



Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
International Institute for Water and Environmental Engineering

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DUMASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT OPTION :ENERGIE

Présenté et soutenu publiquement le 26 Juin 2012 par

Jean Calvin NSUNFO TIAM

THEME :

**ANALYSE ET EXPERIMENTATION D'UN SYSTEME
DE CLIMATISATION SOLAIRE PAR ADSORPTION**

Travaux dirigés par :

Dr Yao AZOUMAH

Justin BASSOLE

Président de Jury :

Dr SIDIBE Sayon

Membres du Jury :

NOUMI Eric

LAVIGNE Batiste

BASSOLE Justin

Promotion 2011/2012

REMERCIEMENTS

Je tiens tout particulièrement à remercier mon encadreur de stage Monsieur Justin BASSOLE et mon maitre de stage Dr Yao K. AZOUMAH pour la confiance qu'ils m'ont accordée tout au long du stage, ainsi que Monsieur Hamed SANKARA, Monsieur YOHAN Richardson, et Mademoiselle Alexandrine EKOUBE, pour leurs soutiens divers.

Je remercie également tous les membres du Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie (LESEE) de la Fondation 2iE.

Je ne saurais terminer cette partie de remerciement sans adresser mes remerciements très chaleureux à mes chers parents TIAM David et TIAM Jeanne née METOU, ainsi qu'à tous mes frères et sœurs et à la grande famille TIAM'S.

RESUME

Les climatiseurs à compression électrique sont la cause d'une consommation d'énergie électrique considérable. Pour le cas du Burkina Faso, environ 30% de toute l'électricité produite durant les périodes chaudes sont destinés aux fonctionnements de ces climatiseurs à compression électrique. Pour un pays importateur net d'hydrocarbures comme le Burkina Faso dont l'électricité produite est à 67% d'origine thermique, 17% importé des pays voisins et 16% d'origine hydroélectrique, le coût de l'énergie électrique étant en permanence tributaire du cours international du pétrole, lequel ne cesse d'augmenter. La dépendance totale aux énergies fossiles constitue donc un réel frein sur le développement économique du pays.

Au vu des problématiques énergétiques dont pose la climatisation en zone subsaharienne durant les périodes chaudes, trouver une alternative à la climatisation conventionnelle via la climatisation solaire vue le potentiel solaire important dans cette zone, sera un processus ferme de réduction de la pauvreté.

C'est dans ce contexte que pour des fins de recherche, mon travail porte sur l'étude d'un pilote de climatisation solaire par adsorption d'une puissance froide de 8 kW. Ce dispositif est nouvellement installé au Laboratoire d'Energie Solaire et Economie d'Energie(LESEE) de la Fondation 2iE Ouagadougou, Burkina Faso.

La mission qui nous a été confiée consiste à faire une étude détaillée de l'installation en place, d'élaborer le schéma détaillé de l'installation, d'instrumenter et d'expérimenter le système installé en vue de faire des propositions d'amélioration du système en place. L'expérimentation du système nous a permis dès les premiers jours de constater le dysfonctionnement du pilote. Ce qui nous a conduit à faire un audit complet de l'installation afin de diagnostiquer ce problème de dysfonctionnement et d'y remédier.

Les diagnostics ont été bien effectués et nous avons déterminé les problèmes susceptibles de causer le dysfonctionnement du système en place ; Nous les avons résolus de façon efficace, puis nous avons mis sur pieds un système optimisé de l'installation en tenant compte de toutes les propositions d'amélioration, des réalités climatiques et socio-économiques locales.

En somme, nous espérons créer un microclimat de confort à l'intérieur d'un local situé dans les régions chaudes fortement ensoleillées à partir de l'énergie solaire via une machine frigorifique à adsorption.

Mots clés

1. Climatisation solaire
2. Machine à adsorption
3. Capteur solaire thermique
4. température
5. Circuit hydraulique

ABSTRACT

Air conditioners using electricity are the cause of a considerably consumption electrical energy. For the case of Burkina Faso, about 30% of all electricity produced during the warmer months are intended for the functioning of those air conditioners using electricity. For a net importer of hydrocarbons such as Burkina Faso in which electricity is produced at 67% thermal, 17% imported from neighboring countries and 16% from hydropower, the cost of electric energy is continuously dependent on international oil prices, which is increasing. Total dependence on fossil fuels is therefore a real brake on economic development.

In view therefore, of the energy problem which arises in sub-Saharan zone because of the electrical consumption of the air conditioners using electricity during warm periods, find an alternative to conventional air conditioning via solar cooling at the sight of the high solar potential in this area, will be a process of farm poverty reduction.

It is in this context that for research purposes, my work involves the study of a pilot solar adsorption cooling power of cold 8 kW newly installed at the Solar Energy and Energy saving at Laboratory of the 2iE Foundation in Ouagadougou, Burkina Faso.

My duty consists in making a detailed study of the existing facility, to develop the detailed scheme of the installation, to instrument and test the installed system in order to make proposals for improving the system in place. The experimental system has allowed us from the early days to see the pilot's fault. This allowed us to conduct a complete audit of the facility to diagnose and solve this problem.

Diagnoses were well done and we determined the problems that can cause malfunction of the system in place; we solved it efficiently, then we put in point an optimized installation taking into account all proposals improvement, climatic realities and socio-economic of our local conditions.

In sum, we hope to create a comfortable microclimate inside a room in the sunny warm regions strongly from solar energy via an adsorption chiller.

Keys word

1. Solar cooling
2. Adsorption machine
3. Solar thermal collector
4. Temperature
5. Hydraulic

LISTE DES ABREVIATIONS

2iE : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

LESEE : Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie

UTER : Unité Thématique d'Enseignement et de Recherche

GEI : Génie Energétique Industriel

ACS: Adsorption Cooling System

ACS 08 désigne la machine à adsorption de puissance froid 8kW

PCS: Pump Cooling Station

HT: High temperature

MT: Mean temperature

LT: Low temperature

Circuit HT: circuit eau chaude

Circuit MT: circuit eau de refroidissement

Circuit LT: circuit eau de production du froid

HT_{in} désigne température d'eau chaude à l'entrée de la machine à adsorption

HT_{out} désigne température d'eau chaude à la sortie de la machine à adsorption

MT_{in} désigne température d'eau de refroidissement à l'entrée de la machine à adsorption

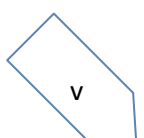
MT_{out} désigne température d'eau de refroidissement à la sortie de la machine à adsorption

LT_{in} désigne température d'eau froide à l'entrée de la machine à adsorption

LT_{out} désigne température d'eau froide à la sortie de la machine à adsorption

HMT : Hauteur Manométrique Totale

DN : Diamètre Nominal



NOMENCLATURE

Nomenclature	Désignation	Unité
P_{fr}	Puissance froid	W
P_{th}	Puissance thermique	W
\dot{m}	Débit massique	kg/s
D_v	Débit volumique	m^3/s
HMT	Hauteur Manométrique Totale	m
ΔH	Perte de charge	m
ΔHL	Perte de charge linéaire	m
ΔH_s	Perte de charge singulière	m
Ks	Coefficient de Strickler	/

Symbole grec	Désignation	unité
ρ	Masse volumique	kg/m^3
κ	coefficient de perte de charge singularité	/

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS.....	ii
RESUME	iii
ABSTRACT.....	iv
LISTE DES ABREVIATIONS.....	iv
SOMMAIRE.....	vii
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES PHOTOGRAPHIES	viii
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
I. Introduction.....	1
II. Présentation de la structure d'accueil.....	2
III. Analyse fonctionnelle du système de climatisation solaire par adsorption.....	3
IV. Optimisation du système de climatisation solaire de l'installation en place.....	14
V. Proposition d'amélioration du système en place.....	33
VI. Conclusion - Perspectives	36
VII. Recommandations.....	37
VIII. Bibliographie.....	38
IX. Annexes.....	39
<i>Annexe 1: Détails de calcul de la puissance totale fournie par chacune des configurations.</i>	<i>39</i>
<i>Annexe 2: Détails des calculs de la HMT.....</i>	<i>46</i>
<i>Annexe 3: Caractéristiques des capteurs solaires thermiques plans BA 22 V/H, BATEC.....</i>	<i>48</i>
<i>Annexe 4: Caractéristiques des ballons de stockage sans échangeurs de chaleur d'Eko-fil.....</i>	<i>49</i>
<i>Annexe 5: Données hydrométriques sur le site de Kamboinsin</i>	<i>50</i>
<i>Annexe 6: Données techniques de la machine à adsorption ACS 08.....</i>	<i>50</i>
<i>Annexe 7: Schéma détaillé du système en place</i>	<i>51</i>
<i>Annexe 8: Schéma détaillé du système optimisé</i>	<i>51</i>

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Principe de fonctionnement de la machine frigorifique à compression mécanique	4
Figure 2 : Principe de fonctionnement de la machine frigorifique adsorption	4
Figure 3 : Schéma du principe de fonctionnement d'une machine frigorifique à adsorption	5
Figure 4: Schéma du principe de fonctionnement de la machine à adsorption fabriquée chez SorTech AG	6
Figure 5: Représentation schématisée du fonctionnement alterné des deux compartiments	6
Figure 6: Le schéma détaillé de l'installation	7
Figure 7: Schématisation du montage des 15 capteurs solaires thermiques plans	8
Figure 8: Montage en parallèle des capteurs plans	25
Figure 9: Montage en série des capteurs plans	25
Figure 10: Evolution du stockage stratifié à des instants différents $t_0 < t_1 < t_2$	27
Figure 11 : Schématisation du mode de raccordement des ballons	28
Figure 12 : Raccordement optimal des ballons pour l'installation	29
Figure 13: Perte de charge et caractéristiques de la pompe installée	30
Figure 14: Perte de charge et caractéristiques de la nouvelle pompe	32
Figure 15: Illustration de l'installation du circuit LT qu'on envisage à mettre sur pied	33

LISTE DES PHOTOGRAPHIES

Photographie 1: Local clim sol	8
Photographie 2: Champ de capteurs solaires	8
Photographie 3: Raccords entre les ballons de stockage d'eau chaude	9
Photographie 4: Images de la machine à adsorption ACS 08, de marque SorTech AG	10
Photographie 5: La tour de refroidissement KT – A40, MULTI GmbH	10
Photographie 6: Les deux ventilo-convecteurs du bâtiment climatisation solaire	11
Photographie 7: Station de pompe (Kit de pompage), PCS 08	11
Photographie 9 : Almeno 2290 – 8	15
Photographie 8 : Thermocouple TPI 343, type K	15
Photographie 10 : Station solaire	15
Photographie 11 : Solari mètre, Extel M-830B	16
Photographie 12 : Variateurs de vitesse, Télémécanique	16
Photographie 13 : Visuel des cadrant piézométriques	16
Photographie 14 : Image de la purge manuelle	16
Photographie 15: Représentation des coudes du circuit LT	19
Photographie 16 : Photographie du mode de raccordement des ballons	28
Photographie 17: Illustration du mode raccordement du système	29
Photographie 18: Image des robinets-vannes de l'installation et celle d'un robinet tournant	34
Photographie 19: Image de l'interrupteur horaire de l'installation	35

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1: Caractéristiques des pompes de l'installation.....</i>	<i>13</i>
<i>Tableau 2: Récapitulatif des conduites de l'installation</i>	<i>14</i>
<i>Tableau 3: Matériaux et longueurs des canalisations de l'installation</i>	<i>14</i>
<i>Tableau 4: Récapitulatif des critères aidant à orienter vers l'une ou l'autre solution.....</i>	<i>21</i>
<i>Tableau 5: Valeurs de puissance fournie par les capteurs plans BA 22 V/H, BATEC.....</i>	<i>22</i>
<i>Tableau 6: Détails des calculs des pertes de charges linéaires pour DN = 25 mm</i>	<i>34</i>
<i>Tableau 7: Détails des calculs des pertes de charges linéaires pour DN = 25 mm</i>	<i>34</i>
<i>Tableau 8 : Classement des 5 configurations par ordre décroissant en fonction de leurs puissances totales fournies.....</i>	<i>45</i>
<i>Tableau 9: Détails de calculs des pertes de charges linéaires dans notre système</i>	<i>46</i>
<i>Tableau 10: Recensement des singularités de l'installation et calcul de $\sum k$</i>	<i>47</i>

I. Introduction

Jusqu'à présent, le conditionnement d'air et les réfrigérateurs de nos domiciles et bâtiments fonctionnent principalement par la voie classique des machines frigorifiques à compression, qui nécessitent pour le fonctionnement du compresseur, une dépense d'énergie électrique considérable. Le cas du Burkina Faso où seuls les climatiseurs à compression électrique sont la cause d'une consommation d'environ 30% de toute l'électricité produite durant les périodes chaudes, une prise de conscience sur l'importance d'usage des énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire (ressource potentielle au Burkina Faso avec près de 9 mois de saison sèche caractérisée par un fort ensoleillement) dans le secteur de la climatisation serait la bienvenue.

La recherche et la mise en œuvre d'installations de climatisation solaire de petites à moyennes puissances (<20 kW) est actuellement un domaine en plein essor à travers le monde.

C'est dans ce contexte que le Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie (LESEE) de la Fondation 2iE basée au Burkina Faso, en collaboration avec ses partenaires, vient d'installer un pilote de climatisation solaire d'une puissance de 8kWf pour des fins de recherche dans le but d'étudier ces alternatives à la climatisation conventionnelle et leur intégration dans le contexte subsaharien.

C'est dans ce cadre que découle le thème de mon mémoire intitulé : **ANALYSE ET EXPERIMENTATION D'UN SYSTEME DE CLIMATISATION SOLAIRE PAR ADSORPTION.**

Il s'agit donc, de consolider le système en place, de l'instrumenter et de l'expérimenter, en fin de faire des propositions d'amélioration du pilote en tenant compte des réalités climatiques et socio-économique locales.

II. Présentation de la structure d'accueil

Présentation du Laboratoire

Le Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie (LESEE) du 2iE, dirigé par Dr Yao AZOUMAH, est créé en novembre 2008. L'équipe de recherche actuelle est composée de trois (03) enseignants chercheurs, un enseignant-doctorant, trois (03) doctorants, sept(07) ingénieurs de recherche, deux (02) techniciens de laboratoire, et des stagiaires internes et externes au 2iE (en moyenne une vingtaine par an) .

Le LESEE entend contribuer au développement des capacités d'innovation industrielle en Afrique dans le domaine du solaire (PV, thermique basse et haute températures) pour une production et une utilisation rationnelle d'énergies électrique/thermique (à petite et grande échelles).

Les orientations de recherche dudit laboratoire sont regroupées en quatre grands axes :

Axe 1 : Evaluation « précise et continue » de la ressource solaire et des besoins en énergie en Afrique ;

Axe 2 : Centrales solaires à concentration (thermodynamiques) ;

Axe 3 : Habitat, architecture bioclimatique & Systèmes solaire PV/thermique (basse température) ;

Axe 4 : Conception optimale, optimisation thermodynamique des systèmes énergétiques et efficacité énergétique.

III. Analyse fonctionnelle du système de climatisation solaire par adsorption

Préambule

La climatisation (production de froid) est équivalente à une absorption de chaleur, car refroidir un corps ne consiste pas à lui donner une quantité de froid, mais à lui enlever une quantité de chaleur. En d'autres termes, elle consiste à créer un confort thermique en extrayant la chaleur dans un local tout en contrôlant des paramètres comme l'humidité de l'air ainsi que sa qualité. Il existe plusieurs procédés de climatisations parmi lesquelles on peut notamment citer la climatisation solaire.

La climatisation solaire désigne l'ensemble des moyens pour climatiser un local en utilisant la chaleur du soleil comme ressource énergétique primaire.

La climatisation solaire par adsorption désigne l'ensemble des moyens et équipements mis en jeu pour climatiser en utilisant la chaleur du soleil comme ressource énergétique primaire et la machine à adsorption comme machine frigorifique.

Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'un système de climatisation par adsorption repose sur 3 circuits hydrauliques [2]:

Le circuit chaud, HT (High Temperature) dans lequel circule le fluide chaud délivrant la chaleur nécessaire à l'adsorption (par exemple : chaleur du soleil, chaudière, chaleur des déchets industriels, etc.). La température du fluide en circulation dans ce circuit est de l'ordre 55 °C.

Le circuit de refroidissement, MT (Mean Temperature) qui a pour rôle de refroidir les chambres d'adsorption et le condenseur de la machine frigorifique à adsorption. Le Circuit MT peut être relié à (par exemple : un puits, un tour de refroidissement, une sonde géothermique, etc.)

Et le de circuit de production d'eau glace, LT (Low Temperature) dans lequel circule froid provenant de l'évaporateur.

La machine à adsorption étant au centre de la climatisation solaire par adsorption, une étude approfondie sur son principe de fonctionnement, nous permettra de mieux comprendre qu'elles seront les équipements adéquats à mettre en œuvre pour réaliser un montage de climatisation solaire par adsorption, ceci afin de mener à bien une analyse d'un tel système, qui est l'un des objectifs spécifiques de mon stage.

