



Département Génie Mécanique
Option : Energétique

Mémoire de Magister

Présenté par : Mme TOUAFEK

Née BENDAIKHA Wahiba

Ingénieur en mécanique- énergétique de l'USTHB

Thème

Etude thermique et conception d'un système énergétique à base d'une PEMFC - Application à l'habitat

Soutenu le : 08-02-2006

Membres du Jury

M M.HADDADI, Pr	Président
M S.LARBI, MC	Rapporteur
M M.BELHAMEL , (CDER)	Examineur
M A.MALEK, MR (CDER)	Examineur
M H.BELHANACHE, CC	Examineur
M L.SERIR, CR (URAER)	Invité

2006

Remerciements

J'aimerais remercier et exprimer toute ma gratitude et reconnaissance à mon encadreur, Monsieur S. LARBI de l'Ecole National Polytechnique, pour avoir proposé et dirigé ce mémoire et pour son support, conseil, et motivation durant tout le projet.

Ce travail a été réalisé à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa, je tiens à remercier son Directeur Monsieur L. SERIR Chargé de recherches pour toute son aide et sa disponibilité, qu'il trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Je remercie le Professeur M. HADDADI, chef de Laboratoire d'Electricité Solaire à l'Ecole Nationale Polytechnique, qui m'a fait l'honneur de présider le jury.

Mes remerciements vont également au Dr M. BELHAMEL Directeur de recherches et Directeur du Centre de Développement des Energies Renouvelables pour toute l'aide qui m'a apporter et pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Je remercie Dr A. MALEK Maître de recherches et chef de Laboratoire d'Electricité Photovoltaïque au Centre de Développement des Energies Renouvelables, pour avoir accepté d'examiner ce travail et faire partie du jury.

Je remercie Monsieur H. BELHANECHÉ Maître de recherches au Centre de Développement des Energies Renouvelables, pour avoir accepté d'examiner ce travail et faire partie du jury.

Je remercie toute ma famille pour son soutien moral durant toute la durée de préparation de ce mémoire et en particulier mon cher époux.

Nomenclature

A_i	: périmètre de la partie interne de l'échangeur de chaleur,	[m]
A_L	: périmètre du RST,	[m]
C_p	: chaleur spécifique du fluide contenant le RST,	[J/kg K]
d_i	: diamètre interne du tube e l'échangeur de chaleur,	[m]
\dot{E}_{CA}	: énergie électrique consommée pour la climatisation de l'habitation,	[W]
\dot{E}_E	: énergie électrique consommée par l'éclairage des lampes,	[W]
\dot{E}_{CEE}	: énergie électrique consommée pour le chauffage électrique de l'espace,	[W]
\dot{E}_{ES}	: énergie électrique consommée pour le chauffage de l'eau sanitaire,	[W]
$\dot{E}_{FC, cap}$: puissance électrique maximale (capacité max) produite de la PEMFCs,	[W]
\dot{E}_{FC}	: puissance électrique produite de la PEMFCs,	[W]
\dot{E}_V	: énergie électrique consommée par les ventilateurs,	[W]
g	: accélération gravitationnelle,	[m/s ²]
h_i	: coefficient de convection du tube interne de l'échangeur de chaleur,	[W/m ² K]
K_{EC}	: conductivité thermique du matériau de l'échangeur de chaleur,	[W/m K]
k_{fluide}	: conductivité thermique du fluide interne de l'échangeur de chaleur,	[W/m K]
K_w	: conductivité thermique du matériau constituant le tube de l'échangeur de chaleur,	[W/m K]
\dot{m}_i	: débit massique du fluide interne circulant,	[kg/s]
$Nu_{D,0}$: nombre de Nusselt pour la convection externe dans l'échangeur de chaleur	
Nu_F	: nombre de Nusselt en convection forcé pour l'extérieur de l'échangeur de chaleur	
Nu_N	: nombre de Nusselt en convection naturel pour l'extérieur de l'échangeur de chaleur	
Pr_0	: nombre de Prandtl pour la convection externe de l'échangeur de chaleur	
\dot{Q}_C	: flux de chaleur cédé par l'eau chaude du RST,	[W]
\dot{Q}_{EC}	: transfert de chaleur au réservoir à partir d'un échangeur de chaleur interne,	[W]
\dot{Q}_{ES}	: flux de chaleur transféré du RST à l'eau sanitaire,	[W]

\dot{Q}_{FC} : chaleur produite par la PEMFCs,	[W]
\dot{Q}_P : flux de chaleur qui représente les pertes thermiques du RST vers le milieu extérieur,	[W]
\dot{Q}_{PC} : énergie thermique totale disponible du PEMFCs par heure,	[W]
$\dot{Q}_{PC,max}$: le flux de chaleur maximum qui peut délivrer la PEMFCs,	[W]
\dot{Q}_S : flux de chaleur cédée par la PEMFCs,	[W]
$Re_{D,0}$: nombre de Reynolds pour la convection externe de l'échangeur de chaleur	
r_{TE} : rapport entre l'énergie thermique et l'énergie électrique de la PEMFCs	
T_{CE} : température d'entrée du fluide chaud,	[°K]
T_{CS} : température de sortie du fluide chaud,	[°K]
T_{ext} : température ambiante,	[°K]
T_{FE} : température d'entrée du fluide froid,	[°K]
T_{FS} : température de sortie du fluide froid,	[°K]
T_{Pex} : température maximale du réservoir RST,	[°K]
T_{SE} : température de l'échangeur de chaleur entre la PEMFCs et le réservoir RST,	[°K]
UA : coefficient de transfert thermique entre l'eau chaude du RST et l'eau sanitaire à chauffer,	[kW/K]
U_L : coefficient d'échange thermique du RST,	[W/m ² °K]
μ_i : viscosité du fluide interne de l'échangeur de chaleur,	[kg/m.s]
ρ_0 : masse volumique du fluide externe de l'échangeur de chaleur,	[kg/m ³]
β : coefficient d'expansion thermique,	[1/°K]
μ_0 : viscosité du fluide externe de l'échangeur de chaleur,	[kg/m.s]

Sommaire

Introduction générale	07	
Chapitre 1	Contexte bibliographique	
1.1	Introduction.....	09
1.2	Historique	09
1.3	Conclusion.....	17
Chapitre 2	Généralités sur les piles à combustible	
2.1	Introduction	19
2.2	Fonctionnement des piles à combustibles.....	19
2.3	Différents types de pile à combustible.....	20
2.4	La Cogénération par PEMFC.....	22
Chapitre 3	Conception du Système Energétique Total (SET) à base d'une PEMFC	
3.1	Introduction.....	27
3.2	Description du système SET.....	28
3.3	Le sous-système PEMFC	28
3.4	Le Réservoir de stockage thermique.....	37
3.5	Le sous-système pompe à chaleur PAC	47
3.6	Le sous-système de chauffage de l'eau sanitaire.....	55
3.7	Le sous-système chauffage thermique de l'espace	56
Chapitre 4	Etude thermique du SET	
4.1	Introduction.....	57
4.2	Etude thermique du SET.....	57
4.3	Etude thermique du SET pour différent régimes de fonctionnement	62
4.4	Besoins énergétiques d'une habitation.....	80
Chapitre 5	Simulation numérique du SET- Application à l'habitat	
5.1	Introduction.....	81
5.2	Présentation des charges.....	81
5.3	Simulation numérique du SET pour une habitation individuelle...	88
5.4	Comparaison des résultats.....	99
Conclusion	103	
Annexes	105	
Bibliographie	109	

Introduction générale

La pile à combustible est un dispositif de cogénération (sous entendu : production d'électricité et de chaleur) qui est un procédé industriel classique, qui permet de valoriser les pertes thermiques inhérentes à la production d'électricité.

La réaction électrochimique qui se produit dans la PEMFC permettant la génération d'électricité est exothermique. Pour maintenir l'ensemble du réacteur à la température voulue un système de refroidissement est nécessaire. La récupération de cette énergie peut être exploitée pour chauffer l'eau et l'espace des habitations.

Le Système Energétique Total (SET) est une nouvelle conception des applications stationnaires à base de la PEMFC, ce système de cogénération peut fournir de l'énergie électrique et thermique nécessaire pour satisfaire les besoins énergétiques d'une habitation. Peu de travaux ont été fait sur les systèmes SET, une étude à l'Université de Blacksburg de la Virginie (USA) [1] a montré l'efficacité d'implantation de ce genre de système dans plusieurs sites des Etats Unis, la conception du SET diffèrent pour chaque application et ceci est fonction du cahier de charges de l'habitation ainsi que les conditions climatiques du site d'implantation de cet habitation.

L'objectif de notre travail est la conception d'un système énergétique total basé sur la technologie PEMFC pour la production simultanée de l'énergie électrique et thermique ou cogénération.

Nous avons entamé notre travail par une étude théorique succincte du système énergétique total à travers l'étude du bilan thermique ensuite nous l'avons appliqué à une habitation individuelle d'une surface de 60m² situé à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables à Ghardaïa (sud d'Algérie).

Ce mémoire est divisé en cinq chapitres et trois annexes. Le premier chapitre est consacré au contexte bibliographique et à l'état de l'art dans les applications des piles à combustible,

les principaux travaux de recherches qui traitent de ce sujet ainsi que notre apport à travers ce mémoire.

Nous avons traité au deuxième chapitre les généralités sur les piles à combustible, leurs principes de fonctionnements ainsi que leur différents voies de leur applications.

Le troisième chapitre est consacré à la conception d'un système énergétique basé sur la technologie PEMFC pour la production simultanée de l'énergie électrique et thermique.

Nous avons établi au chapitre quatre, le bilan thermique d'une habitation à base d'une PEMFC et démontré les performances d'une pile à combustible dans un Système Énergétique Total (SET) en réponse aux besoins énergétiques pour différentes conditions climatiques.

Le chapitre cinq est consacré à la simulation numérique du système et à l'application du SET à une habitation avec des données réelles du site et avec un profil de charge choisi.

Les annexes A, B, C, contiennent des définitions et des illustrations.

Nous avons terminé ce mémoire par une conclusion générale dans laquelle nous avons présenté les principaux résultats trouvés ainsi que les perspectives et la suite à donner à ce travail.

Chapitre 1

ETAT DE L'ART

1.1 Introduction

La pile à combustible est un nouveau système de cogénération car il permet de produire de l'électricité et de la chaleur en utilisant directement l'énergie chimique contenu dans le carburant qui est l'hydrogène et le comburant qui est l'oxygène. La conversion d'énergie chimique en énergie électrique se fait sans combustion directe, ni production intermédiaire d'énergie mécanique.

Les piles à combustibles sont présentées comme la solution du futur dans les domaines de production d'énergie électrique. En effet, elle ont de nombreux avantages, de hauts rendements énergétiques même à charge partielle, ne présentent pas de bruits pendant leur fonctionnement, peu d'émissions (elles dépendent cependant du combustible utilisé), elles sont de construction modulaire, diverses températures de fonctionnement, pas de parties rotatives.

On distingue plusieurs types, chacun a ses particularités et s'applique dans un domaine spécifique qui sont généralement classés en trois grandes familles [1,2] : les applications portables, les applications embarquées et les applications stationnaires, ces dernières faisant objet de ce travail.

Nous allons présenter dans ce chapitre les différents travaux effectués dans le domaine des piles à combustibles et de leurs applications par les différentes équipes de recherches de part le monde et l'état de l'art dans ce domaine.

1.2 Historique

L'histoire de la pile à combustible ne date pas d'hier, elle remonte à l'année 1839 où un juge anglais, Sir William GROVE, chercheur amateur en électrochimie, découvre le principe [3]. Dans son expérience, il utilisait un tube en U rempli d'eau avec deux

électrodes en platine, grâce à un courant électrique, il parvint à obtenir de l'hydrogène et de l'oxygène : c'est ce que l'on appelle l'électrolyse. Mais en coupant ce courant, il constata que ces gaz donnaient lieu à un courant électrique de sens inverse au premier.

Cependant, cette technique resta ensuite plus ou moins dans l'oubli tandis que se développaient les machines thermiques, les accumulateurs et les piles électriques. Pourtant des chercheurs continuèrent de s'intéresser à cette technologie. En 1889, L. Mond et C. Langer ont introduit les catalyseurs (platine), ont perfectionné l'électrolyte et ont utilisé le terme pile à combustible [3]. En 1921, E. Baur découvrant l'importance de la cinétique et construit une cellule fonctionnant à haute température (1000°C) [3].

Mais, c'est vraiment Francis T. Bacon [3] qui réalisa des progrès essentiels: en 1953, il a construit une pile hydrogène-oxygène ayant un électrolyte alcalin et des électrodes poreuses de nickel et d'oxydes de nickel. Elle fonctionnait entre 80 et 200°C pour une pression pouvant atteindre 40 atmosphères. Cette réalisation démontra l'intérêt des piles à combustible pour les domaines spatiaux et océanographiques: d'une puissance de quelques kW, il présentait une densité de courant de $1\text{A}/\text{cm}^2$ pour une tension de 0,8V. Ce fut d'abord la NASA qui les utilisa pour ses engins spatiaux dans les années 60: les piles servaient de générateur pour les véhicules spatiaux habités Gemini en 1963 (piles à combustible de type électrolyte polymère de General Electrics) et Apollo en 1968 (piles de type alcalin de Pratt et Whitney). Ayant prouvé leur efficacité, les piles sont toujours employées dans les navettes américaines.

Les premières applications embarquées sont apparues aux Etats Unis avec une pile de type AFC de 15 kW pour un tracteur électrique [3], puis avec une pile de type AFC de 6 kW (avec des batteries plomb/acide) pour une Austin A40 (c'est une marque de véhicule) à propulsion électrique associée. Cette voiture qui utilisait de l'hydrogène sous pression et avait une autonomie de 300 Km a fonctionné pendant 3 ans en effectuant plus de 16.000 km. Par la suite, la technologie des piles va profiter des travaux sur les véhicules électriques et hybrides.

En 1970, DuPont a mis au point [3], la membrane Nafion, qui a permis de relancer les piles à combustible acides (PEMFC). Dans le même temps, les Etats-Unis ont développé les piles à potasse.

Plus de 30 projets de recherche ont été menés aux Etats-Unis en 1972, sur le stockage de l'hydrogène embarqué ou sur sa fabrication embarquée. L'objectif initial n'était pas les piles à combustible, mais l'emploi de l'hydrogène dans les moteurs thermiques pour réduire la pollution.

Le très fort développement des recherches sur les piles à combustible dans les années 1970 résultait de la première crise de pétrole de 1973. Actuellement, les préoccupations qui sont beaucoup plus d'ordre environnementales font leur apparition : des prototypes roulants de General Motors et Ford font leur apparition avec une pile à hydrogène et stockage d'hydrogène [4]. Plus tard (en 1994) il ont accordé une étude au département de l'énergie des Etats Unies afin d'évaluer la technologie PEMFC pour application au véhicule, ce rapport contient trois principaux points : D'abord , développer et démontrer en laboratoire de système de propulsion l'efficacité de la PEMFC dans l'application embarqués (le control, la puissance maximale, caractéristique, poids, volume, le coût ..), ensuite sélectionner un système de stockage et démontrer son efficacité avec un poids, un volume et un coût acceptable et une bonne sécurité d'utilisation d'hydrogène et enfin analyser l'infrastructure du système d'alimentation à hydrogène pour s'assurer qu'il peut être fourni au véhicule en toute sécurité dans différents sites.

Des travaux ont été menés pour étudier le possible développement de l'infrastructure de l'hydrogène, mais aussi sur l'emploi soit du méthanol, de l'essence, du gaz naturel, de l'éthanol comme combustible pour les véhicules à pile embarquée avec reformeur, d'hydrocarbures légers pour la fabrication d'hydrogène par reformage pour des applications stationnaires. En 1977, une installation de 1 MW a été mise en place [5], suivie d'une installation de 4,5 MW en 1983 à New York.

Malgré quelques réussites, les piles restent à cette époque coûteuses, de faible durée de vie, avec un volume et un poids trop importants pour être insérées dans un véhicule. Les PEMFC n'ont connu un développement accentué qu'après 1987 avec la création de la firme canadienne Ballard [6, 7].

C'est réellement au début des années 1990 que les piles ont connu un regain d'intérêt. Cela est dû à plusieurs facteurs déterminants, L'aggravation des problèmes environnementaux liés à l'effet de serre ont relancé la recherche sur les piles à combustible et leurs applications, Les progrès technologiques (membranes plus performantes pour les PEMFC, catalyseurs, reformage), Les premiers prototypes (véhicules, installations stationnaires) sont développés.

En ce qui concerne les applications stationnaires, en Amérique du nord des installations de forte puissance (plusieurs MW) ont été mises en place pour la production décentralisée d'électricité mais aussi pour la cogénération. En 1992 International Fuel Cells et ONSI ont commencé à installer un système stationnaire de cogénération à base d'une PAFC 200 kWe montré dans la figure 1.1 [8].



Figure 1.1 : PAFC de 200 kW_e [1]

La technologie PEMFC a eu un développement très rapide dans les dernières années dans les applications stationnaires. Ballard a développé une unité de démonstration de 30 kWe alimentée en hydrogène comme carburant et une autre unité de production d'énergie de 10 kWe alimenté en gaz naturel. L'installation de 10 kWe à base d'une PEMFC avec l'intégration d'un réformateur du gaz naturel était la première installation alimentée en gaz naturel [7].

Plug Power's ont installé un système à base d'une PEMFC de 7 kWe pour alimenter une habitation en énergie électrique et thermique (figure 1.2) [9].



Figure 1.2 : Photo d'une PEMFC de 7kWe pour application résidentiel [9]

De nombreux prototypes ont été dans une phase pré-commerciale depuis la fin 2002, Daimler Chrysler [10], le leader dans le domaine, prévoit d'en lancer 60 modèles en Allemagne, USA, Japon et Singapour. Les offres commerciales autour des piles à combustible sont aujourd'hui peu nombreuses et concernent uniquement un marché dit « de démonstration ».

En plus de la cogénération assurée par utilisation des piles à combustible elle présentait un avantage en termes de pollution, en effet si on utilise de l'hydrogène pur, les rejets sont pratiquement nuls et en principe plus faibles que dans les technologies concurrentes si l'hydrogène est produit par reformage des hydrocarbures [11,12]. De plus, les nuisances sonores sont très faibles, ce qui facilite l'insertion urbaine de ces systèmes. Enfin, l'utilisation des piles à combustibles offre l'avantage d'un rendement élevé [13].

On recense trois domaines d'application pour les piles à combustible, les applications :

-portables, cette famille inclut l'ensemble des appareils électroniques portables comme ordinateurs, téléphones, assistant de poche... Ces appareils consomment une puissance moyenne allant de 50 mW à 10 W et connaissent une très forte croissance.

-Les applications embarquées, la propulsion de véhicules, l'alimentation d'appareils portables (dont notamment l'électronique nomade) ...

-Les applications stationnaires, ces systèmes de production d'énergie peuvent être installés au plus près des utilisateurs. Les piles à combustible sont notamment destinées à fournir de l'électricité et de la chaleur, voire du froid, aux bâtiments industriels, tertiaires (hôpitaux, centres commerciaux, hôtels...) ou résidentiels.

L'intérêt porté par les industriels varie selon le type de piles à combustible et les avancées technologiques faites sur leurs composants. Cet intérêt dépend aussi fortement des applications spécifiques à chaque type de pile [14].

Deux types de piles à combustible semblent devoir s'imposer : les PEMFC et les SOFC. Les PEMFC sont les plus aptes à être utilisées dans le domaine stationnaire (petite et moyenne cogénération) [15, 16,17].

Les SOFC en revanche pourront être commercialisées pour des applications de production centralisée de courant (en particulier couplées avec des turbines à gaz), elles peuvent être aussi utilisées pour la cogénération de faible puissance ou en tant que générateurs auxiliaires ou APU pour des véhicules où elles entrent alors en concurrence avec les PEMFC [18].

Les PAFC sont à l'heure actuelle celles qui ont été les plus étudiées par de nombreux chercheurs mais leurs caractéristiques intrinsèques limitent leur utilisation et leur développement [19]. Les AFC [19], les premières développées, restent employées dans le domaine spatial et seront sans doute remplacées par les PEMFC. Quant aux MCFC[19], leur avenir reste incertain car leur utilisation est limitée à la cogénération de moyenne puissance ainsi qu'à la production centralisée de courant (couplées avec des turbines à gaz) et elles présentent encore des problèmes liés à la corrosion de leur électrolyte et leur volume important. Les DMFC [19], elles, seraient destinées aux applications portables.

Les applications stationnaires sont des installations sur place qui ne sont pas mobiles et qui sous entend les applications aux habitations, ces derniers sont les plus diversifiées parmi les applications des piles. Cela est dû à plusieurs éléments : un large spectre de puissance du kW à plusieurs MW, des applications allant de l'approvisionnement d'électricité à la

cogénération en passant par la génération de vapeur ou de froid et plus de possibilités au niveau des carburants [15,16,17].

Une application très intéressante qui a montré le vaste champ d'application des piles à combustibles (PEMFC) et qui a abouti à une thèse de PhD soutenue en 1997 [20] était sur l'utilisation de deux boucle de contrôle pour l'optimisation d'un système hybride constitué de panneaux photovoltaïques et pile à combustible et ceci en faisant d'une part, la recherche du point de puissance maximale par la méthode des réseaux de neurones qui extrait la puissance maximale du panneaux photovoltaïque pour différents ensoleillement, températures et la variations de la charge du système. D'autre part, un contrôleur à base d'une pile à combustible PEMFC qui satisfait à la demande du système en contrôlant le combustible qui entre pour alimenter une PEMFC ainsi pour alimenter un système de climatisation.

Dans la même année une autre thèse de PhD a été soutenue sur une étude expérimentale sur une nouvelle technique qui permet de faire l'étude du phénomène du transfert de masse (oxygène et hydrogène) dans une membrane en polymère solide ce qui est appelé aussi l'électrolyte [21]. En 1998 une publication a apparu sur le développement d'un modèle qui examine l'influence d'hydrogène produit par reformage de l'essence ou autres hydrocarbures sur les performances, le rendement et le dimensionnement du système installer au bord du véhicule [22].

Une étude expérimentale a été faite sur le stockage d'hydrogène dans des réservoirs légers au bord des véhicules à base des piles à combustible PEMFC ainsi qu'une étude économique du système [23].

L'intégration des piles à combustible PEMFC dans un véhicule avec l'utilisation de l'hydrogène en gaz comprimé, la modélisation et la validation du modèle pour un véhicule électrique hybride (PEMFC/batterie) a été l'œuvre d'une thèse soutenu en l'an 2000 à l'université de virginie en USA [24].

Dans la même année une autre thèse de magister en mécanique a été soutenue sur le développement d'un banc d'essais complet qui comprend une PEMFC de 1kW [25], d'abord, pour tester l'efficacité du groupement de plusieurs PEMFC et étudier tous les paramètres qui peuvent influencer sur leur fonctionnement et leur efficacité, ainsi que tracer

ces caractéristiques. Le banc d'essai a été conçu pour mesurer et contrôler le débit de masse, pression, températures et l'humidité relative des gaz réactif, la température, le courant et le débit d'eau qui refroidit l'ensemble des PEMFC. L'auteur a mis en évidence les paramètres qui mènent à un fonctionnement optimal.

Le phénomène transitoire de transfert de chaleur, de masse et de charge a été étudié à travers le développement d'un modèle unidimensionnel, dans une membrane échangeuse de proton PEMFC avec la méthode des différences finies [26].

Une autre étude a été faite pour applications embarquées sur la modification dans la conception de la PEMFC [27] afin d'optimiser son fonctionnement, son poids et son coût. Le travail consiste entre autres, à changer le matériaux utiliser dans les PEMFC qui est le graphite, fragile et difficile à usiner aux spécifications rigoureuses pour l'utiliser dans les PEMFC, par un nouveau matériaux composite qui est testé sous les même conditions et qui réduit le coût de l'ensemble des PEMFC. Dans l'application automobile, une autre étude a été faite sur la comparaison entre deux types différent de compresseur qui font élevé la pression dans la PEMFC qui a une relation directe avec l'efficacité du système [28].

Dans l'application embarquée de la PEMFC qui s'intéresse exactement à la phase transitoire de la PEMFC au démarrage du véhicule hybride (PEMFC/ batterie) et son influence sur le rendement et la puissance générée ainsi que le coût a été l'objet des travaux menés par l'équipe de Stephen D. Gurski et Douglas J. Nelson en Virginie [29].

La majorité des travaux et études ont été faites sur les applications embarquées des piles à combustible PEMFC, néanmoins quelques applications stationnaires ont été étudiées.

Une application des piles à combustible PEMFC alimentée par reformage du gaz naturel dans le domaine stationnaire dans plusieurs sites de l'USA en intégrant une étude économique de comparaison entre les système à base des piles à combustible et les systèmes conventionnels de production d'énergie électrique a été faite dans le cadre d'un Master of science en 2001 [30].

Une autre application stationnaire mais cette fois en utilisant la SOFC a été couronné par une thèse de PhD en 2002, [18].

Dans la même année une publication a été faite sur une installation de production d'hydrogène par voie solaire photovoltaïque en utilisant un électrolyseur, stockage en gaz comprimé et enfin la restitution de l'énergie électrique à partir de la PEMFC [31].

1.3 Conclusion

Depuis une quinzaine d'années et du fait de leurs performances énergétiques et environnementales, les piles à combustible connaissent un très fort développement dans toutes les gammes de puissance, de dizaines de kWe à plusieurs MWe. Cependant les aspects de fiabilité, durée de vie et coût des systèmes à base de piles à combustible (ensemble transformateur de combustible, la pile, et convertisseur électrique) doivent encore être très largement améliorés.

Les travaux et études sur les applications stationnaires sont très restreints. Le système que nous allons étudier dans sa finalité, va assurer les besoins électrique à travers l'électricité produite directement par la pile PEMFC et convertie par un onduleur en alternatif pour les charges domestiques, ainsi que l'énergie thermique générée par la pile à combustible transférée à travers un échangeur de chaleur à un réservoir de stockage thermique servant à chauffer l'eau sanitaire et à la climatisation de l'habitation et ceci par le biais d'une pompe à chaleur.

Chapitre 2

Généralités sur les piles à combustible

2.1 Introduction

Une pile à combustible permet de convertir l'énergie chimique en énergie électrique. La diversité des piles à combustible est liée à la nature et à la constitution chimique de la membrane qui est l'élément essentiel où se produit la réaction d'oxydo réduction (lieu de réaction entre le carburant (hydrogène) et comburant (oxygène)).

Nous allons donner dans ce chapitre des généralités sur les différents types de piles à combustible, leurs principe de fonctionnement et les différents voies de leur applications.

2.2 Fonctionnement des piles à combustibles

Chaque type de pile a sa structure géométrique propre, cependant les composants principaux restent les mêmes. La pile à combustible est constituée :

- d'électrodes ;
- d'électrolyte ;
- de couche de diffusion entourant les électrodes,
- de plaques bipolaires.

L'agencement exact de ces composants entre eux ainsi que la nature des composants les constituant dépend du type de pile. Néanmoins, leur rôle reste le même.

Les deux réactions d'oxydo-réduction se font dans la zone dite de "contact triple". Dans cette zone se trouvent l'électrolyte (à travers lequel passent les espèces ioniques), les électrodes (ou plus précisément le catalyseur avec un apport ou un départ d'électrons) et l'arrivée des réactifs gazeux. Cette zone que l'on peut voir comme un espace à deux dimensions est primordiale pour le bon fonctionnement de la pile.

Les électrodes sont le siège de réactions électrochimiques: une oxydation à l'anode et une réduction à la cathode. Ces réactions ont normalement une cinétique très lente, qui dépend

surtout de l'état de surface des électrodes et de la facilité avec laquelle les réactions se réalisent. Pour que l'hydrogène (ou tout autre carburant) soit oxydé, un catalyseur est nécessaire. De même pour l'oxygène. Il a pour rôle de faciliter les échanges électroniques et est spécifique à la réaction et au niveau de la température de la pile.

2.3 Différents types de pile à combustible

Les piles à combustible sont habituellement classées selon la nature de l'électrolyte, qui détermine, entre autres, la température de fonctionnement optimale. On peut distinguer, dans un premier temps, les piles alcalines et les piles à électrolyte acide.

Les piles alcalines, AFC (Alkaline Fuel Cell) sont basées sur l'usage d'un seul électrolyte, tandis que les piles à électrolyte acide représentent une gamme beaucoup plus variée. On distingue :

- Les piles à haute température ($> 500\text{ }^{\circ}\text{C}$), avec pour électrolyte du carbonate fondu, MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) ou des oxydes solides, SOFC (Solid Oxyde Fuel Cell) ;
- Les piles à basse température ($\leq 200\text{ }^{\circ}\text{C}$), avec pour électrolyte des membranes polymères, PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) ou de l'acide phosphorique, PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell).

Le tableau (2-1) résume l'ensemble des caractéristiques des différentes piles actuellement en développement, classées par niveau de température.

Tableau 2.1 : Les différents piles actuellement en développement [2]

Type de pile	PAFC	PEMFC	SOFC	MCFC
Combustibles	Hydrogène, gaz naturel, méthanol, biogaz			
Applications	Cogénération, transport collectif (bus)	Cogénération résidentielle, automobile, téléphones et ordinateurs portables, sous-marin, spatial	Cogénération, production d'électricité décentralisée	
Stade de développement	Fabrication en petites série : 200 unités de	Développement : Unités de 50 à 250KWe	Recherche et développement : Unités de quelques	Recherche : 1 unité de 2 MWe.

	200 KWe en fonctionnement dans le monde		KWe à 1MWe.	Plusieurs de 100 à 250 KWe
Puissance	→200KWe pour la cogénération, → environ 100KWe pour le transport	→Piles miniatures de quelques Watts pour téléphones, caméscopes, panneaux de signalisation..., →Moins de 10KWe pour les applications résidentiel, 250KWe pour la cogénération.	10KWe ou 300KWe à quelques MWe	250KWe à quelques MWe
Température de fonctionnement	200°C	80 à 120°C	800 à 1000°C	850°C
Rendement électrique	40%	35 à 40%	45 à 50% 70% avec couplage avec des turbines	45 à 50%
Constructeurs	USA, Fuji Electric (Japon)	Ballard (Canada), Siemens	Siemens, Rolls-royce (GB), Sulzer (Suisse)	HC power (USA), Ansaldo (Italie), MTU (Allemagne)

L'état de développement des piles à combustible est représenté dans la figure 2.1 tel que (APU) veut dire un élément auxiliaire de puissance.

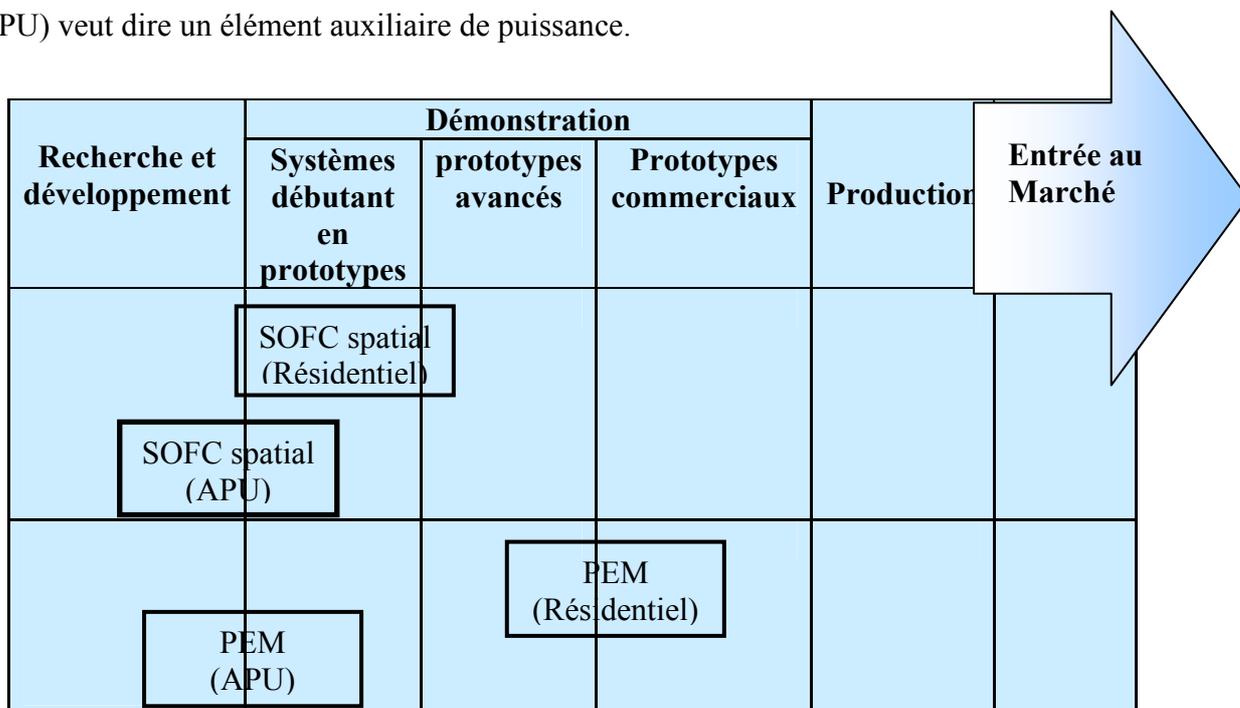


Figure 2.1 : Etat de développement des piles à combustibles [14]

Nous allons nous intéresser à la pile à combustible à membrane échangeuse de proton PEMFC compte tenu que c'est la plus prometteuse pour les petites applications stationnaires. Les divers atouts des piles à combustible type PEMFC sont résumées comme suit :

A. Meilleure efficacité énergétique

Le rendement électrique actuel prouvé dans les opérations de démonstration est de 40 % (contre 30 % environ pour un système "classique"), de plus, le rendement énergétique global (électricité et chaleur) dépasse 80 %;

B. Réponse rapide aux charges variables

Le fonctionnement à charge partielle ne diminue pas l'efficacité générale de l'installation : de plus, il est admis que l'on puisse travailler temporairement à plus de 20 % de la puissance nominale, sans entraîner de dégradation du système;

C. Pas de nuisances sonores

Le système principal ne génère pas de bruit ; seuls les auxiliaires (pompes...) peuvent être une source sonore;

D. Émissions polluantes quasiment nulles

A l'heure où les aspects environnementaux sont de plus en plus intégrés à la réflexion concernant les procédés industriels, les piles à combustibles apportent une double réponse positive : pas d'imbrûlés, pas d'émission de SOX et des émissions de CO et de NOX cinquante fois inférieures aux systèmes concurrents, deux fois inférieures en CO₂, en font un des systèmes de production d'électricité les moins polluants.

