

**Rapport annuel 2002 à l'attention de l'Office fédéral de l'énergie**

**Rapporteurs:** M. Giroud, [pierre-alain.giroud@epfl.ch](mailto:pierre-alain.giroud@epfl.ch)  
M. El Hajal (LTCM-ISE-STI-EPFL), M. Merminod (Merminod Engineering)

**Mandataire:** Prof. D. Favrat / LENI / ISE-STI-EPFL  
<http://leniwww.epfl.ch>

**SPS (Solar Power System) mini-centrale pilote électro-thermo-solaire de 10 kW<sub>e</sub>  
Phase 5 : Développement du prototype industriel de l'unité ORC – année 2002**

**Résumé:** le fonctionnement opérationnel de la centrale solaire hybride constituée de deux cycles à fluide organique et turbines scroll hermétiques connectées ou non à un moteur a été un succès. Les premiers kilowattheures solaires thermiques en suisse ont été produit durant l'été 2001.

Les objectifs principaux de ce projet vise à accroître le rendement, à réduire l'encombrement et à améliorer des points potentiels de manque de fiabilité.

Un nouveau tube collecteur sans vide constitué d'un capteur CPC a remplacé la ligne Ouest de la centrale. Le débit maximal du nouveau collecteur est faible, ce qui nous a poussé à évaporer partiellement l'eau directement dans le collecteur pour bénéficier de chaleur à haute température (170 °C pour 8 bar). Les tests du nouveau collecteur n'ont pas encore pu être réalisés car des délais de fabrication et de livraison nous ont retardé.

Une nouvelle enveloppe pour la turbine scroll Maneurope SZ 125S4RA a été fabriquée et testée. Le standard de résistance est plus élevé que l'original. Cette enveloppe est démontable du côté haute pression aussi bien que du côté basse pression ce qui permet d'observer la lubrification de la turbine tout en permettant (dans le futur) la possibilité d'accouplement d'une pompe en bout d'arbre.

Pour améliorer le mauvais rendement de l'évaporateur-condenseur à plaques situé entre les cycle haut et bas, l'idée d'un évaporateur-condenseur basé sur la technique de films tombants a été avancée. Un logiciel pour dimensionner cet échangeur a été développé par le Laboratoire de transfert de chaleur et de masse de l'EPFL.

L'étude du comportement transitoires des turbines scroll a montré qu'un pic de courant n'est pas évitable lors du démarrage.

Les perspectives futures concernent : 1) tests de performances et de pilotage des nouveaux collecteurs à évaporation directe. 2) analyse de l'huile sur le rendement des échangeurs (la vidange de l'installation aura lieu avant la fin de l'année), 3) essai d'un nouveau réfrigérant, le R 245 fa pour remplacer le R 123, 4) conception d'un nouveau collecteur en acier inoxydable sans soudures, 5) étude de l'optique du capteur par Ray Tracing, 6) conception d'un nouvel échangeur.

## I. Objectifs du projet SPS Phase 5

Les principaux objectifs visés sont d'accroître le rendement, réduire l'encombrement et améliorer des points potentiels de manque de fiabilité.

### I-1. Capteurs et champs solaires

- a. Développer avec COGENER un nouveau tube collecteur (tube sélectif simple avec capteur CPC, technologie sans vide)
- b. Contribution propre et support scientifique et technique à COGENER en vue de concevoir, tester et comparer une ligne de capteurs avec un tube équipé d'un concentrateur supplémentaire de type CPC. Exploration complémentaire des températures supérieures à 170 °C.

### I-2. Turbines scroll, cycle ORC biétagé

- a. Analyse préliminaire des comportements transitoires des turbines scroll en fonction des pressions de démarrage et d'arrêt.
- b. Mesures détaillées du comportement des échangeurs des cycles superposés en accroissant progressivement la proportion d'huile pour finir avec un fonctionnement normal en turbine. Proposition de stratégies d'amélioration.

## II. Travaux effectués et Résultats obtenus en 2002

### II-1. Capteurs et champs solaires

Initialement il était prévu de remplacer la ligne ouest équipée de collecteurs SOLEL par le nouveau collecteur à technologie sans vide. Nous aurions utilisé le même fluide caloporteur et le même circuit d'eau sous pression à disposition sur le site et utilisé pour SPS 1-4.

