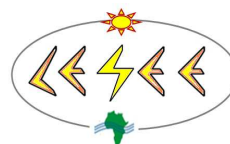




Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
International Institute for Water and Environmental Engineering



Conception et montage d'un système hybride solaire PV/Diesel de cogénération (électricité et froid)

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU MASTER EN INGENIERIE DE
L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT – INGENIEUR ZIE
OPTION : ENERGIE ET PROCEDES INDUSTRIELS.**

Présenté et soutenu publiquement le 13 juin 2011 par

Faïçal Mintéli KANDIA

**Travaux dirigés par : Dr. Yao AZOUMAH
Pr. Xavier PY
M. Daniel YAMEGUEU**

Jury d'évaluation du mémoire :

Président : Pr. Zacharie KOALAGA

Membres et correcteurs : Dr. Joël BLIN
Dr. Yao AZOUMAH

Promotion [2010/2011]

DEDICACE

- ❖ **A Bahanla SANGNA, ma mère**
- ❖ **A Boubacar KANDIA, mon père**

Pour tous vos sacrifices consentis tout au long de notre vie, toutes les prières et bénédictions prononcées à mon nom et vos vœux ardents de me voir réussir

REMERCIEMENTS

Tout d'abord je tiens à remercier mon binôme de travail et ami Nicolas THIERRY stagiaire du 2IE, sans qui tout ce travail n'aurait probablement pas été accompli. Ce document est le fruit d'une collaboration de 6 mois. Ce duo fût très enrichissant d'un point de vue professionnel et personnel pour ma part et je lui en suis très reconnaissant.

Bien que ce projet soit le résultat d'un travail d'équipe avec Monsieur THIERRY, il tire aussi sa réussite grâce à la disponibilité de certains acteurs dont je tiens à leur présenter vivement mes remerciements.

- Ma reconnaissance s'adresse tout particulièrement au Docteur Yao AZOUMAH, mon Directeur de mémoire et Directeur du laboratoire d'accueil pour m'avoir dirigé, encouragé et conseillé tout au long des 5 mois passés au laboratoire.
- Je remercie également M. Daniel YAMEGUEU doctorant au LESEE pour son suivi et son encadrement ;
- Un grand merci à M. Henry KOTTIN et GAYE Madieumbe, ingénieurs de recherche au laboratoire LESEE, qui ont joué un rôle déterminant par leur présence et leurs conseils dans le montage du système.
- Je ne saurais oublier tout le personnel du LESEE et du LBEB pour leur assistance, en particulier mes camarades de promotion pour leur soutien inconditionnel.

RESUME/ABSTRACT

Résumé

Ce mémoire constitue une contribution à l'accès à l'énergie des zones rurales et périurbaines des pays de l'Afrique subsaharienne en intégrant la cogénération à un système hybride solaire PV/ Diesel déjà existant. La démarche retenue est l'exploitation des pertes thermiques du groupe électrogène pour produire du froid à l'aide d'une machine à absorption utilisant le couple ($H_2O/LiCl$). Après avoir justifié le besoin en froid des populations une conception complète du système en ajoutant un appoint thermique solaire (capteurs plan) et la méthodologie de montage ont été proposés.

L'étude énergétique et exergetique a montré une amélioration de l'efficacité du système de cogénération par rapport au système initial. L'étude économique vient confirmer cela puisque la cogénération permet de réduire le coût de production du kWh de 216,5 FCFA à 179 FCFA soit 17% de réduction.

Mots clefs : cogénération, groupe électrogène, machine à absorption, stockage, exergie

Abstract

This master thesis is a contribution to the energy access in rural and peri-urban areas of sub-Saharan Africa countries by integrating cogeneration to a hybrid solar PV / diesel system. The approach used is the valorization of the diesel generator thermal losses to produce cooling using an absorption chiller which runs with the pair $H_2O / LiCl$. After justifying the need of cold for people, a complete design of the system by adding an extra solar thermal (sensor plane) and the methodology of the assembly has been proposed.

The energy and exergy analysis showed an improved of the efficiency of the cogeneration system compared to the initial system. The economic analysis confirms that the CHP reduces the production cost per kWh from 216.5 CFA francs to 179 CFA francs what represents a reduction of 17%.

Key words: Cogeneration, diesel generator, absorption chiller, storage, exergy

LISTE DES ABREVIATIONS

LESSE : Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie

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

GE : Groupe Electrogène

PV : Photovoltaïque

NOMENCLATURE

| Nomenclature | Désignation | Unité |
|--------------|---|----------|
| Φ | Puissance thermique | W |
| W_e | Puissance électrique | W |
| \dot{m} | Débit massique | Kg/s |
| C_p | Capacité calorifique | J/kg. °C |
| T | Température | °C |
| t | Temps | s |
| C | Consommation en gaz-oil à 80% de charge | l/h |
| PCI | Pouvoir calorifique inférieur | kWh/kg |
| Ex_c | Exergie consommée | W |
| Ex_p | Energie produite | W |
| Ex_d | Exergie détruite | W |

| Symbole grec | Désignation | Unité |
|--------------|-----------------|----------|
| ρ | Masse volumique | kg/m^3 |
| χ | Fraction | - |
| η | Rendement | - |

| Indice | Désignation |
|-----------|--|
| fl | Fluide de refroidissement |
| sm | Sortie moteur (ou entrée radiateur) |
| em | Entrée moteur (ou sortie radiateur) |
| fu | Fumée (gaz d'échappement du moteur diesel) |
| Fl_s.éch1 | Fluide de refroidissement à la sortie de l'échangeur N°1 : gaz_liquide |
| Fl_e.éch1 | Fluide de refroidissement à la entrée de l'échangeur N°1 : gaz_liquide |
| cs_ma | Chaud sortie de la machine à absorption |
| ce_ma | Chaud entrée de la machine à absorption |
| e | Eau |
| a | Ambiante |

SOMMAIRE

| | |
|--|-----|
| Dedicace | i |
| Remerciements | ii |
| Résumé/Abstract | iii |
| Résumé | iii |
| Abstract..... | iii |
| Liste des abréviations | iv |
| Liste des tableaux | 4 |
| Liste des figures | 4 |
| I. Introduction générale..... | 6 |
| I.1. Contexte de l'étude | 6 |
| I.2. Objectif de l'étude | 7 |
| I.3. Méthodologie et organisation du travail..... | 7 |
| I.4. Présentation de la structure d'accueil : 2iE et LESEE..... | 7 |
| II. Etude bibliographique | 9 |
| II.1. Les systèmes hybrides à partir de groupe électrogène | 9 |
| II.1.1. La nécessité des systèmes hybrides..... | 9 |
| II.1.2. Flexy Energy: un système hybride solaire PV/Groupe électrogène sans stockage. | 10 |
| II.2. La cogénération | 11 |
| II.2.1. Définition | 11 |
| II.2.2. Les technologies pour la cogénération | 12 |
| II.2.3. Moteur à combustion interne..... | 12 |
| II.2.4. Etat de l'art de cogénération à partir de groupe électrogène..... | 13 |
| II.3. Méthodes de production de froid à partir de la chaleur | 13 |
| II.3.1. Généralités..... | 14 |

| | | |
|----------|--|----|
| II.3.2. | Les technologies | 15 |
| II.4. | Synthèse bibliographique | 15 |
| III. | Dimensionnement..... | 16 |
| III.1. | Les composants | 16 |
| III.1.1. | Le groupe électrogène SDMO..... | 16 |
| III.1.2. | La machine froid ClimateWell 10..... | 17 |
| III.1.3. | Les échangeurs | 17 |
| III.1.4. | Schéma du montage | 19 |
| III.2. | Estimation des pertes thermiques valorisables du groupe électrogène..... | 19 |
| III.2.1. | Puissance thermique disponible dans le circuit de refroidissement | 19 |
| III.2.2. | Puissance thermique disponible dans les gaz d'échappement | 20 |
| III.3. | Exploitation des puissances thermiques pour la cogénération..... | 21 |
| III.4. | Bilan des températures et puissances du système | 22 |
| III.5. | Dimensionnement avec appoint solaire | 23 |
| III.6. | Dimensionnement circuit de refroidissement de la machine froid | 24 |
| IV. | Analyse Exergétique et Energétique théorique | 25 |
| IV.1. | Bilans sur le Groupe électrogène seul..... | 25 |
| IV.1.1. | Bilan énergétique théorique..... | 25 |
| IV.1.2. | Bilan exergétique théorique..... | 26 |
| IV.2. | Bilans sur la machine à absorption seule | 27 |
| IV.2.1. | Efficacité théorique du système | 27 |
| IV.2.2. | Analyse exergétique de la machine froid | 28 |
| IV.3. | Analyse théorique du système de cogénération sans appoint solaire..... | 30 |
| IV.3.1. | Bilan énergétique théorique : | 30 |
| IV.3.2. | Bilan exergétique théorique : | 31 |
| IV.4. | Analyse théorique du système de cogénération avec appoint solaire | 32 |

| | | |
|---------|---|----|
| IV.4.1. | Bilan énergétique théorique..... | 32 |
| IV.4.2. | Bilan exergetique théorique..... | 32 |
| IV.5. | Comparaison et analyse des résultats..... | 33 |
| V. | Montage de l'installation..... | 34 |
| V.1. | Réseau groupe électrogène / échangeurs | 34 |
| V.1.1. | Montage de l'échangeur à plaques : | 35 |
| V.1.2. | Montage de l'échangeur à gaz : | 35 |
| V.1.3. | Les vannes : | 35 |
| V.2. | Réseau échangeurs / machine froid | 36 |
| V.3. | Réseau château d'eau/ machine froid | 37 |
| V.4. | Montage pratique de l'installation | 37 |
| VI. | Etude économique et environnementale | 39 |
| VI.1. | Etude économique..... | 39 |
| VI.2. | Etude environnementale..... | 41 |
| | Conclusion..... | 42 |
| | Bibliographie..... | 43 |
| | Annexe 1 : Cogénération à partir de groupe électrogène par <i>Energiestro</i> | 45 |
| | Annexe 2 : Machine froid à absorption : | 48 |
| | Annexe 3 : La ClimateWell 10..... | 50 |
| | Annexe 4 : Catalogue fournisseur Climatewell..... | 52 |
| | Annexe 5 : Catalogue fournisseur SDMO..... | 53 |
| | Annexe 6 : Composition des gaz d'échappement d'un moteur diesel | 54 |
| | Annexe 7 : Température de rosé acide en fonction de la teneur en SO3 des fumées [18]..... | 55 |
| | Annexe 9 : Bilan matériel..... | 57 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|----|
| Tableau 1: Bilan énergétique théorique du groupe électrogène | 26 |
| Tableau 2: Bilan exergetique groupe électrogène seul..... | 27 |
| Tableau 3: Bilan énergétique théorique du système de cogénération sans appoint solaire..... | 31 |
| Tableau 4: Bilan exergetique théorique du système de cogénération sans appoint solaire..... | 31 |
| Tableau 5: Bilan énergétique théorique du système de cogénération avec appoint solaire | 32 |
| Tableau 6: Bilan exergetique théorique du système de cogénération avec appoint solaire | 32 |
| Tableau 7: Coût du système hybride PV/Diesel sur une durée de vie de 20 ans | 40 |
| Tableau 8: Coût du système hybride Solaire PV/diesel de cogénération (électricité-froid) sur une durée de vie de 20 ans | 40 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| Figure 1: Schéma du prototype Flexy Energy [4] | 10 |
| Figure 2 : La cogénération : Electricité/Thermique | 11 |
| Figure 3: Cogénération par moteur | 12 |
| Figure 4 : Schéma général de production de froid à partir de la chaleur | 14 |
| Figure 5 : Procédés de climatisation | 14 |
| Figure 6 : Groupe électrogène T12K SDMO | 16 |
| Figure 7: La ClimateWell 10..... | 17 |
| Figure 8 : Echangeur liquide/liquide | 18 |
| Figure 9: Schéma de conception de l'échangeur de récupération de la chaleur des gaz d'échappement..... | 18 |
| Figure 10 : Schéma de l'installation | 19 |
| Figure 11: Bilan de puissance de l'installation de cogénération..... | 22 |
| Figure 12 : Puissance de charge de la machine froid en fonction de la température d'entrée absorbeur..... | 23 |
| Figure 13: Bilan de puissance de l'installation de cogénération avec appoint solaire..... | 24 |
| Figure 14: Schéma moteur thermique | 25 |
| Figure 15: Bilan exergetique groupe électrogène | 27 |
| Figure 16: Rendement exergetique de la machine à absorption en fonction de la température de l'évaporateur | 30 |
| Figure 17: Système de cogénération (électricité et froid) | 30 |
| Figure 18: Bilan exergetique théorique du système de cogénération sans appoint solaire | 31 |
| Figure 19: Bilan exergetique théorique du système de cogénération avec appoint solaire..... | 32 |
| Figure 20: Esquisse du réseau groupe électrogène/ échangeurs | 34 |

| | |
|---|----|
| Figure 21: Système de vanne en sortie de pompe de refoulement (liaison 1)..... | 36 |
| Figure 22: Esquisse du réseau groupe électrogène/machine frigo | 36 |
| Figure 23: Esquisse du réseau château d'eau /machine frigo | 37 |
| Figure 24: Schéma détaillé du montage de la partie froid de la cogénération | 38 |

I. INTRODUCTION GENERALE

I.1. Contexte de l'étude

En Afrique, l'accès à l'électricité est un problème majeur qui freine considérablement son développement. Il reste sans doute le continent le moins électrifié avec 3% de consommation électrique mondiale malgré sa population (15% de la population mondiale) [1]. Un chiffre très frappant, mais à nuancer selon les régions : l'Afrique du Nord est électrifiée à plus de 90%, et l'Afrique du Sud, à elle seule, représente près de la moitié de l'électricité produite sur le continent. C'est bien sûr l'Afrique subsaharienne, hors Afrique du Sud, qui est la plus en retard : 48 pays, 10% de la population mondiale, et des installations électriques équivalentes à celle de la Pologne [1]. En plus de l'insuffisance des installations, les pays comme le Burkina Faso, le Mali sont des importateurs nets d'hydrocarbures mais paradoxalement possèdent un important gisement d'énergie solaire.

La mutualisation des réseaux et l'arrivée de grands groupes permettraient-elles d'atteindre les populations rurales les plus reculées? L'électrification des zones rurales est en effet plus difficile, puisqu'il s'agit de populations dispersées et éloignées des centres économiques. Relier ces zones éloignées au réseau électrique est donc encore plus compliqué, encore plus coûteux, de sorte que le taux d'électrification rural est inférieur à 5% dans 17 pays d'Afrique sub-saharienne. Face à ces enjeux et dans le but de tirer le coût de production de l'électricité vers le bas, le Laboratoire Energie Solaire Economie d'Energie (LESEE) a initié en 2009 un concept nouveau qui permettra à terme de produire de l'électricité au moyen de 100% d'énergies renouvelables et sans stockage à partir d'un système hybride solaire PV/ Diesel. Ce concept est appelé « Flexy Energy » et est destiné aux populations des zones rurales et périurbaines.

Mais l'efficacité énergétique du prototype peut encore être améliorée puisqu'il existe d'importantes pertes thermiques au niveau du groupe électrogène. D'où l'idée de récupérer cette chaleur et de concevoir un système de cogénération pour la production d'électricité et froid.

I.2. Objectif de l'étude

L'objectif principal de notre étude est d'améliorer le prototype Flexy Energy en augmentant son efficacité énergétique via une cogénération électricité/froid ; ce qui devrait accroître l'accès aux services énergétiques des populations rurales et périurbaines.

En effet, pour améliorer l'efficacité énergétique du prototype flexy-energy, le LESEE ambitionne d'utiliser les rejets thermiques au niveau du groupe électrogène pour servir de source chaude à une machine à froid. Rappelons que le rendement d'un groupe électrogène tourne autour de 30% et que donc près de 70% constitue des pertes dont une part importante est sous forme thermique et rejetée dans l'environnement.

Dans cette optique nous chercherons à intégrer un système de production de froid au système hybride solaire PV/Diesel existant. Il s'agit donc de proposer une technologie de cogénération de production d'électricité et de froid, à partir du groupe en exploitant ses pertes thermiques.

Nous envisageons à l'issue des travaux, d'apporter les arguments convaincants pour intégrer la technologie à travers les programmes nationaux d'efficacité énergétique et de réduction de la consommation d'électricité dans les zones rurales et périurbaines des pays subsahariens.

I.3. Méthodologie et organisation du travail

Pour atteindre les objectifs fixés, cinq étapes seront suivies successivement :

- Etude bibliographique sur les différents composants du système hybride solaire PV/diesel de cogénération (froid et électricité) en dégageant la technologie à utiliser;
- Evaluation du niveau de température du circuit de refroidissement et des gaz d'échappement du moteur Diesel, dimensionnement du système de cogénération et ajouter un appoint solaire si nécessaire;
- Evaluer l'efficacité énergétique et exergetique du système de production d'électricité et froid;
- Etude économique du prototype retenu accompagnée d'une étude environnementale ;
- Expérimentation du prototype et proposition d'améliorations.

I.4. Présentation de la structure d'accueil : 2iE et LESEE

Le thème de notre stage de fin d'étude est une initiative du LESEE (Laboratoire Energie Solaire et Economie d'Energie) situé sur le site 2iE de Kamboinsé à environ 15 km de Ouagadougou. Il fait partie des six laboratoires de recherche de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) et dépend de l'Unité Thématique de Recherche et d'Enseignement Génie

Energétique et Industrielle (UTER GEI). Créé en novembre 2008, le LESEE est depuis lors dirigé par le docteur Yao AZOUMAH.

L'objectif scientifique du LESEE est de contribuer à l'innovation industrielle dans le domaine du solaire pour une production et une utilisation rationnelle d'énergies électrique / thermique en Afrique.

Les travaux effectués au laboratoire sont relatifs à quatre grands axes de recherche :

- Evaluation précise et continue de la ressource solaire et des besoins en énergie en Afrique
- Etude des centrales solaires à concentration
- Habitat, architecture bioclimatique et systèmes solaire PV/thermique (basse température)
- Conception optimale et optimisation thermodynamique des systèmes énergétiques

L'équipe actuelle de recherche au LESEE est composé de 03 enseignants chercheurs, 04 doctorants, 06 ingénieurs chercheurs et une douzaine de stagiaires.

II. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

II.1. Les systèmes hybrides à partir de groupe électrogène

II.1.1. La nécessité des systèmes hybrides

L'utilisation des groupes électrogènes pour l'électrification rurale pose certains problèmes majeurs [2]

- coûts élevés de fonctionnement
- problème d'approvisionnement en carburant (éloignement des fournisseurs de carburants)
- maintenance compliquée et coûteuse
- faible durée de vie (environ 5 ans)
- impossibilité d'une production électrique continue sur 24 heures (ou nécessité de disposer de plusieurs GE)
- pollution environnementale (nuisance sonore et émission de CO₂)

Pour faire face à ces contraintes une des solutions serait d'hybrider le système de production d'électricité. Nous pouvons alors nous orienter vers les énergies renouvelables tels que l'éolien, la biomasse, la géothermie, le solaire...

Dans le cas du solaire, les systèmes photovoltaïques (PV) fournissent de l'électricité de manière ininterrompue (sous condition d'ensoleillement bien sûr), sans bruit, ni nuisances environnementales (excepté la présence des accumulateurs électrochimiques difficiles à recycler).

