

Conception et construction d'un système de production d'eau chaude sanitaire à énergie renouvelable

par

Fabrice COULIDIATI

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE ÉNERGIES RENOUVELABLES
ET EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE
M. Sc. A.

MONTREAL, LE 09 NOVEMBRE 2022

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés, Fabrice Couliati, 2022

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE OU THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Daniel R. Rousse, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Ricardo Zednik, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Ricardo Izquierdo, membre du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 05 OCTOBRE 2022

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Avant de poursuivre dans cette thèse, j'aimerais prendre le temps d'adresser mes remerciements à l'ensemble des personnes qui m'ont accompagné et soutenu durant cette période de recherche et de rédaction. J'aimerais dire en particulier aux personnes suivantes :

- En un premier temps, je tiens à remercier toute ma famille qui m'a permis faire des études au Canada en 2007 et qui m'a soutenu financièrement jusqu'à l'obtention d'un diplôme et un travail.
- Ma tendre épouse Olga, qui me pousse à l'excellence et m'a permis de me consacrer à mes études de maîtrise pendant que j'étais à temps plein au travail.
- Mon superviseur Daniel Rousse, qui m'a accordé sa confiance et a su me diriger pendant ces deux dernières années
- Hydro-Québec, la compagnie pour laquelle je travaille depuis 7 ans qui m'a libéré du temps au travail et qui m'a soutenu financièrement pour mes études.
- Le Groupe de recherche industrielle en technologies de l'énergie et en efficacité énergétique (t3e) ainsi que mes collègues à la maîtrise et au doctorat.

Conception et construction d'un système de production d'eau chaude sanitaire à énergie renouvelable

Fabrice COULIDIATI

RÉSUMÉ

Dans un souci de réduire l'utilisation des énergies fossiles, ce travail propose un système hybride composé de l'énergie solaire et de la biomasse afin de produire de l'eau chaude sanitaire (ECS) pour une population isolée. Il a été possible de démontrer que les techniques de production d'ECS avec le solaire et la biomasse sont matures et que la mise en place d'un système hybride est possible. De plus, une explication des étapes à suivre afin de concevoir un système hybride solaire et biomasse a été proposée. Le logiciel DH-calc_2-02b a été utilisé afin de prévoir adéquatement le besoin en ECS tout en tenant compte des habitudes de consommation d'eau. Par la suite, le logiciel TRNSYS a servi à la modélisation. Le principe de modélisation consiste à construire un système de production d'ECS fonctionnant avec du solaire thermique tout en ajoutant une chaudière à la biomasse qui va servir de chauffage auxiliaire de l'eau. Pour l'interprétation des résultats, le logiciel Pyscripter a été utilisé. De plus, il a été question de faire la comparaison avec trois études qui traitent de la production ECS avec du solaire. Les comparaisons avec le modèle de ce mémoire se sont faites en fonction de la fraction solaire et ont confirmé le bon fonctionnement du système. Cependant, il reste certains points à explorer comme l'étude de rentabilité du modèle proposé afin de connaître la période de retour sur investissement. Aussi, une étude expérimentale permettrait de comparer les résultats expérimentaux et ceux obtenus par TRNSYS.

Mots-clés : solaire, biomasse, simulation, eau, chaleur

Design and construction of a domestic hot water production system using renewable energy

Fabrice COULIDIATI

ABSTRACT

In order to reduce the use of fossil fuels, a hybrid system made up of solar energy and biomass has been proposed in order to produce domestic hot water (DHW) for an isolated population. It was possible to demonstrate that the techniques of producing DHW with solar and biomass are mature, and that the implementation of a hybrid system is possible. In addition, an explanation of the steps to follow in order to design a solar and biomass hybrid system was proposed. DH-calc_2-02b software was used to adequately forecast the need for DHW while taking into account water consumption habits. Subsequently, the TRNSYS software was used for modelling. The modelling principle is to design a DHW production system operating with thermal solar energy while adding a biomass boiler which will serve as auxiliary water heating. For the interpretation of the results, the Pyscripter software was used. In addition, it was a question of making the comparison with three studies which deal with the production of DHW with solar. The comparisons with the model of this master's thesis were made according to the solar fraction and confirmed the correct functioning of the system. On the other hand, there are some points to explore such as the profitability study of the proposed model in order to know the period of return on investment. Also, an experimental study would make it possible to compare the experimental results and those obtained by TRNSYS.

Keywords: solar, biomass, simulation, water, heat

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
 CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	 3
1.1 Exigences techniques et sanitaires pour la production d'eau chaude	3
1.1.1 Estimation de la consommation en eau chaude	3
1.1.2 Exigence sanitaire: Problèmes de légionellose dans les installations d'eau chaude sanitaires	4
1.2 Production d'eau chaude sanitaire avec le solaire thermique	7
1.2.1 Production d'eau chaude sanitaire (ECS)	10
1.2.2 Les capteurs solaires	16
1.2.2.1 Capteurs Plans.....	16
1.2.2.2 Capteurs à tube sous vide.....	19
1.2.3 Le système de stockage.....	28
1.2.4 Le système d'appoint	28
1.3 Récents développements en chauffage solaire de l'ECS	30
1.4 Production d'eau chaude sanitaire avec la biomasse	35
1.4.1 Choix du combustible	38
1.4.2 Performances des chaudières à granules.....	40
1.5 Récents développements en chauffage de l'ECS à la biomasse	42
1.6 Production d'eau chaude sanitaire en combinant solaire et biomasse	46
1.7 Conclusion	53
 CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE.....	 55
2.1 Localisation géographique	55
2.2 Le profil de puisage	55
2.3 La consommation d'ECS en terme énergétique.....	59
2.4 Le Type de collecteur.....	60
2.5 Le système auxiliaire	62
2.6 Le ballon de stockage.....	63
2.7 Le système de production d'ECS.....	64
2.8 Indicateur de performance du système	65
2.9 Modélisation du système de production d'ECS dans TRNSYS	68
 CHAPITRE 3 SIMULATION ET COMPARAISON AUX ÉTUDES EXISTANTES ...	 71
3.1 Comparaison des résultats avec le projet d'installation en eau chaude sanitaire à l'école supérieure de technologie Fès	71
3.1.1 Étude de sensibilité comparative sur la variation des angles du capteur ..	73

3.2	Comparaison des résultats avec le projet de dimensionnement réalisé en Algérie.....	75
3.2.1	Étude de sensibilité comparative sur la variation des capteurs.....	76
3.3	Comparaison avec le dimensionnement hybride solaire tiré du task 26	78
3.3.1	Étude de sensibilité comparative sur la variation de la surface des capteurs	79
CONCLUSION.....		85
ANNEXE I	DESCRIPTION DU TRANSFERT D'ÉNERGIE À L'INTÉRIEUR DU CAPTEUR.....	89
ANNEXE II	SYSTÈMES DE STOCKAGE	93
ANNEXE III	PARAMÈTRE CAPTEURS ÉTUDE COMPARATIVE RÉALISÉE EN ALGÉRIE	97
ANNEXE IV	ALGORITHME CALCUL FRACTION SOLAIRE PYSCRIPTER	99
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		101

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1-1 Comparatif de prix selon divers combustibles Tirée de Guillemette Énergies (2011).....	37
Tableau 1-2 Type de combustible vs Pouvoir Calorifique Tirée de Guillemette Énergies (2011).....	39
Tableau 1-3 Granules de bois versus les bûches Tirée de Guillemette Énergies (2011).....	40
Tableau 1-4 Exemple d'informations techniques chaudières à la biomasse.....	41
Tableau 2-1 Hypothèse de profil de consommation ECS en considérant les vacances et une consommation d'eau de 200 L/ jour..	56
Tableau 2-2 Réparation de consommation ECS selon les données de base du logiciel DH-calc_2-02b.....	57
Tableau 2-3 Ratio de consommation selon le volume du logiciel DHW.CAL.....	57
Tableau 2-4 Informations relatives aux performances d'un capteur.....	62
Tableau 3-1 Les principales informations du projet de Fès	72
Tableau 3-2 Paramètre du capteur et du ballon thermiques	72
Tableau 3-3 Comparaison des résultats de simulation avec une pente de 40	73
Tableau 3-4 Comparaison des résultats de fractions solaires obtenus à la suite de la variation de l'angle d'inclinaison du capteur	74

Tableau 3-5	Étude de sensibilité sur la variation de la taille des capteurs.....	74
Tableau 3-6	Informations sur le projet de la ville Tamanrasset.....	76
Tableau 3-7	Comparaison des résultats de simulation avec une pente de capteur de 42°	77
Tableau 3-8	Comparaison des résultats de fractions solaires obtenus à la suite de la variation de la pente des capteurs	77
Tableau 3-9	Informations sur le projet de la ville Zurich	78
Tableau 3-10	Performances du capteur utilisé dans TNSYS	78
Tableau 3-11	Paramètres du tank de stockage type 140 dans TRNSYS.....	78
Tableau 3-12	Observation des résultats de fractions solaires obtenus à la suite de la variation de l'angle d'inclinaison du capteur pour deux paramètres de performance	79

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 0-1 Les énergies renouvelables au développement durable Tirée de IRENA (2017)	1
Figure 1-1 Conditions de vie et de développement de la légionelle Tirée de Jean Louis Busquet (2002)	6
Figure 1-2 Évolution de la capacité mondiale des collecteurs solaires produisant de l'eau chaude Tirée de REN21 Members (2020).....	8
Figure 1-3 Régions propices à l'installation de centrales solaires Tirée de Solar Millennium AG (2009).....	9
Figure 1-4 Principe de fonctionnement eau chaude sanitaire Tirée de Énergie Plus (2010)	11
Figure 1-5 Système à boucle fermée(gauche) et ouverte (droit) Tirée de Lane (2004).....	12
Figure 1-6 Système pressurisé Tirée de Lane (2004)	13
Figure 1-7 Système de retour par gravité « Drainback » Tirée de Lane (2004).....	14
Figure 1-8 Système passif à thermosiphon Tirée de Lane (2004)	15
Figure 1-9 Capteur opaque Tirée de Énergie Plus (2010)	17
Figure 1-10 Capteur plan vitré Tirée de Énergie Plus (2010)	18

Figure 1-11	Les tubes sous vide avec absorbeurs sur ailette en cuivre Tirée de Énergie Plus (2010)	21
Figure 1-12	Les tubes sous vide avec absorbeurs sur support en verre Tirée de Énergie Plus (2010)	23
Figure 1-13	Configurations du branchement des capteurs Tirée de Énergie Plus (2010)	25
Figure 1-14	Rendement différent type de capteurs selon la température Tirée de Lamarche (2020).....	27
Figure 1-15	Systèmes d'appoints de production d'eau chaude sanitaire Tirée de Énergie Plus (2010)	29
Figure 1-16	Consommation de biocarburants par secteurs d'activité Tirée de REN21 Members (2020).....	36
Figure 2-1	Exemple du profil de consommation d'une maison quatre habitants.....	58
Figure 2-2	Système de production d'ECS avec Solaire bilan énergétique	65
Figure 2-3	Schéma de la simulation solaire et à la biomasse dans le logiciel TRNSYS	70

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ECS	Eau chaude sanitaire
AIE	Agence Internationale de l'Énergie
PEX	Polyéthylène
CES	Chauffe-eau solaire
CSP	Concertante Solar Power
LCS	Life-cycle saving
PBP	Payback period
VAN	Valeur Actualisée Nette
TRI	Taux de retour sur investissement
IAM	Coefficient de modification d'incidence

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

q	Taux de transfert de chaleur, [W]
h	Enthalpie, [kJ/kg]
W	Puissance électrique, [W]
T	Température, [K]
P	Pression, [kPa]
R	Rayon, [m]
c_p	Chaleur massique ou spécifique du fluide [kJ/kg/K]

Lettres grecques

Φ	Latitude du lieu, [°]
θ	Angle d'incidence du rayonnement solaire sur une surface quelconque [°]
ω	Angle horaire, [°]
Υ	Angle d'azimut, [°]
G_{sc}	Radiation solaire moyenne hors atmosphère, [1367 W/m ²]
G_{on}	Radiation solaire hors atmosphère en fonction du jour de l'année [W/m ²]
δ	Déclinaison solaire, [°]
E	Équation du temps, [Minutes]
T_s	Temps solaire, [Minutes]
I_o	L'irradiation solaire extra-terrestre sur un plan horizontal par heure, [J/m ² hr]
H_o	L'irradiation solaire extra-terrestre sur un plan horizontal par jour, [J/m ² jr]
I_T	L'irradiation solaire totale, [W/m ²]
θ_z	Angle de zénith [°]
ρ_g	Albédo [-]

ρ	Masse volumique, [kg/m ³]
α	Absorptivité au rayonnement solaire, [-]
α_v	Coefficient d'absorption de la vitre, [-]
ρ_v	Coefficient de réflexion de la vitre, [-]
τ	Coefficient de transmission de la vitre, [-]
$(\tau\alpha)$	Portion de la radiation absorbée, [-]
S	Radiation absorbée [W/m ²]
β	Inclinaison d'un capteur solaire [°]
q''_u	Énergie utile [W/m ²]
ΔT	Différence de température entre entrée et sortie du milieu de stockage [K]

INTRODUCTION

La contribution des énergies renouvelables est primordiale à la réalisation des objectifs de développement durable. Les énergies renouvelables créent les conditions favorables au développement humain en facilitant l'accès aux services de base, en améliorant la santé publique et en augmentant les revenus et la productivité (IEA-Pvp, 2020). La Figure 0-1 présente comment les énergies renouvelables soutiennent l'ensemble des objectifs de développement durable.

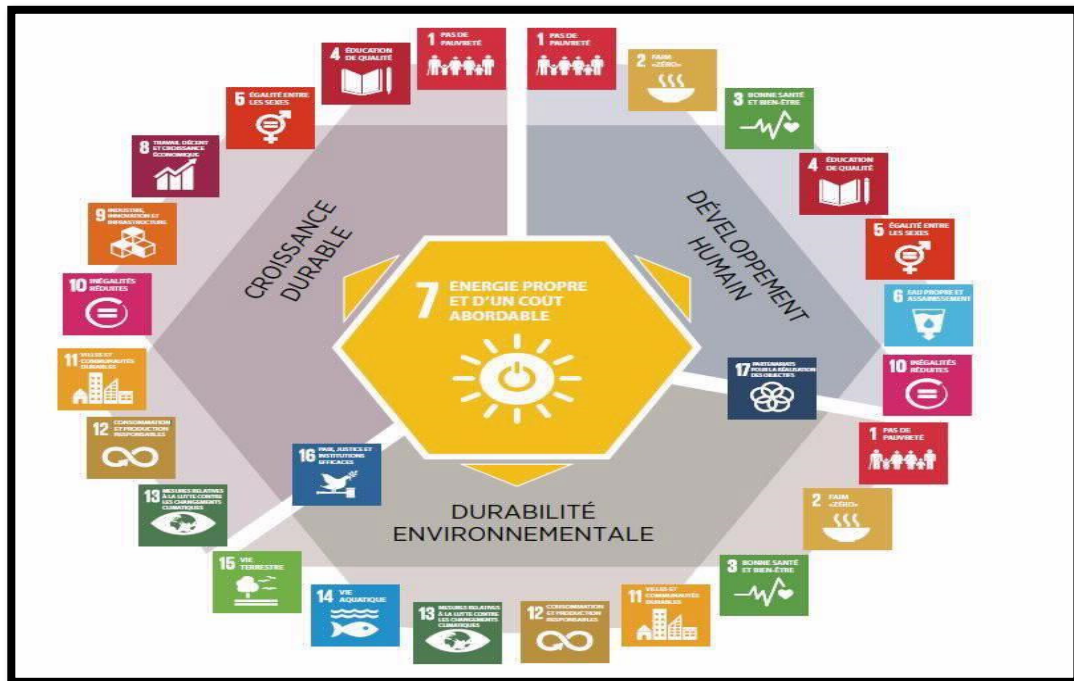


Figure 0-1 Les énergies renouvelables au développement durable
Tirée de IRENA (2017)

L'utilisation des énergies renouvelables pour la production d'eau chaude sanitaire permet de répondre aux besoins d'assainissement des eaux, de confort et d'hygiène de l'être humain. Il est primordial de mettre en place des systèmes durables et abordables pour les populations les moins privilégiées de la planète.

Objectifs de recherche

Cette étude a pour objectif de concevoir et simuler un système mixte qui utilisera deux énergies renouvelables biomasse et solaire dans le but de fournir de l'eau chaude sanitaire à un foyer. Lors de ce mémoire, il sera question de modéliser un système de production d'eau chaude sanitaire en se basant sur les données météo et sur la consommation de la population. Pour cela, une analyse des besoins de la population sera effectuée. Le but est d'utiliser les ressources énergétiques présentes dans la région afin d'éliminer l'utilisation des énergies fossiles de la population et de permettre à plus long terme d'éviter la prolifération des gaz à effet de serre.

Dans le but d'atteindre l'objectif de ce mémoire, les premières étapes seront de calculer la demande en Eau chaude sanitaire (ECS) de la population. Pour cette étape, un logiciel d'estimation de consommation en ECS du nom de DH-calc_2-02b sera utilisé. De plus, il sera question de concevoir le système qui va servir à produire l'eau chaude sanitaire à l'aide du logiciel de simulation des systèmes solaires thermique TRNSYS 18. Par la suite, une analyse de sensibilité sera réalisée afin de déterminer la quantité d'énergie solaire utilisée par le système ainsi que les limites d'hypothèses émises. Enfin, une analyse des résultats et une discussion vont permettre de ressortir les principaux constats et émettre des recommandations.

Contenu du mémoire de recherche

Le mémoire sera subdivisé en trois grandes parties: *Au chapitre 1*, la revue de littérature permet de ressortir les exigences techniques et sanitaires de sujet de l'étude et de donner la maturité des différents systèmes de production d'ECS utilisant le solaire ou la biomasse. *Au chapitre 2*, la conception du modèle permet de donner les équations mathématiques qui seront utilisées pour le calcul de la performance du système et de définir les composantes du système. *Au chapitre 3*, la discussion des résultats de l'étude comparative qui va permettre d'établir les limites de notre étude et des recommandations pour une meilleure conception de systèmes hybrides solaires et biomasse.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre commence par présenter les exigences techniques et sanitaires requises pour la production d'eau chaude. L'emphasis porte sur la consommation et sur les dangers que représente la légionellose. La seconde section présente exhaustivement les technologies de chauffage solaire de l'eau sanitaire. Cette section se termine par la discussion de quelques études scientifiques récentes sur ce sujet. Similairement, la 3^e section s'attarde à présenter les technologies de chauffage de l'eau chaude sanitaire à la biomasse. Elle se termine aussi par la discussion de quelques études scientifiques récentes. Enfin, la dernière section présente une courte revue de récents articles qui étudient les deux moyens de chauffage simultanément.

1.1 Exigences techniques et sanitaires pour la production d'eau chaude

1.1.1 Estimation de la consommation en eau chaude

Pour concevoir un système de production d'eau chaude sanitaire, selon le fabricant de systèmes de chauffage Atlantic (Chauffage Atlantic, 2020), il faut tenir compte des paramètres suivants concernant le nombre de personnes et le profil de la personne :

1. Un adulte : 50 à 80 litres;
2. Un adulte et un enfant : de 75 à 105 litres;
3. Deux adultes : de 100 à 160 litres;
4. Deux adultes et un enfant : de 150 à 190 litres;
5. Deux adultes et deux enfants : environ 200 litres;

Deux adultes et trois enfants : environ 250 litres.

Les habitudes de consommation : une personne consomme en moyenne 60 l d'eau par douche soit 6 l/min. Cette consommation peut varier en fonction du temps de puisage. Dans

certains cas, les habitants d'un logement peuvent prendre un bain, ce qui entraîne une consommation d'environ 9 l/min.

Les équipements du logement : le nombre d'équipements qui consomment de l'eau chaude. Des équipements tels une piscine, un système de chauffage à eau, le type de chauffe-eau, etc.

La région : les régions nordiques versus les régions plus chaudes. Les populations qui disposent d'équipements plus modernes versus les populations qui utilisent encore des systèmes rudimentaires.

La présence dans la maison : une résidence secondaire consomme naturellement moins qu'une résidence principale. Les personnes qui sont présentes dans leur logement toute la journée consomment plus que celles qui sont à l'extérieur toute la journée.

Logiciels de calcul : Il existe des logiciels qui permettent d'estimer le profil de consommation d'eau chaude sanitaire pour un usage domestique. Dans le cadre de cette recherche, le logiciel DH-calc_2-02b sera utilisé. Ce logiciel, mis au point par l'université Kassel en Allemagne, permet de générer le profil de consommation en se basant sur une fonction de Gauss pour le calcul des probabilités de débit.

1.1.2 Exigence sanitaire: Problèmes de légionellose dans les installations d'eau chaude sanitaires

La légionellose est une maladie causée par une bactérie appelée *Legionella pneumophila*. Il existe deux formes cliniques de légionellose. La forme bénigne s'appelle la « fièvre de

Pontiac ». Elle se caractérise par des symptômes de fièvre et de toux qui ressemblent à ceux de la grippe. Elle se manifeste généralement de 1 à 2 jours après l'exposition à la bactérie. La légionellose prend habituellement de 2 à 5 jours pour guérir, sans nécessiter de traitement dans la plupart des cas. La forme la plus grave de la légionellose, la maladie du légionnaire, se caractérise par une infection pulmonaire, la pneumonie. Elle se manifeste généralement de 2 à 10 jours après l'exposition à la bactérie et peut être sévère, surtout chez les personnes vulnérables.

La maladie est soumise à la déclaration obligatoire depuis 1986. Les principales sources de contamination sont les suivantes :

1. Les systèmes de distribution d'eau chaude, tels que les chauffe-eau et les douches;
2. Les tours de refroidissement à l'eau;
3. Les spas, les bains à remous ou les jacuzzis;
4. Les fontaines et les jeux décoratifs;
5. Certains appareils et certaines pièces d'équipement de soins, comme les appareils de thérapie respiratoire et les appareils utilisés pour les soins dentaires.

Étant donné que la bactérie évolue naturellement dans l'eau, les systèmes d'eau chaude sanitaire ne sont pas épargnés. Le comportement de la bactérie varie en fonction de la température de l'eau.

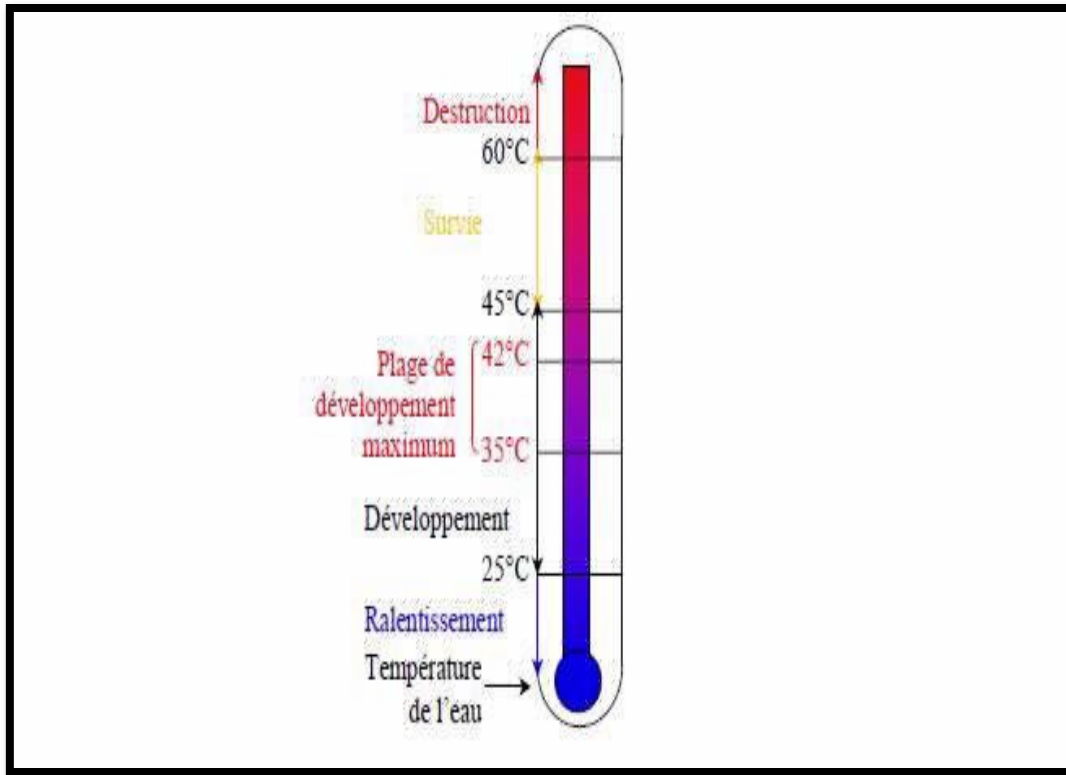


Figure 1-1 Conditions de vie et de développement de la légionelle
Tirée de Jean Louis Busquet (2002)

Au regard de la Figure 1-1, il est possible de constater les points suivants :

1. Entre 0 et 25 °C le ralentissement de la bactérie;
2. Entre 25 °C et 45 °C, la bactérie entre dans sa plage de développement maximale de prolifération dans les eaux stagnantes;
3. À 50°C, la croissance de la bactérie est stoppée, mais la bactérie survit jusqu'à 55°C;
4. La température de destruction de la bactérie se produit au-dessus de 60°C et cela prend 32 min;
5. Lorsque la température de l'eau monte au-dessus de 66°C la destruction de la bactérie se fait en 2 min et au-dessus de 70°C la bactérie est détruite en 1 min.

Pour éviter la prolifération de la bactérie, il faut respecter les recommandations suivantes :

1. S'assurer qu'un système ne comporte pas de zones où l'eau stagne, se refroidit et où les dépôts s'accumulent;
2. Assurer une montée en température quotidienne de tout le volume à 60°C et maintenir la température afin d'éviter la multiplication de la bactérie;
3. Avoir un système d'entretien et de vidange.

Il faudra donc tenir compte de l'aspect sanitaire lors de la conception du système de production d'ECS.

1.2 Production d'eau chaude sanitaire avec le solaire thermique

Énergie propre et verte, l'énergie solaire présente également des avantages environnementaux. Non seulement elle est renouvelable à l'infini, mais elle n'émet aucun gaz à effet de serre qui change le climat. De plus, l'énergie solaire ne crée aucune pollution de l'air ou de l'eau, a peu d'impact sur la terre, la faune ou les écosystèmes et ne laisse aucun déchet dangereux (Canadian Solar Industries Association, 2010). Avec la baisse du prix des installations photovoltaïques et solaire thermique, il y a augmentation de la demande de ces deux

technologies.

