Rapport annuel 2003, 8 décembre 2003

Solar Power System SPS
Projet d'une mini-centrale pilote électro-thermo-solaire de 10 kWe
Phase 5

Auteur et coauteurs	Pierre-Alain Giroud, Benoit Gay, Daniel Favrat
Institution mandatée	Laboratoire d'énergétique industrielle EPFL
Adresse	LENI – ISE – STI Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, EPFL 1015 Lausanne, Suisse
Téléphone, e-mail, site Internet	+41 (0)21 693 3505, pierre-alain.giroud@a3.epfl.ch, leniwww.epfl.ch
N° projet / n° contrat OFEN	2618/150260
Activités du projet 2003	Projet total du 1er juin 2002 – 31 mai 2004

RÉSUMÉ

Le principe de fonctionnement de la centrale solaire hybride a été prouvé durant l'été 2001 par la production des premiers kilowattheures solaires thermiques en Suisse. La centrale est composée de deux cycles à fluides organiques et turbines scroll hermétiques connectés ou non à un moteur. Les capteurs solaires sont développés et produits par la société COGENER, ce sont des capteurs extra-plats à concentration (CEP).
Durant cette première campagne expérimentale, il a été montré que, malgré la bon fonctionnement de la centrale, plusieurs éléments sont à améliorer afin d'accroître le rendement, réduire l'encombrement et limiter les points critiques concernant la fiabilité.

Les travaux effectués durant l'année 2003 se décomposent en quatre parties:

A : Mesure des performances du nouveau collecteur sans vide avec CPC développé par l'entreprise COGENER pour remplacer le collecteur SOLEL utilisé précédemment. Il s'est avéré que le rendement mesuré était nettement inférieur au rendement attendu.

B : Modélisation du CEP. Un modèle optique du capteur à l'aide du programme de ray-tracing RADIANCE a été développé afin de connaître la distribution du rayonnement sur le tube collecteur. Un modèle thermodynamique faisant appel au logiciel FLUENT a également été réalisé, dans le but de caractériser les pertes thermiques du collecteur.

C : Modification de l'instrumentation des cycles thermiques de la centrale pour caractériser la performance des échangeurs, mesurer la proportion d'huile dans le fluide de travail et tester le réfrigérant R245fa qui remplace le R123.

D : Conception en collaboration avec Merminod Engineering d'une pompe à réfrigérant sur le même arbre que la turbine. La faible viscosité du réfrigérant, le fonctionnement très proche de la courbe de saturation, la séparation nécessaire des fluides de travail et de lubrification ont nécessité le recours à des techniques et matériaux spéciaux.

L'année 2004 devrait nous permettre de finaliser la mesure des performances des échangeurs en fonction du taux d'huile et de tester la pompe qui est actuellement en cours de fabrication. La mesure des performances des cycles avec le R245fa et R134 sera également abordée. Le couplage du modèle de ray-tracing RADIANCE et du modèle FLUENT devrait permettre une modélisation globale d'un capteur solaire et de ses caractéristiques.

BFE OFEN UFE SFOE

1 Buts du projet

Le but du projet SPS est de concevoir et de fabriquer une mini-centrale solaire hybride pilote compacte, fiable et simple. Les pays susceptibles à l’implantation d’une telle centrale se situent sur la ceinture solaire.

Le but de la phase 5 du projet SPS est d’améliorer le rendement et réduire l’encombrement du cycle. Pour atteindre cet objectif, nous nous sommes concentrés sur les points suivants :

A. Tester et mesurer les performances du nouveau collecteur sans vide avec CPC conçu par COGENER sur la ligne OUEST du CEP. Le but est de trouver une solution alternative aux collecteurs SOLEL précédemment utilisés. En effet, ces collecteurs ont été principalement conçus pour les centrales de forte puissance (type Luz, > 25 MW), ils ont donc une inertie thermique élevée ainsi qu’une température de fonctionnement élevée (> 380°C).

B. Concevoir un modèle global du capteur qui comprenne la modélisation de l’optique du capteur et la modélisation des pertes thermiques du collecteur. L’objectif de cette modélisation est de choisir la technologie la plus appropriée en fonction de la température du fluide et du rayonnement solaire.

C. Modifier les cycles thermodynamiques et les instrumenter pour mesurer les performances des échangeurs. Effectuer des essais avec le R245fa en remplacement du R123.

D. Concevoir une pompe qui vient s’accoupler directement sur l’arbre de la turbine scroll. Le but est de remplacer les pompes à membranes utilisées précédemment. En effet, les pompes à membranes sont coûteuses, encombrantes et peu efficaces.

2 Travaux effectués et résultats acquis

La partie A a été effectuée en collaboration avec l’entreprise COGENER. COGENER devait concevoir et installer le nouveau collecteur. De son côté, le LENI devait mesurer les performances du nouveau collecteur à l’aide du circuit hydraulique installé l’année précédente [1].