Faciles à installer, ils nécessitent peu de maintenance et font preuve d'une grande fiabilité. Leurs problèmes résident dans le coût d'investissement élevé nécessaire à leur installation et la limitation de la charge électrique à satisfaire.

En associant le groupe électrogène au générateur photovoltaïque, les avantages de chacune des sources d'énergie sont ainsi ajoutés:

- le système photovoltaïque réduit la consommation en carburant, le temps de fonctionnement et donc de la maintenance du groupe ;
- la présence du stockage par batteries réduit la puissance nominale du groupe ;
- la présence du groupe réduit la taille du champ photovoltaïque et la capacité de stockage des batteries, diminuant ainsi le coût du système ;
- la fiabilité du système global est augmentée ;
- les puissances et les énergies mises en jeu sont plus importantes et la charge à alimenter plus élevée.

Il existe plusieurs configurations de système hybride solaire PV/ diesel : configuration en série, configuration commutée et configuration parallèle [2]. Ces systèmes possèdent tous un système de stockage. Ce qui augmente davantage les coûts d'investissements de l'installation, ce que cherche à éviter le concept Flexy Energy.

II.1.2. Flexy Energy: un système hybride solaire PV/Groupe électrogène sans stockage

Flexy Energy est une technologie innovante dans sa conception du système hybride. Contrairement à la quasi-totalité des autres systèmes [2], le système hybride solaire PV/Groupe électrogène de Flexy Energy ne possède pas d'accumulateurs d'énergie [3]. Le concept Flexy Energy est actuellement toujours en phase d'étude et d'expérimentation afin d'optimiser le système (figure 1).

L'avantage de ce concept est la réduction des coûts d'investissement et de maintenance du système permettant de réduire davantage le coût du kWh.

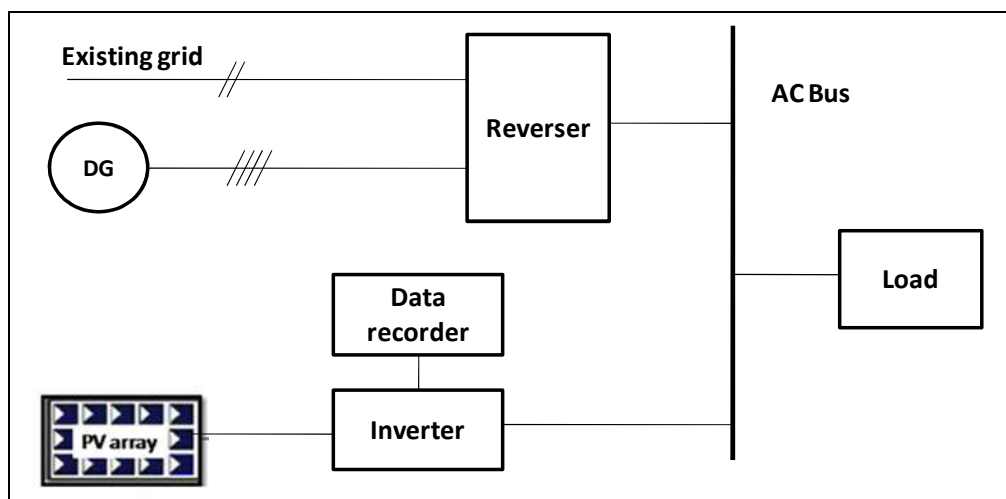


Figure 1:Schéma du prototype Flexy Energy [4]

Cependant le concept Flexy Energy n'a pas encore exploité toutes les solutions dans sa course à la réduction des coûts de l'énergie et à l'amélioration du bilan énergétique. En effet nous savons qu'un groupe électrogène possède un rendement de 30% environ pour la production d'électricité, c'est à dire qu'il y a 70% d'énergie non utilisée. Dans ce qui suit, nous chercherons à mettre en valeur cette énergie perdue et à l'exploiter à son maximum.

II.2. La cogénération

II.2.1. Définition

De façon générale la cogénération est un principe de production simultanée de deux formes d'énergie différentes à partir d'une même source d'énergie primaire.

Mais la définition la plus courante stipule que la cogénération permet de produire simultanément de la chaleur et de l'énergie mécanique [5].

Il faut noter que l'énergie existe sous plusieurs formes et qu'il est possible de passer d'une forme à une autre. Dans certains procédés nous pouvons obtenir en sortie une énergie mécanique. Cette dernière peut être convertie en énergie électrique (cas des groupe électrogène), qui peut elle-même être convertie en énergie thermique : production de chaud ou de froid (avec une Pompe à Chaleur réversible par exemple).

La figure 2 présente le cas d'un système de cogénération utilisant un moteur ou une turbine : à partir d'une combustion, nous obtenons une énergie électrique et thermique. Cette énergie thermique (ou chaleur) peut être utilisée directement (chauffage), ou convertie en froid (climatisation).

Une centrale de cogénération peut donc fournir les couples d'énergies suivants :

- Mécanique/Thermique (chaleur ou froid)
- Electrique/Thermique (chaleur ou froid)

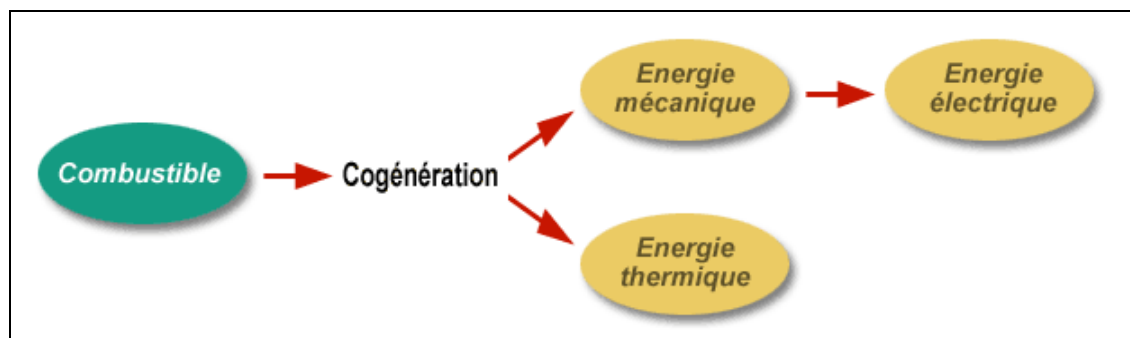


Figure 2 : La cogénération : Electricité/Thermique

Dans le cas de la figure 2, l'idée de cogénération se base sur le fait que la production électrique dégage une grande quantité de chaleur, habituellement dissipée dans l'environnement. Les techniques de cogénération consistent à récupérer et à valoriser le plus possible cette énergie thermique résiduelle et disponible.

On appelle couramment :

- Cogénération : la gamme 1 MWe – 250 MWe (industrie, réseaux de chaleur)
- Mini-cogénération : la gamme 200 – 600 kWe (immeuble)
- Micro-cogénération : la gamme 5 – 50 kWe (maison individuelle, petit bâtiment) [5].

II.2.2. Les technologies pour la cogénération

Actuellement la cogénération s'appuie sur trois grandes familles productrices d'électricité. Il s'agit des moteurs (rendement électrique d'environ 30 à 45%), des turbines (rendement électrique d'environ 25 à 40%), et des piles à combustible (rendement électrique d'environ 20 à 30%).

La quasi-totalité du solde de l'énergie consommée sur l'énergie primaire est perdue, car elle est transformée en chaleur. La cogénération consiste à récupérer au mieux cette énergie, afin de la valoriser pour atteindre un rendement total pouvant aller jusqu'à 80-90% [5].

Dans notre étude nous nous focaliserons sur une cogénération applicable au groupe électrogène c'est-à-dire cogénération par moteur à combustion interne.

II.2.3. Moteur à combustion interne

Les moteurs à combustion interne, aussi appelés moteurs alternatifs, sont très répandus : c'est une technologie maîtrisée venant du secteur automobile.

Les moteurs de cogénération sont disponibles dans une gamme de puissance allant de quelques dizaines de kW à environ 4 MW. Ce sont donc surtout les petites installations et les applications domestiques qui sont concernées par ce type de technologie. Leurs rendements électriques se situent généralement entre 30 et 45 %.

Un moteur produit deux types d'énergie thermique (figure 3):

- Une énergie "basse température" (environ 90 °C), récupérée sur le bloc moteur (circuit d'huile et circuit de refroidissement)
- Une énergie "haute température" (environ 450 °C), sur les gaz d'échappement

L'utilisation pratique de cette chaleur est complexe, et ceci est dû en particulier aux différents niveaux de température. La chaleur est disponible à des températures assez basses, avec comme conséquence que la chaleur est généralement produite sous forme d'eau chaude. [5]

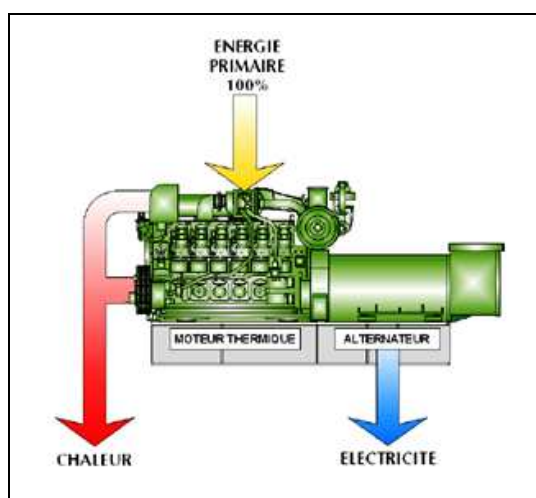


Figure 3:Cogénération par moteur

Ici la cogénération conduit donc à :

- Une production décentralisée d'électricité (au regard des grandes centrales thermiques ou nucléaires) qui, à travers le réseau électrique, peut alimenter des clients proches ou éloignés.
- Une production de chaleur qui doit être consommée à proximité (le plus souvent : site industriel, ou réseau de chaleur adapté) d'une zone urbaine assez dense.

II.2.4. Etat de l'art de cogénération à partir de groupe électrogène

Il existe déjà sur le marché des procédés de cogénération à partir de groupe électrogène. Par exemple la société *Dutry Power* [6] ou *Energiestro* [7] offrent leurs services pour ce type d'installation (Annexe 1). Ces systèmes de cogénération sont en adéquation avec une politique de production décentralisée d'énergie. Ils sont donc aussi appropriés pour des applications rurales.

Mais il faut souligner deux points importants pour ces installations. Le premier étant que l'appoint de chaleur est réalisé à partir d'une chaudière à bois, huile ou fioul. Le second point est que les systèmes en vente se limitent à la production de chaleur et n'offrent pas l'option de production de froid.

Notre projet peut alors devenir innovant dans ce secteur, si nous offrons au consommateur un système de cogénération écologique pour la production de froid et d'électricité. Pour cela le groupe électrogène devra être uniquement alimenté à base de biocarburants, et le système de cogénération devra avoir un appoint thermique solaire. Le tout offrant au consommateur l'option de production de froid.

Pour une application en zone rurale en Afrique, le besoin en froid pour le stockage des aliments est primordial par rapport à la production d'eau chaude vu leur secteur d'activité. Ce qui nous amène à faire un examen sur les méthodes de production de froid en vue de proposer une méthode convenable à notre application

II.3. Méthodes de production de froid à partir de la chaleur

Comme nous venons de le souligner, pour un projet au Burkina Faso, la meilleure valorisation des pertes thermiques d'un système produisant de l'électricité en zone rurale, serait la mise en place d'un système de cogénération avec production de froid. Nous allons maintenant voir comment « il est possible d'obtenir du froid à partir du chaud ».

II.3.1. Généralités

La production de froid à partir d'une source énergétique chaude est possible grâce à des procédés thermiques (figure 4) :

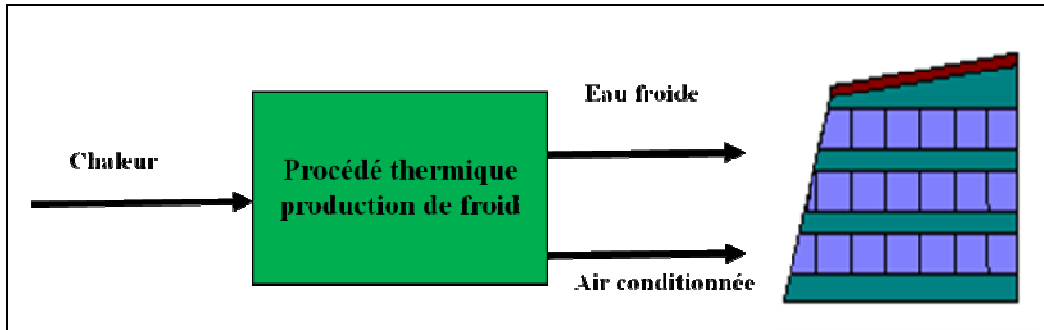


Figure 4 : Schéma général de production de froid à partir de la chaleur

Pour ce type de procédé il n'y a pas de contrainte sur la nature de la source chaude. La chaleur peut provenir d'une installation solaire, géothermique, de biogaz, d'une chaudière, de rejets thermiques d'un moteur...

Généralement l'installation est constituée d'un système de récupération de la chaleur (capteur solaire, échangeur de chaleur, dans notre cas le groupe électrogène), d'un système de production de froid (procédé thermique), d'un système de stockage et de distribution.

La figure 5 ci-dessous présente les différents procédés de production de froid à partir de la chaleur.

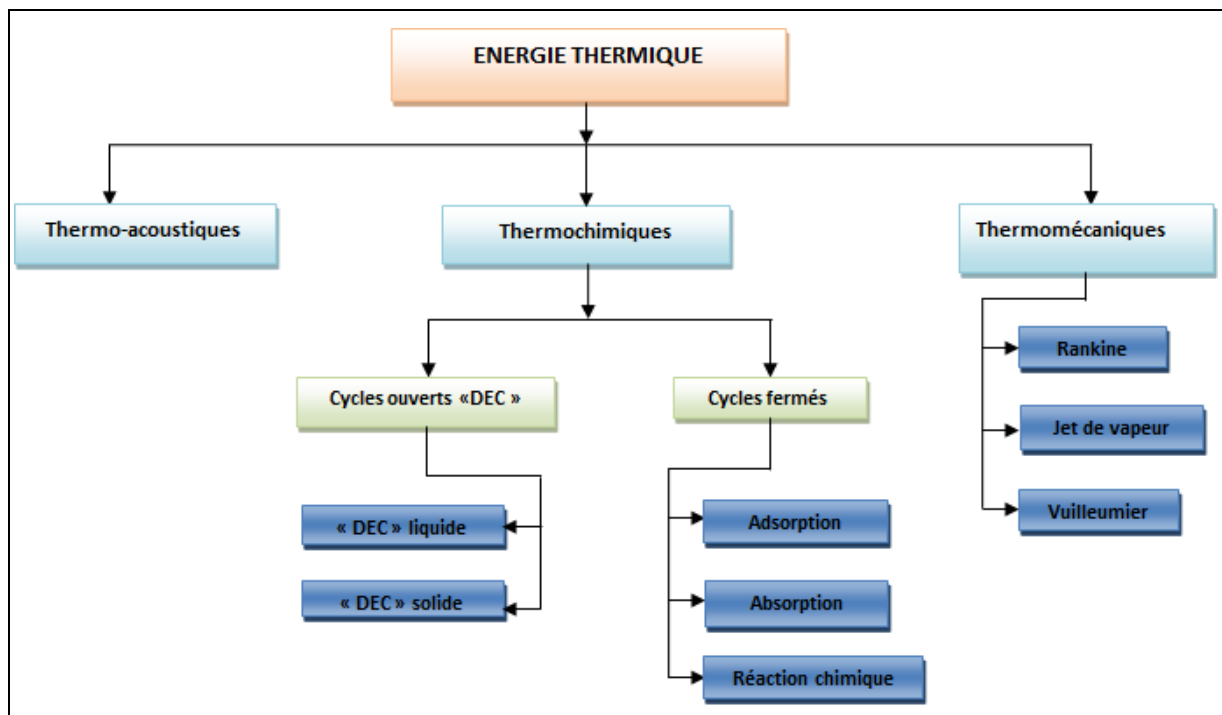


Figure 5 : Procédés de climatisation

II.3.2. Les technologies

D'après l'étude sur la climatisation de petite puissance d'Edith VERDURANT [8], nous pouvons classer les procédés pour la production de froid en trois grandes familles de la thermodynamique: les systèmes Thermo-acoustiques, Thermomécaniques et Thermochimiques.

Toutes ces technologies ont l'avantage de n'utiliser aucun fluide polluant, certaines suppriment la présence de pièces mécaniques en mouvement et sont silencieuses (Thermoacoustique, Jet de vapeur). Malgré ces points forts, nous devons écarter la plus part de ces technologies [8] :

Le cycle de Rankine n'est retenu que pour les installations de grande puissance. Les cycles à sorption sont donc les plus intéressants pour notre cas d'étude. Cependant le 2iE possède une machine froid à absorption de la société ClimateWell. Nous retiendrons donc le cycle à absorption (Annexe 2) et utiliserons cette machine pour notre installation.

II.4. Synthèse bibliographique

Notre étude portera donc sur un système de cogénération électricité/thermique à partir des pertes thermiques de groupe électrogène.

Afin de présenter un système innovateur, nous avons proposé quelques améliorations aux procédés standards de production d'énergie électrique. D'abord la partie production d'électricité sera hybridée à l'aide de panneaux photovoltaïques (ce qui est déjà le cas avec le prototype Flexy Energy). Ensuite la partie thermique sera transformée à l'aide de la technologie de machine à sorption, afin de produire du froid. La partie appoint thermique sera assurée par des capteurs solaires thermiques. Le groupe électrogène sera alimenté quant à lui par un biocarburant pour limiter au maximum l'impact environnemental de l'installation.

III. DIMENSIONNEMENT

Dans cette partie, nous décrirons dans un premier temps, les éléments clefs de notre système et proposerons un premier schéma de l'installation. Dans un second et troisième temps nous chercherons à déterminer les puissances et températures mise en jeu dans le système à travers le groupe électrogène et la machine froid et nous finirons par déterminer la puissance solaire à installer pour l'appoint thermique.

III.1. Les composants

III.1.1. Le groupe électrogène SDMO

Le groupe électrogène utilisé est un groupe diesel SDMO T12K S3L2. C'est un moteur 4 temps, 3 cylindres, avec une chambre de combustion à turbulence [9]. Sa puissance nominale est de 11,5kVA délivrant une tension triphasée de 400/230 V. Il est mis en parallèle avec un champ solaire de 2,85kWp [3].



Figure 6 : Groupe électrogène T12K SDMO

La consommation spécifique du groupe varie selon la charge. Des études déjà menées ont montré que le groupe fonctionne de manière optimale autour de 80% de sa puissance nominale. [4]

Notre étude étant d'optimiser davantage la production du groupe par ses rejets thermiques sans augmenter sa consommation en carburant ; les mesures et les calculs seront faits à 80% de sa puissance nominale. Le fonctionnement du groupe diesel est alors caractérisée par :

- Puissance nominale 9,2kW
- Puissance électrique délivrée : 7,2kW (\approx 80% de la puissance nominale)
- Temps de fonctionnement : 10 h/jour
- Consommation spécifique à 80% de charge : 0,35l/kWh soit 2,5 l de gaz-oil consommée pour produire 7,2kWh électrique.