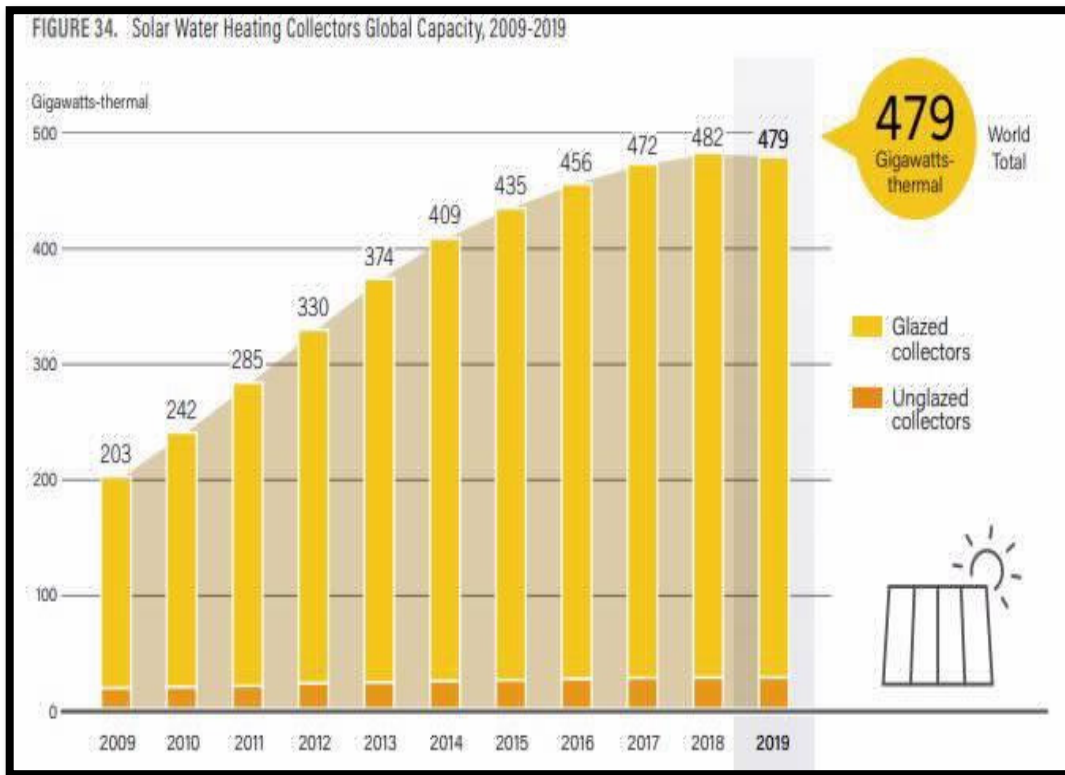


Figure 1-2 Évolution de la capacité mondiale des collecteurs solaires produisant de l'eau chaude
Tirée de REN21 Members (2020)

Selon la Figure 1-2, il est possible de constater l'évolution des installations solaires thermiques depuis les dix dernières années. Il est possible de constater la première baisse depuis les dix dernières années de 1% entre 2018 et 2019 de la capacité solaire thermique. La puissance installée a doublé pour les collecteurs vitrés tandis que l'évolution est plus ou moins stable pour les autres types de collecteurs. La Chine est restée le plus grand marché au monde avec 69% des systèmes solaires thermiques installés suivi de loin pas les États-Unis, la Turquie, l'Allemagne et le Brésil (REN21 Members, 2020). Cela permet aussi de penser que plus il y a des installations dans le monde, plus l'économie d'échelle se fera sentir et plus les technologies solaires thermiques prennent de la maturité.

Certaines régions du monde sont propices à l'installation de systèmes solaires thermiques comme le présente la Figure 1-3. Il est possible de remarquer que sur tous les continents il y a un potentiel solaire thermique qui va du non approprié à excellent. Il est aussi intéressant de constater que plusieurs régions en Afrique, ayant un faible taux d'électrification, disposent d'un potentiel solaire excellent. Cela amène à faire un lien avec la Figure 0-1 qui montre comment les énergies renouvelables peuvent contribuer au développement humain et comment certaines régions disposent des ressources de façon naturelle, mais n'arrive pas à s'en servir dans leurs besoins quotidiens. Il est donc important d'utiliser l'énergie solaire pour les besoins courants de la population.

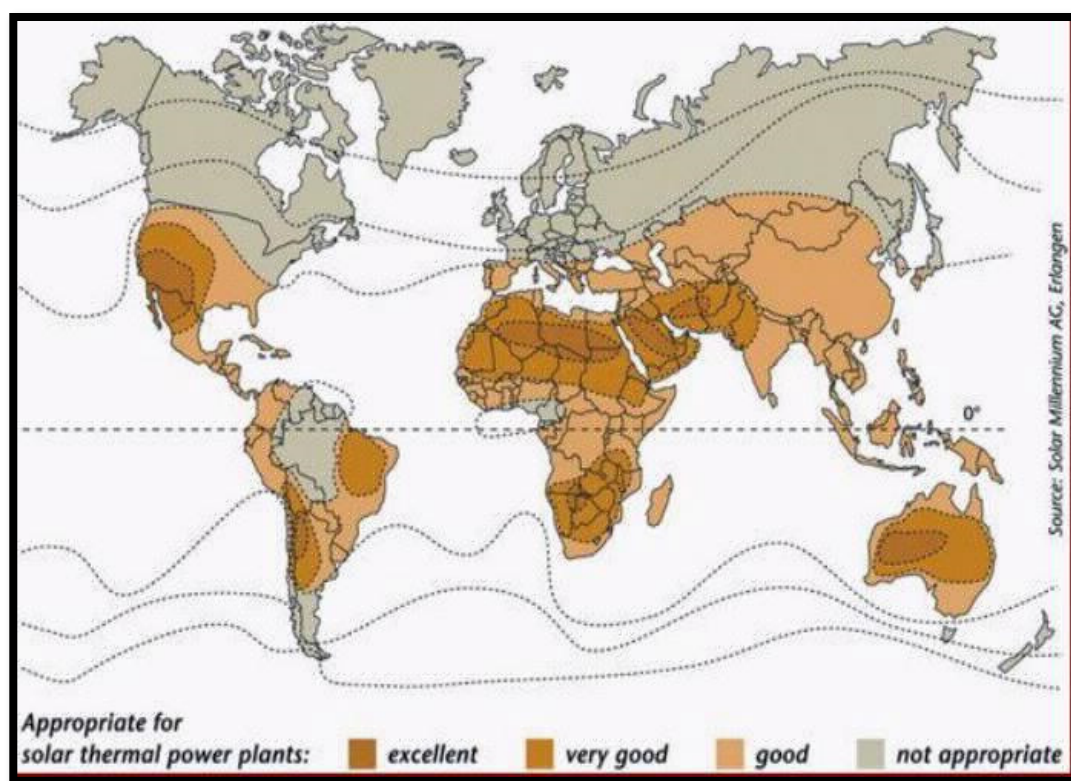


Figure 1-3 Régions propices à l'installation de centrales solaires
Tirée de Solar Millennium AG (2009)

1.2.1 Production d'eau chaude sanitaire (ECS)

Pour produire de l'eau chaude sanitaire avec de l'énergie solaire, il faut un système composé de quatre composantes : Le système de charge, le système de stockage, le système d'appoint et le système de décharge.

La couverture solaire doit être en mesure de répondre aux besoins de la population cible. De plus, le système de production doit être conçu de sorte à minimiser l'excédent de chaleur et l'apport d'un système d'appoint.

La Figure 1-4 présente le principe de fonctionnement d'un système de production d'eau chaude sanitaire. Les éléments qui constituent le système de production d'ECS ainsi que leur fonctionnement sont les suivants :

1. Les capteurs solaires transforment le rayonnement solaire en chaleur grâce à un absorbeur (corps noir);
2. L'absorbeur transfère la chaleur à un fluide caloporteur (généralement de l'eau glycolée) circulant au travers de chacun des capteurs;
3. Lorsque la différence de température entre la sonde capteur (T1) et la sonde en fond de ballon (T2) dépasse quelques degrés, les circulateurs s'enclenchent;
4. Le fluide caloporteur, circulant dans le circuit primaire, achemine alors l'énergie solaire depuis les capteurs vers le(s) ballon(s) de stockage à travers un échangeur.
5. Le(s) ballon(s) de stockage accumulent(nt) la chaleur produite;
6. Si nécessaire, une source d'énergie d'appoint porte l'eau préchauffée à la température souhaitée. Celle-ci est alors acheminée vers les points de puisage par la boucle de distribution;
7. Un dispositif de régulation électronique commande le fonctionnement du système (circulateurs et appoints) selon les conditions d'ensoleillement et la demande en eau chaude.

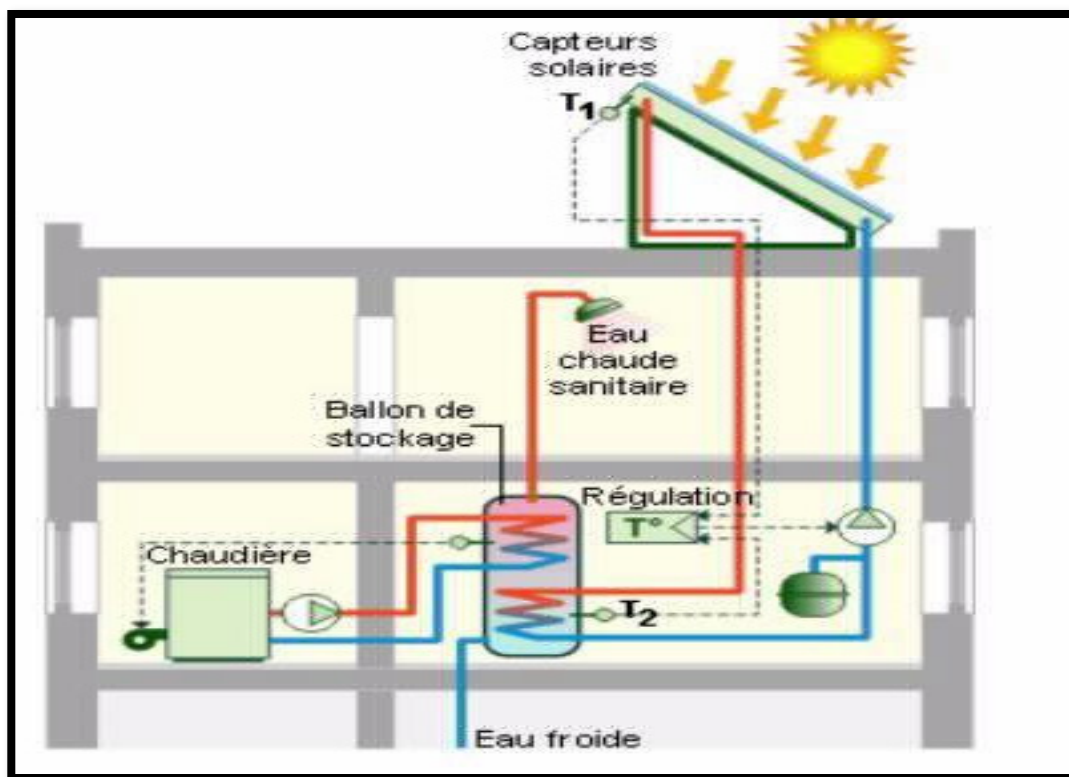


Figure 1-4 Principe de fonctionnement eau chaude sanitaire
Tirée de Énergie Plus (2010)

Il existe cependant divers types d'installations. Les systèmes à boucles fermés ou ouverts, les systèmes pressurisés, les systèmes non pressurisés et les systèmes à circulation fermée ou thermosiphon. Chaque système a ses avantages et inconvénients. Certains systèmes ne peuvent être utilisés que dans des régions chaudes. Les systèmes utilisés dans les régions de gel sont :

1. Les systèmes à retour par gravité (drainback systems) non pressurisés indirects;
2. Les systèmes pressurisés avec antigel (eau-glycolée).

Systèmes à boucles fermés ou ouverts ou systèmes indirects ou directs

Pour le système dont la boucle est fermée (système indirect), le fluide chauffé dans le capteur et le fluide qui arrive aux points de puisages (douches, éviers, etc.) sont distincts (Figure 1-5 gauche): l'eau de consommation est indirectement chauffée à travers un échangeur par le fluide caloporteur du circuit solaire. Le système à boucle fermée permet de mettre le ballon de stockage

à l'abri des intempéries. Le système est utilisé généralement dans les régions froides, car cela évite que l'eau froide gèle dans le capteur solaire.

Pour le système dont la boucle est ouverte ou (système direct) l'eau qui circule dans les capteurs est la même que celle qui est consommée aux points de puisage (Figure 1-5 droit). Les systèmes à boucle ouverte sont faciles à installer ne disposent pas de pompes et ont un coût moins élevé. Le système est généralement utilisé dans les pays tropicaux, car l'eau ne risque pas de geler à l'entrée du collecteur.

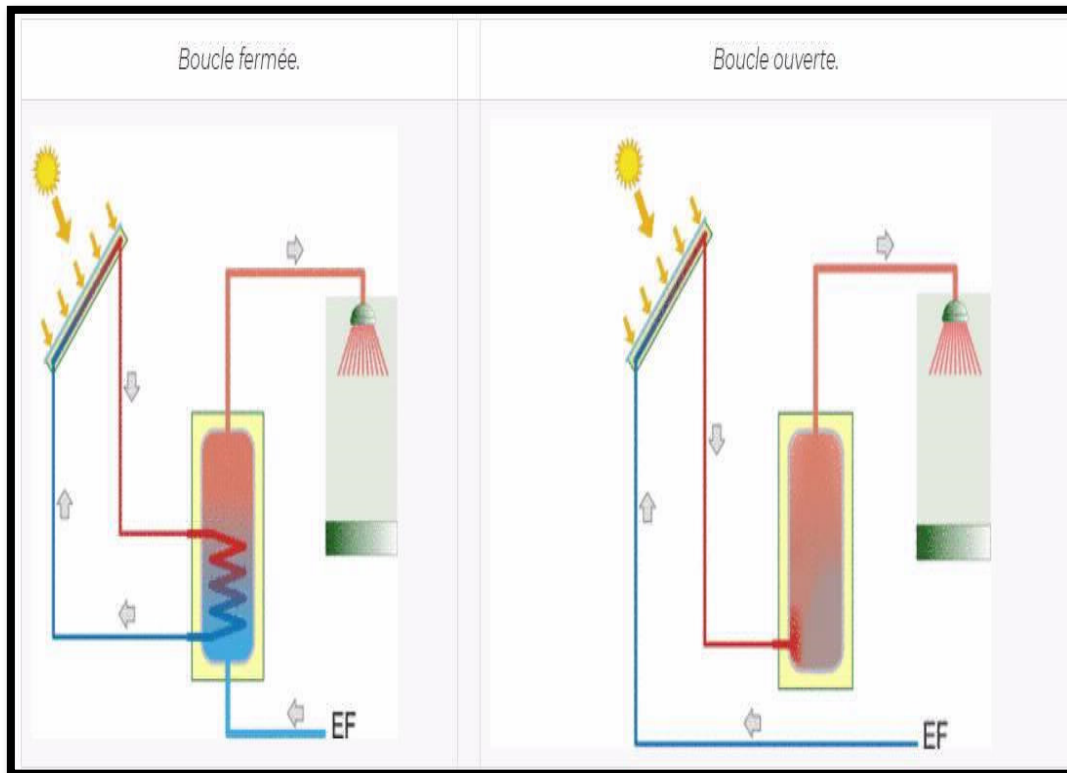


Figure 1-5 Système à boucle fermée(gauche) et ouverte (droit)
Tirée de Lane (2004)

Systèmes pressurisés

Pour les systèmes pressurisés, tels que présentés sur la Figure 1-6, il est possible de constater deux configurations différentes. Dans la première configuration (Figure 1-6 gauche) l'échangeur de chaleur se trouve à l'intérieur du ballon de stockage tandis que sur la deuxième configuration (Figure 1-6 droit) l'échangeur se trouve à l'extérieur du ballon de stockage.

Les systèmes pressurisés sont les plus performants, mais les plus complexes à installer et à entretenir comparativement aux systèmes à retour par gravité. Ces systèmes demandent plusieurs accessoires et une installation minutieuse. L'entretien nécessite une expertise particulière puisque l'écoulement du liquide est sous pression (Lamarche, 2020).

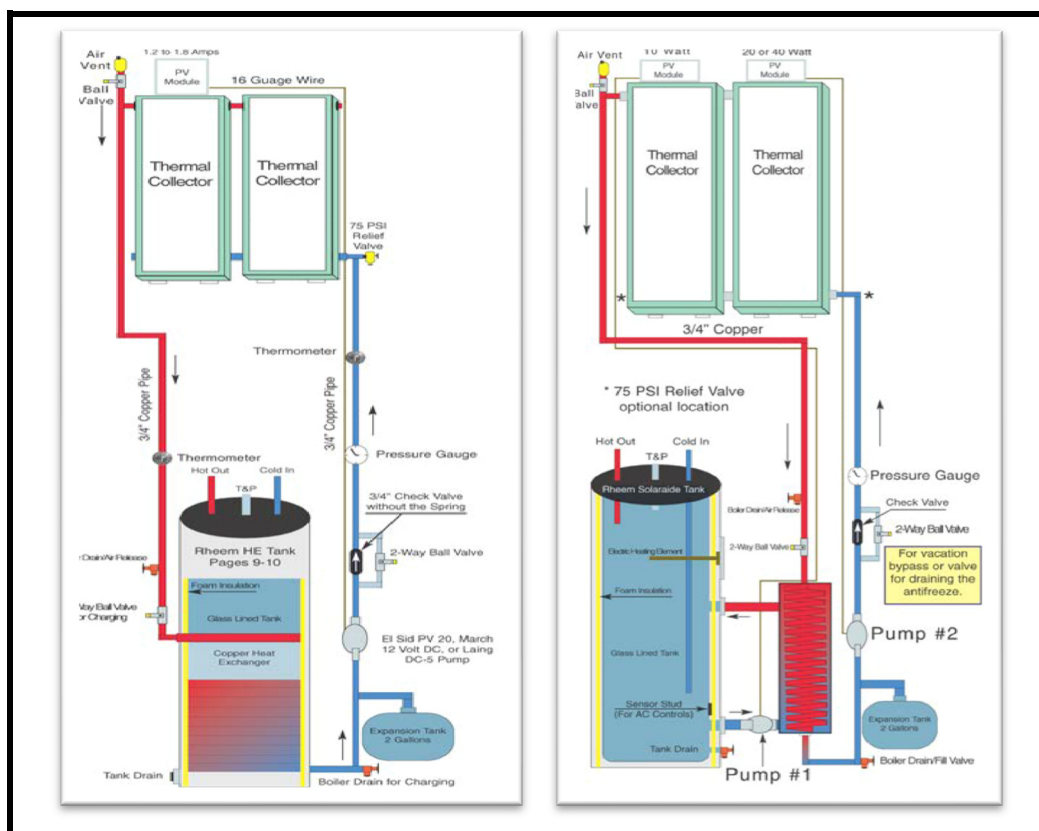


Figure 1-6 Système pressurisé
Tirée de Lane (2004)

Systèmes à retour par gravité

En ce qui concerne les systèmes à retour par gravité, il est possible de retrouver sur le marché trois configurations comme le présente la Figure 1-7. En allant de gauche vers la droite sur la Figure 1-7, la première configuration présente un échangeur thermique à l'intérieur du réservoir. La deuxième configuration, celle du milieu, un échangeur thermique entre le réservoir et le ballon de stockage. Pour finir, la troisième configuration à droite présente l'échangeur de chaleur à l'intérieur du ballon de stockage.

Les systèmes à retour par gravité offrent une la protection contre le gel. Ils nécessitent un réservoir pour que l'eau se déverse lorsque la pompe arrête. De même, ils nécessitent de combattre la hauteur statique, contrairement aux systèmes sous pression (Lamarche, 2020).

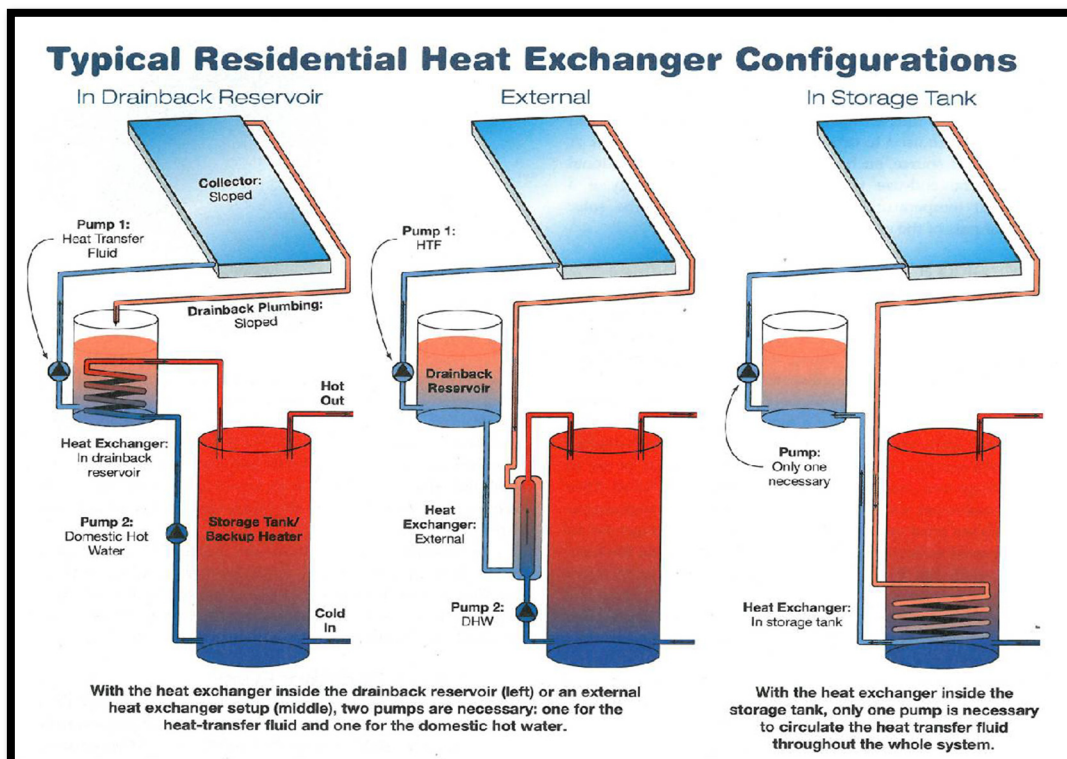


Figure 1-7 Système de retour par gravité « Drainback »
Tirée de Lane (2004)

Systèmes passifs à thermosiphon

La Figure 1-8 présente un système à thermosiphon installé à deux endroits possibles. La première (haut et gauche) sur un toit plat, la deuxième (haut et droit) sur un toit incliné. Dans le système à thermosiphon, la pompe n'est pas requise, le fluide de la boucle solaire circule par convection naturelle. Le fluide réchauffé s'élève. Le stockage est en général situé au-dessus des capteurs à une distance de minimum 50 cm (Energieplus, 2010).

Les systèmes passifs à thermosiphon ont la particularité d'être simples à installer et demandent peu de maintenance, mais sont limités aux climats chauds à cause de l'exposition du réservoir qui est extérieur (Lamarche, 2020).

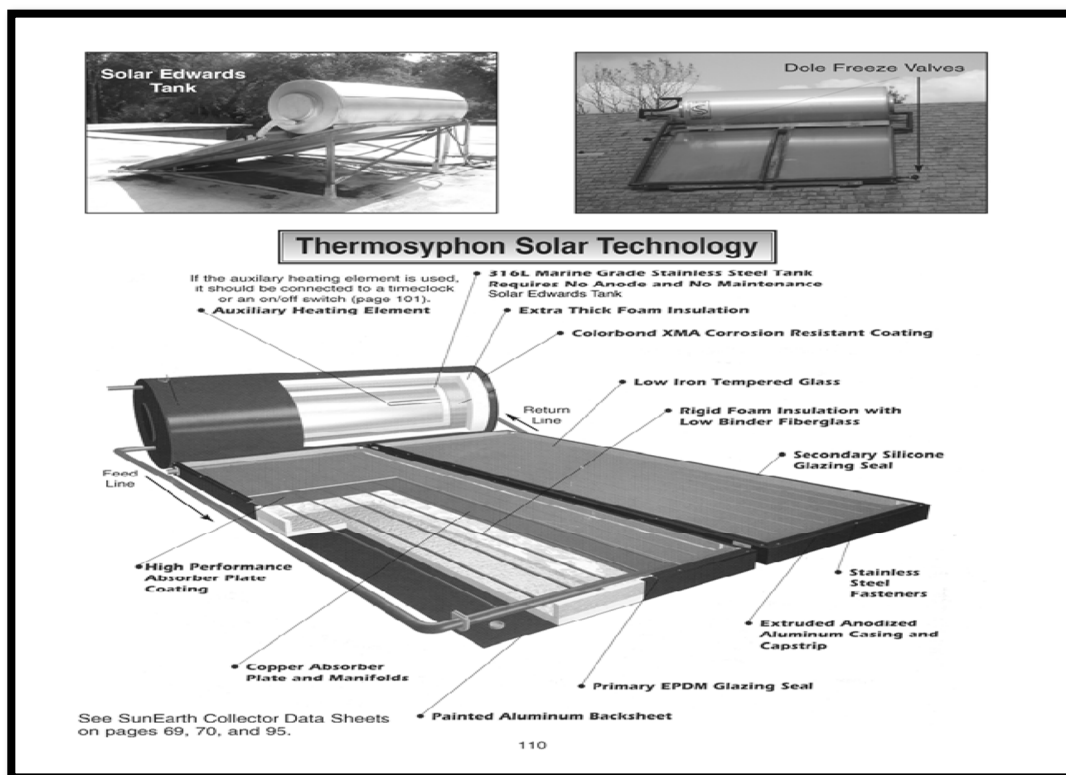


Figure 1-8 Système passif à thermosiphon
Tirée de Lane (2004)

1.2.2 Les capteurs solaires

Il est possible de retrouver sur le marché trois principaux types de capteurs : les capteurs plans (vitrés non vitrés), les capteurs à tubes sous vide et les capteurs à concentration ou CSP. Dans cette section il sera question de présenter et d'expliquer la fonction des différents types de capteurs.

1.2.2.1 Capteurs Plans

Les capteurs plans se subdivisent en deux catégories, les capteurs plan opaque et capteurs plans vitrés. De façon plus générale, ils sont constitués d'une plaque absorbante qui permet la captation de l'énergie et d'une tuyauterie dans laquelle circule le liquide caloporteur.

Les capteurs plans opaques, comme présentés sur la Figure 1-9, sont constitués de deux parties : la plaque absorbante qui permet la captation de l'énergie thermique du rayonnement solaire et le tuyau dans lequel circule le liquide caloporteur. Les capteurs opaques, ne possèdent ni couverture transparente ni isolation, ce qui explique leur rendement plus faible comparativement aux capteurs plans vitrés. Les capteurs opaques sont généralement utilisés en périodes estivales dans les régions plus chaudes (Energieplus, 2010).

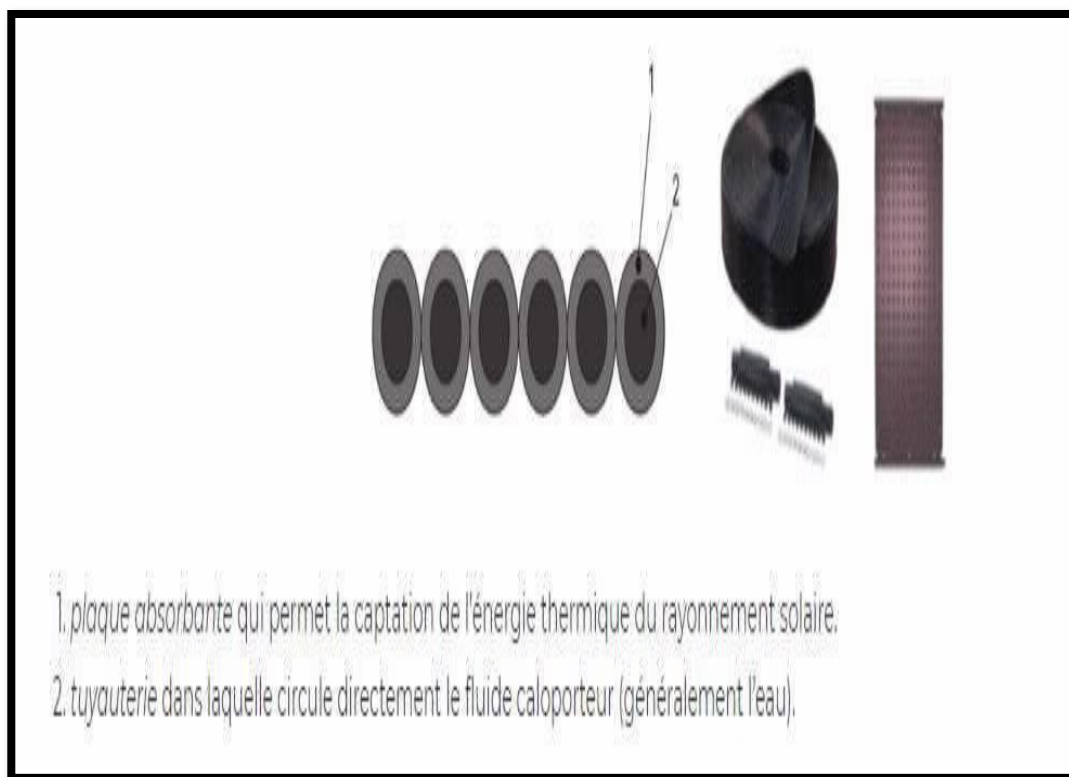


Figure 1-9 Capteur opaque
Tirée de Énergie Plus (2010)

Les capteurs plans, comme présentés à la Figure 1-10 sont composés de six principales composantes suivantes :

1. Un boîtier qui contient tous les éléments constitutifs fragiles du capteur comme les tubes, la plaque absorbante;
2. Un joint d'étanchéité pour empêcher l'eau de pénétrer quand il pleut ;
3. Un couvercle transparent qui crée un effet de serre au-dessus de la plaque absorbante : en général un verre trempé dit solaire, présentant une faible teneur en fer pour permettre un haut degré de transmission lumineuse ;
4. Une isolation thermique qui réduit la déperdition de chaleur par la face arrière et les côtés du capteur ;
5. Une plaque absorbante qui permet la conversion du rayonnement solaire en énergie thermique transportée par le fluide ;
6. Les tubes traversés par le fluide caloporteur qui évacue la chaleur jusqu'à l'extérieur du capteur.

