partiel sur frigorigène :

$$\dot{m}_9 Y_9 + \dot{m}_{11} X_{11} = \dot{m}_{12} X_{12}$$

Bilan partiel sur l'hélium :

$$\dot{m}_9 Y_{9he} = \dot{m}_{12} Y_{12he}$$

Bilan énergétique :

$$\dot{m}_9 h_9 + \dot{m}_{11} h_{11} - \dot{m}_{12} h_{12} = Q_{Abs}$$

A.1.1.7. Echangeur liquide-liquide :

Bilan de matière global :

$$\dot{m}_{13} + \dot{m}_2 = \dot{m}_1 + \dot{m}_{11}$$

Bilan partiel sur frigorigène :

$$\dot{m}_{13} X_{13} + \dot{m}_2 X_2 = \dot{m}_1 X_1 + \dot{m}_{11} X_{11}$$

Bilan énergétique :

$$\dot{m}_{13} h_{13} + \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_{11} h_{11} = 0$$

$$\dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_{13} h_{13} = Q_{ELL}$$

A.1.2. Principe du fonctionnement d'une machine à absorption - diffusion :

A.1.2.1. Description du cycle [1, 2, 5]:

Le schéma de simulation d'une machine frigorifique à diffusion-absorption est représenté sur la figure .2. Les composants de base de la machine sont le générateur, le condenseur, l'évaporateur et l'absorbeur.

L'effet frigorifique recherché est produit par la différence des pressions partielles du réfrigérant entre le condenseur et l'absorbeur. Afin de maintenir une pression égale dans tout l'appareil l'hélium circule dans la boucle évaporateur-absorbeur. Le réfrigérant liquide quittant le condenseur est acheminé dans l'évaporateur où règne une haute pression d'hélium. De ce fait, sa pression partielle chute jusqu'à la pression de P1 qui correspond à une température minimale d'évaporation en ce point (Tmin). En s'évaporant, par apport d'une puissance thermique de l'extérieur (QEvap), la pression partielle du réfrigérant augmente jusqu'à la pression P2 qui correspond à la température de fin d'évaporation et à la pression partielle maximale du réfrigérant dans le circuit gazeux circulant entre l'absorbeur et l'évaporateur. La vapeur produite est acheminée vers l'absorbeur ou elle rentre à contre-courant de la solution pauvre provenant du générateur. Ayant absorbé la vapeur du réfrigérant, la solution maintenant dite riche sortant au fond de l'absorbeur va alimenter la pompe à bulles.

Cette dernière passe ensuite dans le générateur où le réfrigérant est figuré sous forme de vapeur acheminé vers le condenseur alors que la solution pauvre ruisselle par gravité vers la tête de l'absorbeur.

Deux échangeurs à contre-courant assurent une meilleure utilisation de l'énergie fournie. Dans l'échangeur de solution (ELL), disposé entre l'absorbeur et le générateur, la solution pauvre retournant du générateur est refroidie par la solution riche qui s'échauffe de sa part avant d'entrer dans la pompe à bulles. Un deuxième échangeur de gaz (EGG), entre l'absorbeur et l'évaporateur, assure le refroidissement des gaz provenant de l'absorbeur avant de l'introduire dans l'évaporateur.

A.1.2.2. Données fondamentales et hypothèses :

- L'installation envisagée pour une puissance frigorifique de 300 Watt.
- Refroidissement avec l'air ambiant à une température moyenne de 35°C,
- Générateur : La chaleur motrice fournie au générateur peut avoir plusieurs origines : capteur solaire, rejet thermique, vapeur d'eau, gaz de combustion. On fixe une température maximale de cette source à 130°C.
- La machine est supposée en régime de fonctionnement permanent et les pertes de charge sont considérées négligeables.
- la pureté de la vapeur de frigorigène à la sortie du générateur est supérieure à 99 %.
- la vapeur du frigorigène quittant le générateur vers le condenseur est supposée saturée.
- les deux échangeurs de chaleur sont supposés adiabatiques et caractérisés chacun par un pincement thermique ; Celui du pré-refroidisseur (échange vapeur/vapeur) est fixé à 10°C et celui de l'échangeur de solution (échange liquide/liquide), à 5°C.