III.1.2. La machine froid ClimateWell 10



Figure 7: La ClimateWell 10

ClimateWell 10 est une unité de climatisation basée sur la technologie d'absorption, utilisant le couple chlorure de lithium/eau. La machine est détaillée en Annexe 3

La ClimateWell 10 peut fonctionner sous trois modes : chargement, chauffage et refroidissement. En mode de chargement la machine stocke l'énergie par le biais d'un sel (chlorure de lithium - LiCl) qui pourra ensuite être utilisé chaque fois que nécessaire. Un cycle complet de fonctionnement est décrit en Annexe 3.

Fait important, la machine peut charger et décharger simultanément. Cela signifie qu'elle peut recevoir l'énergie thermique en même temps qu'elle fournit le chauffage ou le refroidissement). Les courbes de charges sont données en Annexe 4.

III.1.3. Les échangeurs

Un échangeur de chaleur est un équipement qui permet le transfert de chaleur entre deux fluides sans les mélanger. Il peut être monté suivant différentes configurations. Nous retiendrons le montage en contre-courant qui présente une efficacité thermique plus grande que le montage en co-courant.

Pour notre système, au moins deux échangeurs de chaleur sont nécessaires pour la récupération de la chaleur des deux sources de chaleur.

III.1.3.1. L'échangeur liquide-liquide

Pour récupérer la chaleur du circuit de refroidissement du bloc moteur, il nous faut un échangeur liquide-liquide. Il existe une multitude d'échangeurs de chaleur pour cette application mais l'échangeur à plaques brassées présente plus d'avantages que les autres [10].

- L'efficacité élevée,
- Taille réduite,
- Adapté à des applications à haute température et pression.

De ce fait l'échangeur suivant à été retenu pour le montage :



Fabricant : BHE Manufacturing Ronneby, Sweden

Température de service minimale : -196 °C

Température de service maximale : 225 °C

Pression maximale : 32 Bars

Débit maximale : $3,6m^3/h$

Figure 8 : Echangeur liquide/liquide

III.1.3.2. L'échangeur liquide-gaz

Sur la tuyauterie des gaz d'échappement, il faut un échangeur liquide-gaz.

Sur le marché les échangeurs de gaz d'échappement disponibles sont soit pour des installations de grandes puissances soit ne répondent pas à la configuration de notre système.

Nous avons donc fait recours à ISOMET une société de la place pour la fabrication. Le schéma suivant montre la configuration de l'échangeur

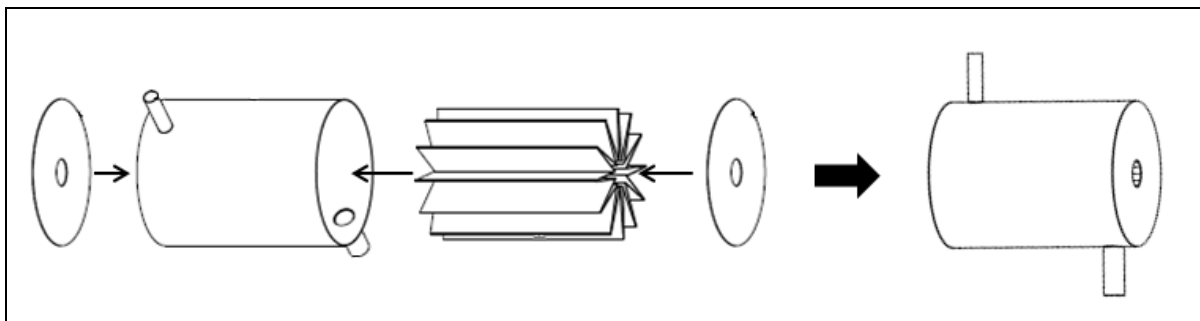


Figure 9:Schéma de conception de l'échangeur de récupération de la chaleur des gaz d'échappement

III.1.4. Schéma du montage

La Figure 10 donne une esquisse grossière de l'installation. Nous nous baserons sur ce montage pour évaluer les puissances et températures mises en jeu dans les différentes parties du circuit.

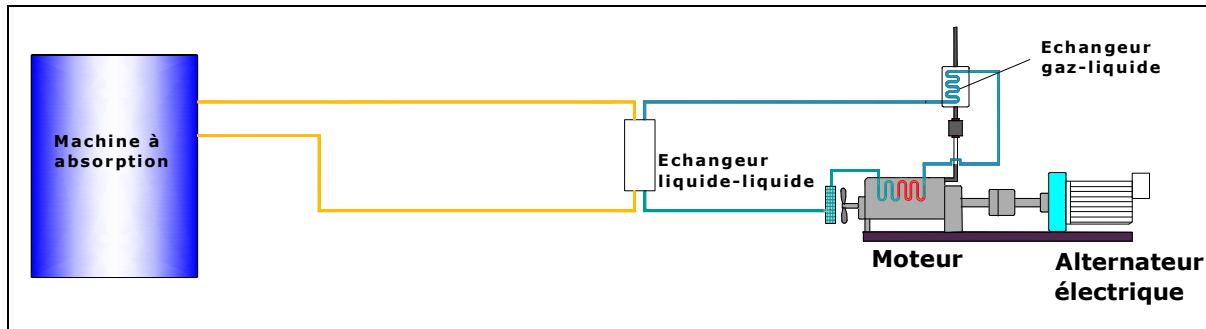


Figure 10 : Schéma de l'installation

III.2. Estimation des pertes thermiques valorisables du groupe électrogène

III.2.1. Puissance thermique disponible dans le circuit de refroidissement

Habituellement dissipée dans l'environnement par le radiateur dans le circuit de refroidissement, cette énergie thermique est celle que nous cherchons à valoriser. A cet effet la puissance thermique disponible dans le circuit de refroidissement est donnée par :

$$\Phi_1 = \dot{m}_{fl} * C_{pfl} * (T_{sm} - T_{em}) \quad (1)$$

\dot{m}_{fl} : Le débit massique du fluide de refroidissement eau + éthylène glycol (kg/s)

C_{pfl} : La capacité calorifique du fluide de refroidissement (J/kg. °C)

T_{sm} : La température à la sortie du moteur (ou entrée radiateur) (°C)

T_{em} : La température à l'entrée du moteur (ou sortie radiateur) (°C)

- Calcul de la capacité calorifique massique et la masse volumique du liquide de refroidissement

Le liquide de refroidissement est composé de 96 % d'eau et 4% d'Ethylène Glycol. On peut utiliser les formules suivantes :

$$\rho_{Liq} = \sum_i x_i \rho_i \quad (2)$$

$$C_{pLiq} = \sum_i x_i C_{p_i} \quad (3)$$

Avec x_i la fraction du constituant i , ρ_i la masse volumique du constituant i ; C_{p_i} la capacité calorifique massique du constituant i . On obtient alors $\rho_{fl} = 983,6 \text{ kg/m}^3$ et $C_{p_{fl}} = 4124,16 \text{ J/kg.K}$

➤ Calcul du Débit massique \dot{m}_{fl}

Pour déterminer le débit massique du liquide de refroidissement nous avons considéré les données du catalogue fournisseur (Annexe 5).

$$\dot{m}_{fl} = \frac{\Phi_r}{Cp_{fl} * (T_{em_max} - T_{sm_max})} \quad (4)$$

Φ_r : Puissance thermique théorique rejetée dans le circuit de refroidissement,

T_{em_max} : La température maximale à l'entrée du moteur (°C)

T_{sm_max} : La température maximale à la sortie du moteur (°C)

Application numérique : $\dot{m}_{fl} = \frac{9800}{4124.16 * (93 - 50)} = 0,055 \text{ kg/s}$

A partir de la formule (1), on obtient la puissance thermique disponible réelle du circuit de refroidissement avec la température sortie moteur (82°C) et entrée moteur (sortie radiateur 49,53°C) :

Analyse numérique : $\Phi_1 = 0,0835 * 2728 * (82,2 - 49,53) = 7445,72093 \text{ W}$

III.2.2. Puissance thermique disponible dans les gaz d'échappement

La puissance thermique disponible dans les gaz d'échappement est la puissance thermique des fumées si on refroidit les fumées à l'aide d'un échangeur. Cette énergie récupérable est limitée par l'efficacité de l'échangeur utilisé et la température de condensation possible des gaz d'échappement.

La puissance thermique disponible est donnée par la formule :

$$\Phi_2 = \dot{m}_{fu} * cp_{fu} * (T_{ce} - T_{cs}) \quad (5)$$

\dot{m}_{fu} : Le débit massique des fumées (gaz d'échappement) en (kg/s)

Cp_{fu} : La chaleur massique moyenne des gaz d'échappement (J/kg. °C)

T_{ce} : La température entrée des fumées dans l'échangeur (°C)

T_{cs} : La température sortie fumées dans l'échangeur (°C)

➤ Calcul de la capacité calorifique massique et la masse volumique des fumées

Pour déterminer la masse volumique et la capacité calorifique massique des fumées, on peut utiliser les formules respectivement (2) et (3).

On obtient alors $\rho_{fu} = 0,64 \text{ kg/m}^3$ et $Cp_{fu} = 1,08 \text{ kJ/kg.k}$. La composition des gaz d'échappement d'un moteur diesel [11] ainsi que le calcul détaillé sont donnés en Annexe 6.

➤ Calcul du débit massique des fumées :

A partir du débit volumique $D_{fu} = 35,6 \text{ l/s}$ donné par le constructeur on en déduit le débit massique.

Application numérique: $\dot{m}_{fu} = \rho_{fu} \cdot D_{fu} = 0,64 * 35,6 \cdot 10^{-3} = 0,023 \text{ kg/s}$

La température des fumées mesurée au niveau de la tuyauterie des gaz d'échappement est de 276°C . A la sortie du tuyau d'échappement la température des fumées doit être supérieure à celle de la température de rosé de l'acide sulfurique afin d'éviter sa formation qui provoquera la corrosion des organes des tuyaux d'échappement [12]. Cette température est environ 110°C pour une teneur en SO_3 de 10 % (annexe 7). Pour une marche de sécurité, nous considérons 120°C comme la température de sortie des fumées.

On en déduit alors la puissance thermique valorisable par la formule (5)

Application numérique : $\Phi_2 = 0,022553 * 1048 * (276 - 120) = 3948,86\text{W}$

III.3. Exploitation des puissances thermiques pour la cogénération

➤ Estimation de la température de sortie du liquide de refroidissement

La température du liquide de refroidissement à la sortie de l'échangeur (liquide de refroidissement / gaz d'échappement) est donnée par :

$$T_{fl_s.ech1} = T_{fl_e.ech1} + \frac{\Phi_2}{\dot{m}_{fl} \cdot C_{pfl}} \quad (6)$$

Analyse numérique : $T_{fl_s.ech1} = 82,2 + \frac{3948}{0,055 * 4124,16} = 99,6^\circ\text{C}$

➤ Puissance thermique valorisable des pertes thermiques du groupe

La première contrainte du système est la différence entre le débit du liquide de refroidissement imposé par le moteur (3.37 l/mn) et le débit de fonctionnement de la machine froid à absorption (15 l/mn) [13]. Nous ne pouvons donc pas directement injecter le liquide de refroidissement dans la machine à absorption. Un échangeur de chaleur liquide / liquide est donc nécessaire pour pallier à ce problème.

Nous nous sommes appuyés sur les données du constructeur, en particulier sur les courbes donnant Φ_c (puissance de charge d'un baril de la machine froid) en fonction de la température d'entrée (Annexe 4).

Nous pouvons alors déterminer la température de sortie de la source chaude en fonction de la température d'entrée en appliquant la formule suivante :

$$T_{cs_mf} = T_{ce_mf} - \frac{\Phi_c}{\dot{m}_e \cdot C_{pe}} \quad (7)$$

L'Annexe 8.1 donne l'évolution de la température de sortie de la source chaude en fonction de sa température d'entrée, à des températures de refroidissement du radiateur de la machine différentes.

Au Burkina Faso compte tenu du climat tropical sec, nous pouvons avoir des systèmes de refroidissement autour de 35°C, en utilisant par exemple une tour de refroidissement à circuit ouvert.

On choisit donc la courbe à la température de refroidissement au radiateur égale à 35°C.

Sur cette courbe on constate qu'avec une température d'entrée de 72 °C l'eau chaude ressort de la machine à 63,4°C et une puissance de charge de 9 kW.

Nous avons donc fixé la température de sortie de la machine froid à 64°C. Par conséquent si nous regardons au niveau de l'échangeur eau/liquide de refroidissement nous connaissons désormais la température d'entrée de la source chaude et celle d'entrée de la source froide.

Pour déterminer les températures de sortie il faudra jouer entre l'efficacité de l'échangeur et la chaleur disponible. Mais une chose est sûre : la température de sortie du liquide de refroidissement (fluide chaud) doit être supérieure à celle à l'entrée de l'eau (fluide froid).

Nous avons fait varier la température de sortie du liquide de refroidissement et nous obtenons les résultats donnés en Annexe 8.2.

En fonction de l'efficacité de l'échangeur, nous pouvons choisir l'état de fonctionnement de notre système. Sur le marché il est difficile d'avoir un échangeur d'efficacité supérieure à 80% mais une efficacité comprise entre 70 et 75% est possible. Par la suite nous considérons un échangeur de chaleur de 75% d'efficacité.

III.4. Bilan des températures et puissances du système

Cette étude nous permet de présenter un premier schéma bilan (Figure 11) de l'installation :

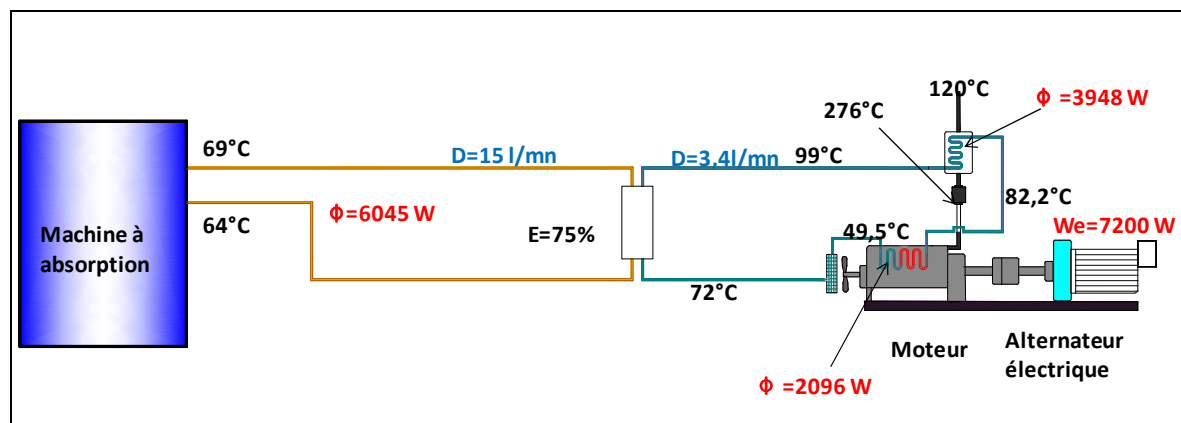


Figure 11: Bilan de puissance de l'installation de cogénération

Nous rappelons que ces données sont purement théoriques, elles nous permettent seulement d'avoir une idée des puissances que nous pouvons mettre en jeu une fois le système mis en marche. Une étude réelle sera réalisée une fois le système monté.

III.5. Dimensionnement avec appoint solaire

Nous savons maintenant que nous disposons d'une puissance thermique de 6 kW à une température de 69°C environ.

Les données du constructeur (Annexe 4) nous permettent de connaître la puissance thermique nécessaire au fonctionnement de la machine froid en fonction de la température d'entrée. Ces données nous permettent de déterminer la puissance thermique à apporter en appoint pour faire fonctionner dans de bonnes conditions la ClimateWell 10, par rapport à nos 6 kW disponibles au niveau du groupe électrogène.

En fonction de la température d'entrée de notre machine à absorption, nous avons les résultats suivants :

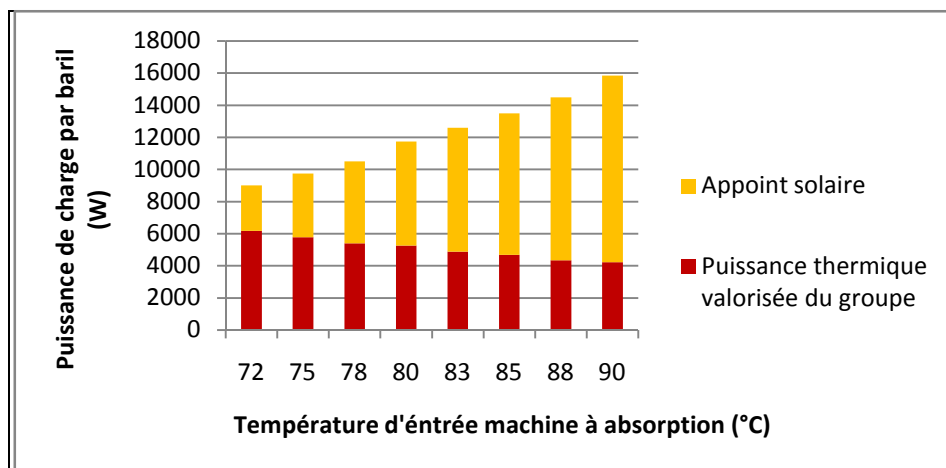


Figure 12 : Puissance de charge de la machine froid en fonction de la température d'entrée absorbeur

Nous pouvons en déduire la part d'énergie solaire et de puissance thermique du groupe pour le fonctionnement de la machine froid.

Notre objectif étant d'exploiter au mieux les pertes thermiques du groupe, l'appoint solaire n'est utilisé que pour augmenter la capacité et les performances de la machine à absorption utilisée.

Il faut donc que la part d'énergie fournie par le groupe soit supérieure à la celle de l'énergie solaire, sans négliger la puissance totale à fournir à la machine froid. Le meilleur scénario est donc pour une température de 75°C (59% de la puissance venant du groupe et 41% du solaire).

Les puissances et températures sont récapitulées ci-dessous :

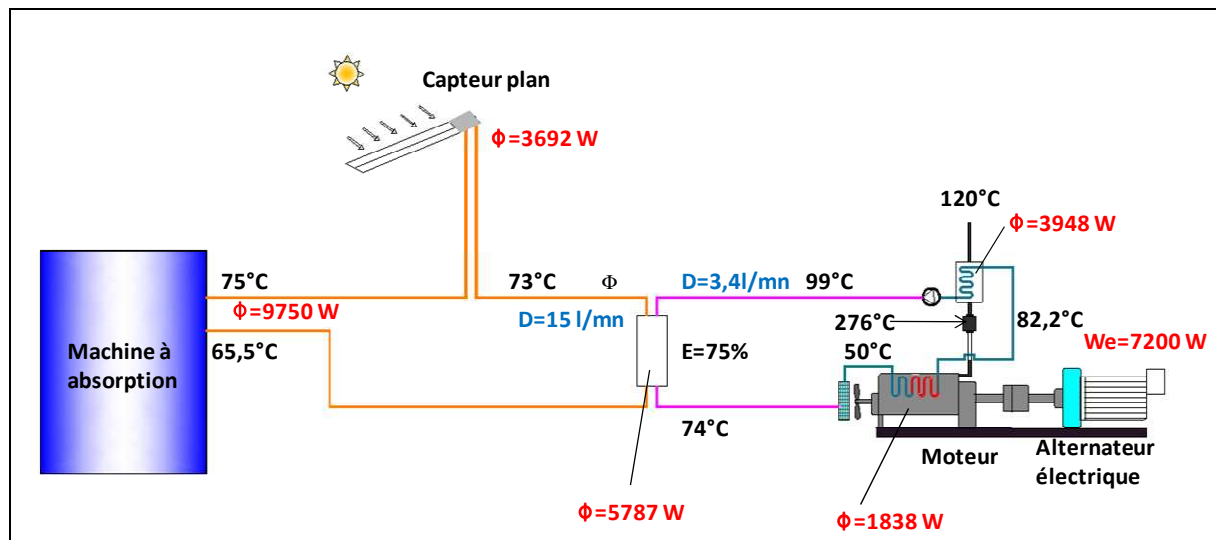


Figure 13: Bilan de puissance de l'installation de cogénération avec appoint solaire

III.6. Dimensionnement circuit de refroidissement de la machine froid

Pour produire le froid la machine à absorption doit avoir un système de refroidissement nécessaire pour évacuer la puissance thermique de la source chaude et la chaleur récupérée au système froid. Pour la machine froide ClimateWell le dimensionnement est déjà fait puis qu'il donne le débit du circuit de refroidissement (15 l/mn) qu'il faut et les courbes de puissance de charge en fonction de la température du circuit de refroidissement.