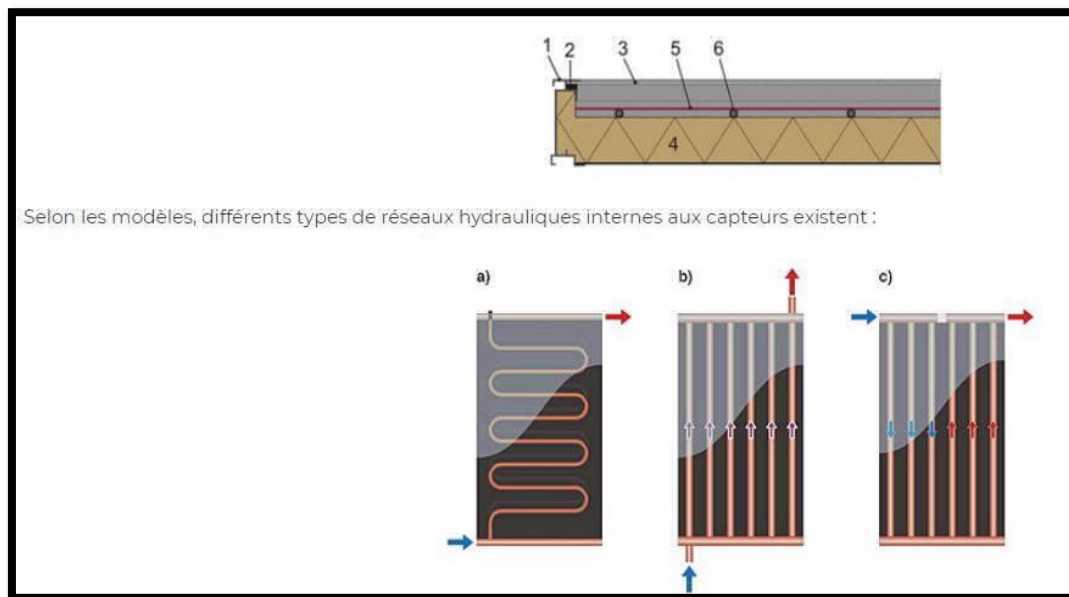


Figure 1-10 Capteur plan vitré
Tirée de Énergie Plus (2010)

Les capteurs plan vitré sont les capteurs que l'on retrouve le plus souvent sur le marché et conviennent pour la plupart des installations de production d'ECS (Energieplus, 2010). Les capteurs plan vitré sont recouverts du couvercle transparent qui permet d'éviter les pertes convectives et radiatives (Duffie & Beckman, 2013). Afin de mieux détailler les pertes radiatives et convectives à l'intérieur du capteur une annexe a été préparée dans le cadre de ce mémoire (voir ANNEXE I).

1.2.2.2 Capteurs à tube sous vide

Les capteurs sous vide sont conçus généralement avec une forme cylindrique d'une longueur de 2 m et un diamètre approximatif de 10 cm. Le principe des capteurs sous vide est de faire un vide partiel de manière à réduire les pertes convectives. L'utilisation d'un gaz est souvent utile pour minimiser les pertes. Il existe deux grandes catégories de capteurs sous vide. Les tubes sous vide avec absorbeurs sur ailette en cuivre et les tubes sous vide avec absorbeurs sur support en verre.

Les tubes sous vide avec absorbeurs sur ailette en cuivre

La surface d'absorption sélective du capteur sous vide se retrouve sur une structure d'acier placée à l'intérieur du tube. Le fluide (eau ou mélange eau-glycol) passe directement dans l'absorbeur. Selon la Figure 1-11, les principales composantes d'un capteur sous vide sont les suivantes :

1. Un tube en verre dans lequel on effectue le vide d'air;
2. L'absorbeur posé sur un support en cuivre;
3. Les tubes qui évacuent la chaleur, généralement aussi en cuivre. Ces tuyaux peuvent être disposés de manière juxtaposée ou concentrique;
4. Le système de raccordement permet la rotation des tubes afin d'orienter au mieux l'ailette absorbante.

Dans le cas de capteurs à circulation directe (Figure 1-11 en bas à gauche), l'ailette sert de support à un tube en U dans lequel circule le fluide caloporteur. Le fluide caloporteur passe directement par l'absorbeur dans le tube sous vide (Energieplus, 2010). Les capteurs en circulation directe ont un rendement élevé à cause du transfert thermique direct. Ces capteurs ont aussi l'avantage de pouvoir être montés directement sur une toiture-terrasse, ce qui permet de réduire les coûts de fixation (Jaleran, s.d.).

Dans le cas du capteur à caloduc (Figure 1-11 en bas à droite) celui-ci utilise les mécanismes de changement d'état liquide-gaz d'un fluide placé dans un tube fermé. Le principe est le suivant: en captant la chaleur absorbée par l'ailette, le fluide s'évapore. La vapeur s'élève alors jusqu'en partie haute et cède sa chaleur en se condensant par contact avec le fluide caloporteur de l'installation qui circule en partie haute. De nouveau à l'état liquide, il retourne alors par gravité en bas du tube (Energieplus, 2010). Le principe d'installation de ce capteur exige une inclinaison minimale du tube absorbeur, contrairement aux tubes à flux directs(Jaleran, s.d.). De plus, ces capteurs ont l'avantage de limiter en partie les mauvais effets de la stagnation, mais ont un rendement légèrement inférieur aux capteurs à circulation directe. Ce rendement inférieur est dû au transfert de chaleur entre le fluide secondaire et primaire (Lamarche, 2020)

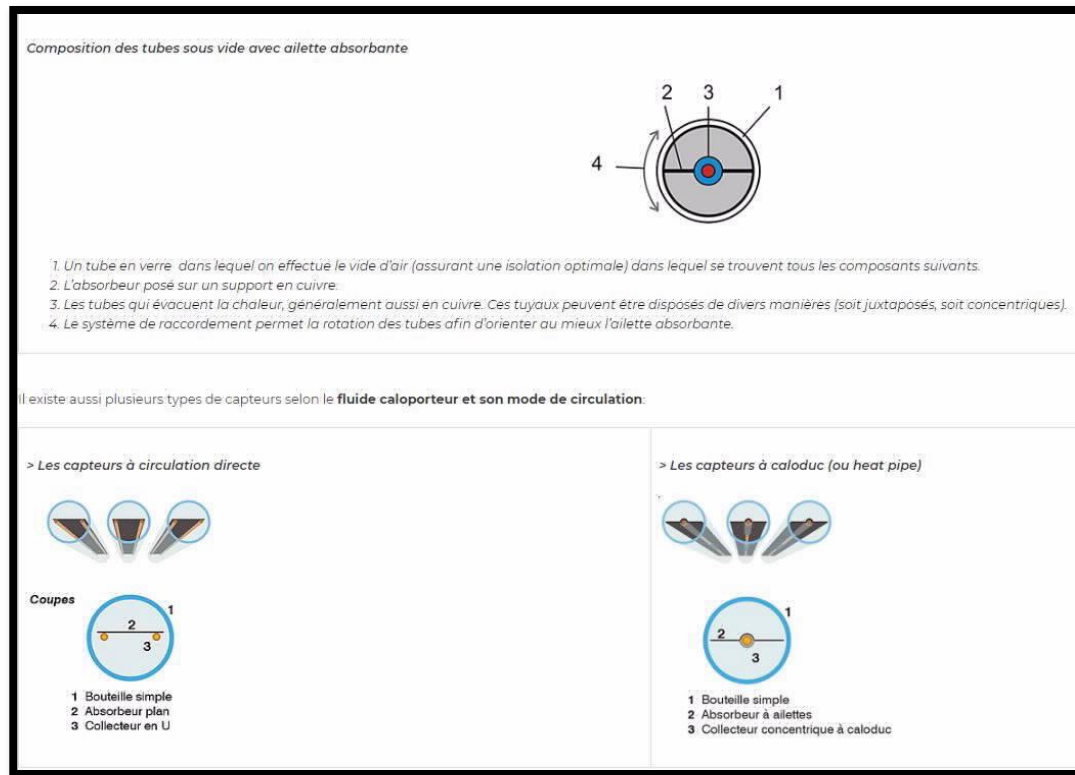


Figure 1-11 Les tubes sous vide avec absorbeurs sur ailette en cuivre
 Tirée de Énergie Plus (2010)

Les tubes sous vide avec absorbeurs sur support en verre

Dans le cas des tubes sous vide avec absorbeur, le vide est fait entre les deux couches de verre (principe du thermo) qui composent le tube en verre. L'intérieur de la bouteille est donc soumis à la pression atmosphérique. À l'intérieur, l'absorbeur et les tuyauteries évacuent la chaleur du creux atmosphérique central.

Les principales composantes des tubes sous vide avec absorbeur, présenté par la Figure 1-12, sont les suivantes :

1. Une bouteille de verre à double paroi est employée. Les deux parois sont reliées de manière étanche au niveau du goulot de manière à emprisonner le vide (partie grise dans le schéma);
2. Sa surface externe est laissée transparente;
3. Un absorbeur est posé sur la face intérieure de la bouteille;
4. Des tubes qui évacuent la chaleur sont placés dans le creux atmosphérique central;
5. Des tuyaux sont reliés à l'absorbeur par des profilés semi-circulaires métalliques de transfert de chaleur;
6. Éventuellement et préférablement, des réflecteurs augmentent le rayonnement solaire sur le capteur (on parle alors de tubes CPC pour Compound Parabolic Concentrator).

Pour ce qui est du type de collecteurs, les réflecteurs extérieurs ont l'inconvénient de se salir avec les intempéries. De plus, ces collecteurs nécessitent un entretien pour le nettoyage des réflecteurs et pour son installation qui nécessite une main-d'œuvre qualifiée. Les collecteurs CPC ont un coût relativement moins cher comparativement aux autres types de collecteurs, mais offrent un rendement plus faible à cause de leur absorbeur arrondi relativement petit (Jaleran, s.d.).

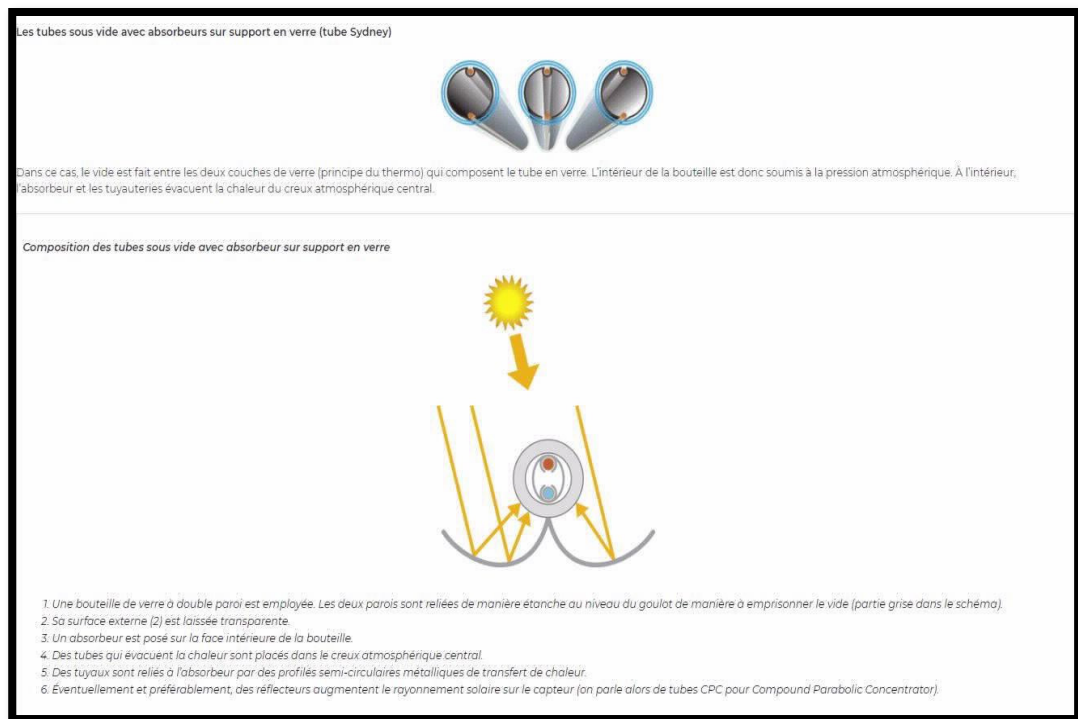


Figure 1-12 Les tubes sous vide avec absorbeurs sur support en verre
Tirée de Énergie Plus (2010)

De façon générale, les capteurs sous vide sont réputés avoir un meilleur rendement thermique, mais sont plus dispendieux sur le marché que les capteurs plans (Energieplus, 2010).

Raccordement des capteurs

Pour le raccordement des panneaux entre eux, il existe différentes configurations. Le choix de chacune de ces configurations dépend de la facilité de réglage, de la longueur nécessaire de tuyauterie, de la configuration de l'espace disponible et du compromis entre l'efficacité du capteur et de la température de sortie. Les principales configurations (voir Figure 1-13) sont les suivantes :

1. En série (a) ;
2. En parallèle respectant de préférence le principe de Tichelmann (b) ;
3. En rangée de capteurs en série (c) ;
4. En rangée de capteurs en parallèle (respectant le principe de Tichelmann) (d).

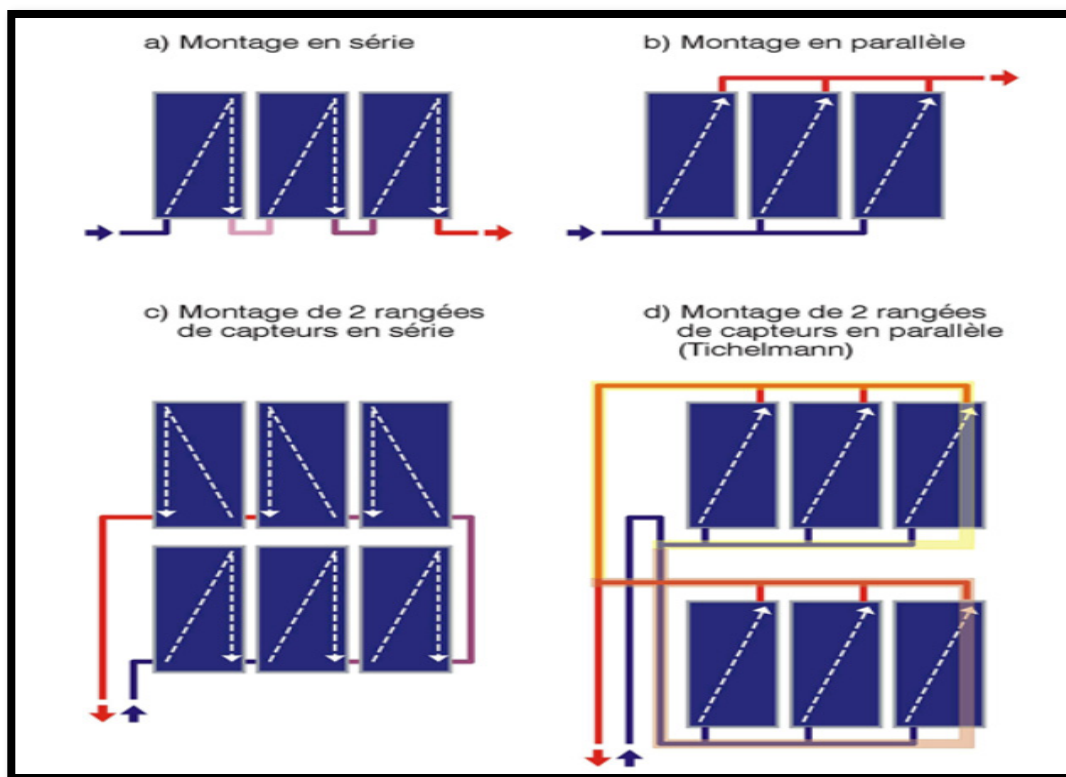


Figure 1-13 Configurations du branchement des capteurs
Tirée de Énergie Plus (2010)

Le montage en série (Figure 1-13 a) permet une montée en température plus importante, cependant le risque de perte thermique est plus élevé. La montée en température progressive au fil des panneaux en série est accompagnée par la diminution des rendements. Un trop grand nombre de panneaux est à éviter à cause de ce phénomène. En général, pour des panneaux de taille standard, le nombre de capteurs est limité à six (Energieplus, 2010).

Le montage en parallèle (Figure 1-13 b) offre un rendement plus intéressant que ceux en série, mais nécessite une longueur de tuyau importante.

Pour les différentes configurations de capteur, il est important de prendre en compte les pertes de charges liées aux différents capteurs lors de la conception. Le montage de deux rangées de capteurs en parallèle Tichelman (voir Figure 1-13d) est souvent préconisé dans les grandes

installations. Ce montage (Tichelmann) requiert des longueurs de tuyaux identiques, quel que soit le capteur ou le groupe de capteur.

Rendement des capteurs

Le rendement d'un capteur correspond au rapport entre l'énergie utile et l'énergie incident. Il exprime la capacité du capteur thermique à convertir l'énergie solaire en chaleur et à la transférer au fluide caloporteur avec un minimum de pertes. Les facteurs suivants doivent être réunis pour obtenir un bon rendement :

1. Une bonne qualité du matériau (bonne isolation);
2. Une bonne transmission de la chaleur entre l'absorbeur et le fluide caloporteur;
3. De bonnes conditions météorologiques (ensoleillement, vitesse du vent, température);
4. La propreté de la surface exposée.

La Figure 1-14 présente le rendement de différents types de capteurs en fonction de leurs utilisations. Il faut noter que sur cette figure, la température représente la différence de température de l'eau froide qui rentre dans le capteur et l'eau chaude qui sort du capteur.

Il est possible de remarquer (Figure 1-14, ligne de gauche) que les capteurs sans vitre offrent un rendement plus grand pour des températures plus faibles et plus la différence de température est grande plus le rendement baisse rapidement. On peut déduire qu'il est préférable d'utiliser ce type de capteurs en été ou dans des régions dont les différences de températures sont moins grandes pendant l'année.

Le rendement des capteurs plan vitré (Figure 1-14, sur la ligne du milieu), décroît aussi avec la différence de température, mais offre une plus grande plage de différence de température comparativement aux capteurs non vitrés.

Pour le rendement des capteurs sous vide (Figure 1-14, sur la ligne de droite), ils sont généralement supérieurs à ceux des capteurs sans vitre et vitrés. Il est aussi possible de constater que les capteurs sous vide peuvent être utilisés pour des différences de température allant jusqu'à 150 °C

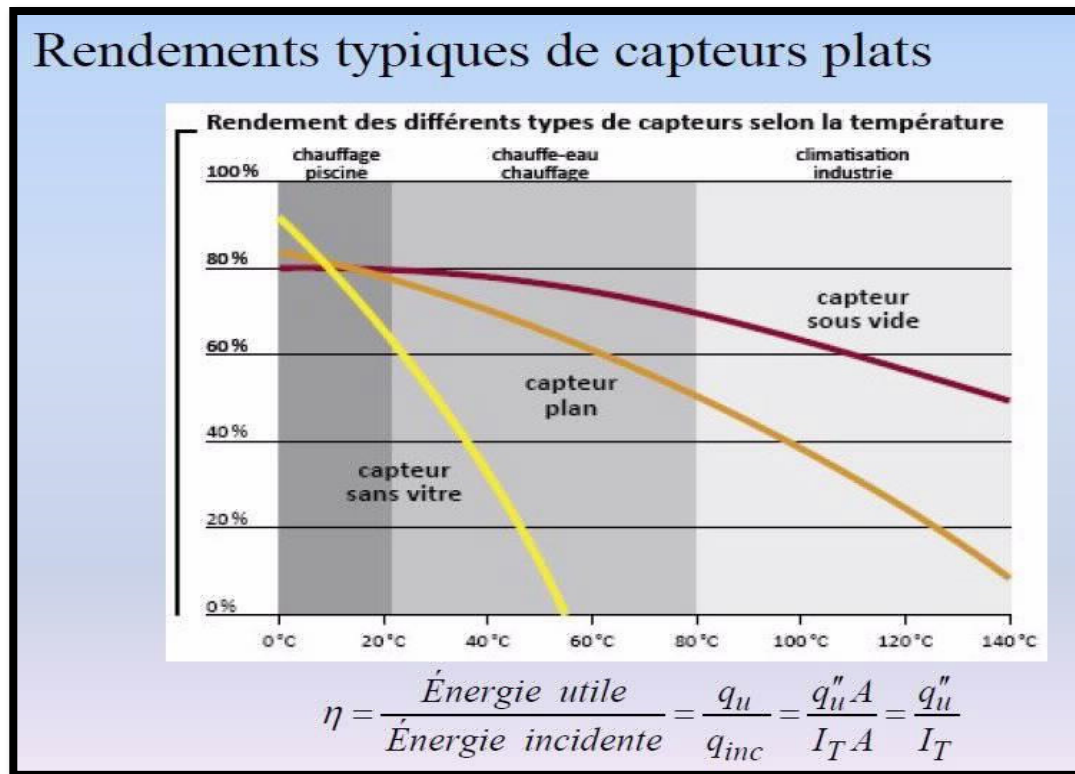


Figure 1-14 Rendement différent type de capteurs selon la température
Tirée de Lamarche (2020)

Les essais permettant de mesurer les rendements de capteurs suivent principalement trois normes : ASHRAE 93/ANSI93-2003 en Amérique, la norme EN 12975-2 en Europe et la norme unifiée qui regroupe les deux normes NF EN ISO9806 : 2013.

1.2.3 Le système de stockage

Le choix d'un ballon de stockage d'eau chaude sanitaire dépend du besoin. Cependant, il doit avoir les caractéristiques suivantes.

1. Matériau résistant à la corrosion et aux hautes températures généralement en acier inoxydable;
2. Avoir une bonne stratification (variation de la masse volumique en fonction de la température) interne des températures;
3. Bonne isolation thermique afin d'éviter les pertes thermiques;
4. Une dimension adaptée aux besoins.

Dans le cadre de ce mémoire, il a été question de recenser les différents de stockage existant sur le marché ainsi que leurs particularités (voir ANNEXE II).

1.2.4 Le système d'appoint

Étant donné que les capteurs solaires à eux seuls peuvent ne pas satisfaire à tout moment l'entièreté des besoins du consommateur, il est nécessaire d'utiliser un système d'appoint (chauffage externe) pour compenser la demande en eau chaude sanitaire. L'appoint aura pour rôle de répondre aux besoins de consommation sans intervention solaire. La Figure 1-15 présente les différentes catégories de systèmes d'appoints retrouvées sur le marché (Energieplus, 2010):

1. Les systèmes d'appoint électrique (figure C) qui consistent à intégrer une résistance électrique à l'intérieur du système de stockage;
2. L'appoint intégré au stockage (a, d, e, f) : L'échangeur se trouvera le plus près possible de l'endroit où s'effectue le puisage dans le(s) ballon(s) et son raccordement respectera la stratification interne des températures;
3. L'appoint séparé en série (b) : L'appoint (généralement instantané ou semi-instantané) se trouve dans ce cas à l'extérieur du ballon de stockage solaire. L'eau préchauffée par

les capteurs solaires est alors directement portée à température (par une chaudière au gaz à condensation, par exemple);

4. L'appoint mixte : il est bien entendu possible de combiner différents types d'appoints. Ce qui est le cas de notre étude. Un système solaire sera combiné à un système à la biomasse pour produire de l'eau chaude sanitaire.

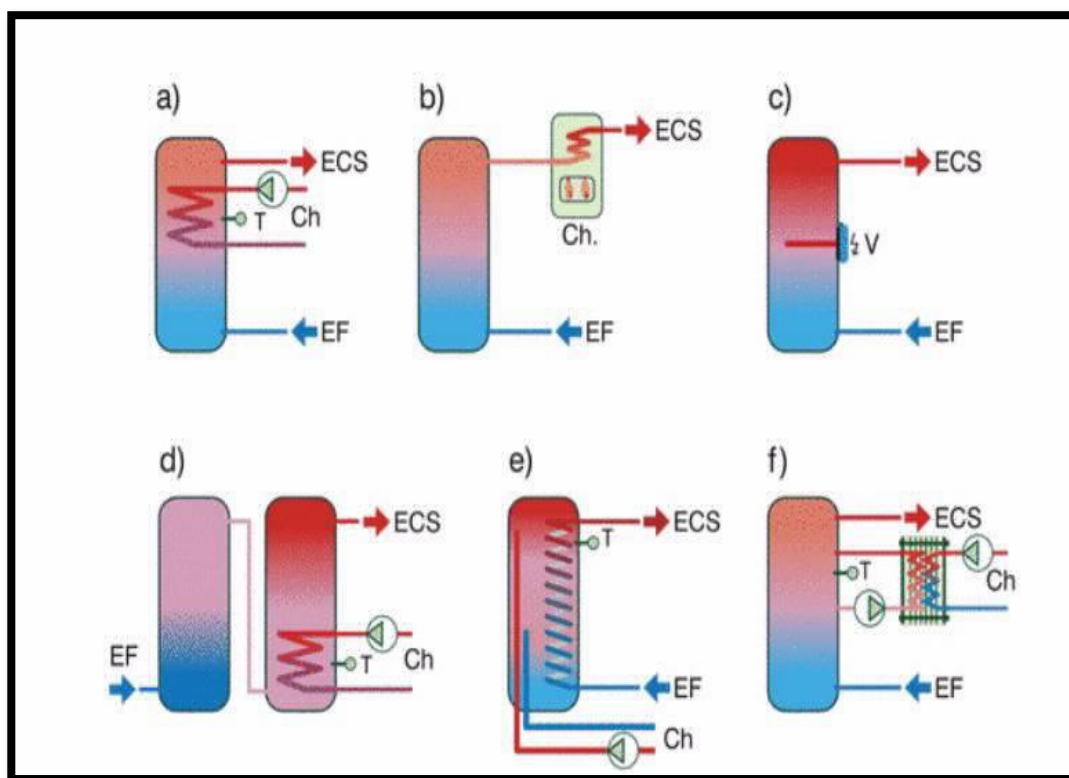


Figure 1-15 Systèmes d'appoints de production d'eau chaude sanitaire
Tirée de Énergie Plus (2010)

Le choix d'un système ou l'autre dépend du besoin du consommateur. De façon générale, pour les grandes installations, l'appoint peut se faire faire via des ballons différents (Energieplus, 2010)

1.3 Récents développements en chauffage solaire de l'ECS

Dans cette section il sera question de citer quelques études qui ont fait la production d'eau chaude avec du solaire thermique.