III.1. Description du principe de fonctionnement d'une machine frigorifique à adsorption

III.1.1 - Analogie avec la machine frigorifique traditionnelle

Bien que la machine à adsorption semble assez différente de la machine frigorifique traditionnelle, le principe de base de fonctionnement reste le même :

- Circulation d'un fluide frigorigène ;
- Evaporation du fluide avec production de froid ;
- Compression du fluide demandant un apport d'énergie ;
- Condensation du fluide avec production de chaleur.

Cependant, la différence réside dans :

- Le moyen de comprimer le fluide
 - mécanique dans le cas d'une machine traditionnelle,
 - thermochimique dans le cas de la machine à adsorption.
- Le type d'énergie nécessaire à cette compression
 - électrique dans le cas d'une machine traditionnelle,
 - calorifique dans le cas de la machine à adsorption.

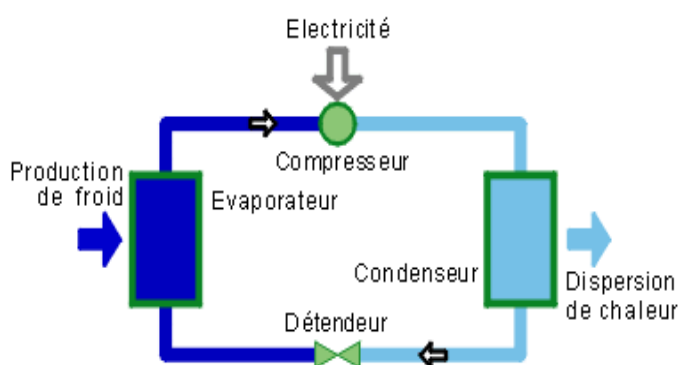


Figure 1 : Principe de fonctionnement de la machine frigorifique à compression mécanique

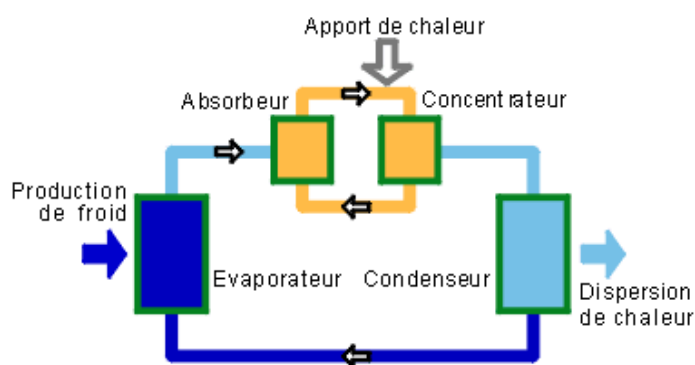


Figure 2 : Principe de fonctionnement de la machine frigorifique adsorption

III.1.2 - Les composants de la machine à adsorption

Le schéma de principe d'une machine frigorifique à adsorption est représenté dans la figure 3, dans le cas le plus simple, la machine comporte les composants suivants [3]:

- un adsorbeur (contenant l'adsorbant solide, en contact avec une source chaude, il joue pour le cycle à adsorption, le rôle joué par le compresseur (aspiration et compression) dans un cycle à compression de vapeur.
- Un condenseur, en contact avec une source intermédiaire dans lequel le réfrigérant se condense à la pression de condensation.
- Un réservoir, qui sert à stocker le réfrigérant liquide provenant du condenseur.
- Une vanne de détente V3.
- Un évaporateur, en contact avec la source froide, dans lequel le réfrigérant se vaporise à pression d'évaporation.
- Deux clapets anti-retour V1 et V2.

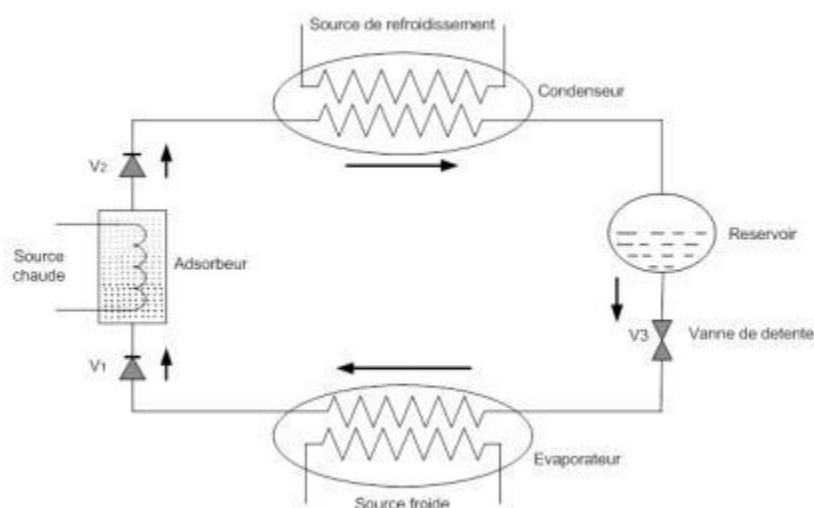


Figure 3 : Schéma du principe de fonctionnement d'une machine frigorifique à adsorption

III.1.3 - Principe de fonctionnement

Au début de cycle, les vannes V1, V2 et V3 sont fermées, l'adsorbeur se trouve à sa température minimale, l'adsorbant est chargé d'une masse maximale d'adsorbat. En chauffant l'adsorbeur, la pression du gaz adsorbé augmente au fur et à mesure que sa température augmente, la masse adsorbée reste constante. Lorsque la pression atteint celle du condenseur (pression haute), la vanne V2 s'ouvre, la vapeur désorbée circule vers le condenseur où elle se liquéfie à la température de condensation et le condensât est stocké dans le réservoir.

Le chauffage continue jusqu'à ce que l'adsorbeur soit en équilibre avec la température de la source chaude où la température atteint sa valeur maximale. À ce moment, le refroidissement de l'adsorbeur commence. Sa pression diminue et la vanne V2 se ferme.

La vanne V3 s'ouvre, le condensât stocké dans le réservoir se détend et entre dans l'évaporateur, sa pression chute de la pression du condenseur jusqu'à celle de l'évaporateur (pression basse).

Lorsque la pression qui règne dans l'adsorbeur atteint celle de l'évaporateur, la vanne V1 s'ouvre et l'adsorbeur qui se trouve en légère dépression, aspire la vapeur produite dans l'évaporateur.

L'effet utile de refroidissement se produit lors de l'évaporation. Le refroidissement de l'adsorbeur continue jusqu'à ce qu'il atteigne sa température minimale, où l'adsorbant est saturé en adsorbat. Les vannes V1 et V3 se ferment et un autre cycle commence.

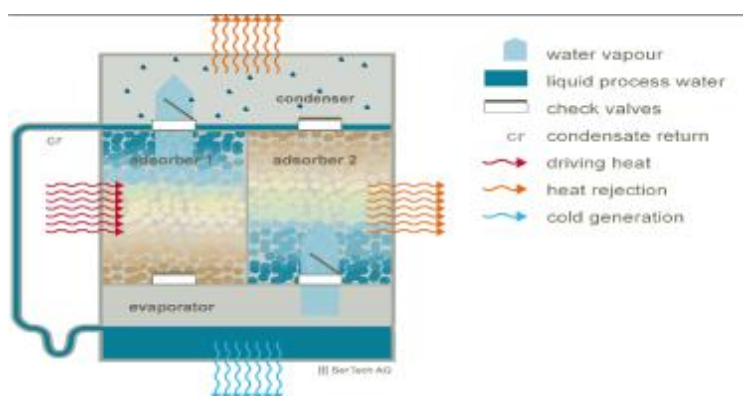


Figure 4: Schéma du principe de fonctionnement de la machine à adsorption fabriquée chez SorTech AG [4]

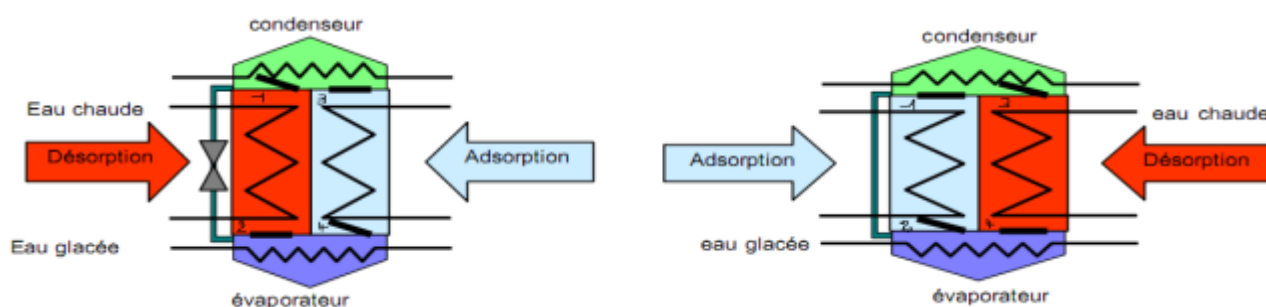


Figure 5: Représentation schématisée du fonctionnement alterné des deux compartiments d'absorptions dans la machine à adsorption

III.2. Description détaillée du système de climatisation solaire par adsorption mise en place

Le Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie (LESEE) de la Fondation 2iE basée au Burkina Faso, vient d'installer un pilote de climatisation solaire d'une puissance de 8kWf.

III.2.1 - Description des équipements de l'installation

Le système mis en place est constitué de :

- Les capteurs solaires thermiques plans ;
- Une station solaire ;
- Deux ballons de stockage ;
- Un banc de pompes ;
- Une machine à adsorption ;
- Deux ventilo-convecteurs ;
- Une tour de refroidissement.

La disposition de tous ces équipements est représentée sur le schéma ci-dessous.

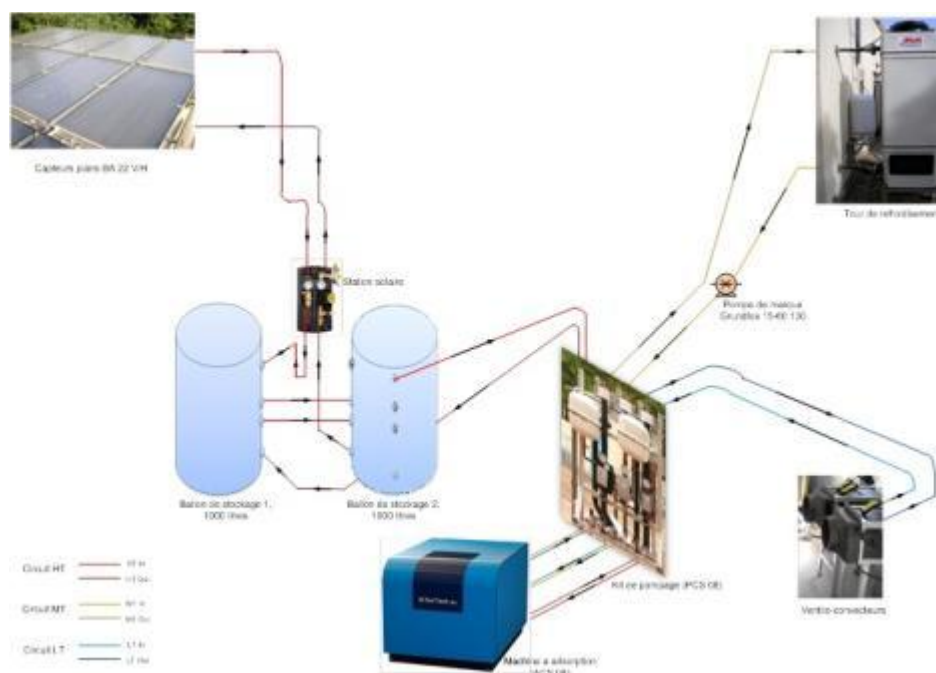


Figure 6: Le schéma détaillé de l'installation

Une partie de l'installation est située dans un bâtiment orienté Nord-Sud fait d'une seule pièce dont la surface intérieure est de 24,6 m² (largeur: 3,64 m et longueur : 6,76 m, hauteur : 2,57 m). Sur le toit, nous avons les capteurs plans installés avec un angle d'inclinaison de 15° Sud et à 60 cm façade Est, la tour de refroidissement. (Voir photographie 1)



Photographie 1: *Local clim sol*

1. Les capteurs solaires

L'installation est dotée de 15 capteurs solaires thermiques plans BA 22 V/H produits par la société BATEC. Ils sont tous montés en parallèle. L'inclinaison des capteurs est de 15° et ils sont orientés vers le Sud suivant la pente de la toiture de bâtiment. Caractéristique des capteurs plans BA 22 V/H, BATEC (voir annexe 3).



Photographie 2: *Champ de capteurs solaires*

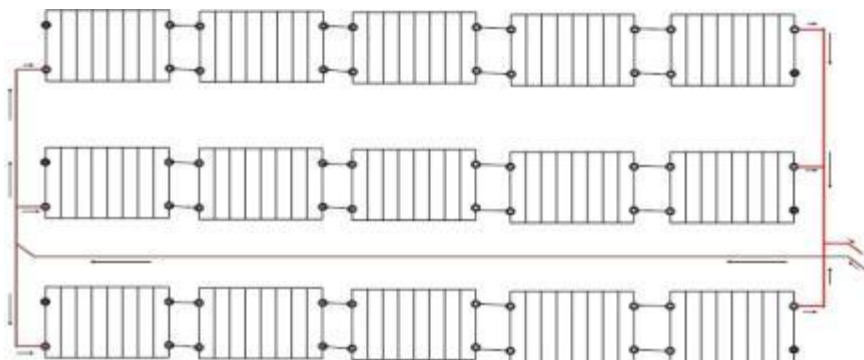


Figure 7: *Schématisation du montage des 15 capteurs solaires thermiques plans*

2. Station solaire

La station solaire est fournie par la société PAW. Elle contient :

- 1 circulateur Grundfos 15-60(pompe alimentant les capteurs plans en eau) ;
- Thermomètres solaires en métal, 0-160°;
- Air stop dans la rampe de départ, pour le dégazage permanent du fluide solaire ;
- Unité de rinçage et de remplissage au-dessous du circulateur, pour un maniement facile, permet le remplissage et le rinçage de l'installation ;
- Flow Check d'une plage de mesure : 2 - 8 l/min ;
- Isolation de design à fonction optimisée, en EPP élastique permanent, 100% isolation des robinetteries, refroidissement du circulateur par effet cheminée.



3. Les ballons de stockage

L'installation est munie de deux ballons de stockage d'eau chaude, identiques, de même volume 1000 litres, sans échangeur de chaleur et de marque inconnu. Selon, les différents types de ballons de stockage, ceux ayant les mêmes propriétés que ceux de l'installation sont des ballons tampon PH de marque Eko-fil (voir annexe 4).

Les règles mises en place pour leur dimensionnement n'ont pas été mises à disposition.

Les ballons sont reliés entre eux par deux canalisations placées l'une au-dessus de l'autre à mi-hauteur des deux réservoirs.



Photographie 3: Raccords entre les ballons de stockage d'eau chaude

4. La machine a adsorption

Le module d'adsorption qui est utilisé au LESEE est l'ACS 08 (Adsorption Cooling Systems 08) de la marque SORTECH. Cette machine est capable de fournir une puissance frigorifique

nominale de 8kWf pour un COP de 0,6 et une puissance maximum de 11kW froid. La particularité des modules d'adsorption de SORTECH est de pouvoir fonctionner même à de faibles températures de la source chaude (à partir de 55°C) et d'utiliser le gel de silice couplé avec de l'eau comme fluide réfrigérant.



Photographie 4: Images de la machine à adsorption ACS 08, de marque SorTech AG

5. Tour de refroidissement

Grâce à un échangeur de chaleur à plaques brasées GBS 500, monté sur le kit de pompage, qui met en jeu la circulation à contre-courant de l'eau du circuit MT de la machine à adsorption et l'eau venant de la tour de refroidissement. La chaleur extraite de la machine à adsorption par l'eau de refroidissement doit être rejetée à l'extérieur. Cette eau de refroidissement transfère sa chaleur à l'air ambiant grâce à une tour de refroidissement.

La tour de refroidissement est de marque KT –A40 du catalogue du constructeur MULTI GmbH, d'une puissance de 60 KW. Le refroidisseur KT –A40 est un aéro-refroidisseur à circuit ouvert.



Photographie 5: La tour de refroidissement KT – A40, MULTI GmbH

6. Les ventilo-convecteurs

Le module d'adsorption ACS produit de l'eau froide qui est utilisée pour refroidir l'air dans une enceinte. L'eau froide circulant dans un circuit fermé (LT), il faut nécessairement une interface d'échange pour accomplir cette fonction. Le système est muni de trois ventilo-convecteurs eau/air, dont 2 dans le bâtiment de climatisation solaire et le troisième est installé dans le local de Flexy-Energy.

Ces ventilo-convecteurs sont constitués par le couplage d'un échangeur eau/air (HSH-FIWIHEX ZLT AIRCO) et d'un ventilateur centrifuge (EBM PAPST) produits par l'entreprise Vision4energy.

Via des variateurs de vitesses, nous pouvons augmenter/diminuer la vitesse de soufflage d'air.