Dans notre cas toutes les études se sont faites pour une température de 35°C. Il nous faut alors une source d'eau à une température dans la journée maximale de 35°C.

IV. Analyse Exergétique et Energétique théorique

L'exergie est une variable thermodynamique qui dépend non seulement du système étudié, mais aussi de son milieu extérieur.

L'exergie se définit comme le travail utile maximal qui peut être produit en théorie par le système se trouvant dans un état donné et dans un milieu donné. Elle peut être transmise sous forme de chaleur, du travail et d'écoulement d'un fluide [14]. Les pertes de potentiel à produire du travail sont dues aux irréversibilités produites (production d'entropie) au cours de l'évolution du système. Ce potentiel perdu est appelé exergie détruite.

Une analyse exergétique permet donc de mettre en avant le potentiel à produire du travail du système global (ou de chacun de ses composants), afin d'optimiser au maximum le système en soulignant les pertes à diminuer si possible.

IV.1. Bilans sur le Groupe électrogène seul

Pour simplifier l'étude, nous assimilerons le groupe électrogène à un moteur thermique fonctionnant entre deux sources de températures (Figure 14). La source chaude représentera la température de la chambre de combustion (T_{comb}) et la source froide la température ambiante (T_a).

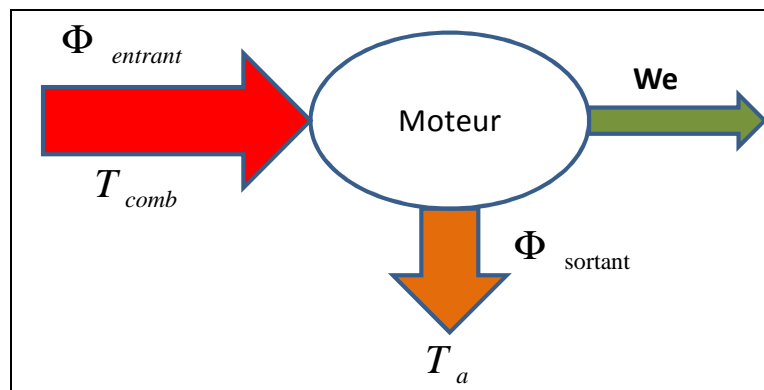


Figure 14: Schéma moteur thermique

IV.1.1. Bilan énergétique théorique

La puissance chaude à l'entrée du groupe est donnée par :

$$\Phi_{entrant} = C \times D \times PCI_{gaz-oil} \quad (8)$$

- $C=2,5$ l/h : la consommation en gaz-oil par heure de fonctionnement à 80% de charge
- $D = 840 \text{ kg/m}^3$: la densité du gaz-oil
- $PCI_{gaz-oil} = 11,62 \text{ kWh/kg}$ le pouvoir calorifique inférieur du gaz-oil.

Application numérique: $\Phi_{entrant} = 2,5 \times 840 \times 11620 = 24402 \text{ W}$

Le premier principe de la thermodynamique nous permet d'écrire :

$$\Phi_{\text{sortant}} = \Phi_{\text{entrant}} - W_e \quad (9)$$

- $W_e = 7200 \text{ W}$: la puissance électrique pour un fonctionnement à 80% de charge

Application numérique: $\Phi_{\text{sortant}} = 24402 - 7200 = \mathbf{17202W}$

➤ A partir de l'équation (1) et (2) nous pouvons en sortir le tableau suivant :

Tableau 1: Bilan énergétique théorique du groupe électrogène

| Φ_{entrant} | Φ_{sortant} | W_e | η_{en} |
|-------------------------|-------------------------|-------|--------------------|
| 24402W | 17202W | 7200W | 30% |

IV.1.2. Bilan exergetique théorique

Le second principe de la thermodynamique nous permet d'écrire [14] :

$$\frac{\Phi_{\text{entrant}}}{T_{\text{comb}}} - \frac{\Phi_{\text{sortant}}}{T_a} + S_{\text{généré}} = 0 \quad (10)$$

- $T_a = 35^\circ\text{C}$ la température ambiante
- $T_{\text{comb}} = 700 \text{ K}$ la température dans la chambre de combustion
- $S_{\text{généré}}$ représente la génération d'entropie due aux irréversibilités du système

Application numérique : $S_{\text{généré}} = \frac{17202}{308} - \frac{24402}{700} = \mathbf{21W/K}$

Les premier et second principes nous permettent d'introduire la notion d'exergie exprimée par l'équation 11 :

$$Ex = \Phi_{\text{entrant}} \times \left(1 - \frac{T_a}{T_{\text{combustion}}}\right) = W_e + Ex_d \quad (11)$$

Soit :

$$\Phi_{\text{entrant}} \times \left(1 - \frac{T_a}{T_{\text{combustion}}}\right) - W_e - Ex_d = 0 \quad (11')$$

- Ex représente l'exergie consommée
- Ex_d représente l'exergie détruite

Application numérique: $Ex_d = 24402 \times \left(1 - \frac{308}{700}\right) - 7200 = \mathbf{6465W}$

Nous pouvons aussi poser :

$$Ex_d = T_a \times S_{\text{généré}} \quad (12)$$

Application numérique: $Ex_d = 308 \times 20.99 = \mathbf{6465 W}$

A partir de l'équation (3) et (5) nous pouvons en sortir le tableau suivant :

Tableau 2: Bilan exergetique groupe électrogène seul

| $\Phi_{entrant}$ | θ_{comb} | W_e | T_{comb} | T_a | Ex_c | Ex_u | Ex_d | η_{ex} |
|------------------|-----------------|--------|------------|-------|--------|--------|--------|-------------|
| 24402 W | 0,56 | 7200 W | 700 K | 308 K | 13655W | 7200W | 6465W | 53% |

Les pertes au niveau des gaz d'échappement et du radiateur s'expriment par :

$$Ex_d = Ex_{d\ échappement} + Ex_{d\ radiateur} \tag{13}$$

Avec

$$Ex_{d\ radiateur} = \Phi_{radiateur} \left(1 - \frac{T_a}{T_i}\right) \tag{14}$$

- $\Phi_{radiateur} = \Phi_1 = 7445\ W$ d'après l'équation (1)

Application numérique : $Ex_{d\ radiateur} = 4169\ W$

Avec l'équation (7) nous déduisons l'exergie détruite dans le gaz d'échappement

Application numérique: $Ex_{d\ échappement} = 6445 - 4169 = 2275\ W$

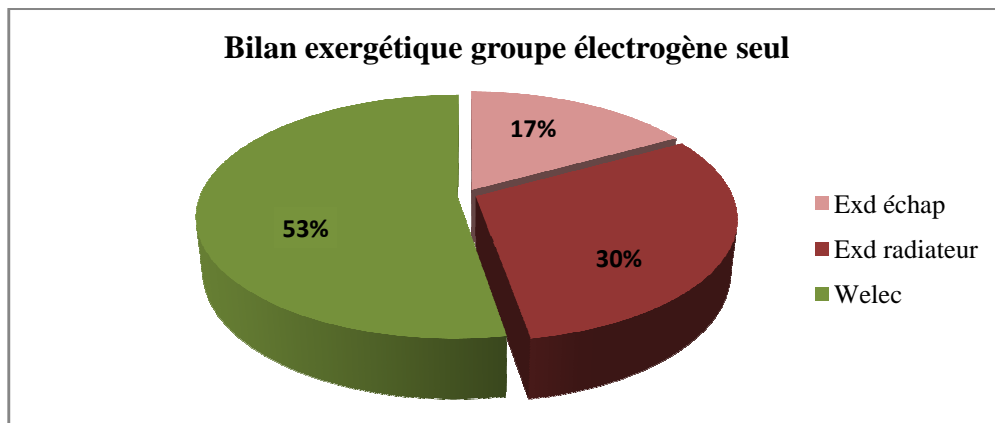


Figure 15: Bilan exergetique groupe électrogène

IV.2. Bilans sur la machine à absorption seule

IV.2.1. Efficacité théorique du système

L'efficacité du système (η) est définie comme étant le rapport du coefficient de performance (COP) sur le coefficient de performance de Carnot (COP_c) [15]

$$\eta_{eff} = \frac{COP}{COP_c} \tag{15}$$

Le coefficient de performance de Carnot (COP_c) est l'efficacité maximale que peut atteindre notre système à absorption. Il est donné par la relation suivante [16]:

$$COP_c = \left(\frac{T_g - T_a}{T_g} \right) \times \left(\frac{T_e}{T_a - T_e} \right) \quad (16)$$

- T_g température au générateur
- T_e température à l'évaporateur
- T_a température ambiante

D'après notre dimensionnement théorique nous connaissons $\Phi_g = 6045 \text{ W}$ et $T_g = 69^\circ\text{CT}$. Φ_e et T_e sont obtenues à partir des courbes en annexe 4. Choisissons une température froide (T_e) de 9°C (supérieure à la température de conservation des produits agricoles comme la pomme de terre [17]) pour la suite de l'étude. A 9°C nous avons une puissance froid (Φ_e) d'environ 3kW_f . Nous obtenons avec la formule (16) le COP de Carnot de la machine froid

$$COP_c = \frac{342 - 308}{342} * \frac{282}{308 - 282}$$

$$COP_c = 1,078$$

Le COP de la machine froid étant de 0,68 nous déduisons avec la formule (15) son efficacité.

$$\text{Application numérique : } \eta_{\text{eff}} = \frac{0,68}{1,078}$$

$$\eta_{\text{eff}} = 63\%$$

IV.2.2. Analyse exergetique de la machine froid

Le rendement exergetique d'une machine à absorption est donné par la formule suivante :

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{\Phi_e \left(\frac{T_a}{T_e} - 1 \right)}{\Phi_g \left(1 - \frac{T_a}{T_g} \right)} \quad (17)$$

Cette formule est utilisée pour des systèmes à absorption ne possédant pas d'accumulateur d'énergie interne c'est-à-dire pour un système qui consomme l'énergie thermique et produit le froid en même temps. Or la machine à absorption Climatewell possède un système de stockage d'énergie chimique interne. La puissance de charge est indépendante de celle de décharge.

Pour les bilans énergétique et exergetique nous allons considérer un cycle complet (charge / décharge)

Il est donc nécessaire de ramener les puissances précédentes à des puissances moyennes sur un cycle.

➤ Calcul du temps d'un cycle

Le temps de fonctionnement d'un cycle est la somme du temps de charge et du temps de décharge. $t_{cycle} =: t_{charge} + t_{décharge}$.

Les temps de charge et décharge sont donnés par les formules suivantes :

$$t_{charge} = \frac{E_{stock}}{Q_g} \quad (18.1)$$

$$t_{décharge} = \frac{E_{déstock}}{Q_e} \quad (18.2)$$

- $E_{stock1} = 44kWh$ énergie chimique stockée dans un baril
- $\Phi_g = 6045W$ la puissance thermique de charge
- $E_{déstock} = 29920 Wh$: l'énergie frigorifique générée par le stockage des 44kWh en appliquant le COP de 0.68 de la machine froid
- $\Phi_e = 3000W$ la puissance thermique de décharge

Analyse numérique : $t_{charge} = \frac{44000}{6045} = 7h\ 18mn$ $t_{décharge} = \frac{29920}{3000} = 10h$

Le temps d'un cycle est alors : $t_{cycle} = 10\ h + 7h18mn$. Le temps nécessaire de fonctionnement pour un cycle est de 17 h 17mn.

➤ Puissance moyenne de charge et de décharge

Les puissances moyennes sont obtenues avec les formules suivantes :

- La puissance moyenne de charge $\Phi_{gm} = \frac{\Phi_g * t_{charge}}{t_{cycle}}$
- La puissance moyenne de décharge $\Phi_{em} = \frac{\Phi_e * t_{décharge}}{t_{cycle}}$

Ce qui nous donne une puissance moyenne de charge et de décharge respective de 2550 W et 1734 W.

Analyse numérique : $\eta_{ex} = \frac{1734 \times [3^{08}/282 - 1]}{2550 \times [1 - 3^{08}/346]} = \mathbf{0,63}$

$$\eta_{ex} = \mathbf{0,63}$$

Le rendement exergetique d'une machine frigorifique tritherme est aussi égal au rendement théorique de la machine [16]. Ce qui confirme l'égalité des deux études précédentes

Mais le rendement exergetique calculé correspond à une application donnée. C'est-à-dire que si on change la température de décharge le rendement exergetique varie. Pour une étude plus large la courbe suivante donne l'évolution du rendement exergetique en fonction de la température à l'évaporateur.

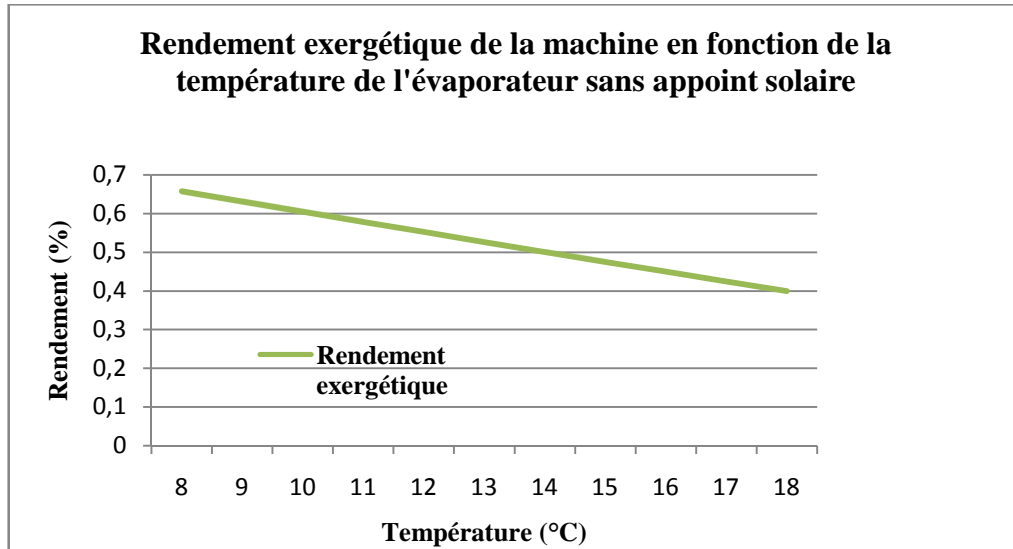


Figure 16:Rendement exergetique de la machine à absorption en fonction de la temperature de l'evaporateur

Nous pouvons en conclure que le rendement exergetique de la machine froid tend vers 70% environ.

IV.3. Analyse théorique du système de cogénération sans appoint solaire

IV.3.1.Bilan énergétique théorique :

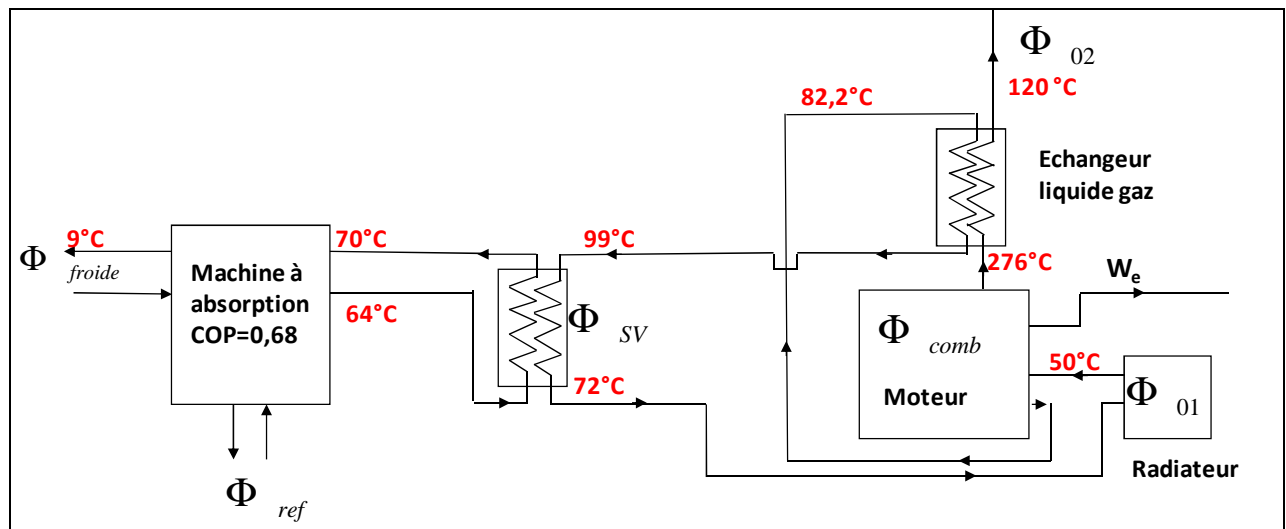


Figure 17: Système de cogénération (électricité et froid)

Pour notre système (figure 17), l'énergie consommée est l'énergie de combustion dans la chambre de combustion du bloc moteur. Les énergies utiles sont de deux natures : électrique et thermique. La puissance calorifique dans la chambre de combustion est 24402 W et génère une puissance électrique est de 7200W et la puissance thermique valorisable de 6045 W.

De même que l'étude précédente toutes ces puissances seront ramenées à des puissances moyennes pour un cycle donné :

- Temps de charge 7h 18mn
- Temps de décharger 10 h
- Temps d'un cycle 17h17mn

Tableau 3: Bilan énergétique théorique du système de cogénération sans appoint solaire

| $\Phi_{entrant.moy}$ (W) | $W_{e.moy}$ (W) | $\Phi_{froide.moy}$ (W) | η_{en} |
|--------------------------|-----------------|-------------------------|-------------|
| 10295 | 3038 | 1734 | 46 % |

IV.3.2. Bilan exergetique théorique :

En combinant toujours le premier et le second principe de la thermodynamique, l'équation générale du bilan exergetique est [14] :

$$\Phi_{entrant} \cdot \theta_{comb} + \Phi_{froide} \cdot \theta_{froide} + \Phi_{01} \cdot \theta_{01} + \Phi_{02} \cdot \theta_{02} + \Phi_{ref} \cdot \theta_{ref} + W_e = Ex_d \tag{19}$$

Avec $\theta_i = 1 - \frac{T_a}{T_i}$ **le coefficient de Carnot**

- Pour notre système les puissances Φ_{01} , Φ_{02} et Φ_{ref} sont rejetées dans l'environnement à la température T_0 (35°C) donc $\theta_{01} = 0$, $\theta_{02} = 0$ et $\theta_{ref} = 0$.