2.4 La cogénération par PEMFC

Le terme cogénération dans les PEMFC (voir annexe A) désigne la production de deux énergies; l'énergie électrique (courant et tension) et l'énergie thermique sous forme de chaleur.

2.4.1 La production d'énergie électrique

L'assemblage de l'électrolyte polymère ou membrane échangeuse de proton, cathode et anode avec deux plaques bipolaires en graphite donne une cellule. Ces deux plaques facilitent la

provision du gaz aux électrodes et connecte électriquement les cellules entre elle. La tension de sortie voulue peut être fournie en assemblant les cellules en série. Les cellules sont entassées l'une sur l'autre ce qui forme un stack comme le montre la figure (2.2).

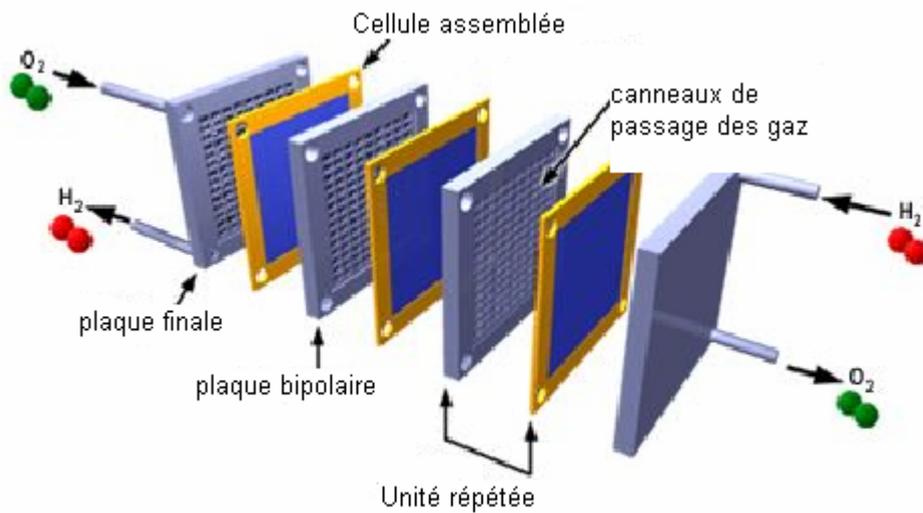


Figure 2.2 : Le stack [51]

D'un point de vue purement électrique, cette pile est considérée comme une source de tension. La figure 2.3 montre la tension et la densité de puissance en fonction de la densité de courant.

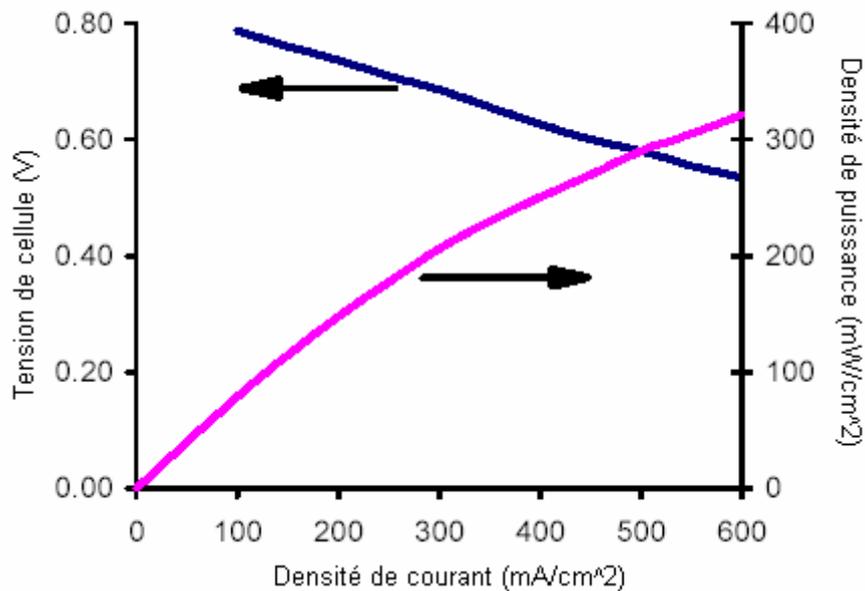


Figure 2.3 : La tension et la densité de puissance en fonction de la densité de courant [14]

La densité de puissance délivrée par une cellule est :

$$P_{cell} = I_{cell} \times V_{cell} \quad (\text{mW/cm}^2) \quad (2-1)$$

Connaissant la densité de puissance délivrée (P_{cell}) et la tension aux bornes par la cellule (V_{cell}), nous pouvons calculer la densité de courant comme suit :

$$I_{cell} = \frac{P_{cell}}{V_{cell}} \quad (\text{mA/cm}^2) \quad (2-2)$$

Dans un stack, le nombre de cellule est calculé comme suit :

$$N_{cellule} = \frac{\text{surface totale}}{\text{surface d'une cellule}} \quad (2-3)$$

Tel que la surface totale est :

$$\text{surface totale} = \frac{I'}{I_{cell}} \left(\frac{\text{mA}}{\text{mA/cm}^2} \right) \quad (2-4)$$

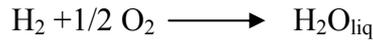
tel que :

I' : est le courant total délivré par le PEMFC stack (mA)

2.4.2 La production d'énergie thermique

La réaction électrochimique causant la production d'énergie électrique dégage de la chaleur, cette chaleur est la source d'énergie thermique dans la pile à combustible.

Dans le cas de la pile hydrogène/oxygène, la réaction chimique globale se présente sous la forme suivante [13]:



L'énergie libre de Gibbs est :

$$\Delta G = -237 \text{ KJ} / \text{moleH}_2 \quad (2-5)$$

L'énergie récupérable du système correspond à la variation dans l'énergie libre de Gibbs (ΔG) exprimée par la relation :

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (2-6)$$

tel que :

ΔG : est l'enthalpie globale.

ΔS : est l'entropie de formation.

Avec :

$\Delta G < 0$: Signifie par convention que la réaction est spontanée.

$\Delta H < 0$: Signifie par convention que la cellule dégage de la chaleur.

Sous une pression de 1 atmosphère de gaz et à une température de 25 °C nous avons :

$$\Delta G^0 = -237 \text{ KJ} / \text{moleH}_2 \text{ consommée}$$

$$\Delta H^0 = -285 \text{ KJ} / \text{mole}$$

$$\Delta S^0 = -0.164 \text{ KJ} / \text{mole} / \text{K}$$

L'énergie thermique est transférée par conduction et convection à travers la membrane polymère (mélange d'eau, protons (H^+) et le matériau polymère) et le milieu poreux (matrice du matériau polymère et l'eau à l'état biphasique 'liquide/vapeur'). La chaleur réversible dégagée est exprimée en fonction de l'entropie de formation des réactifs (s) et dépend à la température et la pression partielle comme suit [1] :

$$Q_s = T \sum_i \left[n_i s_i^\alpha(T, p_i^\alpha) \right] \quad (2-9)$$

Avec :

$$i = H_2, H^+, O_2, H_2O^l$$

$$\alpha = l, g$$

\dot{n}_i : est le taux de production ou consommation des réactifs.

L'entropie de formation pour chaque espèce s_i^α est donnée par les tables thermodynamique [36].

Pratiquement, la puissance thermique générée par la PEMFC peut être calculée comme suit [33]:

$$P_{heat} = P_{totale} - P_{électrique}$$

$$P_{heat} = (V_{idéale} \times I_{cell}) - (V_{cell} \times I_{cell})$$

$$P_{heat} = (V_{idéale} - V_{cell}) \times I_{cell} \quad (W) \quad (2-10)$$

Où :

$$I_{cell} = I \times \text{surface d'une cellule}$$

Cette énergie thermique est utilisée dans le sous système PEMFC qui est intégré dans les systèmes énergétique total (SET). Les réalisations de ce genre de système sont de plus en plus adaptées au cahier des charges, cela est dû à la diversité des composants qui les constituent.

Chapitre 3

Conception du Système Energétique Total (SET) à base d'une PEMFC

3.1 Introduction

Plusieurs systèmes énergétiques totaux qui ont fait objet de plusieurs projets de recherches appliquées ont démontré leurs performances énergétiques importantes [15, 16, 30, 33, 39]. En effet, ils sont plus efficaces étant donné qu'ils utilisent les rejets d'énergie thermique induite lors de la production d'énergie électrique pour subvenir aux besoins d'une habitation [30].

Ce chapitre traite la conception d'un Système Energétique Total basé sur la technologie PEMFC pour la production simultanée de l'énergie électrique et thermique. Le SET basé sur les piles à combustible de type PEMFC représente un système particulièrement prometteur pour les applications résidentielles, ceci est dû à son haut rendement, sa réponse rapide aux demandes d'énergies, sa modularité et son fonctionnement silencieux.

Suivant les conditions de fonctionnement, l'énergie thermique à dissiper peut être du même ordre de grandeur que la puissance électrique produite. Ce qui est bénéfique quand on dispose d'un réservoir de stockage thermique, l'énergie ainsi évacuée (par un fluide caloporteur) peut être récupérée au moyen d'échangeurs de chaleur vers une boucle primaire, (elle-même échangeant avec une boucle secondaire) qui amène les calories vers l'utilisation pour le chauffage de l'eau sanitaire et les système de climatisation par le biais d'une pompe à chaleur.

3.2 Description du Système Energétique total

Le Système Energétique Total (SET) est une nouvelle conception des applications stationnaires qui peut fournir de l'énergie électrique et thermique nécessaire pour satisfaire les besoins énergétiques d'une habitation (figure 3.1). Il est basé principalement sur la technologie PEMFC citée dans le chapitre précédent et constitué par plusieurs sous systèmes :

- PEMFC ;
- Réservoir de Stockage Thermique (RST) ;
- Pompe à chaleur (PAC) pour la climatisation ;
- Chauffage de l'eau sanitaire ;
- Chauffage thermique de l'espace.

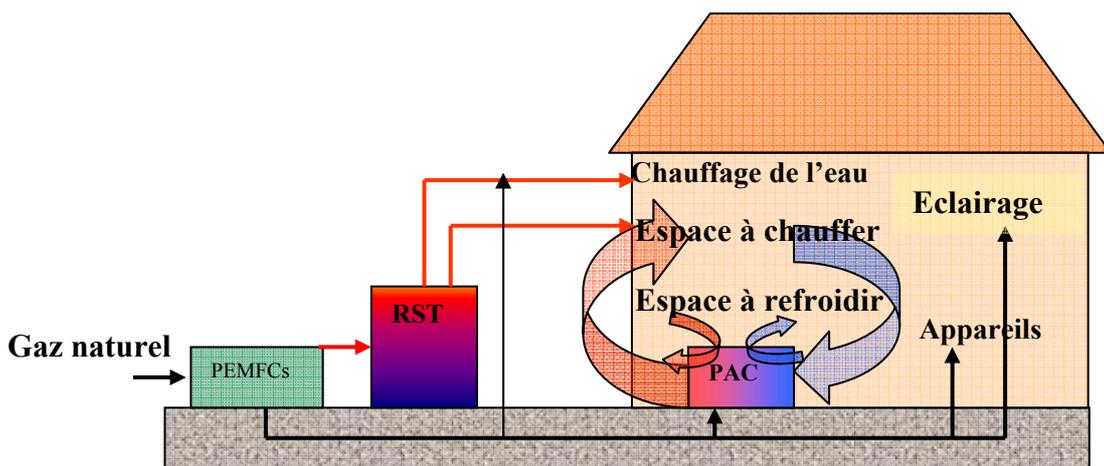


Figure 3.1 : Schéma généralisé du SET.

3.3 Le sous-système PEMFC

Ce sous-système (figure 3.2) est basé principalement sur la pile à combustible à membrane échangeuse de proton (PEMFC) stack.

Le bon fonctionnement d'une PEMFC dans une application résidentielle nécessite un ensemble d'appareils. Ils dépendent fortement de l'application et de la localisation du système.

3.3.1 Description du sous système PEMFC

Afin d'installer la PEMFC stack dans une application résidentielle, nous avons besoin d'un reformeur de carburant, d'un sous-système de gestion thermique et de gestion d'eau dégagé par la PEMFC stack, d'un sous-système d'entrée d'air, un convertisseur et un conditionneur de puissance (voir figure 3.2).

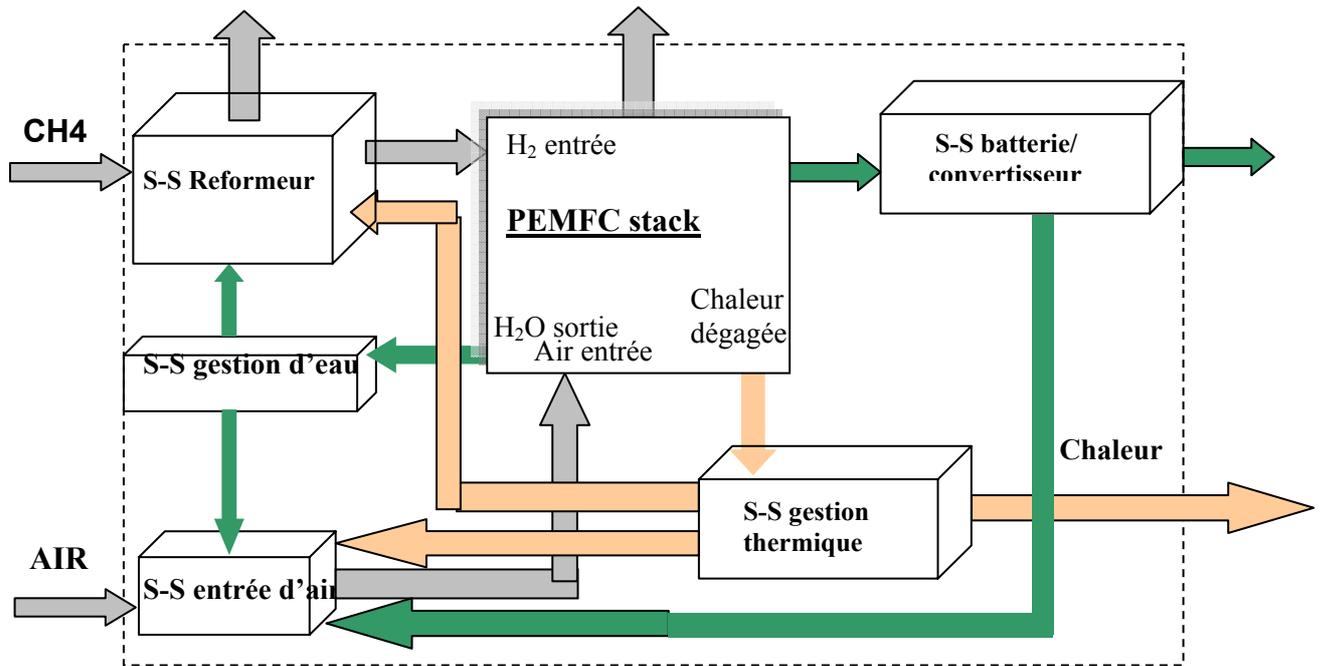


Figure 3.2 : Schéma d'un sous système PEMFC (PEMFCs)

Nous avons choisi un reformeur à vapeur (figure 3.3) qui utilise des hydrocarbures pour produire l'hydrogène. Le combustible considéré dans ce travail de recherche est le gaz naturel, qui est un mélange de gaz et qui contient principalement le méthane.

Le processus de reformage consiste à convertir ce carburant en un gaz riche en hydrogène près à être utilisé dans la PEMFC. La figure 3.3 montre un schéma simplifié du processus du reformage.

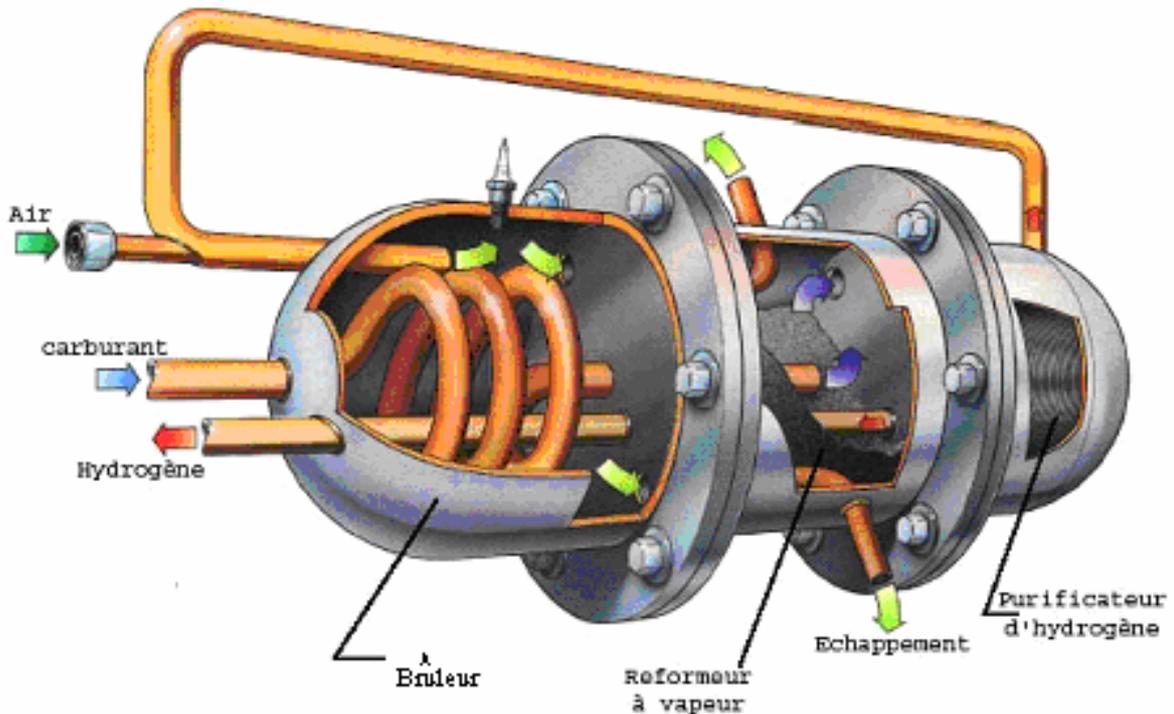


Figure 3.3 : Photo du reformeur à vapeur [11]

Le reformeur du carburant est utilisé pour transformer un hydrocarbure, tel que le méthane, en un gaz riche en hydrogène qui peut être oxydé dans la PEMFC stack. Dans ce processus les hydrocarbures réagissent avec la vapeur d'eau à haute température.

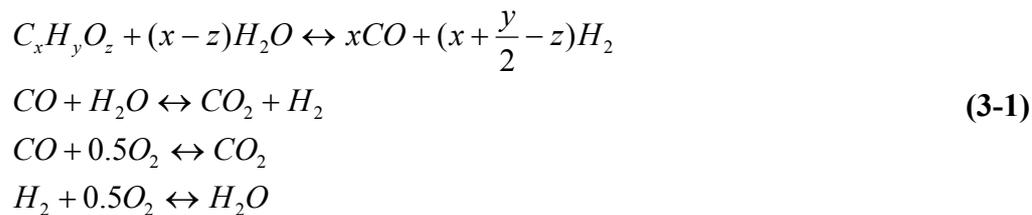
Le reformeur du carburant se divise en quatre parties agissant séparément [38] : L'hydrocarbure et la vapeur traversent en premier un réacteur à haute température, c'est le reformeur où la plupart du combustible est converti en un mélange d'hydrogène et monoxyde de carbone CO. Une partie du CO produite dans le reformeur peut réagir aussi avec l'eau pour former le dioxyde de carbone CO₂. La température de fonctionnement du reformeur dépend du combustible utilisé, de 250 °C (méthanol) à plus de 700° C (méthane).

Dans le cas de l'utilisation du méthane comme carburant, le post réacteur haute température d'eau (HTWS) convertit le CO en CO₂. Il opère à des températures qui varient entre 260-320°C.

Le post réacteur à basse température d'eau (LTWS) est utilisé pour convertir le CO restant en dioxyde de carbone. Il opère à des températures qui varient entre 200-260°C.

Le PROX est le quatrième composant du reformeur du carburant, son rôle est de transformer tout ce qui reste de CO en CO₂ en introduisant un taux d'oxygène convenable au reformeur à vapeur. Car si un taux de trace de CO supérieur à 10 parts par million (ppm) sera absorbé par le platine ou qui rentre dans la partie d'hydrogène vers le catalyseur, réduit ainsi les performances de la PEMFCs.

Les quatre réactions qui se passent dans le reformeur de carburant sont :



La première équation exprime la conversion directe d'un combustible $C_xH_yO_z$ en un mélange d'hydrogène et monoxyde de carbone, cette réaction a lieu dans le reformeur.

La deuxième équation décrit la réaction de changement où le monoxyde de carbone produit dans le reformeur réagit avec la vapeur d'eau pour produire d'hydrogène et du dioxyde de carbone. Cette réaction est exothermique et ce passe dans le reformeur, HTWS et le LTWS.

La troisième et la quatrième réaction se passent dans le PROX où le reste du monoxyde de carbone est transformé en dioxyde de carbone au moyen d'une réaction avec l'oxygène. L'oxygène qui rentre dans le PROX et n'oxyde pas le monoxyde de carbone va réagir avec l'hydrogène pour former la vapeur d'eau.

Un schéma simplifié du reformeur de carburant est montré dans la figure suivante (figure3-4) :

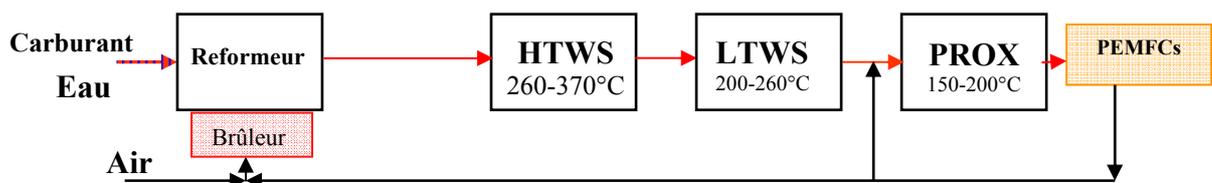


Figure 3-4 : Schéma simplifié du reformeur à vapeur [38]

Un sous-système de cogénération à base d'une PEMFC contient plusieurs dispositifs auxiliaires nécessaires pour le bon fonctionnement. Puisque la tension électrique de la PEMFC varie avec le courant, le courant continu (DC) produit par la PEMFC doit être converti en courant alternatif (AC) par le biais d'un convertisseur (onduleur). Ce conditionneur de puissance est nécessaire pour réguler la tension de sortie.

L'humidificateur et l'échangeur de chaleur sont des composants très importants, leur rôle est le conditionnement du flux d'air afin qu'il soit à une température et humidité convenable pour la PEMFC, nous avons appelé ces composants les sous-système de gestion d'eau et d'entrée d'air. Ces derniers utilisent de l'eau issue d'un réservoir pour l'humidification et le chauffage à partir de la boucle du caloporteur qui sort de la PEMFC. Dans les PEMFCs les températures issues des sous-systèmes doivent être soigneusement contrôlées.

Le sous-système de la gestion thermique est très important, son rôle principal est de maintenir une température constante et optimale du fonctionnement de la PEMFC, ce qui peut être assuré à partir des échangeurs de chaleur qui utilisent comme fluide caloporteur de l'eau.

Un schéma détaillé d'un PEMFCs pour une application de cogénération est montré dans **l'annexe (B)**.

3.3.2 Performances du sous système PEMFC

Les performances de la PEMFCs sont liées aux paramètres de fonctionnement, en effet, le rendement électrique total du système PEMFC est de 40%, si on prend la puissance maximale de fonctionnement, pour la plus petite partie de la charge (PLR) nous avons légèrement un rendement plus élevé. Cependant, à un PLR (rapport de la partie de la charge) très bas (PLR <10%) les pertes augmentent considérablement et la performance du système baisse radicalement.

La courbe du rendement électrique de la PEMFCs est présentée dans la figure (3.5). L'usage du combustible dans les PEMFCs peut être calculé pour toute la charge électrique de l'habitation avec le profil montré ci-dessous.

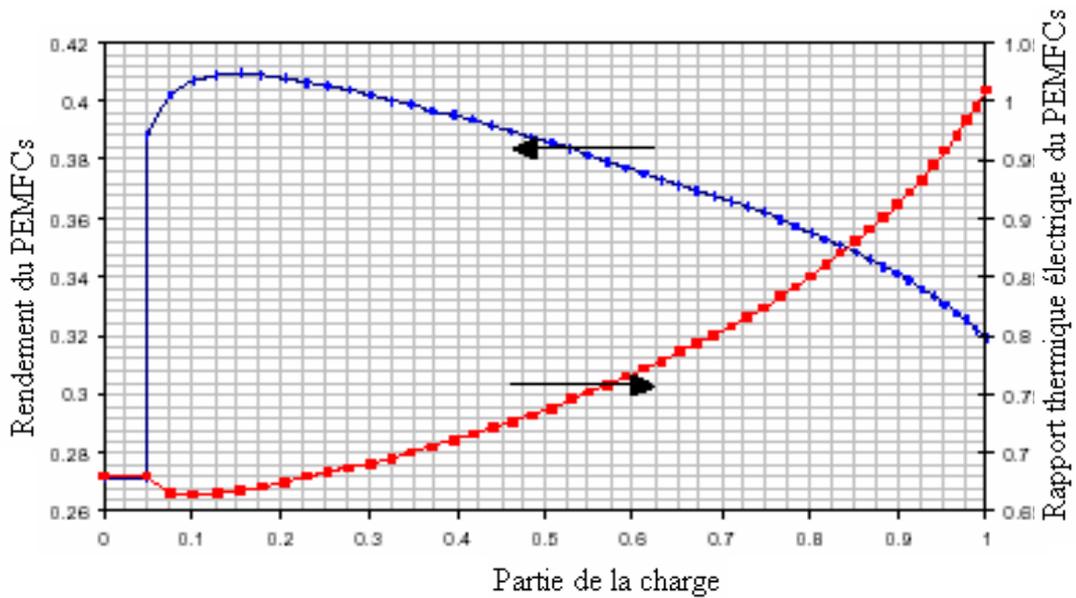


Figure 3.5 : Les performances de la PEMFCs en fonction de PLR [30]

Nous considérons le sous-système PEMFC comme une boîte noire (figure 3.6) qui a comme entrée le gaz naturel et comme sortie l'électricité et la production d'énergie thermique. Des relations empiriques sont utilisées pour faire le lien entre l'entrée et la sortie [30].

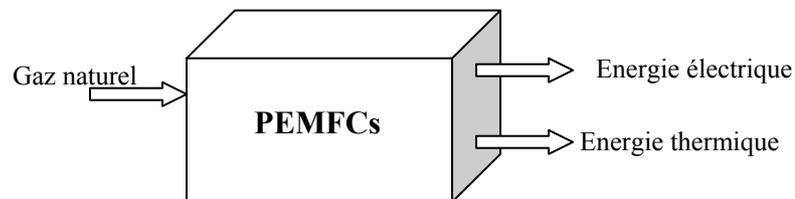


Figure 3.6 : Schéma du sous système PEMFC (PEMFCs) vu comme une boîte noire

La partie de la charge ou le taux de charge est calculé comme suit :

$$PLR = \frac{\dot{E}_{FC}}{\dot{E}_{FC, cap}} \quad (3-2)$$

Tel que ;

$\dot{E}_{FC, cap}$: Puissance électrique maximale (capacité max) produite de la PEMFCs

\dot{E}_{FC} : Puissance électrique produite de la PEMFCs

Le rapport entre la production d'énergie thermique et électrique du sous système PEMFC (r_{TE}) est montré dans la figure 3.7. Il est donné par :

$$r_{TE} = 0.6801 \quad \text{Pour } PLR < 0.05 \quad (3-3)$$

$$r_{TE} = 1.0785PLR^4 - 1.9739PLR^3 + 1.5005PLR^2 - 0.2817PLR + 0.6838 \quad \text{Pour } PLR > 0.05 \quad [30].$$

L'énergie thermique totale disponible du PEMFCs pour l'utilisation à l'habitation est donné par :

$$\dot{Q}_{FC} = r_{TE} \dot{E}_{FC} \quad (3-4)$$

Telle que ;

\dot{Q}_{FC} : La chaleur produite par la PEMFCs

r_{TE} : Le rapport des sortie thermique/électrique de la PEMFCs.

Avec :

$$r_{TE} = \frac{\eta_{thermique}}{\eta_{électrique}}$$

Le rendement de cogénération de la PEMFCs peut être exprimé par :

$$\eta_{cogénération} = \eta_{électrique} + \eta_{thermique} = \eta_{électrique}(1 + r_{TE}) \quad (3-5)$$

$$\text{Pour } PLR < 0.05 \quad \eta_{électrique} = 0.2716 \quad (3-6)$$

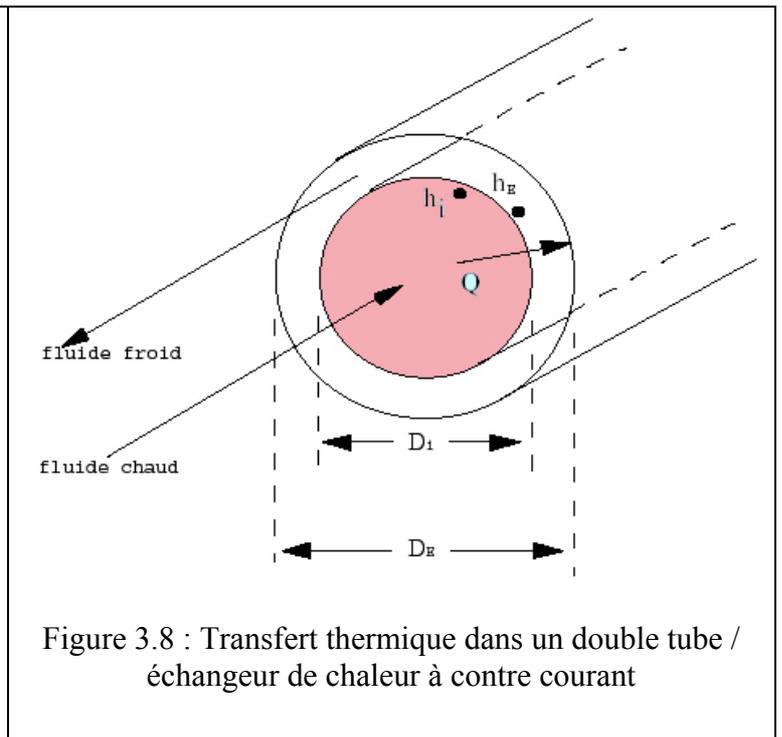
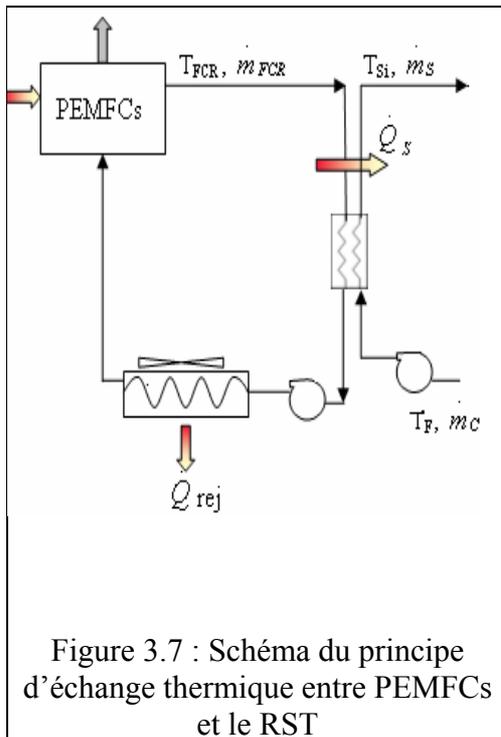
Pour $PLR > 0.05$, [43].

$$\eta_{électrique} = 0.9033PLR^5 - 2.9996PLR^4 + 3.6503PLR^3 - 2.0704PLR^2 + 0.4623PLR + 0.3747$$

3.3.3 Extraction de la chaleur de la PEMFCs

L'extraction de la chaleur dégagée par la PEMFCs s'effectue à travers des échangeurs de chaleur, l'énergie thermique récupérée est stockée dans le réservoir de stockage thermique RST. Lorsque la température de la PEMFC stack commence à s'élever, le fluide caloporteur (l'eau ou le glycol) sera pompé à travers le serpentin qui extrait cette chaleur du sous système PEMFC (PEMFCs). L'échange thermique se passe dans un échangeur de chaleur à convection forcée.