Photographie 6: *Les deux ventilo-convecteurs du bâtiment climatisation solaire*

7. Station de pompe

La connexion directe entre la machine à adsorption, la tour de refroidissement, les ballons de stockage et les ventilo-convecteurs est assurée par le kit de pompage. Ayant, une machine à adsorption ACS 08, l'installation s'est dotée d'une station de pompe PCS 08, fabriquée par SorTech AG.



Elle comprend:

- ✓ 2 vases d'expansion pour les circuits (MT, LT) ;
- ✓ 3 pompes de marque Wilo TOP reliée respectivement aux circuits HT, MT et LT ;
- ✓ 1 échangeur de chaleur à plaque ;
- ✓ 3 cadrans de lecture de température ;
- ✓ 3 cadrans de lecture de pression ;
- ✓ 6 circuits de connexion directe au module ACS 08 ;
- ✓ Le tout monté sur un support métallique.

Photographie 7: *Station de pompe (Kit de pompage), PCS 08*

III.2.2. - Description des circuits hydraulique de l'installation

Le système de climatisation par adsorption installé au 2iE, utilisant l'eau comme fluide frigorigène possède trois circuits hydrauliques principaux à travers lesquels transite l'eau à différentes températures servant au fonctionnement de l'adsorbeur (gel de silice).

Ainsi donc, nous avons :

Circuit Primaire d'eau chaude

L'eau contenue dans les ballons de stockage est envoyée vers les capteurs solaires plans via la pompe **GRUNDFOS Solar 15-60**. Cette eau circule dans les canalisations en cuivre isolées thermiquement, installées entre la pompe et les capteurs solaires. Une fois dans les capteurs, l'eau est chauffée et retourne dans les ballons de stockage où est prélevée l'eau alimentant la machine adsorbeur via le circuit secondaire HT.

Le circuit secondaire d'eau chaude HT

L'eau stockée dans les ballons de stockage est pompée et envoyée dans l'adsorbeur ACS 08 à travers le circuit secondaire d'eau chaude. Ce circuit alimente les chambres d'adsorption de l'adsorbeur en chaleur lors de la phase de désorption. L'eau est mise en circulation dans ce circuit par une pompe **Wilo STAR-RS 25/6** intégré dans le kit de pompage PCS 08. Le débit nominal d'eau chaude alimentant l'ACS 08 est de 1600 litres/h pour une pression maximale de 4 bars et une perte de charge admissible de 230 mbar. Cette eau arrive au module à adsorption via un circuit HT In, et le retour se fait par le HT Out vers le ballon de stockage pour être pompée en direction des capteurs. Et le cycle de l'eau chaude HT recommence.

Le circuit Moyenne Température (MT)

Ce circuit contient l'eau de refroidissement qui absorbe la chaleur dans les chambres d'adsorption et le condenseur afin de la rejeter au milieu extérieur. L'eau dans ce circuit parcourt un trajet entre le condenseur, les chambres d'adsorption et un échangeur de chaleur à plaque installé sur le kit de pompage où elle cède sa chaleur à l'eau de refroidissement. Une pompe **Wilo TOP S 30/10 intégrée dans le kit de pompage PCS 08** permet de faire circuler l'eau de refroidissement dans ce circuit à un débit de 3700 l/h pour une pression maximale de 4 bars et une perte de charge admissible de 350 mbar.

Le circuit de refroidissement

Ce circuit va de l'échangeur de chaleur à plaque vers la tour de refroidissement. Il y a une pompe centrifugeuse montée sur ce circuit pour permettre la circulation d'eau. Le débit dans le circuit est de 6000 litres/h.

Le circuit d'eau glacée (LT)

L'eau circulant dans ce circuit provient de l'évaporateur du module ACS 08, où elle a subi un refroidissement durant la phase d'adsorption. L'eau passant à travers cette chambre d'évaporation est pompée et envoyée vers les ventilo-souffleurs. La pompe du circuit eau

froide est une pompe Wilos TOP S 30/10 également intégrée dans le kit de pompage donnant un débit de 2000 litres/h. La pression maximale dans le circuit eau froide est de 4 bars et une perte de charge admissible de 300 mbar.

III.2.3 - Les pompes

Le système requiert d'énergie hydraulique nécessaire à la mise en mouvement de l'eau dans les différents circuits hydrauliques, cette énergie est fournie par un ensemble de pompes placées sur les circuits hydrauliques du système à adsorption. On en dénombre en tout cinq (5) pompes sur toute l'installation.

<i>Circuit</i>	<i>Désignation</i>	<i>Puissance (Watt)</i>	<i>Tension nominale (Volt)</i>	<i>Débit nominal (l/h)</i>	<i>Pression Nominale (Bar)</i>
<i>Eau chaude primaire</i>	Grundfos Solar 15-60	80	230	1300	10
<i>HT</i>	WILO Stratos PARA 25/1-7 T3	70	230	1 600	6
<i>MT</i>	WILO Stratos PARA 25/1-12 T1	310	230	3 700	6-10
<i>LT</i>	WILO Stratos PARA 25/1-8 T3	140	230	2 000	6
<i>Circuit de refroidissement</i>	Grundfos Solar 15-60	80	230	1300	10

Tableau 1: *Caractéristiques des pompes de l'installation*

III.2.4 - Caractéristiques des conduites de notre installation

Les conduites de circulation d'eau du système de climatisation sont d'une importance capitale pour son fonctionnement correct. Ces conduites sont installées sur les différents circuits en fonction de leurs caractéristiques et leur coût. Comme critère de différenciation des conduites, nous avons :

- Les matériaux (cuivre, polypropène ou PPR, Polyéthylène basse densité ou PE bd) ;
- Les diamètres ;
- La résistance à la chaleur ;
- La conductivité thermique.

Le tableau suivant récapitule les caractéristiques des conduites et les circuits de l'installation en place.

<i>Tronçons</i>	<i>matériaux</i>	<i>Diamètre</i>	<i>Isolation</i>
<i>Collecteurs-pompe de circulation</i>	Cuivre/PPR	25 mm	oui
<i>Pompe de circulation-Réservoir</i>	Cuivre	25 mm	oui
<i>Réservoir-Réservoir</i>	Cuivre	25 mm	oui
<i>Réservoir –kit de pompage</i>	Cuivre	25 mm	oui
<i>Kit de pompage-module ACS 08</i>	Cuivre	DN20 DN25	oui
<i>Kit de pompage-Souffleur</i>	PPR	DN 25	oui
<i>Kit de pompage-tour de refroidissement</i>	PE bd	DN 40	non

Tableau 2: *Récapitulatif des conduites de l'installation*

Donc, les canalisations de l'installation sont de 3 types: cuivre, PPR (polypropylène random) et PE (polyéthylène).

<i>Nature des canalisations</i>			
<i>Matière</i>	Cu	PPR	PE
<i>L (m)</i>	74,15	64,9	7,48

Tableau 3: *Matériaux et longueurs des canalisations de l'installation*

IV. Optimisation du système de climatisation solaire de l'installation en place.

Un pilote de climatisation solaire par adsorption d'une puissance froid de 8 kW, pour des fins de recherche dans le but d'étudier les alternatives à la climatisation conventionnelle et son intégration dans le contexte subsaharien a été installé sur le site de 2iE-Kamboinsin.

L'objectif spécifique de mon stage, est d'auditer le système en place, de l'instrumenter et de l'expérimenter, en fin de faire des propositions d'amélioration du système en tenant compte des réalités climatiques et socio-économiques locales.

IV.1. Audit du système en place

Nous avons audité le système en place et les failles observées sont les suivantes :

- L'absence du cahier de charge de l'exécution des travaux par l'entreprise ;
- Le manque d'informations écrites sur les critères de choix et de dimensionnement de différents équipements ;

- La chute de pression dans les circuits hydrauliques ;
- Système doté de beaucoup de coudes ;
- Enfin, nous notons le dysfonctionnement du système de climatisation.

IV.1.1 – Instrumentation utilisée

Les appareils de mesure utilisés sont les suivants :

- Un Almemo 2290-8 et trois thermocouples TPI 343, pour mesurer les températures d'eau dans les circuits HT, MT et LT ; Et les températures de l'air ambiante de l'extérieur et l'intérieur du local Clim Sol.



Photographie 8 : Almemo 2290 – 8



Photographie 9 : Thermocouple TPI 343, type K

- Deux thermomètres intégrés sur la station solaire, pour mesurer les températures d'eau à l'entrée et à la sortie du champ solaire.



Thermomètres intégrés

Photographie 10 : Station solaire

- Un Solari mètre, pour mesurer l'ensoleillement du site.



Photographie 11 : Solari mètre, Extel M-830B

- Deux variateurs de vitesse, pour augmenter/diminuer le débit de soufflage d'air dans le local Clim Sol via les ventilo convecteurs.



Photographie 12 : Variateurs de vitesse, Télémechanique

- Trois cadrans piézométriques, pour la lecture des pressions d'eau dans les circuits HT, MT et LT.



Photographie 13 : Visuel des cadran piézométriques

- Une purge manuelle, pour augmenter la pression d'eau dans les circuits hydrauliques.



Photographie 14 : Image de la purge manuelle

La fiche technique de mesure des données utilisées tout au long du stage se présente comme telle :

Climatisation Solaire par Absorption (Données du LESEE 2012)		Date :				Débit :			
	Heure								
	Ensoleillement du site								
	Ens								
	Températures								
	E/capteur								
	S/capteur								
	HT in								
	HT out								
	LT in								
	LT out								
	MT in								
	MT out								
	E/CV1								
	S/CV1								
	E/CV2								
	S/CV2								
	air/CV1								
	air/CV2								
	air/Int								
air/Ext									
Pression									
HT									
MT									
LT									
TIAM Calvin Stagiaire LESEE									
Commentaires :									

IV.1.2– Analyse du dysfonctionnement du système mis en place

Le dysfonctionnement du système de climatisation solaire mis en place, se traduit par le fait que le système devrait nous produire le froid (température de soufflage d'air dans l'ordre de 15 à 18 ° C) mais il souffle de l'air dans une plage de 27 à 38 ° C. D'après la bibliographie, la machine à adsorption possède deux modes de fonctionnement, la production du froid à l'été et la production de la chaleur à l'hiver.

Ce qui est important à savoir, c'est que le passage d'un mode à l'autre se fait de façon automatique et le paramètre clé pour que la machine bascule d'un mode à l'autre est la température d'entrée d'eau chaude dans la machine à adsorption.

Algorithme de fonctionnement de la machine à adsorption

Début

lecture de la température HT_{In}

si $HT_{In} = < 55 \text{ }^\circ\text{C}$

alors lire LT_{In} , LT_{Out} , MT_{In} et MT_{Out}

si $LT_{In} > MT_{Out}$ et $MT_{In} > MT_{Out}$

alors passer machine en mode Hiver ‘‘ production de la chaleur’’

sinon machine en mode été ‘‘ production du froid’’

fin si

fin si

Fin

Légende

HT_{In} désigne température d'eau chaude à l'entrée de la machine à adsorption

HT_{Out} désigne température d'eau chaude à la sortie de la machine à adsorption

MT_{In} désigne température d'eau de refroidissement à l'entrée de la machine à adsorption

MT_{Out} désigne température d'eau de refroidissement à la sortie de la machine à adsorption

LT_{In} désigne température d'eau froide à l'entrée de la machine à adsorption

LT_{Out} désigne température d'eau froide à la sortie de la machine à adsorption

Face au dysfonctionnement du système et aux manques d'informations écrites sur les critères de choix et de dimensionnement des équipements, nous nous sommes posés des questions, à savoir :

- ✓ Pourquoi le choix de 15 capteurs solaires thermiques plans ? Comment sont-ils montés et pourquoi ?
- ✓ Pourquoi utiliser deux ballons de stockage ? pourquoi des ballons d'une capacité de 1000 litres ? Quels sont les intérêts de leur raccord comme tel ?
- ✓ Quels sont les critères de choix de la station solaire en place ?
- ✓ Pourquoi une tour de refroidissement d'une puissance de 60 W ?

La réponse à ces questions, nous permettra sans doute de résoudre le problème du dysfonctionnement du système, d'optimiser le système, de proposer des solutions pour améliorer le système.

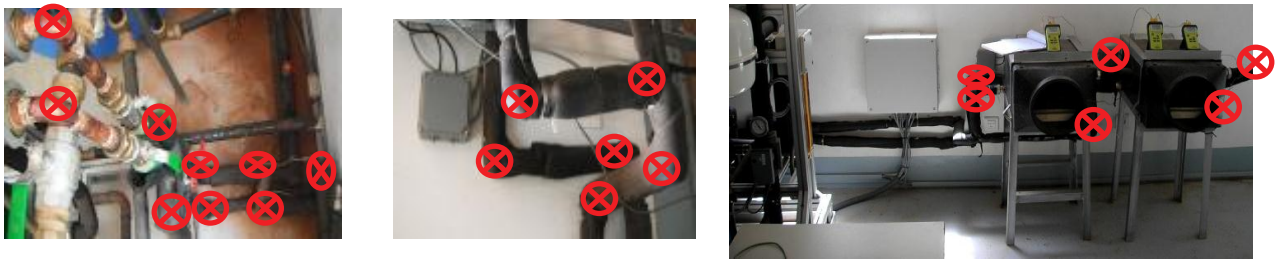
IV.2. Diagnostics

Pour améliorer le système en place, nous avons en face de nous deux véritables voies :

- ✓ Optimiser les circuits hydrauliques du système.
- ✓ Résoudre le problème du dysfonctionnement du système.

Au niveau des circuits hydrauliques, nous observons des chutes de pression. Ces chutes de pression sont les plus constatées au niveau du circuit LT.

- Le circuit LT est parsemé de nombreuses dérivations (coudes) à peu près 28 coudes. C'est le circuit le plus court du réseau (moins de 2,5 mètres entre le kit de pompage et les ventilo-convecteurs), mais ce dernier comporte le plus de coudes, d'où la chute permanente de pression, ceci due sûrement à d'éventuelles fuites d'eau sur le circuit.



Photographie 15: *Représentation des coudes du circuit LT*

- Les circuits HT et MT, ne présentent pas de graves problèmes de chute de pression.

Le dysfonctionnement du système de climatisation solaire est dû au fait que les températures d'eau des différents circuits hydrauliques (HT, MT, LT) à l'entrée et à la sortie de la machine à adsorption du système en place, ne sont pas dans les plages de températures recommandées par le constructeur. Selon le catalogue du constructeur, nous devons avoir l'ordre de températures dans le circuit HT de (55 – 95 °C), le circuit MT de (22 - 37 °C) et le circuit LT de (6 – 20 °C). Mais à travers le système mis en place, les températures d'eau dans les circuits sont dans les plages suivantes : HT de (40 – 53 °C), MT de (20 – 36 °C) et LT de (27 – 38 °C).

Nous remarquons que, seules les températures du circuit MT respectent la plage indiquée par le constructeur.

IV.3. Travail effectué

Le dysfonctionnement du système mis en place, est dû au fait que la température d'entrée d'eau chaude dans la machine à adsorption est inférieure à 55 °C (température minimale de fonctionnement). Ce qui est paradoxale pour un contexte subsaharien où nous avons un très bon ensoleillement.

Pour résoudre ce problème crucial, nous avons :

- ✓ Étudié la nature et la configuration des capteurs solaires thermiques plans mis en place et par la suite déterminer la configuration optimale pour obtention d'une bonne puissance fournie et une bonne température d'eau à la sortie.
- ✓ Analysé et étudié les caractéristiques des ballons de stockage d'eau chaude
- ✓ Calculé les pertes de charges du circuit HT, ceci dans le but de vérifier si la pompe (Grundfos Solar 15 – 60) installée au niveau de la station solaire est capable de faire transiter l'eau dans tous les 15 capteurs solaires thermiques plans.
- ✓ Dimensionné et choisi la pompe pour assurer l'alimentation des 15 capteurs plans pour le bon fonctionnement du système.

Une fois, le problème d'eau chaude résolu (c'est-à-dire, que l'on a de l'eau à une température supérieure à 55 ° C à l'entrée de la machine à adsorption.), nous allons passer à la phase suivante de nos travaux. Elle consiste à résoudre le problème de chute de pression permanent dans le circuit LT.

Enfin, au niveau du circuit de refroidissement MT, nous avons installé un compteur à l'entrée d'alimentation en eau de la tour de refroidissement, ceci dans le but de déterminer la consommation mensuelle d'eau pour le refroidissement du système. Puis, mener une étude sur les éventuels paramètres à mettre en jeu pour le remplacement de la tour de refroidissement par un puits.

IV.3.1 - Résolution des problèmes liés au circuit HT du système de climatisation solaire par adsorption mis en place sur le site de Kamboinsin.

A. Dimensionnement des capteurs solaires thermiques pour une installation de climatisation solaire

Pour une climatisation solaire, le dimensionnement des capteurs solaires thermiques passe par :

- Connaissant la puissance froid à produire et le COP théorique de la machine frigorifique à utiliser, on calcule **la puissance thermique nécessaire**.
- La puissance thermique une fois connue, on **choisit le type de capteur solaire** qu'on veut utiliser (capteurs solaires thermiques plans, capteurs solaires thermiques sous vides, ...). Selon les catalogues des constructeurs, on détermine en fonction de deux paramètres clés(ensoleillement et la différence de température $t_m - t_a$) **la puissance moyenne que peut fournir un capteur solaire**.
- La détermination du nombre de capteurs moyens dont on a besoin pour l'installation passe par la formule : **nombre de capteurs = Puissance thermique / Puissance d'un capteur**.