1. Johannes, 2005

Le but de cette étude est d'améliorer d'un point de vue technico-économique les performances des installations de production d'ECS. Un ballon de stockage à stratification fonctionnant aussi bien dans les installations individuelles que dans les installations collectives a été conçu. La simulation du comportement d'un ballon domestique puis collectif grâce au code CFD Fluent (Computational Fluid Dynamics) a permis de mettre en évidence l'influence positive de la présence d'injecteurs à plaques sur les entrées solaires ainsi que sur l'entrée d'eau froide. Les résultats expérimentaux, obtenus grâce à la mise en place d'un banc expérimental, ont permis de valider le modèle CFD ainsi que l'utilisation des injecteurs à plaques vis-à-vis de la stratification thermique. L'objectif du travail étant d'optimiser les installations solaires d'eau chaude collective, l'analyse économique montre que les installations à production solaire centralisée et à appoint individualisé, ainsi que les installations décentralisées, permettent d'effectuer des économies non négligeables sur la fourniture de l'énergie d'appoint. Cependant, l'investissement initial est en fonction du nombre de ballons mis en place, et par conséquent, les temps de retour sont plus ou moins intéressants.

2. Aoues et al., 2009

Le présent article présente les résultats d'une enquête expérimentale sur les performances d'un capteur solaire à air plat équipé d'une rugosité artificielle de différentes formes et différents agencements. Une installation complète d'essai de collecteurs équipée d'un système d'acquisition de données a été assemblée et testée à cet effet. Le système conçu est muni d'un capteur solaire plat, d'une superficie de $1,74 \text{ m}^2$ a été installé dans la ville de Briska au sud-est d'Ager. L'unité de rugosité artificielle adaptée à la structure est en métal galvanisé. Quatre configurations avec deux formes (modèle-1 et modèle-2) et deux dispositions (A et B) sont

combinées (A1, A2, B1 et B2) et testées. Le capteur solaire à air plat a été monté sur un support faisant face au sud et ils ont été testés dans les conditions environnementales de la région. Le dispositif expérimental a été instrumenté dans le but de mesurer du rayonnement solaire, de la température ambiante, de la température de l'air en sortie et en entrée, du débit d'air et de la vitesse du vent. Les résultats expérimentaux ont démontré un rendement de 58,47 % pour la configuration B1, capteur dont la différence entre la température de l'air à l'entrée du capteur et température ambiante est la plus basse.

Lipu & Jamal, 2013

Dans cet article, l'auteur propose une étude technico-économique des technologies CSP (Concentrante Solar Power) à 30 différents endroits du Bangladesh. Pour analyser la faisabilité des technologies CSP, deux projets, à savoir, PS-10 (basé sur la technologie Power Tower) et ANDASOL-1 (basé sur la technologie des collecteurs à auge parabolique) ont été pris comme cas de référence pour cette étude. L'étude révèle que les emplacements bénéficiant d'un accès direct annuel rayonnement solaire supérieur à 1700 kWh/m² ont un meilleur rendement et sont recommandés pour l'installation de systèmes CSP. Par ailleurs, l'étude met en évidence les avantages de la technologie CSP par rapport aux systèmes PV (Photovoltaïque) avec une analyse coûts-avantages détaillée.

3. Moreau, 2015

Dans cette étude, le ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) a mis en place un projet pilote visant à développer le marché des chauffe-eau solaires domestiques dans le secteur résidentiel. Environ 70 clients ont participé au projet. Dans le cadre de ce projet, le Laboratoire des technologies de l'énergie (LTE) d'Hydro-Québec a permis d'instrumenter, de surveiller et d'analyser la performance de 23 de ces systèmes solaires pour quantifier les économies d'énergie des chauffe-eau solaires dans un contexte québécois. La campagne a duré sur une période d'un an. La surface totale des panneaux de la plupart des systèmes (75 %) était de 6 m², soit deux panneaux de 3 m² avec des angles d'inclinaison de 40 à 50°. Le projet pilote a démontré une économie d'énergie annuelle moyenne de 40 % dans le contexte québécois.

Quelques recommandations à mettre en œuvre auraient permis d'augmenter ces économies dont : 1. minimiser les déperditions thermiques par les conduites de fluide caloporteur en réduisant la distance entre les panneaux solaires et le ballon de stockage et en isolant correctement les conduites de transfert de chaleur ; 2. minimiser les pertes de chaleur des tuyaux qui relient le réservoir de stockage au chauffe-eau en réduisant la distance entre les deux et en isolant adéquatement les tuyaux; 3. éviter de surdimensionner le volume du ballon de stockage pour réduire les déperditions thermiques et augmenter les performances globales du système ; 4. fournir aux clients une interface conviviale pour les tenir informés du bon fonctionnement de leur système.

4. Franco, 2020

Dans cet article, il est question d'optimiser la conception d'un système de production d'ECS dans le milieu industriel. La méthode utilisée pour cette étude prend en compte les variables typiques du problème qui sont l'irradiation solaire, l'architecture, la répartition de charge, et les critères de conception et d'optimisation. Le système envisage également l'utilisation du système auxiliaire utilisant des combustibles fossiles. L'élément clé de la méthodologie est de combiner les critères énergétique et économique. De plus, l'auteur considère l'attribution d'une pénalité économique à l'irréversibilité liée à l'utilisation d'un combustible fossile.

5. (Abokersh, Vallès, Saikia, Cabeza, & Boer, 2021)

Dans cette étude, l'auteur fait une étude technico-économique sur le système de production de chaleur appliquée à une communauté de quartier résidentiel de 10 bâtiments situés à Madrid. Le système proposé a été développé à l'aide du logiciel de simulation dynamique (TRNSYS) et optimisé sur la base d'un algorithme. Le projet consiste à connecter une pompe à chaleur de taille industrielle à des réservoirs de stockage thermique pour l'eau chaude sanitaire (ECS) et le chauffage des locaux pour les besoins de la communauté. Les résultats ont montré un effet significatif pour le contrôle de la pompe à chaleur dans les avantages technico-économiques où le système proposé est capable de fournir une fraction solaire jusqu'à 99 %. De plus, la consommation totale d'électricité du système de chauffage variait de 10 % entre le meilleur et

le pire des cas. En outre, l'efficacité annuelle du stockage saisonnier s'est améliorée jusqu'à 90 % avec une dépense de cycle de vie jusqu'à 67,12 euros/MWh et une période de récupération de 29 ans.

6. Moreno, Chemisana, & Fernández, 2021

Dans la présente étude, un module HCPVT (les capteurs PVT à haute concentration) a été conçu, modélisé et simulé. Des simulations ont été menées pour deux villes, Almeria (Espagne) et Lancaster (États-Unis), avec des climats différents, mais toutes deux adaptées aux applications de concentration solaire. Les résultats démontrent une très bonne performance dans les deux endroits, couvrant de 95 % à 100 % de la demande d'eau chaude sanitaire, et plus de 55 % des demandes de chauffage et de refroidissement des locaux et d'électricité. De plus, une comparaison avec un capteur solaire PVT standard a été réalisée, indiquant que le système HCPVT surpasse nettement le système standard en termes d'électricité et d'énergie thermique produite.

7. Zhang et al., 2021

Dans cette étude, l'auteur propose une approche pour résoudre les problèmes de conception des systèmes de production d'ECS. En effet, de nombreuses méthodes de conception de systèmes d'ECS ne prennent pas en compte l'impact du déséquilibre énergétique, ce qui conduit à une surestimation des performances du système et induit en erreur la conception du système. Pour résoudre ces problèmes, une méthode de conception d'optimisation de système d'eau chaude solaire est basée sur l'équilibrage de l'énergie en temps réel. La méthode se compose de trois parties principales : (1) établir un modèle simplifié de système de chauffe-eau solaire basé sur le bilan énergétique en temps réel pour simuler les performances énergétiques dynamiques du système ; (2) proposer une méthode d'optimisation pour minimiser l'inadéquation énergétique entre l'offre et la demande du système et (3) identifier le schéma avec le coût total du cycle de vie minimum comme la conception optimale. Un système de chauffe-eau solaire à Pékin a été optimisé sur la base de la méthode d'optimisation proposée. Il a été constaté que le degré d'inadéquation de l'énergie entre l'offre et la demande peut être

considérablement réduit et conduit à un coût maximal d'économie sur le cycle de vie jusqu'à 20,13 % dans le cas concerné.

8. (Sharma, 2021)

Dans cet article, l'auteur fait une étude sur croissance de l'utilisation des systèmes de chauffe-eau solaires. En effet, les chauffe-eau solaires (CES) sont une technologie mature avec des taux d'adoption élevés par les ménages dans les pays tels que la Chine, la Turquie et Israël. Aux États-Unis, la contribution a seulement 2 % du marché mondial. Pour mieux comprendre le point de vue des consommateurs sur les chauffe-eau solaires et leur potentiel de marché, une étude basée sur la population urbaine du sud-ouest des États-Unis a été effectuée. L'analyse explore la relation entre (a) la démographie (revenu et diplôme), (b) l'influence du groupe et (c) les technologies concurrentielles telles que le solaire photovoltaïque (PV) sur la sensibilisation du public et l'acceptation des CES. Nous constatons que les consommateurs ayant un revenu annuel plus élevé ($> 60\,000$ \$) et un diplôme ($>$ baccalauréat) sont plus familiers avec les Chauffe-eaux solaires (CES) et plus disposés à adopter de nouvelles technologies solaires. Nous notons également que les consommateurs résidentiels sont plus sensibilisés au solaire photovoltaïque que les CES. Les consommateurs ont préféré le besoin d'informations sur les coûts et les besoins énergétiques, et la comparaison des performances des CES par rapport aux technologies conventionnelles de chauffage de l'eau comme éléments décisifs pour l'adoption des CES à l'avenir.

Au regard des articles cités ci-dessus, il est possible de constater que le sujet de ce mémoire est d'actualité. Dans certaines études il était question d'optimisation la conception des systèmes de production de chaleur et dans d'autres le besoin était d'optimiser les coûts et d'avoir un meilleur retour sur investissement. La volonté d'intégrer les énergies renouvelables dans réduction des gaz à effet de serre et dans la résolution des besoins énergétiques est présente sur l'ensemble des continents. Le solaire thermique peut non seulement aider à la production de l'eau chaude sanitaire, mais aussi de chaleur et de climatisation. Cependant, il a

été possible de constater une méconnaissance de l'usage du solaire thermique dans certaines tranches de la population aux États-Unis (Sharma, 2021).

1.4 Production d'eau chaude sanitaire avec la biomasse

La biomasse est une source d'énergie non négligeable dans les énergies renouvelables. La biomasse constitue l'ensemble des matières organiques d'origines végétales et animales ou fongiques pouvant devenir une source d'énergie. Les procédés de conversion énergétiques de la biomasse sont les suivants : pyrolyse, gazéification, combustion et liquéfaction.

La biomasse n'est pas seulement utilisée pour la production de chaleur et pour le transport, mais peut aussi servir à produire de l'électricité. L'apport de la biomasse à la production d'électricité reste faible soit 2.1 % comme le présente la Figure 1-16. La contribution de la biomasse dans la consommation d'énergie primaire est estimée à 12 %, soit 45,2 EJ (Exajoules). Il est aussi possible de constater que la demande dans l'industrie pour la biomasse augmente de 1,8 % par an depuis 2013.

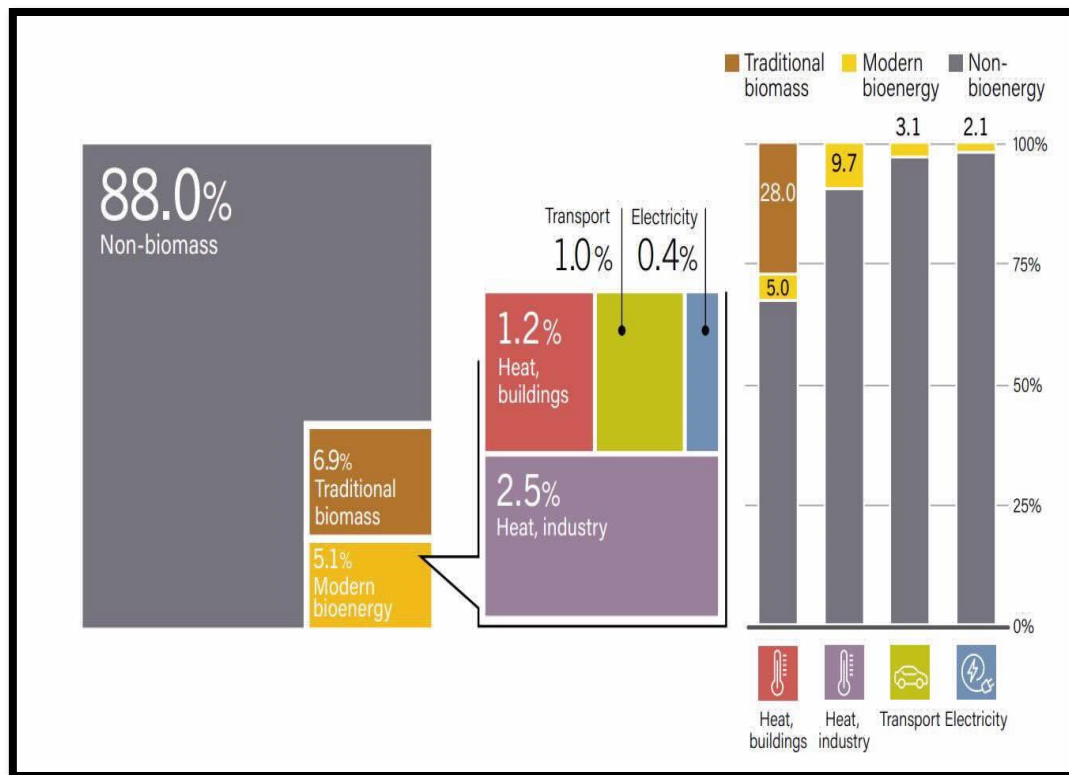


Figure 1-16 Consommation de biocarburants par secteurs d'activité
Tirée de REN21 Members (2020)

Dans le cadre de ce mémoire, l'aspect de combustion de la biomasse sera étudié dans le but de produire de l'eau chaude sanitaire. Il existe de nombreux avantages à utiliser de la biomasse pour la production de chaleur. Les avantages sont les suivants :

1. Au niveau de l'environnement, la combustion de la biomasse est considérée comme neutre en matière d'émission de CO₂;
2. Développer l'économie locale lorsque la ressource est disponible. Elle crée des emplois liés à la manutention, au transport et à la distribution;
3. La technologie liée de chauffage à la biomasse est éprouvée et présente sur le marché résidentiel.

4. Réduction de coûts combustibles. Le tableau 1.1 montre une comparaison entre les autres sources d'énergie et la biomasse.

Tableau 1-1 Comparatif de prix selon divers combustibles
Tirée de Guillemette Énergies (2011)

Combustible	Unité	Btu	Coût unitaire ⁽¹⁾ (taxes incluses)	1 M Btu	Efficacité ⁽²⁾	Coût réel 1 M Btu
Bois dur	Corde 16 po	8 000 000 ⁽³⁾	80,00 \$	10,00 \$	60.00%	16,67 \$
Mazout	litre	36 650	1,11 \$	30,29 \$	75.00%	40,38 \$
Gaz naturel	m cube	35 940	0,71 \$	19,75 \$	90.00%	21,95 \$
Propane	litre	24 200	0,74 \$	30,58 \$	90.00%	33,98 \$
Électricité	kW	3 413	0,083 \$	24,32 \$	100.00%	24,32 \$
Granules	sac 40 lb	340 000 ⁽³⁾	7,00 \$ ⁽⁴⁾	20,59 \$	85.00%	24,22 \$

1- Selon AEE (exc. granules), mars 2011.
2- Variable selon appareil ou système.
3- Variable.
4- Les prix ont beaucoup fluctués dans le passé. Les granules en vrac peuvent revenir à beaucoup moins, le prix étant alors calculé à la tonne.

Pour la production d'ECS, le système doit être composé d'éléments suivants :

1. Réserve de combustibles dans laquelle le combustible est gardé. Un système d'approvisionnement qui peut être manuel ou mécanique pour le transfert des particules combustibles vers la chambre de combustion;
2. Chambre de combustion dans laquelle se déroule le processus chimique de combustion. Elle comporte une alimentation en air d'une sortie pour les gaz chauds et d'un évacuateur de cendre;
3. Un échangeur de chaleur dans lequel l'énergie dégagée par combustion est transférée à l'eau chaude sanitaire;

4. Un réservoir isolé qui gardera l'eau chaude pour quelques jours;
5. Un réseau d'eau chaude qui passe à travers un radiateur pour du chauffage ou servir à la production d'eau chaude sanitaire;
6. Un système d'élimination de cendres qui permet d'éliminer les cendres lourdes et volatiles;
7. Une cheminée d'évacuation des gaz;
8. Les instruments de régulation et de contrôle de l'oxygène (Sondes à Oxygène) de la chambre de combustion. Ils permettent d'optimiser la teneur en oxygène et des gaz des combustions.

Au Québec, la norme qui régit les installations des systèmes à la biomasse est la CSA B415.1-10. L'obtention d'un permis ainsi que l'aide d'un professionnel peuvent être requises pour l'installation d'une chaudière à la biomasse. Dans cette section, il sera question de décrire les principaux critères considérés dans l'industrie pour produire de l'eau chaude sanitaire avec de la biomasse.

1.4.1 Choix du combustible

Dans le but de produire de l'eau chaude sanitaire, le choix du combustible est primordial. Il faut tenir compte de la disponibilité du combustible, de son pouvoir calorifique, de sa teneur en eau et de son prix. Le Tableau 1-2 présente la synthèse des différents combustibles ainsi que leur pouvoir calorifique. Il est possible de constater que le matériau qui offre le plus bas taux en humidité et la meilleure énergie produite en MJ/kg est la granule de bois à 14,5 MJ/kg. Cependant, selon le prix des différents combustibles il est possible de constater que le coût pour 1 MBtu est supérieur à celui du bois.

Tableau 1-2 Type de combustible vs Pouvoir Calorifique
Tirée de Guillemette Énergies (2011)

A1.3 : Comparaison des caractéristiques énergétiques des biocombustibles						
Type de biocombustible	Teneur en humidité % en poids humide	Teneur en cendres % en poids sec	Teneur en combustible kg de combustible sec exempt de cendres par kg de combustible, dans ses conditions d'utilisation	Pouvoir calorifique supérieur (PCS) MJ par kg de combustible sec exempt de cendres	Rendement de l'appareil % calculé selon le PCS du combustible	Énergie produite MJ par kg de combustible, dans ses conditions d'utilisation
Copeaux d'arbres entiers (bois vert, bois mou)	50	1,2	0,494	20,9	62	6,4
Fragments de bois (bois dur séché à l'air)	20	0,8	0,749	19,6	73	11,4
Sciure de bois / planures de bois (bois dur séché au four)	8	0,5	0,915	19,5	76	13,6
Paille (séchée à l'air)	15	6,2	0,797	19,4	74	11,4
Granules	7	1,0	0,921	20,7	76	14,5

Dans le Tableau 1-3, il est possible de comparer la puissance calorifique des granules et des bûches fendues de façon détaillée. En termes de taux d'humidité, les granules de bois ont un taux variant de 4 à 8 % tandis que celui des bûches fendues est supérieur à 20 %. Les avantages des combustibles granulés comparativement aux bûches fendues sont les suivants :

1. La chaleur dégagée des granules est plus constante;
2. L'humidité des granules est plus faible;
3. Le combustible est déjà prêt à être utilisé, car il exige moins de manutention (coupe, entreposage);
4. Les granules dégagent moins de particules fines donc sont moins polluantes pour l'environnement;

Tableau 1-3 Granules de bois versus les bûches
Tirée de Guillemette Énergies (2011)

	Granulé normé	Bûches fendues
Taux d'humidité	4 à 8 %	20 % ou plus
Btu/lb	8 000 - 9 000 Btu/lb	6 000 - 8 000 Btu/lb
Efficacité de combustion (variable selon chambre de combustion)	85.00%	60.00%
Particules fines émises par kg de combustible à l'heure	0,5 à 2 g	1,3 à 6 g
Gaz à effet de serre	CO2 neutre	CO2 neutre
Pourcentage de cendre	moins de 0,5 %	3.00%
	● La chaleur dégagée est constante. ● Aucune impureté ou écorce et moins d'humidité, donc plus de pouvoir calorifique et moins de cendre. ● Fonctionnement de chaudière automatisé. ● Moins de particules fines dégagées donc moins polluant. ● Matière propre, peut être stockée à l'intérieur. ● Espace de stockage réduit	● Pics de chaleur selon chargement(s) ● Très humide, beaucoup d'impuretés donc plus de cendre et moins de pouvoir calorifique. ● Demande beaucoup de manipulation. ● Plus de fumée dégagée, donc plus polluant et risque d'accumulation de créosote. ● Insectes, moisissures, saletés et humidité élevée rendent le stockage à l'intérieur problématique. ● Espace de stockage important.

1.4.2 Performances des chaudières à granules

Outre le choix du combustible, il faut tenir compte des critères de performance des appareils sur le marché. Les critères de performance sont établis à partir de la norme CSA B415.1-10 (Essais de Performance des Appareils de Chauffage À Combustible solide). Il existe sur le marché une grande variété de chaudières à granules et à bois. Les critères de performances divergent d'une compagnie à l'autre. Cependant, le tableau 1.4 présente un exemple des informations que l'on peut retrouver sur les fiches techniques des fabricants :

Tableau 1-4 Exemple d'informations techniques chaudières à la biomasse

Marque Chaudière	Edison (DP 00065)	Bilovax (LS450)	Bilovax (LS950)	Chaudière bois Bilovax (LS150)	Chaudière au granule Maxim 255 PE
Coût d'achat approximatif	5000\$	13 425 \$	17 795 \$	7 775 \$	11 995,00\$
Combustible	Granules de bois	Bois ou bois- électrique	Bois ou bois- électrique	Bois ou bois- électrique	Granules de bois
Superficie de chauffage re- commandée	500 à 1800 pi ²	6000 pi ²	10 000 pi ²	3500 pi ²	7000 pi ²
Capacité du trémis	60 lb (27 kg)	150 lb(64kg)	220 lb(100kg)	60 lbs(27 kg)	600 lb (270kg)
Puissance thermique maximale	45,600 BTU/h (13.4 kW)	130 000 BTU/h	100 000 Btu/h à 150 000 Btu/h	45000 Btu/h	212 000 Btu/h
Capacité d'eau		60 gallons (227l)		25 gallons (95 l)	90 gallons (340 l)
Poids	384 lb (174 kg)	2380 lb(1079 kg)	3600 lbs(1630 kg)	995 lb(450 kg)	1310 lb

1.5 Récents développements en chauffage de l'ECS à la biomasse

Dans cette section il sera question de citer quelques études qui portent sur le chauffage avec la biomasse.

1. (Rohmah, Pikra, & Salim, 2013)

Dans cette étude il est question de produire de l'électricité à base d'épis de maïs en utilisant le système de génération d'électricité ORC (Organic Rankine Cycle). Le but est de produire de l'électricité dans les régions rurales de l'Indonésie. Les variables indépendantes de cette étude sont la température du liquide caloporteur qui varie de 110 à 130°C, le débit du fluide qui varie entre 100 à 200 l/min. Pour ce projet, un générateur de type R141b fonctionnant avec de l'huile de palme comme liquide caloporteur a été sélectionné et l'eau comme liquide réfrigérante. Cette étude a montré que la puissance de turbine théorique la plus élevée, l'efficacité thermique et l'exigence de surface de culture de maïs sont respectivement, 8,5 kW, et 101,1 hectares/an. Tous ces résultats les plus élevés sont obtenus à la valeur la plus élevée de température et de débit, 130 °C et 200 litres/minute.

2. (Carneiro et al., 2017)

Ce travail présente les données à la suite d'une étude d'une chaudière de laboratoire avec une chambre de combustion cyclonique équipée d'un calorimètre. Le but de cette étude est de mesurer la qualité de la vapeur dégagée par le système afin de minimiser l'émission de CO (monoxyde de carbone). Les données mesurées permettent de quantifier le rendement thermique de la chaudière et la concentration des particules gazeuses dégagées par le système. Des expériences ont été réalisées en utilisant comme combustible la sciure de bois issue de la plante *Cedrella fissilis* préalablement caractérisée. Les résultats ont montré une efficacité thermique de 44 %, une conversion d'énergie de la biomasse par combustion de 98 % et les émissions de CO ont baissé à environ 139 ppm (partie par million) comparativement à la moyenne qui va de 165 à 3381 ppm.

3. (Kortela & Jämsä-Jounela, 2017)

Dans le cadre cette étude, les auteurs proposent un concept pour améliorer la capacité de suivi de charge des chaudières à grille existantes. Un modèle de concept de contrôle prédictif (MPC) basé sur un capteur de puissance de combustion a été développé. Le modèle proposé, qui utilise la stratégie de contrôle prédictif, est testé avec les données de la centrale de cogénération BioPower 5. Le logiciel MATLAB a été utilisé pour le développement du code MPC. Les paramètres d'évaporation de l'eau, la décomposition thermique du combustible ont été déterminés grâce aux données de la centrale de cogénération BioPower 5. Selon les résultats obtenus des simulations de l'étude, des améliorations significatives sur le contrôle des variables critiques du processus de combustion ont été obtenues.

4. (Hou, Che, Liu, & Jiang, 2018)

Les auteurs étudient un système dans le but de récupérer la chaleur résiduelle des gaz de combustion et recueillir l'eau condensée. Le logiciel Aspen Plus a été utilisé pour modéliser le système. Un projet de chauffage de 31,5 MW de puissance installée couvrant une surface de chauffage de 400 000 m² a été utilisé comme cas pratique. Les résultats ont montré que le nouveau système de chaudière à pompe à chaleur à absorption peut faire chuter les fumées à 30°C. De plus, avec le nouveau système, la chaleur des gaz de combustion peut être récupérée et l'efficacité de la chaudière peut être considérablement améliorée. En ce qui concerne les tests sur le projet 31,5 MW, les résultats montrent que 13 793,84 MJ de chaleur sont récupérés par heure et que 1,14 million de mètres cubes de gaz naturel seront économisés dans une saison de chauffage.

5. (Palomba et al., 2020)

Dans cet article, les auteurs analysent le remplacement des chaudières centrales à combustibles fossiles (mazout, gaz de pétrole liquéfié et gaz naturel) par des chaudières centrales à biomasse afin de répondre aux besoins en chauffage et en eau chaude sanitaire de plusieurs immeubles en Espagne. Pour se faire, cinq villes situées dans des zones climatiques différentes ont été considérées. Par suite d'une analyse énergétique, environnementale et économique

approfondie menée, il a été possible de constater une réduction allant jusqu'à 93 % de la consommation d'énergie primaire non renouvelable. De plus, il a été possible de constater une diminution 94 % des émissions de CO₂. Ce qui se traduit par des notes de certificat de performance énergétique meilleure et plus élevée. Malgré l'investissement nécessaire, des économies de coûts sont réalisées. Les économies sont plus importantes avec la sévérité croissante des conditions hivernales dans les régions plus froides.

6. (Wang et al., 2020)

Dans cette étude, l'auteur propose une conception qui améliore les performances des chaudières à la biomasse qui utilisent des briquettes. La problématique est que les chaudières à biomasse utilisant des briquettes en Chine ont plusieurs défauts de conception, d'alimentation en combustible ainsi que de contrôle de combustion. Ces défauts de conception sont dus au fait que pour la conception de ces chaudières, le modèle de four unique des chaudières à charbon a été copié. Cette façon de concevoir les chaudières à la biomasse ne permet pas de contrôler efficacement la combustion et produit des rendements thermiques médiocres. Il est aussi question de décrire les critères de performance des chaudières tels que la puissance thermique de la chaudière, le rendement de la chaudière et les pertes thermiques pendant la combustion. Cinq types de pertes thermiques ont été identifiés et sont les suivantes: les pertes dues au gaz d'échappement, les pertes dues aux gaz non brûlés, les pertes dues aux matières solides non brûlées, les pertes radiatives et convectives enfin les pertes dues à l'émission de cendres. L'étude a donc permis de concevoir une chaudière avec une puissance thermique 12 kW et un rendement de 84,68 %.