Dans certaines conditions, le fluide caloporteur qui récupère la chaleur de la PEMFCs n'est pas assez refroidi, pour cette raison, nous avons envisagé un second échangeur de chaleur (fluide caloporteur/air) à convection forcée. La figure 3.7 montre le schéma de principe de l'échange thermique entre PEMFCs et le réservoir RST.



Le transfert thermique se fait du fluide chaud vers le fluide froid provenant du RST (figure 3.8). L'eau dans le réservoir sera plus dense que l'eau dans l'échangeur de la chaleur. La tendance pour l'eau la plus lourde sera de chercher le plus bas point comme représenté dans la figure (3.9).

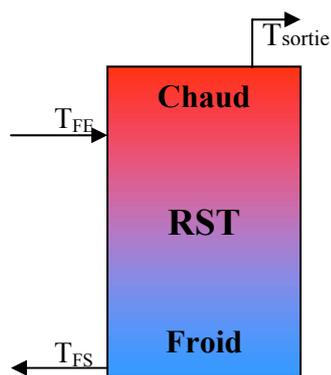


Figure 3.9 : Schéma du RST

où :

T_{FE} : température d'entrée du fluide froid.

T_{FS} : température de sortie du fluide froid.

T_{sortie} : température de sortie d'eau chaude.

L'échangeur de chaleur à contre-courant (figure 3.10) qui a deux entrées : l'une pour le fluide chaud et l'autre pour le fluide froid ainsi que deux sorties qui représentent respectivement, le fluide froid (qui a cédé des calories) et le fluide chaud (qui a gagné des calories).

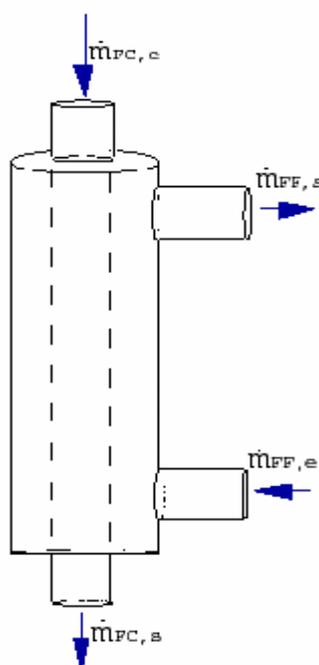


Figure 3.10 : Schéma de l'échangeur de chaleur à double tube/ contre-courant

Le diamètre hydraulique est calculé comme suit :

$$D_H = D_E - D_i \quad (3-7)$$

Où ; D_E et D_i sont le diamètre extérieur et intérieur respectivement.

La surface de circulation du flux d'eau est déterminée par:

$$A_F = \frac{1}{4} \pi (D_E^2 - D_i^2) \quad (3-8)$$

3.4 Le réservoir de stockage thermique

Dans un Système Energétique Total (SET) la présence d'un stockage thermique est indispensable, afin de maîtriser la régulation instantanée de la chaleur produite pour différentes utilisations et à la température voulue.

Le réservoir de stockage thermique (RST) comme il est présenté dans la figure 3-11 doit avoir une bonne configuration qui lui permet d'absorber le maximum de quantité de chaleur sans influencer les performances de la PEMFCs.

La configuration qui peut être adaptée à ce système est faite de telle sorte que l'échange thermique entre le fluide caloporteur chaud (40°C jusqu'à 100°C) qui sort de la PEMFCs et l'eau à une température T_{ST} qui provient du RST se fait à travers un échangeur de chaleur, le fluide caloporteur cède toute la chaleur et pour qu'il soit bien refroidi (10°C) avant de retourner à la PEMFCs il passe par un autre échangeur à air, l'eau sanitaire froide rentre dans le RST à travers un serpentin interne qui est un échangeur de chaleur immergé à l'intérieur du RST, et sort chaude à une température T_{ES} dans un autre réservoir où sa température est prise instantanément par un thermostat et ajustée en cas de besoin avec une résistance électrique supplémentaire (voir figure (3.11)).

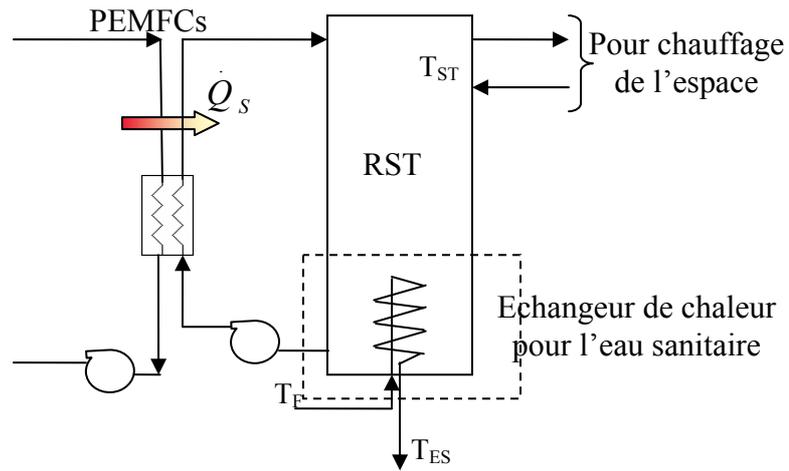


Figure 3.11 : Schéma du réservoir du stockage thermique

L'échangeur de chaleur interne est utilisé lorsque nous ne voulons pas mélanger le fluide du RST avec celui qui provient de l'alimentation en eau potable.

Il existe plusieurs types d'échangeur de chaleur (serpentin) qui se place à l'intérieur du RST, parmi les plus utilisés l'échangeur de chaleur à serpentin régulier montré dans la figure 3.12, il est constitué d'un long tube sous forme de spirale ascendante sans ailettes, le fluide circule du haut en bas.

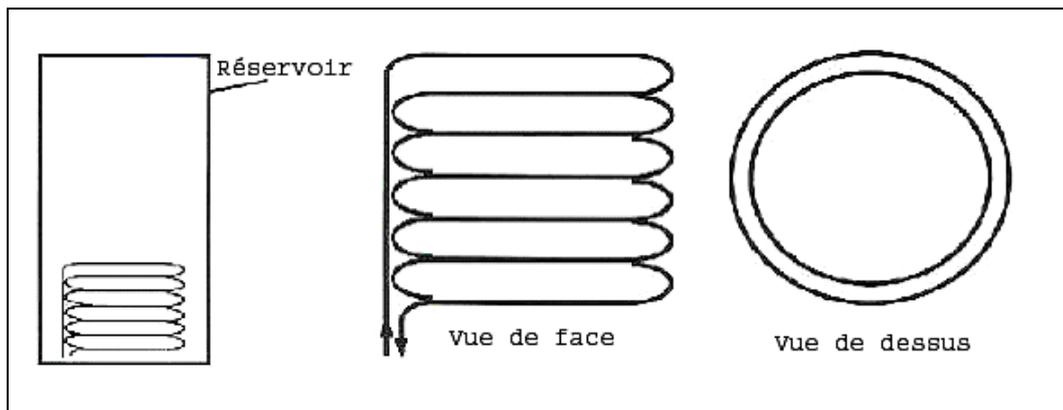


Figure 3.12 : Echangeur de chaleur en serpentin régulier

L'échangeur à serpentin irrégulier (figure 3.13), constitué d'un long tube sous forme de spirale à rayon décroissant ascendante, le fluide circule du haut en bas.

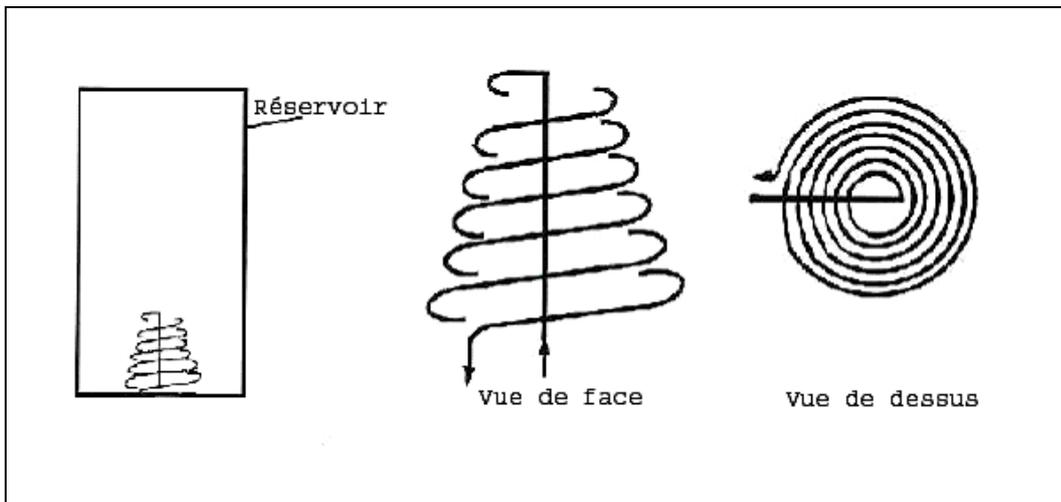


Figure 3.13 : Serpentin irrégulier

L'échangeur de chaleur schématisé dans la figure 3.14 et 3.15 est à une paroi à ailettes baïonnettes et à double paroi à ailettes baïonnettes respectivement, ils sont sous forme spirale autour d'un tube au centre qui contient des ailettes. Le double paroi à ailettes baïonnettes est utilisé généralement lorsque le fluide interne est toxique ou imbuvable et celui du RST est de l'eau potable.

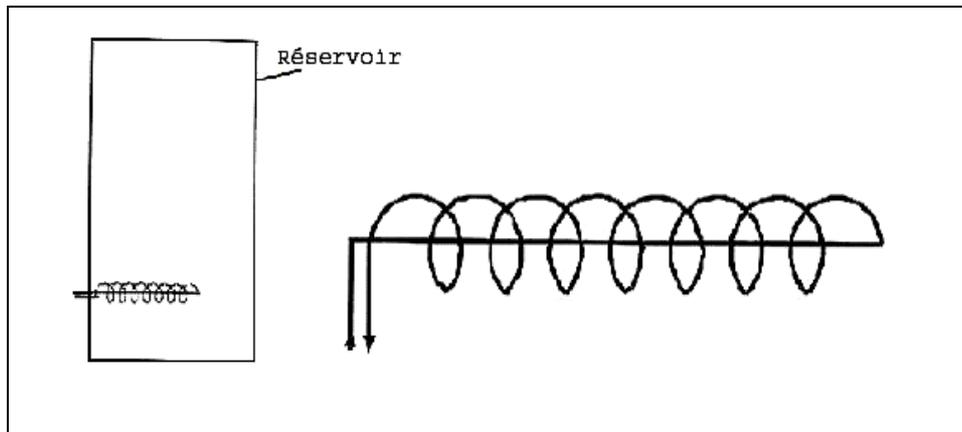


Figure 3.14 : Serpentin à une paroi à ailettes baïonnettes

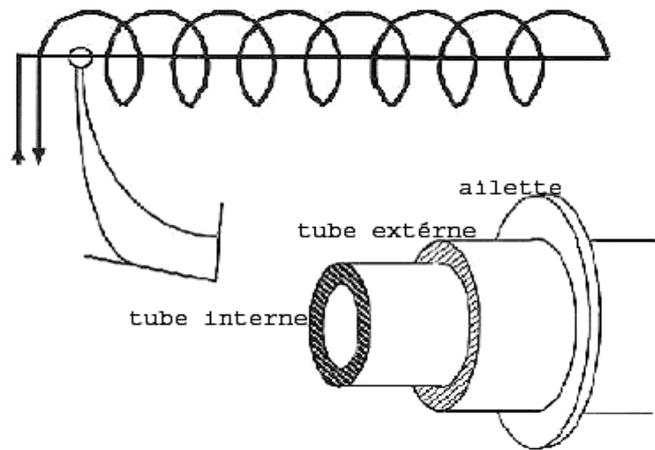


Figure 3.15 : Serpentin à une paroi à double paroi à ailettes baïonnettes

Le circuit électrique équivalent du transfert de chaleur dans un échangeur de chaleur est montré sur la figure 3.16.

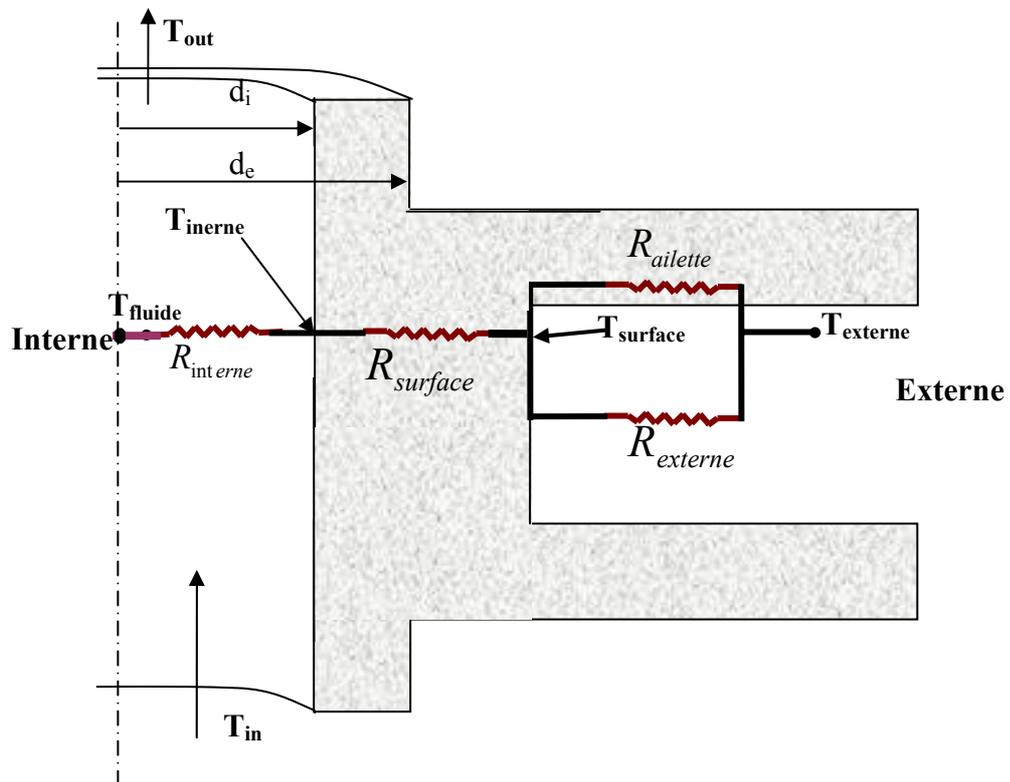


Figure 3.16: Schéma du circuit équivalent de l'échangeur de chaleur

L'équation du transfert de chaleur est comme suit :

$$\dot{Q}_{EC} = (UA_{EC})\Delta T_{lm} \quad (3-10)$$

Où :

$$\dot{Q}_{EC} = UA_{EC} lmtd \quad (3-11)$$

\dot{Q}_{EC} : est le flux de chaleur transmis au réservoir à partir d'un échangeur de chaleur interne donné.

Avec :

$$lmtd = \frac{T_{in} - T_{out}}{\ln \left[\frac{T_{in} - T_{externe}}{T_{out} - T_{externe}} \right]} \quad (3-12)$$

Tel que :

T_{in} et T_{out} : sont respectivement la température d'entrée et de sortie du fluide froid.

$T_{externe}$: est la température du fluide chaud.

La résistance équivalente est donnée par :

$$\frac{1}{UA_{EC}} = R_{int\ interne} + R_{surface} + \frac{1}{\frac{1}{R_{ailette}} + \frac{1}{R_{externe}}} \quad (3-13)$$

La résistance interne est :

$$R_{int\ interne} = \frac{1}{h_i A_i} \quad (3-14)$$

Tels que :

h_i : est le coefficient de convection du tube interne de l'échangeur de chaleur.

A_i : est le périmètre de la partie interne de l'échangeur de chaleur.

EC : Echangeur de chaleur

Le coefficient de convection (h_i) est donné comme suit [43] :

$$h_i = \frac{k_{fluide} Nu_{D,i}}{d_i} \quad (3-15)$$

k_{fluide} : est la conductivité thermique du fluide interne de l'échangeur de chaleur.

d_i : est le diamètre interne du tube de l'échangeur de chaleur.

$Nu_{D,i}$: Le nombre de Nusselt pour l'écoulement interne dans l'échangeur de chaleur

Le nombre de Prandtl :

$$Pr = \frac{C_p \mu_i}{k_{fluide}} \quad (3-16)$$

C_p : est la chaleur spécifique du fluide interne de l'échangeur de chaleur.

μ_i : est la viscosité dynamique du fluide interne de l'échangeur de chaleur.

Le nombre de Reynolds pour la convection interne de l'échangeur de chaleur est :

$$Re_{D,i} = \frac{4 \dot{m}_i}{\pi d_i \mu_i} \quad (3-17)$$

\dot{m}_i : débit massique du fluide interne circulant.

Pour : $Re_{D,i} > 2200$ l'écoulement est considéré comme turbulent.

$$Nu_{D,i} = \frac{(f/8) Re_{D,i} Pr_i}{K_1 + K_2 (f/8)^{1/2} (Pr_i^{2/3} - 1)} \quad (3-18)$$

Où :

$$K_1 = 1 + 3.4f \quad (3-19)$$

$$K_2 = 11.7 + \frac{1.8}{Pr_i^{1/3}} \quad (3-20)$$

$$f = [1.82 \log_{10}(Re_{D,i}) - 1.64]^{-2} \quad (3-21)$$

Si le nombre de Reynolds est inférieur à 2200 l'écoulement est considéré comme laminaire:

$$Nu_{D,i} = 4.4 + \left[\frac{a \left(\frac{Re_{D,i} Pr_i d_i}{L} \right)^m}{1 + b \left(\frac{Re_{D,i} Pr_i d_i}{L} \right)^n} \right] \quad (3-22)$$

Avec :

$$a = (-1.7419 \times 10^{-4})(Pr_i - 0.7) + 0.0398 \quad (3-23)$$

$$b = (-5.8387 \times 10^{-4})(Pr_i - 0.7) + 0.0114 \quad (3-24)$$

$n=1.125$

$m=1.666$

et L : est la longueur de l'échangeur de chaleur.

L'équation (3-21) est applicable sous la condition : $0.7 < Pr_i < 10$

Les équations (3-22) et (3-23) ont une allure de courbe linéaire qui s'adapte avec les variations du nombre de Prandlt.

Le périmètre intérieur est donnée par : $A_i = \pi d_i L$

La résistance de surface est calculée par :

$$R_{surface} = \frac{\ln\left(\frac{d_0}{d_i}\right)}{2\pi \cdot L \cdot K_w} \quad (3-25)$$

d_0 : est le diamètre externe du tube de l'échangeur de chaleur.

K_w : est la conductivité thermique du matériau constituant le tube de l'échangeur de chaleur.

Il y'a deux transfert de chaleur qui se font en parallèle : Le premier se fait dans l'ailette tel que :

La résistance de l'ailette est :

$$R_{ailette} = \frac{1}{h_0 A_f \eta_f} \quad (3-26)$$

h_0 : est le coefficient de convection du tube externe de l'échangeur de chaleur.

A_f : est le périmètre des ailettes de l'échangeur de chaleur.

Le rendement de l'ailette est donné par [44] :

$$\eta_f = \frac{(2r_0/\lambda) K_1(\lambda r_0) I_1(\lambda r_f) - I_1(\lambda r_0) K_1(\lambda r_f)}{(r_f^2 - r_0^2) K_0(\lambda r_0) I_1(\lambda r_f) + I_0(\lambda r_0) K_1(\lambda r_f)} \quad (3-27)$$

Avec
$$\lambda = \left(\frac{h_0}{K_{EC} \delta} \right)^{1/2} \quad (3-28)$$

Où ; δ : est l'épaisseur de l'ailette.

K_{EC} : La conductivité thermique du matériau de l'échangeur de chaleur

Le rayon extérieur du tube de l'échangeur de chaleur est :

$$r_0 = \frac{d_0}{2}$$

Où ; d_0 : est le diamètre extérieur du tube de l'échangeur de chaleur

Le rayon de l'ailette de l'échangeur de chaleur : $r_f = \frac{d_f}{2}$

Où : d_f : est le diamètre de l'ailette de l'échangeur de chaleur

K_0 , K_1 , I_0 et I_1 sont les coefficient de Bessel du zéro et premier ordre respectivement.

Nous allons déterminer le coefficient de convection h_0 , en entament le deuxième transfert qui se fait en parallèle dans l'espace et qui se trouve entre les ailettes. La résistance externe équivalente est donné comme suit :

$$R_{\text{externe}} = \frac{1}{h_0 A_b} \quad (3-29)$$

Où: A_b est le périmètre extérieur de l'échangeur de chaleur sans les ailettes (la base des ailettes).

Le coefficient de convection h_0 est donné par :

$$h_0 = \frac{kNu_{D,0}}{d_0} \quad (3-30)$$

$Nu_{D,0}$: Le nombre de Nusselt pour la convection externe dans l'échangeur de chaleur.

Le nombre de Nusselt pour la convection externe est le résultat d'une convection naturel et forcé, il est fonction du nombre de Rayleigh, nombre de Reynolds et le nombre de Prandlt.

$$Nu_{D,0} = Nu_{D,0}(Ra_D, Re_{D,0}, Pr_0) \quad (3-31)$$

Churchill [46] a proposé la relation (3-30) sous la forme :

$$Nu_{D,0} = \left[Nu_F^3 + Nu_N^3 \right]^{1/3} \quad (3-32)$$

Avec ;

Nu_F : est le nombre de Nusselt en convection forcé pour l'extérieur de l'échangeur de chaleur.

Nu_N : est le nombre de Nusselt en convection naturel pour l'extérieur de l'échangeur de chaleur.

Nu_F et Nu_N peuvent être positives ou négatives si l'écoulement se fait en haut ou en bas du réservoir.

Nous parlons d'une convection forcé s'il y'a un flux d'eau (flèche bleu) qui circule à l'intérieur du réservoir comme il est montré sur la figure (3.17).

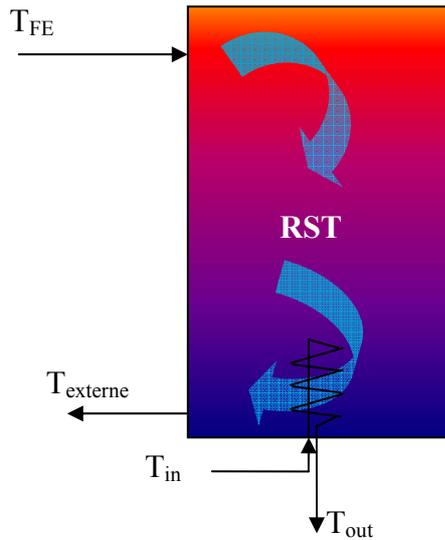


Figure 3.17 : Schéma montrant la convection forcée dans un échangeur de chaleur immergé

La figure (3.17) montre un débit massique d'eau qui circule du haut en bas. L'équation de convection forcée s'écrit comme suit [46] :

$$Nu_F = \left[A_{F2} Re_{D,0}^{1/2} Pr_0^{1/3} \left(1 + \left(\frac{C_F}{Pr_0} \right)^{2/3} \right)^{-1/4} \right]^{1/3} \quad (3-33)$$

Où : A_{F2} et C_F sont des constantes.

$Re_{D,0}$: est le nombre de Reynolds pour la convection externe de l'échangeur de chaleur.

Pr_0 : le nombre de Prandlt pour la convection externe de l'échangeur de chaleur.

Pour la convection naturelle nous avons une relation qui a été établie par les chercheurs FARRINGTON et BINGHAM [47, 48] qui relie le nombre de Nusselt au nombre de Rayleigh comme suit:

$$Nu_N = C(Ra_D)^n \quad (3-34)$$

Où : C et n sont des constantes.

Le nombre de Rayleigh pour la convection externe de l'échangeur de chaleur est comme suit :

$$Ra_D = \frac{\rho_0^2 \beta C_p g d_0^3}{\mu_0 K} (lmtd_{corr}) \quad (3-35)$$

Où :

ρ_0 : est la masse volumique du fluide externe de l'échangeur de chaleur.

β : est le coefficient d'expansion thermique.

C_p : est la chaleur spécifique du fluide contenant le RST.

g : est l'accélération gravitationnel.

μ_0 : est la viscosité du fluide externe de l'échangeur de chaleur.

et :

$$lmtd_{corr} = \frac{T_{in} - T_{out}}{\ln \left[\frac{T_{in} - T_{externe}}{T_{out} - T_{externe}} \right]} - q_{EC} [R_{interne} + R_{surface}] \quad (3-36)$$

Cette équation montre la différence et la diminution de température qui se produit entre le fluide interne et la surface externe de l'échangeur de chaleur.

3.5 Le sous-système pompe à chaleur PAC

3.5.1 Fonctionnement de la PAC

La pompe à chaleur (PAC) est une machine thermique constituée essentiellement d'un compresseur, d'une valve de détente, une vanne d'inversion de cycle et de deux échangeurs de chaleur (évaporateur et condenseur).

Ces composants sont connectés pour former un circuit fermé comme le montre la figure (3.18). Un fluide caloporteur (réfrigérant) circule à travers les quatre composants. Dans l'évaporateur, la température du fluide caloporteur reste inférieure à la température de la source de la chaleur, un transfert de chaleur se produit entre le fluide chaud et le fluide caloporteur qui cause l'évaporation du fluide caloporteur, ce dernier est comprimé dans le compresseur afin d'augmenter sa pression et sa température, La vapeur chaude entre dans le condenseur où libère l'énergie emmagasiné.

Finalement, le fluide actif comprimé est détendu à la pression et la température de l'évaporateur dans la valve d'expansion. Le fluide caloporteur est rendu à son état initial et le cycle est bouclé.

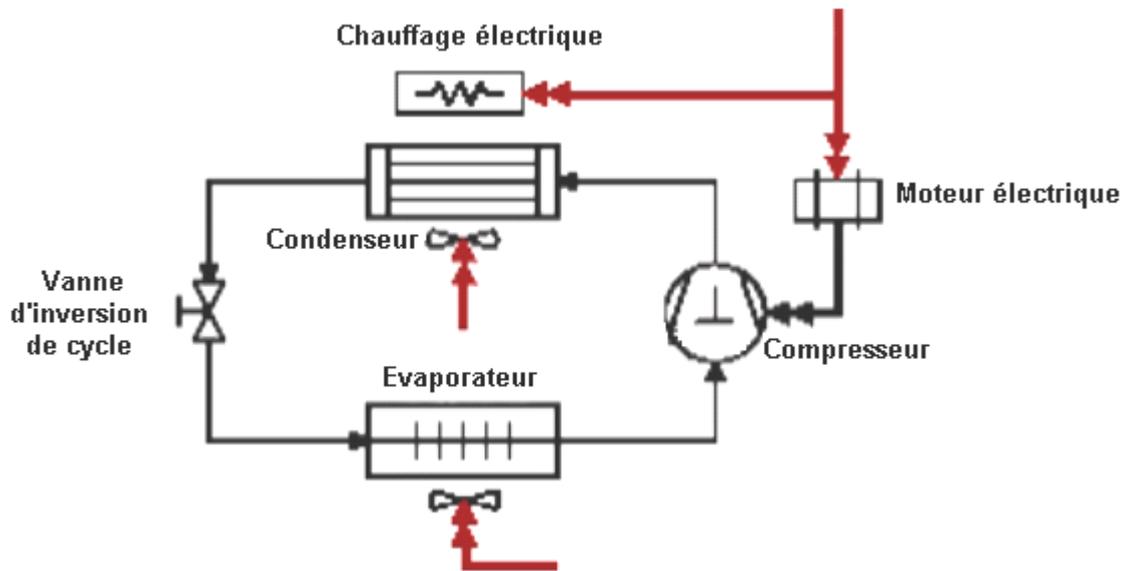


Figure 3.18 : Schéma de la PAC

Ce cycle thermodynamique combine deux fonctions essentielles :

-la production de froid au niveau de l'évaporateur, par absorption de calories à la source froide (machine frigo).

-la production de chaleur au niveau du condenseur, par dégagement de calories à la source chaude (pompe à chaleur).

On dispose donc, d'une machine capable de produire du froid (réfrigérateur, congélateur, chambre froide, salle d'ordinateur...), de produire de la chaleur pour chauffer un local, un bâtiment et d'assurer à la fois le chauffage et le refroidissement d'un local (climatisation) en utilisant une vanne d'inversion, qui échange le rôle des échangeurs selon les saisons.

3.5.2 Le cycle de la pompe à chaleur

La PAC fonctionnant sur la base d'un cycle de compression de la vapeur est montrée dans la figure (3.19). Elle correspond au diagramme température-entropie (T-s).

Le réfrigérant entre dans le compresseur (point A) où il est comprimé avec une élévation de la température et la pression (point B).

Dans le condenseur, l'énergie est enlevée du réfrigérant avec un fluide externe froid (point C) et cède de la chaleur au milieu extérieur. Au point D, le réfrigérant entre dans une soupape d'expansion qui diminue sa pression et sa température représenté au diagramme par le point E, puis rentre dans l'évaporateur à une basse température. Il absorbe l'énergie d'un fluide externe plus chaud en s'évaporant et revient au point A et le cycle recommence au début.

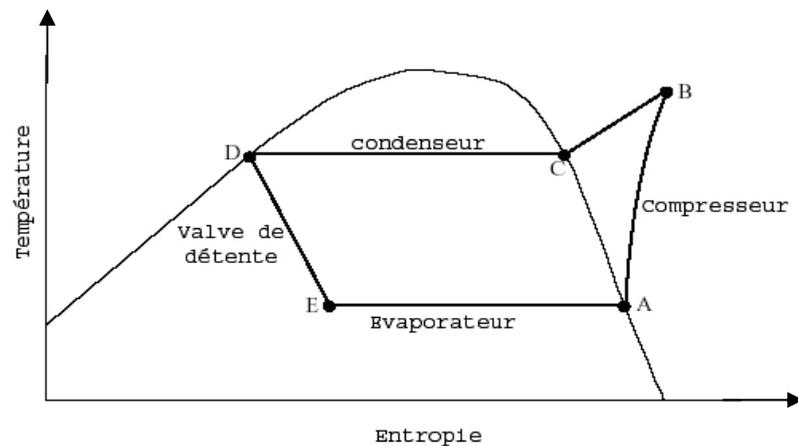


Figure 3.19 : Diagramme de la température - entropie de cycle de compression de la vapeur

Pendant la saison chaude, l'évaporateur qui est un échangeur de chaleur (fluide frigorigène /air) est à l'intérieur de l'habitat, absorbe la chaleur Q_{evap} et extrait l'humidité de l'intérieur de l'habitat, le condenseur est situé à l'extérieur et rejette une quantité de chaleur Q_{cond} tel que :

$$Q_{cond} = Q_{evap} + W_{comp} \quad (3-37)$$

La figure 3.20 montre le schéma du cycle de compression de vapeur pour le mode refroidissement.