Le diamètre de l'ailette qu'utilise COGENER dans le nouveau collecteur est nettement inférieur au diamètre des tubes collecteurs SOLEL, il résulte une perte de charge beaucoup plus élevée pour un même débit. Le tube du collecteur est en cuivre, ce qui augmente la corrosion à haute température et haut débit par rapport à l'acier inoxydable (SOLEL).

Pour éviter la corrosion de l'ailette et les pertes de charges élevées, il suffit de diminuer le débit. Si l'on diminue le débit, la différence de température entre l'entrée et la sortie du collecteur est très élevée, ce qui se traduit par une température moyenne basse et une pente élevée de notre utilité chaude dans la représentation des composites. Ces caractéristiques diminuent le rendement de l'installation par une limitation de la température maximale.

Une solution consiste à évaporer l'eau directement dans le collecteur. En effet, la chaleur latente de vaporisation de l'eau est nettement supérieure à la chaleur massique, et la vaporisation se fait à température constante. L'évaporation directe permet également de limiter la masse d'eau en circulation dans le circuit car le diamètre des conduites est plus petit étant donné le faible débit. De plus, l'énergie consommée par les pompes est plus faible car le débit est plus faible.

Nous avons dû construire un autre circuit hydraulique correspondant mieux à la nouvelle gamme de débit. Le débit lors de l'évaporation directe est environ 10 fois inférieur à celui du collecteur précédemment installé. Nous avons dû acheter une pompe, un vase d'expansion, des tuyaux et leurs isolations, des vannes, des filtres et des thermocouples d'un diamètre de 0.5 mm (le diamètre des thermocouples est directement lié au diamètre du tube de l'écoulement mesuré). Nous avons également dû changer de débitmètres massiques pour ne pas être dans le bas de l'échelle de mesure et garantir la précision.

La mesure de l'efficacité du capteur solaire est plus complexe lorsqu'il y a évaporation partielle du fluide caloporteur car il faut prendre en compte la masse de vapeur à la sortie du capteur. La solution adoptée consiste à faire un bilan d'énergie sur le capteur solaire et l'échangeur-condenseur (fig. 1), ce qui implique des mesures supplémentaires sur l'eau de refroidissement (débit et température au condenseur).