- Enfin, on détermine la **configuration optimale** des capteurs pour l'installation.

Application : Etudions la nature et la configuration des capteurs solaires thermiques plans BA 22 V/H, BATEC du système en place pour vérifier si elles ont été bien dimensionnées.

✓ **Pourquoi le choix des capteurs solaires thermiques plans ?**

Comme on peut le constater dans le tableau ci-dessous, les capteurs solaires thermiques plans sont bien adaptés dans les régions chaudes, ont une bonne surface de captation et sont moins coûteux que les capteurs solaires thermiques sous vides. [5]

	<i>Capteurs plans</i>	<i>Capteurs sous vide</i>
<i>Régions froides/altitude</i>		☹
<i>Régions chaudes</i>	☺	
<i>Climatisation solaire</i>		☹
<i>Faible surface disponible</i>		☹
<i>Risque de surchauffe</i>	☹	
<i>Longévité</i>	☺	☹
<i>Possibilité d'auto-construction</i>	☹	
<i>Prix</i>	☹	

Tableau 4: *Récapitulatif des critères aidant à orienter vers l'une ou l'autre solution (source, dossier solaire thermique, Jean-Paul BLUGÉAN).*

Donc, suivant ces critères de décisions, nous pouvons **valider le choix des capteurs solaires thermiques plans** de l'installation en place. Ces capteurs plans sont des capteurs BA 22 V/H fabriqués par BATEC Solar A/S.

✓ **Dimensionnement des capteurs solaires pour l'installation en place.**

1. Le système de climatisation solaire en place est régi par une machine à adsorption d'une puissance froid de 8 kW et d'un COP théorique de 0,56. Nous pouvons calculer la puissance thermique à installer par la formule : $COP_{théorique} = \text{Puissance froid}(P_{fr}) / \text{Puissance thermique}(P_{th}) \Rightarrow P_{th} = P_{fr} / COP_{th}$

Résultat : $P_{th} = 8 / 0,56 = 14,29 \text{ kW}$;

Donc, la **Puissance thermique à installer est d'environ 15 kW.**

2. Selon le catalogue du constructeur des capteurs plans BA 22 V/H, BATEC, en fonction de l'ensoleillement et la différence de température $t_m - t_a$, nous avons les puissances suivantes (voir tableau 5).

t_m : température moyenne de l'eau dans les capteurs ;

t_a : température ambiante

Puissance fournie par le capteur			
$t_m - t_a$ (K)	Ensoleillement (W/m^2)		
	400	700	1000
10	597	1101	1606
30	434	938	1441
50	253	757	1261

Tableau 5: Valeurs de puissance fournie par les capteurs plans BA 22 V/H, BATEC
(Source : rapport délivré par Utfardad Av Ackreðiter at Laboratorium, N° P6 0376_BA22, date 2006 – 12 – 01)

Pour les paramètres clés de dimensionnement, sur le site de kamboinsin, nous avons un ensoleillement moyen de $700 W/m^2$; Et en ce qui concerne la différence de température $t_m - t_a$, elle est fonction de la configuration des capteurs.

Etant donné que dans la configuration du système en place, tous les capteurs plans sont montés en parallèle, on a $t_m = 45\text{ °C}$ dans tous les capteurs et $t_a = 35\text{ °C} \Rightarrow t_m - t_a = 10\text{ °C}$ dans tous les capteurs.

La puissance fournie par chaque capteur d'après le tableau 5 est donc de 1101 W(car Ensoleillement = $700 W/m^2$ et $t_m - t_a = 10\text{ K}$).

3. Connaissant la puissance fournie par chaque capteur, nous pouvons donc déterminer le nombre de capteurs moyen à installer par la formule
nombre de capteurs = Puissance thermique / Puissance d'un capteur.

$$A.N : \text{nombre de capteurs} = 15000 / 1101 = 13,42$$

D'où, pour 15 capteurs plans, nous avons une puissance totale fournie de 16,5 kW (15 x 1101 W) ; La puissance totale fournie > puissance thermique voulu (16,5 kW > 15 kW).

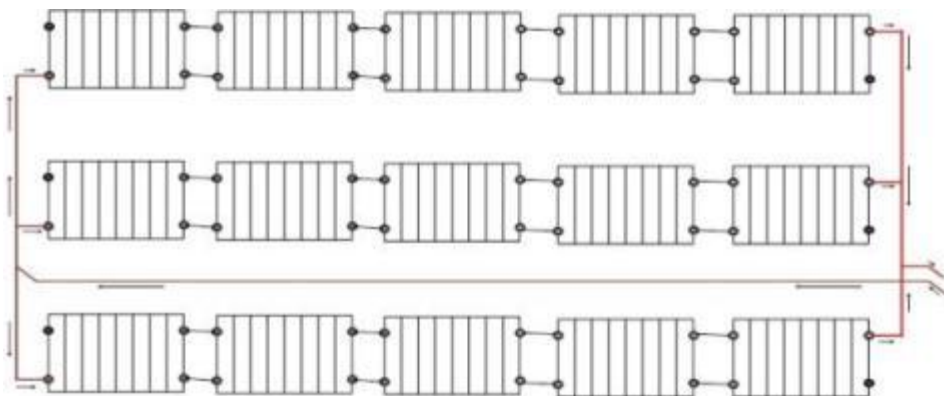
Donc, nous pouvons **valider le choix des 15 capteurs solaires thermiques plans BA 22 V/H de BATEC** de l'installation en place.

✓ **Comment trouver la configuration optimale pour une installation ?**

Déterminer la configuration optimale d'une installation revient à trouver le montage des capteurs pour lequel on obtient à la fois une bonne puissance totale fournie et une bonne température d'eau chaude à la sortie du champ solaire.

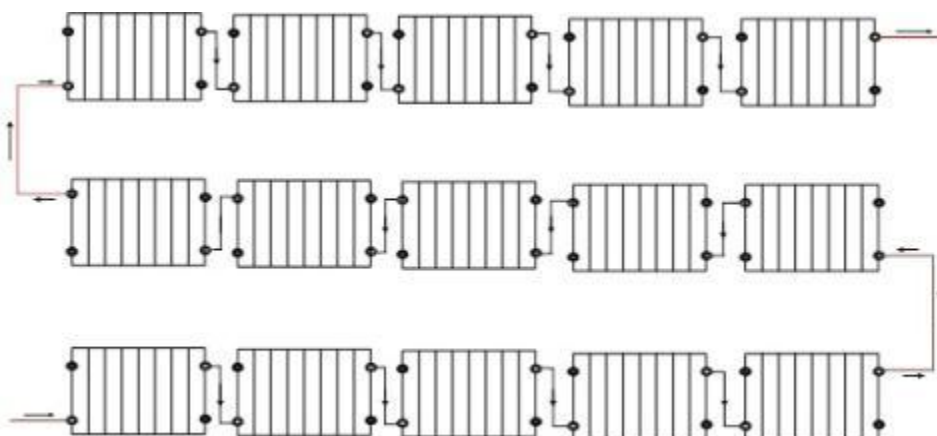
Pour le système en place, nous pouvons envisager cinq (05) types de montages[6] :

Configuration 1 : Tous les capteurs en parallèle (Figure a)



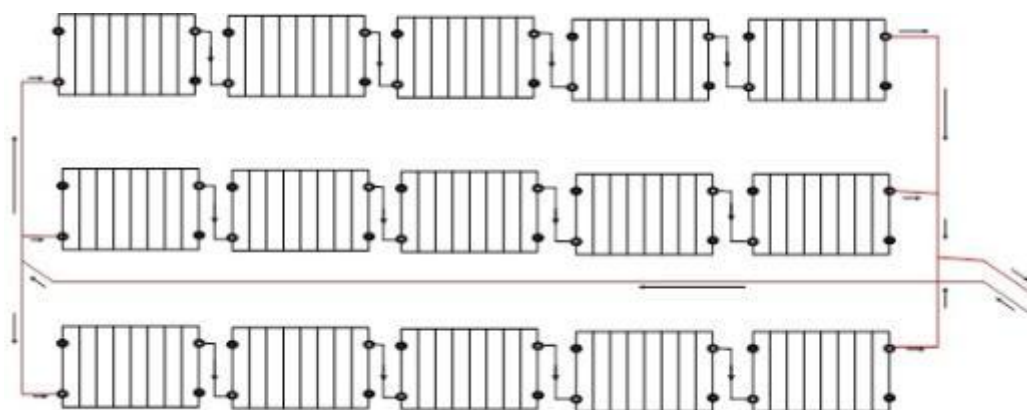
La puissance totale fournie = 15,4 kW. (Voir détail des calculs à l'annexe 1)

Configuration 2 : Tous les capteurs en série (Figure b)



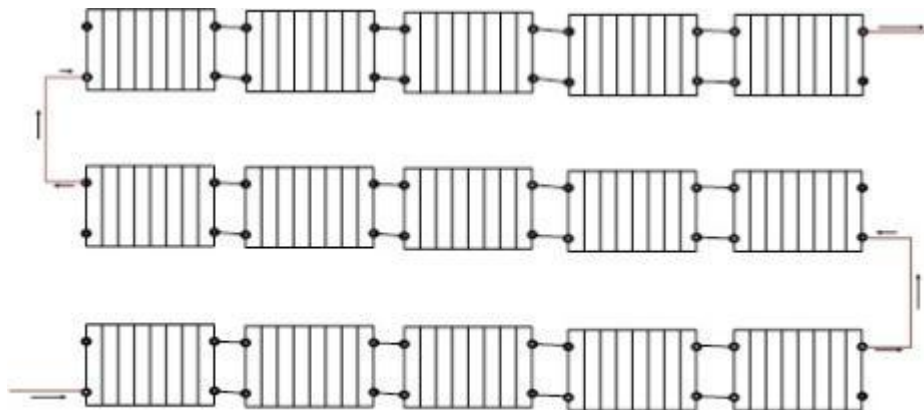
La puissance totale fournie = 11,29 kW. (Voir détail des calculs à l'annexe 1)

Configuration 3 : Trois (03) strings parallèles de cinq (05) en série. (Figure c)



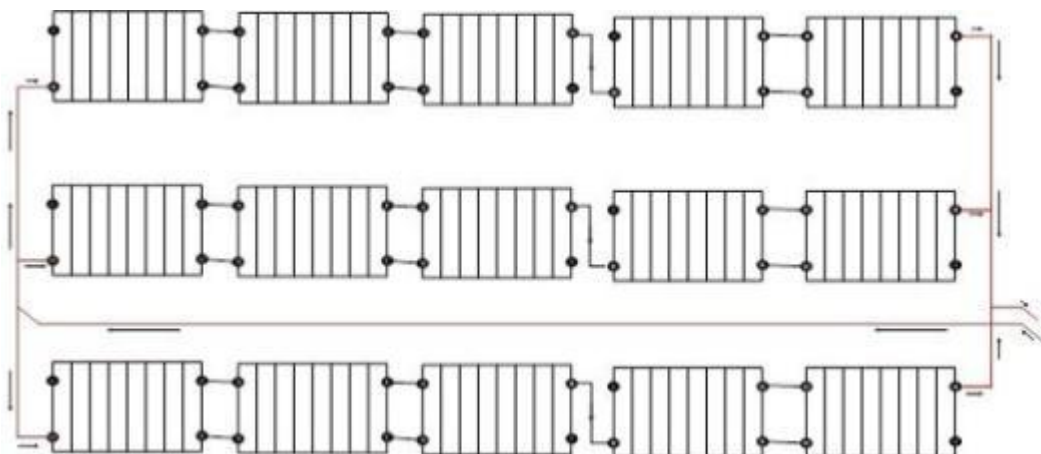
La puissance totale fournie = 13,71 kW. (Voir détail des calculs à l'annexe 1)

Configuration 4 : Trois (03) strings séries de cinq (05) en parallèle. (Figure d)



La puissance totale fournie = 14,48 kW. (Voir détail des calculs à l'annexe 1)

Configuration 5 : Un montage mixte parallèle/série. (Figure e)



La puissance totale fournie = 15,02 kW. (Voir détail des calculs à l'annexe 1)

Pour garantir les conditions de fonctionnement optimales aux capteurs solaires thermiques plans, il est important de veiller sur les deux points qui sont [7]:

1. le dégazage au sein d'un champ doit pouvoir s'effectuer correctement ;
2. le débit qui arrive dans un champ doit être réparti d'une façon homogène au sein de chaque capteur.

Pour répondre au point 1, il faut privilégier un raccordement en parallèle des capteurs (Voir figure 8) plutôt que série (Voir figure 9) de façon à éviter les pièges à air.

Ce qui nous permet **d'éliminer d'office les configurations 2 et 3** ci-hauts de l'hypothèse de la configuration optimale.

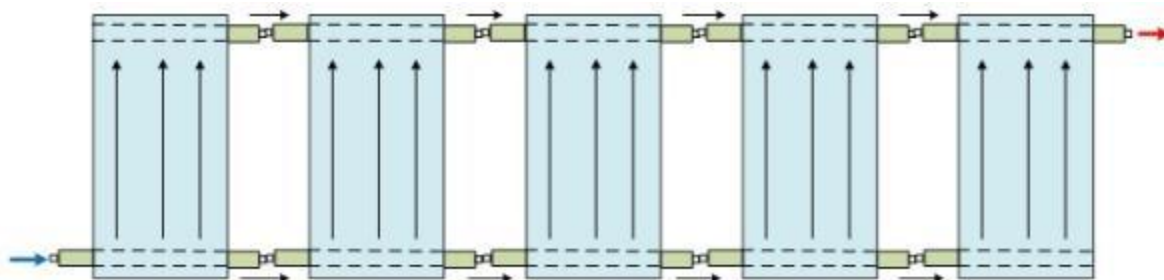


Figure 8: *Montage en parallèle des capteurs plans*

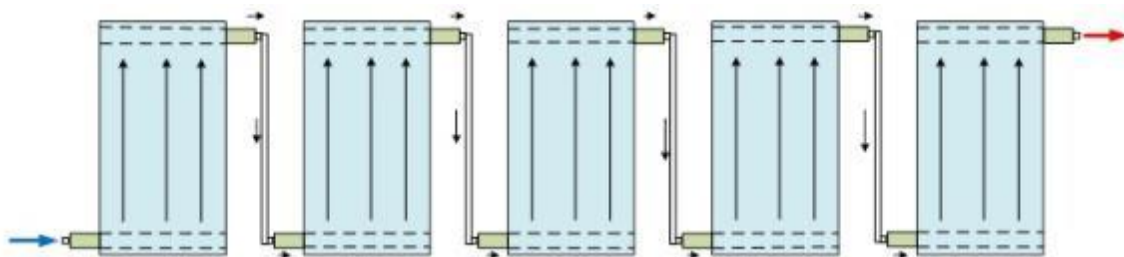


Figure 9: *Montage en série des capteurs plans*

Pour répondre au point 2, il est important de privilégier le raccordement qui met le moins en évidence le phénomène de thermosiphon pour le transit du fluide dans les capteurs plans.

En fonction de ce point 2, si nous voulons classer les trois (03) configurations restantes par ordre de priorité, nous aurons : la configuration 1, suivie de la configuration 5 et enfin la configuration 4.

Le but étant de trouver la configuration optimale c'est-à-dire la configuration pour l'obtention à la fois d'une bonne puissance totale fournie et d'une bonne température d'eau chaude à la sortie du champ solaire.

- Du point de vue bonne puissance totale fournie par le montage des capteurs, nous aurons la configuration 1 « montage de tous des capteurs plans en parallèles »
- Cependant, du point de vue bon température d'eau chaude à la sortie du champ solaire, nous n'avons pas pu réaliser les expériences claires pour pouvoir la déterminer dans chaque cas de configurations, les raisons étant les suivantes :
 - Il serait très difficile pour nous de réaliser les cinq (05) configurations.
 - Du point de vue théorique, le calcul de cette température s'avérer très complexe car il n'existe pas de formule appropriée afin de la calculer, on ne peut procéder que par expérimentation ce qui n'est évident selon le type de montage et le nombre de capteurs, vu que la température moyenne de l'eau dans les capteurs (t_m) varie, non seulement en fonction de la température d'entrée et de sortie de l'eau pour chaque capteur, mais aussi en fonction de l'ensoleillement du site à l'instant t , du débit d'eau qui transite dans le capteur et de la configuration en place entre les capteurs.

- De plus, la température n'est pas une variable extensive, c'est-à-dire, ce n'est pas parce qu'on connaît la température d'eau chaude à l'entrée et à la sortie d'un capteur isolé qu'on peut déduire celle à la sortie de deux ou plusieurs capteurs plans de même nature montés en parallèles ou/et en séries.