7. (Las-Heras-Casas, López-Ochoa, Paredes-Sánchez, & López-González, 2018)

Dans cet article, il est question d'explorer le remplacement des chaudières utilisant l'énergie fossile par des chaudières à la biomasse pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire des immeubles à logement. Il faut noter qu'en Espagne la consommation d'énergie pour un logement représente en moyenne 47 % pour le chauffage et 19 % pour la production d'eau chaude sanitaire. Ces études ont été menées sur des immeubles situés dans cinq villes

différentes (Cadiz, Valencia, Cáceres, Madrid, et Léon) ayant une superficie moyenne de 484 m² dont chaque étage a une hauteur de 3 m. Le logiciel utilisé pour la simulation est HULC (2016) dont les puissances des chaudières vont de 160 kW à 220 kW avec une demande en ECS de 1870 l/jours. En ce qui concerne le remplacement des chaudières existantes par des chaudières à la biomasse, la période de retour sur investissement est plus faible dans les régions plus froides (3 à 5 ans) que dans les régions plus chaudes (12 à 14 ans). Au-delà du coût d'investissement pour le remplacement par une chaudière à la biomasse, les périodes de retour sur investissement sont de 3 à 6 ans lorsque l'on remplace une chaudière à huile, de 4 à 7 ans lors du remplacement d'une chaudière LPG (liquefied petroleum gas) et entre 12 à 20 ans lors du remplacement d'une chaudière au gaz naturel.

8. (Kreft, 2020)

Dans cet article, il est question de proposer un modèle mathématique du processus de production d'énergie thermique d'une chaudière à la biomasse munie d'un réservoir tampon qui utilise de la paille comme combustible. Pour la simulation de la production thermique, le logiciel Matlab/Simulink a été utilisé. Par la suite, ce modèle a été vérifié à l'aide d'expérience de combustion de paille dans l'installation située au laboratoire de l'université des sciences et technologies AGH. La modélisation tient compte du processus physique qui est le transfert thermique entre la chambre de combustion et la chemise entourant la chambre de combustion et remplie d'eau et du phénomène chimique qui résulte de la combustion de la paille dans la chambre de combustion. Pour donner suite aux simulations et à la comparaison avec le modèle expérimental, des écarts ont été constatés dans la première phase expérimentale. Ces écarts sont dus au fait que les équations ne prennent pas en compte tout de la complexité de combustion de la paille. Pour en arriver à de meilleures corrélations entre le modèle mathématique et le modèle expérimental, il faudrait examiner de plus près le processus de combustion de la paille en prenant en compte le facteur de vitesse variable de la combustion.

Au regard des études citées, il est possible de dire que la technique de chauffage à la biomasse peut s'appliquer partout dans le monde des régions rurales aux régions urbaines. En effet, les

articles ont démontré que d'utiliser des épis de maïs comme combustibles dans les régions rurales ou d'utiliser des granules de bois dans les régions urbaines était tout à fait réaliste. De plus, le remplacement des chaudières utilisant les énergies fossiles comme combustibles par des chaudières à la biomasse permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Certaines études ont permis d'estimer des périodes de retour sur investissement plus faibles dans les régions plus froides que dans les régions plus chaudes, en Espagne, lorsque l'on remplace des chaudières qui utilisent les énergies fossiles par des chaudières à la biomasse (Las-Heras-Casas et al., 2018). Cependant, le choix du combustible doit être adéquatement choisi en fonction de la disponibilité et du pouvoir calorifique. La chaudière doit permettre le contrôle adéquat de la combustion du combustible dans la chambre de combustion, avoir un rendement énergétique adéquat et émettre le moins possible des gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4 , N_2O etc.).

1.6 Production d'eau chaude sanitaire en combinant solaire et biomasse

Dans la littérature, il est possible de retrouver quelques études récentes qui font la combinaison du solaire et de la biomasse. Parmi ces études, il est possible de noter des systèmes qui fournissent à la fois de l'eau chaude sanitaire et de la chaleur. Dans les lignes qui suivent, il sera question de présenter quelques études récentes qui ont utilisé les mêmes outils que ce mémoire pour la production d'ECS et de chaleur. Parmi ces études, il est possible de citer les études suivantes :

1. (Sibley & Sibley, 2015)

Dans cette étude, il est question de proposer des solutions de production d'eau chaude sanitaire afin de moderniser les hammams traditionnels au Maroc. Dans un premier temps, l'auteur énonce les principaux facteurs qui permettent d'améliorer les performances d'une chaudière traditionnelle. Dans un second temps, l'auteur fait la comparaison entre les rendements des chaudières traditionnelles dont la consommation est de 1 à 2 tonnes de bois par jours (166 tonnes par an) et des chaudières modernes qui permettent de réduire la consommation de bois 80 %. Pour finir, il est question de combiner l'énergie solaire et la biomasse dans le but de

produire de l'eau chaude sanitaire. Pour ce qui est du fonctionnement du système hybride (solaire et biomasse), l'eau est préalablement chauffée dans le collecteur et par la suite, l'eau chaude est acheminée à la chaudière à biomasse. Ce système hybride (solaire et biomasse) est composé de 100 m² de capteurs solaires et une chaudière à la biomasse. La puissance totale du système est de 272 kW. L'utilisation des panneaux solaires a permis de réduire la consommation de bois de 500 kg par jour et par la même occasion réduire la consommation de CO₂ de 900 kg. Le retour sur investissement calculé par l'auteur est de quatre ans.

2. (M. Krarouch, Hamdi, Lamghari, & Outzourhit, 2018)

Dans cette étude il est question de faire des simulations avec le Logiciel TRNSYS d'un système hybride solaire et biomasse dans le but de répondre à la demande en chauffage d'un Hammam situé au Maroc. Le système hybride est composé de six collecteurs à auge parabolique (PTC) de 6 kWc et de deux chaudières à la biomasse ayant chacune une puissance de 115 kW. Cette installation permet de chauffer deux planchers de superficie respective de 29,6 et 33 m². Une température (60 °C) de consigne a été programmée au niveau du ballon de stockage de sorte que lorsque la température est plus basse que la consigne, la chaudière à la biomasse se mette à fonctionner afin de chauffer l'eau du ballon. Les simulations ont permis de démontrer que le jour le système fonctionne avec le système solaire et la nuit la chaudière à la biomasse commence à fonctionner lorsque la température dans le ballon stockage baisse en dessous de 60 °C.

3. (Tian, Perers, Furbo, & Fan, 2018)

Cette étude a pour objectif de réduire les coûts de l'installation et l'augmentation des performances thermiques de la centrale solaire de Taars ayant une superficie de collecteurs totale de 9999 m² situés au Danemark. Cette centrale est composée de collecteurs à auge parabolique (4039 m²) et des collecteurs plans (5969 m²) et couvre la demande en chaleur (20167 kW/an) de 850 immeubles et environ 1900 résidents. L'optimisation visée est la réduction des coûts de l'installation et l'augmentation des performances thermiques. Le logiciel de simulation TRNSYS 17 a été utilisé avec les composantes telles que collecteurs

plan, collecteurs à auge paraboliques, les réservoirs de stockages de 2430 m³ ainsi qu'une chaudière au gaz de 9100 kW. L'étude a permis de montrer que l'orientation optimale pour les collecteurs plans est de 35° et que l'orientation optimale des collecteurs à auge parabolique est du côté E-W(Est-Ouest). Il a aussi été possible de démontrer une réduction de coût de production de chaleur de 5 à 9 %.

4. (Lugo, García-Valladares, Best, Hernández, & Hernández, 2019)

Dans cette étude il est question de faire des simulations numériques et une validation expérimentale d'un système de chauffage (chauffage de confort et eau chaude sanitaire) composé d'une chaudière à gaz et de capteurs solaires thermiques. Le dispositif expérimental utilisé est composé de 18 capteurs solaires sous vide, d'un réservoir de stockage de 700 l, d'un système de chauffage électrique axillaire de 10 kW et un échangeur couplé à un refroidisseur de 25 kW. Le modèle expérimental a été mené à l'université nationale et autonome de Mexico. L'université est située à une altitude de 1219 m au-dessus de la mer, une température moyenne annuelle de 23,1 °C et une irradiation solaire annuelle 20,28 MJ/m². Les écarts moyens entre le modèle théorique et expérimental étaient de $\pm 3,6$ % pour les températures et de $\pm 5,6$ % pour les énergies utilisées au niveau du réseau de capteurs. De plus, le modèle numérique et expérimental a été utilisé afin d'étudier l'apport solaire d'un système composé d'un capteur solaire thermique, d'un système de stockage thermique et un système de refroidissement par adsorption de 8 kW. Les résultats obtenus sont une fraction solaire annuelle de 86 %. L'étude a aussi permis de démontrer la faisabilité de projets hybrides dans la ville de Mexico avec une période de retour sur investissement allant de 38 mois (avec subvention gouvernementale de 30 %) à 51 mois.

5. (Mohamed & Michel, 2020)

Dans cet article, il est question de combiner des collecteurs plans vitrés et une chaudière à la biomasse dans le but de produire de l'ECS pour un hammam grâce à un système hybride. L'auteur s'est servi du logiciel TRNSYS pour la simulation dynamique du système sur une période d'un an (8760 h) avec un pas de temps de 30 s. La consommation typique en ECS du

hammam étudié varie entre 7 m³ en été et 40 m³ en hiver. Le système hybride solaire et biomasse est composé de deux ballons stockage d'ECS. Le ballon 6 m³ est relié à la chaudière et 3 m³. La chaudière à la biomasse est connectée au ballon de stockage de 6 m³ tandis que le collecteur plan vitré est connecté au ballon de 3 m³. Plusieurs critères sont utilisés par l'auteur pour l'évaluation de la performance et la rentabilité du système pour un cycle de vie de 20 ans. Le premier critère est la fraction solaire (FS) qui évalue la portion de l'énergie solaire dans le système. Les autres critères sont des critères économiques tels que le LCS (Life-cycle saving) et le PBP (Payback period). Les résultats de l'analyse ont permis de démontrer des économies selon le LCS de 82,7 k€ pour une surface de collecteur de 213 m² et une fraction solaire variant de 22 (hiver) à 80 % (été). La période de retour sur investissement est calculée à 6,8 ans

6. (Mohamed Krarouch, Ruesch, Hamdi, Outzourhit, & Haller, 2020)

L'objectif de cette étude est d'évaluer les performances énergétiques et les avantages économiques d'un système qui combine des collecteurs à auge parabolique (PTC) et une chaudière à granules. Le système sert à fournir de l'eau chaude sanitaire à un Hammam du nom de Ajiad situé dans la ville de Marrakech au Maroc. La demande en ECS du site est de 38 m³ en hiver et 7 m³ en été pour environ 250 visiteurs par jour. La puissance de la chaudière dans le cadre de cette étude est de 230kW. La production énergétique annuelle pour cette demande en ECS est d'environ 400 MWh. Les auteurs se sont servis du logiciel TRNSYS pour modéliser le projet avec deux configurations Cn1(sans valve d'eau froide) et Cn2 (avec valve d'eau froide). Les principaux indicateurs de performances utilisés étaient :

- La fraction solaire (f_s) qui permet d'évaluer l'apport solaire du système;
- La fraction des économies d'énergie basée sur le carburant économisé ($f_{sav,therm}$). Il s'agit des économies faites sur la quantité de granules d'oliviers du système actuel (solaire thermique et biomasse de chaudière) par rapport à un système de chauffage non solaire.

De plus, une analyse de coût par rapport au cycle de vie du système a été réalisée afin d'optimiser le dimensionnement du système solaire thermique.

Le coût le plus bas du système a été obtenu avec une surface de capteurs solaires de 288 m² et une fraction solaire de 58 %. Avec la configuration finale, une économie annuelle de 5 593 € peut être réalisée par rapport au système de référence.

7. (Mohamed Krarouch, Lamghari, Hamdi, & Outzourhit, 2020)

L'objectif principal de cette étude est d'étudier l'influence du système solaire hybride sur le comportement thermique du Hammam pendant la période hivernale où le chauffage est nécessaire afin d'atteindre la température de confort (46°) pour les bains publics. Les simulations ont été faites pour les mois janvier et décembre qui sont les mois les plus froids avec une température moyenne de l'air de 12 °C et 13 °C respectivement. De plus, d'autres aspects étaient étudiés tels que l'influence de la conductivité des tubes de chauffage et la distance entre les tubes et la surface du sol. Le rayonnement solaire total à Marrakech sur un plan horizontal allant de 3 à 3,6 kWh/m²/jour. L'indicateur de performance étudié est la température à la surface du sol du hammam. Cette étude a permis de démontrer que le système à la biomasse est non fonctionnel durant la journée et s'active lorsque la température à l'intérieur du ballon de stockage descend sous de 60 °C. L'analyse montre aussi qu'il n'y a aucune différence significative de température lorsque des tubes en cuivre ou en Polyéthylène (PEX) sont utilisés. Cependant, il a été démontré que plus la distance entre le tube et la surface est faible plus la température du plancher du hammam est supérieure à la température de confort de 46 °C.

8. (Palomba et al., 2020)

Cette étude consiste à démontrer les potentialités d'un système hybride basé sur des capteurs solaires thermiques, une chaudière à biomasse et un concept innovant de pompe à chaleur hybride réversible. Le but du système est de répondre à la demande en chauffage, de refroidissement, d'eau chaude sanitaire et d'électricité des bâtiments résidentiels. Le potentiel est étudié dans trois villes qui sont Madrid, Berlin et Helsinki. Ces villes représentent les différents climats rencontrés en Europe. Dans cette étude, les auteurs font opérer les systèmes en fonction des saisons et des climats rencontrés. Le système proposé offre une grande

flexibilité en fonction des saisons et a été modélisé grâce au logiciel TRNSYS pour un usage dans les bâtiments standards (SB) et dans le nouveau bâtiment rénovés (NRB). Les principaux résultats de l'analyse énergétique sont les possibilités d'atteindre des fractions solaires pour l'ECS extrêmement élevées (supérieure à 80 %) dans les climats nordiques. De plus, le système offre la possibilité de couvrir une large part de la demande de chauffage jusqu'à 60 % à Madrid et jusqu'à 30 % à Berlin et Helsinki grâce à la chaleur solaire. Un enjeu clé démontré dans cette étude est le besoin de stratégies de contrôle optimisées capables de prédire et de piloter le fonctionnement de systèmes complexes sur la base de la demande énergétique du bâtiment, la demande des utilisateurs et les conditions climatiques.

9. (Zemann et al., 2020)

Dans cet article, les auteurs proposent une stratégie de contrôles qui considère tous les éléments y compris l'utilisateur et les prévisions de rendements pour un système de chauffage central composé d'une chaudière à bois et d'un système de capteur thermique. La stratégie de contrôle apprend en permanence du comportement de l'utilisateur et indique à l'utilisateur quand recharger la chaudière à bûche. La stratégie de contrôle proposée a été vérifiée sur un modèle expérimental composé d'une chaudière à bûche 28 kW de puissance nominale, de deux ballons de stockage de 1,5 m³ et un dispositif de chauffage thermique utilisant des capteurs solaires de 12 kW. La nouveauté de cette étude est la prise en compte du comportement de l'utilisateur dans le rendement global du système. La qualité de combustible de biomasse et le moment de les remplir sont donnés à l'utilisateur en fonction de ses habitudes. L'algorithme est optimisé en fonction du comportement de l'utilisateur et les propriétés du carburant et adapte la stratégie d'exploitation en conséquence. De façon générale, cette approche a permis d'augmenter le rendement global du système de 3.1 %, réduire les émissions de monoxyde de carbone (CO) de 93,6 % comparativement aux stratégies de contrôle utilisées par les fabricants dans l'industrie.

10. (Mehregan, Abbasi, Khalilian, Majid Hashemian, & Madadi, 2021)

Cette étude a pour objectif de faire une analyse technique et économique d'un système combiné dans le but de produire de la chaleur, du refroidissement et de l'électricité (CCHP). Le système CCHP est composé d'un moteur à gaz à combustion interne à piston d'une puissance de 1253 kW, d'une chaudière au gaz, d'un système de collecteurs plan vitrés, d'un système de refroidissement par absorption et d'un système de refroidissement électrique. L'étude de cas s'est déroulée sur le bâtiment de la faculté d'ingénierie de l'université de Shahrood en Iran. Pour l'étude, quatre scénarios ont été choisis par l'auteur. Pour le premier scénario, le moteur à gaz avec une capacité fixe de 1253 kW et les collecteurs plans fournissant 100 % de la demande en chauffage. Pour le deuxième scénario, le moteur à gaz avec une capacité fixe de 1253 kW, les collecteurs plans fournissent 75 % de la demande en chauffage tandis que la chaudière auxiliaire au gaz fournit 25 % de la demande en chauffage. Pour le troisième scénario, le moteur à gaz avec une capacité fixe de 1253 kW, les collecteurs plans fournissent 50 % de la demande en chauffage tandis que la chaudière auxiliaire au gaz fournit 50 % de la demande en chauffage. Pour le quatrième scénario, le moteur à gaz avec une capacité fixe de 1253 kW, les collecteurs plans 125 % de la demande en chauffage tandis que la chaudière auxiliaire au gaz fournit 75 % de la demande en chauffage. Le scénario un a été sélectionné comme celui qui offrait une efficacité de 97 % pour la combinaison de chauffage, refroidissement et fourniture d'électricité. L'efficacité du scénario 1 passe à une efficacité de 69 % pour une combinaison de chauffage et refroidissement. Le scénario 1 offre aussi une réduction de coût de 56,14 % une économie de carburant de 40,64 % et un taux de retour sur investissement 40,59 %.

1.7 Conclusion

Au regard de ce qui a pu être trouvé dans la littérature, avec les changements climatiques, il y a une volonté mondiale d'intégrer les énergies renouvelables dans les besoins quotidiens. Les critères de conception des systèmes hybrides pour la production d'ECS doivent prendre en compte l'intermittence du soleil en incorporant une température de consigne afin que le système auxiliaire (utilisant la biomasse, énergie fossile, etc.) prenne la relève en cas de manque de soleil. La combinaison de l'énergie solaire et de l'énergie à la biomasse n'est pas le seul possible. Plusieurs études ont démontré que le besoin énergétique peut être couvert par plusieurs sources d'énergie, comme le solaire, l'électricité, la biomasse et aussi des énergies fossiles.

De plus, pour la production d'eau chaude sanitaire avec un système hybride solaire et biomasse, les critères suivants doivent être intégrés dans le logiciel de simulation TRNSYS :

- La localisation géographique du projet;
- Le profil de consommation d'ECS de la population ciblée;
- Les paramètres de rendement du capteur;
- La puissance thermique délivrée par la chaudière à la biomasse;
- Les dimensions du système de stockage d'eau;
- Un système pour contrôler de la température de l'eau dans le système;
- Un système pour contrôler la distribution de l'eau dans le système;

De plus, les indicateurs de performances du système doivent clairement être définis. Dans la littérature, il a été possible de relever des critères de performances énergétiques ainsi que des critères de performances économiques afin de s'assurer de la rentabilité du système.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

2.1 Localisation géographique

La localisation donne l'information climatique du lieu ainsi que les données d'irradiation. Dans le cadre de cette étude, le type 15 de la bibliothèque du logiciel TRNSYS sera utilisé. Cette composante a pour but de lire les données à partir d'un fichier météorologique et d'interpoler les données du rayonnement solaire sur une surface inclinée. Le type 15 calcule aussi la température de l'eau du réseau et la température effective du ciel. Pour l'analyse de sensibilité du système de production solaire, c'est dans le type 15 que l'on modifie l'angle d'inclinaison et l'orientation du capteur.

2.2 Le profil de puisage

La production d'ECS doit répondre à un besoin de consommation. Pour cela, il est requis d'établir un profil de puisage selon les informations du consommateur. Les Tableau 2-1 à Tableau 2-3 présentent des exemples d'informations qui peuvent se retrouver dans un profil de consommation d'ECS d'une population donnée.

Tableau 2-1 Hypothèse de profil de consommation ECS en considérant les vacances
et une consommation d'eau de 200 L/ jour

Profil de puisage	
Type d'habitation	Maison Unifamiliale
Nombre d'habitants	4
Durée du profil (jours)	365
Pas de temps du profil (heures)	1
Période de vacances (Québec) Vacances de la construction du 18 au 31 juillet Vacances de fin d'année 19 décembre au 1er janvier	28 j
Débit de consommation ECS/Moyen par personne (litres/jours)	200
Débit de consommation ECS période vacances (litres/jours)	100
Ratio consommation semaine/fin de semaine	120
Amplitude de la fonction sinus	10 %
Jour de consommation max	45
Température eau froide Québec hiver (°C)	5
Température eau froide Québec été (°C)	18

Tableau 2-2 Répartition de consommation ECS selon les données de base du logiciel DH-calc 2-02b

Catégories	Cat A Petite consommation	Cat B Consommations moyennes	Cat C (Bain)	Cat D (Douche)	Total
Répartition consommation	21 %	34 %	17 %	25 %	100 %
Débit en l/min	1	6	14	8	
Durée de puisage en min	1	1	10	5	
Volume/jours	48	68	34	50	200

Tableau 2-3 Ratio de consommation selon le volume du logiciel DHW.CAL

Heures en semaine	Ratio	Heures en fin de semaine	Ratio
22:00-06:30	2 %	23:00-07:00	3.8 %
06:30-07:30	50 %	07:00-09:00	47.5 %
07:30-12:00	6 %	09:00-15:00	7.1 %
12:00-13:00	16 %	15:00-17:00	23.8 %
13:00-18:00	6 %	17:00-20:00	3.6 %
18:00-22:00	20 %	20:00-23:00	14.3 %

Pour le calcul du volume d'eau chaude annuel consommé par une population donnée, il est possible de prendre en compte les hypothèses montrées dans les tableaux (Tableau 2-1, Tableau 2-2 et Tableau 2-3). La

Figure 2-1 présente le profil de consommation d'eau à la suite de l'intégration des hypothèses dans le logiciel d'estimation de consommation de DH-calc_2-02b. Il faut noter (sur la Figure 2-1) une baisse de consommation d'ECS durant les périodes de vacances. En faisant la somme du volume d'eau consommé de façon journalière, le volume de consommation d'ECS total annuelle est de 73 m³. Il faut noter que le profil de consommation montré à la Figure 2-1 a été généré à titre d'exemple afin de montrer à quoi ressemble le profil de consommation d'une famille de quatre habitants au Québec cependant ces données n'ont pas été utilisées dans nos simulations.

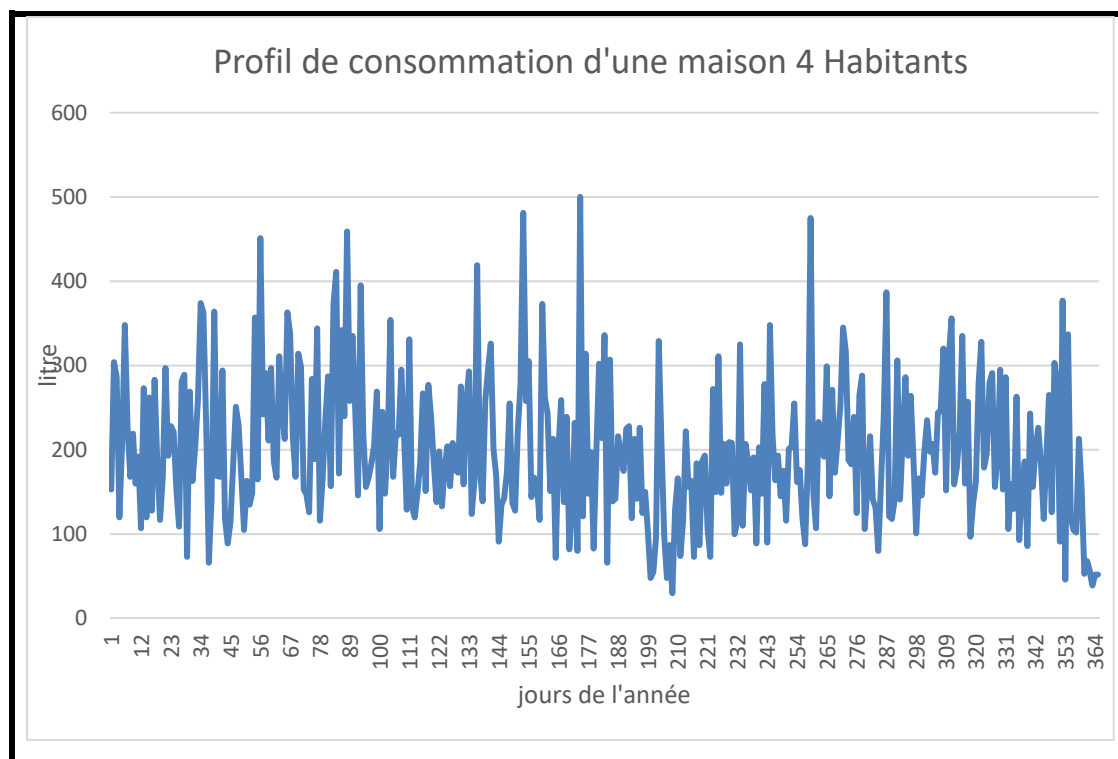


Figure 2-1 Exemple du profil de consommation d'une maison quatre habitants

2.3 La consommation d'ECS en terme énergétique

Lorsque le besoin en ECS est calculé, il faut exprimer ce besoin en termes de consommation d'énergie thermique. Pour se faire, il a été question d'utiliser l'équation (2.1) de calcul d'énergie utile tirée du manuel Duffie & Beckman, (2013).

$$E_{charge} = M_w \times c_p \times \Delta T / 3600 \quad (2.1)$$

$$\Delta T = T_{eau,chaud} - T_{eau,froid} \quad (2.2)$$

Dans cette équation, M_w représente la masse de l'eau (kg), considérant une température de 25 °C la valeur de la chaleur spécifique de l'eau c_p (4,18 kJ/kg.K) et la densité de l'eau (997,13 kg/m³) pour une consommation moyenne annuelle de 73 m³ d'eau en considérant une variation de température (différence de température eau froide et eau chaude) de 50 Kelvin (K), le besoin énergétique peut se calculer de en utilisant l'équation suivante (2.3):

$$E_{charge} = M_w \times c_p \times \Delta T / 3600 \quad (2.3)$$

$$E_{charge} = 73 \times 997,13 \times 4,18 \times 50 / 3600$$

$$E_{charge} = 4225 \text{ kWh}$$

2.4 Le Type de collecteur

Selon la norme ASHRAE 93, la performance d'un capteur solaire est mesurée selon les paramètres suivants :

- Surface d'absorbeur;
- Capacité thermique du fluide;
- Angle d'azimuts et d'inclinaison du capteur;
- Irradiation totale et diffuse incidente sur le capteur;
- Irradiation à grande longueur d'onde incidente sur le capteur;
- Angle d'incidence solaire;
- Vitesse de l'air;
- Température de l'air;
- Températures d'entrée-sortie du fluide caloporteur;
- Débit du fluide caloporteur.

Les informations de performance du collecteur se retrouvent dans le certificat du collecteur solaire. Le calcul du rendement du capteur est calculé par l'équation tirée du manuel Duffie J, Beckman WWiley, (2013).

$$\eta_c = \eta_0 - \frac{a_1(\Delta T) + a_2(\Delta T)^2}{I_T} \quad (2.4)$$

Dans cette équation (2.4), η_0 représente la performance du capteur tandis que a_1 et a_2 représentent les coefficients de pertes du capteur exprimés en W/m^2K .