La partie B est principalement le produit de plusieurs travaux d’étudiants, travaux de semestre, de diplôme ainsi que 2 mois d’assistant étudiant. Ces travaux sont toujours en cours dans le cadre de travaux de semestre. Malheureusement, les principales conclusions ne peuvent pas apparaître dans se rapport car le diplôme final d’un étudiant n’a pas encore été rendu.

La partie C est principalement d’ordre expérimentale. Elle a nécessité un travail important de la part des mécaniciens du LENI. Un projet de diplôme est actuellement en cours sur ce sujet. Il prendra fin en février 2004.

La partie D a été effectuée en collaboration avec M. Merminod de Merminod Engineering. Elle a fait l’objet d’un travail important de M. Merminod, le LENI s’occupant principalement de la coordination, la vérification des dessins (facilité d’usinage), la recherche de composants (pistons céramiques) ainsi que de l’usinage des pièces.

2.A Mesure des performances du collecteur COGENER sans vide, avec CPC

Les mesures des performances du capteur ont débuté au mois de mai, mais une série de problèmes survenus sur le nouveau collecteur COGENER sans vide avec CPC, n'ont pas permis d'arriver à des performances concluantes. Les mesures ont été effectuées sur la ligne ouest de la centrale située face au PSE-C de l'EPFL. Un nouveau circuit hydraulique [1] a été conçu et installé. Il a été conçu pour pouvoir également effectuer des mesures d'évaporation directe. Ce circuit permet une large plage de débits grâce à une pompe à engrenage et à deux débitmètres massiques montés en parallèle.

Les mesures de performances ont été effectuées en mode tout liquide et sans évaporation, même partielle du liquide caloporteur (eau pressurisée à 10 bar). En effet, il n'a pas été jugé utile de faire des essais d'évaporation directe avec des performances déjà faibles en mode liquide.

Les mesures ont été réalisées dans une gamme de températures de 80 à 160 °C en sortie de capteur pour un rayonnement variant entre 500 et 730 W/m^2. Le meilleur rendement trouvé atteignait 40%. Etant donné la redondance des mesures thermodynamiques et le calcul du bilan de l'échangeur de chaleur, on peut considérer que la précision des mesures est de 3%. La mesure du rayonnement solaire direct provenant de la soustraction de deux solarimètres, est pour sa part moins précise. Néanmoins, les deux solarimètres ont été étalonnés en même temps sur 3 jours complets [2], mais le solarimètre étalon n'a pas été réétalonné depuis plus de 10 ans. Un réétalonnage à Davos permettrait de lever les derniers doutes, mais ceci est coûteux en temps et en argent.

Le problème le plus important qui s'est manifesté à plusieurs reprises a été la flexion de la structure du collecteur (CPC et tube). Cette déformation est due à la dilatation asymétrique de la tôle porteuse en acier inoxydable. Ce phénomène s'aggrave si le capteur n'est pas défocalisé dans les plus brefs délais. Dans notre cas, cette flexion a entraîné la rupture d'une soudure du collecteur (sunstrip) et plusieurs complications dues à la dépose puis la repose du collecteur.