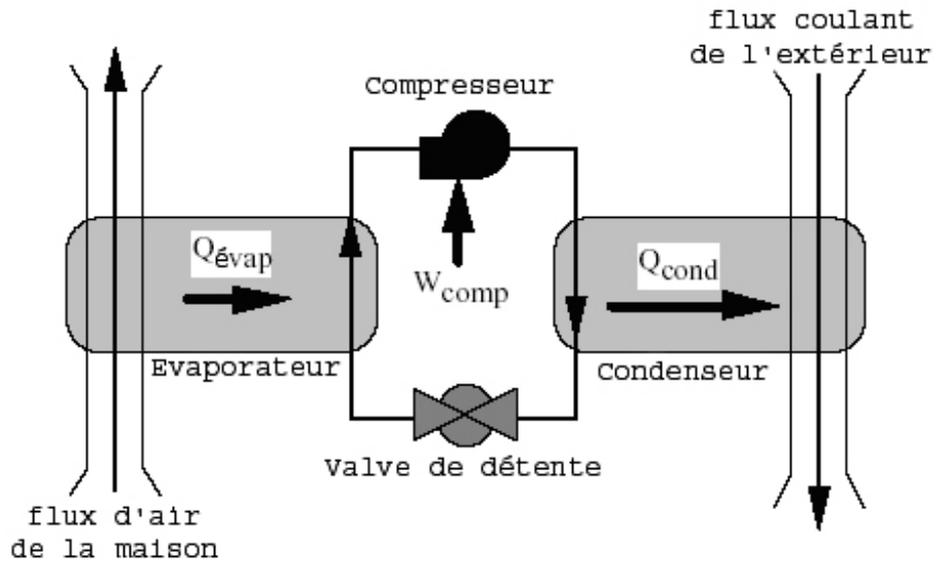


Figure 3.20 : Schéma du cycle de compression de vapeur pour le mode refroidissement

Pour chauffer, l'évaporateur est situé à l'extérieur où il absorbe une quantité de chaleur $Q_{\text{évap}}$ du milieu extérieur (figure 3.21), le condenseur situé à l'intérieur cède à l'air de l'intérieur une quantité de chaleur Q_{cond} qui est égal à :

$$Q_{\text{cond}} = Q_{\text{évap}} + W_{\text{comp}}$$

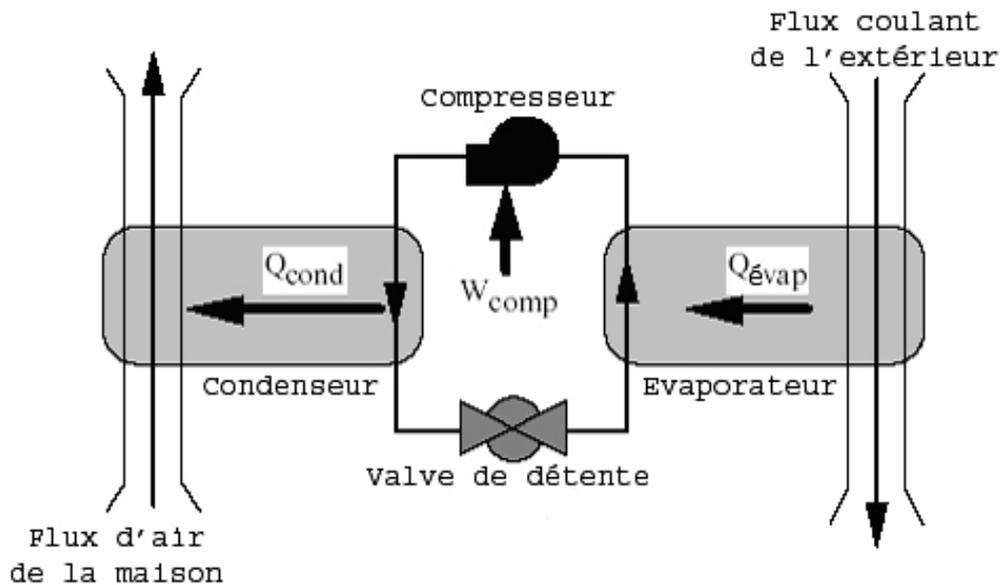


Figure 3.21 : Schéma du cycle de compression de vapeur pour le mode chauffage

Dans le mode chauffage, les performances du cycle de compression de vapeur sont estimées avec un coefficient de performance COP, et pour le refroidissement, elles sont estimées avec un rapport d'efficacité d'énergie (EER).

$$COP = \frac{Q_{cond}}{W_{comp}} \quad (3-38)$$

$$EER = \frac{Q_{evap}}{W_{comp}} \quad (3-39)$$

Les pompes à chaleur sont des appareils de chauffage efficace lorsqu'elles sont comparées aux systèmes de chauffage électriques conventionnels qui utilisent un système de résistances pour chauffer de l'air.

La performance du cycle de compression de la vapeur est sensible aux températures de l'évaporateur et du condenseur. Une baisse dans la température de l'évaporateur, ou une augmentation dans la température du condenseur, baisse le COP du cycle. Cela peut être vu en utilisant le cycle de réfrigération idéal de Carnot montré dans la figure 3.22. T_H est la température de condensation et T_L est la température d'évaporation.

Le COP peut être calculé comme suit :

$$COP = \frac{T_H}{T_H - T_C} \quad (3-40)$$

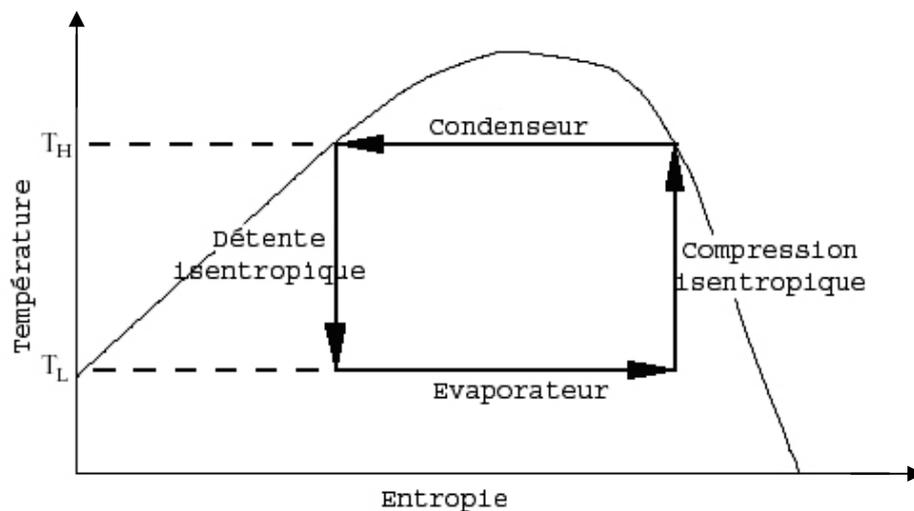


Figure 3.22 : Cycle de Carnot

Si la différence de température entre l'évaporateur et le condenseur ($T_H - T_C$) diminue le COP diminue ce qui réduit la masse volumique du réfrigérant qui entre dans le compresseur c-à-d le débit de masse du réfrigérant dans tout le système, de ce fait, l'énergie consommée par le compresseur et le taux d'énergie thermique transporté de l'évaporateur au condenseur sont diminuées.

La pompe à chaleur le plus généralement installée dans les applications résidentielles a comme source de chaleur l'air extérieur [49].

3.5.3 Présentation des modes de fonctionnement de la PAC

La PAC assure le chauffage de l'espace et de l'eau sanitaire. L'utilisation d'une haute température du fluide qui provient du RST augmente la température de l'évaporateur dans le cycle de la PAC, ce qui permet d'augmenter le coefficient de performance COP.

L'énergie électrique qui alimente ce type de climatiseur qu'il soit en mode de chauffage ou en mode de refroidissement est la PEMFCs, car chacun du condenseur, de l'évaporateur y compris les ventilateurs fonctionnent avec des moteurs électriques (**voir Annexe C**).

Pendant le mode de chauffage (PAC), une énergie électrique supplémentaire est consommée par le dégivrage qui se déclenche périodiquement lorsque la température extérieure du bulbe sec est inférieure à 4.4°C.

Nous allons décrire les caractéristiques de chaque élément utilisé pour la réalisation de cette pompe à chaleur.

Le circuit frigorifique a été totalement réalisé avec des tuyaux en cuivre soudés à l'aide d'un alliage spécial à base d'argent qui garantit une bonne étanchéité aux hautes pressions.

Cette dernière est calculée par la relation:

$$A = \frac{\dot{Q}}{K\Delta T_m} \quad (3-41)$$

Où:

A : est l'aire de la surface de l'échangeur de chaleur (m^2);

K : est le coefficient d'échange thermique global ($W/ m^2.K$)

ΔT_m : La différence de température moyenne dans l'échangeur de chaleur (K) qui, pour le type d'échangeur à air, vaut normalement environ 7K.

\dot{Q} = puissance thermique de l'échangeur (W).

La différence de surface nécessaire dans les deux modes d'emploi (A et B) de l'échangeur fluide-air, est clairement mise en évidence par la figure en annexe C. Puisque dans les pompes à chaleur de petites dimensions, comme celle qui est fournie, ce sont des évaporateurs à sec qui sont utilisés, le fluide frigorigène, après l'expansion, mouille les parois internes des tubes de l'évaporateur et forme un mélange de vapeur et de gouttes qui continue dans le tube évaporateur. A cause de la chaleur fournie, les gouttes en suspension évaporent et, à la fin de l'évaporateur, elles sont toutes transformées en vapeur. Pour s'assurer qu'aucune goutte de liquide frigorigène n'atteigne le compresseur, on projette l'évaporateur en le surdimensionnant légèrement, de façon à ce que l'un de ses segments courts finaux soit parcouru par du fluide frigorigène complètement évaporé qui, ainsi, reçoit de la chaleur et se surchauffe donc légèrement.

Une méthode plus sûre afin d'éviter que le compresseur n'aspire pas de fluide frigorigène, est celle qui consiste en l'utilisation d'un séparateur gaz liquide (ou bouteille de liquide) immédiatement avant la conduite d'aspiration du compresseur (figure de l'annexe C). La présence de cet élément permet l'inversion immédiate du cycle de fonctionnement en garantissant toujours du gaz à l'aspiration du compresseur. Son absence peut au contraire provoquer des dommages au compresseur dû à l'aspiration de fluides liquides par les cylindres, suite à une brusque inversion du cycle (par l'intermédiaire de la vanne correspondante actionnée manuellement), alors que le compresseur fonctionne.

En l'absence du séparateur gaz-liquide, pour effectuer l'inversion du cycle, il faut en effet débrancher le compresseur, agir à la main sur la vanne d'inversion, attendre environ 10 minutes afin que le fluide s'évapore naturellement et brancher de nouveau le compresseur [44].

Nous remarquons (figure de l'annexe C) que l'utilisation de cet échangeur, selon le mode de fonctionnement de la pompe à chaleur (mode A et mode B), est simplement réglée par

la présence de deux soupapes de fermeture (V.R.) et par une vanne électro-mécanique (V.S.).

Les soupapes de retenue, ou de non retour, permettent le passage du fluide frigorigène dans un sens et l'empêche dans le sens opposé.

La vanne électro-mécanique, par contre, est une vanne du type tout ou rien et son fonctionnement est directement commandé par la vanne d'inversion et, pour cette raison, dépend du mode de fonctionnement de la pompe à chaleur.

Le passage d'air à travers la surface à ailettes de l'échangeur fluide-air est réalisé par l'intermédiaire d'un groupe de ventilation constitué par un moteur électrique directement accouplé à un ventilateur hélicoïdal à 4 pales en aluminium.

La consommation d'énergie électrique de celui-ci constitue évidemment une perte d'énergie qui réduit l'efficacité de toute l'installation; il faut donc optimiser la puissance absorbée P_v du ventilateur de façon à ce que l'efficacité COP totale de toute l'installation de la pompe à chaleur soit la plus élevée possible.

La puissance absorbé optimale P_v du groupe de ventilation s'exprime par :

$$P_v = P_{v0} + \sqrt{\frac{a \dot{Q} \dot{Q}_0}{2C_p T \varphi}} \quad (3-42)$$

$$\dot{Q}_0 = \dot{Q} - P_c \quad (3-43)$$

Où :

\dot{Q}_0 : Puissance thermique de l'évaporateur (kW)

\dot{Q} : Puissance thermique du condenseur (besoin énergétique à 0°C) en kW.

P_c : Puissance motrice du compresseur.

φ : Rendement exergétique (énergie mécanique et électrique)

T : Température de condensation (K)

C_p : Chaleur spécifique de l'air à 0°C (kW h/m³ .K)

P_{v0} : Puissance à vide du ventilateur (kW)

a : Rapport entre pression d'arrivée et rendement du ventilateur.

L'échangeur de chaleur fluide-eau est de type à double tube coaxial. Il est constitué par deux tubes en cuivre, un interne et un externe, maintenus à une distance constante au moyen d'ailettes intercalaires.

Dans l'espace intermédiaire entre les tubes interne et externe, coule l'eau, tandis que dans le tube interne coule le fluide frigorigène. En respectant les connexions décrites à la figure de l'annexe C, avec le mode A de fonctionnement, l'échangeur fluide-air est utilisé comme évaporateur en contre-courant. Avec le mode B de fonctionnement, au contraire, l'échangeur fluide-eau est utilisé comme condenseur à courants parallèles.

En utilisant l'échangeur à courants parallèles, les deux courants fluides vont dans la même direction, ce qui permet au courant qui reçoit de la chaleur d'être chauffé au maximum jusqu'à la température la plus basse atteinte par le courant de fluide qui cède la chaleur.

Dans un échangeur en contre-courant, au contraire, puisque les courants fluides ont des sens opposés, la température finale du courant fluide qui reçoit de la chaleur dépasse la température finale (la plus basse) du courant fluide qui cède de la chaleur.

Dans les deux cas (mode A et mode B de fonctionnement) schématisé en annexe C, le fluide frigorigène liquide est introduit ou prélevé par la partie basse de l'échangeur, tandis que le fluide frigorigène gazeux est introduit ou prélevé par sa partie haute.

Les grands débits d'eau et du fluide frigorigène améliorent le coefficient global d'échange thermique K, mais requièrent également une puissance motrice supérieure.

3.6 Le sous-système de chauffage de l'eau sanitaire

Le sous-système du chauffage de l'eau sanitaire (figure 3.23) contient un serpentin immergé dans le RST et l'appoint d'énergie thermique est effectué par une résistance supplémentaire alimenter en énergie électrique. Ce dernier fournit la chaleur quand la

température du RST n'est pas assez élevée pour chauffer l'eau sanitaire à la température de sortie désirée à $T_C=60^\circ\text{C}$.

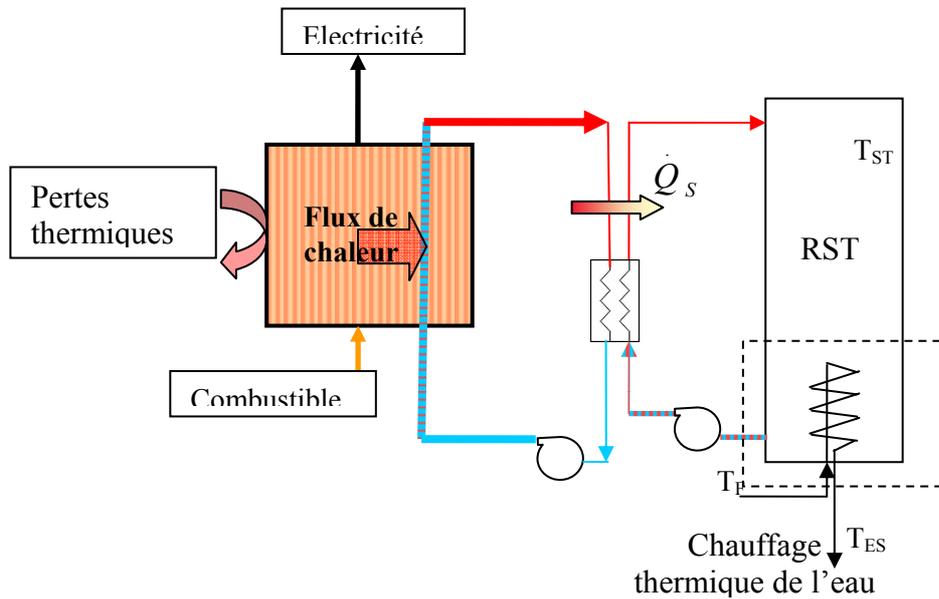


Figure 3.23 : Le sous-système de chauffage de l'eau sanitaire

3.7 Le sous-système chauffage thermique de l'espace

Le sous-système de chauffage thermique de l'espace contient les échangeurs de chaleur situés dans la PAC (voir figure 3.24). Il est utilisé seulement lorsque la température dans le RST atteint un certain niveau. Il est conçu pour chaque opération du système qui sera détaillé dans le prochain chapitre relatif à l'étude thermique du SET.

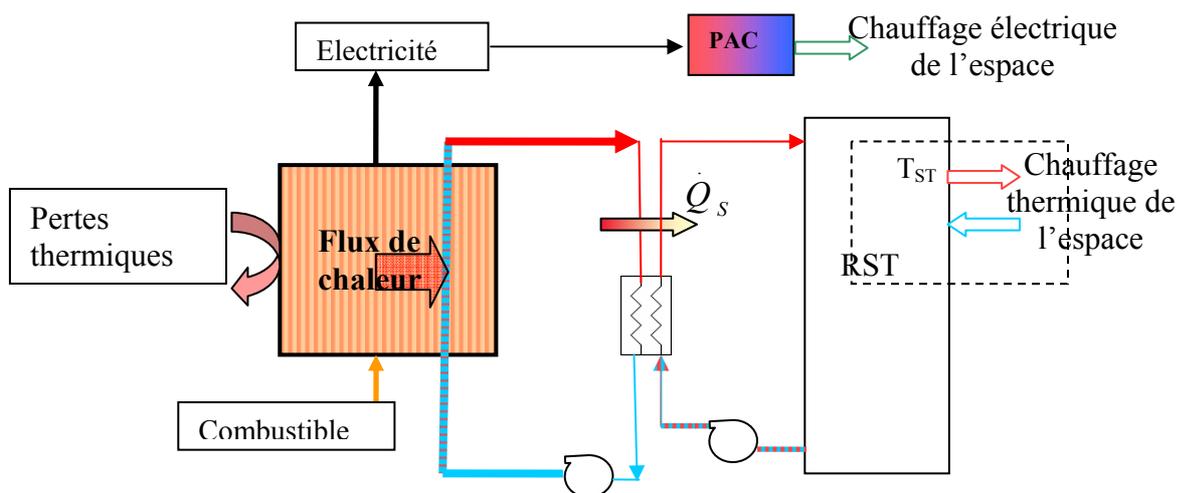


Figure 3.24 : Schéma du sous-système chauffage thermique de l'espace

Chapitre 4

Etude thermique du SET

4.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'établir un bilan thermique d'une habitation à base d'une PEMFC et de démontrer les performances d'une pile à combustible dans un Système Energétique Total (SET) en réponse aux besoins énergétiques de cette habitation pour différentes conditions climatiques. Ce système est différent des systèmes conventionnels liés au réseau électrique, car l'énergie thermique disponible par le processus de génération d'énergie électrique ou ce qui est appelé : cogénération, peut être utilisée pour le chauffage de l'eau sanitaire et de l'espace. Cette énergie thermique est transférée d'abord dans un réservoir de stockage thermique (RST) puis à la charge thermique.

4.2 Etude thermique du SET

Le fonctionnement du système énergétique total (SET) dépend de la température du réservoir de stockage thermique (T_{ST}) qui varie en fonction du temps. Nous avons choisi dans notre étude le réservoir de stockage thermique comme volume de contrôle dans le système (figure 4.1).

Afin de faire une étude thermique plus fiable, nous avons fixé des températures critiques autour du RST, définies comme suit :

- T_{CX} , est la température minimale du réservoir de stockage thermique (T_{ST}) nécessaire pour chauffer l'eau domestique circulant avec un débit \dot{m}_C à la température voulu (T_C).

- T_{PCX} , indique le T_{ST} maximal à qui la production thermique spécifiée du sous-système de la pile à combustible \dot{Q}_{FC} peut être complètement transféré dans le réservoir thermique.

- T_{STL} est la limite du T_{ST} où le chauffage de l'espace ne peut pas être assuré à partir du réservoir.

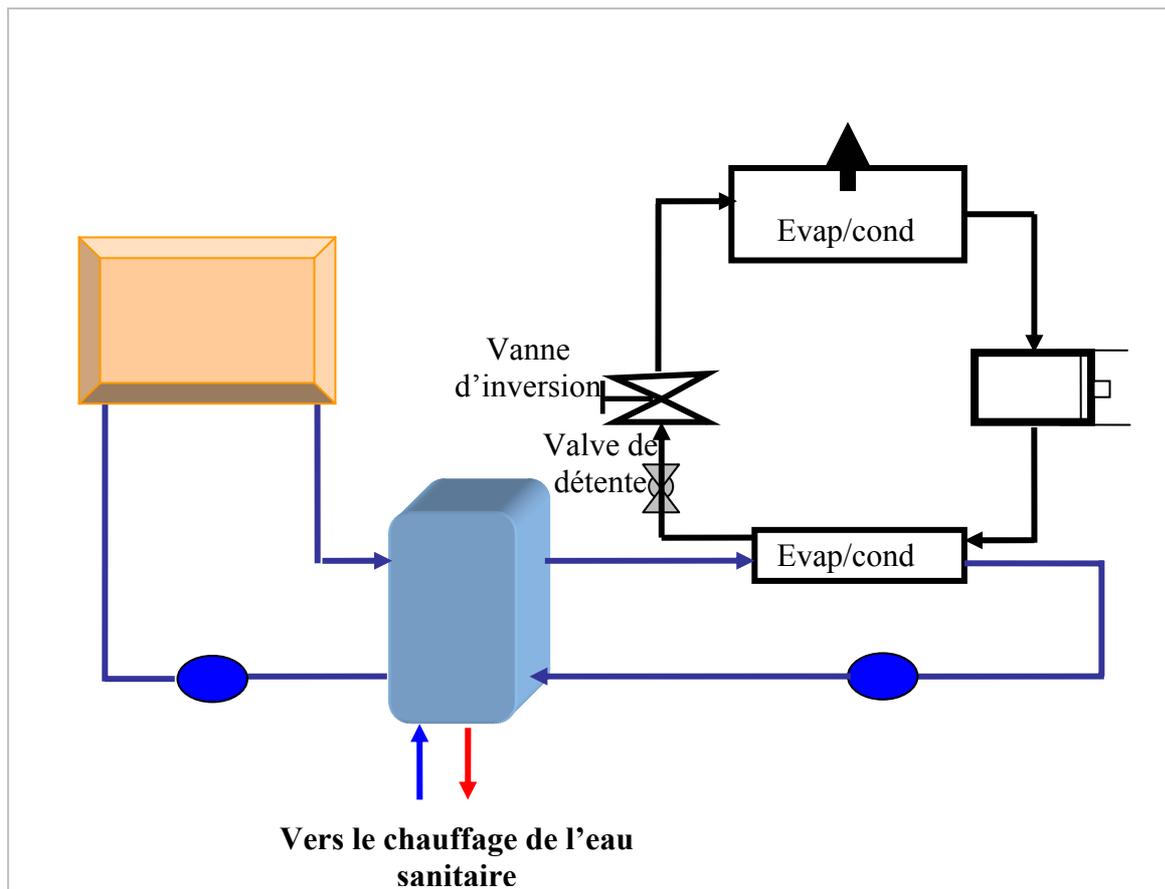


Figure 4.1 : Système thermique pour l'habitation

Si le réservoir est assez chaud ($T_{ST} \geq T_{CX}$), il peut satisfaire entièrement le chauffage de l'eau sanitaire. Si le réservoir est trop chaud ($T_{ST} \geq T_{PCX}$) le transfert de chaleur de la pile à combustible sera limité.

Finalement, il est préférable d'utiliser l'énergie thermique pour chauffer l'eau sanitaire compte tenu que le chauffage de l'espace peut être accompli par une pompe à chaleur, par contre le chauffage supplémentaire de l'eau domestique est accompli en utilisant la chaleur d'une résistance électrique. Par conséquent, si la température chute en dessous d'un point critique ($T_{ST} < T_{STL}$) alors l'énergie thermique ne sera pas appliquée pour chauffer l'espace mais stocker pour chauffer l'eau sanitaire.

Les valeurs des points critiques des températures T_{CX} , T_{PCX} , et T_{STL} sont déterminées dans les paragraphes suivants basés sur les calculs de l'échangeur de chaleur, du fluide caloporteur de la pile à combustible et sur un bilan énergétique du réservoir de stockage thermique (RST) illustré dans la figure (4.2) .

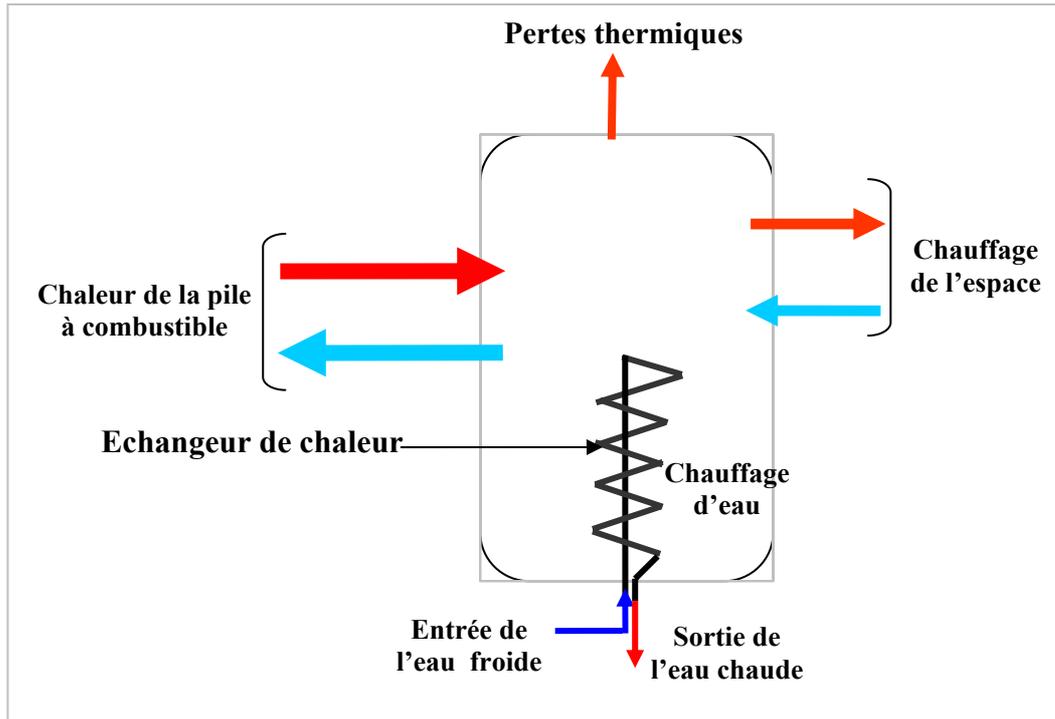


Figure 4.2 : Schéma du Réservoir de stockage thermique

Pour des températures T_{ST} inférieures à la température limite calculée (T_{cx}), le chauffage électrique supplémentaire de l'eau domestique sera exigé.

4.2.1 Etude de la boucle de la PEMFCs

Le flux de chaleur transféré entre la PEMFCs et le réservoir thermique (cf. Figure 4.1) est donné par :

$$\dot{Q}_S = \dot{m}_S C_P (T_{SE} - T_{ST}) \quad (4-1)$$

Telle que T_{SE} est la température de sortie de l'échangeur de chaleur entre la PEMFCs et le réservoir RST ; La température du réservoir T_{ST} diminue linéairement avec \dot{Q}_S ; Le débit de masse peut être augmenté pour une plus grande production de chaleur du PEMFCs ; T_{Pcx} , est la température maximale du réservoir RST qui est déterminée par l'énergie thermique cédée par la PEMFCs et peut être donnée comme suit :

$$T_{Pcx} = T_{SE} - \frac{\dot{Q}_{PC}}{\dot{m}_{S,max} C_P} \quad (4-2)$$

Où : \dot{Q}_{PC} : est l'énergie thermique totale disponible du PEMFCs par heure (exprimée par (3-4)) et ($\dot{m}_{S,max}$) le débit massique maximum.

4.2.2 Etude de la boucle du chauffage de l'eau

Le rendement de l'échangeur de chaleur de l'eau sanitaire est donnée par:

$$\varepsilon = \frac{T_C - T_F}{T_{cx} - T_F} = 1 - \exp\left[-UA/\dot{m}_C C_P\right] \quad (4-3)$$

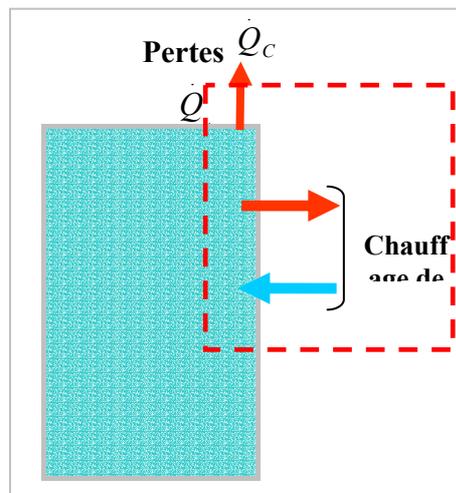
UA : est le coefficient de transfert thermique entre l'eau chaude du RST et l'eau sanitaire à chauffer qui est déterminé par des abaques [43] pour l'échangeur de chaleur considéré. La température minimale du RST qui peut être fournie au chauffage de l'eau T_{Cx} est donnée par:

$$T_{cx} = T_F + \frac{T_C - T_F}{1 - \exp\left(-UA/\dot{m}_C C_P\right)} \quad (4-4)$$

4.2.3 Etude de la boucle de la PAC

Nous allons prendre comme volume de contrôle la boucle de la PAC ou de chauffage de l'espace, cette dernière contient la PAC qui est alimentée avec de l'eau chaude provenant du RST.

Afin de déterminer la température minimale T_{STL} du réservoir RST qui peut assurer le chauffage de l'espace, nous avons effectué un bilan thermique sur le RST comme le montre le schéma suivant:



L'équation générale du bilan thermique autour d'un volume de contrôle (V.C) est donnée par [43]:

$$\sum_{V.C} \dot{Q}_{\text{gagnés}} - \sum_{V.C} \dot{Q}_{\text{Cédés}} = m_{V.C} C_P \frac{dT_{V.C}}{dt}$$

Nous n'avons pas pris en considération la source de chaleur qui est la PEMFCs et la boucle de chauffage de l'eau d'où:

$$\sum_{V.C} \dot{Q}_{\text{gagnés}} = 0$$

La somme des flux de chaleur cédés sont comme suit :

$$\sum_{V.C} \dot{Q}_{\text{Cédés}} = \dot{Q}_C + \dot{Q}_P$$

avec :

\dot{Q}_C : est le flux de chaleur cédé par l'eau chaude du RST pour le chauffage de l'espace.

et :

$$\dot{Q}_P = U_L A_L (T_{ST} - T_{ext})$$

avec :

T_{ext} : est la température ambiante.

U_L : est la conductivité thermique du RST.

A_L : est le périmètre du RST.

Donc :

$$-\dot{Q}_C - U_L A_L (T_{ST} - T_{ext}) = m_{ST} C_P \frac{dT_{ST}}{dt} \quad (4-5)$$

Comme le terme relatif aux pertes thermiques dans cette équation est très petit comparé à la quantité de chaleur cédée par l'eau du RST \dot{Q}_C , il est supposé constant et l'équation (4-5) peut être exprimée comme une équation linéaire [43]:

$$m_{ST} C_P \frac{T_{STL} - T_{Cx,max}}{\Delta t} = \dot{Q}_{C,max} + U_L A_L (T_{ST} - T_{ext}) \quad (4-6)$$

$$T_{STL} = T_{Cx,max} + \frac{\left(\dot{Q}_{C,max} + U_L A_L (T_{ST} - T_{ext}) \right) \Delta t}{m_{ST} C_P} \quad (4-7)$$

Telle que $\Delta t = 1hr$

T_{STL} doit toujours avoir une valeur supérieure à $T_{Cx,max}$ et inférieure à T_{Pcx} .

4.3 Etude thermique du SET pour différent Régimes de fonctionnement

La régulation énergétique du SET peut être effectuée en considérant les différentes possibilités de distribution d'énergie électrique et thermique qui peuvent exister entre l'alimentation et les charges. Pour simplifier l'étude, nous avons pris comme point de référence la température du réservoir RST (T_{ST}) et nous l'avons comparée aux températures des trois points critiques (T_{Cx} , T_{PCx} et T_{STL}) en prenant en compte les besoins énergétiques qui sont liés directement à la saison (été ou hiver).