B. Utilisation actuelles des fluides frigorigènes et prochaine génération :

B.1. Utilisation actuelles des fluides frigorigènes :

Le remplacement des fluides frigorigènes est établi par secteur d'application. On trouve bien les fluides inorganiques comme, l'ammoniac et le CO2 que les hydrocarbures et les molécules fluorés, soit insaturées (HFO, Hydro-fluoro-oléfines) ou à GWP faible comme le R152 a (GWP = 1133) ou moyen comme le HFC-32 (GWP = 756).

Ces molécules sont utilisées comme fluides pur ou en mélange pour obtenir des propriétés d'usage souhaitables [7]:

- Le froid domestique : le HFC-134 a remplacé par l'isobutane avec des nouvelles conceptions de la sécurité des réfrigérateurs ;
- La climatisation automobile : le R-1234yf et le R-1234zf a prouvé une viabilité technique ;
- Froid négatif (-35 à -38°C) en froid commercial : le CO2 à basse température avec le R-1234 ;
- Procédés Industriels agro-alimentaires : l'ammoniac est déjà très utilisé ;
- Les pompes à chaleur résidentielles : Fluide frigorigène R410A, et les fluides candidats sont HFC-32 ;
- Les pompes à chaleur Industrielle suivant le niveau de température, les fluides candidats pour le futur sont R-1234ze et le R-1233zd.

B.2. La prochaine génération de réfrigérants :

Calm et al [7] ont examiné la progression des fluides frigorigènes de premières utilisations de la présente, il a abordé ensuite les orientations et les futurs candidats. En effet, ils ont montré les différents développements récents des mélanges selon les secteurs. Enfin il a prélevé les perspectives pour une acceptation plus large de « réfrigérants naturels ».

Balaj et al [6] dans ses études ont présenté les réfrigérants naturels comme l'idéal. Ils ont analysé également les potentiels de différents réfrigérants naturels et leurs domaines d'application en particulier les hydrocarbures et leurs mélanges qui sont miscibles avec les deux huiles minérales utilisées dans R12 et poly-ol-ester, huiles utilisées dans les systèmes R134a.

Ils ont noté également la compatibilité de ces réfrigérants naturels, à l'exception de l'ammoniac, avec tous les matériaux traditionnellement utilisés dans les systèmes de réfrigération.

Jian sun et al [8] ont présenté une revue complète des fluides de travail des cycles d'absorption en effet les pompes à chaleur à absorption, les refroidisseurs à absorption et les transformateurs d'absorption.

En effet, ils ont montré que le couple LiBr + H2O et NH3 + H2O avec différents additifs joueront un rôle le plus important lorsque les cycles d'adsorption sont utilisés dans cas particulier, tels que l'énergie solaire, la chaleur souterraine et la chaleur perdue dans les industries.

C. le propylène comme réfrigérant dans une machine frigorifique à absorption-diffusion :

Dans un travail ultérieur, nous avons étudié la faisabilité thermodynamique des mélanges binaires d'hydrocarbures très peu utilisés jusqu'à présent comme fluides de travail pour les machines frigorifiques à absorption diffusion. Ces fluides naturels non nocifs pour l'environnement constituent une alternative intéressante puisque les machines opérant avec de tels mélanges peuvent utiliser une source de chaleur motrice à température modérée telle que celle d'un rejet thermique ou d'un capteur solaire adéquat. De plus, cette installation fonctionne sous une pression modérée de l'ordre de 17 bar; avec le propylène comme frigorigène et l'hexane, l'heptane, comme des absorbants. D'après notre étude la température minimale de fonctionnement du générateur est de l'ordre de 106 degrés Celsius et la température maximale est de l'ordre 300 degrés Celsius.

TABLEAU 1 : CARACTERISTIQUES ET PROPRIETES DE CERTAINS FLUIDES FRIGORIGENES [9]

Fluide de travail	R-290	R-600	R-1270	R-717
Formule chimique	C 3 H 8	C 4 H 10	C 3 H 6	NH 3
Masse molaire (g mol -1)	44.10	58.12	42.08	17.03
Température critique (° C)	96,7	152,0	92,4	131,9
Pression critique (kPa)	4 247	3 796	4 665	11 333
Densité critique (kg m -3)	220,0	227,8	222,6	225,0
Point d'ébullition un (° C)	-42,1	-0,5	-47,7	-33,3
Chaleur latente d'évaporation b (kJ kg -1)	343,9	366,4	344,2	1 186,2
Inflammabilité	Y	Y	Y	Y
Toxicité	N	N	N	Y
ODP	0	0	0	0
GWP c	3	3	3	0