L'équation (19) devient :

$$\Phi_{entrant} \cdot \theta_{comb} + \Phi_{froide} \cdot \theta_{froide} + W_e = Ex_d \tag{20}$$

Nous pouvons dresser le tableau bilan suivant :

Tableau 4: Bilan exergetique théorique du système de cogénération sans appoint solaire

| $\Phi_{entrant.moy}$ (W) | θ_{comb} | $W_{e.moy}$ (W) | $\Phi_{froide.moy}$ (W) | | Ex_c (W) | Ex_u (W) | Ex_d (W) | η_{ex} |
|--------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------|------|------------|------------|------------|-------------|
| 10295 | 0,54 | 3038 | 1734 | 0,09 | 5584 | 3198 | 2386 | 57% |

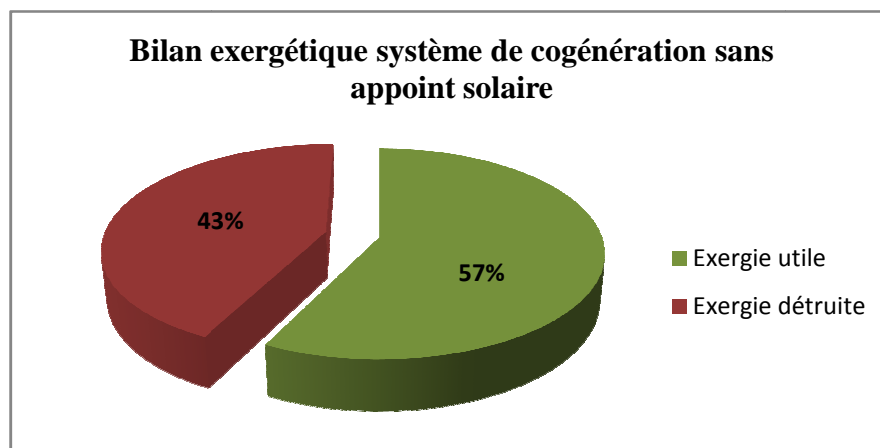


Figure 18: Bilan exergetique théorique du système de cogénération sans appoint solaire

IV.4. Analyse théorique du système de cogénération avec appoint solaire

IV.4.1. Bilan énergétique théorique

D'après notre dimensionnement, avec l'appoint solaire de 3692W nous pouvons avoir une puissance thermique de 9750 W à l'entrée de la machine froid. Dans ce cas de figure pour charger un baril de 44kWh le système doit fonctionner pendant 4h 31 mn. Pour la production de froid nous gardons les mêmes caractéristiques : 3000 W à la température de 9°C se déchargeant en 10 heures. Ce qui nous donne un temps de fonctionnement d'un cycle de 14h 31mn pour le système avec appoint solaire. Le tableau 5 présente le bilan énergétique du système considéré.

Tableau 5: Bilan énergétique théorique du système de cogénération avec appoint solaire

| $\Phi_{entrant.moy}$ (W) | $\Phi_{sol.moy}$ (W) | $W_{e.moy}$ (W) | $\Phi_{froide.moy}$ (W) | η_{en} |
|--------------------------|----------------------|-----------------|-------------------------|-------------|
| 7602 | 1154 | 2243 | 2065 | 49% |

IV.4.2. Bilan exergetique théorique

Nous prendrons la température à l'intérieur des panneaux égale à la moyenne entre la température de l'eau à l'entrée et à la sortie des panneaux :

$$\text{Analyse numérique} : T_{panneaux} = \frac{T_{sortie} + T_{entree}}{2} = \frac{75 + 73}{2} = 74 \text{ } ^\circ\text{C}$$

L'équation (19) devient :

$$\Phi_{entrant} \cdot \theta_{comb} + \Phi_{froide} \cdot \theta_{froide} + \Phi_{sol} \cdot \theta_{sol} + W_e = Ex_d \tag{21}$$

Nous pouvons dresser le tableau bilan suivant (toutes les puissances sont exprimées en W) :

Tableau 6: Bilan exergetique théorique du système de cogénération avec appoint solaire

| $\Phi_{entrant.moy}$ | θ_{comb} | | $\Phi_{sol.moy}$ | θ_{sol} | $\Phi_{froide.moy}$ | θ_{froide} | Ex_c | Ex_u | Ex_d | η_{ex} |
|----------------------|-----------------|------|------------------|----------------|---------------------|-------------------|--------|--------|--------|-------------|
| 7602 | 0,54 | 2243 | 1154 | 0,11 | 2066 | 0,09 | 4253 | 2434 | 1819 | 57% |

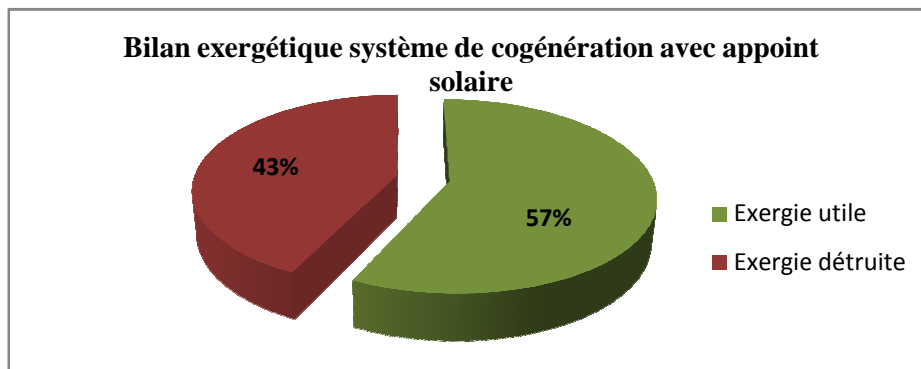


Figure 19: Bilan exergetique théorique du système de cogénération avec appoint solaire

IV.5. Comparaison et analyse des résultats

Le bilan énergétique sur le groupe électrogène nous a permis de confirmer le rendement de la machine thermique et de souligner les 70% de pertes sous forme thermique. Son analyse exergétique nous montre que ce travail perdu est plus important au niveau du radiateur.

L'étude exergétique de la machine froid nous a donné un rendement de 63 % pour une consigne de 9°C. Or comme nous l'avons vu (figure 16), le rendement exergétique est fonction de la température à l'évaporateur de la machine froid. La puissance froid étant à son tour proportionnelle à cette température, le rendement général de l'installation est donc lui aussi proportionnel à T_{froid} . Plus on décharge à une température élevée plus le rendement exergétique chute. Ce qui justifie que la température de 9°C en plus d'être adapté à la conservation des produits permet d'avoir un bon rendement exergétique.

L'analyse énergétique et exergétique du système de cogénération sans appoint solaire qui passent respectivement de 30% à 46% et de 53% à 57%, nous montrent clairement l'exploitation rationnelle de l'énergie primaire du groupe électrogène. L'unique problème pour ce système est que la température de 69°C à l'entrée de la machine ClimateWell est une valeur limite et admet un temps de charge de 7h 18 mn pour un baril ; ce qui est relativement long. D'où la nécessité d'ajouter un appoint solaire.

Avec l'appoint solaire le système devient plus intéressant. Premièrement, on augmente le rendement énergétique du système. Deuxièmement, il assure la différence de température minimale entre la source chaude et le circuit de refroidissement de la machine froid (normalement 50°C), comme vu précédemment. Enfin, il permet, en jouant aussi sur la température de la source chaude, de diminuer le temps de charge d'un baril de la machine froid.

V. MONTAGE DE L'INSTALLATION

Le système peut être décomposé en trois réseaux. Pour des raisons pratiques et économiques, les trois réseaux n'auront pas le même type de tuyauterie.

- Le premier réseau : groupe électrogène / échangeurs (tube flexible)
- Le second réseau : échangeurs/machine froid (tube galva)
- Le troisième réseau : machine froid/ château d'eau (tube PVC)

Dans ce qui suit nous étudierons ces trois réseaux.

V.1. Réseau groupe électrogène / échangeurs

Il s'agit ici de prendre le liquide de refroidissement du groupe électrogène entre la pompe de refoulement à la sortie du bloc moteur et l'entrée du radiateur. Le liquide faisant office de fluide caloporteur nous devons le faire traverser l'échangeur à gaz et l'échangeur à plaque, avant de le renvoyer en amont du radiateur. La figure 20 présente la configuration à suivre, en décomposant le réseau en 3 liaisons :

- 1^{ère} liaison : sortie moteur diesel entrée haut de l'échangeur des gaz d'échappement
- 2^{ème} liaison : sortie bas de l'échangeur des gaz d'échappement entrée de l'échangeur à plaques
- 3^{ème} liaison : sortie de l'échangeur à plaque entrée radiateur

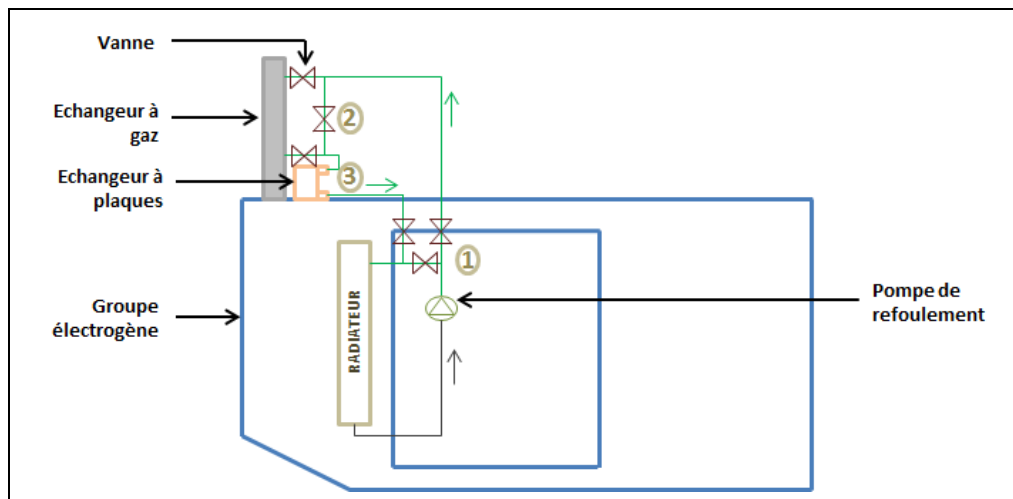


Figure 20: Esquisse du réseau groupe électrogène/ échangeurs

Pour ne pas percer de trou sur le groupe, les liaisons 1 et 3 passeront par l'orifice du haut anciennement utilisé pour ajouter l'eau de refroidissement au circuit. Cette partie devra être rendue étanche pour éviter que l'eau de pluie entre dans le groupe. Sur la figure 20 nous voyons bien l'intérêt d'utiliser des tubes non rigides. Les flexibles nous donneront une plus grande marge de manœuvre.

V.1.1. Montage de l'échangeur à plaques :

Afin de minimiser les pertes de charges dans le circuit, l'échangeur à plaque sera monté le plus près possible du radiateur. De plus nous devons minimiser au maximum les changements physiques du groupe (carrosserie, circuits des fluides etc....) Par conséquent, nous avons choisi de déposer l'échangeur sur la grille d'aspiration du radiateur (figure 20).

Afin de réduire les vibrations, l'échangeur sera encastré dans une structure métallique (boîte ouverte pour laisser la face de l'échangeur avec les sorties libres) qui limitera les mouvements de l'échangeur à l'aide de 4 butées. La structure sera vissée à la grille du radiateur sur le haut du groupe. Une épaisseur de quelques centimètres de mousse thermique est à prévoir entre l'échangeur et la structure métallique afin de l'isoler, car se trouvant sur la grille l'échangeur sera exposé à un débit d'air non négligeable ce qui pourrait le refroidir.

V.1.2. Montage de l'échangeur à gaz :

Sur la tuyauterie des gaz d'échappement juste à la sortie du silencieux, l'échangeur est monté horizontalement (hauteur de 40cm) où les gaz d'échappement traversent. Il est possible de rajouter le circuit d'échappement existant après l'échangeur si besoin est, notamment pour éjecter les fumées à une hauteur suffisante pour ne pas gêner le personnel.

V.1.3. Les vannes :

L'utilisation des vannes permet au système d'avoir une grande flexibilité de fonctionnement. Ainsi l'utilisation des 3 vannes montées comme indique la figure 22 nous permet d'avoir deux régimes de fonctionnement :

- Régime normal : les vannes 1 et 2 sont fermées, la 3 ouverte. Le liquide de refroidissement passe directement de la pompe au radiateur.
- Régime cogénération : les vannes 1 et 2 sont ouvertes, la 3 est fermée. Le liquide de refroidissement passe par les échangeurs.

De même à l'entrée et sortie de l'échangeur à gaz on place le même système de vannes (figure 21). Cela permet de by-passer l'échangeur, car cet échangeur risque de s'encrasser à cause des fumées. Avec ce procédé, le système pourra continuer de fonctionner en régime cogénération, même si l'échangeur est en maintenance, pour le nettoyage par exemple (Liaison 2).

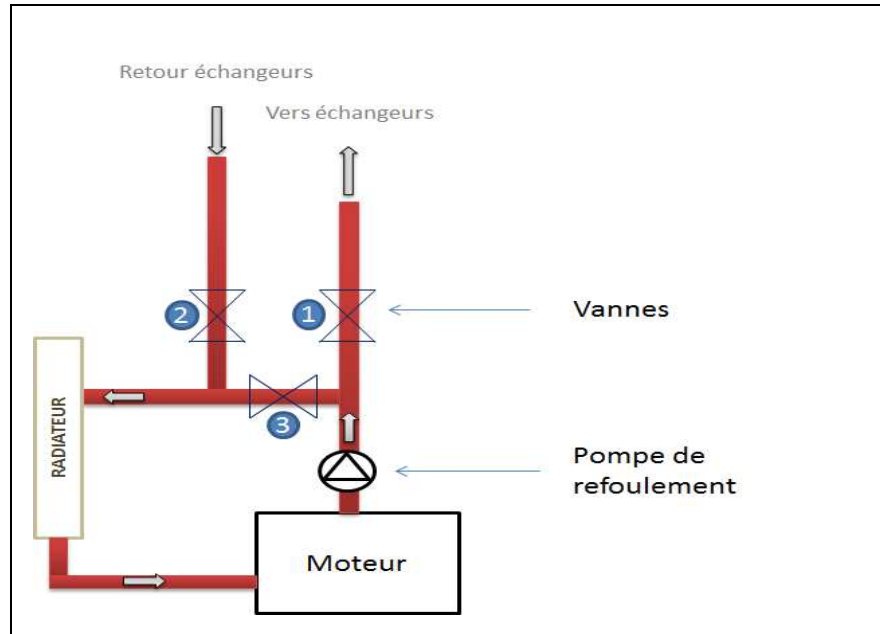


Figure 21: Système de vanne en sortie de pompe de refoulement (liaison 1)

V.2. Réseau échangeurs / machine froid

Concernant le réseau aller et retour du groupe froid, étant donné que ce dernier et le groupe électrogène ne sont pas dans le même bâtiment, le circuit ne devra pas être à hauteur d'homme pour faciliter les passages. La figure ci-dessous présente la configuration à suivre, en décomposant le réseau en 3 liaisons :

- 3^{ème} liaison : entrée et sortie échangeur à plaque
- 4^{ème} liaison : connexion appoint solaire
- 5^{ème} liaison : entrée et sortie machine froid

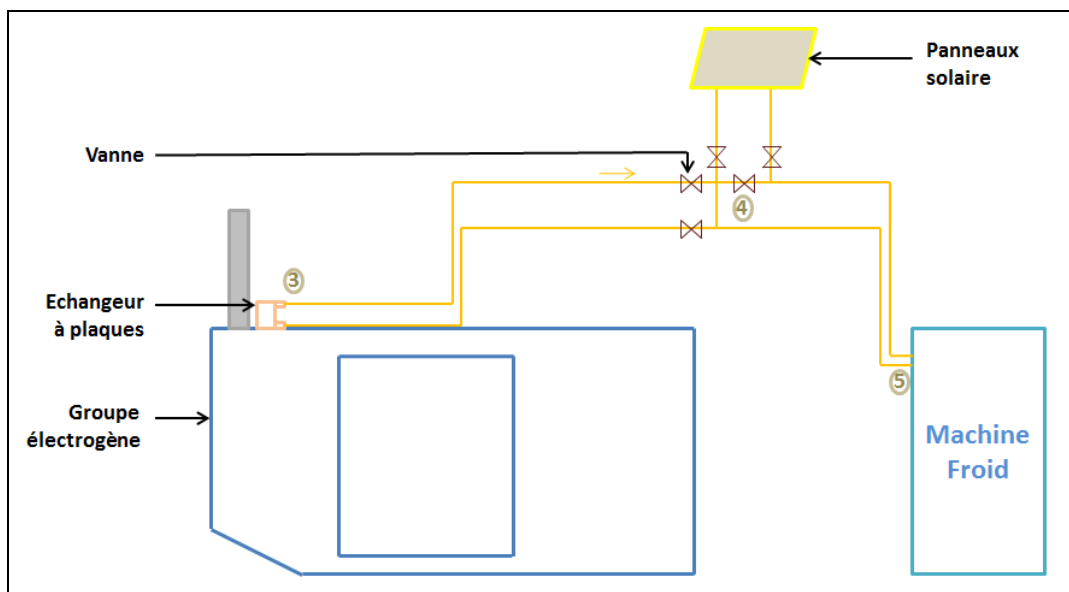


Figure 22: Esquisse du réseau groupe électrogène/machine frigo

V.3. Réseau château d'eau/ machine froid

Comme nous l'avons vu dans le second chapitre, la ClimateWell 10 a besoin de fonctionner avec une différence de température de 50°C entre la source thermique et la source de refroidissement. D'après nos calculs nous travaillerons à des températures dépassant 75°C, la température de la source chaude doit donc être d'environ 25°C. Le 2iE possède un puits d'eau. Actuellement elle sert à alimenter un château d'eau construit près de la source. Cette eau est à la bonne température (inférieure à 31°C) pour être utilisée comme fluide pour refroidir la ClimateWell 10. Nous nous brancherons donc sur le circuit d'alimentation du château pour ce dernier réseau.

La figure ci-dessous présente la configuration à suivre

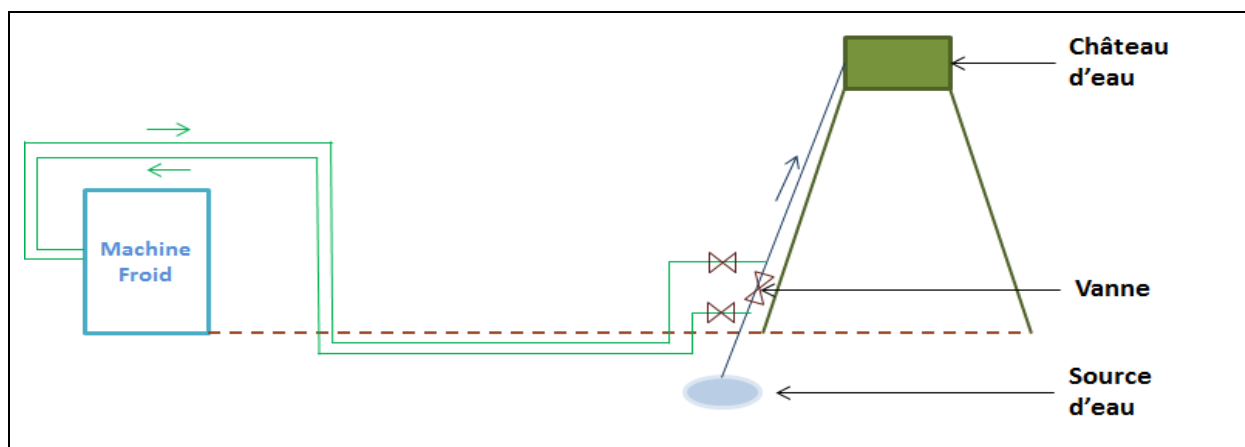


Figure 23: Esquisse du réseau château d'eau /machine frigo

Etant donné la distance entre la machine froid et le château d'eau, et cela pour des raisons de sécurité, la canalisation en PVC sera enterrée (la partie hachurée de la figure 24 représente le sol).