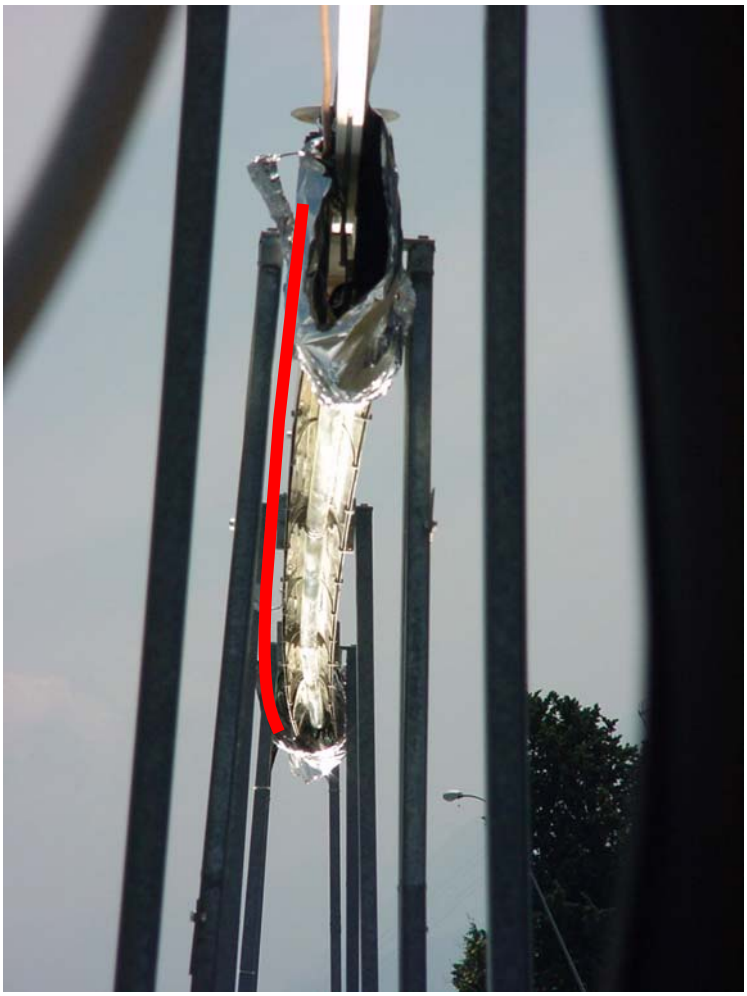

Figure 1 : flexion du collecteur

2.B Modélisation du capteur

L’objectif est de créer un modèle d’un capteur solaire comprenant la modélisation du rayonnement ainsi que des pertes thermiques. De cette manière, il est possible de connaître le bilan global du collecteur donc, ses performances. Dans notre cas, nous allons nous concentrer sur le capteur extra-plat (CEP).

Le programme de ray-tracing RADIANCE a été choisi pour modéliser la partie optique du capteur. L’avantage de RADIANCE est d’être un programme libre et moins coûteux en ressources. En effet, c’est un programme de « backward » ray-tracing. La présence au sein de l’EPFL d’une personne maîtrisant parfaitement ce programme a également contribué à ce choix.

La partie thermodynamique et le calcul des pertes thermiques du collecteur ont été modélisées à l’aide du programme de CFD, FLUENT.

Partie optique : RADIANCE

Pour coupler ces deux programmes, nous avons choisi MATLAB comme programme de communication. C'est-à-dire qu’une interface MATLAB a été développée afin d’exécuter et de paramétrer le modèle RADIANCE. Ce programme permet, pour une configuration donnée et selon des hypothèses bien définies, de connaître la distribution du rayonnement solaire autour du collecteur. Les principaux paramètres de modélisation sont : a/ la géométrie du capteur, b/ la position du soleil par rapport au capteur, et c/ les caractéristiques des matériaux (verre, miroir, etc…). Nous avons également introduit des paramètres qui modélisent les imprécisions de positionnement des miroirs afin de quantifier les pertes optiques [3, 4].