III. RESULTATS ET DISCUSSION

A. Simulation de la machine frigorifique à absorption-diffusion :

Les simulations sur un logiciel approprié (Aspen PLUS) de la machine à absorption-diffusion opérant en régime stationnaire sont réalisées compte tenu des hypothèses et conditions opératoires mentionné avant, les résultats de la

simulation de la machine au C3H6/n-C6H14/He et C3H6/n-C7H16/He sont présentés dans la figure suivant (figure.3)

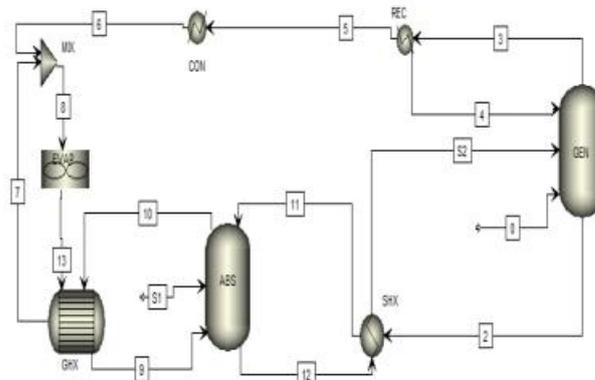


Figure 2

Schéma de flowsheet de machine à absorption-diffusion

Ces mélanges d'hydrocarbures proposés sont des fluides frigorigènes assez prometteurs quant aux avantages techniques qu'ils offrent, tels que la possibilité d'utilisation d'une source de chaleur à une température ne dépassant pas 150 °C.

Dans le tableau suivant (Tableau.3). Nous avons représenté les performances de la machine pour une puissance frigorifique de 300 watt.

TABLEAU 3
 RESULTATS DE SIMULATION DE MACHINE ABSORPTION-DIFFUSION POUR
 QE=300WATT

Composant	Énergie (kW)
Evaporateur, Q e	0,300
Absorber, Q ab	-1,298
Générateur, Q g	1,499
Condenseur, Q C	-0,054
Rectifier, Q r	-0,396

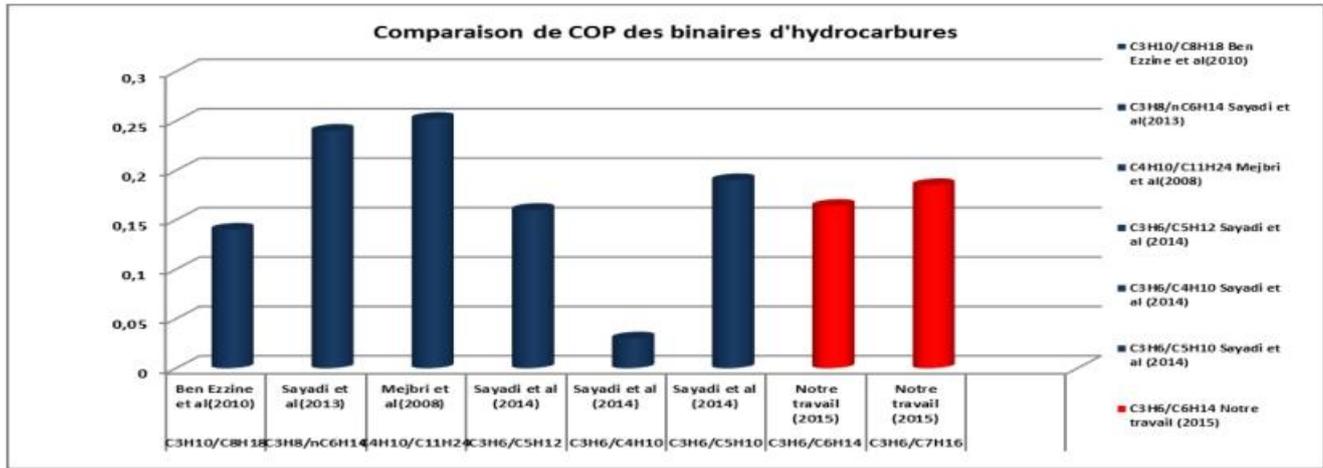
Figure 3

Comparaison des résultats de simulation avec celle des littératures

B. Validation des résultats :

Pour valider notre simulation relative à notre flowsheet, nous avons comparé nos résultats respectivement pour le couple propane/nonane, avec ceux de H. Dardour et al [2] et pour le couple propane/hexane ,avec ceux de Sayadi et al [1] Ces résultats sont reportés dans le tableau 4.