Donc, ce que nous proposons c'est de faire des mesures de températures en divers points du champ solaire en place, enfin de déterminer une corrélation logique. En d'autre terme :

- Mesure des températures de l'eau aux points d'entrée et sortie de chacun des 5 capteurs de la première ligne, pareille pour chacun des 5 capteurs de la deuxième ligne, puis effectuer des comparaisons.
- Mesure des températures aux points de sortie extrême de chacun des strings de 5 capteurs, puis les comparer à la valeur de la température d'eau à la sortie du champ solaire.

Résultat attendu : En fonction des résultats obtenus sur le système en place, nous pouvons estimer la température d'eau chaude à la sortie du champ solaire dans les autres configurations.

Cependant, en se référant aux points 1 et 2 ci-haut, **la configuration 5 « montage mixte parallèle/série des capteurs plans »** est sûrement celle que nous cherchons : elle est la configuration optimale pour l'installation en place dotée de 15 capteurs solaires thermiques plans BA 22 V/H.

B. Analyse et étude des ballons de stockage d'eau chaude

Dans un système de climatisation solaire, le stockage d'énergie est assuré par le ballon dit ballon solaire. Elle est l'élément clef d'une installation solaire puisqu'il permet de faire le tampon entre l'eau chaude produite par le champ solaire et l'eau chaude qui arrive au niveau de la machine à adsorption.

Donc, elle joue un rôle primordial dans une installation solaire, d'où le soin de bien faire le dimensionnement. Cependant, les volumes de stockage sont le plus souvent surdimensionnés augmentant ainsi les pertes du ballon.

✓ Analyse de la nature des ballons de stockage de l'installation en place

Nous avons deux ballons de stockage sans échangeur de chaleur, d'une capacité de 1000 litres chacune.

Le principe de fonctionnement de ces ballons repose sur le processus naturel de stratification et sur les mouvements de convection naturelle et forcée pouvant apparaître au sein du ballon.

Un stockage stratifié est caractérisé par une séparation des niveaux de température dans un même ballon qui se traduit par l'existence d'un gradient thermique entre la zone chaude et la zone froide. La fine couche de séparation est appelée thermocline (Voir figure 10). [8]

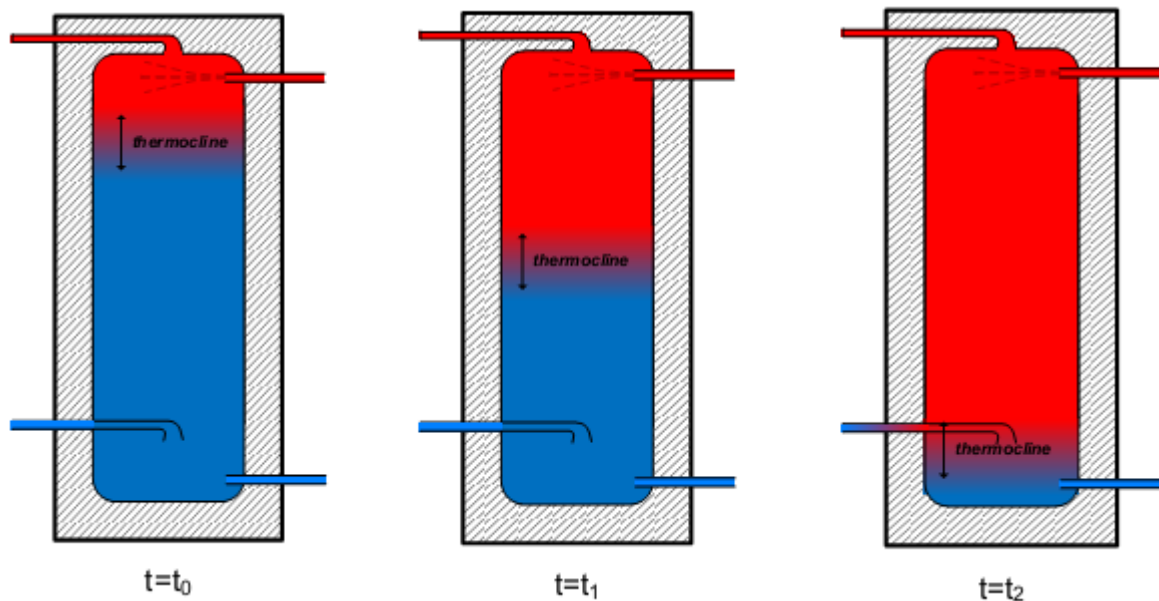


Figure 10: Evolution du stockage stratifié à des instants différents $t_0 < t_1 < t_2$

Donc, les **ballons de stockage sans échangeur de chaleur installés sont bien adaptés au contexte climatique de la zone.**

✓ **Etude de la configuration optimale de raccordement pour les deux ballons de stockage de l'installation en place**

Possédant deux ballons de stockage pour assurer le transfert d'énergie du champ solaire à la machine à adsorption, il est important de trouver la configuration optimale de raccordement, ceci dans le but de réduire au maximum les pertes.

• **Raccordement des deux ballons de l'installation en place**

Dans le système en place, les deux ballons sont reliés entre eux par deux canalisations placées l'une au-dessus de l'autre à mi-hauteur des deux réservoirs. (Voir figure 11 et photographie 9)

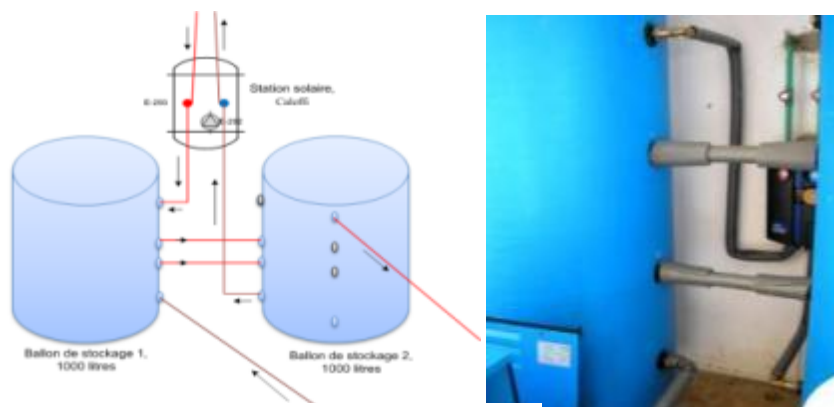
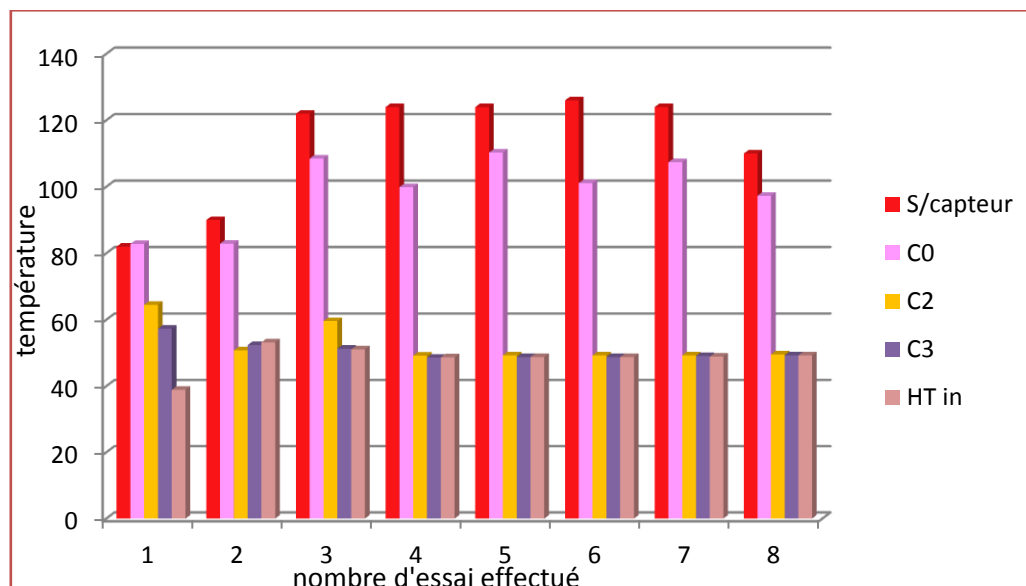


Figure 11 : Schématisation du mode de raccordement des ballons



Photographie 16 : Photographie du mode de raccordement des ballons

En observant le profil de température du circuit HT, nous constatons une très grande différence de température entre la température d'entrée d'eau chaude dans le ballon 1 venant du champ solaire (S/capteur) et celle de la température d'eau chaude à la sortie du ballon 2 allant vers la machine à adsorption (HT in). (Voir graphique 1)



Graphique 1: Profil de température le long du circuit HT

Cette grande différence de température (en moyenne de 47 °C) entre les points S/capteur et HT in, est sans doute, l'un des facteurs responsable du dysfonctionnement du système de climatisation solaire en place.

- Pour résoudre ce problème, nous avons effectué une étude approfondie sur les propriétés des ballons de stockage sans échangeur de chaleur [8], ce qui nous a permis de déterminer le raccordement optimal : monter les deux ballons en série. (voir figure 12 et photographie 10)

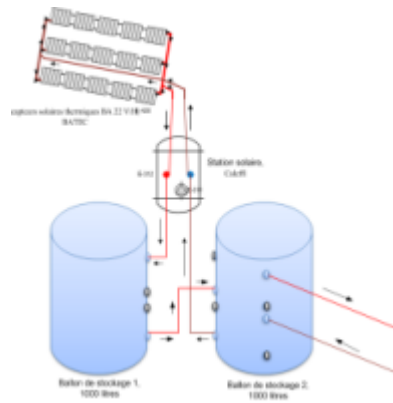
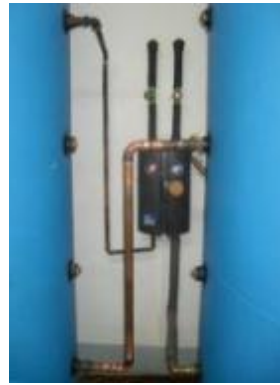


Figure 12 : Raccordement optimal des ballons pour l'installation



Photographie 17: Illustration du mode raccordement du système.

Les avantages de cette configuration sont :

- Aucune perturbation du mouvement d'eau dans le ballon 1, favorisant ainsi la poussée rapide de la thermocline vers le bas du ballon permettant d'augmenter la capacité de stockage stratifié dans le ballon.
- Le départ d'eau froide vers les capteurs à partir du point le plus bas du ballon 2, permet de favoriser le passage d'eau chaude du ballon 1 au ballon 2 via le raccord.
- Le départ d'eau chaude du ballon 2 vers la machine à adsorption à partir du point le plus haut du ballon et son retour de la machine vers le ballon 2 à mi- hauteur, est une stratégie qui va nous permettre de garder la partie haute du ballon 2 toujours chaude.
- L'avantage prédominant est qu'une fois que le ballon 2 contient de l'eau chaude dans les températures recommandées, on peut alimenter la machine à adsorption bien des heures après le coucher du soleil, donc de la climatisation solaire en absence du soleil.

C. Dimensionnement et choix de la pompe pour assurer le bon fonctionnement du système.

Un facteur décisif au dysfonctionnement d'un système de climatisation solaire est le manque d'eau dans certains capteurs du champ solaire ; Un constat fait sur l'installation en place (seuls les cinq derniers capteurs sont bien alimentés, à partir de la seconde rangée des 5 capteurs, nous notons un manque d'eau et au niveau des cinq derniers capteurs plus hauts, pratiquement pas d'eau. (Voir figure 7).

Face à ce constat, nous nous interrogeons si la pompe Grundfos Solar 15-60 installée au niveau de la station solaire est capable d'alimenter tous les 15 capteurs plans du champ ?

Dimensionner une pompe de circulation dans un système revient à déterminer le débit et les pertes de charges générées dans les panneaux solaires et dans les tubes / les vannes de l'installation.

✓ Calcul du débit nécessaire pour le système de climatisation solaire en place

Dans le catalogue du constructeur des capteurs plans BATEC, BA 22 V/H, le débit massique dans le capteur est de $0,021 \text{ kg/s.m}^2$.

=>débit massique d'un capteur BA 22 V/H = débit massique x surface du capteur ;

A.N : $\dot{m} = 0,021 \times 2,19 = 0,046 \text{ kg/s}$

Débit volumique d'un capteur = débit massique d'un capteur /masse volumique de l'eau avec $\rho_{\text{eau}} = 1 \text{ kg/l}$

$Dv = 0,046 \times 1 = 0,046 \text{ l/s} = 0,166 \text{ m}^3/\text{h}$

=>Débit volumique pour les 15 capteurs = débit volumique d'un capteur x 15

A.N : $Dv'' = 0,166 \times 15 = 2,48 \text{ m}^3/\text{h} = 2480 \text{ l/h}$, soit un débit moyen de 40 l/min.

Donc, pour alimenter les 15 capteurs plans de l'installation en place, il nous faut une **pompe de circulation d'un débit de 2480 litres par heures, soit 40 litres par minutes.**

Remarque : La pompe de circulation installée sur le système en place est une pompe Grundfos Solar 15-60, en regardant ses caractéristiques (voir figure 13) , elle ne peut transiter qu'un débit maximal de 1400 l/h, or vu le débit nécessaire pour faire transiter l'eau dans tous les 15 capteurs plans qui est de l'ordre de 2500 l/h, nous constatons que la **pompe installée est belle et bien incapable pour alimenter tous les 15 capteurs plans du champ solaire en place.** Ce résultat vient confirmer les constats que nous avons notés sur le terrain, à savoir le manque d'eau dans certains capteurs plans du champ solaire.

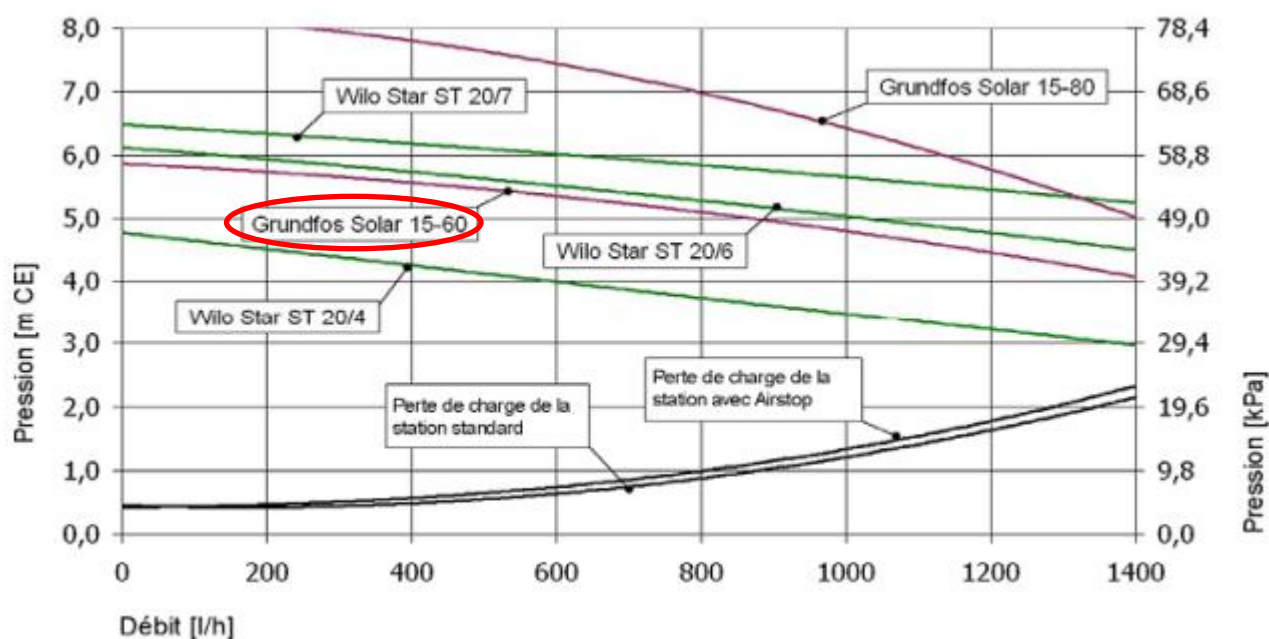


Figure 13: Perte de charge et caractéristiques de la pompe installée

✓ **Choix de la pompe de circulation pour assurer le bon fonctionnement du système**

Le choix de la pompe dépend du débit en circulation dans l'installation et de la HMT du système. Étant donné que nous connaissons le débit souhaité pour l'alimentation des 15 capteurs plans qui est dans l'ordre de 2500 l/h. Il reste de calculer la HMT.

• **Calcul de la HMT de l'installation (voir détail de calculs à l'annexe 2)**

La HMT est régit par la formule, $HMT = \text{hauteur géométrique } (H_{geo}) + \text{pertes de charges } (\Delta H)$.

○ **Calcul de H_{geo}**

Hauteur géométrique (H_{geo}) = Hauteur d'aspiration (H_{as}) + Hauteur de refoulement (H_{re})

$H_{as} = 0,85 \text{ m}$; $H_{re} = 2,6 \text{ m}$ (valeur mesure sur le système)

$\Rightarrow H_{geo} = 0,85 + 2,6 = 3,45 \text{ m}$

Donc, **$H_{geo} = 3,45 \text{ mètres (1)}$**

○ **Calcul des pertes de charges**

Pertes de charges (ΔH) = pertes de charges linéaires (ΔHL) + pertes de charges singulières (ΔHs).