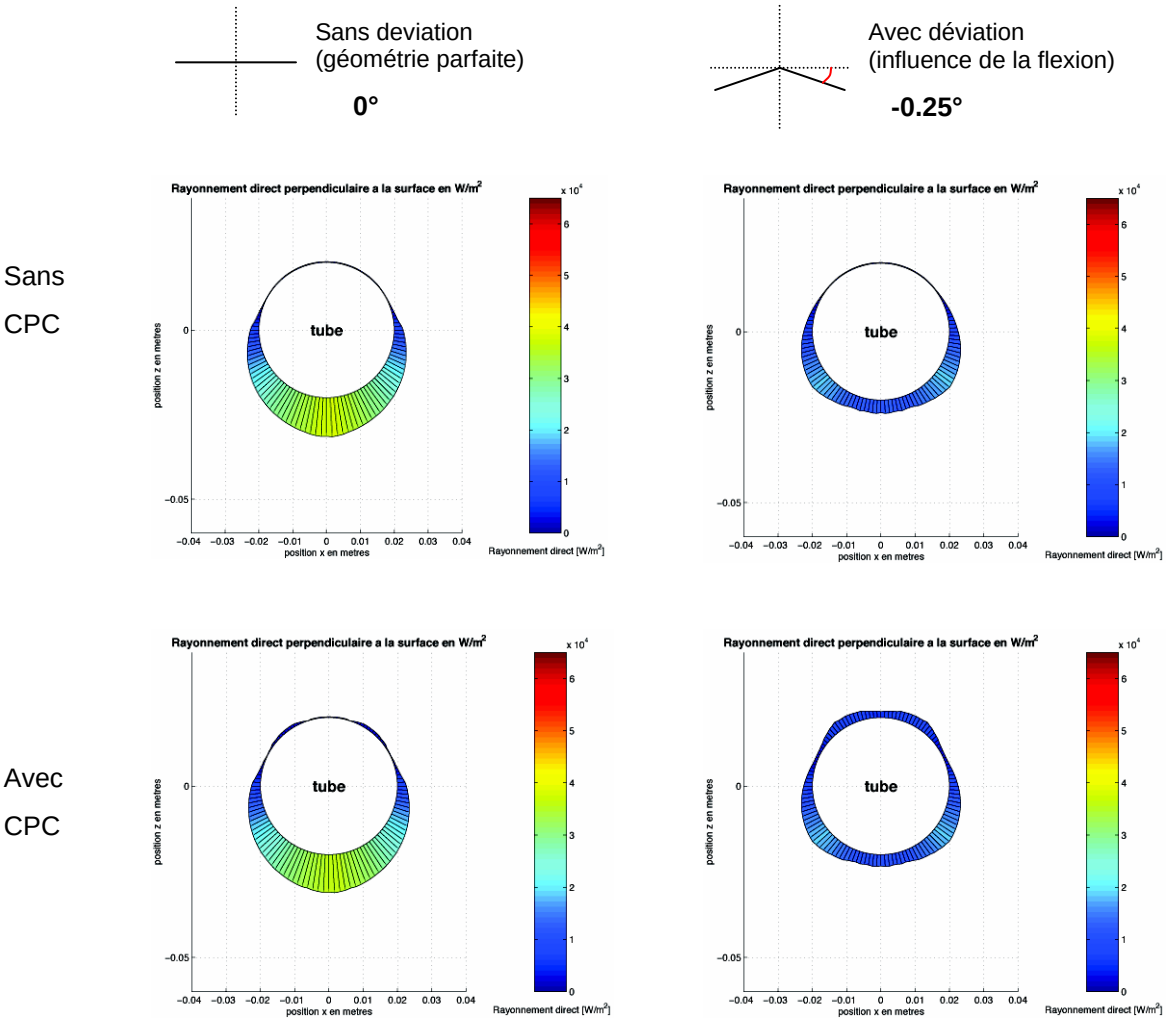

Figure 2 : distribution du rayonnement sur le collecteur

Sur la figure 2, on constate qu'une flexion de -0.25 ° des couteaux soutenant les miroirs entraîne une diminution notable du rayonnement. De plus, l'influence du CPC (CPC conçu par COGENER) ne semble pas être significative.

Néanmoins, il est nécessaire de considérer ces résultats avec prudence tant que le modèle numérique n'a pas été validé par des mesures. C'est dans ce but qu'un travail de diplôme a été réalisé (de juillet à décembre) au LENI [5]. L'objectif de ce travail a été de valider les simulations RADIANCE en développant une méthode de mesure du rayonnement solaire à l'aide d'une camera numérique. Pour contrôler la géométrie du capteur, toutes les mesures de rayonnement ont été effectuées sur le CEP 1 (fig. 3). En effet le CEP 1 est très rigide et il est possible de régler la position de chaque miroir indépendamment.

Figure 3 : capteur CEP 1

La principale difficulté de la mesure de rayonnement consiste à trouver une cible lambertienne et une loi entre l'intensité de la lumière reçue par le CCD (valeur de gris, codée sur 12 bits) et l'intensité réelle. Les outils utilisés ont été : une caméra numérique codée sur 12 bits et un objectif macro 105mm. La cible lambertienne (fig 4) est en céramique. Le traitement d'images (fig. 5) a été fait à l'aide de LabView.

Ce travail de diplôme, n'est pas encore terminé, c'est pour cette raison que les résultats présentés sont incomplets.

Figure 4 : cible lambertienne

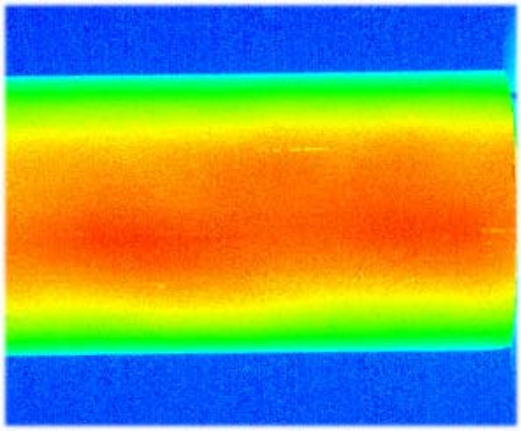

Figure 5 : image traitée

Partie thermique. FLUENT, Gambit

Ce projet traite la modélisation d’un capteur solaire à concentration [6]. Ce travail a été assisté par un logiciel CFD : Fluent. Le but est de modéliser et d’analyser les résultats obtenus pour minimiser les pertes de chaleur sur un collecteur concentrique. Nous considérons ce système dans le cas idéal et sous l’influence de changements climatiques : sous l’effet de différentes températures atmosphériques et de différentes intensités de vent.

Les phénomènes de transfert de chaleur modélisés sont : la conduction dans l’acier et le verre, la convection (*naturelle* entre le collecteur et le tube en verre, *forcée* à l’extérieur du tube de verre) et le rayonnement. Si l’on désire une modélisation fine de la géométrie, il est nécessaire d’utiliser un logiciel de CFD, car la température à la paroi n’est pas homogène sur toute la circonférence du tube. De même, comme décrit ci-dessus, la distribution du rayonnement incident (calculé par RADIANCE) n’est pas homogène sur la périphérie du tube.

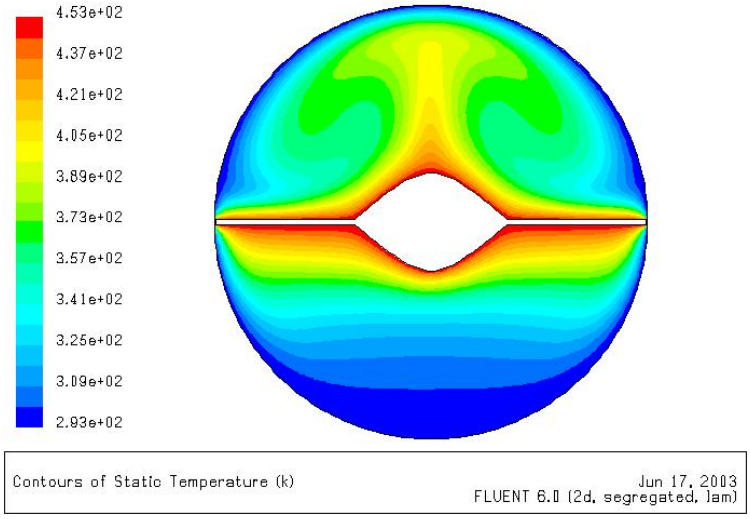

Figure 6 : Profil des températures pour un collecteur conique avec ailettes horizontales à une température de 180°C et le cylindre extérieur à une température de 20°C