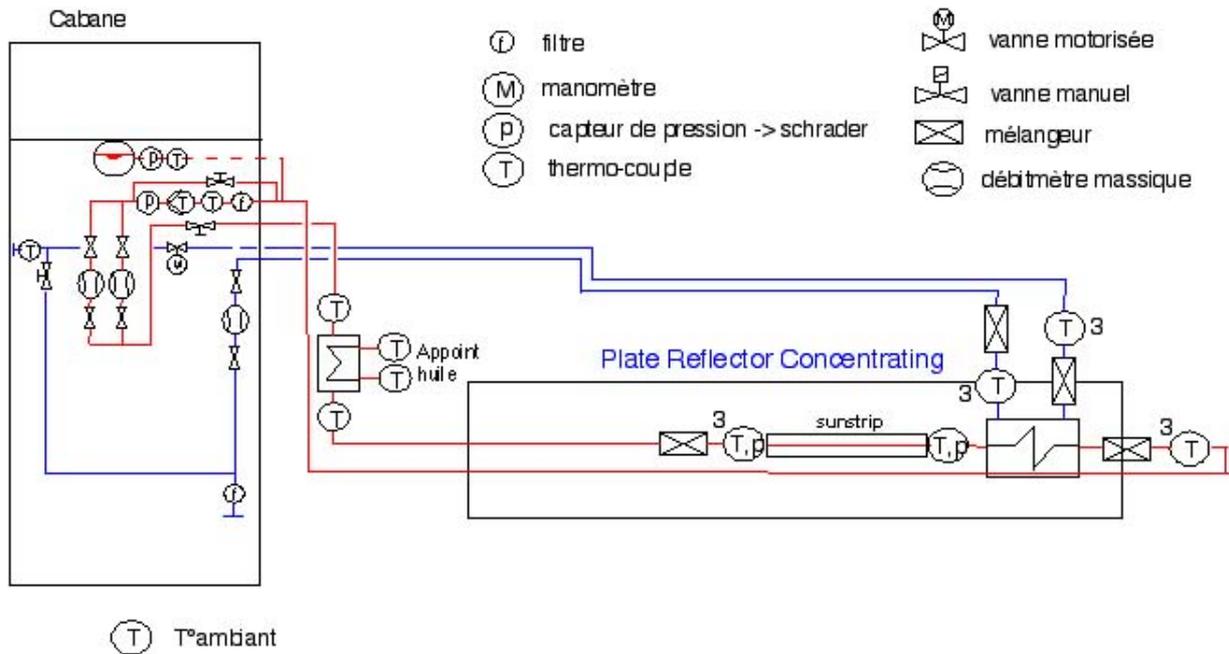


Figure 1 : schéma de l'installation, en rouge le fluide caloporteur, en bleu l'eau de refroidissement

Le travail effectué au LENI permet de faire des mesures de l'efficacité du capteur pour un débit variant de 6l/min à 0.3 l/min. Cette grande plage de débit nous permet de varier le titre de vapeur à la sortie du capteur de 0 à 1. Des tests de mises au point et de réglage de l'installation sont nécessaires, mais nous dépendons de la pose du capteur.

## II -2. Turbines scroll et cycles ORC biétagé

### II -2.1. Modification de l'enveloppe d'une turbine scroll et proposition de pompe en bout d'arbre

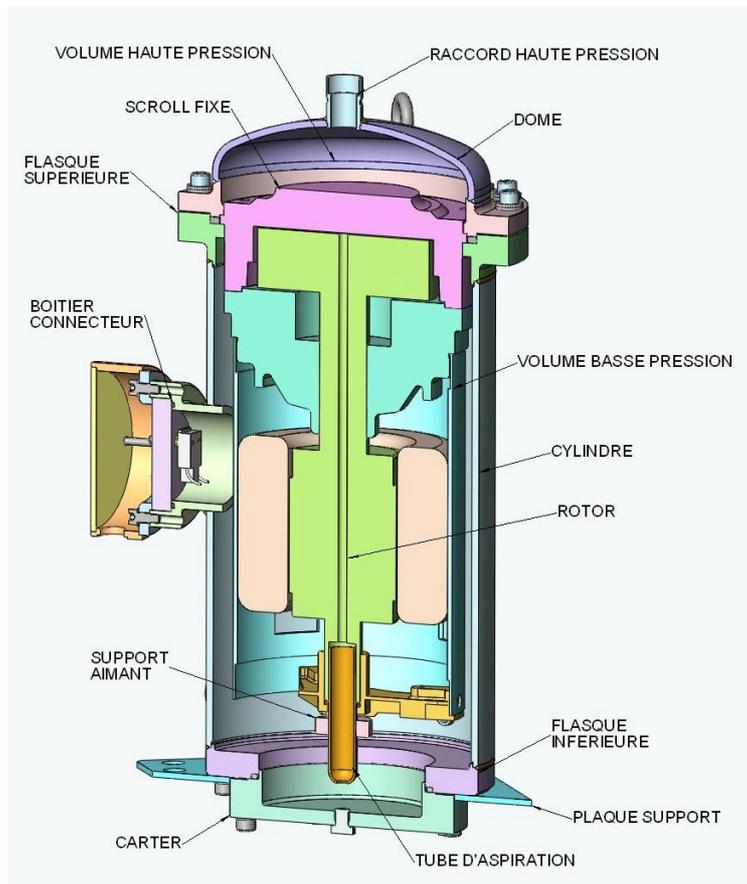


Figure 2: enveloppe démontable pour turbine maneuropé SZ 125, nomenclature

Une nouvelle enveloppe a été construite afin d'adapter un compresseur scroll Maneurope SR125 à un usage en turbine. En particulier la nouvelle enveloppe est construite de façon à pouvoir être démontée soit du côté haute pression, soit du côté du réservoir d'huile situé en bas. L'ensemble est construit avec un standard de résistance plus élevé que l'original mais mis à part la hauteur totale, l'unité peut être échangée avec le modèle d'origine.