- **Calcul des pertes de charges linéaires ΔHL**

En utilisant la formule de Manning-Strickler, les pertes de charges linéaires par unités de longueur notée J est donné par l'équation [9]

$$J = \frac{4^{10/3}}{\pi^2 K_s^2} \frac{Q^2}{D^{10/3}} \approx \frac{10,29 Q^2}{K_s^2 D^{5,33}} \text{(i)}$$

Q : débit volumique (m^3/s),

D : diamètre de la conduite (m),

K_s : coefficient de Strickler (dépend de la nature du matériau de la conduite)

Donc, **les pertes de charges linéaires $\Delta HL \text{ total} = 2,14 \text{ mètres. (2)}$**

- **Calcul des pertes de charges singulières**

Les pertes de charges singulières se produisent quant- il y a perturbation de l'écoulement normal (élargissement brusque, rétrécissement, courbure, etc.)

La formule pour le calcul des pertes de charge singulières dans une canalisation, est donnée par l'équation [9]

$$\Delta H_s = \sum k \frac{v^2}{2g} \text{ (ii)}$$

$\sum k$: somme de coefficients de perte de charge propre à chaque singularité

v : vitesse (m/s)

g : accélération du champ de pesanteur (N/kg)

Donc, les pertes de charge singulières $\Delta H_s = 0,94$ mètres (3)

$$(2) \text{ et } (3) \Rightarrow \Delta H = 2,14 + 0,94 = 3,08 \text{ m}$$

Donc, les pertes de charges totales de l'installation $\Delta H = 3,08$ mètres. (4)

$$(1) \text{ et } (4) \Rightarrow \text{HMT} = 3,45 + 3,08 = 6,53 \text{ m}$$

Alors la hauteur manométrique total de l'installation HMT = 6,53 mètres. (Voir détail de calculs à l'annexe 2)

Par conséquent, la pompe de circulation qui doit être adapter à notre installation pour assurer l'alimentation complète des 15 capteurs plans du champ solaire sera une pompe dont le débit moyen est de 40 l/min et la HMT de 6,53 m.

Selon, les catalogues des constructeurs de pompe, nous portons notre choix sur la pompe **Grundfos Solar 25/120** (Voir caractéristiques figure 14)

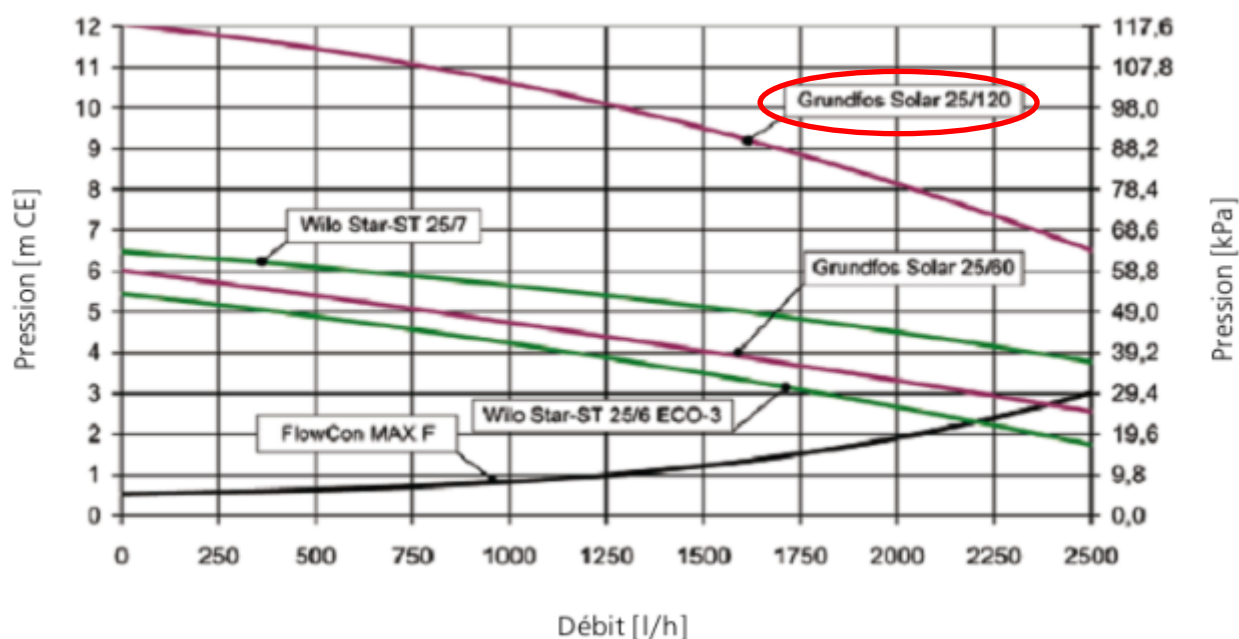


Figure 14: Perte de charge et caractéristiques de la nouvelle pompe

IV.3.2 - Résolution des problèmes liés au circuit LT du système de climatisation solaire par adsorption mis en place sur le site de Kamboinsin.

Etant donné que le circuit LT présent est parsemé de nombreuses dérivations (coudes) environ 28 coudes. Nous envisageons substituer tout le circuit LT présent dans l'installation par un nouveau circuit LT possédant uniquement 6 coudes reliant le kit de pompage et le ventilateur convecteurs de chez CIAT. (Voir Figure 15).

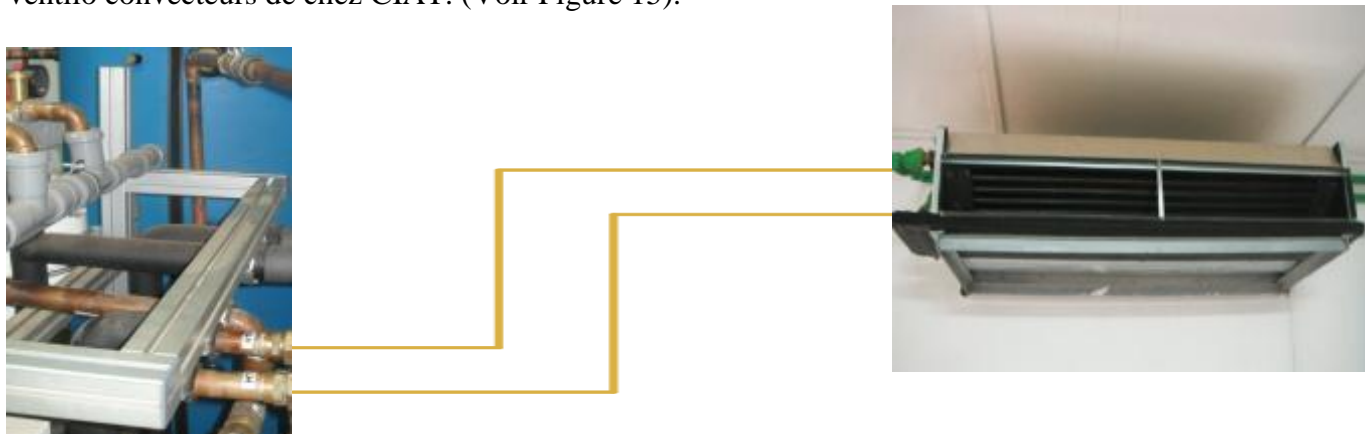


Figure 15: *Illustration de l'installation du circuit LT qu'on envisage à mettre sur pied*

Ceci dans le but d'éliminer de façon définitive le phénomène de chute de pression dans le circuit LT.

V. Proposition d'amélioration du système en place

Le système mis en place n'ayant pas des informations écrites sur le dimensionnement et le choix de ses équipements, nous avons donc, effectué une étude minutieuse tronçon par tronçon du système, enfin de lui doter des critères solides pour la justification des choix des équipements.

➤ Dans le tronçon HT,

✓ nous avons :

- Vérifié la cohérence du choix des capteurs solaires thermiques plans avec les réalités climatiques et économiques de la région.
- Calculé et validé le choix du nombre des capteurs plans et leur montage.
- Changé la configuration des ballons de stockages de l'installation par une configuration optimale pour le système.
- Montré que la pompe Grundfos solar 15/60 est incapable d'alimenter tous les 15 capteurs plans du champ solaire.

- ✓ Ce qui nous reste à faire :
 - C'est d'installer une pompe de circulation d'un débit de 40 l/min et d'une HMT de 7 m.
- ✓ Et comme suggestion, nous souhaitons:
 - Changer les deux robinets-vannes situés entre la station solaire et le champ solaire par des robinets tournant (utilisation simple, pratique et coefficient de perte de charge singulière moins important que celle des robinets-vannes).



Photographie 18: Image des robinets-vannes de l'installation et celle d'un robinet tournant

- Changer le diamètre des tuyauteries du circuit sorti d'eau ballon 2 – pompe – capteur plan – station solaire – entrée d'eau ballon 1. Nous proposons un diamètre de 30 mm à la place de 25 mm de l'installation en place. Elle permettra une bonne circulation du fluide, ainsi qu'une forte réduction des pertes de charges linéaires dans le circuit.

Les pertes de charges linéaires pour DN = 25 mm sont 2,7 fois supérieures à celles engendrées pour DN = 30 mm pour le même circuit. (Voir détail des calculs dans les tableaux 8et 9)

Tronçons	Nature de la conduite	Ks	D (m)	Q (m3/s)	J (m)	L (m)	ΔHL
Ballon - pompe	Cuivre	80	0,025	0,00068889	0,263945046	0,9	0,237550
Pompe - coude extérieur	PVC	120	0,025	0,00068889	0,117308909	0,95	0,111443
Coude ext - capteur haut	Cuivre	80	0,025	0,00068889	0,263945046	6,77	1,786907
ΔHL pour DN = 25 mm							2,135901

Tableau 6: Détails des calculs des pertes de charges linéaires pour DN = 25 mm

tronçons	Nature de la conduite	Ks	D (m)	Q (m3/s)	J (m)	L (m)	ΔHL
Ballon - pompe	Cuivre	80	0,03	0,00068889	0,099879756	0,9	0,089891
Pompe - coude extérieur	PVC	120	0,03	0,00068889	0,044391003	0,95	0,042171
Coude ext - capteur haut	Cuivre	80	0,03	0,00068889	0,099879756	6,77	0,676185
ΔHL pour DN = 30 mm							0,808249

Tableau 7: Détails des calculs des pertes de charges linéaires pour DN = 25 mm

- Dans le tronçon LT,
 - ✓ Nous avons :
 - Révisé de nombreuses dérivations (coudes) environ 28 coudes.
 - Constaté des chutes de pressions régulières.
 - ✓ Et comme suggestion, nous souhaitons:
 - Envisager le remplacement de tout le circuit LT présent dans l'installation par un nouveau circuit LT possédant uniquement 6 coudes reliant le kit de pompe et le ventilateur convecteurs de chez CIAT.
- Nous proposons l'utilisation d'une pile de 9 volts comme source d'alimentation de l'interrupteur horaire de démarrage/arrêt automatique de la pompe au niveau de la station solaire car l'interrupteur horaire qui a été installé pour gérer le fonctionnement autonome de démarrage et d'arrêt de la pompe de 8h00 à 18h00 (c'est-à-dire que, lorsqu'il est 8h00 à l'horloge de l'interrupteur horaire, la pompe démarre et à 18h00 à son l'horloge, la pompe s'arrête) est cependant alimenté par le réseau public. En cas de délestage, on notera donc un retard au niveau de l'horloge de l'interrupteur horaire ; la région étant soumise à de nombreux délestages, cela aura pour conséquence un retard plus ou moins considérable de l'interrupteur horaire par rapport aux heures recommandées de démarrage/arrêt automatique (8h00 /18h00) de la pompe de la station solaire. Ce dernier aspect est susceptible d'être un facteur non négligeable au dysfonctionnement du système en place.



Photographie 19: Image de l'interrupteur horaire de l'installation

VI. Conclusion - Perspectives

Conclusion

La climatisation solaire par adsorption est de nos jours à une phase de recherche et d'expérimentation à l'échelle mondiale et particulièrement pour la zone subsaharienne par le Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie (LESEE) de la Fondation 2iE basée au Burkina Faso.

Au vu des problématiques énergétiques dont pose la climatisation en zone subsaharienne durant les périodes chaudes, trouver une alternative à la climatisation conventionnelle via la climatisation solaire sera un processus ferme de réduction de la pauvreté pour tous les pays africains. Au Burkina Faso les climatiseurs à compression électrique sont la cause d'une consommation d'environ 30% de toute l'électricité produite durant les périodes chaudes. La climatisation solaire par adsorption sera sans doute une solution pour le développement économique des pays africains, pour l'émergence d'utilisation des énergies renouvelables, donc une réduction considérable de la dépendance en ressources énergétiques fossiles. Cependant, le pilote de climatisation solaire par adsorption installé sur le site de kamboinsin, après étude bibliographique et expérimentation, nous présente des dysfonctionnements (les plages de températures souhaitées pour faire du froid ne sont pas atteintes). Pour résoudre ce dysfonctionnement, nous avons audité le système en place afin de trouver les anomalies qui y sont présentes, nous avons mené une étude détaillée de l'installation (dimensionnement du champ des capteurs solaires thermiques, dimensionnement des ballons de stockage, calcul des pertes de charges hydrauliques du système, étude des caractéristiques pompes de l'installation), ce qui nous a permis d'élaborer un schéma détaillé de l'installation et de mettre sur pied des propositions d'amélioration du système en place.

En somme, nous espérons faire du froid à partir de l'énergie solaire via une machine frigorifique à adsorption une fois l'optimisation du système atteinte.

Perspectives

- Installer la pompe de circulation d'un débit de 40 l/min et d'une HMT de 7 m (exemple, la pompe Grundfos Solar 25/120) et refaire les expérimentations.
- Mesurer les températures d'eau en divers points du champ solaire en place, à fin d'avoir une idée claire sur l'évolution de la température d'eau à l'entrée / sortie d'un capteur, de deux, trois, ..., n capteurs monté en parallèle.
- Déterminer la consommation mensuelle d'eau pour le refroidissement du système.
- Mener une étude sur les éventuels paramètres à mettre en jeu pour le remplacement de la tour de refroidissement par un puits.
- Etant donné qu'on veut avoir une installation à 100% énergie renouvelable plus particulièrement énergie solaire, il faudra dimensionner un champ solaire photovoltaïque pouvant assurer l'alimentation de tous les équipements électriques présent sur le pilote et dans le bâtiment.

VII. Recommandations

- Nettoyer le champ solaire des capteurs plans deux fois par mois.
- Trouver un appoint fixe pour l'alimentation en eau de la tour de refroidissement.
- Alimenter tous les équipements électriques du pilote et du bâtiment via l'énergie solaire photovoltaïque.
- Mettre en place des stores pour éviter les apports de chaleur dus aux rayonnements solaires à travers les baies vitrées.
- Mettre en place d'une cloison pour séparer le local technique (zone comprise entre la cloison et le mur façade nord du bâtiment, et contenant tous les équipements du système : la machine à adsorption, les deux ballons de stockage, le kit de pompage, la station solaire, les appareils de mesure et d'acquisition des données) et le local à climatiser (espace de l'autre côté de la cloison contenant les ventilo- convecteurs.)

VIII. Bibliographie

- [1] Hildbrand C et al, A new solar powered adsorption refrigerator with high performance, Solar Energy, Vol.77, No.3, 2004, pp. 311-318.
- [2] Cold from Heat Product Catalogue 2011, SorTech AG
- [3] Dr. CHEKIROU WASSILA, Etude et analyse d'une machine frigorifique solaire à adsorption, thèse pour obtenir le diplôme de doctorat en sciences en physique spécialité : Energétique option Photo-thermique, Juin 2008
- [4] Cold from Heat Product Catalogue 2010, SorTech AG
- [5] Solaire thermique, Concepts innovants pour le technique chauffage et le solaire thermique, Catalogue 4/2009.
- [6] Pr. Jacques BERNARD, Energie solaire, Calcul et Optimisation ; Février 2007, pp.95 -122.
- [7] Hervé SEBASTIA – ATLANTIC-GUILLOT, Installations Solaires Collectives pour la production d'ECS Partie 1 – Janvier 2012.
- [8] Dr. David Blandin, Modélisation et validation expérimentale de nouveaux concepts de ballons solaires à forte stratification, thèse pour obtenir le grade de docteur à l'École doctorale : Mécanique, Energétique, Génie civil, Acoustique ; Spécialité : Génie civil, Juin 2009
- [9] Cours d'hydraulique en charge, GROUPE DES ECOLES EIER – ETSHER
- [10] Brochure EKO-FIL, Stockage d'énergie Ballons tampon pour eau de chauffage Ballons d'eau chaude sanitaire (ECS), Ballons Solaires, 2010.

IX. Annexes

Annexe 1: Détails de calcul de la puissance totale fournie par chacune des configurations.