Nous pouvons résumer notre étude en deux régimes de fonctionnements (froid et chaud) (voir tableau 4.1) :

Tableau 4.1 : Différents cas de régimes de fonctionnement

Régimes	Cas	Température du RST	Description
FROID (ETE)	Cas1	$T_{ST} < T_{PCx}$	- transfert de chaleur total de la PEMFCs. -refroidissement de l'espace par la PAC
	Cas2	$T_{ST} \geq T_{PCx}$	-transfert de chaleur limité de la PEMFCs. - refroidissement de l'espace par la PAC
Chaud (Hiver)	Cas3	$T_{ST} < T_{Cx}$	-chauffage électrique de l'eau sanitaire par la PEMFCs. - transfert de chaleur max de la PEMFCs -chauffage électrique de l'espace par la PAC.
	Cas4	$T_{Cx} \leq T_{ST} < T_{STL}$	-Pas de chauffage électrique de l'eau sanitaire. -transfert de chaleur max de la PEMFCs. - chauffage électrique de l'espace.
	Cas5	$T_{STL} \leq T_{ST} < T_{PCx}$	-Pas de chauffage électrique de l'eau sanitaire. -transfert de chaleur max de la PEMFCs, -un chauffage thermique de l'espace.

	Cas 6	$T_{ST} \geq T_{PCX}$	-Pas de chauffage électrique de l'eau sanitaire. -transfert de chaleur limité de la PEMFCs, -un chauffage thermique de l'espace.
--	-------	-----------------------	--

Nous avons partagé l'étude thermique du système SET en deux parties essentielles :

-La première partie est orientée dans le sens d'absence d'espace à chauffer pour le régime froid (en été).

-La seconde est illustrée par le régime chaud (hiver), dont lequel on tient compte du chauffage de l'espace et de la production de l'eau chaude.

Le bilan énergétique du système est illustré dans la figure 4.3.

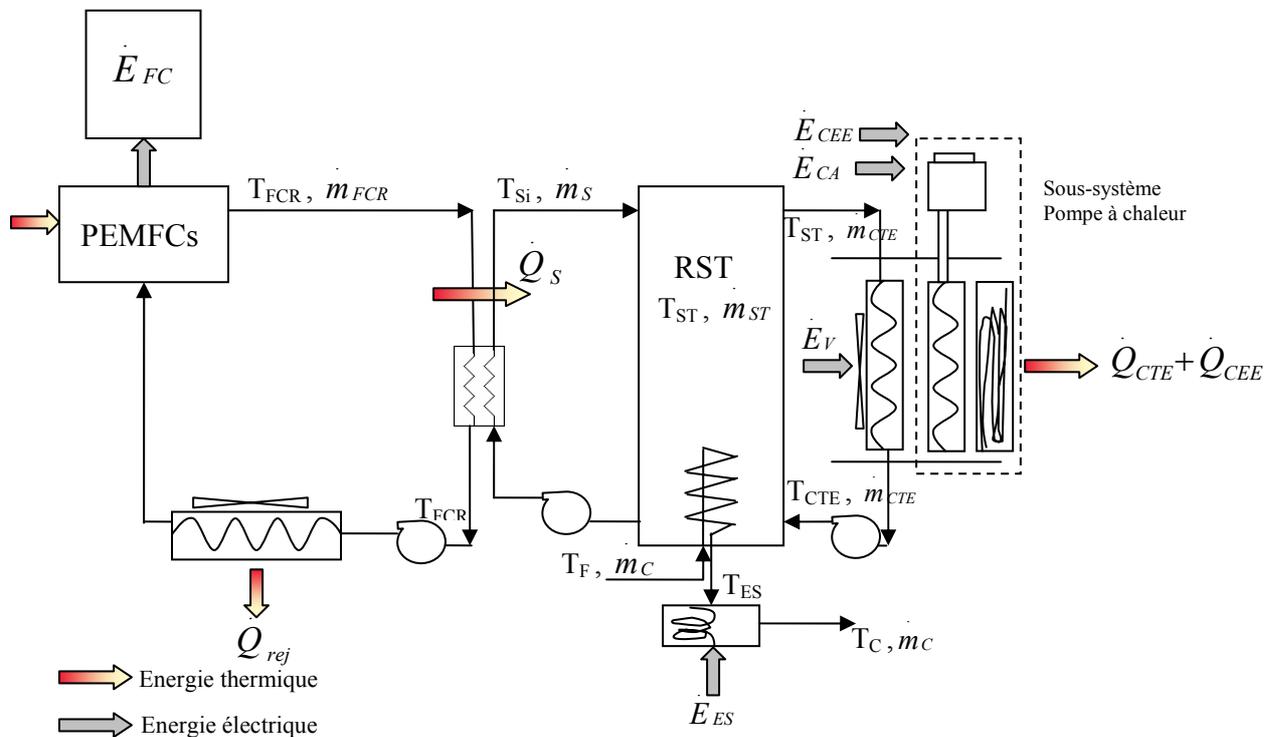


Figure 4.3 : Distribution énergétique du SET

Nous avons donc établi l'énergie totale générée par la PEMFCs pour alimenter les différentes charges d'une habitation comme suit :

$$\dot{E}_{PC} = \dot{E}_E + \dot{E}_V + \dot{E}_{CA} + \dot{E}_{CEE} + \dot{E}_{ES} \quad (4-8)$$

Où : \dot{E}_E : est l'énergie électrique consommée par l'éclairage des lampes.

\dot{E}_V : est l'énergie électrique consommée par les ventilateurs.

\dot{E}_{CA} : est l'énergie électrique consommée pour la climatisation de l'habitation.

\dot{E}_{CEE} : est l'énergie électrique consommée pour le chauffage électrique de l'espace.

\dot{E}_{ES} : est l'énergie électrique consommée pour le chauffage de l'eau sanitaire.

4.3.1 Régime Froid

Le régime froid concerne les saisons chaudes où nous avons affaire à produire de l'énergie pour refroidir l'espace, il concerne essentiellement l'été.

Cas1 :

Dans ce cas la température du réservoir RST (T_{ST}) est inférieure à la température cédée par la PEMFCs (T_{PCX}). Le refroidissement de l'espace est assuré par la pompe à chaleur PAC qui est alimentée électriquement par la PEMFCs.

Un bilan thermique autours du réservoir de stockage thermique donne :

$$\dot{Q}_S - \dot{Q}_{ES} - \dot{Q}_P = m_{ST} C_P \frac{dT_{ST}}{dt} \quad (4-9)$$

Où : \dot{Q}_P : Flux de chaleur qui représente les pertes thermiques du RST vers le milieu extérieur.

\dot{Q}_{ES} : Flux de chaleur transféré du RST à l'eau sanitaire.

\dot{Q}_S : Flux de chaleur cédée par la PEMFCs.

m_{ST} : Masse de l'eau contenu dans le RST.

C_p : Chaleur spécifique de l'eau.

Puisque dans ce cas nous n'avons pas besoin d'énergie électrique pour chauffer l'eau sanitaire donc on peut écrire :

$$\dot{E}_{PC} = \dot{E}_E + \dot{E}_{CA} + \dot{E}_V \quad (4-10)$$

Le flux de chaleur cédée par la PEMFCs est:

$$\dot{Q}_S = \dot{Q}_{PC} = r_{TE} \dot{E}_{PC} \quad (4-11)$$

r_{TE} : Rapport entre l'énergie thermique et l'énergie électrique de la PEMFCs donné par l'équation (3-3).

Le flux de chaleur transférer du RST à l'eau sanitaire est comme suit :

$$\dot{Q}_{ES} = \dot{m}_C C_P (T_C - T_F) \quad (4-12)$$

Les pertes de chaleur du RST sont données par :

$$\dot{Q}_P = U_P A_P (T_{ST} - T_{ext}) \quad (4-13)$$

En combinant l'équation (4-9)-(4-13) nous trouvons l'équation (4-9) devienne :

$$m_{ST} C_P \frac{dT_{ST}}{dt} = r_{TE} (\dot{E}_E + \dot{E}_{CA} + \dot{E}_V) - \dot{m}_C C_P (T_C - T_F) - U_P A_P (T_{ST} - T_{ext}) \quad (4-14)$$

Après un arrangement algébrique, l'équation (4-14) peut être mise sous la forme suivante :

$$\alpha - \beta T_{ST} = m_{ST} C_P \frac{dT_{ST}}{dt} \quad (4-15)$$

Avec :

$$\alpha = r_{TE} (\dot{E}_E + \dot{E}_{CA} + \dot{E}_V) - \dot{m}_C C_P (T_C - T_F) + U_P A_P T_{ext} \quad (4-16)$$

$$\beta = U_P A_P \quad (4-17)$$

La résolution de l'équation différentiel de la température du RST en fonction du temps (nous avons pris 24h) donne :

$$T_{ST,t_2} = \frac{\alpha}{\beta} + \left(T_{ST,t_1} - \frac{\alpha}{\beta} \right) \exp\left(-\frac{3600\beta}{m_{ST} C_P} (t_2 - t_1) \right) \quad (4-18)$$

La quantité de chaleur transférer du RST à l'eau sanitaire est donnée comme suit:

$$Q_{ES} = \int_{t_1}^{t_2} \dot{m}_C C_P (T_C - T_F) dt \quad (4-19)$$

En intégrant dans un intervalle du temps $[t_1, t_2]$ et en considérant que les températures sont des valeurs constantes ainsi que la chaleur spécifique et le débit massique, nous obtenons l'équation de transfert de chaleur du RST à l'eau sanitaire comme suit :

$$Q_{ES} = \dot{m}_C C_P (T_C - T_F) (t_2 - t_1) \quad (4-20)$$

L'énergie électrique délivrée par la PEMFCs, l'énergie thermique et la quantité du combustible (méthane) consommé sont calculer comme suit :

$$E_{PC} = (\dot{E}_E + \dot{E}_{CA} + \dot{E}_V) (t_2 - t_1) \quad (4-21)$$

L'énergie thermique est donnée par l'équation (3-4).

La quantité du combustible consommée par la PEMFCs est calculée comme suit :

$$F_{PC} = \frac{E_{PC}}{\eta_{\text{électrique}}} \quad (4-22)$$

$\eta_{\text{électrique}}$: est le rendement électrique de la PEMFCs représenté par les équations (3-6) et (3-7).

Cas 2 :

Ce cas représente aussi le régime froid quand la température du RST est supérieure à T_{PCx} . La chaleur transférée de la PEMFCs au RST doit être limitée.

Un bilan thermique du réservoir de stockage thermique donne :

$$\dot{Q}_S - \dot{Q}_{ES} - \dot{Q}_P = m_{ST} C_P \frac{dT_{ST}}{dt} \quad (4-23)$$

L'énergie de la PEMFC est donnée par :

$$\dot{E}_{PC} = \dot{E}_E + \dot{E}_{CA} + \dot{E}_V \quad (4-24)$$

La chaleur générée par le PEMFCs est:

$$\dot{Q}_S = \dot{Q}_{PC} = r_{TE} \dot{E}_{PC} \quad (4-25)$$

r_{TE} : est le rapport entre l'énergie thermique et l'énergie électrique de la PEMFCs donné par l'équation (3-3).

Compte tenu de la haute température du RST, le transfert de chaleur est limité à [30]:

$$\dot{Q}_S = \dot{Q}_{PC,max} \frac{T_{SE} - T_{ST}}{T_{SE} - T_{ST,conception}} \quad (4-26)$$

Où : $\dot{Q}_{PC,max}$: est le flux de chaleur maximum qui peut délivrer la PEMFCs.

$T_{ST,conception}$ est la température T_{ST} de conception où la chaleur maximale de la PEMFC peut être transféré au RST et T_{SE} est la température de sortie de l'échangeur de chaleur entre la PEMFCs et le réservoir RST.

Le flux de chaleur du RST à l'au sanitaire est comme suit:

$$\dot{Q}_{ES} = \dot{m}_C C_P (T_C - T_F) \quad (4-27)$$

Les pertes de chaleur du RST sont comme suit:

$$\dot{Q}_P = U_P A_P (T_{ST} - T_{ext}) \quad (4-28)$$

En combinant l'équation (4-23)-(4-28) nous trouvons l'équation d'énergie :

$$m_{ST} C_P \frac{dT_{ST}}{dt} = \dot{Q}_{PC,max} \frac{T_{SE} - T_{ST}}{T_{SE} - T_{ST,conception}} - \dot{m}_C C_P (T_C - T_F) - U_P A_P (T_{ST} - T_{ext}) \quad (4-29)$$

Après un arrangement algébrique l'équation (4-29) peut être mise sous la forme suivante :

$$\alpha - \beta T_{ST} = m_{ST} C_P \frac{dT_{ST}}{dt} \quad (4-30)$$

avec :

$$\alpha = \dot{Q}_{PC,\max} \frac{T_{SE} - T_{ST}}{T_{SE} - T_{ST,conception}} - \dot{m}_C C_P (T_C - T_F) + U_P A_P T_{ext} \quad (4-31)$$

$$\beta = \frac{\dot{Q}_{PC,\max}}{T_{SE} - T_{ST,conception}} + U_P A_P \quad (4-32)$$

La résolution de l'équation différentielle de la température du RST en fonction du temps (nous avons pris 24h) nous trouvons :

$$T_{ST,t_2} = \frac{\alpha}{\beta} + \left(T_{ST,t_1} - \frac{\alpha}{\beta} \right) \exp\left(-\frac{3600\beta}{m_{ST}C_P} (t_2 - t_1) \right) \quad (4-33)$$

L'équation du temps t_2 en fonction du temps initial t_1 est :

$$t_2 = t_1 + \frac{m_{ST}C_P}{3600\beta} \ln \frac{T_{TS,t_1} - \frac{\alpha}{\beta}}{T_{TS,t_2} - \frac{\alpha}{\beta}} \quad (4-34)$$

L'équation de transfert de chaleur du RST à l'eau sanitaire est comme suit :

$$Q_{ES} = \dot{m}_C C_P (T_C - T_F) (t_2 - t_1) \quad (4-35)$$

L'énergie thermique rejeté à l'environnement extérieur est calculée comme suit :

$$Q_{rej} = \int_{t_1}^{t_2} \left(\dot{Q}_{PC,\max} - \dot{Q}_S \right) dt = r_{TE} \dot{E}_{PC} (t_2 - t_1) - \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q}_S dt \quad (4-36)$$

En remplaçant les équations (4-17), (4-24) et (4-25) nous obtenons :

$$Q_{rej} = r_{TE} \dot{E}_{FC} (t_2 - t_1) - \frac{\dot{Q}_{PC,\max}}{T_{SE} - T_{ST,conception}} \left[\left(T_{SE} - \frac{\alpha}{\beta} \right) (t_2 - t_1) + \frac{m_{ST}C_P}{3600\beta} (T_{ST,t_2} - T_{ST,t_1}) \right] \quad (4-37)$$

L'énergie électrique délivrée par la PEMFCs, l'énergie thermique et la quantité du combustible (méthane) consommé sont calculées comme suit :

$$E_{PC} = (\dot{E}_E + \dot{E}_{CA} + \dot{E}_V) (t_2 - t_1) \quad (4-38)$$

L'énergie thermique est donnée par l'équation (3-4).

La quantité du combustible (méthane) consommée par la PEMFCs est calculée comme suit :

$$F_{PC} = \frac{E_{PC}}{\eta_{\text{électrique}}} \quad (4-39)$$

$\eta_{\text{électrique}}$: est le rendement électrique de la PEMFCs représenté par les équations (3-6) (3-7).

4.3.2 Régime chaud

Dans ce régime chaud nous avons exploité l'énergie thermique et l'énergie électrique produite par la PEMFCs pour le chauffage électrique et pour produire de l'eau chaude.

Dans ce cas nous avons utilisé un sous-système constitué par une pompe à chaleur PAC qui inclut un compresseur et une résistance supplémentaire :

L'énergie électrique consommée pour le chauffage électrique de l'espace est exprimée comme suit :

$$\dot{E}_{CEE} = \dot{E}_{PAC} + \dot{E}_{\text{sup}} \quad (4-40)$$

Où : \dot{E}_{PAC} : est l'énergie électrique consommée par le compresseur de la PAC.

\dot{E}_{sup} : est l'énergie électrique consommée par la résistance supplémentaire pour le chauffage de l'espace.

La puissance du compresseur (voir figure 3-22) est donnée par :

$$\dot{E}_{PAC} = f_{\text{eir}}(T_{db}) \dot{Q}_{PAC} \quad (4-41)$$

La relation entre le rapport électrique d'entrée en fonction de la température du bulbe sec qui est la température ambiante prise avec un thermomètre à bulbe sec (T_{db}) est exprimé comme suit [30]:

$$f_{\text{eir}}(T_{db}) = \frac{1}{COP} (2.057025 - 0.0332229T_{db} + 0.0002284T_{db}^2) \quad (4-42)$$

La puissance électrique nécessaire pour alimenter la résistance interne du chauffage supplémentaire qui est donnée par :

$$\dot{E}_{\text{sup}} = \dot{Q}_{\text{sup}} / K_{\text{sup}} \quad (4-43)$$

Où ; K_{sup} est l'efficacité du chauffage électrique.

\dot{Q}_{sup} : est le flux de chaleur cédé par la résistance du chauffage supplémentaire, c'est est un appoint qui fourni de la chaleur qui ne peut pas être fournie par la PAC.

Tels que :

$$\dot{Q}_{\text{sup}} = \dot{Q}_{\text{CEE}} - \dot{Q}_{\text{PAC}} \quad (4-44)$$

Le chauffage de l'espace fourni par la pompe à chaleur est donné par [30]:

$$\dot{Q}_{\text{PAC}} = \min(\dot{Q}_{\text{CEE}}, f_{\text{cap}}(T_{\text{db}}) \dot{Q}_{\text{PAC, cap}}) \text{ Si } T_{\text{db}} > 1.1^\circ\text{C} \quad (4-45)$$

Sinon : $\dot{Q}_{\text{PAC}} = 0$

Sachant que la capacité du cycle de la PAC est [30]:

$$f_{\text{cap}}(T_{\text{db}}) = 0.313927 + 0.0118416T_{\text{db}} + 0.0000586T_{\text{db}}^2 \quad (4-46)$$

Cas 3 :

Dans ce cas nous avons T_{ST} inférieur à T_{CX} . L'eau sanitaire est chauffée à partir de l'énergie thermique du RST et avec une résistance supplémentaire dans la boucle de chauffage de l'eau.

Pour ce qui concerne le chauffage de l'espace, il est assuré par la production d'énergie thermique d'une part délivrée par la PAC elle-même et d'autre part délivrée par une résistance supplémentaire dans la boucle de la PAC.

Le bilan thermique du RST :

$$\dot{Q}_S - \dot{Q}_{\text{ES}} - \dot{Q}_P = m_{\text{ST}} C_P \frac{dT_{\text{ST}}}{dt} \quad (4-47)$$

Où : \dot{Q}_S : est le flux de chaleur générée par le PEMFCs.

\dot{Q}_{ES} : est le flux de chaleur transféré du RST à l'eau sanitaire.

\dot{Q}_p : est le flux de chaleur perdu du RST vers le milieu extérieur.

La chaleur générée par le PEMFCs est :

$$\dot{Q}_S = \dot{Q}_{PC} = r_{TE} \dot{E}_{PC} \quad (4-48)$$

Où : \dot{E}_{PC} : est l'énergie totale générée par le PEMFCs pour alimenter les différentes charges d'une habitation.

r_{TE} : est le rapport entre l'énergie thermique et l'énergie électrique de la PEMFCs donné par l'équation (3-3).

D'où :

$$\dot{Q}_S = \dot{Q}_{PC} = r_{TE} (\dot{E}_E + \dot{E}_V + \dot{E}_{CEE} + \dot{E}_{ES}) \quad (4-49)$$

Où : \dot{Q}_{PC} : est le flux de chaleur générée par le PEMFCs.

\dot{E}_E : est l'énergie électrique consommée par l'éclairage des lampes.

\dot{E}_V : est l'énergie électrique consommée par les ventilateurs.

\dot{E}_{CEE} : est l'énergie électrique consommée pour le chauffage électrique de l'espace.

\dot{E}_{ES} : est l'énergie électrique consommée pour le chauffage de l'eau sanitaire.

Le transfert de chaleur entre le RST et l'eau sanitaire est donné par :

$$\dot{Q}_{ES} = \dot{m}_C C_P (T_{ES} - T_F) = \dot{m}_C C_P (T_{ST} - T_F) \left[1 - \exp\left(-UA / \dot{m}_C C_P\right) \right] \quad (4-50)$$

de l'équation (4-50) nous obtenons :

$$T_{ES} = T_F + (T_{ST} - T_F) \left[1 - \exp\left(-UA / \dot{m}_C C_P\right) \right] \quad (4-51)$$

La puissance électrique nécessaire au chauffage de l'eau sanitaire est donné par :

$$\dot{E}_{ES} = \frac{\dot{m}_C C_P}{K_{ES}} (T_C - T_{ES})$$

nous remplaçons T_{ES} par l'équation (4-51) nous obtenons :

$$\dot{E}_{ES} = \frac{\dot{m}_C C_P}{K_{ES}} \left\{ T_C - \left[T_F + (T_{ST} - T_F) \left(1 - \exp\left(-UA / \dot{m}_C C_P \right) \right) \right] \right\} \quad (4-52)$$

Telle que $K_{ES}=1$ est l'efficacité du chauffage électrique de l'eau.

Les pertes de chaleur du RST sont données par :

$$\dot{Q}_P = U_P A_P (T_{ST} - T_{ext}) \quad (4-53)$$

Où T_{ext} est la température ambiante.

Nous remplaçons les équations (4-49)-(4-50)-(4-52)-(4-53) dans l'équation du bilan thermique du RST (4-47), nous trouvons l'équation exprimant le bilan énergétique comme suit:

$$\begin{aligned} m_{ST} C_P \frac{dT_{ST}}{dt} = r_{TE} \left\{ \dot{E}_{LA} + \dot{E}_V + \dot{E}_{CEE} + \frac{\dot{m}_C C_P}{K_{ES}} \left(T_C - \left[T_F + (T_{ST} - T_F) \left(1 - \exp\left(-UA / \dot{m}_C C_P \right) \right) \right] \right) \right\} \\ - \dot{m}_C C_P (T_{ST} - T_F) \left[1 - \exp\left(-UA / \dot{m}_C C_P \right) \right] - U_P A_P (T_{ST} - T_{ext}) \end{aligned} \quad (4-54)$$

Après un arrangement algébrique l'équation (4-54) peut être mise sous la forme suivante :

$$\alpha - \beta T_{ST} = m_{ST} C_P \frac{dT_{ST}}{dt} \quad (4-55)$$

Avec :

$$\begin{aligned} \alpha = r_{TE} \left[\dot{E}_{LA} + \dot{E}_V + \dot{E}_{CEE} + \frac{\dot{m}_C C_P}{K_{ES}} \left(T_C - T_F \exp\left(-UA / \dot{m}_C C_P \right) \right) \right] + \\ \dot{m}_C C_P T_F \left[1 - \exp\left(-UA / \dot{m}_C C_P \right) \right] + U_P A_P T_{ext} \end{aligned} \quad (4-56)$$

$$\beta = \dot{m}_C C_P \left[1 - \exp\left(-UA / \dot{m}_C C_P \right) \right] \left(\frac{r_{TE}}{K_{DW}} + 1 \right) + U_P A_P \quad (4-57)$$

La résolution de l'équation différentielle exprimant la température du RST en fonction du temps (nous avons pris 24h de temps pour la simulation) nous donne :

$$T_{ST,t_2} = \frac{\alpha}{\beta} + \left(T_{ST,t_1} - \frac{\alpha}{\beta} \right) \exp\left(-\frac{3600\beta}{m_{ST}C_P}(t_2 - t_1) \right) \quad (4-58)$$

L'énergie électrique délivrée par la PEMFCs, l'énergie thermique et la quantité du combustible consommé sont calculées comme suit :

$$E_{PC} = (\dot{E}_{LA} + \dot{E}_V + \dot{E}_{CEE})(t_2 - t_1) + E_{ES} \quad (4-59)$$

L'énergie thermique est donnée par l'équation (3-4).

La quantité du combustible consommée par la PEMFCs est calculée comme suit :

$$F_{PC} = \frac{E_{PC}}{\eta_{\text{électrique}}} \quad (4-60)$$

$\eta_{\text{électrique}}$: est le rendement électrique de la PEMFCs représenté par les équations (3-6) et (3-7).

Cas 4 :

Ce cas est considéré lorsque la température du RST est supérieure à T_{CX} et inférieure à T_{STL} . Dans ce cas nous prétendons que l'eau sanitaire est chauffée à partir du RST, l'espace est chauffé à partir de l'énergie thermique fournie par la PAC et la résistance supplémentaire.

Le bilan thermique autour du RST :

$$\dot{Q}_S - \dot{Q}_{ES} - \dot{Q}_P = m_{ST}C_P \frac{dT_{ST}}{dt} \quad (4-61)$$

Où : \dot{Q}_P : Flux de chaleur perdu du RST vers le milieu extérieur.

\dot{Q}_{ES} : Flux de chaleur transféré du RST à l'eau sanitaire.

\dot{Q}_E : Flux de chaleur généré par l'éclairage des lampes.

\dot{Q}_S : Flux de chaleur cédée par la PEMFCs.

m_{ST} : Masse de l'eau contenu dans le RST.

C_p : Chaleur spécifique de l'eau.

L'énergie électrique fournie par la PEMFC :

$$\dot{E}_{PC} = \dot{E}_E + \dot{E}_V + \dot{E}_{CEE} \left\{ \dot{Q}_{EC} \right\} \quad (4-62)$$

La chaleur dégagée par le PEMFCs est:

$$\dot{Q}_S = \dot{Q}_{PC} = r_{TE} \dot{E}_{PC} \quad (4-63)$$

r_{TE} : Rapport entre l'énergie thermique et l'énergie électrique de la PEMFCs donné par l'équation (3-3).

La chaleur cédée au chauffage de l'eau sanitaire est donnée par :

$$\dot{Q}_{ES} = \dot{m}_C C_P (T_C - T_F) \quad (4-64)$$

Les pertes de chaleur du RST sont données par :

$$\dot{Q}_P = U_P A_P (T_{ST} - T_{ext}) \quad (4-65)$$

En combinant les équations (4-61) à (4-65) nous trouvons l'équation du bilan énergétique comme suit :

$$m_{ST} C_P \frac{dT_{ST}}{dt} = r_{TE} \left(\dot{E}_E + \dot{E}_V + \dot{E}_{CEE} \right) - \dot{m}_C C_P (T_C - T_F) - U_P A_P (T_{ST} - T_{ext}) \quad (4-66)$$

Après un arrangement algébrique l'équation (4-66) peut être mise sous la forme suivante :

$$\alpha - \beta T_{ST} = m_{ST} C_P \frac{dT_{ST}}{dt} \quad (4-67)$$

Avec :

$$\alpha = r_{TE} \left(\dot{E}_E + \dot{E}_V + \dot{E}_{CEE} \right) - \dot{m}_C C_P (T_C - T_F) + U_P A_P T_{ext} \quad (4-68)$$

$$\beta = U_p A_p \quad (4-69)$$

La résolution de l'équation différentielle de la température du RST en fonction du temps (nous avons pris 24 heures) nous donne :

$$T_{ST,t_2} = \frac{\alpha}{\beta} + \left(T_{ST,t_1} - \frac{\alpha}{\beta} \right) \exp\left(-\frac{3600\beta}{m_{ST} C_P} (t_2 - t_1) \right) \quad (4-70)$$

L'équation de transfert de chaleur du RST à l'eau sanitaire est donnée par :

$$Q_{ES} = \dot{m}_C C_P (T_C - T_F) (t_2 - t_1) \quad (4-71)$$

L'énergie électrique délivré par la PEMFCs, l'énergie thermique et la quantité du combustible (méthane) consommé sont calculées comme suit :

$$E_{PC} = (\dot{E}_E + \dot{E}_V + \dot{E}_{CEE}) (t_2 - t_1) \quad (4-72)$$

L'énergie thermique est donnée par l'équation (3-4).

La quantité du combustible (méthane) consommée par la PEMFCs est calculée comme suit :

$$F_{PC} = \frac{E_{PC}}{\eta_{\text{électrique}}} \quad (4-73)$$

$\eta_{\text{électrique}}$: Rendement électrique de la PEMFCs représenté par les équations (3-6)

(3-7).

Cas 5 :

Dans ce cas nous avons la température du RST est supérieur à T_{STL} et inférieur à T_{PCX} . Pour ce cas nous avons un chauffage de l'eau sanitaire et de l'espace à partir du RST, on peut écrire que :

$$\dot{Q}_{CTE} = \dot{Q}_{EC}$$

Où : Q_{EC} : Flux de chaleur nécessaire au chauffage de l'espace.

\dot{Q}_{CTE} : Flux de chaleur cédé par le chauffage thermique de l'espace.

Le bilan thermique du RST nous donne :

$$\dot{Q}_S - \dot{Q}_{CTE} - \dot{Q}_{ES} - \dot{Q}_P = m_{ST} C_P \frac{dT_{ST}}{dt} \quad (4-74)$$

L'énergie électrique fournie par la PEMFC :

$$\dot{E}_{PC} = \dot{E}_E + \dot{E}_V \quad (4-75)$$

La chaleur dégagée par le PEMFCs est:

$$\dot{Q}_S = \dot{Q}_{PC} = r_{TE} \left(\dot{E}_E + \dot{E}_V \right) \quad (4-76)$$

r_{TE} : Rapport entre l'énergie thermique et l'énergie électrique de la PEMFCs donné par l'équation (3-3).

La chaleur cédée au chauffage de l'eau sanitaire est donnée par :

$$\dot{Q}_{ES} = \dot{m}_C C_P (T_C - T_F) \quad (4-77)$$

Les pertes de chaleur du RST sont données par :

$$\dot{Q}_P = U_P A_P (T_{ST} - T_{ext}) \quad (4-78)$$

En combinant les équations (4-74) à (4-78) nous trouvons l'équation du bilan énergétique comme suit :

$$m_{ST} C_P \frac{dT_{ST}}{dt} = r_{TE} \left(\dot{E}_{LA} + \dot{E}_V \right) - \dot{Q}_{CTE} - \dot{m}_C C_P (T_C - T_F) - U_P A_P (T_{ST} - T_{ext}) \quad (4-79)$$

Après un arrangement algébrique l'équation (4-79) peut être mise sous la forme suivante :

$$\alpha - \beta T_{ST} = m_{ST} C_P \frac{dT_{ST}}{dt} \quad (4-80)$$

Avec :

$$\alpha = r_{TE} \left(\dot{E}_{LA} + \dot{E}_V \right) - (\dot{Q}_{EC}) - \dot{m}_C C_P (T_C - T_F) + U_P A_P T_{ext} \quad (4-81)$$

$$\beta = U_P A_P \quad (4-82)$$

La résolution de l'équation différentielle de la température du RST en fonction du temps (nous avons pris 24 heures) nous trouvons :

$$T_{ST,t_2} = \frac{\alpha}{\beta} + \left(T_{ST,t_1} - \frac{\alpha}{\beta} \right) \exp\left(-\frac{3600\beta}{m_{ST}C_P}(t_2 - t_1) \right) \quad (4-83)$$

L'équation du taux de transfert de chaleur du RST à l'eau sanitaire comme suit :

$$Q_{ES} = \dot{m}_C C_P (T_C - T_F)(t_2 - t_1) \quad (4-84)$$

L'énergie transférée du RST vers l'espace à chauffer est comme suit :

$$Q_{CTE} = \dot{Q}_{EC}(t_2 - t_1) \quad (4-85)$$

L'énergie électrique délivrée par la PEMFCs, l'énergie thermique et la quantité de combustible consommé sont calculées comme suit :

$$E_{PC} = (\dot{E}_{LA} + \dot{E}_V)(t_2 - t_1) \quad (4-86)$$

L'énergie thermique est donnée par l'équation (3-4).

La quantité du combustible (méthane) consommée par la PEMFCs est calculée comme suit :

$$F_{PC} = \frac{E_{PC}}{\eta_{\text{électrique}}} \quad (4-87)$$

$\eta_{\text{électrique}}$: est le rendement électrique de la PEMFCs représenté par les équations (3-6) (3-7).

Cas 6 :

Ce cas est pris en considération lorsque la température du RST est supérieure à T_{pcx} . Le chauffage de l'eau sanitaire et de l'espace est fourni par le RST, mais le transfert de chaleur entre la PEMFCs et le RST est limité.

Nous avons :

$$\dot{Q}_{CTE} = \dot{Q}_{EC}$$

Où : \dot{Q}_{EC} : est le flux de chaleur nécessaire au chauffage de l'espace.