TABLEAU 4
 VALIDATION DE RESULTATS



Référence	Chiller	Fluide de travail	Qe (kw)	COP	Tgénérateur (°C)	Tévaporateur (°C)	Résultats	Gaz inerte
Dardour et al(2013)[2]	diffusion	C3H8/C9H20	1	0.20	120	2	Simulation	L'hydrogène
Notre travail (2015)	diffusion	C3H8/C9H20	1	0.197	120	2	simulation	L'hydrogène
Sayadi et al(2013)[1]	Diffusion adapté au solaire	C3H8/nC6H14	1	0,24	121	0	Simulation	l'hélium
Notre travail (2015)	diffusion	C3H8/nC6H14	1	0.239	121	0	Simulation	l'hélium

D'après la comparaison de ces résultats, on peut affirmer que notre simulation montre une bonne concordance.

IV. CONCLUSIONS

Dans ce travail, L'installation fonctionne sous une pression modérée de l'ordre de 17 bar; avec le propylène comme frigorigène et l'hexane et l'heptane comme absorbants.

En utilisant l'air comme milieu de refroidissement, le système propylène/hexane donne un coefficient de performance de l'ordre de 0.164, et le système propylène/heptane donne un coefficient de 0.185. Ces valeurs sont nettement comparables avec celles des résultats trouvés dans la littérature dans les mêmes conditions.

La simulation des machines frigorifiques à absorption à simple effet avec les binaires des hydrocarbures étudiés et les performances calculées offrent des perspectives prometteuses pour ces mélanges dans le domaine de la réfrigération à absorption- diffusion.

NOMOCLES

COP: coefficient of performance

Q: heat transfer power (watt)

h: enthalpy (kJ/kg)

m: mass flow (kg/s)

P: pressure (bar)

T: temperature (K)

REFERENCES

- [1] Z.Sayadi, N.BenThameur, M. Bourouis, A.Bellagi, Optimisation des performances de l'énergie solaire conduit petit-refroidisseurs à absorption-diffusion de travailler avec des hydrocarbures légers, Conversion et gestion de l'énergie, Volume 74, Octobre 2013, Pages 299-307
- [2] H.Dardour, H.Mhiri, S.Gabsi, A.Bellagi, thèse de doctorat: Etude des machines frigorifiques à absorption diffusion utilisant un mélange d'alcane: étude systématique et modélisation rigoureuse de l'absorbeur, 2012
- [3] A. Zohar, M. Jelinek, A. Levy, I. Borde; Performance of diffusion absorption refrigeration cycle with organic working fluids, Revue Internationale du Froid, 32 (2009) 1241-1246
- [4] N.Ben Ezzine, R.Garma, M. Bourouis, A. Bellagi. Experimental studies on bubbles pump operated diffusion absorption machine based on light hydrocarbons for solar cooling. Renew Energy 2010; 35:464-70.
- [5] W. Mbarek, A. Bellagi, 5ème Congrès International sur les Energies Renouvelables et l'Environnement, Etude expérimentale d'une

- machine frigorifique à absorption-diffusion fonctionnant aux hydrocarbures (C4/C8), 04-06 Novembre, 2010, Sousse, Tunisie
- [6] B.Bolaji, Le choix des frigorigènes respectueux de l'environnement et les solutions de rechange actuelles dans les systèmes de réfrigération à compression de vapeur
- [7] : James M. Calm ,La prochaine génération de réfrigérants - Examen historique, considérations et perspectives ,2008.
- [8] : Jian Sun ,Lin Fu ,Shigang Zhang , Un examen des fluides de travail des cycles d'absorption , Renouvelables et de l'énergie durable Commentaires , Volume 16, Numéro 4 , mai 2012, Pages 1899-1906
- [9] : le raffinage de pétrole , page 34-36