Le fonctionnement en turbine nécessite une pompe à réfrigérant liquide. Dans le cas où il est fait usage d'une pompe séparée, l'entraînement de celle-ci nécessite un moteur supplémentaire et, à moins d'une solution à moteur noyé, il se pose un problème de joints et de lubrification. La solution actuelle (fig. 2) fait appel à une pompe à membranes multiples dont la matière peut être plus ou moins compatibles avec le réfrigérant et l'huile qu'il véhicule. En effet, des membranes peuvent résister à un liquide dans le sens d'une non dilution de ses composants chimiques mais d'autre part subir des déformations (gonflement) et présenter une porosité sélective à certains produits. Dans le cas de membranes actionnées par une huile, une petite partie du fluide pompé peut migrer à travers la membrane du côté de l'huile motrice, ce qui peut avoir des effets indésirables en particulier au démarrage de la pompe.

Il est proposé ici un concept de pompe fixé à l'extrémité inférieure de la turbine utilisant le côté accessible de l'axe moteur et l'huile du réservoir comme lubrifiant. Ceci permet d'utiliser une pompe à piston, évitant ainsi le problème des membranes. L'entraînement direct élimine le moteur et les pertes de rendement qui y sont associées.

La pompe se monte simplement à la place du couvercle inférieur (carter).

L'enveloppe a été fabriquée au LENI, elle a été testée et comptabilise une quinzaine d'heures de fonctionnement sans problèmes. Nous avons démonté les deux flasques et nous avons constaté la bonne lubrification du scroll. Les essais du comportement transitoire qui suivent ont été effectués sur cette turbine.

## II -2.2. Analyse du comportement transitoire des turbines scroll

Les fabricants des compresseurs scroll, que nous utilisons comme turbine dans notre cas, ont changé leur design, ce qui pose des problèmes lors du démarrage. Pour analyser ce phénomène, nous avons fait des tests pour différentes procédures de démarrage. Voici les différentes procédures :

a) Fermeture du by-pass de la turbine et couplage de la turbine **simultanément**.

Lors du démarrage, la turbine va fonctionner en mode « moteur » durant la phase d'accélération. Cette procédure permet de garantir le décollement de la turbine et sa mise en rotation, elle évite des surpressions importantes dans la partie haute pression. Par contre, la turbine va consommer de la puissance jusqu'à ce que sa vitesse de rotation dépasse le 50 Hz du réseau. Le passage du mode « moteur » au mode « générateur » se fait naturellement par inversion des flux.

b) Fermeture du by-pass **puis** couplage de la turbine.

Cette procédure est très similaire à la précédente, elle augmente simplement le rapport de pression, car le by-pass est fermé et la turbine ne tourne pas. Par contre elle est plus risquée car on maîtrise pas parfaitement l'augmentation de pression à l'entrée de la turbine. On constate que la consommation de puissance est légèrement inférieure au cas a). Par contre, la montée en régime qui est plus rapide.

c) Décollement de la turbine par une impulsion, fermeture du by-pass puis couplage lorsque la vitesse de rotation dépasse 50 Hz.

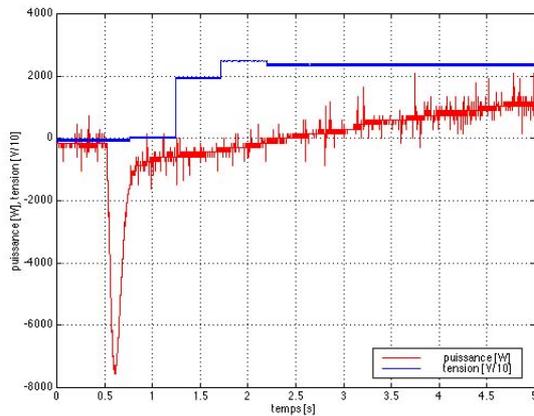
Cette approche avait été envisagée, pour décoller la turbine avant de la coupler. Il est clair que ce n'est pas une bonne solution car nous avons 2 pics de consommation, un lors du décollement et un lors du couplage.

d) La turbine tourne librement. Fermeture du by-pass **puis** couplage lorsque la vitesse de rotation dépasse 50 Hz.