\dot{Q}_{CTE} : est le flux de chaleur cédé par le chauffage thermique de l'espace.

Le bilan thermique autour du RST :

$$\dot{Q}_S - \dot{Q}_{CTE} - \dot{Q}_{ES} - \dot{Q}_P = m_{ST} C_P \frac{dT_{ST}}{dt} \quad (4-88)$$

L'énergie électrique fournie par la PEMFC :

$$\dot{E}_{PC} = \dot{E}_E + \dot{E}_V \quad (4-89)$$

La chaleur dégagée par le PEMFCs est:

$$\dot{Q}_{PC} = r_{TE} \left(\dot{E}_E + \dot{E}_V \right) \quad (4-90)$$

r_{TE} : est le rapport entre l'énergie thermique et l'énergie électrique de la PEMFCs donné par l'équation (3-3).

Puisque la température du RST est très élevée, le transfert de chaleur de la PEMFCs avec le RST est limité à :

$$\dot{Q}_S = \dot{Q}_{PC} \frac{T_{SE} - T_{ST}}{T_{SE} - T_{ST,conception}} \quad (4-91)$$

$T_{ST,conception}$ est la température T_{ST} de conception où la chaleur maximale de la PEMFC peut être transféré au RST.

Le transfert de chaleur du RST à l'eau sanitaire est donnée par :

$$\dot{Q}_{ES} = \dot{m}_C C_P (T_C - T_F) \quad (4-92)$$

Les pertes de chaleur du RST sont donnée par :

$$\dot{Q}_P = U_P A_P (T_{ST} - T_{ext}) \quad (4-93)$$

En combinant l'équation (4-88) à (4-93) nous trouvons l'équation du bilan énergétique comme suit :

$$m_{ST} C_P \frac{dT_{ST}}{dt} = \dot{Q}_{PC} \frac{T_{SE} - T_{ST}}{T_{SE} - T_{ST,conception}} - \dot{Q}_{CTE} - \dot{m}_C C_P (T_C - T_F) - U_P A_P (T_{ST} - T_{ext}) \quad (4-94)$$

Après un arrangement algébrique l'équation (4-93) peut être mise sous la forme suivante :

$$\alpha - \beta T_{ST} = m_{ST} C_P \frac{dT_{ST}}{dt} \quad (4-95)$$

Avec :

$$\alpha = \dot{Q}_{PC} \frac{T_{SE}}{T_{SE} - T_{ST,conception}} - (\dot{Q}_{EC}) - \dot{m}_C C_P (T_C - T_F) + U_P A_P T_{ext} \quad (4-96)$$

$$\beta = \frac{\dot{Q}_{PC}}{T_{SE} - T_{ST,conception}} + U_P A_P \quad (4-97)$$

La résolution de l'équation différentiel de la température du RST en fonction du temps (pour un temps $t = 24h$) nous donne :

$$T_{ST,t_2} = \frac{\alpha}{\beta} + \left(T_{ST,t_1} - \frac{\alpha}{\beta} \right) \exp\left(-\frac{3600\beta}{m_{ST}C_P} (t_2 - t_1) \right) \quad (4-98)$$

L'équation du temps t_2 en fonction du temps initial t_1 est :

$$t_2 = t_1 + \frac{m_{ST}C_P}{3600\beta} \ln \frac{T_{TS,t_1} - \frac{\alpha}{\beta}}{T_{TS,t_2} - \frac{\alpha}{\beta}} \quad (4-99)$$

L'équation de la chaleur transférée du RST à l'eau sanitaire est donnée par :

$$Q_{ES} = \dot{m}_C C_P (T_C - T_F) (t_2 - t_1) \quad (4-100)$$

L'énergie transféré du RST vers l'espace à chauffer est donnée par :

$$Q_{CTE} = \dot{Q}_{EC} (t_2 - t_1) \quad (4-101)$$

L'énergie thermique rejeté à l'environnement extérieur est calculée comme suit :

$$Q_{rej} = \int_{t_1}^{t_2} (\dot{Q}_{PC} - \dot{Q}_S) dt = r_{TE} \dot{E}_{FC} (t_2 - t_1) - \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q}_S dt \quad (4-102)$$

En remplaçant les équations (4-91), (4-98) et (4-99) par leurs expressions, nous obtenons :

$$Q_{rej} = r_{TE} \dot{E}_{FC}(t_2 - t_1) - \frac{\dot{Q}_{PC}}{T_{SE} - T_{ST,conception}} \left[\left(T_{SE} - \frac{\alpha}{\beta} \right) (t_2 - t_1) + \frac{m_{ST} C_P}{3600 \beta} (T_{ST,t_2} - T_{ST,t_1}) \right] \quad (4-103)$$

L'énergie électrique délivré par la PEMFCs, l'énergie thermique et la quantité du combustible (méthane) consommé sont calculer comme suit :

$$E_{PC} = (\dot{E}_{LA} + \dot{E}_V)(t_2 - t_1) \quad (4-104)$$

L'énergie thermique est donnée par l'équation (3-4).

La quantité du combustible (méthane) consommée par la PEMFCs est calculer comme suit :

$$F_{PC} = \frac{E_{PC}}{\eta_{\text{électrique}}} \quad (4-105)$$

$\eta_{\text{électrique}}$: est le rendement électrique de la PEMFCs représenté par les équations (3-6) (3-7).

4.4 Besoins énergétiques d'une habitation

Afin de calculer les besoins énergétiques d'une habitation on doit avoir deux types d'informations, le premier type concerne les données climatique du site de l'implantation de l'habitation (température ambiante, humidité, ...) et des données concernant le profil de charge électrique et thermique c'est-à-dire le type de charge à alimenter et le degré de confort choisi. Il faut bien comprendre que ces températures de référence permettent le calcul de la puissance de chauffage pour le cas le plus défavorable (hiver en générale). Nous prendrons les températures moyennes constatées pour éviter que notre installation ne sera pas surdimensionnée et donc peu rentable.

Chapitre 5

Simulation numérique du SET -Application à l'habitat-

5.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif de décrire et d'interpréter sous formes de graphes les principaux résultats auxquels nous avons abouti. Nous allons simuler le fonctionnement de notre système énergétique total SET pour l'alimentation en énergie électrique et thermique d'une habitation d'une famille individuelle située à la cité résidentielle de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelable de Ghardaïa. Nous avons utilisé pour notre simulation numérique les données réelles concernant les données météorologiques (température ambiante), les données climatiques (l'heure du lever et coucher du soleil) et les données liées à la consommation de cette habitation (charges électriques, thermiques et le nombre d'heures de consommation).

5.2 Présentation des charges

5.2.1 Profil de charge électrique

L'habitation prise en considération pour la simulation numérique est constituée de deux chambres, d'un salon, d'une cuisine, d'une salle de bain et d'un couloir. Pour l'éclairage de l'ensemble des chambres de cette habitation individuelle nous nous proposons d'utiliser des réglettes à fluorescence de 18W. Ceci pour leur faible consommation et leur grande luminosité. Comme électroménager, nous considérons qu'il n'existe que les appareils de base à savoir : un téléviseur couleur et un réfrigérateur. Le tableau 5.1 montre la répartition des équipements et leurs consommations.

Tableau 5.1. Le profil de charge électrique d'une habitation individuelle

Charges électriques	Puissance nominale (W)
Lampes à fluorescence	162
Téléviseur	350
Réfrigérateur	300

La valeur du nombre d'heures de consommation est déterminée en fonction de l'heure du lever et du coucher du soleil. Cette consommation varie d'une saison à une autre. Ainsi, le nombre d'heure d'éclairage dépend des heures du lever et du coucher des membres de la famille. Nous supposons que le lever et le coucher respectif des occupants de cette habitation s'effectuent en moyenne à 7h du matin et à 23h le soir. Sur la figure (5.1) [50] nous présentons les diagrammes relatifs au lever et au coucher du soleil en heure locale. Sur ce diagramme nous constatons que ces paramètres varient d'une saison à l'autre. Ainsi connaissant les heures de lever et du coucher de la famille, nous pouvons déterminer facilement le nombre d'heures de consommation relatif à l'éclairage d'une habitation quelconque sur le lieu considéré.

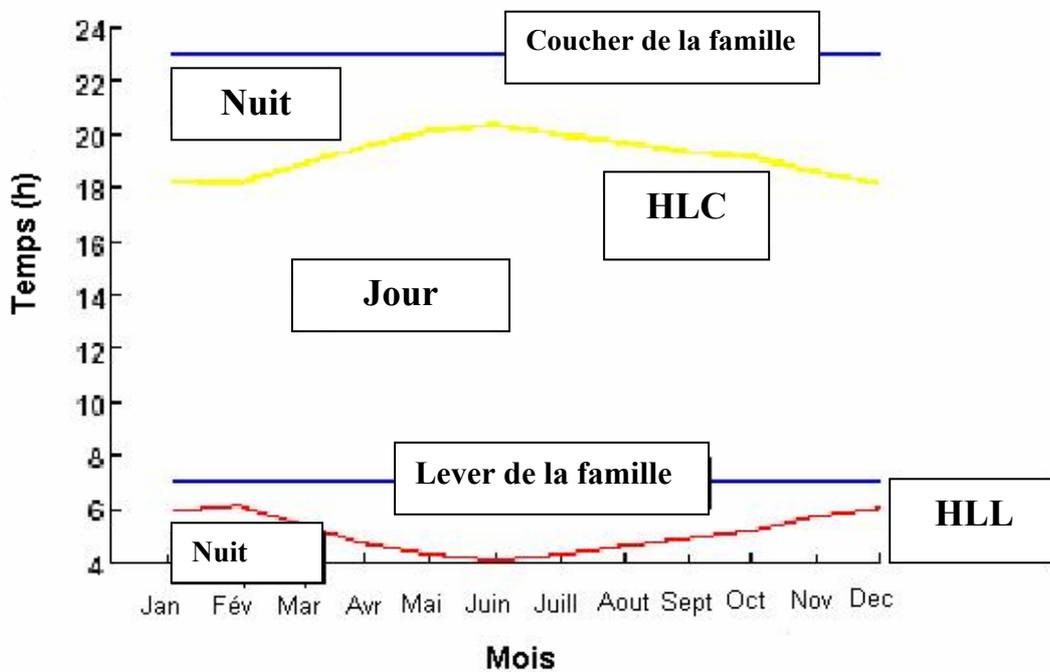


Figure 5.1 : Diagramme de calcul du nombre d'heure de consommation [50]

Telle que :

HLC : Heure locale du coucher de soleil

HLL : Heure locale du lever du soleil

Pour les appareils électroménagers, dont le réfrigérateur, le nombre d'heures de fonctionnement du compresseur dépend de la température du milieu environnant. Le tableau 5.2 montre les températures moyennes mensuelles du site d'implantation de habitation (Ghardaïa) qui est situé à une latitude de 32.4N et une longitude de 3.80 E à une altitude de 468.5 m :

Tableau 5.2 : Les températures moyennes mensuelles du site de Ghardaïa

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
T _{ambiante}	9.32	10.22	18.48	22.25	28.8	30.64	34.13	35.8	27.85	25.15	14.4	11.52

Dans ce tableau nous constatons que la température extérieure moyenne est comprise entre 9 et 15 °C pour la période hivernale, de 19 à 28 °C pour les périodes d'automne et de printemps. Par contre pour la période estivale, la température extérieure est comprise entre 29 et 36°C. Ainsi celle ci nous conduit à prévoir une climatisation.

5.2.2 Profil de charge thermique

Les charges thermiques sont en général prises en considération pour la période hivernale, elles concernent le chauffage de l'eau sanitaire et le chauffage de l'espace interne de cette habitation.

Les caractéristiques nécessaires utilisées dans la simulation numérique sont estimées par le tableau suivant :

Tableau 5-3 : Données utilisées pour la simulation numérique

Capacité du RST (Vol TS) litres	450
Coefficient d'échange thermique du RST (W/m ² K)	0.849
Hauteur du RST (m)	0.9868
Surface du RST (m ²)	3.2743
Le rendement de la résistance supplémentaire du chauffage (l'eau et l'espace) %	100
COP	3.3

5.2.3 Présentations des charges en hiver

Le tableau 5.4 est relatif aux données réelles de la moyenne journalière du mois de janvier d'une habitation d'une surface de 60m².

Ces données représentent le temps en heure, la température du bulbe sec, les charges thermique nécessaire pour le chauffage d'espace, les charges électriques pour l'éclairage ainsi que la climatisation et la ventilation, la température d'eau sanitaire froide entrant et le débit d'eau chaude consommés par unité de temps, ces données nous ont été transmis par le laboratoire de gisement solaire situé à l'unité de recherche appliquée en énergies renouvelables de Ghardaïa.

Tableau 5-4. Données réelles utilisées pour la simulation numérique du régime chaud

Heure (h)	Tdb (°C)	Qec (kWth)	Ee (kWe)	Ec (kWe)	Ev (kWe)	T _F (°C)	<i>m_c</i> (Kg/h)
1	5.6	12.45	0.318	0	0.9	4.25	1
2	5.899	12.15	0.318	0	0.9	4.42	1
3	5.979	12.07	0.318	0	0.9	4.5	40
4	4.8	13.26	0.318	0	0.9	4.24	43
5	4.587	13.47	0.318	0	0.9	4.22	40
6	4.932	13.12	0.318	0	0.9	4.35	50
7	5.114	12.94	0.39	0	0.9	4.53	62
8	6.771	11.28	0.39	0	0.9	4.48	61
9	9.63	8.40	0.3	0	0.9	5.71	63
10	12.17	5.85	0.65	0	0.9	5.69	64
11	13.89	4.12	0.668	0	0.9	5.85	64.5
12	14.58	3.43	0.65	0	0.9	8.08	65
13	14.44	3.57	0.668	0	0.9	10.41	65.6
14	13.47	4.55	0.686	0	0.9	10.52	66
15	13.32	4.70	0.704	0	0.9	10.6	65.7
16	13.15	4.87	0.74	0	0.9	10.75	64
17	12.99	5.03	0.758	0	0.9	5.556	67
18	12.77	5.25	0.812	0	0.9	5.439	60
19	11.58	6.44	0.74	0	0.9	5.288	65
20	10.64	7.39	0.812	0	0.9	4.891	64
21	9.59	8.44	0.812	0	0.9	4.66	63
22	8.38	9.66	0.812	0	0.9	4.646	65
23	7.58	10.46	0.39	0	0.9	4.804	10
24	7.26	10.78	0.318	0	0.9	4.851	10

Afin de mieux voir les fluctuations de la consommation de notre habitation, nous avons tracé les figures 5.2 et 5.3 qui représentent respectivement la variation des charges électriques pour chaque heure ainsi que le rapport de la charge (PLR), la variation de la température ambiante et les charges électriques et thermiques de la moyenne journalière pour une journée du mois de Janvier.

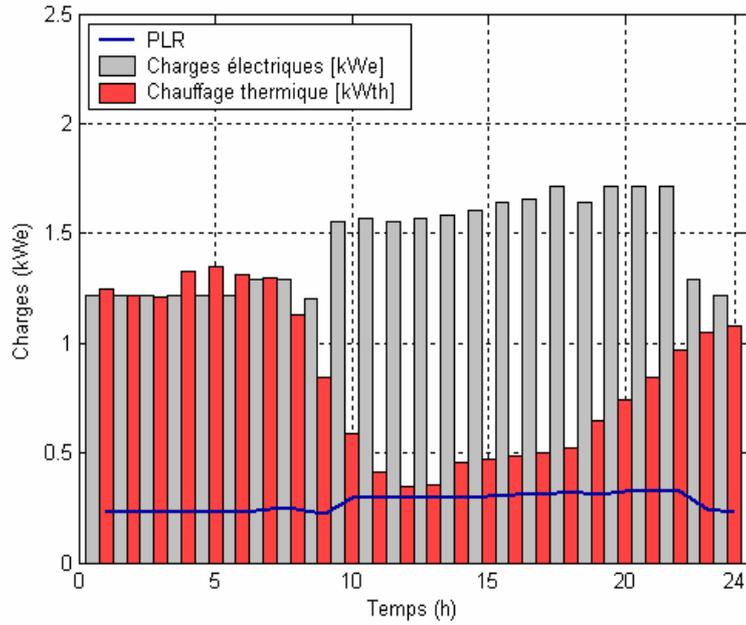


Figure 5.2 : Evolution des charges électriques pour une journée du mois de Janvier

La figure 5.2 nous montre que la plus grande charge électrique atteinte est de l'ordre de 1.7kW de 17 h à 21h ce qui est dû à l'heure locale du coucher du soleil (HLC) et à l'heure du coucher de la famille présentées par la figure 5.1.

La figure 5.3 représente la variation de la température ambiante et d'entrée d'eau sanitaire en fonction du temps.

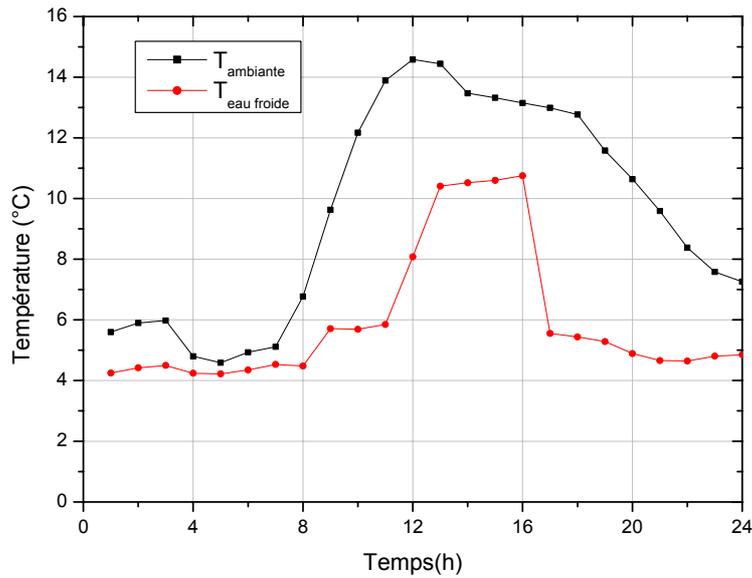


Figure 5.3 : Variation des températures ambiante et d'eau sanitaire au cours du temps

Nous remarquons que l'évolution de la température d'entrée d'eau froide sanitaire est presque la même que celle de la température du bulbe sec qui est dû à l'échange thermique entre le milieu extérieur et l'eau sanitaire. Nous notons aussi que la température est basse au début de la journée puis elle atteint les valeurs maximales de 12h à 16h puis elle rechute en fin de l'après midi.

La représentation graphique des charges électriques et thermiques pour le chauffage de l'espace pour la journée du mois de Janvier choisi montre qu'il y'a une grande demande en énergie thermique pour le chauffage de l'espace pendant la matinée et le soir. Ceci est expliqué par l'heure locale du coucher du soleil (HLC) et l'heure du coucher de la famille ainsi par le fait que la température ambiante (présenté par la figure 5.3) chute pendant les heures suscitées.

5.2.4 Présentation des charges en été

Nous avons présenté les données réelles pour une habitation d'une surface de 60m² qui varie en fonction du temps (heure) de la moyenne journalière du mois d'Août présenté dans le tableau 5.4.

Ces données représentent le temps en heure, la température du bulbe sec, les charges électriques pour l'éclairage ainsi que la climatisation et la ventilation, la température d'eau sanitaire froide entrant.

Tableau 5.4 : Données réelles pour la simulation en régime froid

Heure (h)	Tdb (°C)	Ee (kW)	Ec (kW)	Ev (kW)	T _F (°C)	$\dot{m}_c \times 10^{-3}$ (kg/h)
1	24.74	0.318	0	0.9	20.42	0
2	25.03	0.318	0	0.9	20.56	0
3	24.64	0.318	0	0.9	20.57	0
4	24.46	0.3	0	0.9	20.60	0
5	24.47	0.3	0	0.9	21.63	0
6	24.47	0.318	0	0.9	21.61	0
7	24.43	0.318	0	0.9	21.69	0.2
8	25.08	0.65	0	0.9	21.79	0.3
9	27.46	0.65	0	0.9	21.91	1.1
10	29.05	0.668	0	0.9	22.90	1.4
11	34.86	0.65	4.4	0	24.03	17.2
12	32.65	0.668	4.4	0	24.14	18.1
13	33.58	0.686	4.4	0	25.28	19
14	35.11	0.686	4.4	0	25.57	2.6
15	35.55	0.668	4.4	0	25.66	2.8

16	35.87	0.65	4.4	0	25.79	3.4
17	34.68	0.65	4.4	0	25.98	3.1
18	27.13	0.686	4.4	0	27.10	3.1
19	25.84	0.704	4.4	0	27.24	3.1
20	26.03	0.74	4.4	0	27.50	2.8
21	25.73	0.758	4.4	0	27.52	2.8
22	23.99	0.812	4.4	0	25.63	2.8
23	23.78	0.812	0	0.9	24.72	2.8
24	22.92	0.318	0	0.9	21.75	2.8

La figure 5.4 montre la variation de la température ambiante pendant une journée choisie du mois d’Août ainsi que la température d’entrée d’eau froide.

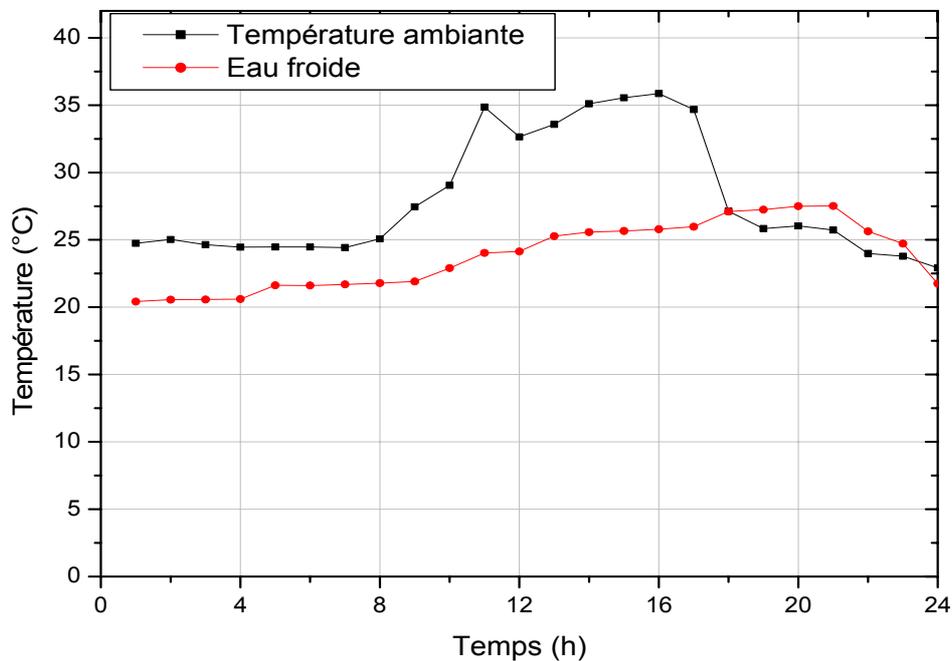


Figure 5.4 : Variation de la température ambiante et de l’eau d’entrée en fonction du temps

La température ambiante mesurée pendant une journée du mois d’Août (régime froid) à l’Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa a l’allure présentée sur la figure 5.4, elle augmente sensiblement à partir de 9.00 du matin et jusqu’au soir, pour se stabiliser à partir de 22.00 h .

Nous remarquons que la température d’entrée d’eau froide commence à augmenter à partir de 9h et se stabilise légèrement en fin de journée. La figure 5.5 montre la variation des charges électriques et le PLR en fonction du temps.

La variation des charges électriques indiquée sur la figure 5.5 peut être expliquée par la mise en marche de la PAC à partir de 10 h jusqu’à 23 h qui correspond aux hautes valeurs

de la température ambiante en ces moments (voir figure 5.4). Dans ce régime nous avons un PLR qui peut atteindre sa valeur maximale.

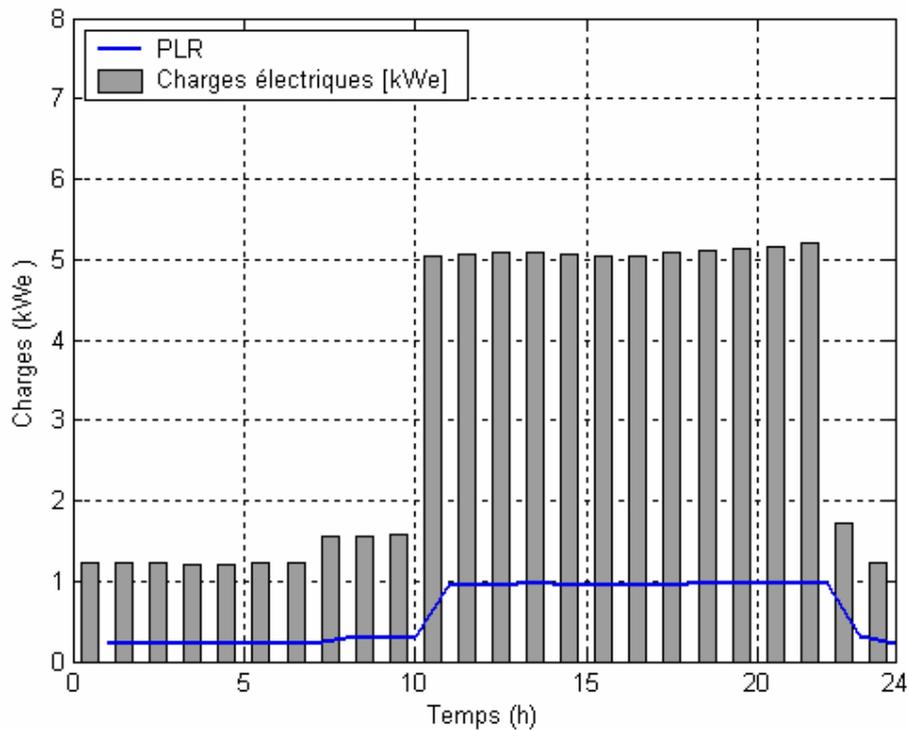


Figure 5.5 : Evolution des charges électriques et du PLR en fonction du temps

5.3 Simulation numérique du SET pour une habitation individuelle

Nous avons simulé le comportement énergétique du SET appliqué à l'habitation individuelle dans le site de Ghardaïa. Nous avons pris les deux journées types pour les deux régimes de fonctionnements, le régime chaud qui est celui de l'hiver et le régime froid qui représente la saison d'été.

La simulation que nous avons effectuée nous a permis de déterminer les paramètres et les caractéristiques de tous le système pour les deux régimes de fonctionnement, principalement la variation des températures critiques des trois boucles du système ainsi que les quantités d'énergies transférées de la PEMFCs à la charge.

Nous avons calculé également le rendement de cogénération de la PEMFCs et du SET pour les deux régimes de fonctionnement.

5.3.1 Organigramme de la simulation numérique

Afin de simuler le SET pour une habitation d'une superficie de 60 m^2 , nous avons utilisé le logiciel MATLAB conjointement à l'organigramme donné ci-dessous.

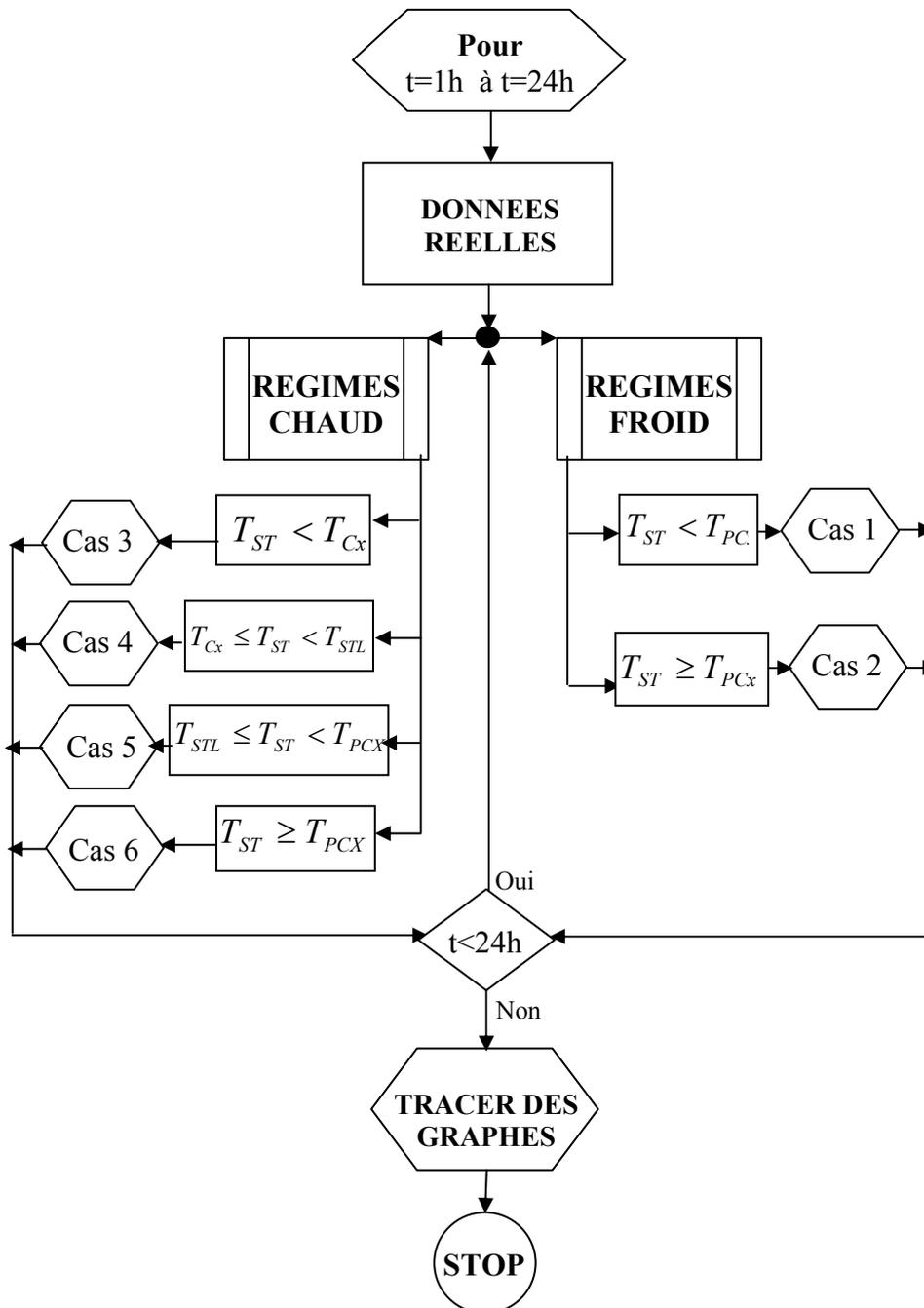


Figure 5.6 : Organigramme de la simulation numérique du SET

Cet organigramme permet de sélectionner à partir des données le cas de fonctionnement notre système SET pour chaque heure et de tracer tous les résultats de la simulation obtenue en fonction de ces données.

5.3.2 Résultats obtenus

Afin de simuler le fonctionnement de notre système énergétique total (SET) nous avons pris comme données les valeurs climatiques du site d'implantation de l'habitation de notre application ainsi que les charges électriques et thermiques de l'habitation mentionnée dans les paragraphes précédents.

Nous avons pris une journée type pour chaque régime de fonctionnement ainsi que les données moyennes qui nous ont permis d'éviter le surdimensionnement du SET.

L'utilisation du logiciel MATLAB nous a permis la résolution numérique des équations décrivant notre système énergétique SET. Les résultats du programme de calcul ont été présentés sous formes de graphes.

5.3.2.1 Simulation numérique du fonctionnement du SET en régime chaud

Dans ce paragraphe nous avons présenté les différents résultats obtenus du fonctionnement du SET en régime chaud sous les charges illustrées dans le paragraphe 5.2.3.

5.3.2.1.1 Distribution de la température dans les différentes boucles du SET

La figure 5.7 montre les résultats de la simulation numérique correspondant au fonctionnement en régime chaud pour la distribution des températures dans la boucle du PEMFCs, de la boucle du chauffage de l'eau sanitaire et de la boucle de la PAC comparé avec la température du réservoir RST présenté respectivement par les équations : [4-2], [4-4], [4-7], [4-18].