Nous avons envisagé cinq montages à savoir :

- **Configuration 1** : Tous les capteurs en parallèle. (Figure a) ;
- **Configuration 2** : Tous les capteurs en série. (Figure b) ;
- **Configuration 3** : Trois (03) strings parallèles de cinq (05) en série ;(Figure c)
- **Configuration 4** : Trois (03) strings série de cinq (05) en parallèle ;(Figure d)
- **Configuration 5** : Un montage mixte parallèle/série. (Figure e)

Calcul détaillé de la puissance totale fournie par chacune des configurations

(Source des calculs : Pr. Jacques BERNARD, Energie solaire, Calcul et Optimisation ;
Février 2007, pp.95 -122.)

Soit \dot{Q} l'énergie solaire absorbée par un capteur. Une partie de celle-ci est emmagasinée dans le fluide caloporteur (eau) ; c'est énergie utile \dot{Q}_u . Cette énergie peut être directement transférée aux ballons de stockage.

Un capteur solaire est sujet à des pertes thermique. Une partie de l'énergie adsorbée est transférée vers l'environnement sous forme d'énergie thermique principalement par convection et rayonnement. Ces pertes seront notées \dot{Q}_a .

$$\text{On donc : } \dot{Q} = \dot{Q}_u + \dot{Q}_a \quad (1)$$

$$\text{L'expression de l'énergie utile } \dot{Q}_u = \rho \dot{v} c_p (T_{fe} - T_{fs}) = \eta G^* \quad (2)$$

$$\text{avec } \eta = F_t \left(v^* - K \frac{T_{fe} - T_a}{G^*} \right) \quad (3)$$

$$\text{et le flux thermique } \dot{Q}_a \text{ échangé avec l'environnement s'écrit : } \dot{Q}_a = K (T_p - T_a). \quad (4)$$

$$(2) \text{ et } (4) \text{ dans } (1) \Rightarrow \dot{Q} = F_t \left(v^* - K \frac{T_{fe} - T_a}{G^*} \right) G^* + K (T_p - T_a).$$

- facteur de transfert thermique des capteur plan $F_t = 0,895$
- rendement optique $v^* = 0,85$
- conductance globale $K = 6,55 \text{ W/m}^2$.
- puissance solaire globale recue par le capteur (ensoleillement du site): G^*
- température ambiante extérieure: T_a
- température de la plaque : T_p
- température d'eau à l'entrée du capteur: T_{fe}
- température d'eau à la sortie du capteur: T_{fs}

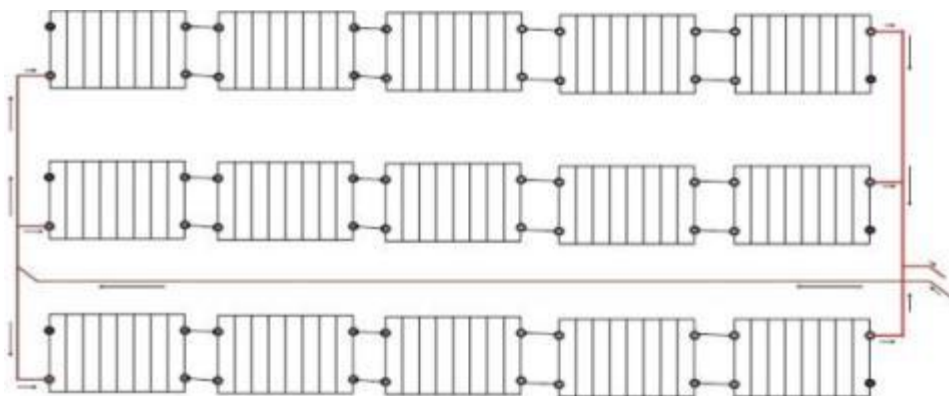
$$\text{On a donc : } \dot{Q} = \left(0,76 - 5,86 \frac{T_{fe} - T_a}{G^*}\right) G^* + 6,55 (T_p - T_a) \quad (5)$$

Remarque : l'énergie solaire absorbée par un capteur \dot{Q} dépend de T_a , T_p , G^* , et T_{fe} . Or étant donné que T_a , T_p , G^* sont des valeurs qui ne varient pas d'un capteur à l'autre dans une installation en place, donc la variation de \dot{Q} d'un capteur à l'autre dépend uniquement de T_{fe} .

Application

Pour l'installation en place, nous avons les données suivantes :

- *Ensoleillement moyenne du site : $G^* = 700 \text{ W/m}^2$*
- *temperature ambiante exterieure: $T_a = 35^\circ \text{ C}$*
- *temperature de la plaque du capteur plan : $T_p = 115^\circ \text{ C}$*
- **Configuration 1** : Tous les capteurs en parallèle. (Figure a)



La variation de la puissance \dot{Q} d'un capteur à l'autre dépend de la température d'entrée d'eau des capteurs.

Dans cette configuration, la température d'entrée d'eau dans le capteur 1 est égale à celle dans le capteur 2, pareil pour le capteur 3, jusqu'au dernier capteur du système, le capteur 15.

D'où, **La puissance totale fournie = puissance fournie par un capteur x 15**

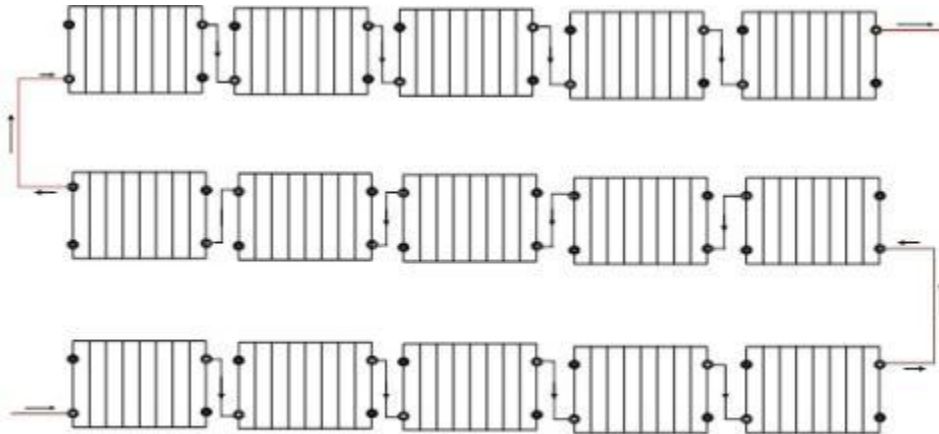
A.N: la température d'entrée d'eau des capteurs $T_{fe} = 40^\circ \text{ C}$

$$\Rightarrow \dot{Q}_{cap} = \left(0,76 - 5,86 \frac{40-35}{700}\right) \cdot 700 + 6,55(115 - 35) = 1026,7 \text{ W}$$

$$\text{Donc, } \dot{Q}_{totale} = 15 \times 1026,7 = 15\,400 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{totale \text{ fournie}} = 15,4 \text{ kW}$$

- **Configuration 2** : Tous les capteurs en série. (Figure b)



Dans cette configuration, la température de sortie d'eau du capteur 1 est égale à celle d'entrée d'eau du capteur 2, ainsi de suite, donc $T_{fs1} = T_{fe2}$; $T_{fs2} = T_{fe3}$; ... ; $T_{fs14} = T_{fe15}$

D'où, **la puissance totale fournie = puissance fournie par le capteur 1 + puissance fournie par le capteur 2 + ... + puissance fournie par le capteur 15.**

D'après l'équation (2) on a : $T_{fs} = T_{fe} + \eta \frac{G^*}{\rho \dot{v} C_p}$

- masse volumique de l'eau : $\rho = 990 \text{ kg/m}^3$
- débit d'eau : $\dot{v} = 40 \text{ l/min} = 1,11 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$
- chaleur calorifique de l'eau : $c_p = 4175 \text{ J/kg.K}$

=>

Puissance fournie par le capteur 1 $= \dot{Q}_{cap1} = \left(0,76 - 5,86 \frac{T_{fe1}-35}{700}\right) \times 700 + 524$ avec $T_{fe1} = 40^\circ \text{C}$

Puissance fournie par le capteur 2 $= \dot{Q}_{cap2} = \left(0,76 - 5,86 \frac{T_{fe2}-35}{700}\right) \times 700 + 524$ avec $T_{fe2} = T_{fs1} = T_{fe1} + \eta \frac{G^*}{\rho \dot{v} C_p}$

Puissance fournie par le capteur 3 $= \dot{Q}_{cap3} = \left(0,76 - 5,86 \frac{T_{fe3}-35}{700}\right) \times 700 + 524$ avec $T_{fe3} = T_{fs2} = T_{fe2} + \eta \frac{G^*}{\rho \dot{v} C_p}$

.

.

.

Puissance fournie par le capteur 15 $= \dot{Q}_{cap15} = \left(0,76 - 5,86 \frac{T_{fe15}-35}{700}\right) \times 700 + 524$ avec
 $T_{fe15} = T_{fs14} = T_{fe14} + \eta \frac{G^*}{\rho \dot{v} C_P}$

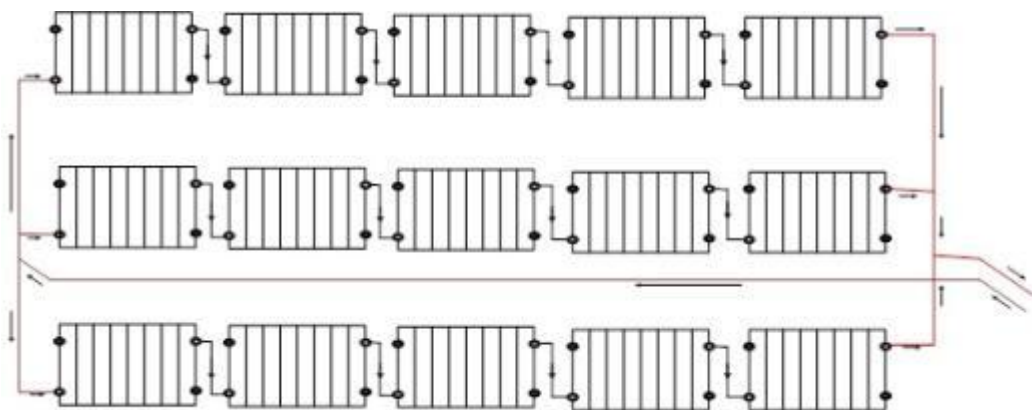
Donc, $\dot{Q}_{totale\ fournie} = \dot{Q}_{cap1} + \dot{Q}_{cap2} + \dots + \dot{Q}_{cap15}$

A.N : voir détail des calculs dans le tableau ci-dessous

	Capteur 1	Capteur 2	Capteur 3	Capteur 4	Capteur 5
Tfe	40	50,94	60,49	68,82	76,09
n	0,72	0,63	0,55	0,48	0,42
Tfs	50,94	60,49	68,82	76,09	82,43
Q	1026,7	962,57	906,61	857,80	815,21
	Capteur 6	Capteur 7	Capteur 8	Capteur 9	Capteur 10
Tfe	82,43	87,96	92,79	97,00	100,67
n	0,36	0,32	0,28	0,24	0,21
Tfs	87,96	92,79	97,00	100,67	103,87
Q	778,06	745,65	717,37	692,70	671,18
	Capteur 11	Capteur 12	Capteur 13	Capteur 14	Capteur 15
Tfe	103,87	106,67	109,11	111,24	113,09
n	0,18	0,16	0,14	0,12	0,11
Tfs	106,67	109,11	111,24	113,09	114,71
Q	652,40	636,02	621,73	609,26	598,38

Donc, $\dot{Q}_{totale\ fournie} = 11,29\ kW$

- **Configuration 3** : Trois (03) strings parallèles de cinq (05) en série. (Figure c)



Dans cette configuration, nous avons 3 rangées en parallèle de 5 capteurs en série

D'où, **La puissance totale fournie = puissance fournie par les 5 capteurs en série x 3**

- **Calcul de la puissance fournie par les 5 capteurs en série**

Les 5 capteurs étant en série => la température de sortie d'eau du capteur 1 est égale à celle d'entrée d'eau du capteur 2, ainsi de suite, donc $T_{fs1} = T_{fe2}$; $T_{fs2} = T_{fe3}$; $T_{fs3} = T_{fe4}$ et $T_{fs4} = T_{fe5}$

D'où, **la puissance fournie par les 5 capteurs en série = puissance fournie par le capteur 1 + puissance fournie par le capteur 2 + ... + puissance fournie par le capteur 5.**

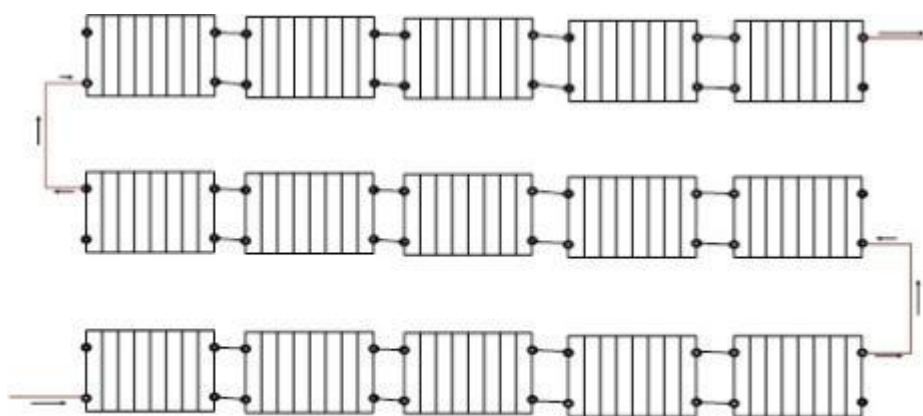
A.N : voir détail des calculs dans le tableau ci-dessous

	Capteur 1	Capteur 2	Capteur 3	Capteur 4	Capteur 5	Puissance fournie
Tfe	40	50,94	60,49	68,82	76,09	
n	0,72	0,63	0,55	0,48	0,42	
Tfs	50,94	60,49	68,82	76,09	82,43	
Q	1026,7	962,57	906,61	857,80	815,21	4568,89

Donc, $\dot{Q}_{totale} = 3 \times 4568 = 13\ 706,67\ W$

$$\dot{Q}_{totale\ fournie} = 13,71\ kW$$

- **Configuration 4 :** Trois (03) strings séries de cinq (05) en parallèle. (Figure d)



Dans cette configuration, nous avons 3 rangées en série de 5 capteurs en parallèle

Ici, la température de sortie d'eau de la première rangée des capteurs en parallèle est égale à celle d'entrée d'eau dans la seconde rangée des capteurs, pareil pour les rangées 2 et 3.

D'où, la **puissance totale fournie = puissance fournie par la 1er rangée + puissance fournie par la 2e rangée + puissance fournie par la 3e rangée.**

$$\text{Donc, } \dot{Q}_{\text{totale fournie}} = \dot{Q}_{\text{1er rangée}} + \dot{Q}_{\text{2e rangée}} + \dot{Q}_{\text{3e rangée}}$$

A.N : voir détail des calculs dans le tableau ci-dessous

	1er rangée	2e rangée	3e rangée
Tfe	40	50,94	60,49
n	0,72	0,63	0,55
Tfs	50,94	60,49	68,82
Q_cap_rangée	1026,7	962,57	906,61
Q_t_rangée	5133,5	4812,83	4533,06

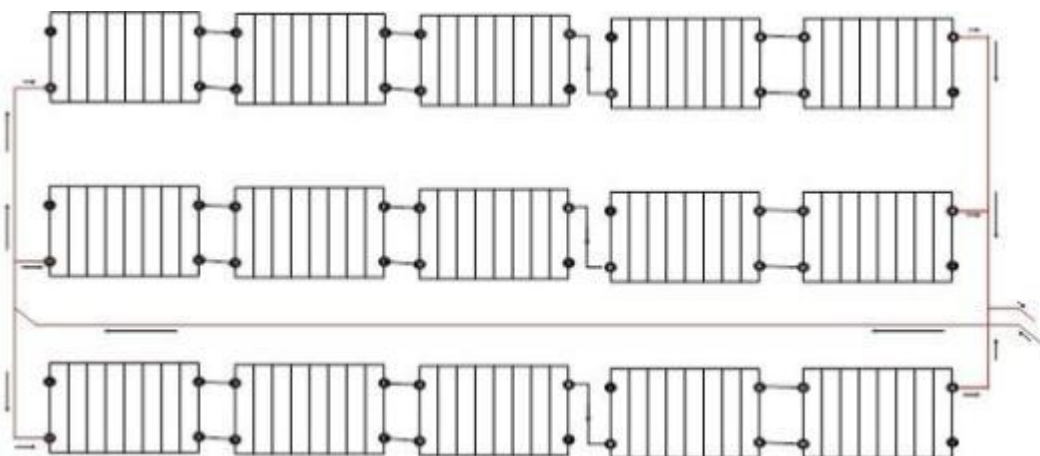
Q_cap_rangée : désigne la puissance d'un capteur dans une rangée i

Q_t_rangée : désigne la puissance totale des 5 capteurs de la rangée i = Q_cap_rangée x 5

$$\text{Donc, } \dot{Q}_{\text{totale}} = 5133,5 + 4812,83 + 4533,06 = 14\,479,39\,W$$

$$\dot{Q}_{\text{totale fournie}} = 14,48\,kW$$

- **Configuration 5** : Un montage mixte parallèle/série. (Figure e)



Nous avons, un montage mixte où

La puissance totale fournie = puissance fournie par le string de capteur x 3

$$\text{Donc, } \dot{Q}_{\text{totale fournie}} = \dot{Q}_{\text{string}} \times 3$$

Avec

$$\dot{Q}_{string} = 3 \times \left[\left(0,76 - 5,86 \frac{T_{fe} - 35}{700} \right) \times 700 + 524 \right] + 2 \times \left[\left(0,76 - 5,86 \frac{T_{fs} - 35}{700} \right) \times 700 + 524 \right]$$

Le string de capteur ici, est un ensemble de 3 capteurs parallèle en série avec 2 capteurs parallèle (voir figure e)

A.N :

$$\dot{Q}_{string} = (3 \times 3080,1) + (2 \times 1925,13) = 5005,25 \text{ W}$$

Donc, $\dot{Q}_{totale} = 3 \times 5005,25 = 15\,015,69 \text{ W}$

$$\dot{Q}_{totale \text{ fournie}} = 15,02 \text{ kW}$$

Récapitulatif :

En classant les configurations ci-dessus en fonction de leurs puissances totales fournies par ordre décroissante on a :

Configuration	Type de montage	Puissance totale fournie (kW)
<i>Configuration 1</i>	Tous les capteurs en parallèle	15,4
<i>Configuration 5</i>	Un montage mixte parallèle/série	15,02
<i>Configuration 4</i>	Trois (03) strings séries de cinq (05) en parallèle	14,48
<i>Configuration 3</i>	Trois (03) strings parallèles de cinq (05) en série	13,71
<i>Configuration 2</i>	Tous les capteurs en série	11,29

Tableau 8 : Classement des 5 configurations par ordre décroissant en fonction de leurs puissances totales fournies

Annexe 2: *Détails des calculs de la HMT***Calcul de la HMT de l'installation en place**

La HMT est régie par la formule, $HMT = \text{hauteur géométrique } (H_{\text{geo}}) + \text{pertes de charges } (\Delta H)$.