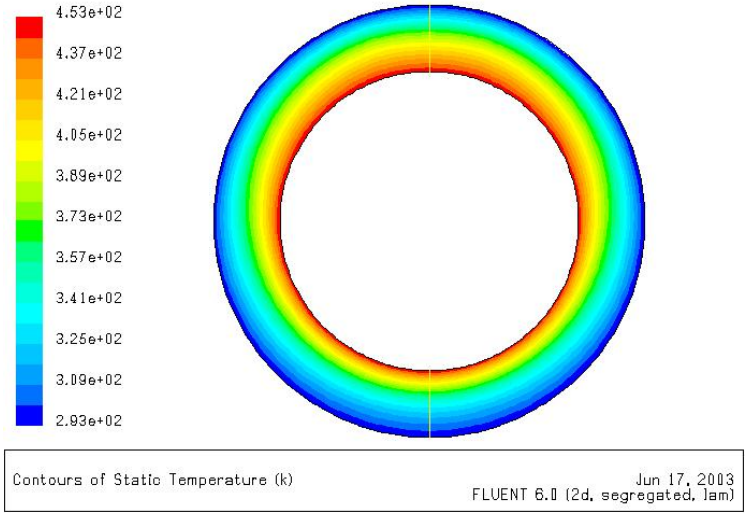

Figure 7 : Profil des températures pour un collecteur concentrique à une température de 180°C et le cylindre extérieur à une température de 20°C.

Actuellement un projet de semestre est en cours afin de développer une interface MATLAB pour exécuter FLUENT permettant ainsi de coupler, via MATLAB, les deux logiciels.

2.C Modification et Instrumentation des cycles

Le but est de mesurer les performances des échangeurs en fonction du taux d'huile dans le réfrigérant. Pour supprimer la présence d'huile dans le réfrigérant, nous avons vidangé puis rincé l'installation. Comme les essais se déroulent sans huile, il n'est pas possible de connecter les turbines. Des vannes de réglages ont donc été installées en remplacement, les turbines étant by-passées.

Instrumentation

Pour garantir la précision des mesures, 4 débitmètres massiques ont été installés. Les débits mesurés sont : la source chaude, chaque réfrigérant et l'eau de refroidissement. Un densimètre a été ajouté sur le R134a, du côté évaporation de l'évapo-condenseur. Pour garantir de bonnes mesures, des mélangeurs Sulzer (fig 9) ont été placés dans les parties liquides de l'installation.

Des capteurs de pression ont été ajoutés pour connaître le plus fidèlement possible les paliers d'évaporation et de condensation. Tous les capteurs de pression et de température ont été étalonnés. Une nouvelle chaîne d'acquisition National Instrument a été installée. Elle permet un échantillonnage rapide (>10 ms), ce qui est essentiel pour étudier les séquences de démarrage des cycles. Tous les programmes de visualisation ont été refaits et une interface LabView – Matlab – Refprop permet un post processing « online » des mesures.

Le R245fa a remplacé le R123. Des tests de compatibilités et de miscibilité de l'huile et du réfrigérant ont été effectués. Il s'est avéré que l'huile Mobil EAL Arctic 68 est miscible avec le R245fa, même à plus de 140 °C.