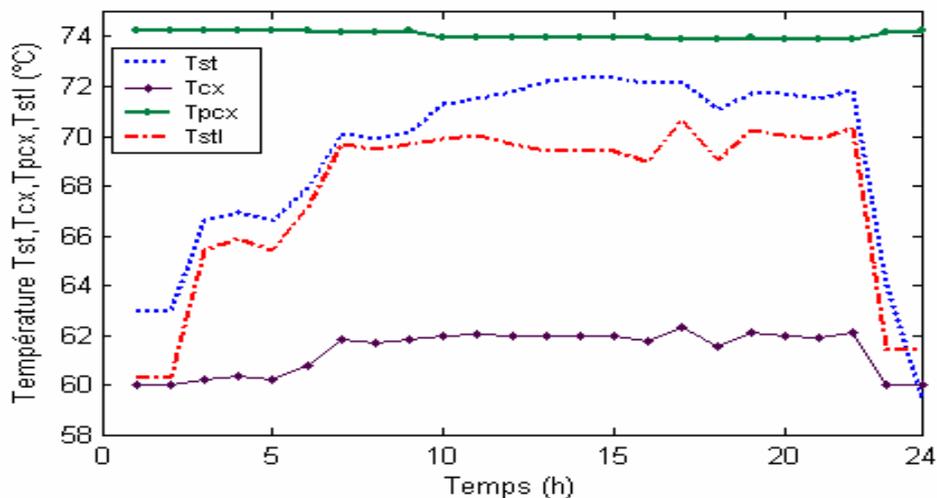


Figure 5.7 : Distributions des températures dans les différentes boucles du SET en fonction du temps (saison froide)

Nous remarquons que la température limite pour le chauffage de l'espace (T_{STL}) a la même allure que la température du réservoir de stockage thermique (T_{ST}), cette dernière est inférieure à la température maximale délivrée par la PEMFCs (T_{PCX}).

Pour la température minimale (T_{cx}) qui peut être fournie au chauffage de l'eau sanitaire, elle augmente de 2°C durant le jour (6h à 22h) à cause d'une part, de l'augmentation de la température d'entrée d'eau sanitaire froide (voir figure 5.3) et d'autre part ceci est expliqué par l'augmentation de la température du réservoir de stockage thermique T_{ST} qui est dû à l'accumulation de la chaleur produite par l'effet de la grande demande en énergie électrique car l'augmentation de la demande en énergie électrique conduit à une augmentation de la production d'énergie thermique.

La température minimale du réservoir RST qui peut assuré le chauffage d'espace (T_{STL}) a augmenté de 10°C ceci est expliqué par la formule (4.7) qui énonce que T_{STL} doit toujours avoir une valeur supérieur à $T_{Cx,max}$ et inférieur à T_{Pcx} . Nous remarquons aussi que la température délivrée par la PEMFCs est presque constante.

Dans la figure 5.8 nous avons tracé la variation des températures critiques au niveau des différentes boucles et la moyenne de chaque température critique en fonction de la température ambiante.

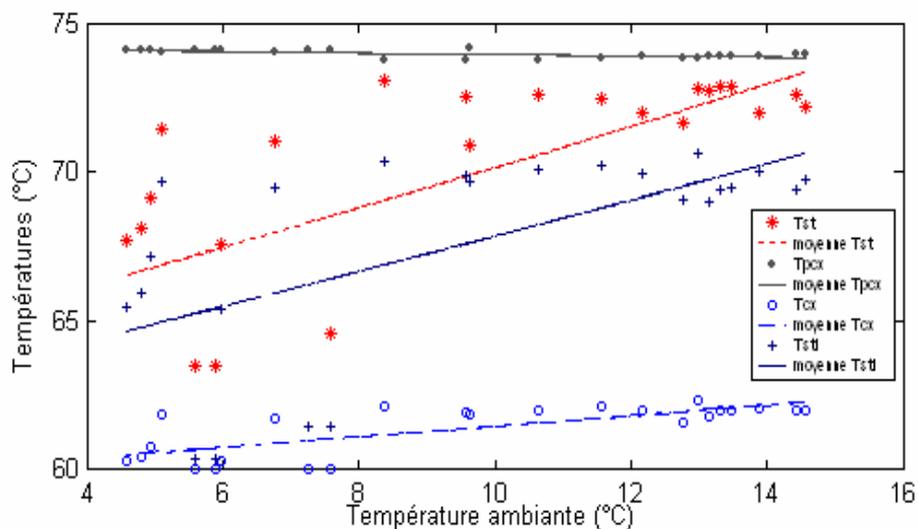


Figure 5.8 : Distributions des températures des différentes boucles du SET en fonction de la température ambiante (saison froide)

Nous remarquons que l'évolution est linéaire, la plus grande pente se trouve au niveau du chauffage de l'espace qui coïncide avec celle du réservoir RST.

Les figures 5.7 et 5.8 montrent que la température critique du RST (T_{ST}) est inférieure à la température critique de la boucle du chauffage thermique de l'espace (T_{STL}) ce qui signifie que le système SET fonctionne dans la condition du cinquième cas du régime chaud, Pour ce cas nous avons un chauffage de l'eau sanitaire et de l'espace à partir du réservoir RST ce qui veut dire que nous n'avons pas besoin d'une résistance supplémentaire pour le chauffage de l'espace pour notre application.

5.3.2.1.2 Variation des pertes

Le tracé de la courbe qui représente les pertes thermiques au niveau du RST est illustré par la figure 5.9 [53].

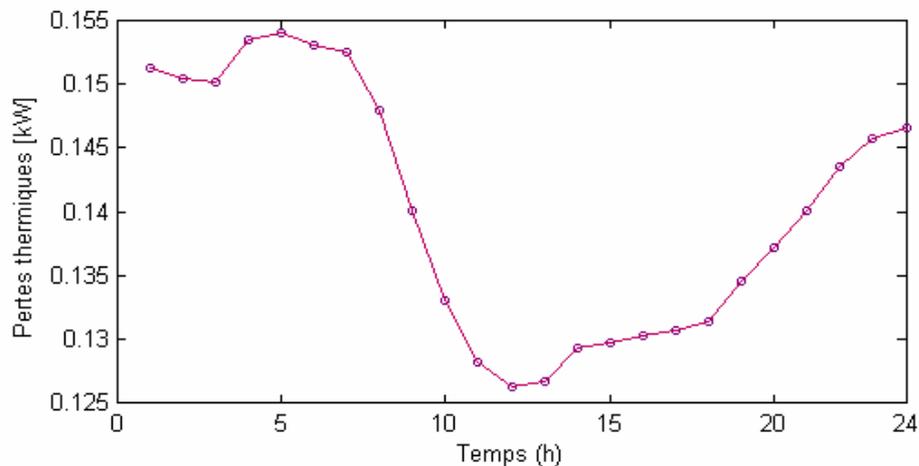


Figure 5.9 : Variation des pertes thermiques au niveau du RST au cours du temps

Les pertes thermiques du RST varient entre 0.13 et 0.16 kW, elles diminuent pendant la journée à cause de l'augmentation de la température ambiante, ce qui peut être expliqué par l'équation (4-77) : lorsque la température ambiante augmente l'échange thermique entre le milieu intérieur du RST (qui est l'eau chaude sanitaire) et le milieu extérieur du RST diminue.

5.3.2.1.3 Energies délivrées par la PEMFCs

Nous avons représenté dans la figure 5.10 la quantité de chaleur produite par la PEMFCs (Q_s) et récupérée par les échangeurs de chaleur, l'énergie électrique délivrée par la PEMFCs en fonction du temps (E_{PC}) ainsi que la quantité de combustible (le CH₄) consommé (F_{PC}) [53].

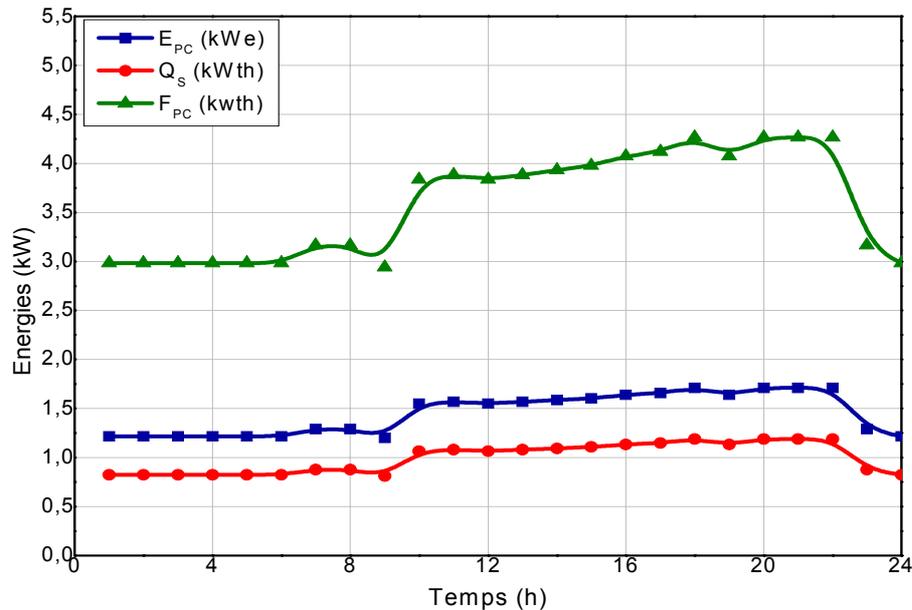


Figure 5.10 : Evolution des énergies produites par la PEMFCs et de la quantité de combustible consommé en fonction du temps (saison froide)

La PEMFCs doit fournir une énergie électrique et thermique suffisantes pour satisfaire aux besoins énergétiques de notre habitation. La figure 5.2 nous montre que de 10h :00 à 22h :00 nous avons un besoin thermique qui peut être largement assuré par notre système SET, par contre pour le reste du temps nous remarquons qu'il y'a une forte consommation en énergie thermique, en le comparant avec le résultats de la simulation, nous remarquons qu'il y'a un manque qui peut être assuré par le stockage thermique pendant les heures où il y'a un excès de l'énergie thermique. Contrairement à l'énergie électrique qui est assuré toute la journée.

A la fin, nous pouvons dire que l'énergie thermique utilisée pour le chauffage de l'eau et de l'espace de l'habitation ainsi que les charges électriques (voir figure 5.2) peuvent être assurés par la PEMFCs.

La figure 5.11 montre l'évolution de la consommation du combustible pour le régime étudié en fonction du temps.

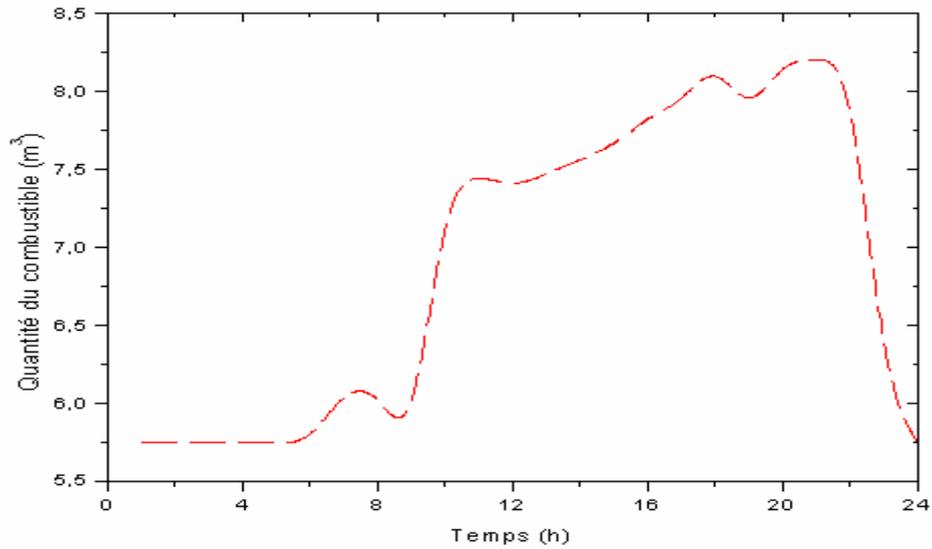


Figure 5.11 : Quantité du combustible (méthane) consommé pour chaque heure (saison froide)

La variation de la quantité du combustible consommé pour le fonctionnement de la PEMFCs dépend de la demande en énergie électrique de l'habitation.

5.3.2.1.5 Rendement de cogénération de la PEMFCs et du SET

Nous avons tracé le rendement de la cogénération de la PEMFCs ainsi que le rendement global de notre système SET appliqué à l'habitation étudiée en fonction du temps pour le régime chaud étudié, les résultats obtenus sont montrés sur la figure 5.12 [53] :

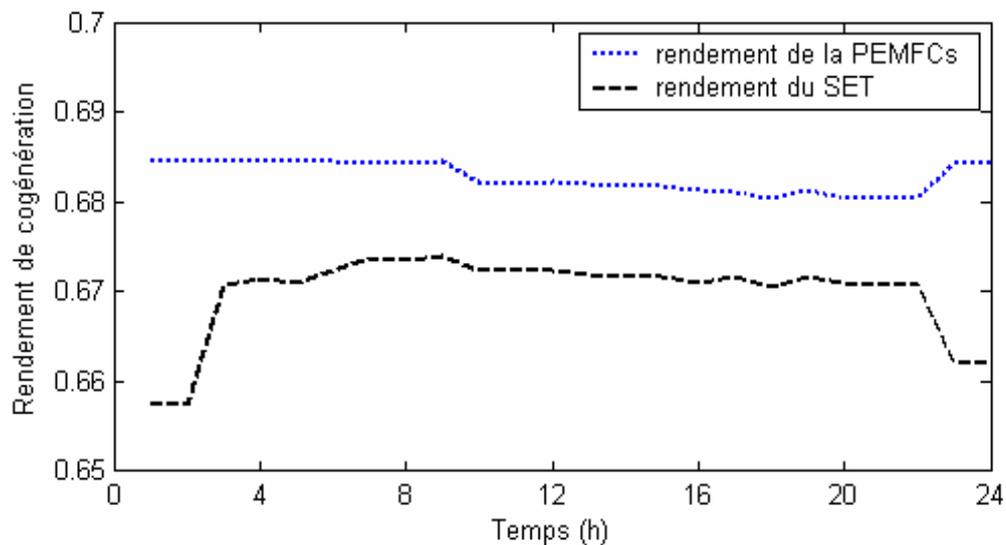


Figure 5.12 : Evolution du rendement de cogénération du SET et de la PEMFCs en fonction du temps (saison froide)

Le rendement de cogénération englobe le rendement thermique et électrique de la PEMFCs, il est de l'ordre de 69 % qui est plus ou moins constant. Le rendement de tout le système SET est inférieur au rendement de la PEMFCs et avoisine les 65%.

5.3.2.2 Simulation du fonctionnement du SET en régime froid

Nous allons présenter les résultats de la simulation du SET pour les différentes données réelles du site considéré (paragraphe 5.2.4).

5.3.2.2.1 Distribution de la température dans les différentes boucles

La figure 5.13 montre les résultats de simulation obtenus pour le régime froid. Dans ce régime nous avons pris en considération seulement une boucle qui est celle de la PEMFCs car nous n'avons pas besoin de chauffage de l'eau ni de l'espace.

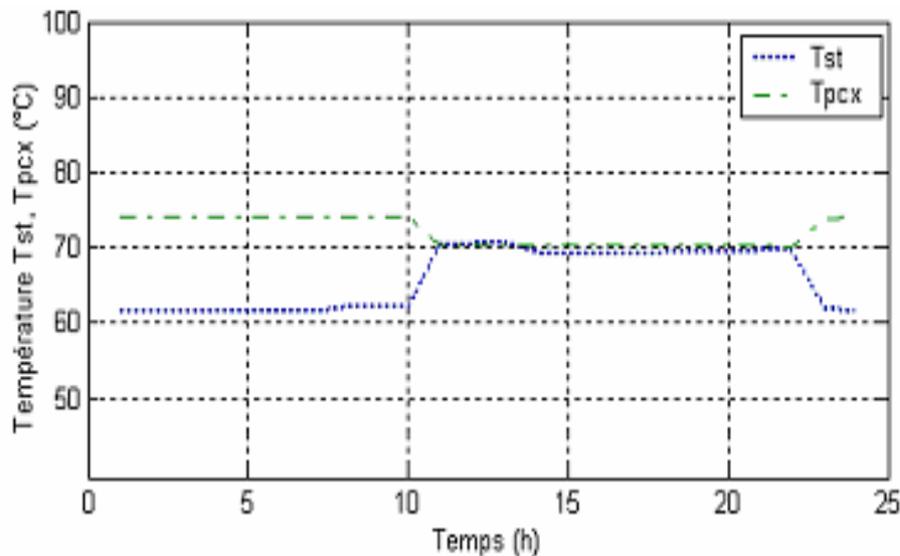


Figure 5.13 : Distributions des températures dans la boucle PEMFCs en fonction du temps (saison chaude)

D'après les données prises en considération nous remarquons dans les résultats de la figure 5.13 que la température du réservoir RST a des variations très considérables. Ces fluctuations ont conduit à un fonctionnement au même temps avec les deux cas du régime froid, du 1h à 11h et de 22h et 00h le fonctionnement du SET est dans le cas 1 du régime froid et de 12h à 22h le SET fonctionne dans la condition du 2^{ème} cas du régime froid qui exprime que la température du RST est supérieure à la température délivré par la PEMFCs ce qui est dû à la quantité de chaleur disponible et qui n'est pas utilisé dans notre cas et qui doit être rejeté à l'environnement.

Dans la figure 5.14 nous avons tracé la variation des températures critiques des différentes boucles et la moyenne de chaque température critique en fonction de la température ambiante.

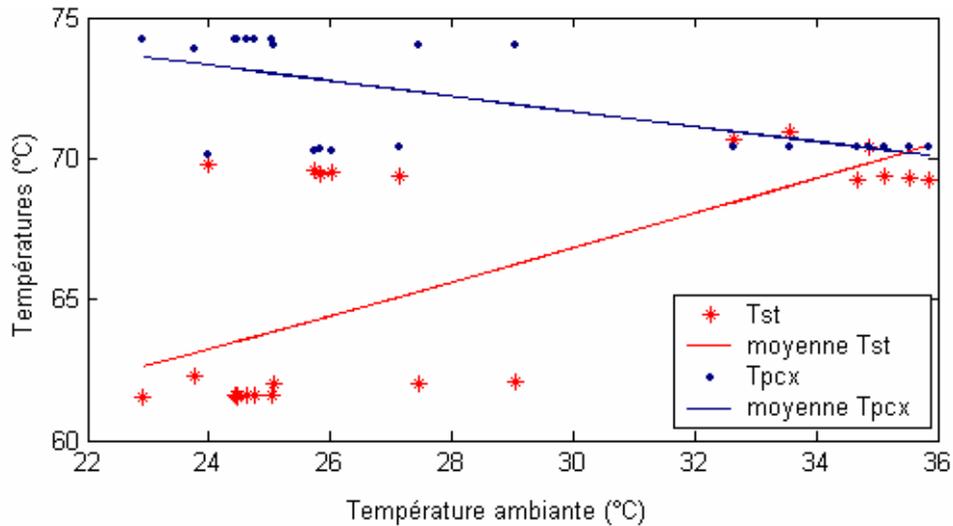


Figure 5.14 : Evolution des températures critiques des différentes boucles en fonction de la température ambiante (saison chaude)

Nous remarquons que l'évolution est linéaire, mais la température disponible pour le chauffage de l'eau et de l'espace n'est pas utilisée. Donc c'est une énergie perdue.

5.3.2.2 Variation des pertes

Le calcul des pertes thermiques au niveau du RST de la figure 5.15 montre qu'elles sont inversement proportionnelles à la variation de la température ambiante.

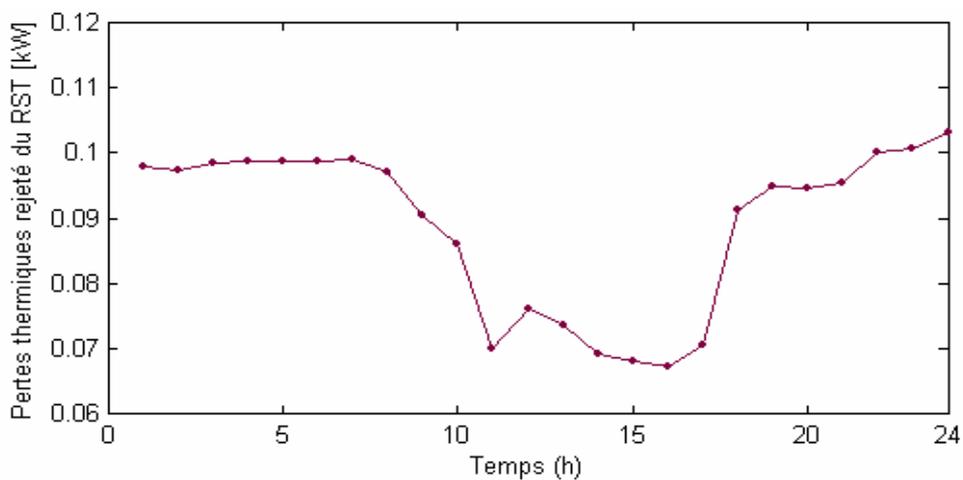


Figure 5.15 : Variation des pertes thermiques au niveau du RST en fonction du temps (saison chaude)

Les pertes thermiques du RST varient entre 0.07 et 0.1 kW, elles diminuent de 11h à 18h pour la raison de l'augmentation de la température ambiante.

5.3.2.2.3 Variation instationnaire de Epc et Fpc

Dans cette partie nous avons tracé l'énergie électrique délivrée et la quantité du combustible consommé par la PEMFCs (figure 5.16).

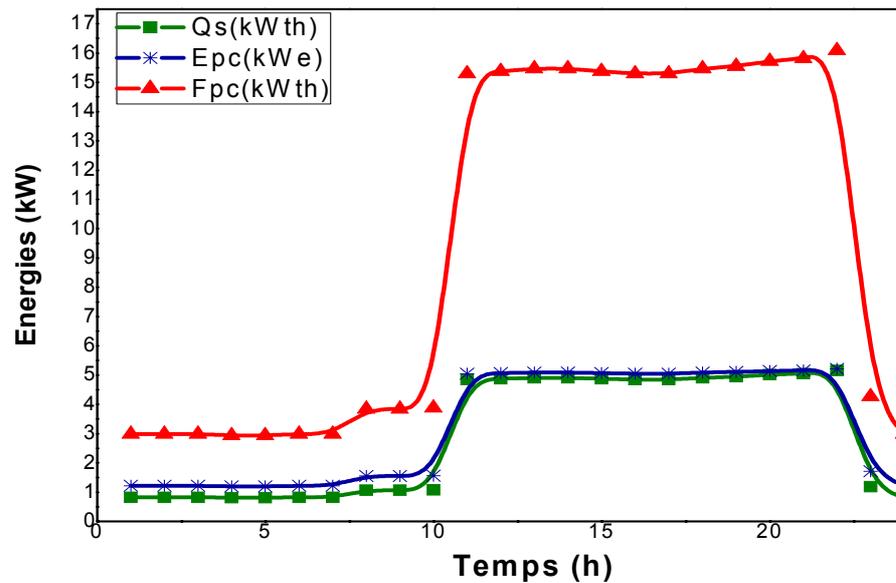


Figure 5.16 : Energie électrique délivré Epc et la quantité du combustible consommé Fpc par la PEMFCs en fonction du temps (saison chaude)

Nous remarquons que l'énergie électrique délivrée Epc est proportionnelle à la chaleur cédée par la PEMFCs \dot{Q}_s , et qui est proportionnelle à la puissance thermique du combustible (CH_4) sollicité. Cette dernière augmente avec l'augmentation de la consommation en énergie et atteint 16 kW pour une énergie électrique délivrée de 5 kW.

La consommation du combustible est illustrée par la figure 5.17. Nous remarquons en premier lieu que la consommation du combustible dans ce régime froid est beaucoup plus grande que celle trouvée dans le régime chaud. Ceci est expliqué par le grand besoin en énergie électrique consommé par la PAC pour le refroidissement de l'espace de l'habitation.

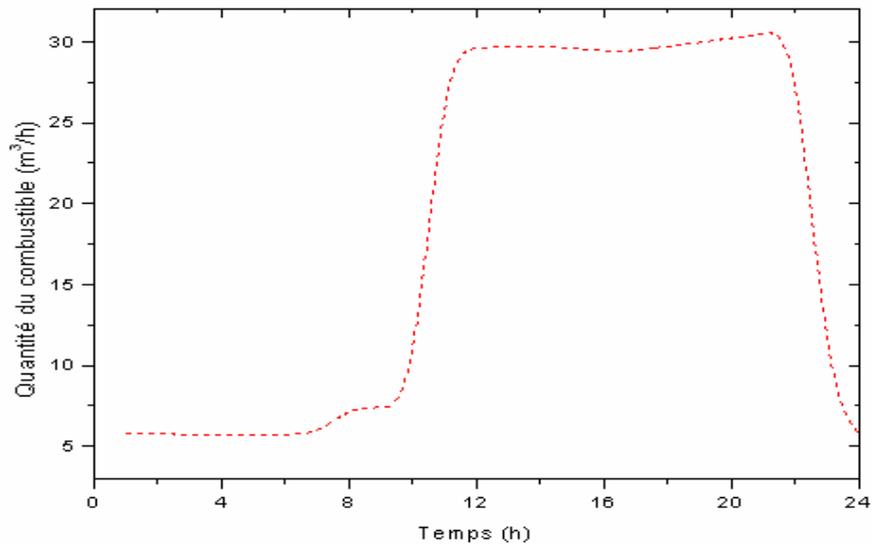


Figure 5.17 : Evolution du débit massique du méthane consommé en fonction du temps (saison chaude)

5.3.2.2.4 Rendement électrique de la PEMFCs

Nous avons tracé (figure 5.18) le rendement électrique de la PEMFCs en fonction du temps, les résultats obtenus sont comme suit :

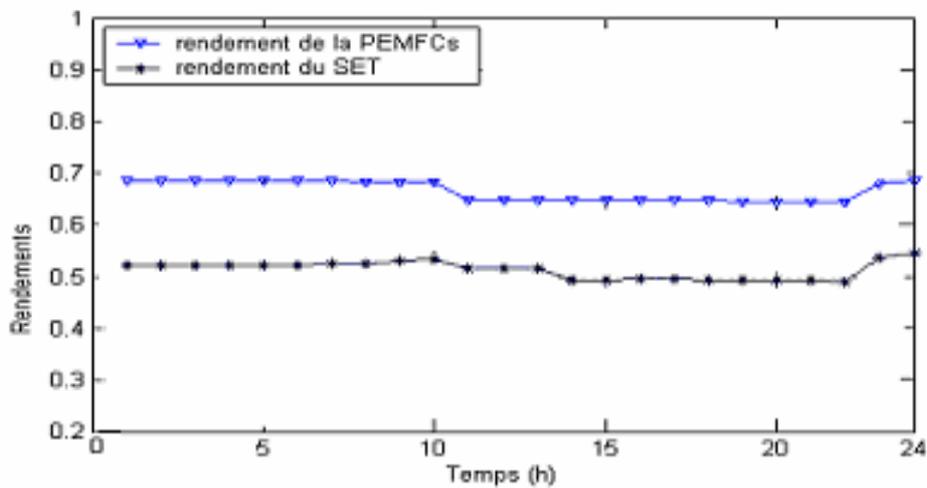


Figure 5.18 : Evolution du rendement de la PEMFCs et du SET en fonction du temps

Le rendement électrique est trouvé égale à 0.69 qui est plus ou moins constant. Nous remarquons que le rendement de la PEMFCs ne change pas pour les deux régimes de fonctionnement. Pour notre application la PEMFCs fonctionne à presque 70%.

Par contre le rendement du SET a chuté par rapport à celui trouvé pour le régime chaud et est trouvé égale à 0.52 qui est plus ou moins constant. Ceci est expliqué par le fait que l'énergie thermique générée par la PEMFCs n'est pas exploitée donc elle est considérée comme des pertes supplémentaires, ce qui a diminué le rendement total du système SET.

6. Comparaison des résultats

La première étape avant toute exploitation et utilisation du code de calcul, est la validation de celui-ci. C'est ainsi que nous avons comparé nos résultats avec ceux issus de la littérature. Nos résultats issus de la simulation numérique ont été comparés à ceux de la référence [52] et ceci pour les deux régimes de fonctionnement (chaud et froid).

A- Régime chaud (Saison froide)

En premier lieu, nous avons comparé l'allure de notre rendement de cogénération de la PEMFCs pour la saison froide en fonction du temps avec celle de la référence [52], comme il est illustré sur la figure (5.19).

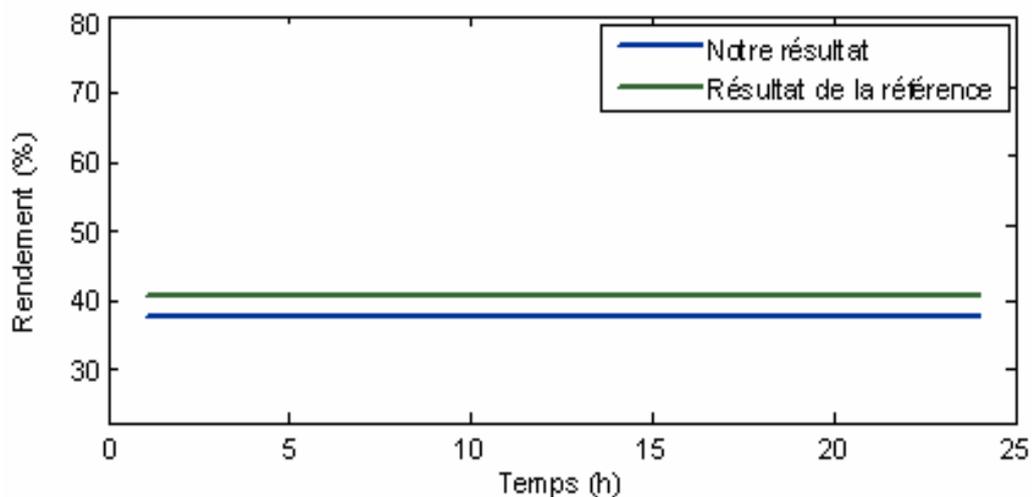


Figure 5.19 : Rendement de cogénération de la PEMFCs en fonction du temps (saison froide)

Nous remarquons une bonne concordance des résultats et de l'allure des graphes. La petite différence est due à la précision de la méthode de résolution des équations qui régissent ce phénomène de transfert thermique.

En second, nous avons comparé l'allure de notre quantité du combustible F_{PC} consommé pour la saison froide en fonction du temps avec celle de la référence, comme il est illustré sur la figure (5.20).

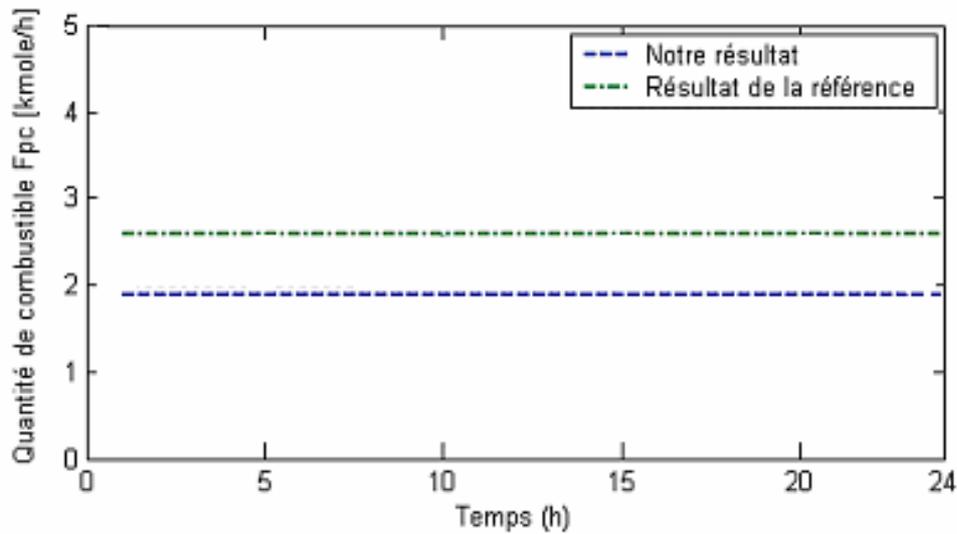


Figure 5.20 : Quantité du combustible F_{PC} consommé en fonction du temps (saison froide)

Nous remarquons qu'il y'a une plus petite consommation du combustible (kmole/h) pour notre simulation en le comparant avec le résultat de la référence, ceci est du aux grandes pertes thermique du RST vers le milieu extérieur c-à-d le choix du volume du RST et de la conductivité thermique du matériau constituant le RST, ainsi au fait de la non prise en compte du terme de la résistance de dégivrage des pâles de la PAC $\dot{E}_{dégivrage}$ qui est ajouté dans l'équation (4-40) qui concerne l'énergie électrique consommée pour le chauffage électrique de l'espace \dot{E}_{CEE} exprimé dans le paragraphe (4.3.2). Une plus grande consommation en énergie électrique mène à une plus grande consommation du combustible et vice versa.