Le Tableau 2-4 montre un exemple de paramètres de performances du capteur selon la norme qui permet de calculer le rendement d'un capteur (ASHRAE 93). Parmi ces paramètres, il y a le coefficient de modification d'incidence (IAM) qui permet de tenir compte des variations de performance du capteur à un angle incident du rayonnement solaire (θ) non nul. Il s'agit du rapport entre la production de chaleur utile d'un capteur solaire à un angle d'incidence donné et sa production de chaleur utile à un angle d'incidence de 0 degré. L'équation (2.5) permet de calculer le coefficient IAM. Dans cette équation, b_0 est appelé le coefficient d'angle d'incidence modifié (Duffie & Beckman, 2013).

$$K_{\tau\alpha}(\theta) = 1 - b_0 \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) \quad (2.5)$$

Le capteur de type JDL-PG représente un capteur plan vitré tandis que le capteur de type SP-repréSC0611-17 représente les paramètres d'un capteur sous vide. Il est possible de constater que les coefficients de pertes thermiques a_1 et a_2 sont plus faibles au niveau du capteur sous vide.

Tableau 2-4 Informations relatives aux performances d'un capteur

Type de collecteur	η_0	$a_1(\text{W/m}^2\text{K})$	$a_2(\text{W/m}^2\text{K}^2)$	b_0	Angle d'incidence modifiée (IAM) 50°
Collecteur plan vitré JDL-PG	0.759	3.3833	0.011	0.2	0.89
Collecteur sous vide (SP SC0611-17)	0.443	0.611	0.017	0.14	0.92

Ces paramètres sont intégrés dans le logiciel TRNSYS dans les paramètres du capteur.

2.5 Le système auxiliaire

Dans le cadre de cette étude, le système auxiliaire sera un système à la biomasse. Il existe plusieurs types de brûleurs comme le présente le Tableau 1-4. Dans le cadre de ce mémoire, il sera question d'utiliser la puissance fournie par l'auxiliaire et le brancher à un tank à eau chaude dont la température de consigne sera de 60 °C. Pour que le système auxiliaire soit en mesure de fournir l'ECS au ballon de stockage en cas de besoin, il faut calculer la puissance en fonction du débit maximal de puisage.

Pour le calcul de puissance de la chaudière la biomasse, Wang et al., (2020) se sont servi de l'équation de pour calculer la puissance nominale de la chaudière à la biomasse.

$$q = m_w \times c_p \times \Delta T / 3600 \quad (2.6)$$

Dans l'équation (2.6). q représente la puissance de chauffage de la chaudière en kW et M_w représente le débit d'eau en kg/h. En considérant une température de 25 °C la valeur de la

chaleur spécifique de l'eau c_p (4,18 kJ/kg.K) et la densité de l'eau (997,13 kg/m³). La valeur de température ΔT est la différence de température entre l'eau chaude et l'eau froide.

Pour le calcul de la puissance thermique, il est possible de prendre en compte les hypothèses montrées dans les tableaux (Tableau 2-1, Tableau 2-2 et Tableau 2-3). Les hypothèses intégrées dans le logiciel DH-calc_2-02b donnent un débit horaire maximal de 245 l/h.

L'équation 2.4 présente un exemple de calcul de puissance pour un débit de 245 l/h. et une différence de température eau chaude (333,15 K) et eau froide (283,15 K) de 50K.

$$q = m_w \times c_p \times \Delta T / 3600 \quad (2.7)$$

$$q = 0.245 \left(\frac{m^3}{3600s} \right) \times 997,13 \left(\frac{kg}{m^3} \right) \times 4,18 \left(\frac{kJ}{kgK} \right) \times 50K = 14,18kW$$

2.6 Le ballon de stockage

Sur le marché des ballons de stockage, il y a différentes dimensions en fonction des besoins de consommation en ECS. Lorsque le ballon est trop petit, il est possible de manquer d'eau et lorsque le ballon est trop grand cela occasionne de plus grandes pertes thermiques. Les pertes dues au stockage des réservoirs peuvent être importantes. Sur le marché de distribution, il est possible de retrouver des ballons de stockage de grandeur suivants (RONA, 2021):

1. Appartement deux personnes ayant une capacité de 135 l pour le modèle électrique (30 gallons) et 90 l (20 gallons) pour le modèle au gaz;
2. Appartement deux à trois personnes on a une capacité de 180 l pour le modèle électrique (40 gallons) et 135 l (30 gallons) pour le modèle au gaz;
3. Maison unifamiliale trois à quatre personnes on a une capacité de 225l pour le modèle électrique (50 gallons) et 180 l (40 gallons) pour le modèle au gaz;
4. Maison unifamiliale quatre à cinq personnes on a une capacité de 270 l pour le modèle électrique (60 gallons) et 180 l (40 gallons) pour le modèle au gaz;

5. Maison unifamiliale cinq à six personnes on a une capacité de 360 l pour le modèle électrique (80 gallons) et 225 l (50 gallons) pour le modèle au gaz;
6. Maison unifamiliale six personnes et plus on a une capacité de 540 l pour le modèle électrique (120 gallons) et 340 l (75 gallons) pour le modèle au gaz;

Dans les paramètres de simulation, il faut tenir des pertes du réservoir estimées à partir du coefficient de perte du réservoir (UA exprimé en $[W/m^2K]$) de la différence de température entre l'eau dans le réservoir et la température ambiante entourant le réservoir (Duffie & Beckman, 2013). Dans le cadre de ce mémoire, les coefficients de pertes sont constants sur les trois parties du ballon de stockage. Les trois parties définies dans les paramètres du tank dans TNN SYS sont le coefficient pour le bord vertical du tank, le coefficient de perte au fond du réservoir et le coefficient de perte au-dessus du réservoir.

2.7 Le système de production d'ECS

La conception du système de production d'eau chaude sanitaire sera composée principalement des éléments suivants :

1. Collecteur solaire;
2. Ballon de stockage ou tank à eau chaude;
3. Chaudière à la biomasse.

La Figure 2-2 présente un schéma du système qui sera utilisé pour la production d'eau chaude sanitaire. Il est possible d'observer sur le graphique un panneau solaire thermique qui capte l'énergie solaire (E_{solaire}), un système de conduit qui achemine l'eau chaude du capteur vers le réservoir de stockage ($E_{\text{in, réservoir}}$). Lorsque l'eau chaude est dans le réservoir, une température de consigne est mise à 60 °C afin d'éviter la prolifération de la bactérie de la légionellose. La chaudière à la biomasse est programmée afin de fournir de l'eau chaude lorsque la température de l'eau baisse en dessous de 60 °C.

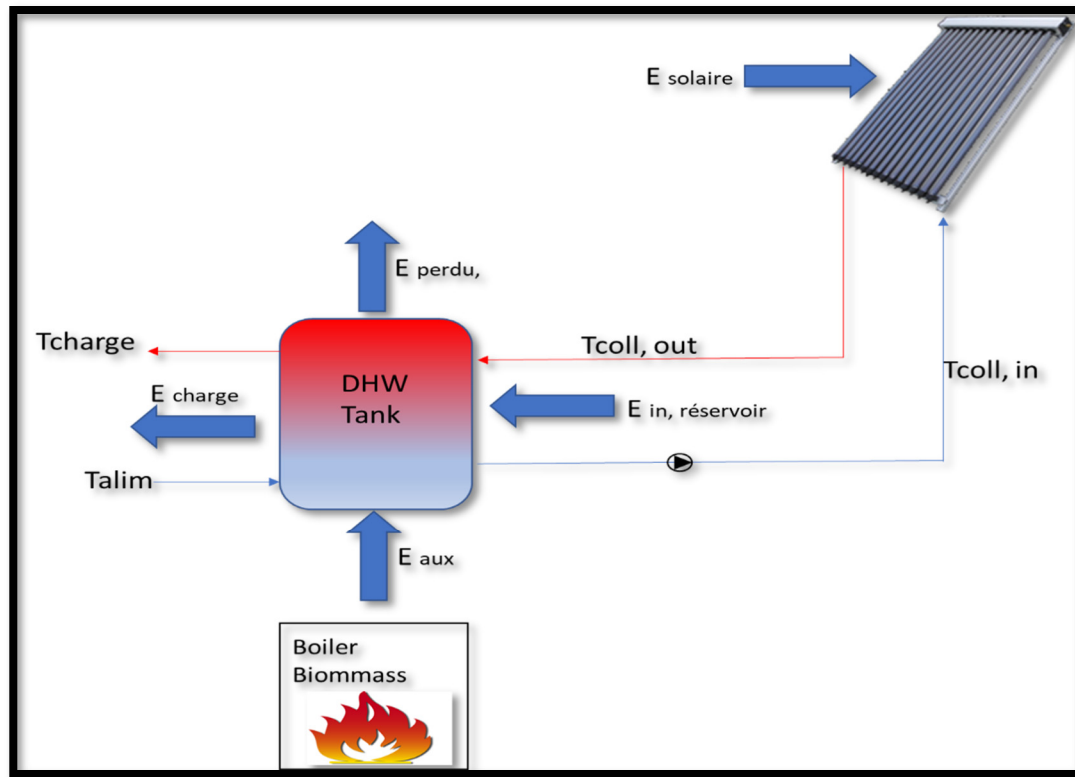


Figure 2-2 Système de production d'ECS avec Solaire bilan énergétique

Dans le but d'établir un bilan énergétique et de garder l'accent sur la production d'eau chaude sanitaire des pertes énergétiques au niveau des conduits et des pertes liés au pompage de l'eau seront négligées. Le bilan énergétique est établi par l'équation (2.8).

$$E_{charge} = E_{aux} + E_{in,réservoir} - E_{perdu,réservoir} \quad (2.8)$$

2.8 Indicateur de performance du système

Fraction solaire : La fraction solaire sera utilisée comme indicateur de performance dans le cadre de cette étude. La fraction solaire ou taux de couverture solaire représente l'économie d'énergie du système due à l'utilisation du solaire. La fraction solaire se calcule en faisant le

rapport entre la quantité d'énergie transmise au stockage par l'échangeur solaire et l'énergie totale pour la fourniture d'ECS. L'équation (2.9) présente le calcul de la fraction solaire.

$$F_{solaire} = \frac{E_{charge} - E_{aux}}{E_{charge}} = 1 - \frac{E_{aux}}{E_{charge}} \quad (2.9)$$

Ce critère va permettre le calcul d'évaluer la performance énergétique du système lors des analyses de sensibilité. Un algorithme a été créé avec le logiciel PyScripiter afin de faciliter le calcul de la fraction solaire (Voir ANNEXE IV).

Analyse du cycle de vie : Le cycle de vie du système est un critère d'optimisation du système. Le coût du cycle de vie (LCC) est la somme de tous les coûts associés à un système de distribution d'énergie sur sa durée de vie ou sur une période d'analyse sélectionnée, en dollars d'aujourd'hui, et prend en compte la valeur temporelle de l'argent. L'idée de base des coûts du cycle de vie est que les coûts futurs anticipés sont ramenés au coût actuel (actualisé) en calculant combien il faudrait investir à un taux d'actualisation du marché pour avoir les fonds disponibles quand ils seront nécessaires (Duffie & Beckman, 2013). L'analyse du cycle de vie (équation (2.10)) prend en compte le coût d'investissement (C_{ic}) des principales composantes du système (collecteurs solaires, la chaudière et le ballon de stockage), le coût de maintenance (C_m) et le coût de consommation annuelle de biomasse (C_{pc})

$$LLC_{système} = C_{ic} + C_m + C_{pc} \quad (2.10)$$

L'optimisation hybride peut se faire en comparant avec le cycle de vie d'un système existant. Dans l'étude proposée par Mohamed Krarouch, Ruesch, et al., (2020), le système de référence est une chaudière à la biomasse existant (LCC_{ref}). L'objectif global de cette méthode est d'obtenir la configuration optimale en identifiant la surface minimale et maximale du capteur et le volume de stockage qui maximisent l'économie annuelle du cycle de vie, qui est donnée par l'équation (2.11)

$$ALCS = LLC_{ref} - LLC_{système} \quad (2.11)$$

$$LLC_{ref} = m_{pc} \times C_{fuel} \times PWF \times UP \quad (2.12)$$

Dans cette équation (2.12), le C_{fuel} représente le coût du combustible (€/kg) de la première année, m_{pc} la consommation annuelle de combustible (kg) pour chauffer l'eau, UP fait référence à une série uniforme de paiements et PWF est le facteur de valeur actuelle d'une série de paiements gonflants, calculés selon les équations (2.13) et (2.14).

$$UP = \frac{d(1+t)^N}{(1+t)^N - 1} \quad (2.13)$$

$$PWF = \frac{1}{(d-1)} \left[1 - \left(\frac{(1+i)}{(1+t)} \right)^N \right] \quad (2.14)$$

Dans ces équations, t est le taux d'actualisation du marché, i est le taux d'inflation et N est le nombre d'années.

Autres paramètres financiers : Pour une analyse de coût se faisant sur une base absolue, l'optimisation du système n'est pas calculée en fonction d'un système de référence, mais en fonction du taux de retour sur investissement (TRI). Le TRI est le taux d'actualisation rendant la Valeur actualisée nette (VAN) nulle. Plus le TRI est élevé plus l'investissement est élevé.

$$VAN = \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^M A_{k,j} \times \frac{(1+i)^{k-1}}{(1+t)^k} - I + V_r \quad (2.15)$$

Dans l'équation (2.15), I représente les coûts d'investissement V_r la valeur marchande résiduelle à la fin de vie du système et A le montant actuel. L'ensemble des équations ((2.10) à (2.15)) calculant les données économiques sont tirés de Duffie & Beckman, 2013.

Il est à noter que ce mémoire n'utilise que la fraction solaire comme critère de performance et que les analyses de cycle de vie et économiques, intéressantes certes, ont été reléguées à des études ultérieures.

2.9 Modélisation du système de production d'ECS dans TRNSYS

Dans le but de réaliser les simulations dans le logiciel TRNSYS, un modèle existant dans le logiciel est utilisé. La Figure 2-3 présente le système de production d'ECS tiré du logiciel TRNSYS. La description des composantes numérotée sur la Figure 2-3 est la suivante :

1. Le profil de consommation journalier de l'utilisateur est incorporé dans le logiciel dans le type 9e;
2. La calculatrice dans laquelle on définit la température d'eau froide et le débit d'eau à l'entrée du système;
3. La valve qui permet de contrôler la température du fluide qui sera utilisée pour abaisser l'eau chaud sortant du tank à 60 °C afin de le maintenir l'eau en dessous du point de consigne à 49 degrés selon la réglementation du Québec;
4. Le contrôleur qui permet de déclencher le déplacement du fluide caloporteur. Lorsque le liquide atteint 85 °C, le contrôleur arrête la pompe.
5. Le fichier météo qui permet d'importer les données météo du lieu de l'étude ainsi que la pente du collecteur;
6. Le collecteur dans lequel on incorpore les paramètres de performance du capteur;
7. Le tank dans lequel on définit le volume du tank, le coefficient de perte du tank, la densité du fluide;
8. Le thermostat qui permet de contrôler la température moyenne du tank. Fonctionne comme un automate 0 et 1. Lorsque la température moyenne du fluide descend en dessous de 60 °C, le système auxiliaire est enclenché;
9. L'auxiliaire qui donne une puissance au tank pour chauffer le tank. Le système auxiliaire représente la biomasse;
10. La calculatrice qui permet le calcul des paramètres d'efficacité du capteur;

11. Les imprimantes qui permettent d'afficher les résultats sous formes texte qui sont traitées dans le logiciel python.

Pour le fonctionnement du système, la demande en ECS est calculée avec le logiciel DH-calc_2-02b, par la suite cette demande en ECS est prise en compte dans le système grâce à la composante de TRNSYS (type9e et le calculateur Daly load). L'eau froide est ensuite pompée vers le collecteur. Lorsque l'eau est chauffée par le collecteur, l'eau est ensuite acheminée du collecteur vers le réservoir de stockage. Une consigne de température (60 °C) est donnée au tank et lorsque la température à l'intérieur du tank baisse en dessous de cette consigne, la chaudière se met en action pour compenser la demande en chaleur. La valeur de puissance de la chaudière est calculée grâce à l'équation (2.6) en fonction du débit maximal de l'ECS consommé. La puissance de la chaudière est intégrée dans les paramètres de la chaudière ($q_{Aux\ tank}$). Le système de valve de contrôle de température (tempering valve control) permet de donner une température de distribution de l'eau afin d'éviter la brûlure du consommateur. La température maximale de l'eau à la sortie du robinet de la baignoire ou de la pomme de douche n'excède pas 43 °C, comparativement à 49 °C pour les autres types de bâtiments (Régie du bâtiment du Québec, 2013).

Dans le modèle utilisé, le choix a été fait de ne pas intégrer un échangeur de chaleur entre le capteur solaire et le ballon de stockage et aussi de ne pas tenir compte des pertes liées à la longueur des conduits. Ces choix ont été faits dans le but de se concentrer sur l'apport du solaire et de la biomasse, car ces équipements (échangeur de chaleur et pertes liées à la longueur des conduits) n'exercent pas une influence sur le calcul de la fraction solaire.

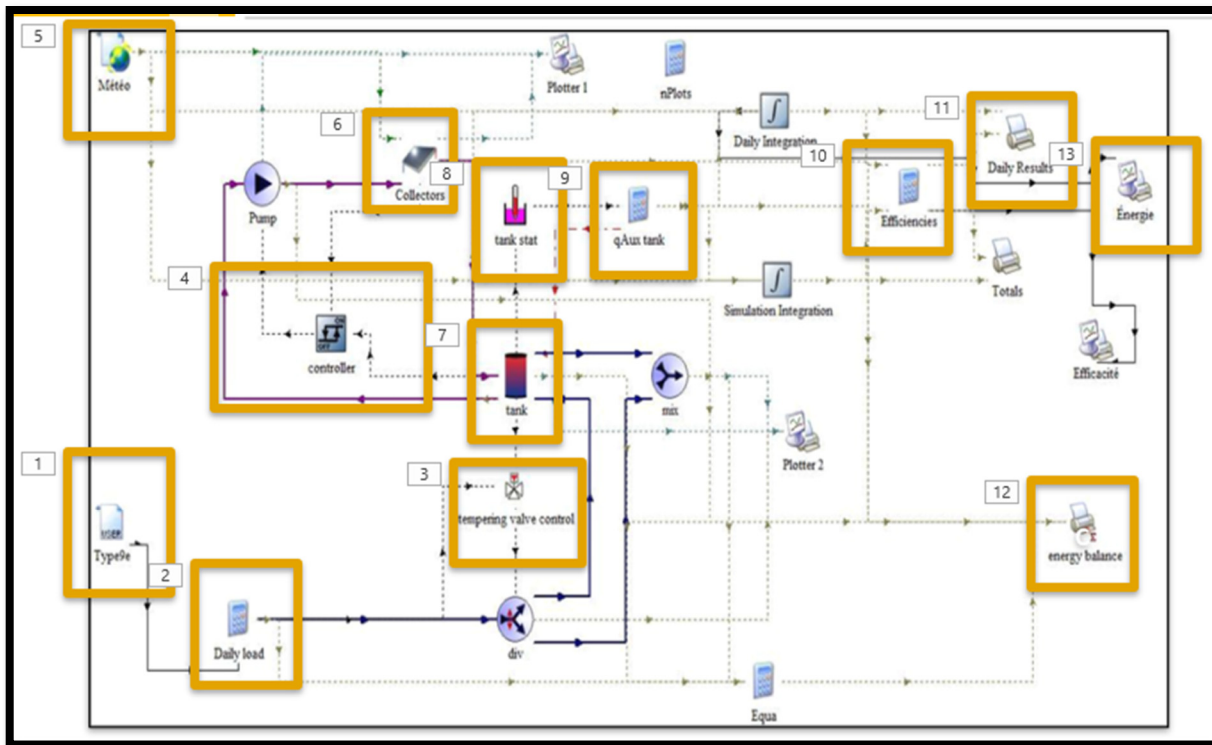


Figure 2-3 Schéma de la simulation solaire et à la biomasse dans le logiciel TRNSYS

CHAPITRE 3

SIMULATION ET COMPARAISON AUX ÉTUDES EXISTANTES

Cette section vise à comparer le concept proposé dans ce mémoire à différentes études similaires retrouvées dans la littérature. L'intention de ce chapitre n'est pas d'obtenir exactement les résultats que les études choisies, mais de valider les ordres de grandeur des résultats et de déterminer dans quels intervalles le modèle de cette étude reproduit les mêmes comportements lors des études de sensibilités.

Pour aboutir à des constats, trois études dont les données étaient disponibles ont été choisies afin de faire les comparaisons. Les principaux critères de comparaison utilisés dans cette section sont les suivants:

- La demande en ECS;
- Le besoin énergétique annuel;
- L'énergie produite par le capteur;
- La fraction solaire.

À partir de la fraction solaire, il est alors facile de déterminer la part d'ECS qui devra être produite à partir de la combustion de la biomasse. Ainsi, c'est exclusivement l'implantation de la méthode de prédiction de la production d'ECS à partir du solaire qui est testée dans cette section. La quantité de bois requise est par la suite aisément déterminée à partir des équations présentées antérieurement.

3.1 Comparaison des résultats avec le projet d'installation en eau chaude sanitaire à l'école supérieure de technologie Fès

L'étude dont les résultats seront comparés au modèle de ce mémoire est tirée du rapport ELMARSI & ABYAYE, (2010). Le projet consiste à fournir de l'eau chaude sanitaire à des

résidents du pavillon B du campus de l'école supérieure de technologie de Fès. Le logiciel de simulations TSOL a été utilisé par l'auteur pour réaliser les simulations. Les Tableaux 3.1, 3.2 et 3.3 présentent les principales caractéristiques du problème simulé.

Tableau 3-1 Les principales informations du projet de Fès

Ville	Fès
Latitude	34,018
Longitude	-5,008
Nombre d'étudiants	225
Besoin journalier en eau	965 l/j
Consommation annuelle selon ECS TOL	233,53 m ³
Besoin énergétique annuelle	11,93 MWh
Température d'eau chaude de consigne	60 °C
Température d'eau froide	20 °C été et 12 °C hiver
Température d'eau froide utilisée simulation	16 °C
Volume du tank simulation	1000 L

Tableau 3-2 Paramètre du capteur et du ballon thermiques

Type de capteurs	Capteurs sous vide
Dimensions du capteur	3.26 m ²
Nombre de capteurs	6
Perte du tank	5,69 W/K
Hauteur	1,8 m

Pour ce qui est les performances du capteur, les paramètres suivants ont été utilisés:

- La performance du capteur (η_0) de 84%;
- Le coefficient de perte du capteur (a_1) de $1,01 \text{ W/m}^2\text{K}^2$ et le coefficient de perte (a_2) de $0 \text{ W/m}^2\text{K}^2$.

3.1.1 Étude de sensibilité comparative sur la variation des angles du capteur

Il faut noter que la principale difficulté de cette étude comparative est de retrouver les données choisies par l'auteur. Pour être en mesure de comparer les résultats, les hypothèses suivantes ont été émises :

1. Les paramètres du capteur n'étant pas tous connus, le choix a été fait de garder un modèle linéaire du rendement du capteur. En faisant l'hypothèse du modèle linéaire le paramètre a_2 de l'équation de la performance du capteur (équation(2.4)) peut être mis à zéro;
2. Les paramètres de pertes thermiques dans le ballon n'étant pas définis, les paramètres par défaut de pertes de TRNSYS ont été gardés.

Tableau 3-3 Comparaison des résultats de simulation avec une pente de 40

Paramètres	TSOL	TRNSYS	Écart (%)
Aire des capteurs (m^2)	19,56	19,56	-
Angle d'orientation des capteurs	40	40	-
Rayonnement annuel Global (kWh/m^2)	1952	2108	2
Demande en ECS (kWh)	11930	11894	0,3
Énergie produite par capteur (kWh)	9500	9905	4
Fraction solaire	0,81	0,94	13

Tableau 3-4 Comparaison des résultats de fractions solaires obtenus à la suite de la variation de l'angle d'inclinaison du capteur

Angle inclinaison	TSOL	TRNSYS	Écart (%)
5°	0,62	0,94	32
10°	0,65	0,95	30
15°	0,68	0,95	27
20°	0,7	0,96	26
25°	0,71	0,96	25
30°	0,72	0,96	24
35°	0,73	0,94	21
40°	0,81	0,94	13

Tableau 3-5 Étude de sensibilité sur la variation de la taille des capteurs

Superficie des capteurs (m ²)	Fraction solaire TRNSYS
5	0,42
10	0,87
15	0,95
20	0,95
25	0,93
30	0,96

Au regard des résultats il est possible de déduire les points suivants :

1. Dans l'étude comparative, les écarts entre les deux fractions solaires sont significatifs de l'ordre de 30 %;
2. Dans le modèle de ce mémoire, avec une superficie de capteur de 19,56 m², le besoin annuel en ECS est couvert aux environs de 90 % avec l'énergie solaire tandis que dans le modèle de référence le besoin est couvert autour de 70 %;

3. Dans le modèle de ce mémoire, plus l'angle d'inclinaison du capteur se rapproche de la latitude de la ville de Fès qui est de $34,0^\circ$ plus la fraction solaire augmente;
4. Dans le modèle de ce mémoire, lorsque la superficie est au-delà de 15 m^2 le besoin en ECS est couvert à 95 %. Une analyse du cycle de vie en tenant compte des critères économiques est requise pour déterminer la taille optimale du capteur solaire.

Il faut noter des écarts significatifs dans les différents types de comparaison. La première raison est l'utilisation de deux ballons de stockage de 500 l dans le cas de référence tandis que le modèle utilisé dans ce mémoire est un seul ballon de 1000 l. Le fait d'utiliser deux ballons augmente les pertes thermiques et peut expliquer une fraction solaire plus petite que celle de TRNSYS. N'ayant pas tous les paramètres de données dans l'étude, il a été question de faire des hypothèses sur coefficient de l'angle incidence modifier (IAM) qui a été mis à 0 dans le logiciel TRNSYS. Par ailleurs, il y a aussi les pertes thermiques dans les conduits qui n'ont pas été pris en compte dans le modèle de ce mémoire. Pour finir, les deux logiciels TSOL et TRNSYS n'ont pas la même base de données de calcul.

3.2 Comparaison des résultats avec le projet de dimensionnement réalisé en Algérie

Dans la seconde étude de comparaison, il est question de se pencher sur le projet réalisé par Yettou, Malek, & Gama, (2010). Il s'agit d'une étude qui a pour but d'étudier le dimensionnement des chauffe-eau solaires individuels en élaborant un programme informatique basé sur l'utilisation d'une base de données des capteurs plans appliquée dans quelques villes en Algérie. Les auteurs se sont servis d'un logiciel du nom de DCESAL pour leur analyse. Dans le cadre de ce mémoire, la ville de Tamanrasset est considérée pour les simulations.

Tableau 3-6 Informations sur le projet de la ville Tamanrasset

Ville	Tamanrasset
Latitude	22,785
Longitude	5,522
Besoin journalier en eau (l)	300
Besoin énergétique annuel (kWh)	5222
Température d'eau chaude de consigne	60 °C
Température d'eau froide	15°C
Volume du tank	300 L

Pour ce qui est les performances du capteur, les paramètres suivants ont été utilisés (Voir ANNEXE III) :

- La performance du capteur (η_0) de 82,7%;
- Le coefficient de perte du capteur (a_1) de 1,41 W/m²K² et le coefficient de perte (a_2) de 0,05 W/m²K².