○ **Calcul de H_{geo}**

Hauteur géométrique (H_{geo}) = Hauteur d'aspiration (H_{as}) + Hauteur de refoulement (H_{re})

$H_{\text{as}} = 0,85 \text{ m}$; $H_{\text{re}} = 2,6 \text{ m}$ (valeur mesure sur le système)

$\Rightarrow H_{\text{geo}} = 0,85 + 2,6 = 3,45 \text{ m}$

Donc, $H_{\text{geo}} = 3,45 \text{ mètres (1)}$

○ **Calcul des pertes de charge**

Pertes de charges (ΔH) = pertes de charges linéaires (ΔHL) + pertes de charges singulières (ΔH_s).

- **Calcul des pertes de charges linéaires ΔHL**

En utilisant la formule de Manning-Strickler, les pertes de charges linéaires par unité de longueur notée J est donné par l'équation

$$J = \frac{4^{10/3}}{\pi^2 K_s^2} \frac{Q^2}{D^{10/3}} \approx \frac{10,29 Q^2}{K_s^2 D^{5,33}} \text{(i)}$$

Q : débit volumique (m^3/s),

D : diamètre de la conduite (m),

K_s : coefficient de Strickler (dépend de la nature du matériau de la conduite)

Les diamètres et la nature du matériau des conduites n'étant pas le même partout le long du circuit hydraulique, nous allons déterminer les pertes de charges linéaires totales via le tableau ci-dessous :

Tronçons	Nature de la conduite	K_s	D (m)	Q (m3/s)	J (m)	L (m)	ΔHL (m)
<i>Ballon - pompe</i>	Cuivre	80	0,025	0,00068889	0,263945046	0,9	0,2375
<i>Pompe - coude extérieur</i>	PVC	120	0,025	0,00068889	0,117308909	0,95	0,1114
<i>Coude ext - capteur</i>	Cuivre	80	0,025	0,00068889	0,263945046	6,77	1,7869
ΔHL total							2,1359

Tableau 9: Détails de calculs des pertes de charges linéaires dans notre système

Donc, *les pertes de charges linéaires ΔHL total = 2,14 mètres. (2)*

- Calcul des pertes de charges singulières

Les pertes de charges singulières se produisent quand il y a perturbation de l'écoulement normal (élargissement brusque, rétrécissement, courbure, etc.)

La formule pour le calcul des pertes de charges singulières dans un système, est donnée par l'équation

$$\Delta H_s = \sum k \frac{v^2}{2g} \text{ (ii)}$$

$\sum k$: somme de coefficients de perte de charge propre à chaque singularité

v : vitesse (m/s)

g : accélération du champ de pesanteur (N/kg)

Nous allons dans le tableau suivant recensé toutes les singularités du circuit ainsi que leurs coefficients de perte de charge propre.

Tronçon	Type de singularité	k
ballon - pompe	rétrécissement	1
	2 coudes de 90°	2,26
pompe - champ capteur	vanne	0,81
	3 coudes de 90°	3,39
	4 coudes de 60°	1,88
Σk		9,34

Tableau 10: Recensement des singularités de l'installation et calcul de Σk

Evaluation de la vitesse : $Q = v \times S \Rightarrow v = Q / S$.

$$Q = 2500 \text{ l/h soit } Q = 6,94 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \quad \text{et } S = 4,9 \cdot 10^{-6} \Rightarrow v = 1,4 \text{ m/s}$$

Donc, les pertes de charge singulières $\Delta H_s = 0,94$ mètres (3)

$$(2) \text{ et } (3) \Rightarrow \Delta H = 2,14 + 0,94 = 3,08 \text{ m}$$

Donc, les pertes de charges totales dans l'installation $\Delta H = 3,08$ mètres. (4)

$$(1) \text{ et } (4) \Rightarrow \text{HMT} = 3,45 + 3,08 = 6,53 \text{ m}$$

Alors la hauteur manométrique total de l'installation **HMT = 6,53 mètres.**

Annexe 3: Caractéristiques des capteurs solaires thermiques plans BA 22 V/H, BATEC

Solar collector data sheet

Description of solar collector


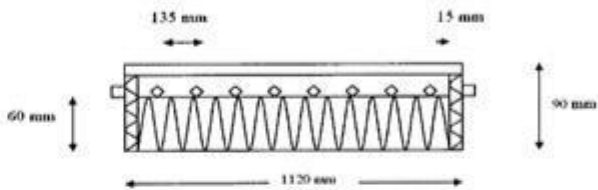


Photo of the collector

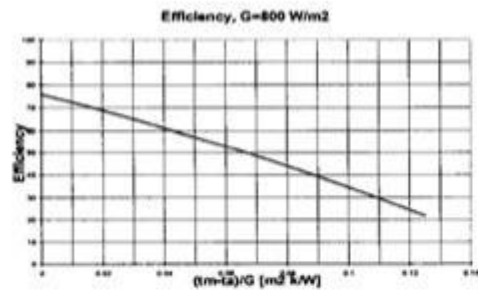


Cross section of collector

Manufacturer:	BATEC A/S	Weight ¹ :	35 kg
Brand name:	BA22	Heat transfer fluid ¹	Water or water/glycol
Collector type:	Flat plate	Pressure drop:	
Absorber area:		Operating pressure ¹	Max 6 bar
Aperture area:	2.19 m ²	Stagnation temperature:	<191°C ²
Gross area:	2.32 m ²		

Testing results

Efficiency based upon aperture area

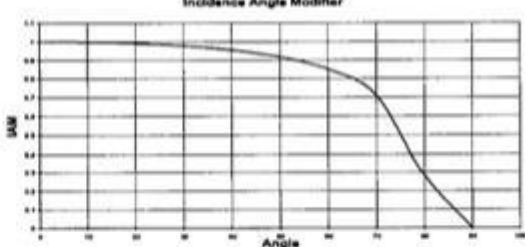


Efficiency, G=800 W/m²

$$\eta_a = \eta_{0a} - a_{1a}((t_m - t_a)/G) - a_{2a}G((t_m - t_a)/G)^2$$

$\eta_{0a} = 0.767 [-]$
 $a_{1a} = 3.327 [W/m^2 K]$
 $a_{2a} = 0.010 [W/m^2 K^2]$
 $a_{3a} = 0.180 [J/m^3 K]$

Incidence angle modifier



Incidence Angle Modifier

θ	0	10	30	50	70	90
$K_{\theta b}$	1	0.998	0.977	0.954	0.709	0

Outdoor testing

Test method: Outdoor, semi dynamic, QDT

Latitude: 57.7

Collector tilt: 45°

Longitude: 12.9

Local time at solar noon: 12:07

Collector azimuth: 0° (South)

Test flow: 166 l/h

¹ Data from the manufacturer
² According to high temperature test on BA30

Power output per collector unit, without wind (W)			
$t_m - t_a$ [K]	Irradiance [W/m^2]		
	400	700	1000
10	597	1 101	1 606
30	434	938	1 441
50	253	757	1 261

<p>Thermal capacity: $C=9\ 200\ J/m^2K$</p> <p>Pressure drop: $\Delta p=144\ mbar$ using water, 20°C, and 166 l/h</p> <p>$\Delta p=0.557q + 0.0019q^2$ [mbar]</p> <p>q = flow [l/h]</p>	<p>Terms</p> <p>η_a Collector efficiency</p> <p>η_{0a} Zero loss collector efficiency based on aperture</p> <p>a_{1a} Heat loss coefficient at $(t_m - t_a)=0$ based on aperture</p> <p>a_{2a} Temperature dependence of the heat loss coefficient based on aperture</p> <p>a_{3a} Wind dependence of the heat loss coefficient based on aperture</p> <p>t_m Mean temp. of heat transfer fluid</p> <p>t_a Ambient air temp.</p> <p>G Hemispherical solar irradiance</p> <p>K_{θ} Incidence angle modifier for direct irradiance</p> <p>θ Angle of incidence</p>
--	---

Dimensions of collector unit

Length: 1120 mm
 Width: 2070 mm
 Height: 90 mm

Aperture: 2.19 m²
 Gross area: 2.31 m²

Technical specifications

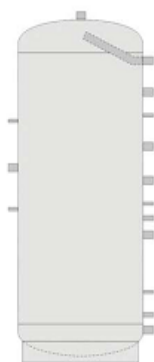
Weight:
 Fluid content:
 Heat transfer fluid, recommended:
 Pressure drop:

35 kg
 1.84 liters
 Water or water/glycol
 $\Delta p=144\ mbar$ using water, 20°C, and 166 l/h

Stagnation temperature at 1000 W/m²
 and 30 °C ambient temperature

<191°C

Annexe 4: Caractéristiques des ballons de stockage sans échangeurs de chaleur d'Eko-fil [10]

Ballon Tampon PH

Ballon d'hydro-accumulation sans échangeur thermique pour applications domestiques ou industrielles.

Permet le stockage d'énergie primaire provenant de chaudières à combustibles solides ou électriques, collecteurs solaires, pompes à chaleur, etc.

Capacité (L)	Hauteur (mm)	Diamètre (mm)	Poids (kg)
300	1410	450	70
500	1670	420	110
800	1860	560	130
1000	2040	560	150
1500	2170	760	230
2000	2200	910	270

Acier ST 37.2. Pression maximale de service : 3 bar. Pression maximale testée : 6 bar. Température maximale de fonctionnement : 95 °C. Isolation thermique en polyuréthane souple d'épaisseur 100 mm.

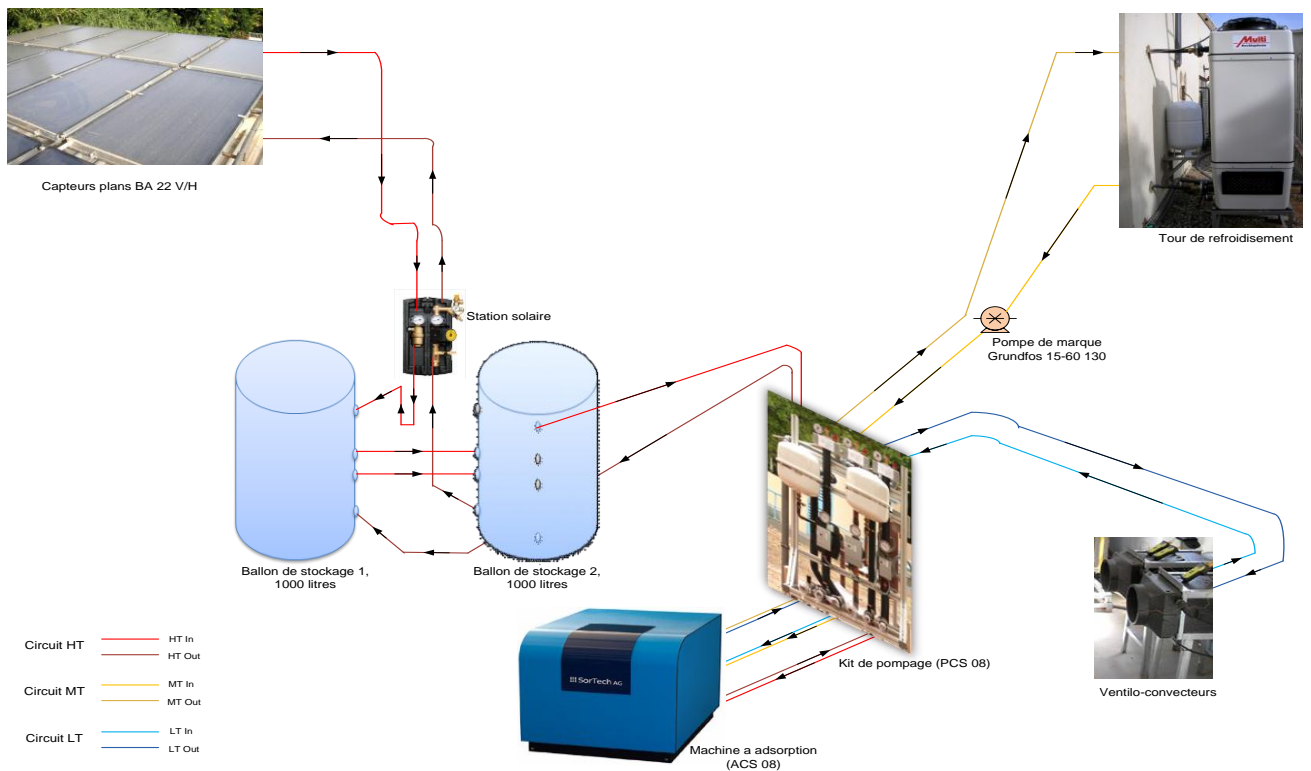
Annexe 5: *Données hydrométriques sur le site de Kamboinsin*

Mois	Rayonnement Globale (W/m ²)	Rayonnement Diffus (W/m ²)	Température (°C)	HR(%)	Ensoleillements (kWh/m ² .jr)
janv-11	451,8	441,0	22,6	21,7	4,52
févr-11	440,6	356,1	28,7	15,6	4,41
mars-11	497,7	330,1	32,7	22,6	4,98
avr-11	499,8	353,9	33,4	26,5	5,00
mai-11	480,9	288,0	32,2	49,7	4,81
juin-11	463,8	304,5	29,7	63,5	4,64
juil-11	443,1	283,7	27,5	73,9	4,43
août-11	407,7	238,1	26,5	79,2	4,08
sept-11	480,7	304,7	27,7	73,6	4,81
oct-10	540,5	581,7	28,3	66,7	5,41
nov-10	472,0	452,1	28,1	41,6	4,72
déc-10	481,2	441,0	24,3	28,4	4,81
Ensoleillement moyen du site de Kamboinsin (kWh/m².jr)					4,72

Annexe 6: *Données techniques de la machine à adsorption ACS 08*

Données constructeurs de la machine à froid ACS 08	
Capacité nominale de refroidissement (kW)	8
COP nominal	0,6
Capacité maximale de refroidissement (kW)	11
Circuit d'eau basse température (LT)	
Plage de température de sortie (°C)	6-20
Plage de température d'entrée/sortie (°C)	18-15
Débit (m ³ /h)	2
Pertes de charges (mbar)	300
Pression opérationnelle maximale (bar)	4
Circuit d'eau moyenne température (MT)	
Plage de température de sortie (°C)	22-37
Plage de température d'entrée/sortie (°C)	27-32
Débit (m ³ /h)	1,6
Pertes de charges (mbar)	230
Pression maximale de fonctionnement (bar)	4
Circuit d'eau haute température (HT)	
Plage de température d'entrée (°C)	55-95
Température d'entrée/sortie (°C)	72/65
Débit (m ³ /h)	1,6
Pertes de charges (mbar)	230
Pression de fonctionnement maximale	4
Fourniture électrique	
Voltage (V)	230
Fréquence (Hz)	50
Puissance consommée (W)	7
Dimensions	
Longueur*largeur*épaisseur (mm)	790*1060*940
Poids net (kg)	265
Poids en fonctionnement (kg)	295

Annexe 7: Schéma détaillé du système en place



Annexe 8: Schéma détaillé du système optimisé