B- Régime froid (Saison chaude) :

Nous avons comparé en premier lieu l'allure de notre rendement de cogénération de la PEMFCs pour la saison chaude en fonction du temps avec celle de la référence [52], comme il est illustré sur la figure (5.21).

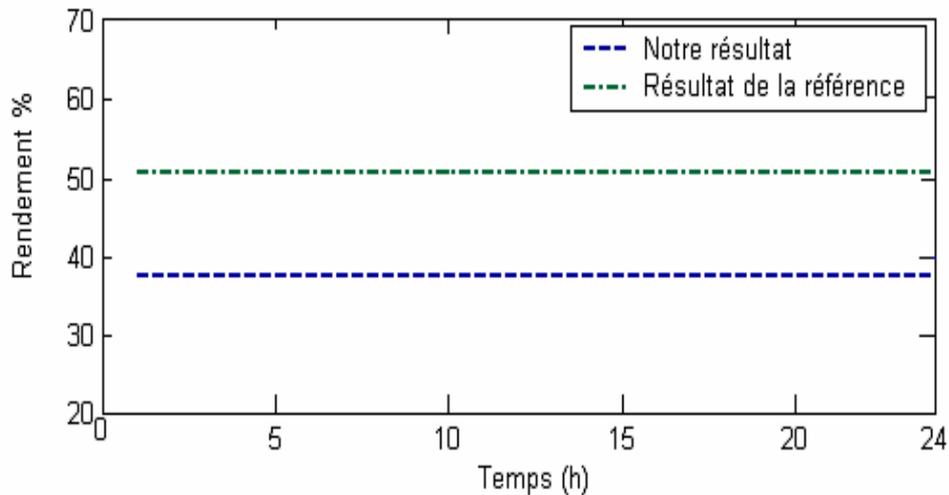


Figure (24) : Rendement de cogénération de la PEMFCs en fonction du temps (saison chaude)

Nous remarquons que le rendement trouvé avec notre modèle mathématique est inférieur au rendement de la PEMFCs trouvé dans la littérature, ceci est dû au fait d'avoir négligé d'utiliser de l'eau chaude dans notre simulation car dans le paragraphe (4.3), en ce qui concerne la saison chaude nous n'avons pas besoin de chauffer ni l'eau sanitaire ni l'espace de l'habitation, donc l'eau chaude provenant du RST n'est pas exploitée d'où la non prise en compte du flux de chaleur transféré du RST à l'eau sanitaire \dot{Q}_{ES} et du flux de chaleur cédé par le chauffage thermique de l'espace \dot{Q}_{CTE} . Par contre le résultat obtenu de la référence est basé sur l'utilisation de ces deux termes, d'où la diminution du rendement de cogénération de la PEMFCs trouvé.

En second lieu nous avons comparé l'allure de notre quantité du combustible F_{PC} consommé pour la saison chaude en fonction du temps avec celle de la référence, comme il est illustré sur la figure (5.22).

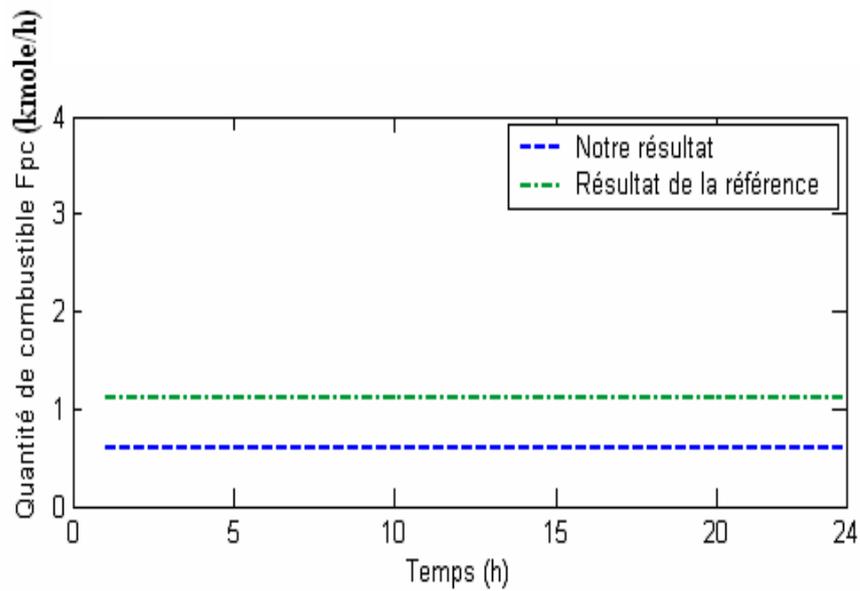


Figure 5.22 : Quantité du combustible F_{PC} consommé en fonction du temps (saison chaude)

Nous remarquons qu'il y'a une plus petite consommation du combustible (kmole/h) pour notre simulation en le comparant avec le résultat de la référence, ceci est expliqué par la non prise en compte du le flux de chaleur transféré du RST à l'eau sanitaire \dot{Q}_{ES} et du flux de chaleur cédé par le chauffage thermique de l'espace \dot{Q}_{CTE} , par contre le résultat obtenu de la référence est basé sur l'utilisation de ces deux termes, d'où la diminution de la consommation en combustible. Une plus grande consommation en énergie thermique mène à une plus grande consommation du combustible et vice versa.

Conclusion générale

L'objectif du présent travail est l'étude d'un système énergétique total (SET) basé sur la technologie PEMFC afin de l'appliquer à une habitation individuelle de 60m² située à Ghardaïa en faisant une simulation numérique pour des données réelles sur site.

Nous avons commencé d'abord par une description de la pile à combustible du type PEMFC et nous avons présenté toutes ses caractéristiques électriques, physiques et thermodynamiques.

Nous avons intégré cette technologie PEMFC dans une conception d'un système qui combine l'énergie électrique et thermique délivrée par la PEMFC stack afin de satisfaire les besoins énergétiques de cette habitation. Le système énergétique total comprend un sous système de production d'énergie électrique et thermique (PEMFCs) qui est alimenté par un combustible (méthane) très abondant dans notre pays. Afin de mieux exploiter cette énergie thermique, nous avons prévu un réservoir de stockage thermique. La conception d'un circuit de circulation du fluide caloporteur assure le chauffage thermique de l'eau et de l'espace.

Les bilans thermiques exposés dans notre système énergétique total SET démontrent les performances de la PEMFCs dans de tels systèmes à la réponse aux besoins énergétiques pour différentes conditions climatiques. L'étude thermique était divisée en deux régimes de fonctionnement le régime froid et le régime chaud, et chacun d'entre eux contient un ou plusieurs cas qui est sélectionné d'après le cahier de charges.

Nous avons simulé numériquement par la suite, le fonctionnement de notre système énergétique total SET pour l'alimentation en énergie électrique et thermique d'une habitation d'une famille individuelle située à la cité résidentielle de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelable de Ghardaïa. La simulation numérique réalisée sous le logiciel MATLAB, nous a permis le tracé de chaque caractéristique thermique en fonction du temps et en fonction de la température du milieu extérieur. Nous avons rajouté à la simulation numérique la possibilité de sélectionner le cas du régime de fonctionnement.

Après avoir analysé les différents cas, nous avons remarqué pour le régime chaud que l'exploitation de l'énergie thermique délivré par la PEMFCs est très efficace mais la production d'énergie thermique à partir de la PEMFCs est beaucoup plus faible par rapport au régime froid (été). Nous soulignons aussi que les pertes thermiques à travers le RST

sont plus élevées par rapport au régime froid, par contre le rendement de la PEMFCs pour les deux régimes n'a pas chuté. Par ailleurs, le rendement de cogénération du SET a chuté considérablement pour le régime froid.

Les résultats de la simulation numérique pour les différents cas des deux régimes de fonctionnement (chaud et froid) dépendent d'une part des conditions climatiques du site de Ghardaïa et d'autre part de la charge électrique et thermique de la maison ainsi que du nombre d'heures de consommation relatif à l'éclairage.

La simulation que nous avons effectuée nous a permis de déterminer les caractéristiques thermiques de tout le système pour les deux régimes de fonctionnement. Nous avons déterminé la variation des températures critiques des trois boucles du système en fonction du temps, les quantités d'énergies transférées de la PEMFCs à la charge ainsi que la quantité du combustible (méthane) consommé pour fournir cette énergie.

Nous avons comparé nos résultats de la simulation numérique avec ceux obtenus dans la littérature et ceci pour les deux régimes de fonctionnement (chaud et froid). En premier lieu, nous avons comparé l'allure du rendement de cogénération de la PEMFCs en fonction du temps, En second lieu, nous avons comparé l'allure de la quantité du combustible F_{PC} consommé en fonction du temps, et nous avons remarqué une bonne concordance des résultats et de l'allure des graphes. Nous pouvons noter que plus la consommation en énergie thermique est grande, plus la consommation du combustible est plus importante et vice versa.

En conclusion, nous pouvons dire que le système énergétique SET est un système prometteur vu ses performances par rapport aux systèmes conventionnels ainsi que sa réponse rapide aux fluctuations des charges, et qu'il est plus rentable en régime chaud (saison froide).

Pour les perspectives, il serait intéressant de développer et de poursuivre l'étude en réalisant un système énergétique total. Nous pouvons aussi concevoir un système totalement écologique et ce si on fait produire de l'hydrogène par voie solaire.

Bibliographies

- [1] **W.Vielstich, A.Lamm, H.Gasteiger.** “*Handbook of Fuel Cells: Fundamentals, Technology, Applications*”. Edition Wiley, 2003.
- [2] **K.Kordesch.** “*Fuel cells and their applications*”. VCH, Germany, 1996.
- [3] <http://www.annso.freesurf.fr/Grove.html>, 2005
- [4] **D.Gie oei.** “*Direct hydrogen fueled proton-exchange-membrane (PEM) fuel cell system for transportation applications*”. Quarterly technical progress report n°1, 1994.
- [5] **Université de technologie de Belfort-Montbéliard.** “*Rapport de synthèse sur les piles à combustibles* ”. Rapport interne, 2002.
- [6] <http://www.ebara.co.jp/en/>, 2005.
- [7] <http://fuelcellsworks.com/>, 2005.
- [8] **K.Kordesch and G.Simader.** “*Fuel Cells and Their Applications*”. VCH Publishers, Inc., New York. 1996.
- [9] <http://www.plugpower.com>, 2005.
- [10] <http://www.annso.freesurf.fr/H2.html>, 2005.
- [11] **David J. Edlund et William A. Pledger.** “*An Integrated Fuel Processor for PEM Fuel Cells*”. Electric Power Research Institute, Portland, 1998.
- [12] **Dr. Joan M. Ogden.** “*Review of small stationary reformers for hydrogen production*”. Rapport de synthèse pour the International Energy Agency Agreement on the Production and Utilization of Hydrogen, Task 16, Hydrogen from Carbon-Containing Materials, 2002.
- [13] **J.H. Hirschenhofer, D.B. Stauffer, R.R. Engleman, and M.G. Klett.** “*Fuel Cell Handbook*”. (fourth Edition), 1998.
- [14] **EG and G Technical Services, Inc, Science Applications International Corporation.** “*Fuel Cell Handbook*”. (Sixth Edition), 2002.

- [15] **M. Weeda.** “*Techno-economique assessment of integrated fuel cell and sorption heat pump systems*”. ECN clean fossil fuels, 2002.
- [16] **S. Higashiguchi, K. Hirai, N. Shinke, S. Ibe, O. Yamazaki, K. Yasuhara, Hamabashiri, Y. Koyama and T. Tabata.** “*Development of Residential PEFC Cogeneration Systems at Osaka Gas*”. Rapports pour Japanese residential market, 2003.
- [17] **M. Rubala.** “*PEM Fuel Cell Demonstration*”. Midpoint Project Status Report, Southern Maryland Electric Cooperative, Inc, 2003.
- [18] **R. J. Braun.** “*Optimal Design and Operation of Solid Oxide Fuel Cell Systems for Small-scale Stationary Applications*”. Thèse de PhD, University of Wisconsin –Madison, 2002.
- [19] **EG et G Technical Services, Inc, Science Applications International Corporation,** “*Fuel Cell Handbook*”. (fifth Edition), 2000.
- [20] **Kyoungsoo. Ro.** “*Two-Loop Controller for Maximizing Performance of a Grid-Connected Photovoltaic-Fuel Cell Hybrid Power Plant*”. Thèse de PhD, Blacksburg, Virginia, USA, 1997.
- [21] **Sukhtej Singh Dhingra.** “*Mixed gas transport study through polymeric membranes: a novel technique*”. Thèse de PhD, Blacksburg, Virginia, USA, 1997.
- [22] **R. Kumar, R. Ahluwalia, E. D. Doss, H.K. Geyer, and M. Krumpelt.** “*Design, Integration, and Trade-Off Analyses of Gasoline-Fueled Polymer Electrolyte Fuel Cell Systems for Transportation*”. Fuel Cell Seminar, Palm Springs, California, USA, 1998.
- [23] **F. Mitlitsky, A. H. Weisberg, and B. Myers.** “*Vehicular hydrogen storage using lightweight tanks (regenerative fuel cell systems)*”. Proceedings of the 1999 U.S DOE Hydrogen Program Review, 1999.
- [24] **M. J. Ogburn.** “*Systems Integration Modeling and Validation of a Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle*”, Master of Science in Mechanical Engineering, Blacksburg, Virginia, USA, 2000.

[25] **Mark William Davis.** *“Development and Evaluation of a Test Apparatus for Fuel Cells”*. Master of Science in Mechanical Engineering, Blacksburg, Virginia, USA, 2000.

[26] **Brandon M. Eaton.** *“One Dimensional Transient Model of Heat, Mass and Charge Transfer in a Proton Exchange Membrane”*. Master of Science in Mechanical Engineering, Blacksburg, Virginia, USA, 2001.

[27] **Eric Kruszewski.** *“Investigation of Graphite Bipolar Plates for PEM Fuel Cell Performance”*. Master of Science in Mechanical Engineering, Blacksburg, Virginia, USA, 2001.

[28] **Galen W. Kulp.** *“A Comparison of Two Air Compressors for PEM Fuel Cell Systems”*. Master of Science in Mechanical Engineering, Blacksburg, Virginia, USA, 2001.

[29] **S. D. Gurski and D. J. Nelson.** *“Cold Start Fuel Economy and Power Limitations for PEM Fuel Cell Vehicle”*. Mechanical Engineering, Virginia Tech Blacksburg VA, 24061, 2003.

[30] **Mehmet Burak Gunes.** *“Investigation of a Fuel Cell Based Total Energy System for Residential Applications”*. Master of Science in Mechanical Engineering, Blacksburg, Virginia, USA, 2001.

[31] **S. Busquet, P. Leroux, D. Mayer, R. Metkemeijer.** *“Stand Alone Power System Coupling a PV Field and a Fuel Cell: Experimental Results of the FC System”*. France-Deutschland Fuel Cell Conference, 2002.

[32] **Koppel, Tom.** *“Powering the Future: The Ballard Fuel Cell and the Race to Change the World”*. Toronto: John Wiley & Sons, 1999.

[33] **Sharon Thomas, Marcia Zalbowitz.** *“Fuel Cells-Green Power”*. Los Alamos National Laboratory in Los Alamos, New Mexico, Publication for Office of Advanced Automotive Technologies, Office of Transportation Technologies , Energy Efficiency and Renewable Energy , U.S. Department of Energy , LA-UR-99-3231. The 3M Foundation

- [34] **John P. Evans.** “ *Experimental Evaluation of the Effect of Inlet Gas Humidification on Fuel Cell Performance*”. Master of Science in Mechanical Engineering, Blacksburg, Virginia, USA, 2003.
- [35] **Vincent Farr.** “*Synthesis and characterization of novel polyimide gas separation membrane material systems*”, Thèse de Phd, Blacksburg, Virginia, USA, 1999.
- [36] <http://www-ipst.u-strasbg.fr/jld/thermo.htm>, 2005.
- [37] **Daniel B. Genevey.** “*Transient Model of Heat, Mass, and Charge Transfer as well as Electrochemistry in the Cathode Catalyst Layer of a PEMFC*”. Master of Science in Mechanical Engineering, Blacksburg, Virginia, USA, 2001.
- [38] **J. Hirschenhofer.** “*Fuel Cell Handbook*”. Forth Edition, Federal Energy Technology Center, US Department of Energy, 1998.
- [39] Jean Jacques Beziau. “ *Systèmes de piles a combustible pour la cogénération état de l’art* ”. Centre d’Energétique de l’Ecole des Mines de Paris, Sophia Antipolis, 1998 .
- [40] **G.Kulp.** “ *Issues in PEM Fuel Cell Air Management*”. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 2001.
- [41] **Peterson, A. J., Perez, R., Bailey, B., Elsholz, K.** “*Operational Experience of a Residential Photovoltaic Hybrid System*”. Solar Energy, 65, Iss. 4, (pp. 227-235), 1999.
- [42] **D. Arthur.** “*Multi-Fuel Reformers for Fuel Cells Used in Transportation*”. Little Report for Department of Energy, Cambridge, MA, 1994.
- [43] **S.C.Arora and S.Domkundwar.** “*A course in Heat and Mass Transfer*”. 3rd édition, Delhi, 1990.
- [44] **Brian J.Newton.** “*Modeling of solar storage tanks*”. Master of Science in Mechanical Engineering, University of Wisconsin-Madison, 1995.
- [45] **Manuel d’instructions.** “*Solar trainer pour pompe à chaleur*”. Electronica Veneta, Italie, mod. STR-814/EV.

[46] **Churchill, S.W.** “*Combined free and forced convection around immersed bodies*”, Hemisphere Handbook of Heat Exchanger Design, G. F. Hewitt, coordinating editor, New York, 1990.

[47] **Farrington, R.B., Bingham, C.E.** “*Testing and Analysis of Immersed Heat Exchangers*”. SERI Report, 1986.

[48] **Farrington, R.B., Bingham, C.E.** “*Testing and Analysis of Load-Side Heat Exchangers for Solar Domestic Hot Water Systems*”. SERI Report, 1987.

[49] **Jonathan J. Giardina.** “*Evaluation of ground coupled heat pumps for the state of Wisconsin*”, Masters of science in Mechanical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia ,1995.

[50] **D. Koussa, M. Alem et M. Belhamel.** “*Système Hybride (Eolien, Solaire) pour l’Alimentation Electrique d’une Charge à usage Domestique*”. Rev, Energ. Ren.: Zones Arides (pp. 1-8), 2002.

[51] <http://www.3m.com/fuelcells>, 2005.

[52] **Nikolaos G. Georgopoulos.** “*Application of a decomposition strategy to the optimal synthesis/design and operation of a fuel cell based total energy system*”. Master of Science in Mechanical Engineering, 2002.

[53] **W.Touafek, S.Larbi.** “*Etude thermique et conception d’un système énergétique à base d’une PEMFC-Application à l’habitat*”. Acceptée pour publication dans les actes au JITH, Tanger, Maroc, 15-17 Novembre 2005.

Annexe A

Les PEMFC

A.1 Les piles à combustibles à membrane échangeuse de proton (PEMFC)

Une pile à combustible est un générateur qui convertit directement l'énergie interne d'un combustible en énergie électrique par un procédé électrochimique contrôlé (figure A.1). Les rendements théoriques attendus sont très élevés, et les sous produits très peu polluants.

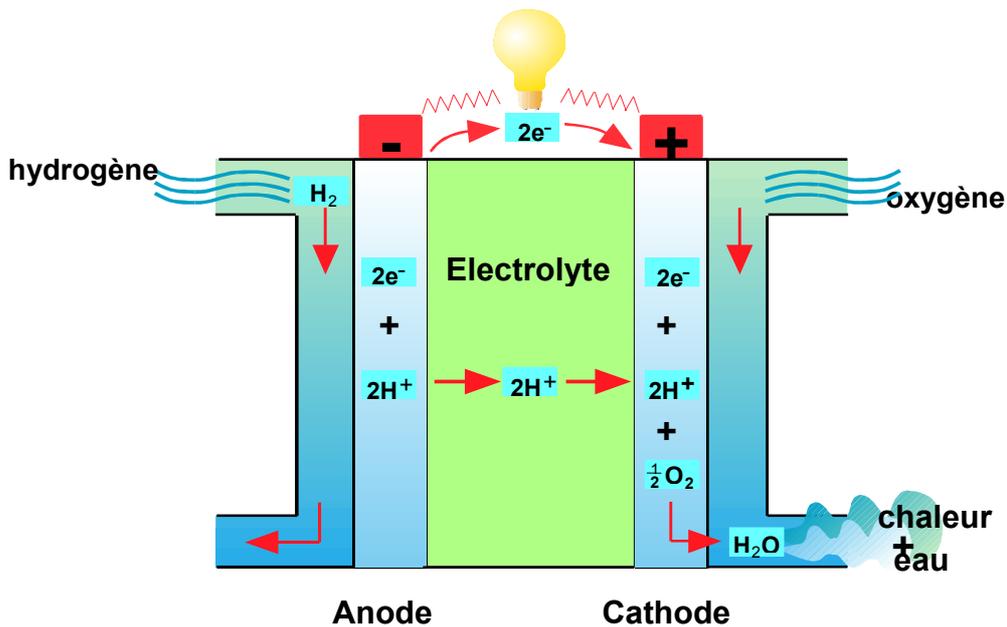


Figure A.1 : Principe de fonctionnement de la PEMFC [32]

Elle met en jeu, sans les mélanger un combustible (hydrogène) et un comburant (l'oxygène).

Le principe de fonctionnement d'une PEMFC peut se résumer comme suit. L'hydrogène introduit à l'anode se dissocie en deux proton H^+ et deux électrons e^- . Les électrons se déplacent vers le circuit extérieur ce qui donne une tension continue (DC) par contre les protons passent à travers l'électrolyte polymère vers la cathode qui est alimentée en oxygène, les électrons reviennent finalement à la cathode qui rencontre les ions H^+ et l'oxygène qui réagissent pour produire de l'eau et de la chaleur. Les phénomènes de transport dans la membrane sont illustrés dans la figure A.2 [26].

Chacun des gaz (hydrogène et oxygène) doit être humidifié afin de garder une bonne hydratation de la membrane pour une bonne conductivité ionique (H^+). Cette dernière est plus élevée lorsque la membrane est entièrement saturée, et ceci offre une basse résistance de la membrane et augmente l'efficacité globale.

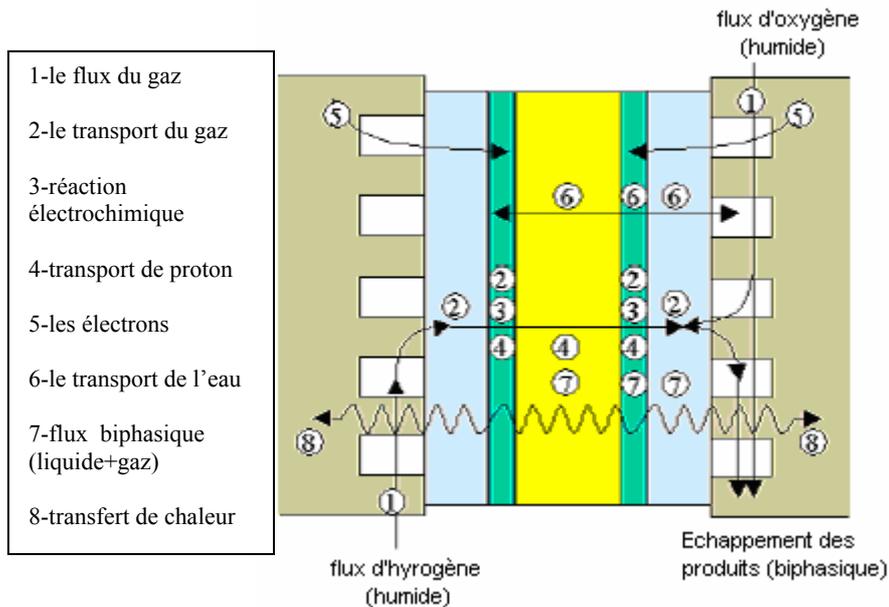


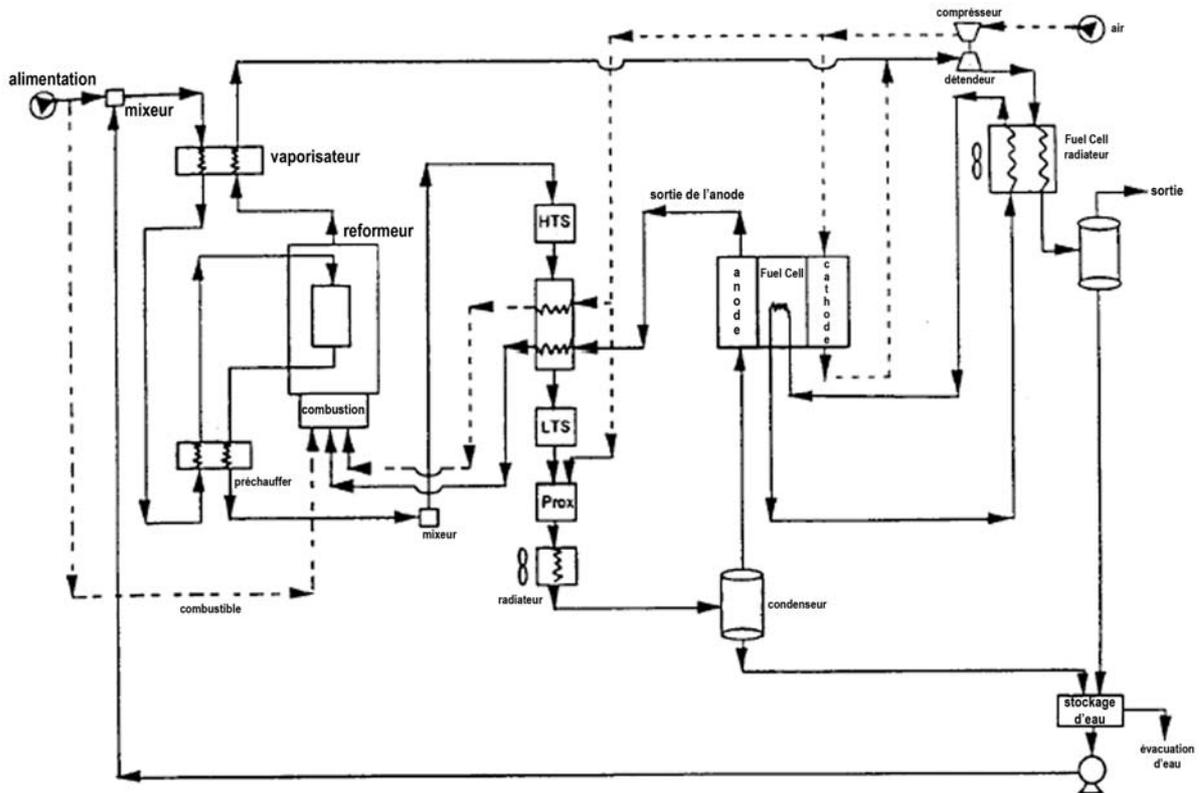
Figure A.2 : Les phénomènes de transport dans la membrane [37]

En résumé, les PEMFC ont de nombreux avantages: outre un rendement pouvant aller jusqu'à 60% pour la pile et 40% pour le système, elles ont des densités de puissance maximales de 1 W/cm^2 .

Elles peuvent fonctionner à charge partielle sans baisse (et même avec une hausse) du rendement. Le fait de fonctionner à faible température permet d'atteindre une température de fonctionnement en quelques minutes, donc un démarrage rapide.

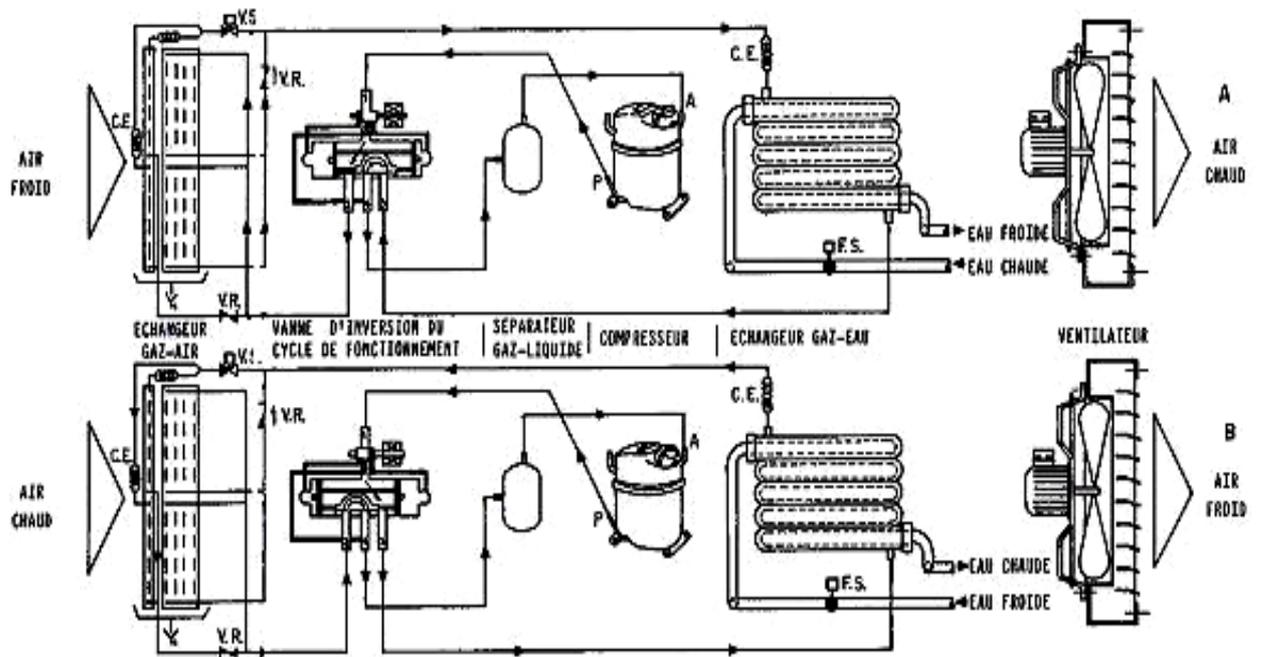
Annexe B

Schéma détaillé d'un PEMFCs [38]



Annexe C

Schéma de Présentation de la PAC dans le mode (A) chauffage et mode (B) refroidissement [44].



Y.R. Soupape de retenue
 Y.S. Vanne électromagnétique

F.S. Flussostat de sécurité
 C.E. Capillaire d'expansion

ملخص:

بطارية الهيدروجين هي جهاز لتوليد الطاقة التي تحول طاقة محروق إلى كهرباء بواسطة عملية أكسدة إرجاع بدون احتراق. إن عملية أكسدة إرجاع التي تحصل داخل PEMFC و التي تؤدي إلى توليد الكهرباء منتجة للحرارة. لإبقاء الجهاز على درجة حرارة مستحبة، نحتاج إلى نظام للتبريد، الطاقة الحرارية الممتصة نستطيع استعمالها في تسخين الماء و البيت. الهدف من عملنا هذا يتمثل في تصميم نظام طاقتي كامل يرتكز على تكنولوجيا PEMFC للإنتاج المترامن للطاقتين الكهربائية و الحرارية ثم تطبيق هذا النظام واستعمالها لمنزل يقع في الجنوب الجزائري.

كلمات مفتاحية: بطارية الهيدروجين, الخزان الحراري, مضخة الحرارة, المنزل, تكييف الهواء.

Résumé :

La pile à combustible est un dispositif de production d'énergie qui convertit l'énergie d'un combustible en électricité par une réaction électrochimique, sans combustion. La réaction électrochimique qui se produit dans le PEMFC permettant la génération d'électricité est exothermique. Pour maintenir l'ensemble du réacteur à une température voulue, un système de refroidissement est nécessaire, le rétablissement de cette énergie peut être exploitée pour chauffer l'eau et l'espace des habitations. L'objectif de notre travail est relatif à la conception d'un système énergétique total basé sur la technologie PEMFC pour la production simultanée d'énergie électrique et thermique et de l'appliquer à une habitation située au sud algérien.

Mots clés : Pile à combustible, réservoir de stockage thermique, pompe à chaleur, habitation, climatisation

Abstract :

The fuel cell subsystem is a device of energy production which converts the energy of a fuel in electricity by an electro-chemical reaction, without combustion. The electro-chemical reaction which occurs in the PEMFC allowing the generation of electricity is exothermic. In order to maintain the whole of the set of the reactor at a desirable temperature, a system of cooling is necessary, the recuperation of this energy can be used to heat the water and the space of the dwellings. The aim of our work is related to the design of an energy system based on the PEMFC technology for the simultaneous production of the electric and the thermal energy and to apply it to a dwelling located in the south of Algeria.

Keys words: Fuel cell, thermal storage tank, heat pump, dwelling, air conditioning