3.2.1 Étude de sensibilité comparative sur la variation des capteurs

Pour être en mesure de comparer les résultats, les hypothèses suivantes ont été émises :

1. Les paramètres sur le collecteur dans l'étude n'étant pas connus, un collecteur plat vitré équivalent a été utilisé. Le choix a été fait, car les coefficients de perte des capteurs sont plus ou moins équivalents.
2. Les paramètres de pertes thermiques dans le ballon n'étant pas définis, les paramètres par défaut de pertes de TRNSYS ont été utilisés pour la comparaison;

Tableau 3-7 Comparaison des résultats de simulation avec une pente de capteur de 42°

Paramètres	DCESAL	TRNSYS	Écart (%)
Aire des capteurs (m ²)	3,92	3,92	0
Angle d'orientation des capteurs	42°	42°	0
Énergie incidente IColl (kWh/m ²)	2540	2650	4
Demande en ECS (kWh)	5222.11	5181	1
Énergie produite par capteur (kWh)	4471	5260	15
Fraction solaire (%)	0,85	0,84	1

Il est possible de constater un écart significatif de 15% entre l'énergie produite obtenue par le logiciel DCESAL et TRNSYS. Cette différence peut s'expliquer par le choix d'un collecteur plat vitré équivalent avec des performances différentes à cause du manque de données dans l'étude de référence. De plus la simulation avec Trnsys produit plus d'énergie (5260 kWh) à travers les capteurs que la demande en ECS. Cela s'explique par le fait que les capteurs continuent à produire de la chaleur entre 60 °C et 85 °C avant que le système ne mette en arrêt.

Tableau 3-8 Comparaison des résultats de fractions solaires obtenus à la suite de la variation de la pente des capteurs

Pente capteur	DCESAL	TRNSYS	Écart (%)
17°	0,89	0,88	1
29°	0,94	0,94	0

Pour donner suite à la comparaison, voici les constats qui ont été observés:

1. Les fractions solaires des deux modèles sont dans les mêmes ordres de grandeur;
2. L'optimum de fraction solaire est obtenu pour une pente proche de 29°, ce qui est proche de la latitude de la ville qui est de 22,78°

3.3 Comparaison avec le dimensionnement hybride solaire tiré du task 26

Dans cette section, il est question de comparer le modèle de ce mémoire à une étude réalisée par Shah (2002) dans le task 26 de l'AIE. Le système proposé dans l'étude est composé d'un capteur solaire et d'un réservoir de stockage et deux énergies auxiliaires, le gaz naturel et l'électricité. Le but du système est de fournir de l'eau chaude sanitaire et de l'énergie thermique à un bâtiment.

Tableau 3-9 Informations sur le projet de la ville Zurich

Ville	Zurich
Latitude	47,37
Longitude	8,5
Aire du collecteur	15 m ²
Besoin journalier en eau annuelle	73000 L
Besoin énergétique annuelle	3090 kWh
Température d'eau chaude sortie du mitigeur	45 °C
Température d'eau froide	9,7 °C

Tableau 3-10 Performances du capteur utilisé dans TNSYS

Type de collecteur	η_0	a_1 (W/m ² K)	a_2 (W/m ² K ²)	b_0	Débit de test(kg/ m ² -h)	Angle d'incide nce 50°
Collecteur plan vitré	0.8	3.5	0.015	0	72	0.9

Tableau 3-11 Paramètres du tank de stockage type 140 dans TRNSYS

Volume total (m ³)	0,75
Hauteur (m)	1,67
Diamètre (m)	0,15

La puissance nominale de la chaudière au gaz naturel employée est de 15kW.

3.3.1 Étude de sensibilité comparative sur la variation de la surface des capteurs

Dans le but de faire la comparaison, les hypothèses suivantes seront émises :

- Les pertes liées à la conductivité des conduits seront négligées;
- Les pertes liées à l'échangeur de chaleur seront négligées;
- La chaudière au gaz du task 26 délivre la même puissance nominale que la chaudière à la biomasse du modèle proposé, soit 15 kW;
- La chaudière auxiliaire électrique du système n'est pas considérée dans l'étude;
- La fourniture de chaleur au bâtiment n'est pas prise en compte. L'étude va se concentrer sur la production d'eau chaude sanitaire;
- Les pertes de chaleur à l'intérieur du ballon de stockage sont selon les paramètres de bases du logiciel TRNSYS;
- L'étude de sensibilité se fait avec un volume de Tank de 0,75 m³ tout en faisant varier les pentes du collecteur.

Tableau 3-12 Observation des résultats de fractions solaires obtenus à la suite de la variation de l'angle d'inclinaison du capteur pour deux paramètres de performance

Angle capteur	TRNSYS (Task 26) $F_{sav,therm}$	TRNSYS $F_{solaire}$
0	0,26	0,48
10	0,28	0,56
20	0,29	0,63
30	0,30	0,67
40	0,31	0,70
50	0,32	0,72
60	0,32	0,72
70	0,31	0,69

Voici les constats observés à la suite de l'analyse :

- La fraction solaire tient compte seulement de l'énergie axillaire fournie par la chaudière à la biomasse;
- L'optimum de fraction solaire annuelle est obtenu avec une pente de capteur variant entre 50° et 60°. Ce qui correspond à la latitude de la ville de Zurich.

Il faut noter que dans le cadre du Task 26 le pourcentage calculé n'est pas une fraction solaire. Il s'agit d'un pourcentage de gaz économisé lorsque l'on utilise l'énergie solaire pour chauffer de l'eau. Cette économie de gaz est calculée en fonction de l'équation (3.1).

$$F_{sav,therm} = 1 - \frac{\text{Consommation brute de gaz avec système de chauffage solaire}}{\text{Consommation brute de gaz sans système de chauffage solaire}} \quad (3.1)$$

Il n'est donc pas pertinent de comparer « numériquement » les deux valeurs. Cependant il est possible de constater que les pourcentages les plus élevés se situent entre 50° et 60°, tant pour cette prédiction que pour les fractions solaires calculées avec le logiciel proposé. Les maximums correspondent à la latitude de la ville de Zurich dans les deux cas. Plus la pente du capteur se rapproche de la latitude du lieu de l'installation, plus on augmente la fraction solaire et plus on réalise des économies d'énergie à cause de l'intégration de l'énergie solaire.

En ce sens, il est permis d'affirmer que les prédictions effectuées avec TRNSYS corroborent les résultats présentés par le Task26 de l'IEA.

DISCUSSION

Dans le cadre de ce mémoire, il était question de concevoir un système qui combine le solaire et la biomasse dans le but de répondre à la demande en eau chaude sanitaire d'une population donnée. Pour se faire, il fallait se questionner à savoir, quelles sont les exigences sanitaires qui régissent la production d'ECS. Dans un second temps, quels sont les équipements techniques qui permettent de combiner le solaire et la biomasse. Dans un troisième, quels sont les outils qui permettent de simuler un tel système. Et pour finir, il était question de savoir, comment valider le bon fonctionnement du modèle retenu.

En ce qui concerne les exigences sanitaires, il a été question de s'assurer que le système permette d'éviter la prolifération de la bactérie *Legionella pneumophila* causant la Légionellose. Il a donc été décidé, lors de la conception du modèle, de prévoir une température de consigne de 60 °C à l'intérieur du ballon de stockage afin d'éliminer la bactérie et un système de circulation de l'eau afin d'éviter toute stagnation d'eau. De plus, pour éviter les brûlures lors de la distribution de l'eau, un système de valve de contrôle de température a été mis en place avec une température de consigne à 49 °C.

En ce qui concerne les équipements, il a été démontré, dans les précédents chapitres, que les techniques de production d'ECS avec le solaire thermique et la biomasse sont matures. Il existe sur le marché différents systèmes solaires thermiques de l'eau chaude sanitaire qui utilisent des collecteurs plans vitrés, des collecteurs sous vide ainsi que des collecteurs à concentration solaire. En ce qui concerne la biomasse, il existe la norme CSA B415.1-10 (Essais de Performance des Appareils de Chauffage À Combustible solide) qui permet de s'assurer de la performance des chaudières à la biomasse. De plus, certaines études réalisées au Maroc dans des bains publics ont permis de mieux comprendre l'interaction entre le solaire et la biomasse dans la production d'eau chaude sanitaire à grande échelle. C'est donc basé sur ces connaissances qu'il a été possible de concevoir un système composé principalement d'un

capteur solaire thermique, d'un système auxiliaire à la biomasse, d'un réservoir d'eau chaude et d'un système de distribution.

Dans la littérature, il existe plusieurs outils de simulation. Parmi ces outils, le logiciel TRNSYS développé par des chercheurs à l'université de Wisconsin a été retenu pour cette étude. Ce logiciel a permis de simuler la production d'eau chaude sanitaire et d'établir la fraction solaire nécessaire à la production d'eau ECS.

Pour finir, il était primordial de s'assurer du bon fonctionnement du modèle proposé dans le cadre de ce mémoire. Il a donc été décidé de reproduire des études déjà existantes afin de comparer les résultats obtenus. Pour y parvenir, trois études ont été choisies. Les principales difficultés observées lors de cette étape concernaient le manque de données dans les études publiées, les configurations qui pouvaient différer de notre modèle et les objectifs techniques recherchés par les différents auteurs. De plus, il y avait le risque de changer la configuration du système proposé pour chaque comparaison, ce qui modifierait l'essentiel de l'étude qui est de s'assurer du bon fonctionnement de la conception mise en place.

Cependant, en émettant quelques hypothèses et en se concentrant sur la production d'eau chaude sanitaire, il a été possible de faire une étude de sensibilité sur la variation de l'orientation des capteurs dans chacune des études. Le principal indicateur utilisé pour évaluer la performance du système est la fraction solaire. L'étude de sensibilité a permis de comparer les fractions solaires et d'observer que le maximum de fraction solaire était obtenu lorsque la pente du capteur était proche de la latitude du lieu. De plus, il a été possible de constater que l'augmentation de la surface des capteurs faisait augmenter la fraction solaire. Aussi, il a été constaté que plus la puissance chaudière à la biomasse augmentait, plus la fraction solaire baissait. Par ailleurs, pour respecter la température de consigne de 60° à l'intérieur du ballon à eau chaude, il faut que la puissance minimale de la chaudière d'eau soit calculée en fonction du débit maximal de puisage tel que calculé par l'équation (3.2).

En tenant compte de l'objectif qui a été fixé au de but de cette recherche, il a été possible de proposer un système qui est en mesure de fournir de l'eau chaude sanitaire pour répondre au besoin d'une certaine population. En se basant sur le modèle existant dans le logiciel TRNSYS, il a été possible d'inclure un système auxiliaire d'énergie à la biomasse munie d'un thermostat qui va permettre d'assurer d'avoir une température de 60° en tout temps à l'intérieur du ballon de stockage lorsque l'apport du solaire serait insuffisant.

Le calcul des appoints à la biomasse n'a pas eu à être validé par des études puisque les prédictions étaient simples à valider par des calculs théoriques pour combler la différence entre production solaire et demande.

Bien que ce mémoire ait atteint les objectifs escomptés, certains aspects pourraient être approfondis. Il serait pertinent de faire une étude de rentabilité du modèle existant pour savoir quelle serait la période de retour sur investissement avec différentes dimensions de capteur et différentes grandeurs de ballon de stockage. Il serait intéressant de considérer l'aspect analyse de cycle de vie du système hybride comportant les deux types de chauffage en fonction de leur taille, de leur emplacement et des besoins à combler. Enfin, il serait aussi pertinent d'installer un système expérimental pour la production d'ECS d'une maison unifamiliale afin de comparer les résultats de fractions solaires avec le modèle théorique.

CONCLUSION

Dans le cadre ce mémoire, il était question de concevoir un système qui combine le solaire et la biomasse dans le but de répondre à la demande en eau chaude sanitaire d'une population donnée. Pour se faire, il fallait se questionner à savoir, quelles sont les exigences sanitaires qui régissent la production d'ECS. Dans un second temps, quels sont les équipements techniques qui permettent de combiner le solaire et la biomasse. Dans un troisième, quels sont les outils qui permettent de simuler un tel système. Et pour finir, il était question de savoir, comment valider le bon fonctionnement du modèle retenu.

En ce qui concerne les exigences sanitaires, il a été question de s'assurer que le système permette d'éviter la prolifération de la bactérie *Legionella pneumophila* causant la Légionellose. Il a donc été décidé, lors de la conception du modèle, de prévoir une température de consigne de 60 °C à l'intérieur du ballon de stockage afin d'éliminer la bactérie et un système de circulation de l'eau afin d'éviter toute stagnation d'eau. De plus, pour éviter les brûlures lors de la distribution de l'eau, un système de valve de contrôle de température a été mis en place avec une température de consigne à 49 °C.

En ce qui concerne les équipements, il a été démontré, dans les précédents chapitres, que les techniques de production d'ECS avec le solaire thermique et la biomasse sont matures. Il existe sur le marché différents systèmes solaires thermiques de l'eau chaude sanitaire qui utilisent des collecteurs plans vitrés, des collecteurs sous vide ainsi que des collecteurs à concentration solaire. En ce qui concerne la biomasse, il existe la norme CSA B415.1-10 (Essais de Performance des Appareils de Chauffage À Combustible solide) qui permet de s'assurer de la performance des chaudières à la biomasse. De plus, certaines études réalisées au Maroc dans des bains publics ont permis de mieux comprendre l'interaction entre le solaire et la biomasse dans la production d'eau chaude sanitaire à grande échelle. C'est donc basé sur ces connaissances qu'il a été possible de concevoir un système composé principalement d'un

capteur solaire thermique, d'un système auxiliaire à la biomasse, d'un réservoir d'eau chaude et d'un système de distribution.

Dans la littérature, il existe plusieurs outils de simulation. Parmi ces outils, le logiciel TRNSYS développé par des chercheurs à l'université de Wisconsin a été retenu pour cette étude. Ce logiciel a permis de simuler la production d'eau chaude sanitaire et d'établir la fraction solaire nécessaire à la production d'eau ECS.

Pour finir, il était primordial de s'assurer du bon fonctionnement du modèle proposé dans le cadre de ce mémoire. Il a donc été décidé de reproduire des études déjà existantes afin de comparer les résultats obtenus. Pour y parvenir, trois études ont été choisies. Les principales difficultés observées lors de cette étape concernaient le manque de données dans les études publiées, les configurations qui pouvaient différer de notre modèle et les objectifs techniques recherchés par les différents auteurs. De plus, il y avait le risque de changer la configuration du système proposé pour chaque comparaison, ce qui modifierait l'essentiel de l'étude qui est de s'assurer du bon fonctionnement de la conception mise en place.

Cependant, en émettant quelques hypothèses et en se concentrant sur la production d'eau chaude sanitaire, il a été possible de faire une étude de sensibilité sur la variation de l'orientation des capteurs dans chacune des études. Le principal indicateur utilisé pour évaluer la performance du système est la fraction solaire. L'étude de sensibilité a permis de comparer les fractions solaires et d'observer que le maximum de fraction solaire était obtenu lorsque l'angle d'inclinaison du capteur était proche de la latitude du lieu. De plus, il a été possible de constater que l'augmentation de la surface des capteurs faisait augmenter la fraction solaire. Aussi, il a été constaté que plus la puissance chaudière à la biomasse augmentait, plus la fraction solaire baissait. Par ailleurs, pour respecter la température de consigne de 60° à l'intérieur du ballon à eau chaude, il faut que la puissance minimale de la chaudière d'eau soit calculée en fonction du débit maximal de puisage tel que calculé par l'équation (3.2).

En tenant compte de l'objectif qui a été fixé au de but de cette recherche, il a été possible de proposer un système qui est en mesure de fournir de l'eau chaude sanitaire pour répondre au besoin d'une certaine population. En se basant sur le modèle existant dans le logiciel TRNSYS, il a été possible d'inclure un système auxiliaire d'énergie à la biomasse munie d'un thermostat qui va permettre d'assurer d'avoir une température de 60° en tout temps à l'intérieur du ballon de stockage lorsque l'apport du solaire serait insuffisant.

Le calcul des appoints à la biomasse n'a pas eu à être validé par des études puisque les prédictions étaient simples à valider par des calculs théoriques pour combler la différence entre production solaire et demande.

Bien que ce mémoire ait atteint les objectifs escomptés, certains aspects pourraient être approfondis. Il serait pertinent de faire une étude de rentabilité du modèle existant pour savoir quelle serait la période de retour sur investissement avec différentes dimensions de capteur et différentes grandeurs de ballon de stockage. Il serait intéressant de considérer l'aspect analyse de cycle de vie du système hybride comportant les deux types de chauffage en fonction de leur taille, de leur emplacement et des besoins à combler. Enfin, il serait aussi pertinent d'installer un système expérimental pour la production d'ECS d'une maison unifamiliale afin de comparer les résultats de fractions solaires avec le modèle théorique.

ANNEXE I

DESCRIPTION DU TRANSFERT D'ÉNERGIE À L'INTÉRIEUR DU CAPTEUR

La surface captatrice (vitre)

En régime permanent, le bilan énergétique d'un capteur solaire plan vitré est décrit par les équations suivantes en régime permanent (Duffie & Beckman, 2013):

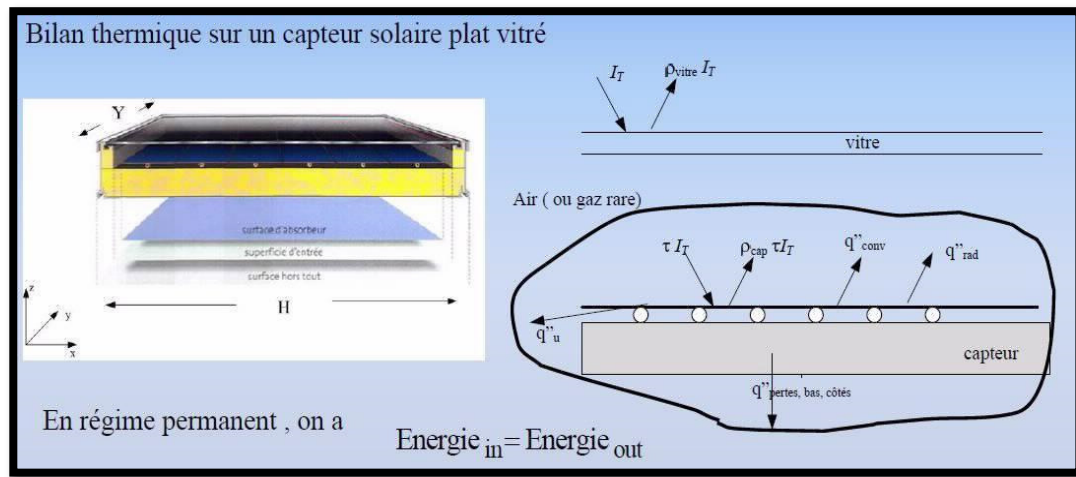


Figure-A I-1 Bilan énergétique radiatif sur un capteur plan vitré
Tirée de Duffie & Beckman (2013)

Les équations suivantes proviennent de (Duffie & Beckman, 2013)

$$Energie_{in} = Energie_{out} \quad (A-I-1)$$

$$\tau I_T = \rho_{cap} \tau I_T + q''_{conv} + q''_{rad} + q''_{bas} + q''_u$$

$$q''_u = \tau I_T - \rho_{cap} \tau I_T - (q''_{conv} + q''_{rad} + q''_{bas} + q''_{pertes})$$

$$q''_u = (\tau \alpha) I_{T_{\omega S}} - pertes$$

En ce qui concerne la radiation absorbée, elle se définit de la façon suivante par le modèle isotopique:

$$S = I_b(\tau\alpha)_b R_b + I_d * \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right)(\tau\alpha)_d + I_{\rho_g} \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) * (\tau\alpha)_r S \quad (\text{A-I-2})$$

$$= (\tau\alpha)_{\text{moy}} I_T = \underline{(\tau\alpha)} I_T$$

Pertes dans le système

Pour ce qui est des pertes dans le système, il faut noter les pertes radiatives et convectives. De façon générale, on néglige la résistance de la vitre, car elle est très faible. Les équations suivantes traduisent la relation d'équilibre entre l'intérieur du système et l'extérieur :

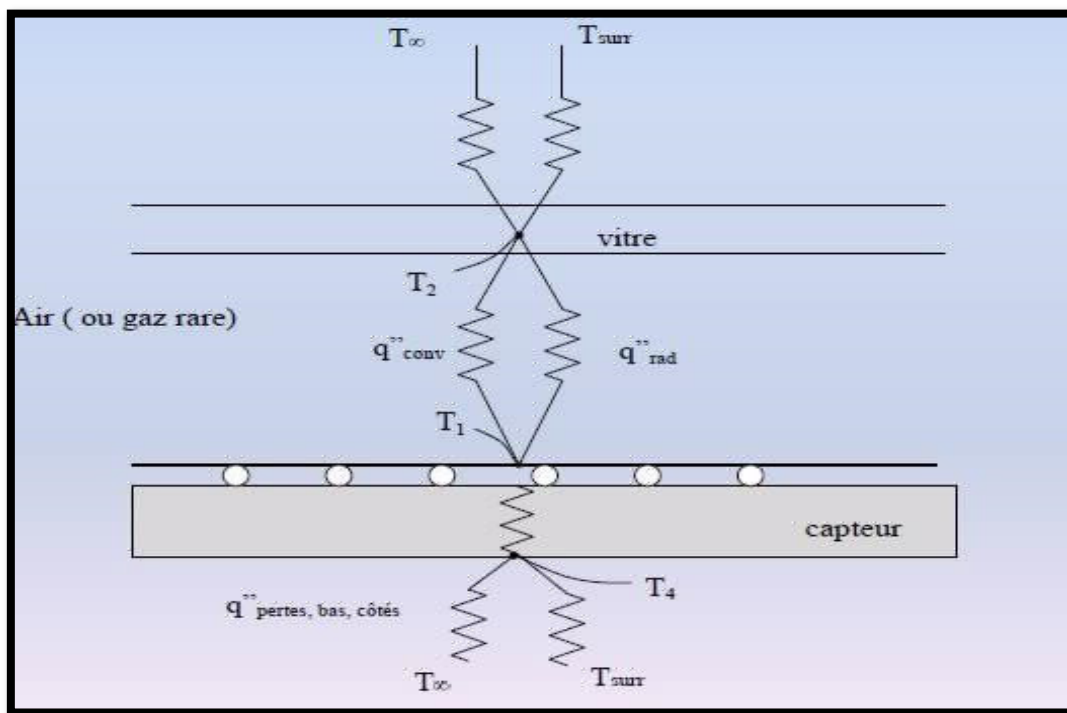


Figure A I-2 Transfert énergétique entre la vitre et le Capteur
Tirée de Duffie & Beckman (2013)

Selon (Duffie & Beckman, 2013), les équations de transfert de chaleur sont les suivantes :

$$\begin{aligned} \frac{T_1 - T_2}{R''_{int}} &= \frac{T_2 - T_\infty}{R''_{conv,ext}} + \frac{T_2 - T_{sur}}{R''_{rad,ext}} \\ &= \left(\frac{1}{R''_{conv,int}} + \frac{1}{R''_{rad,int}} \right)^{-1} = \frac{1}{h_{conv,int} + h_{rad,int}} \end{aligned} \quad (A-I-3)$$

Pertes par le bas

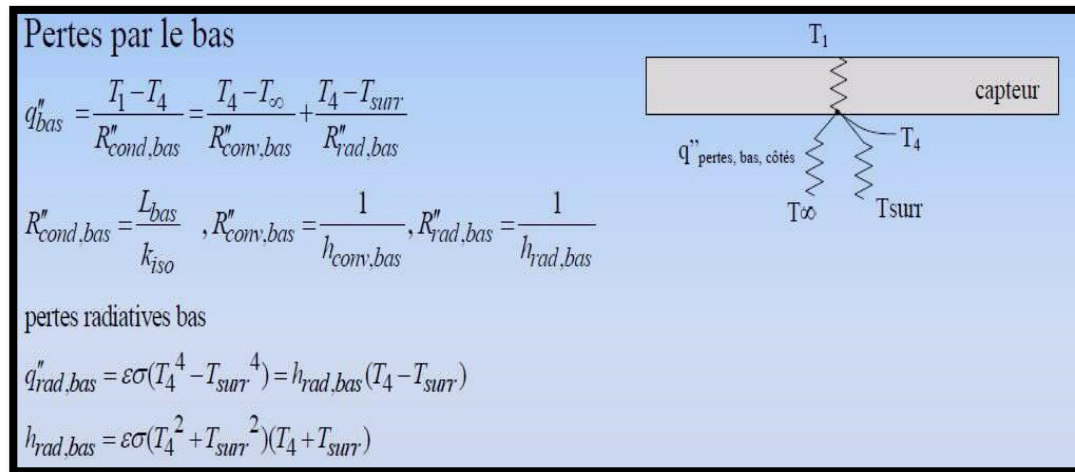


Figure A I-3 Perte d'énergie bas du capteur (Duffie & Beckman, 2013)

Lorsque le système est bien isolé, il est possible de négliger les pertes radiatives et convectives. Dans ce cas les pertes par conduction seront considérées. Ce qui donne l'expression suivante :

Lorsque le système est bien isolé, il est possible de négliger les pertes radiatives et convectives. Dans ce cas les pertes par conduction seront considérées. Ce qui donne l'expression suivante :

$$q''_{bas} = \frac{T_1 - T_\infty}{R''_{cond,bas}} = U_{bas} (T_1 - T_\infty) \quad (A-I-4)$$

Pertes sur le côté

Les pertes du côté sont également faibles. Lorsque le système est bien isolé, il est possible de négliger les pertes radiatives et convectives. Dans ce cas les pertes par conduction seront considérées.

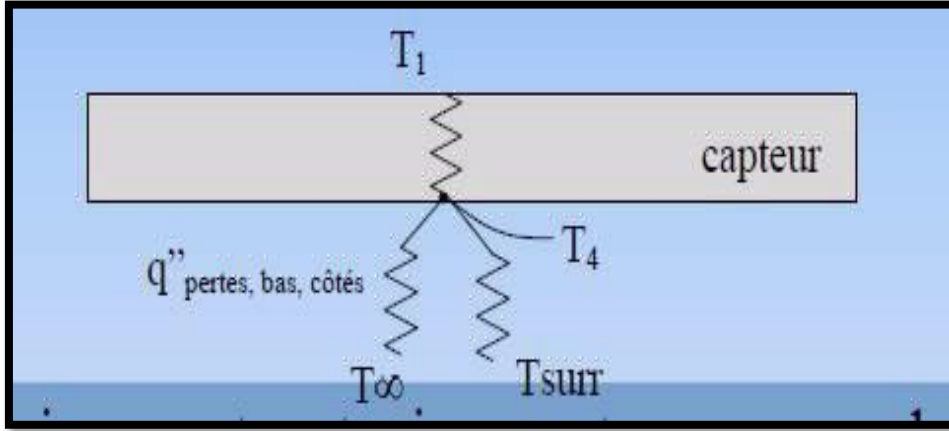


Figure A I-4 Perte d'énergie cotée du capteur

$$q_{\text{côtés}} = \frac{T_1 - T_{\infty}}{R_{\text{cond}, \text{coté}}} = \frac{k_{\text{iso}} * A_{\text{côtés}}(T_1 - T_{\infty})}{L_{\text{côtés}}} \quad (\text{A-I-5})$$

$$\begin{aligned} q''_{\text{côtés}} &= \frac{q_{\text{côtés}}}{A_{\text{plaque}}} = \frac{A_{\text{côtés}}}{A_{\text{plaque}}} \frac{k_{\text{iso}} * A_{\text{côtés}}(T_1 - T_{\infty})}{A_{\text{plaque}} * L_{\text{côtés}}} \\ &= U_{\text{côtés}}(T_1 - T_{\infty}) \end{aligned} \quad (\text{A-I-6})$$

ANNEXE II

SYSTÈMES DE STOCKAGE

Système de faible puissance

L'échangeur est intégré dans le ballon de stockage. L'eau chaude est en haut du ballon et l'eau plus froide se trouve en bas. L'eau froide est tirée et emmenée au capteur solaire. Lorsque l'eau est chauffée, l'eau est ensuite injectée au milieu du réservoir. Un échangeur de chaleur situé en haut du réservoir chauffe l'eau à 60 degrés. L'eau chaude sanitaire est soutirée en haut du réservoir.