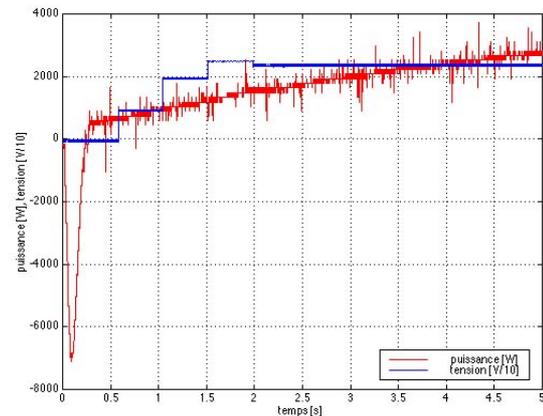
Dans ce cas, la turbine n'est pas collée, elle tourne d'elle-même. Cette procédure n'est pas réalisable sur toutes les turbines, elle dépend du design du scroll.

On remarque, un pic de puissance négatif, même si l'on couple la turbine à 60 Hz. Ce phénomène provient de l'établissement de la tension dans le générateur et de la chute de vitesse de la turbine lors de l'accouplement. Le pic de puissance négatif est nettement inférieur, environ 65 % de a), b) ou c).

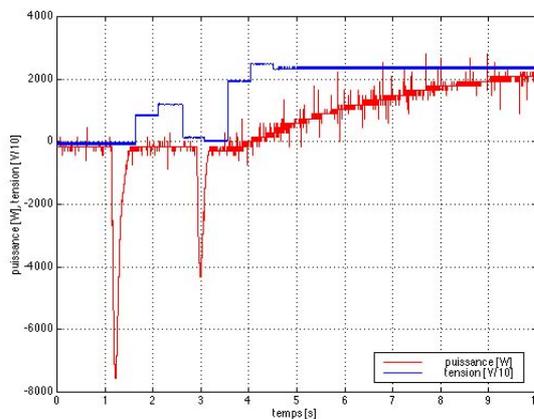
Puissance et tension en fonction du temps, cas a)



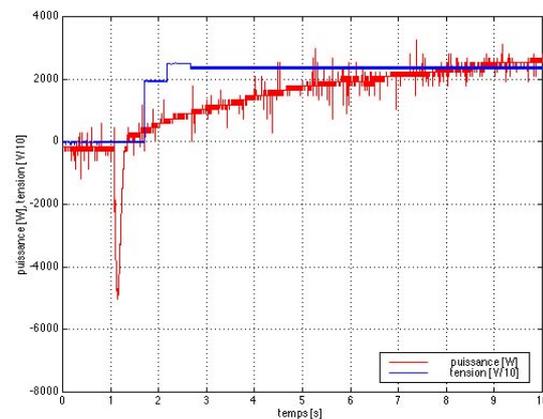
Puissance et tension en fonction du temps, cas b)



Puissance et tension en fonction du temps, cas c)



Puissance et tension en fonction du temps, cas d)



### II -2.3. Développement d'un logiciel pour le dimensionnement d'un évaporateur -condenseur à film tombant

Des études précédentes ont mis en évidence un mauvais rendement de l'évaporateur-condenseur situé entre les cycles haut et bas. Pour palier à ce disfonctionnement l'idée d'un évaporateur-condenseur basé sur la technique de film tombant a été avancée. La première étape, qui fait l'objet de ce travail, est le développement d'un logiciel pour dimensionner cet échangeur.

#### II -2.3.1. Les échangeurs à films tombants

Dans cette section nous décrivons succinctement la technique des échangeurs à films tombants telle que nous désirons l'appliquer. Précisons premièrement que l'évaporation se fera à l'extérieur des tubes et la condensation à l'intérieur. Le principe repose sur une série de tubes superposés les uns aux autres. Le liquide à évaporer est uniformément réparti sur le tube supérieur et coule de tube en tube jusqu'au plus bas. Chaque tube est connecté à celui du dessous par un coude, de sorte que le fluide à condenser entre par le tube supérieur et sort par le tube inférieur comme le montre la figure 3.