V.4. Montage pratique de l'installation

Le schéma suivant présent les détails sur la différente connexion des trois réseaux étudiés précédemment. Le bilan du matériel nécessaire est donné en annexe 9.

Sur ce schéma nous voyons bien que pour connecter une vanne et un thé il nous faut des mamelons. Les raccords sont utilisés pour les différentes connexions aux organes de l'installation tels que l'échangeur à gaz, l'échangeur à plaque, la machine froid ClimateWell, le château d'eau. Les adaptateurs sont utilisés pour assurer la connexion entre deux circuits de diamètres différents.

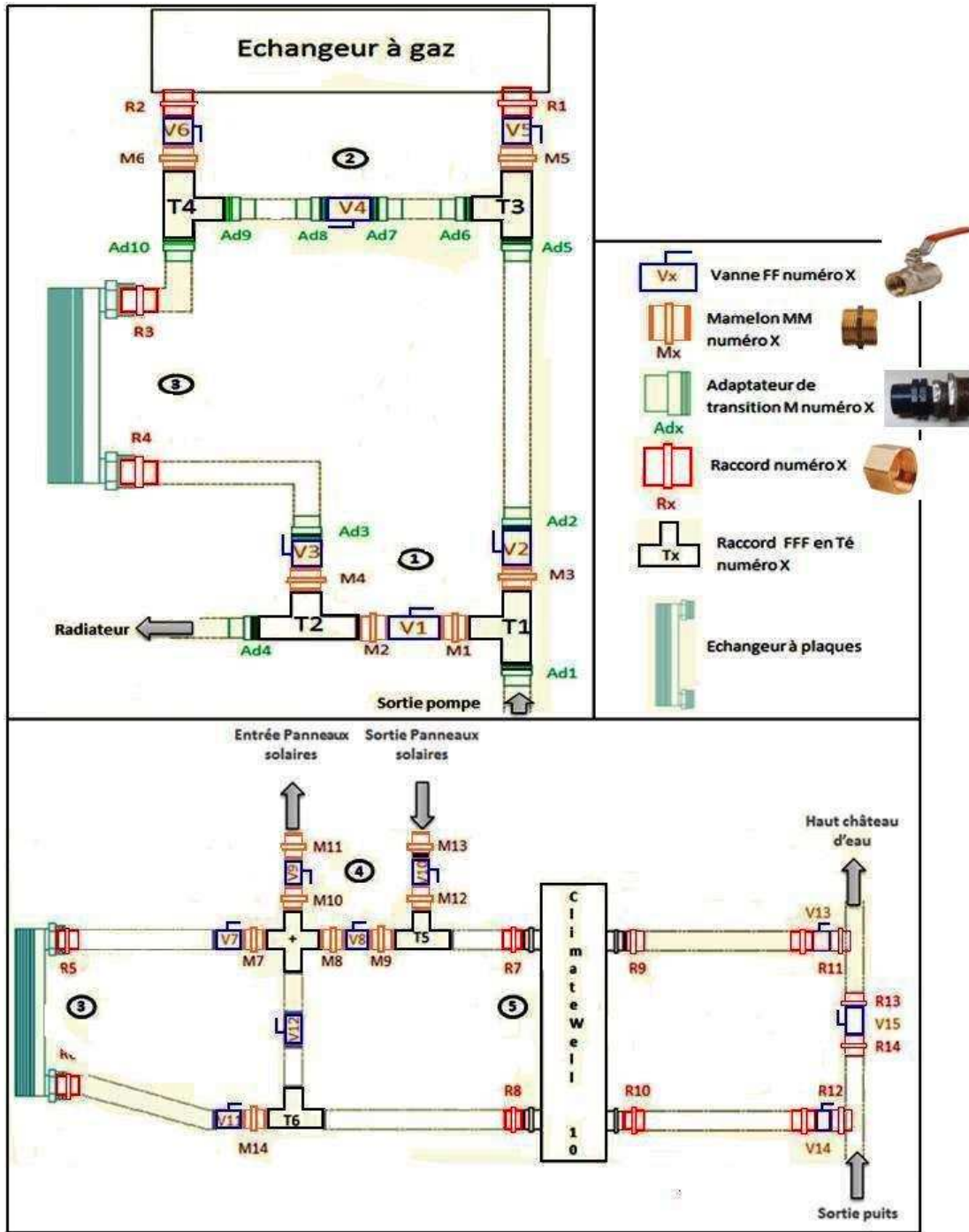


Figure 24: Schéma détaillé du montage de la partie froid de la cogénération

Afin de pouvoir réaliser notre étude énergétique et exergetique réelle, nous placerons sur le système plusieurs sondes de températures à des endroits stratégiques pour pouvoir étudier les échanges de température mis en jeu durant son fonctionnement. Il faut donc 6 sondes : 4 sur l'échangeur à plaque et 2 sur l'échangeur des gaz d'échappement, 1'autre est à prévoir en sortie des panneaux solaires. Les réseaux groupe électrogène / échangeurs et échangeurs / machine froid devront être remplis d'eau. A cet effet un orifice est prévu sur l'échangeur à gaz (point le plus haut du réseau) pour le premier réseau, et un autre sur le second réseau.

VI. ETUDE ECONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE

VI.1. Etude économique

Le projet de cogénération admet un bon rendement énergétique et est techniquement réalisable comme nous l'avons vu dans l'étude précédente. Mais quelle est sa valeur ajoutée sur le coût du kWh produit ? Pour répondre à cette question nous allons calculer le coût de production total et les énergies produites sur une durée de 20 ans de notre installation et le comparer à celui du système hybride sur la même durée de vie.

❖ **Les hypothèses de calcul sont les suivantes [3] :**

- **Générateur Diesel (DG)**

| | |
|---------------------------------|-------------------------------------|
| 9,2 kW DG coût investissement | 7425 € |
| Coût du gaz-oil | 0,92 €/l |
| Coût de la maintenance annuelle | 0,18* Temps de fonctionnement du DG |
| Valeur résiduelle | 10% du coût d'investissement du DG |
| Durée de vie | 10 ans |

- **PV système**

| | |
|---------------------------------|---------------------------------------|
| 2,85 kWc Coût d'investissement | 21200 € |
| Coût de la maintenance annuelle | 3% du coût d'investissement annualisé |
| Valeur résiduelle | 10% du coût d'investissement |
| Durée de vie | 20 ans |

- **Capteurs solaire plan**

| | |
|---------------------------------|---------------------------------------|
| 3,7kW Coût d'investissement | 6200 € |
| Valeur résiduelle | 10% du coût d'investissement |
| Coût de la maintenance annuelle | 3% du coût d'investissement annualisé |
| Durée de vie | 20 ans |

- **Machine à absorption**

| | |
|--------------------------------|---------------------------------------|
| 2-10 kWf Coût d'investissement | 10000 € |
| Coût de la maintenance | 3% du coût d'investissement annualisé |
| Valeur résiduelle | 10% du coût d'investissement |
| Durée de vie | 20 ans |

- La consommation du groupe est de 2,5l/ h en fonctionnement nominale et on admet un temps de fonctionnement de 10 heures par jour.

- La production du champ PV est estimée à 15kWh/jour en moyenne.
 - Le groupe froid Climatewell en 10 heures de fonctionnement produit 66 kWh froid.
 - Pour additionner les énergies produites l'énergie frigorifique sera convertie en énergie électrique consommée par un climatiseur à compression de COP=2,5.
- ❖ Coût de l'énergie produite par le système sur une durée de vie de 20ans
- En tenant compte des hypothèses suivantes, nous pouvons dresser les tableaux suivants :

Tableau 7: Coût du système hybride PV/Diesel sur une durée de vie de 20 ans

| | Générateur Diesel | Système PV | Total |
|-----------------------------------|----------------------|---------------|-----------|
| Investissement initial (€) | 7425 | 21200 | |
| Coût de fonctionnement annuel (€) | 8395 | 0 | |
| Coût de maintenance annuel(€) | 425,65 | 31,8 | |
| Valeur résiduelle (€) | 742,5 | 2120 | |
| Coût de remplacement(€) | 7425 | 0 | |
| Coût total sur 20 ans (€) | | | 209493,96 |
| Energie produite sur 20 ans (kWh) | | | 635100 |

Tableau 8: Coût du système hybride Solaire PV/diesel de cogénération (électricité-froid) sur une durée de vie de 20 ans

| | Générateur Diesel | Système PV | Capteur Solaire plan | Machine froid | Total |
|-----------------------------------|----------------------|---------------|----------------------------|------------------|------------|
| Investissement initiale (€) | 7425 | 21200 | 6200 | 11500 | |
| Coût de fonctionnement annuel (€) | 8395 | 0 | 0 | 0 | |
| Coût de maintenance annuelle (€) | 425,65 | 31,8 | 9,3 | 17,25 | |
| Valeur résiduelle (€) | 742,5 | 2120 | 620 | 1150 | |
| Coût de remplacement (€) | 7425 | 0 | 0 | 0 | |
| Coût total sur 20 ans (€) | | | | | 225954,957 |
| Energie produite sur 20 ans (kWh) | | | | | 827820 |

❖ Calcul du cout du kWh produit

Des tableaux 8 et 9, on peut calculer le coût du kWh (C_{kWh}) produit des deux systèmes considérés.

$C_{kWh} = \frac{CT}{Ep}$ Avec CT : le coût total de production sur la durée de vie de 20 ans ;

Ep : l'énergie produite par le système sur une durée de vie de 20 ans.

Nous obtenons les valeurs suivantes :

- Système hybride Solaire PV /Diesel : $C_{kWh} = 0,330 \text{ €/kWh}$ soit 216,5 FCFA/kWh
- Système hybride solaire PV / diesel de cogénération: $C_{kWh} = 0,273 \text{ €/kWh}$ soit 179 FCFA/kWh

L'intégration de la partie production de froid au système hybride solaire PV/Diesel permet une réduction de 0,057 €/kWh soit 37,5 FCFA/kWh sur lecoût de production du kWh.

En rappel, l'étude a été faite pour un petit système (Groupe Diesel 11,5kVA, Champ PV 2,85 kWh, Capteur solaire 3,7 kW) mais nous avons pu obtenir une réduction de 17% sur le coût de production par rapport au système de production électrique seule. Ce qui représente un gain important et il est probable que cette réduction soit plus importante si la capacité du système est plus grande. En effet, plus le groupe diesel est grand, plus sa consommation spécifique diminue et ses rejets thermiques sont importants.

VI.2. Etude environnementale

Les avantages de la cogénération en plus de l'aspect économique est la réduction de la consommation d'énergie primaire donc de ses effets sur le réchauffement climatique.

Au Burkina 1kWh produit entraîne une émission d'environ 0,72kg CO₂ [8]. Ainsi pour une énergie électrique économisée de 6552,48 kWh/an par l'utilisation de la cogénération, le système évite une émission de 4,72 tonnes de CO₂ par an dans l'atmosphère. Le système avec l'appoint solaire permet d'éviter l'émission de 9304,5216 kWh soit 6,70 tonnes avec une économie de 9304,5216 kWh.

Si nous prenons en compte la production du champ PV de 15kWh en moyenne par jour, l'émission de CO₂ évité est de 3,94 tonnes par an.

En somme le système hybride solaire PV/diesel de cogénération (électricité et froid) permet d'éviter l'émission de 10,64 tonnes de CO₂ par an.

Certes le projet n'est pas éligible au crédit carbone (projets MDP conditionné par une économie minimum de $T_{eq}CO_2$) mais contribue à freiner l'impact des gaz à effet de serre sur la terre.

CONCLUSION

L'étude démontre que théoriquement il est possible et intéressant de récupérer les pertes thermiques du groupe électrogène afin d'alimenter une machine froid à absorption.

Pour un groupe électrogène de 11,5 kVA il est possible d'exploiter plus de 6 kW des pertes thermiques à 73 °C pour la production du froid. Cependant la température de cette source étant basse pour le fonctionnement optimum de la machine froid, un appoint solaire de 3,7 kW est nécessaire pour élever cette température et augmenter la puissance de la source chaude. Ainsi le système de cogénération pour la production d'électricité et de froid obtenu permet d'augmenter les rendements énergétique et exergetique du système initial. L'évolution de ses rendements entraîne un impact positif sur la réduction de la consommation des énergies primaires.

L'étude économique faite pour le système global système hybride solaire PV/Diesel de cogénération (électricité froid) sur une durée de vie de 20 ans montre qu'il est possible de réduire de 17% le coût du kWh produit du fait de l'intégration de la cogénération dans le système initial. L'objectif principal étant de proposer un accès à l'énergie aux zones rurales et périurbaines des pays subsahariens, en baissant le prix du kWh est théoriquement possible.

En plus de l'aspect économique, la cogénération en réduisant la consommation des énergies primaires fossiles contribue à limiter leur impact environnemental. Il est de même pour l'utilisation d'une machine frigorifique par absorption pour la production de froid en lieu et place d'un système à compression utilisant des fluides nocifs pour l'environnement.

Cependant le système reste à parfaire et les améliorations suivantes peuvent être proposées :

- ❖ Installer un diffuseur pour la production de froid dans le local à rafraichir
- ❖ Les échangeurs de chaleurs peuvent être améliorés avec des échangeurs de meilleure qualité et possédant des surfaces d'échanges plus importantes.
- ❖ Si l'installation se trouve proche d'un lac, il serait intéressant de travailler avec l'eau de celui-ci pour alimenter le circuit de refroidissement de la machine à absorption. En effet l'eau du lac sera plus fraîche que l'eau utilisée pour notre étude (environ 35°C) ce qui augmentera la puissance froid fournie par la machine. Dans notre cas on pourra utiliser l'eau des bassins des bans d'essais hydrauliques qui à température de 32 °C.
- ❖ Il est intéressant d'ajouter des électrovannes et des capteurs de température pour la commande du système via un poste sur place ou par télégestion. Il sera ainsi possible de proposer un système de maintenance fiable, puisqu'il sera possible de suivre l'installation 24 heures sur 24.

BIBLIOGRAPHIE

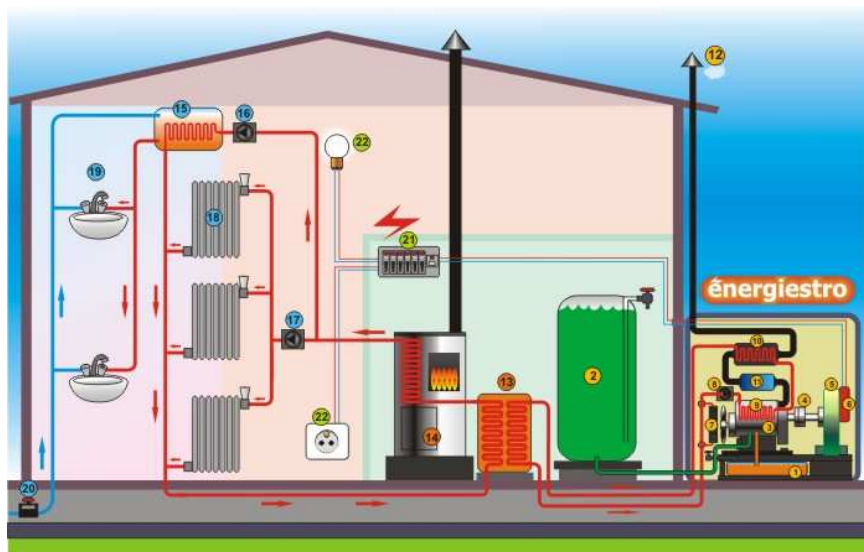
- [1] Mediaterrre. Electricité au cœur des défis Africains.<http://www.mediaterrre.org/afrique-ouest/actu,20101103192040.html>, visité en Mars 2010
- [2] Stoyanov L, Notton G, Lazarov V. Optimisation des systèmes multi-sources de production d'électricité à énergies renouvelables, Revue des Energies Renouvelables 10 (1), pp.1-18, 2007
- [3] Azoumah Y, Yamegueu D, Ginies P, Coulibaly Y, Girard P. Sustainable electricity generation for rural and peri-urban populations of sub-Saharan Africa: The "flexy-energy" concept. Energy Policy 39, pp.131–141, 2011
- [4] Yamegueu D , Azoumah Y, Py X, Zongo N . Experimental study of electricity generation by solar PV/diesel hybrid systems without battery storage for off-grid areas, Renewable Energy 36, pp.1780-1787,2011
- [5] Ingénieurs et scientifiques de France. La cogénération : des technologies éprouvées et performantes au développement encore trop limité en France, Juin 2010.
- [6] Dutry Power.<http://www.dutrypower.be/site-fr/vente/diesel.html>, visité en Mars 2011
- [7] Energistro. L'énergie la plus économique pour les sites isolés. http://www.energiestro.com/fr/fr_cogeneration.htm. visité en Mars 2011
- [8] Edith Verdurand. Etude pour la réalisation d'un prototype de climatisation solaire de petite puissance au Burkina Faso. Mémoire Université de Perpignan Via Domitia, 2010, pp.3-25
- [9] SDMO (2004) Manuel d'utilisation et d'entretien des groupes électrogènes, Aout.
- [10] Alfa Laval. Echangeur de chaleur à plaque brassées. B<http://annuaire.xpair.com/img/produits/410/fichetech.pdf>, visité en mai 2011
- [11] International Programme on Chemical Safety. Diesel fuel and exhaust emissions. World healthOrganisationGeneva,1996 . <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc171.htm>, visité en février 2011
- [12] Ametek Company. Control du point de rosé acide. Combustion & Environmental Monitoring. http://www.landinst.com/fr/combustion/telechargements/pdf/adm_fr.pdf
- [13] ClimateWell. Product description ClimateWell™10, www.climatewell.com, visité en mars 2011

- [14] Cengel, Boles, Lacroix. Thermodynamique : une approche pragmatique. Edition : France Vandal 2008
- [15] C M Lamine. Simulation et étude comparée de cycle à absorption (LiBr / H₂O) à usage de froid. Cas de l'unité de production de détergent Kenkel. . Mémoire Université de MENTOURI CONSTANTINE Algérie, 2010, p.21
- [16] Louis Possoz ; Rendement des cycles frigorifiques trithermes ; février 2010
- [17] Christian Ducattillon. La conservation des pommes de terre en 2006.
<http://www.carah.be/ResultatsDEssais/pommedeterre/pdf/conservation%20pdt.pdf>
- [18] Yassine AIT SI HAMMOU. Optimisation de la facture énergétique par l'amélioration du système de production d'énergie de la raffinerie Samir de Mohammedia (Morocco). Mémoire ingénieur d'état Université Ibn Zohr Agadir 2010.
http://www.memoireonline.com/09/10/3884/m_Optimisation-de-la-facture-energetique-par-lamelioration-du-systeme-de-production-denergie-de32.html

ANNEXE 1 : COGENERATION A PARTIR DE GROUPE ELECTROGENE PAR ENERGIESTRO

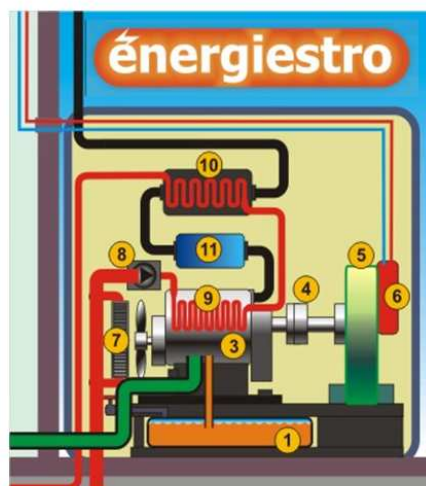
➤ La cogénération

En standard, le groupe ENERGIESTRO est prévu pour permettre la cogénération, par récupération de la chaleur dégagée par le moteur lors de la production d'électricité, selon le schéma ci-dessous :



Système de cogénération ENERGIESTRO 1

- (1)- Réservoir Fioul de Démarrage
- (2) - Réservoir Principal Huile Végétale
- (3) - Moteur
- (4) - Embrayage
- (5) - Volant Inertiel couplé à un alternateur stocke et produit de l'électricité
- (6) - Onduleur
- (7) - Radiateur
- (8) - Pompe
- (9) - Récupération de la chaleur du moteur
- (10) - Récupération de la chaleur des gaz d'échappement (option)
- (11) - Pot catalytique (option)
- (12) - Evacuation gaz froid
- (13) - Echangeur thermique
- (14) - Chaudière (Bois ou Fioul ou Huile)
- (15) - Ballon d'eau chaude sanitaire
- (16-17) - Pompes
- (18) - Radiateurs
- (19) - Sanitaires
- (20) - Arrivée générale eau
- (21) - Tableau de distribution d'électricité
- (22) - Eclairages, Appareils électroménagers



Le circuit de refroidissement du moteur comporte une dérivation qui permet d'envoyer le liquide de refroidissement vers un réservoir de chaleur situé dans le bâtiment, à partir duquel on obtiendra l'eau chaude sanitaire et le chauffage.