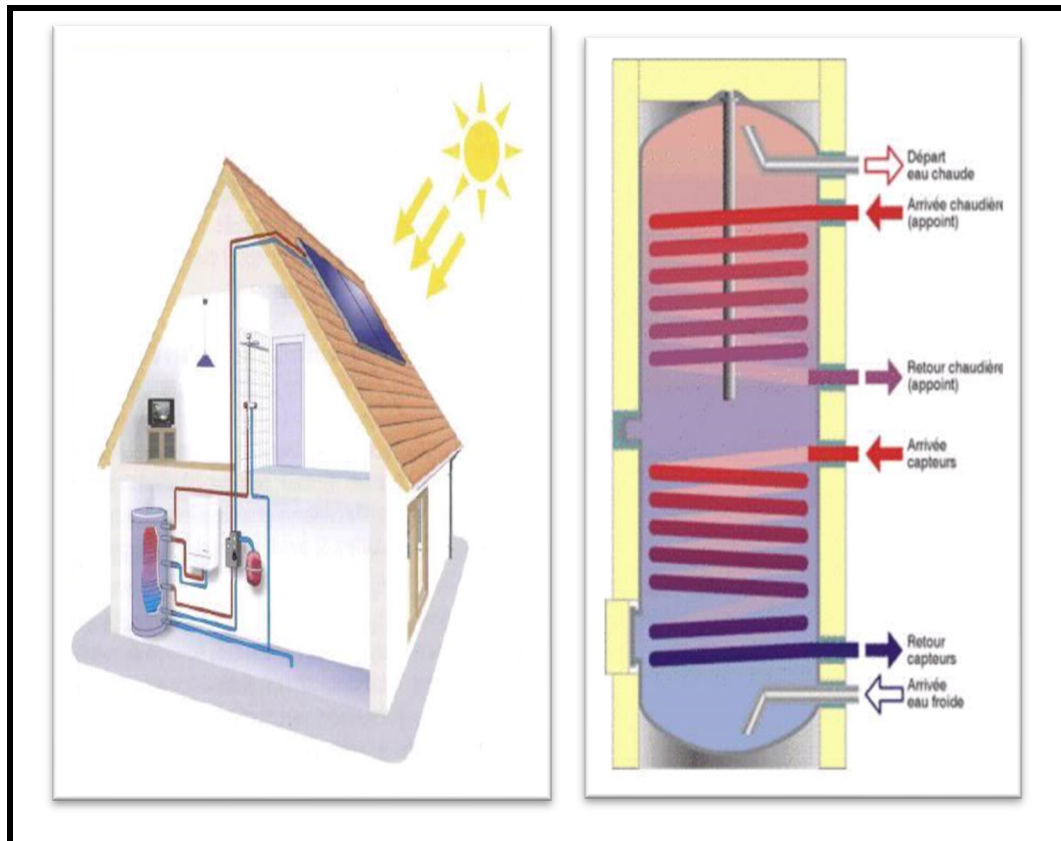


Figure A II-1 Système faible puissance: Échangeur intégré ballon stockage
Tirée de PEUSER, REMMERS (2005)

Les systèmes à moyenne puissance

L'échangeur est externe et deux ballons de stockage sont requis. Un ballon pour la recharge solaire et l'autre pour le chauffage d'appoint.

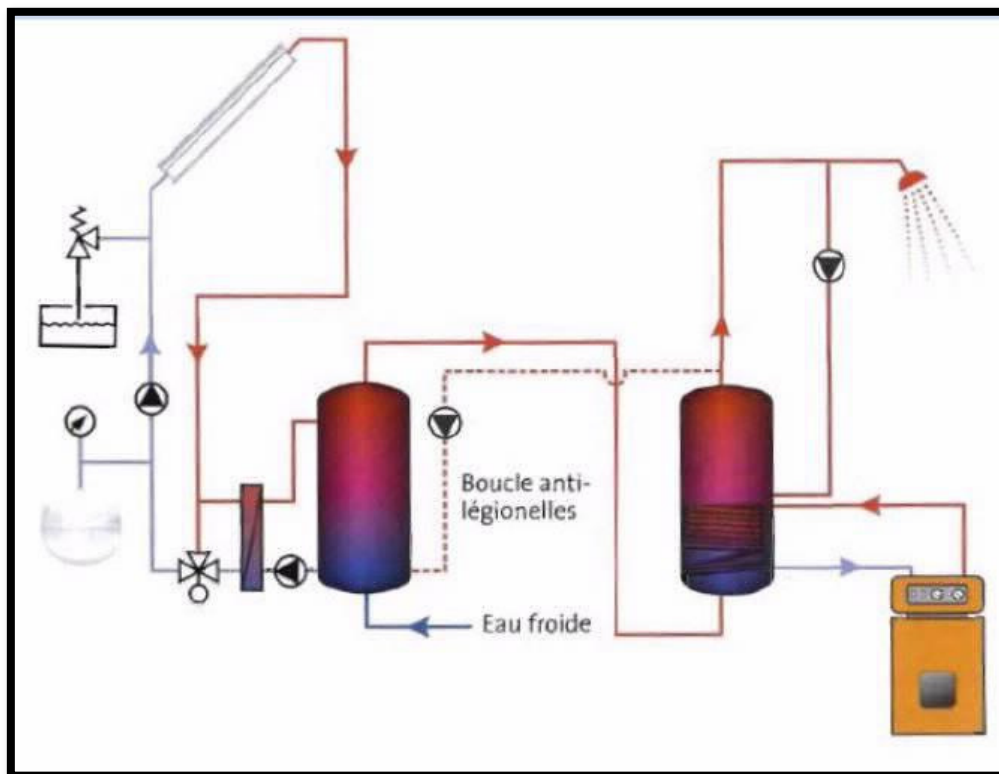


Figure A II-2 Système moyenne puissance :
échangeur chaleur extérieur du ballon
Tirée de PEUSER, REMMERS (2005)

Le système à réservoir tampon

Le circuit d'eau domestique est séparé du circuit capteur. On a un échangeur externe de plus et une pompe de plus. Ce système est moins performant, mais plus sécurisé.

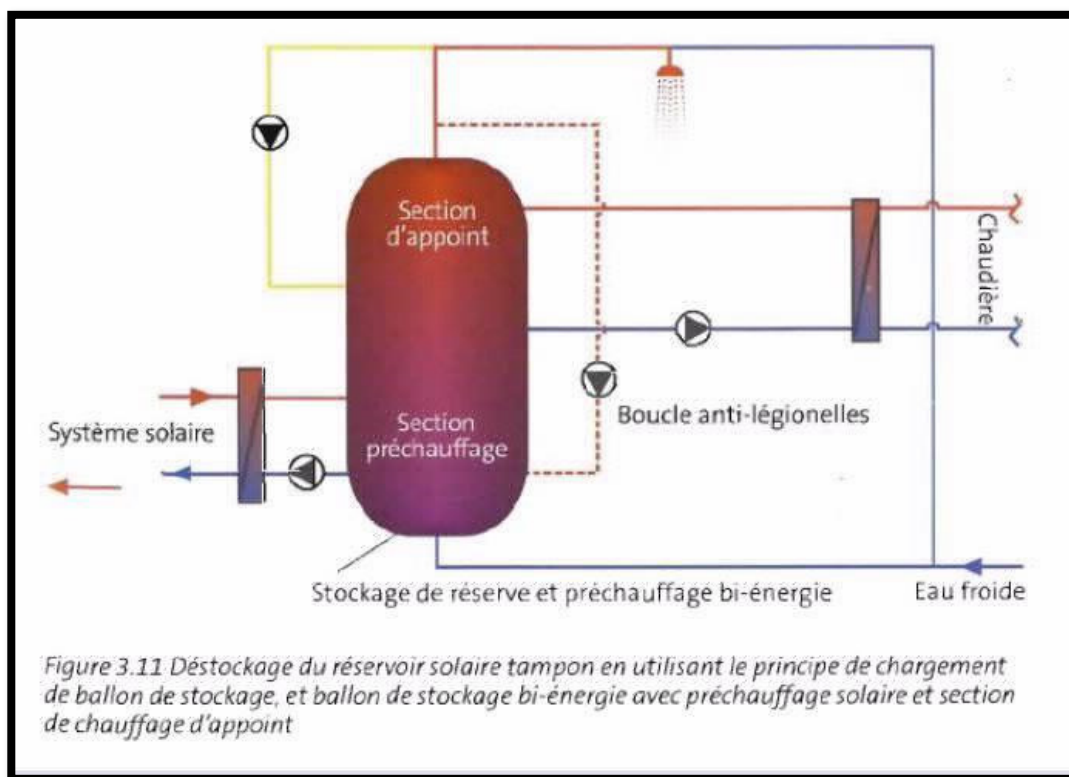


Figure A II-3 Systèmes à réservoir tampon
Tirée de PEUSER, REMMERS (2005)

Les systèmes combinés sont utilisés pour le chauffage de l'eau chaude sanitaire et le chauffage des locaux.

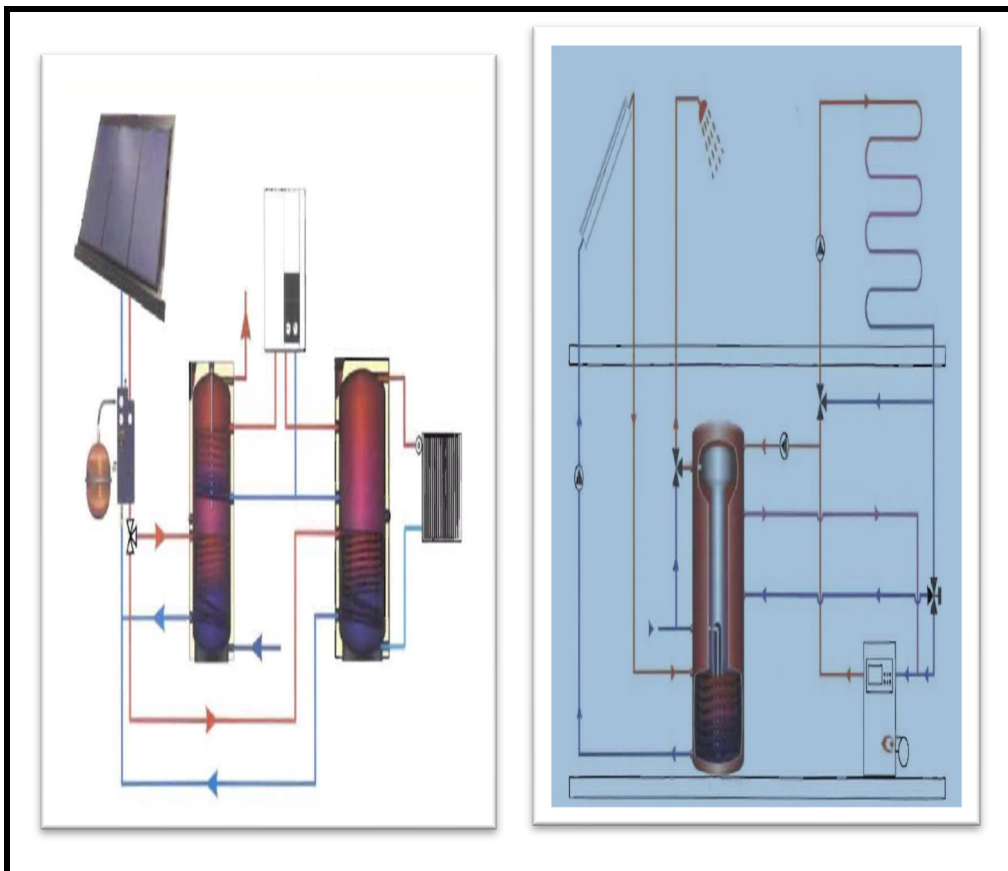


Figure A II-4 Systèmes à réservoir tampon avec source auxiliaire
Tirée de PEUSER, REMMERS (2005)

ANNEXE III

PARAMÈTRE CAPTEURS ÉTUDE COMPARATIVE RÉALISÉE EN ALGÉRIE



SOLAR RATING & CERTIFICATION CORPORATION

OG-100 ICC-SRCC™ CERTIFIED SOLAR COLLECTOR # 10001848

Supplier:
Agua Del Sol
3640 E Roeser Rd.
Phoenix, AZ 85040 USA
www.aguadelsol.co

Reference Standard:
SRCC Standard 100-2013-01

Brand: Radco

Model: 408C-HP

Collector Type: Glazed Flat Plate

Certification #: 10001848

Original Certification: September 11, 2013

Renewal Expiration Date: January 31, 2019

Certifications must be renewed annually.

This solar collector has been evaluated and certified by the Solar Rating & Certification Corporation™ (ICC-SRCC™), an ISO/IEC 17065 accredited and EPA recognized Certification Body, in accordance with the SRCC OG-100 Certification Program, as defined in SRCC OG-100, Operating Guidelines and Minimum Standards for Certifying Solar Collectors. This award of certification is subject to all terms and conditions of the current OG-100 Program Agreement and the documents incorporated therein by reference. This document must be reproduced in its entirety.

COLLECTOR THERMAL PERFORMANCE RATINGS							
Kilowatt-hours (thermal) Per Panel Per Day				Thousands of Btu Per Panel Per Day			
Climate -> Category (Ti-Ta)	High Radiation (6.3 kWh/m².day)	Medium Radiation (4.7 kWh/m².day)	Low Radiation (3.1 kWh/m².day)	Climate -> Category (Ti-Ta)	High Radiation (2000 Btu/ft².day)	Medium Radiation (1500 Btu/ft².day)	Low Radiation (1000 Btu/ft².day)
A (-5 °C)	13.8	10.3	6.8	A (-9 °F)	47.3	35.2	23.3
B (5 °C)	13.4	9.9	6.4	B (9 °F)	45.7	33.6	21.7
C (20 °C)	12.0	8.4	5.0	C (36 °F)	40.8	28.8	17.1
D (50 °C)	7.5	4.3	1.4	D (90 °F)	25.5	14.7	4.6
E (80 °C)	2.3	0.2	0.0	E (144 °F)	8.0	0.7	0.0

A- Pool Heating (Warm Climate) B- Pool Heating (Cool Climate) C- Water Heating (Warm Climate) D- Space & Water Heating (Cool Climate) E- Commercial Hot Water & Cooling

TECHNICAL RESULTS			Tested in accordance with: ISO 9806:1994				
ISO Efficiency Equation [NOTE: Based on gross area and (P)=Ti-Ta]							
SI UNITS:	$\eta = 0.827 - 1.41520(P/G) - 0.05840(P^2/G)$	Y Intercept:	0.841	Slope:	-4.712 W/m².°C		
IP UNITS:	$\eta = 0.827 - 0.24942(P/G) - 0.00571(P^2/G)$	Y Intercept:	0.841	Slope:	-0.830 Btu/hr.ft².°F		
Incident Angle Modifier							
θ	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°
K _{ra}	1.00	0.98	0.96	0.92	0.84	0.68	
Impact Safety Rating: 0							

COLLECTOR SPECIFICATIONS					
Gross Area:	2.998 m²	32.27 ft²	Dry Weight:	49.0 kg	108.0 lb
Net Aperture Area:	2.861 m²	30.80 ft²	Fluid Capacity:	4.5 liter	1.2 gal
REMARKS: There are (2) pieces of glass					

Shawn Martin

Technical Director

Print Date: March 14, 2019 Page 1 of 4

Please verify certification is active on the SRCC website www.solar-rating.org.

© Solar Rating & Certification Corporation™ (ICC-SRCC) 3060 Saturn Street, Suite 100, Brea, CA 92821

Figure A-III 1 Fiche technique Capteur plan vitrée
Tirée de Yettou et al (2010)

ANNEXE IV

ALGORITHME CALCUL FRACTION SOLAIRE PYSCRIPTER

```
# Name:Maitrise Ets Solaire Biomasse
# Purpose: Calcul fraction solaire de TRNSYS
# Author: Fabrice Couliati
# Created: 24-03-2020
# Copyright: (c) Fabrice Couliati 2020
# Licence: <your licence>
#-----
from sys import *
from solar_mod import *
from finance_mod import *
from numpy import *
from collections import *
from matplotlib.pyplot import *

# créer une matrice pour les données

nm = array([31,28,31,30,31,30,31,31,30,31,30,31]) # nombre de jours par mois
hrr=array([0,1488, 2832, 4320,5760,7248,8688,10176,11664, 13104,14592, 16032,
17520]) # nombre d'heures dans chaque mois.

# Récolte de donnée du problème au niveau du capteur solaire

donnees1 = loadtxt("journalierTaman.txt") # Extraction de TRNSYS
temps = donnees1[:,0] # heures
```

```

It = donnees1[:,1]*(1/3600)          # valeurs de I total donné par TRNSYS en
kJoules/m2/ hr

Qucoll = donnees1[:,2]*(1/3600)      # Énergie utile venant du collecteur
QDHW = donnees1[:,3]*(1/3600)        # Énergie utile venant du tank solaire chaude
QAux = donnees1[:,4]*(1/3600)        # Énergie auxiliaire Biomasse
EtaColl=donnees1[:,5]*(1/3600)       # Rendement du capteurs journalier
Fsol_d=donnees1[:,6]*(1/3600)        # Fraction solaire journalière

Deltat = 1.0

hrr2  =  array([0,744,1416,2160,2880,3624,4344,5088,5832,6552,7296,8016,8760])  #
nombre d'heures écoulé après chaque mois

EDHW=sum(QDHW)# Énergie utile venant du tank solaire chaude
It_an=sum(It)
Eaux=sum(QAux) #Énergie auxiliaire biomasse
EuColl=sum(Qucoll) #Energie fournie au réservoir
E_Charge=EDHW # Charge énergétique du système
EtaColl_a=-sum(EtaColl)
# calcul de la fraction
Fraction_solaire= 1-Eaux/EDHW

print('le rayonnement annuel = ',It_an, 'kWh/m2')
print('Charge eau chaude à la sortie réservoir = ', EDHW, 'kWh')
print('Energie utile produite par le capteur = ',EuColl, 'kWh')
print ('consommation énergie auxiliaire Biomasse = ',Eaux, 'kWh')
print ('La fraction solaire est = ', Fraction_solaire)
print ('Le rendement du collecteur est = ', EtaColl_a)

```

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abokersh, M. H., Vallès, M., Saikia, K., Cabeza, L. F., & Boer, D. (2021). Techno-economic analysis of control strategies for heat pumps integrated into solar district heating systems. *Journal of Energy Storage*, 42, 103011. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2021.103011>
- Aoues, K., Moummi, N., Zellouf, M., Moummi, A., Labed, A., Achouri, E., & Benchabane, A. (2009). Amélioration des performances thermiques d ' un capteur solaire plan à air : Etude expérimentale dans la région de Biskra. *Revue des Energies Renouvelables*, 12(2), 237–248.
- Canadian Solar Industries Association. (2010). Solar Vision 2025 Canadian Solar Industries Association, (December), 1–41.
- Carneiro, A., de Oliveira, D., Rocha, M., Silva, M., Guerra, D., & Nogueira, M. (2017). Performance quantification of a cyclonic boiler using biomass sawdust. *Energy Procedia*, 120, 403–409. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.07.185>
- Chauffage Atlantic. (2020). No Title. Repéré à <https://www.atlantic.fr/Chauffer-le-logement/Chauffage-electrique/Guide-Chauffage/Sublimez-votre-interieur-le-catalogue-de-nos-solutions-chauffage>
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes. Design Studies* (Fourth Edi, Vol. 3). (S.l.) : Wiley. [https://doi.org/10.1016/0142-694x\(82\)90016-3](https://doi.org/10.1016/0142-694x(82)90016-3)
- ELMARSI, N., & ABYAYE, Y. (2010). Licence Professionnelle Rapport : Projet d' installation eau chaude sanitaire À l ' école supérieure de technologie Fès, 1–27.
- Energieplus. (2010). Le capteur solaire à eau chaude. Repéré à <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16760>
- Franco, A. (2020). Methods for the sustainable design of solar energy systems for industrial process heat. *Sustainability (Switzerland)*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/su12125127>
- Guillemette Énergies. (2011). Bois et Biomasse. Repéré à <http://guillemetteenergies.ca/bois>
- Hou, J., Che, D., Liu, Y., & Jiang, Q. (2018). A New System of Absorption Heat Pump Vs. Boiler for Recovering Heat and Water Vapor in Flue Gas. *Energy Procedia*, 152, 1266–1271. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2018.09.180>

- IEA-Pvp. (2020). Snapshot of Global PV Markets 2020. *Photovoltaic Power Systems Programme*, 1–16. Repéré à http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/technical/PVPS_report_-_A_Snapshot_of_Global_PV_-_1992-2014.pdf
- IRENA. (2017). *REpenser l'énergie 2017: accélérer la transformation énergétique mondiale* Agence internationale pour les énergies renouvelables. Repéré à <https://www.irena.org/404?item=%2Fmenu%2Findex&user=extranet%5CAnonymous&site=IrenaLive>
- Jaleran, X. (s.d.). Les différents concepts de capteurs à tubes sous vide. *LePanneauSolaire.net*. Repéré à <https://www.lepanneausolaire.net/les-differents-concepts-capteurs-tubes-sous-vide.php>
- Jean Louis Busquet. (2002). Le guide du chauffe eau soalire collectif. *Cabestany cedex [France] : France édition multimédia*, 36.
- Johannes, K. (2005). Optimisation des installations solaires collectives d ' eau chaude sanitaire : application des techniques « des faibles débits » et « du stockage divisé ».
- Kortela, J., & Jämsä-Jounela, S. L. (2017). Improvement of load-following capacity of grate boilers based on the combustion power soft-sensor. *Energy Procedia*, 120, 410–416. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.07.188>
- Krarouch, M., Hamdi, H., Lamghari, S., & Outzourhit, A. (2018). Simulation of floor heating in a combined solar-biomass system integrated in a public bathhouse located in Marrakech. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 353(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/353/1/012005>
- Krarouch, Mohamed, Lamghari, S., Hamdi, H., & Outzourhit, A. (2020). Simulation and experimental investigation of a combined solar thermal and biomass heating system in Morocco. *Energy Reports*, 6, 188–194. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.11.270>
- Krarouch, Mohamed, Ruesch, F., Hamdi, H., Outzourhit, A., & Haller, M. (2020). Dynamic simulation and economic analysis of a combined solar thermal and pellet heating system for domestic hot water production in a traditional Hammam. *Applied Thermal Engineering*, 180(August), 115839. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115839>
- Kreft, W. (2020). Modeling and simulation of heat production in a local heating installation including a batch-fired straw boiler with a buffer tank. *Heliyon*, 6(12), e05667. <https://doi.org/10.1016/J.HELİYON.2020.E05667>

- Laboratoire de recherche en diversification énergétique, CANMET, & Limited, S. E. (2000). *Les petites installations Guide à la biomasse : de chauffage de l'acheteur*. Canada.
- Lamarche, L. (2020). *ENR835 Technologies des systèmes solaires* – Montréal.
- Lane, T. (2004). *Solar Hot Water Systems: Lessons Learned, 1977 to Today*. (S.l.) : (s.n.).
- Las-Heras-Casas, J., López-Ochoa, L. M., Paredes-Sánchez, J. P., & López-González, L. M. (2018). Implementation of biomass boilers for heating and domestic hot water in multi-family buildings in Spain: Energy, environmental, and economic assessment. *Journal of Cleaner Production*, 176, 590–603. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.12.061>
- Lipu, M. S. H., & Jamal, T. (2013). *Techno-economic Analysis of Solar Concentrating Power (CSP) in Bangladesh Hybrid Electricity Supply System in Remote/Rural Area View project Suitable Mobile Broadband Solution for South Asia View project INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED RENEWABLE ENERGY RESEARCH*. Repéré à <https://www.researchgate.net/publication/277504473>
- Lugo, S., García-Valladares, O., Best, R., Hernández, J., & Hernández, F. (2019). Numerical simulation and experimental validation of an evacuated solar collector heating system with gas boiler backup for industrial process heating in warm climates. *Renewable Energy*, 139, 1120–1132. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.02.136>
- Mehregan, M., Abbasi, M., Khalilian, P., Majid Hashemian, S., & Madadi, A. (2021). Energy, economic, environmental investigations and optimization of a combined cooling, heating and power system with hybrid prime mover of gas engine and flat plate solar collector. *Energy Conversion and Management*, 115018. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2021.115018>
- Mohamed, K., & Michel, H. (2020). Design optimisation of a combined pellets and solar heating systems for water heating in a public bathhouse. *Energy Reports*, 6, 1628–1635. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.12.031>
- Moreau, A. (2015). Field Study of Solar Domestic Water Heaters in Quebec Energy Procedia Field Study of Solar Domestic Water Heaters in Quebec, (August). <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.146>
- Moreno, A., Chemisana, D., & Fernández, E. F. (2021). Hybrid high-concentration photovoltaic-thermal solar systems for building applications. *Applied Energy*, 304, 117647. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2021.117647>

- Palomba, V., Borri, E., Charalampidis, A., Frazzica, A., Cabeza, L. F., & Karellas, S. (2020). Implementation of a solar-biomass system for multi-family houses: Towards 100% renewable energy utilization. *Renewable Energy*, 166, 190–209. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2020.11.126>
- PEUSER, REMMERS, S. (2005). *Installations solaires thermiques : conception et mise en oeuvre*. (S.l.) : (s.n.).
- Régie du bâtiment du Québec. (2013, February). Contrôle de la température de l'eau chaude.
- Ren, A., & Report, G. S. (2019). REN21 GLOBAL STATUS REPORT 2019.
- REN21 Members. (2020). *Renewables 2020 Global Status Report. Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*. (S.l.) : (s.n.). Repéré à http://www.ren21.net/resources/publications/%0Ahttps://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2020_full_report_en.pdf
- Rohmah, N., Pikra, G., & Salim, A. (2013). Organic Rankine Cycle System Preliminary Design with Corn Cob Biomass Waste Burning as Heat Source. *Energy Procedia*, 32, 200–208. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2013.05.026>
- RONA. (2021). Comment bien choisir un chauffe-eau. Repéré à <https://www.rona.ca/fr/atelier/guides/comment-bien-choisir-un-chauffe-eau>
- Shah, L. (2002). A solar combisystem based on a heat storage with three internal heat exchangers. *Sags Rapport BYG DTU Sr-02-19*. Repéré à <http://www.studenterpraest.dtu.dk/upload/institutter/byg/publications/rapporter/byg-sr0219.pdf>
- Sharma, N. (2021). Public perceptions towards adoption of residential Solar Water Heaters in USA: A case study of Phoenixians in Arizona. *Journal of Cleaner Production*, 320, 128891. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.128891>
- Sibley, M., & Sibley, M. (2015). “Hybrid transitions: Combining biomass and solar energy for water heating in public bathhouses”. *Energy Procedia*, 83, 525–532. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.172>
- Solar Millennium AG, E. (2009). The Construction of the Andasol Power Plants. Repéré à :http://www.solarmillennium.de/english/technology/references_and_projects/andasol-spain/andasol_artikel.html

- Tian, Z., Perers, B., Furbo, S., & Fan, J. (2018). Thermo-economic optimization of a hybrid solar district heating plant with flat plate collectors and parabolic trough collectors in series. *Energy Conversion and Management*, 165, 92–101.
<https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2018.03.034>
- Wang, D., Liu, L., Yuan, Y., Yang, H., Zhou, Y., & Duan, R. (2020). Design and key heating power parameters of a newly-developed household biomass briquette heating boiler. *Renewable Energy*, 147, 1371–1379. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.09.081>
- Yettou, F., Malek, A., & Gama, M. H. A. (2010). Optimisation d ' un système solaire de production d'eau chaude, 13, 465–476.
- Zemann, C., Deutsch, M., Zlabinger, S., Hofmeister, G., Gölles, M., & Horn, M. (2020). Optimal operation of residential heating systems with logwood boiler, buffer storage and solar thermal collector. *Biomass and Bioenergy*, 140, 105622
 . <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2020.105622>
- Zhang, G., Hu, K., Yan, C., Shi, J., Sheng, K., Gong, Y., & Xu, Y. (2021). Optimal design and integration of multiple-function solar water heating systems based on a co-adaptive matchmaking method. *Energy and Buildings*, 252, 111492.
<https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2021.111492>