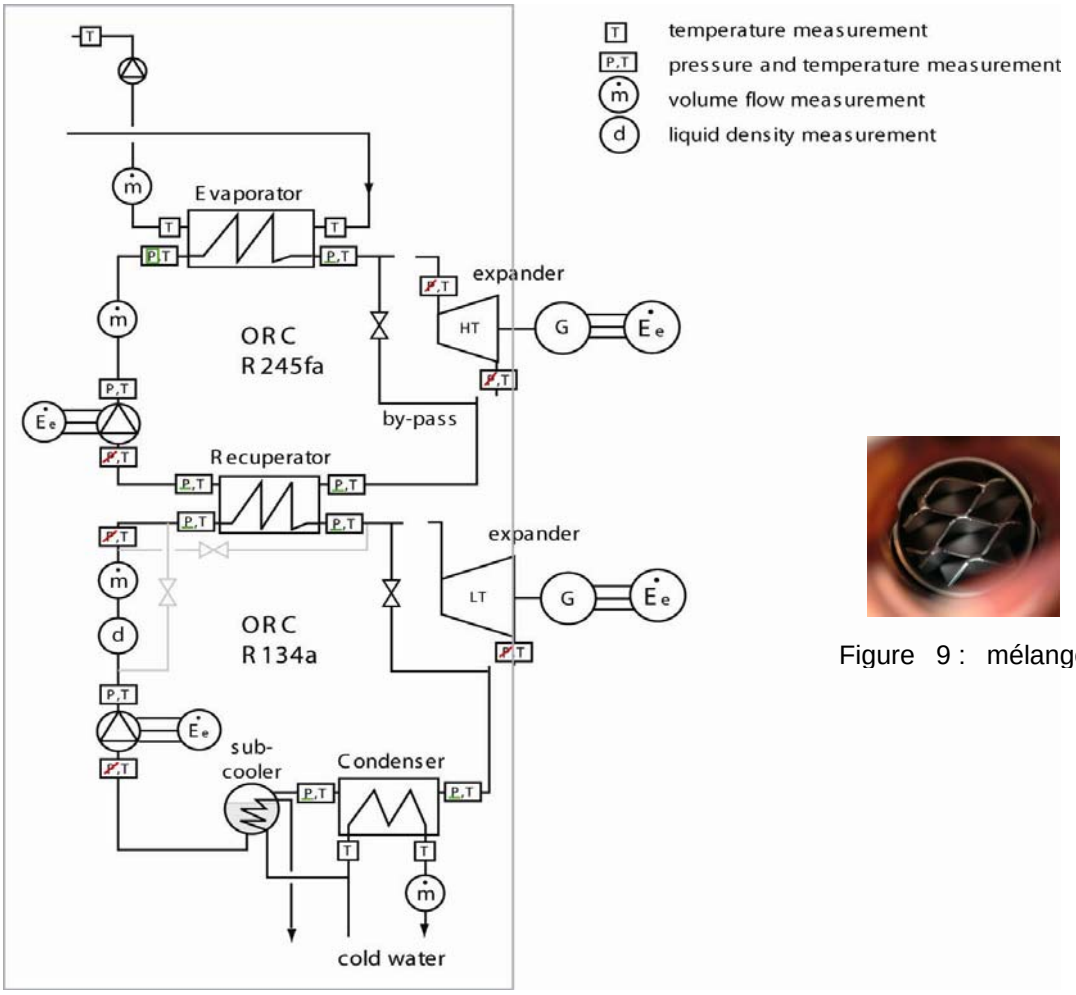

Figure 8 : shéma des cycles, modifications et isolement des turbines

Figure 9 : mélangeur

2.D Conceptions d’une pompe en bout d’arbre [7]

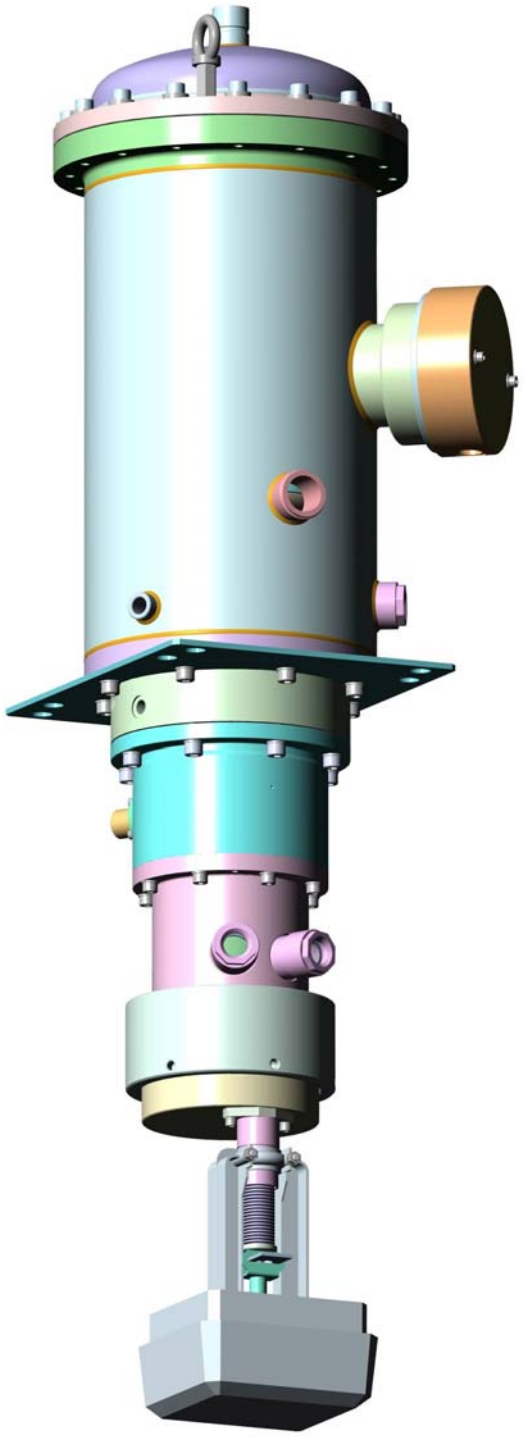

Figure 10: Ensemble turbine-pompe

Construction d‘une pompe à réfrigérant pouvant être entraînée directement par une turbine scroll dans le but de rendre les petites centrales thermiques à cycle de Rankine plus compactes, plus efficaces et plus fiables.