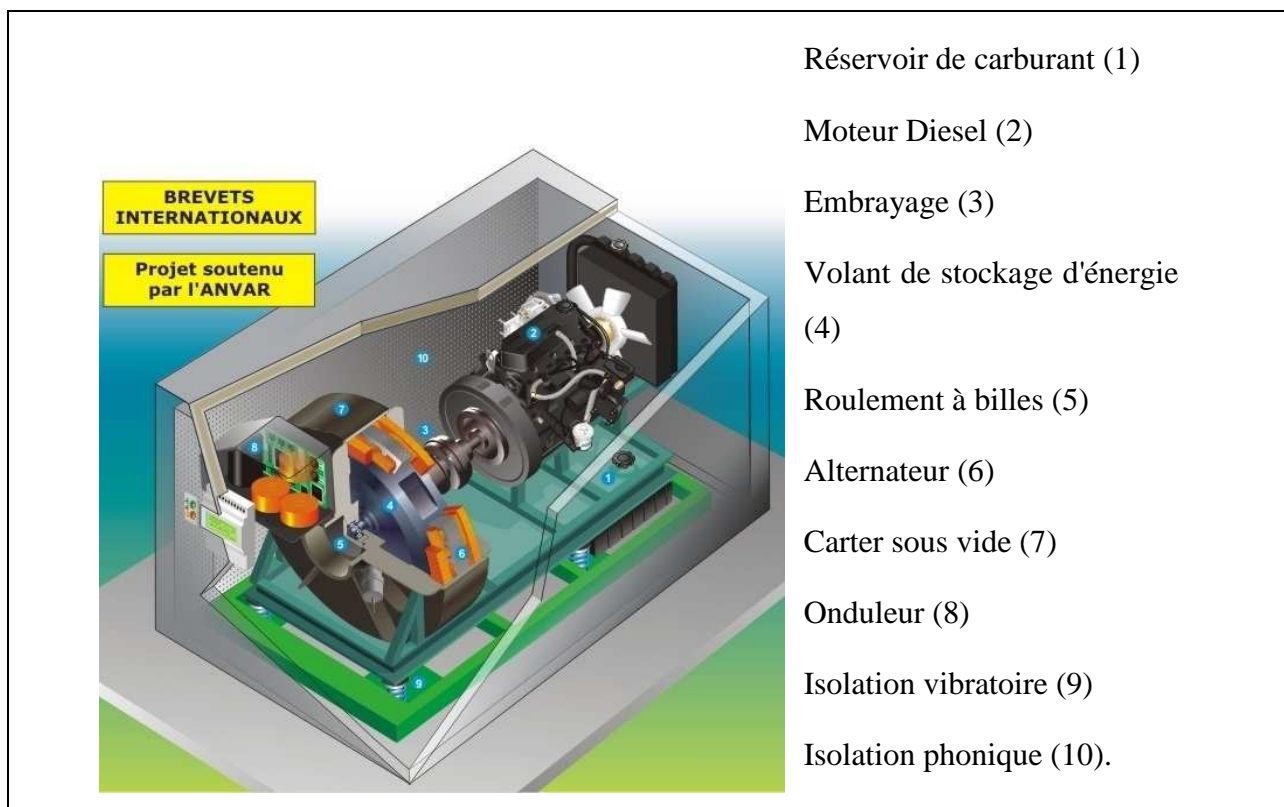
L'énergie thermique récupérée dans le liquide de refroidissement est sensiblement égale à l'énergie électrique produite. En résidentiel, cela permet de couvrir gratuitement les besoins d'eau chaude sanitaire. Quand le réservoir de chaleur est plein, la chaleur produite est classiquement dissipée par un radiateur.

En option un échangeur de chaleur permet de récupérer en plus de la chaleur des gaz d'échappement, ce qui double l'énergie thermique récupérée et fait monter le rendement à 90%.

En résidentiel, cela permet de couvrir gratuitement les besoins de chauffage d'une maison suffisamment bien isolée.

➤ Un groupe électrogène innovateur

Voici une représentation d'un groupe ENERGIESTRO :



Groupe Energiestro

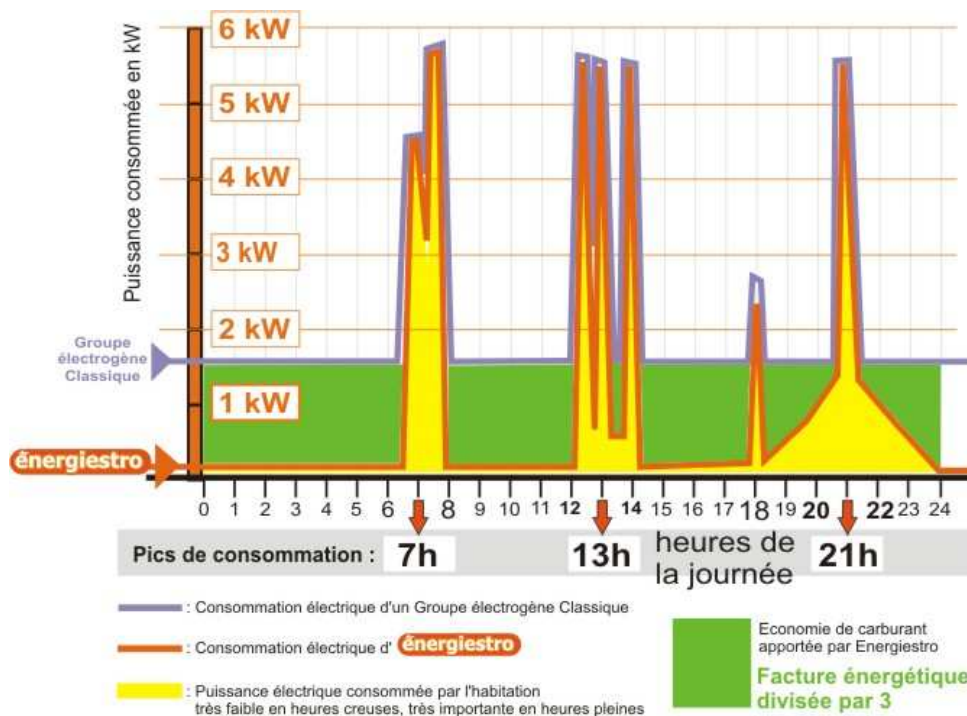
L'innovation sur le groupe réside dans la mise en place d'un volant alternateur. Le volant-alternateur se distingue par :

- sa capacité à stocker de l'énergie dans son rotor de grand diamètre ;

- ses pertes à vide extrêmement faibles.

La batterie souffre d'une durée de vie courte, ce qui oblige à la changer au minimum tous les cinq ans et qui conduit à un coût au kilowattheure élevé. Le volant a une durée de vie illimitée, ce qui évite tout entretien lourd et conduit à un prix au kilowattheure faible. Le volant a bien d'autres avantages : plus léger, insensible à la température et non polluant.

Le fonctionnement intermittent est naturel dans la plupart des applications, où la puissance nominale n'est utilisée que très rarement comme le présente la figure ci-dessous :



Courbe de puissance consommée dans une journée

La surface jaune ci-dessous montre la puissance électrique consommée en fonction de l'heure en application résidentielle : la puissance moyenne n'est que le dixième de la puissance nominale, et la plus grande partie du temps la puissance est très faible. Courbe orange : le groupe ENERGIESTRO, grâce au fonctionnement intermittent autorisé par son volant de stockage, ajuste sa consommation de carburant à la consommation d'électricité. Courbe bleue : le groupe électrogène classique à fonctionnement continu, lui, consomme 20 à 25% de sa consommation nominale quand la consommation d'électricité est très faible. La surface verte représente l'économie de carburant procurée par le groupe ENERGIESTRO : une division par trois !

La durée de vie est donc automatiquement multipliée par 10, son entretien 10 fois plus espacé, et sa consommation parasite (à faible charge) 10 fois plus faible. C'est ce qui rend le groupe ENERGIESTRO beaucoup plus économique qu'un groupe électrogène conventionnel.

ANNEXE 2 : MACHINE FROID A ABSORPTION :

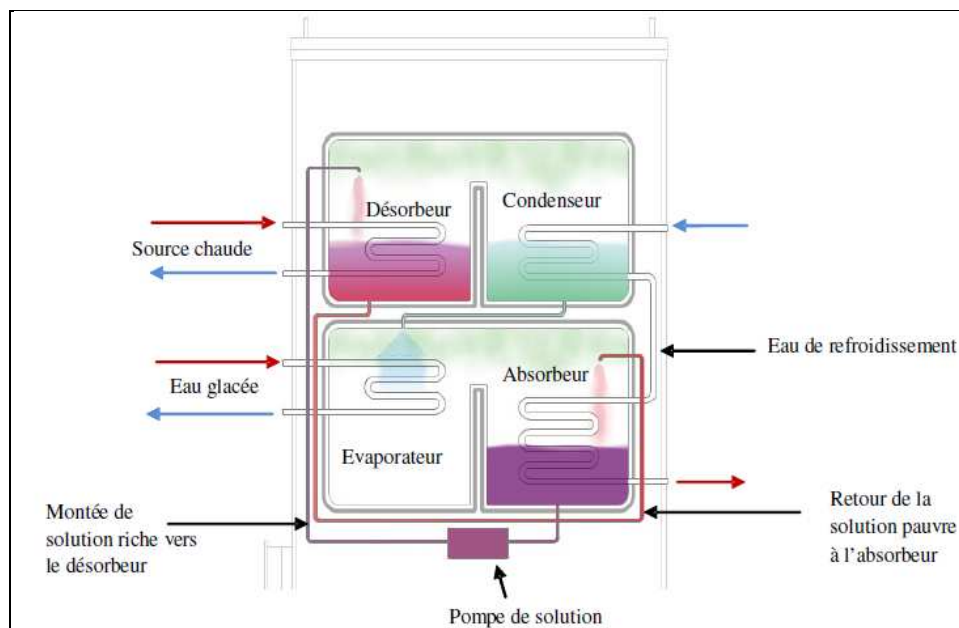
➤ Principe de fonctionnement

Les machines frigorifiques à absorption liquide fonctionnent grâce à la faculté de certains liquides d'absorber (réaction exothermique) et de désorber (réaction endothermique) une vapeur. Elles utilisent également le fait que la solubilité de cette vapeur dans le liquide dépend de la température et de la pression. Les installations à absorption fonctionnent sur la base d'un cycle thermodynamique, mais la compression, au lieu d'être mécanique, est de type thermochimique.

Deux couples de fluide de travail sont principalement utilisés :

- Eau + Bromure de Lithium ($H_2O/LiBr$), l'eau étant le fluide frigorigène,
- Ammoniac + Eau (NH_3/H_2O), l'ammoniac étant le fluide frigorigène.

La figure suivante montre les différents organes d'une machine à absorption :



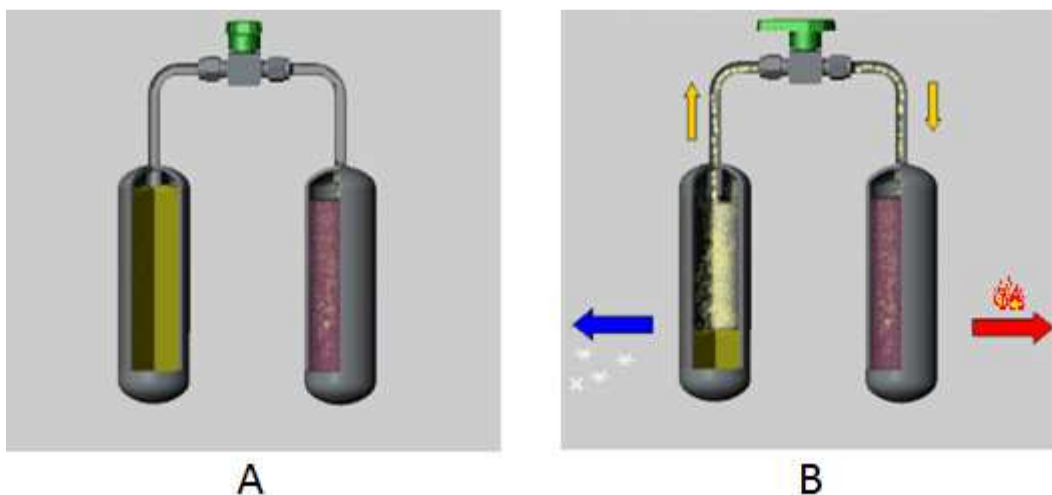
Principe machine à absorption

➤ Détail du cycle

Phase 1 : Production de froid et de chaleur

Ce procédé est basé sur la transformation par évaporation d'eau liquide en un gaz qui vient réagir avec des sels. Il est composé de deux éléments, un évaporateur, contenant de l'eau liquide et un réacteur, contenant les sels réactifs (chlorure de lithium – $LiCl$ pour la ClimateWell10). Dès l'ouverture de la vanne, l'eau emmagasinée dans l'évaporateur s'évapore, ce qui entraîne une

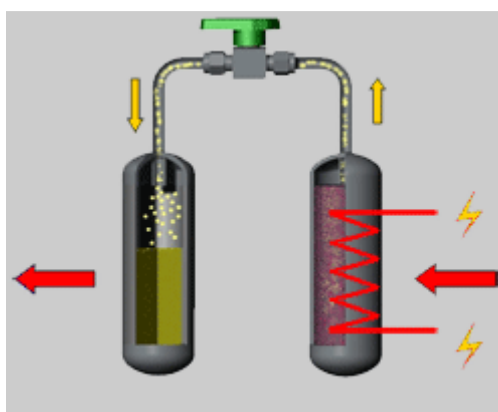
production de froid. L'eau gazeuse est fixée par les sels solides contenus dans le réacteur. La réaction provoque un dégagement de chaleur.



Ouverture de la vanne A - Absorption de la vapeur par les sels avec dégagement de chaleur B

Phase 2 : Régénération du système

Une fois la réserve d'eau épuisée, le système est rechargeable. C'est la phase 2. Le réacteur contient le solide dans lequel l'eau est piégée. Il suffit de lui apporter de la chaleur pour que la phase de rechargement démarre. Dans notre cas ce sont les pertes thermiques du groupe électrogène et l'appoint solaire qui provoquent la désorption de l'eau gazeuse qui vient se condenser dans l'évaporateur. A la fin de cette phase, le procédé peut alors entamer un nouveau cycle.

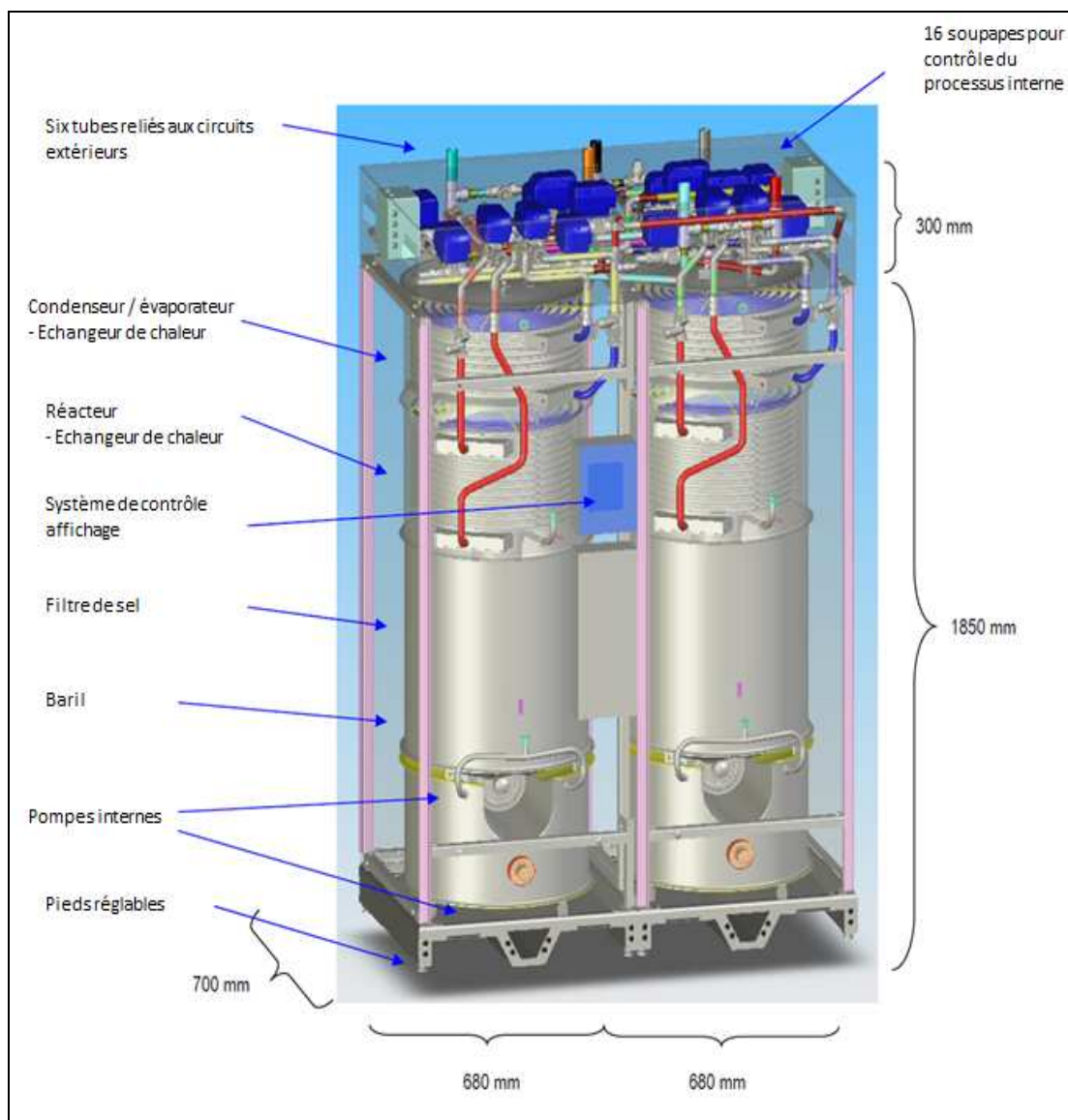


Régénération du système

ANNEXE 3 : LA CLIMATEWELL 10

Elle se différencie des autres machines de ce type par trois aspects principaux :

- Par sa capacité de stockage grâce aux deux accumulateurs. Il est important de souligner que cette énergie stockée est sous forme chimique non thermique. Cette énergie peut plus tard être employée pour le refroidissement ou le chauffage.
- Par son fonctionnement : elle peut fonctionner par intermittence avec deux accumulateurs parallèles (baril A et baril B). Chaque baril comporte un réacteur et un condenseur/évaporateur. Les deux barils peuvent fonctionner en parallèle.
- Elle est conçue pour être utilisée à des températures relativement basses et fonctionne également avec une température stable à l'intérieur des accumulateurs.