Les pompes utilisées jusqu’à maintenant sont de type à membranes en polymère ayant leur propre moteur. L’entraînement direct permet de supprimer le moteur électrique.

Bien qu’ayant l’avantage d’une bonne étanchéité interne, la durée des membranes s’est révélée insuffisante. Aucun élastomère ne sera donc utilisé dans les joints dynamiques de la nouvelle pompe étudiée.

Données:

Turbine :MANEUROPE SZ125S4RA modifiée

Le liquide à pomper est un mélange de réfrigérant et d’environ 5% de lubrifiant

réfrigérant	R134 A
lubrifiant	MobilEAL Arctic68
débit maximum	400cm^3/s
Vitesse de rotation (égal à celui de la turbine)	3000t/min
pression d‘entrée minimum	0,5 MPa
pression de sortie nominale	2,4 MPa
température du liquide	10-15 °C

Conditions de fonctionnement

La pompe est montée sur la partie inférieure de la turbine, comme on peut le voir sur la Figure 10. L'intérieur est montré dans la Figure 11 avec la désignation des principaux éléments.

Son carter communique avec celui de la turbine qui est rempli de lubrifiant. Deux fluides sont donc en présence dans le voisinage des pistons, ce qui est une situation particulière comparativement à une pompe hydraulique. Toute la mécanique (plateau, barillet, partie arrière des pistons, entraînement) est immergée, ce qui est un avantage pour la lubrification. Toutefois, cela implique un brassage dont la consommation en énergie ne pourra être estimée qu'au cours des essais.

Pour diminuer cet effet « mixer », un tube peut être placé sur le barillet pour empêcher une circulation trop importante du fluide.

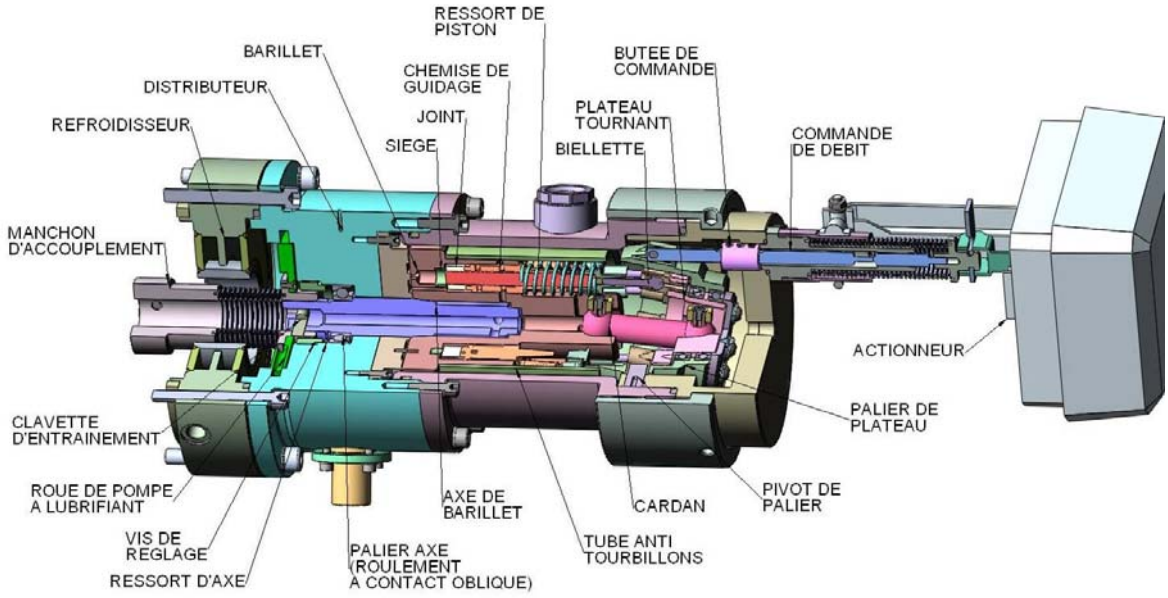

Figure 11 : Pompe à réfrigérant, ensemble ouvert

Problèmatique

Les pistons : Le poids du piston et des pièces en mouvement est important car l'accélération axiale provoque une force qui n'est pas négligeable comparativement à celle du ressort. Le risque est que la force de contact entre la biellette et rotule s'annule ; il y a alors décollement. Plusieurs types de pistons ont été étudiés et c'est la version plongeur en alumine avec manchon fretté en bronze aluminium qui a été retenue malgré son prix un peu plus élevé. Elle est moins lourde que la version acier et le plongeur, ayant une dureté suffisante, ne nécessite pas de traitement de surface. Toutefois, il n'est pas commun d'usiner un piston en alumine avec des tolérances de l'ordre de deux micromètres sur une longueur de plusieurs centimètres. Néanmoins, nous avons trouvé une entreprise neuchâteloise qui a fabriqué ces pistons.

Le palier axial - distributeur : le palier axial est critique, c'est un palier hydrodynamique composé de 40 rainures radiales en escalier d'une profondeur de 6 micromètres. Les deux surfaces en contact sont polies et traitées par un revêtement dur (« diamond like coating », ADLC Bernex), limitant l'usure et les forces de friction en cas de contact.

Etat de la pompe

Actuellement, environ 70 % des pièces sont usinées. Nous avons reçu et contrôlé les pistons en alumine. Les tests de la nouvelle pompe se dérouleront dans la première moitié de 2004.

3 Collaboration nationale et internationale

COGENER a fourni le capteur et le nouveau collecteur sans vide avec CPC.

Merminod Enginering s’est occupé de la conception de la pompe en bout d’arbre.

Maret SA a fabriqué les pistons en céramiques de la pompe. Le prix d’un piston chute fortement en fonction du nombre de pièces, ce qui rend cette technologie abordable pour de grandes séries.

4 Évaluation de l’année 2003 et perspectives pour 2004

Beaucoup d’efforts ont été déployés pour le projet SPS 5 cette année de la part des mécaniciens, des étudiants et des ingénieurs. On constate que les énergies renouvelables et l’énergie solaire en particulier enthousiasment toujours les gens.

Le développement d’un modèle global de capteur solaire est encourageant. Il est prévu qu’un nouveau collaborateur travaille sur la synthèse du modèle et le valide expérimentalement sur le CEP 1. Il est également envisageable de rapatrier au LENI le stand hydraulique, développé pour la mesure des performances du collecteur, qui se trouve sur la centrale (PSE-C).

L’instrumentation complète des cycles avec une chaîne d’acquisition performante et un nouvel ordinateur offrent des perspectives intéressantes pour la caractérisation des échangeurs, des turbines et des pompes. Le stand est prêt, les essais de mesures des performances devraient se dérouler dans les 2 à 3 prochains mois (mars 2004).
Un travail de diplôme qui prendra fin en février 2004, consacre une large part à l‘expérimentation des cycles de Rankine avec le « R245 fa » comme fluide de travail.

Le développement d’une pompe en bout d’arbre est critique et la complexité de l’ensemble le démontre. Toutefois, cette solution est beaucoup plus compacte et plus adaptée que les pompes à membranes actuellement utilisées. Des solutions élégantes ont été trouvées. Plus de la moitié des pièces sont usinées, ce qui devrait permettre de tester la pompe entre mars et juin 2004.

Reste encore le développement et la conception d’un évaporateur condenseur à film tombant vertical. Un modèle d’évaporateur condenseur assez général a été développé lors d’un travail de diplôme au LENI [8] et un étudiant poursuit ce projet.

Concernant le nouveau collecteur sans vide avec CPC, force est de constater que les résultats sont décevants. Beaucoup d’énergie a été investie pour la réalisation du nouveau stand d’essais sans avoir pu l’exploiter pleinement. Une bonne modélisation et une compréhension globale du problème pourraient permettre dans le futur de tester différents collecteurs. Toutefois, nous pensons qu’il est inutile de poursuivre les mesures tant que le prototype n’est pas au point.

5 Publication :

Kane M., LarrainD., Favrat D., Allani Y. *Small hybrid solar power system*. Energy:The International Journal 28/14 pp1427-1443, 2003

6 Références

[1] P.-A. Giroud, M. El Hajal, M. Merminod, D. Favrat : ***Solar Power System SPS, Phase 5****, Rapport Annuel, Office fédéral de l'énergie, Décembre 2002, LENI – ISE – STI, EPFL*

[2] P.-A Giroud : ***Note interne : étalonnage des solarimètres***, *Septembre 2003, LENI – ISE – STI, EPFL.*

[3] M. Gull : **modelisation et optimisation d'un capteur solaire thermique extra plat à concentration I**, *semestre hiver 2002-2003*, *LENI – ISE – STI, EPFL*

[4] M. Gull : **modelisation et optimisation d'un capteur solaire thermique extra plat à concentration II**, *semestre été 2003*, *LENI – ISE – STI, EPFL*

[5] F. Jochem : **Modélisation et optimisation d'un capteur solaire thermique à concentration IV**, *diplôme juillet 2003 – décembre 2003, LENI – ISE – STI, EPFL*

[6] O. Martin Du Pan : **modelisation et optimisation d'un collecteur solaire thermique à concentration III**, *semestre été 2003*, *LENI – ISE – STI, EPFL*

[7] Antoine Merminod : ***Etude d'une pompe à refrigerant à entrainement direct pour l'alimentation d'une turbine scroll****, 4/12/2003, Merminod Engineering, LENI -EPFL*

[8] *Diez* : **Study and development of a plate heat exchanger evapo-condenser for a superposed Organic Rankine Cycle and the oil influence in its performance**, *diplôme été 2003, LENI – ISE – STI, EPFL*