Vue en coupe de la ClimateWell 10

➤ Mode charge :

Le liquide chaud de la source thermique (groupe électrogène et solaire) circule dans l'échangeur de chaleur du réacteur de la machine froid. Pour le chargement, la température de la source thermique doit avoir une température supérieure à la température de refroidissement de 50°C.

La température maximum de chargement en continu est 95°C, mais des périodes de chauffes plus courtes (quelques minutes) à des températures plus élevées, jusqu'à 120 °C, sont possibles. Le débit du fluide caloporteur doit être au minimum de 15l/mn.

A usage normal, la commande de fonctionnement permet de charger un baril et de décharger l'autre en même temps. De cette façon la machine peut se charger et se décharger sans interruption.

Dès qu'un baril est entièrement chargé le système de commande se réoriente automatiquement vers le deuxième baril et commence à le charger. La température augmente graduellement et toute la période de commutation prend environ 10 minutes jusqu'à ce que le baril récemment chargé commence à fournir le refroidissement ou le chauffage. L'écoulement d'énergie dans le circuit de distribution et dans le circuit de la source thermique est continu. Environ 44 kWh sont exigés pour charger un baril.

En mode double les deux barils sont chargés et déchargés en même temps. Pendant le mode de décharge (refroidissement ou chauffage), la puissance est deux fois plus importante, mais il n'y a alors aucun refroidissement ou chauffage pendant le cycle de remplissage.

➤ Mode refroidissement

Le mode refroidissement fonctionne comme dans une machine à absorption classique (voir annexe 2).

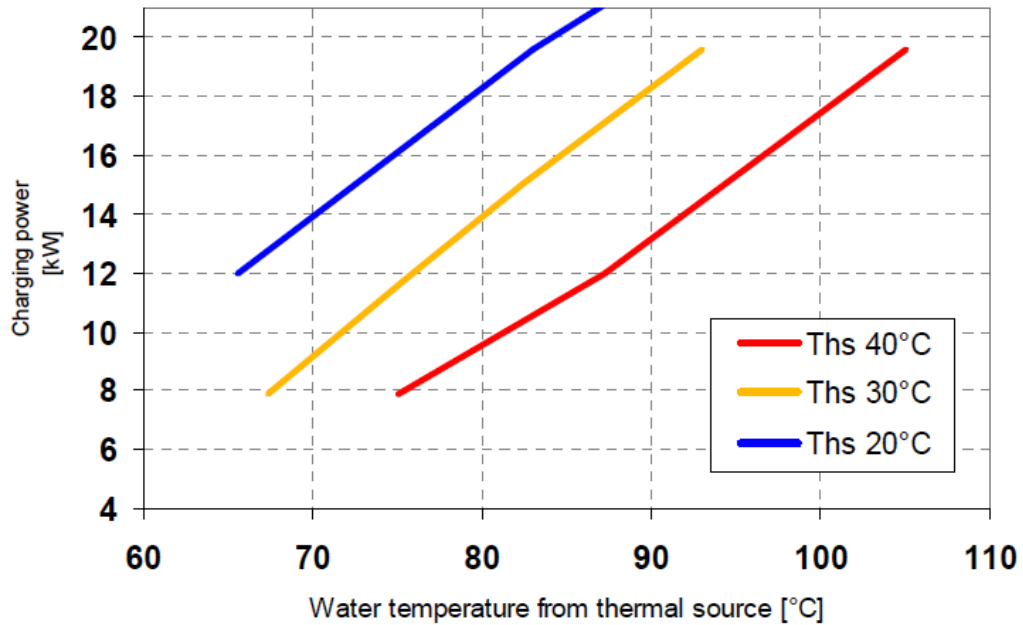
➤ Mode chauffage

Le chauffage est juste l'inverse du refroidissement. L'énergie chargée est extraite en tant que chauffage en reliant le condenseur/évaporateur au radiateur puis au système de distribution.

La source thermique peut naturellement être reliée directement au système de distribution et par conséquent peut fournir le chauffage sans passer par le groupe à absorption.

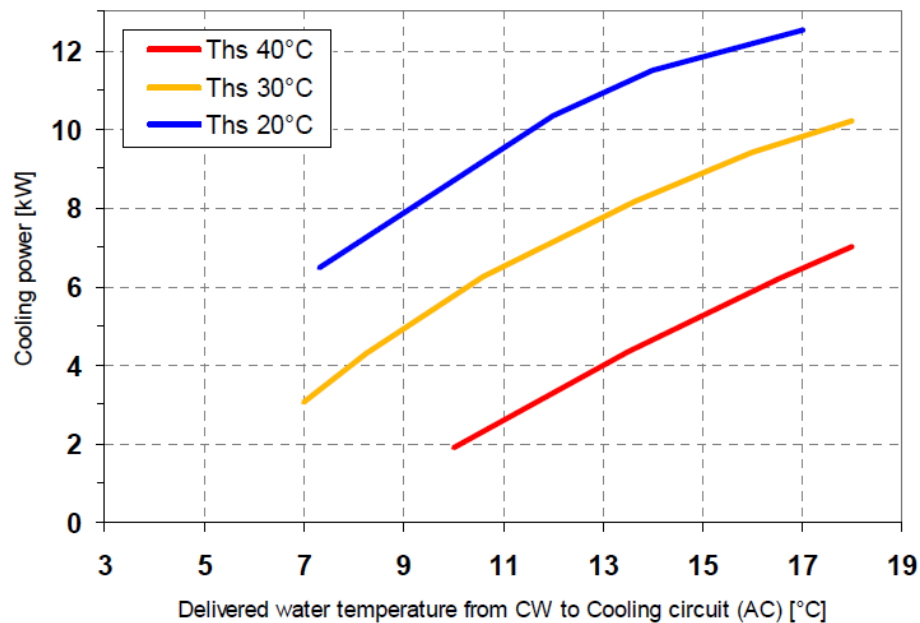
ANNEXE 4 : CATALOGUE FOURNISSEUR CLIMATEWELL

ClimateWell 10 charging performance



Puissance de chargement en fonction de la température de la source chaude

ClimateWell 10 Cooling performance



Puissance froid en fonction de la température froide de sortie

ANNEXE 5 : CATALOGUE FOURNISSEUR SDMO

ENGINE SPECIFICATIONS

| | | |
|-------------------|------------------------------------|--|
| STANDARD FEATURES | Manufacturer / Model | MITSUBISHI S3L2-SD , 4-strokes, Athmo , [N/A] 3 X |
| | Cylinder Arrangement | L |
| | Displacement | 1.31L [79.9C.I.] |
| | Bore and Stroke | 78mm [3.1in.] X 92mm [3.6in.] |
| | Compression ratio | 22 : 1 |
| | Rated RPM | 1500 Rpm |
| | Piston Speed | 4.6m/s [15.1ft./s] |
| | Max. stand by Power at rated RPM | 11.33kW [15BHP] |
| | Frequency regulation, steady state | +/- 2.5% |
| | BMEP | 6.24bar [90psi] |
| Governor : type | MECA | |
| EXHAUST SYSTEM | Exhaust temperature | 400°C [752°F] |
| | Exhaust gas flow | 36.5L/s [77cfm] |
| | Max back pressure | 700mm CE [28in. WG] |
| FUEL SYSTEM | 110% (Stand By power) | [N/A] |
| | 100% (of the Prime Power) | 3.1L/h [0.8gal/hr] |
| | 75% (of the Prime Power) | 2.5L/h [0.7gal/hr] |
| | 50% (of the Prime Power) | 2.1L/h [0.6gal/hr] |
| | Max. fuel pump flow | 18L/h [4.8gal/hr] |
| OIL SYSTEM | Total oil capacity w/filters | 4.2L [1.1gal] |
| | Oil Pressure low idle | 0.5bar [7.2psi] |
| | Oil Pressure rated RPM | 4bar [58.0psi] |
| | Oil consumption 100% load | 0.018L/h [0.005gal/hr] |
| | Oil capacity carter | 3.7L [1.0gal] |
| THERMAL BALANCE | Heat rejection to exhaust | 10kW [569Btu/mn] |
| | Radiated heat to ambient | 1kW [57Btu/mn] |
| | Heat rejection to coolant | 9.8kW [557Btu/mn] |
| AIR INTAKE | Max. intake restriction | 200mm CE [8in. WG] |
| | Engine air flow | 13.6L/s [29cfm] |
| COOLANT SYSTEM | Radiator & engine capacity | 4.2L [1.1gal] |
| | Max water temperature | 111°C [232°F] |
| | Outlet water temperature | 93°C [199°F] |
| | Fan power | 0.3 kW |
| | Fan air flow w/o restriction | 0.5m ³ /s [1060cfm] |
| | Available restriction on air flow | 10mm CE [0.4in. WG] |
| | Type of coolant | Gencool |
| | Thermostat | 82-95 °C |
| EMISSIONS LEVEL | PM | 80 mg/Nm ³ |
| | CO | 140 mg/Nm ³ |
| | Nox | 1500 mg/Nm ³ |
| | HC | 50 mg/Nm ³ |

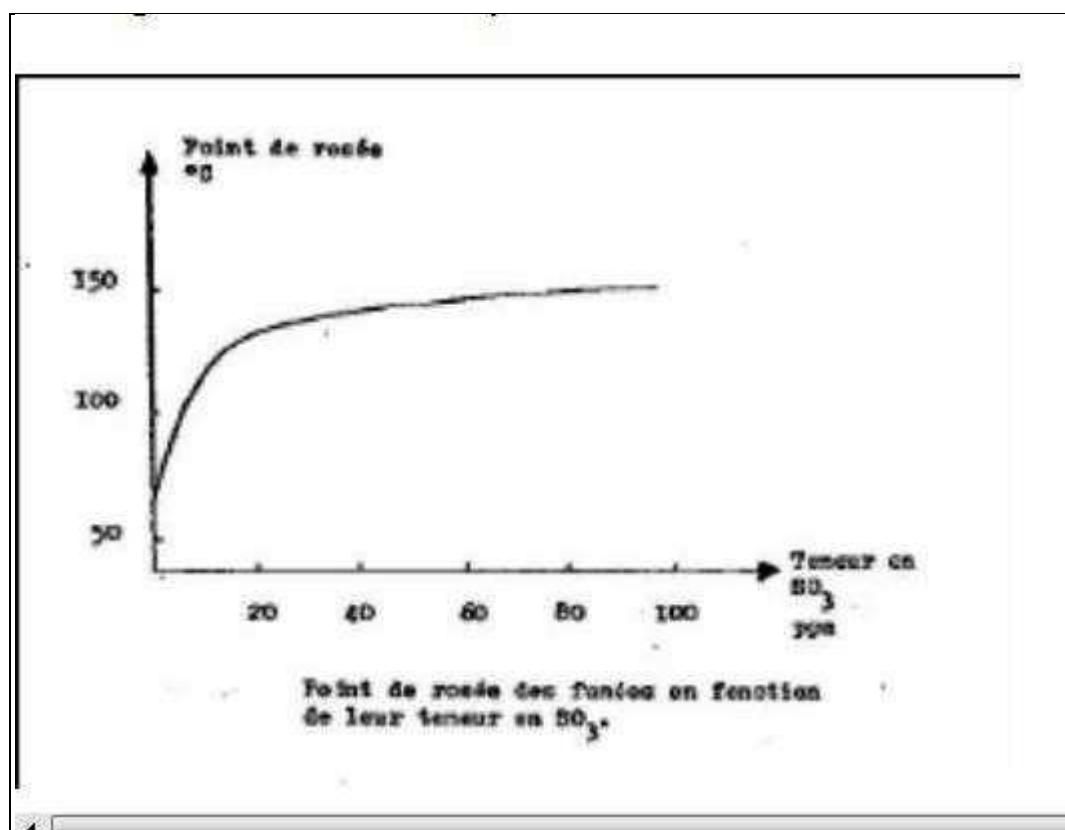
Fiche technique SDMO

ANNEXE 6 : COMPOSITION DES GAZ D'ÉCHAPPEMENT D'UN MOTEUR DIESEL

| Composition | Pourcentage (%) | Masse volumique (kg/m ³) | Cp (kJ/kg.K) |
|---------------------|-----------------|--------------------------------------|--------------|
| Dioxyde de carbone | 7,1 | 0,9625 | 1,05 |
| Vapeur d'eau | 2,6 | 0,4005 | 1,997 |
| Oxygène | 15 | 0,6998 | 0,988 |
| Azote | 75,2 | 0,6124 | 1,065 |
| Monoxyde de carbone | 0,03 | 0,61226 | 1,076 |
| Hydrocarbures | 0,007 | | |
| Oxyde d'azote | 0,03 | | |
| Hydrogène | 0,002 | 0,04407 | 14,53 |
| Dioxyde de soufre | 0,01 | | |
| Sulfate | 0,00016 | | |
| Aldéhydes | 0,0014 | | |
| Ammoniaque | 0,00005 | 0,37515 | 2,595 |
| Particules | 0,006 | | |
| Fumées | 99,99 | 0,64 | 1,08 |

Bilan du calcul de la masse volumique et la capacité calorifique des fumées

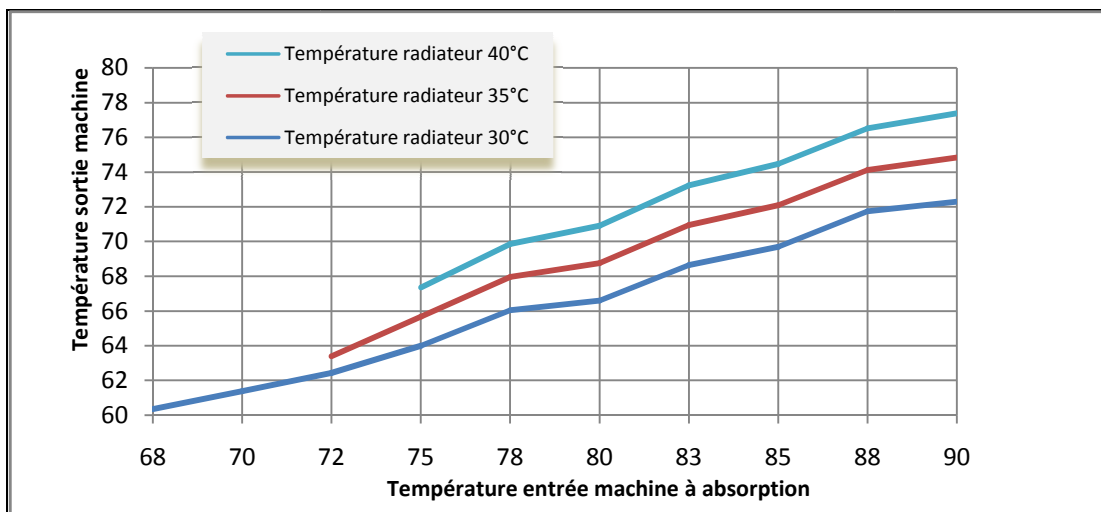
ANNEXE 7 : TEMPERATURE DE ROSE ACIDE EN FONCTION DE LA TENEUR EN SO3 DES FUMÉES [18]



Température de rosé en fonction de la teneur en SO_3 de la fumée

Annexe 8 : Influence de la température de refroidissement du radiateur

Annexe 8.1 : Variation de la température de sortie du groupe froid en fonction de la température d'entrée






Annexe 8.2 : Estimation de l'efficacité de l'échangeur liquide-liquide

| Température entrée chaud | Température sortie chaud | Puissance disponible | Température entrée froid | Température sortie froid | Efficacité |
|--------------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|--------------------------|------------|
| 99,5 | 64 | 8097 | 64 | 71,7 | 1 |
| 99,5 | 65 | 7869 | 64 | 71,5 | 0,97 |
| 99,5 | 66 | 7641 | 64 | 71,3 | 0,94 |
| 99,5 | 67 | 7413 | 64 | 71,1 | 0,92 |
| 99,5 | 68 | 7185 | 64 | 70,9 | 0,89 |
| 99,5 | 69 | 6957 | 64 | 70,7 | 0,86 |
| 99,5 | 70 | 6729 | 64 | 70,4 | 0,83 |
| 99,5 | 71 | 6501 | 64 | 70,2 | 0,80 |
| 99,5 | 72 | 6274 | 64 | 70,0 | 0,77 |
| 99,5 | 73 | 6046 | 64 | 69,8 | 0,75 |
| 99,5 | 74 | 5818 | 64 | 69,6 | 0,72 |
| 99,5 | 75 | 5590 | 64 | 69,3 | 0,69 |
| 99,5 | 76 | 5362 | 64 | 69,1 | 0,66 |

Variation de la température de sortie du groupe froid en fonction de la température d'entrée

ANNEXE 9 : BILAN MATERIEL

Le matériel nécessaire pour le montage du système est représenté dans le tableau qui suit :

| Nom | Représentation/Image | Appellation | Quantité |
|---|---|-------------|----------|
| Vanne FF 33/42 |  | V | 12 |
| Connexion en Té F 33/42 | | T | 6 |
| Connexion en croix F 33/42 | | + | 1 |
| Adaptateur de transition M 33/42 (tige $\Phi_{\text{ext}} = 32$) |  | Ad | 10 |
| Mamelon MM 33/33 |  | M | 12 |
| Mamelon FF 33/42 |  | F | 6 |
| Coude 33/42 | | | 12 |
| Tube flexible 33 | | | 2 m |
| Tube galva 33/42 | | | 15 m |
| Tube PVC | | | 115 m |
| Sonde de température | | | 6 |
| Attache murale | | | 10 |
| Attache sur lumière | | | 2 |