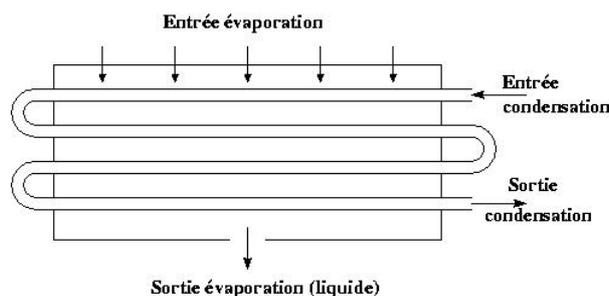


Figure 3 : Schéma de l'évaporation / condensation par film tombant

II -2.3.2. *Caractéristiques du logiciel*

Le programme, écrit en langage C a été testé avec succès dans un environnement Windows avec Visual C++, ainsi que dans un environnement Linux avec le compilateur gcc. Le logiciel est écrit sous forme modulaire, ce qui facilitera les améliorations futures en remplaçant les modèles physiques ou les corrélations actuels par de plus récents.

II -2.3.3. *Données / Résultats*

Pour réaliser un calcul deux types de données sont nécessaires. Le premier est d'ordre géométrique, il concerne la longueur des tubes, leurs diamètres interne et externe, le nombre de tubes superposés et leur espacement, le nombre de tubes juxtaposés, ainsi que le nombre de zones de calcul par tube. Le second type de données concerne la nature des réfrigérants et leurs états. Il est nécessaire de donner, aussi bien du côté de l'évaporation que de la condensation, le débit massique, la température d'entrée et celle de saturation ainsi que le taux de vide. Les résultats (puissance, coefficient de transfert de chaleur, taux de vide, ...) locaux ou globaux sont donnés dans un fichier texte facilement exploitable par la plupart des logiciels tels que Matlab ou Excel. A titre d'exemple, les figures 4 et 5 représentent respectivement l'évolution des coefficients de transfert de chaleur pour l'évaporation et la condensation et la puissance, coté condensation le long des tubes superposés. Cette simulation a été réalisée dans les conditions résumées dans le tableau ci-dessous.

Longueur d'un tube (m)	Nombre de zone de calcul	Nombre de colonnes (tubes juxtaposés)	Nombre de lignes (pass) (tubes superposé)	Distance intertube(mm)	
0.5	5	4	4	15	
Fluide	Débit massique (kg / s)	T d'entrée (°C)	T de saturation (°C)	Taux de vide initial à l'entrée	Diamètre du tube
R245fa (condensation)	0.17	72	72	1	8
R134a (évaporation)	0.24	57	57	0	10

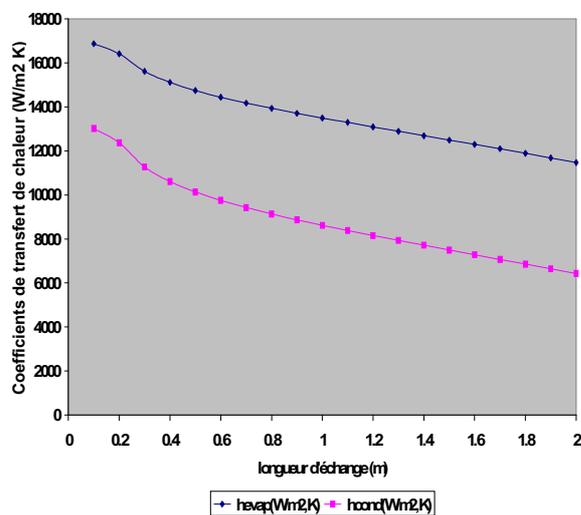


Figure 4 : Evolution des coefficients de transfert de chaleur pour l'évaporation (bleu) et la condensation (rose). L'abscisse 0 correspond à l'entrée dans le tube du haut.

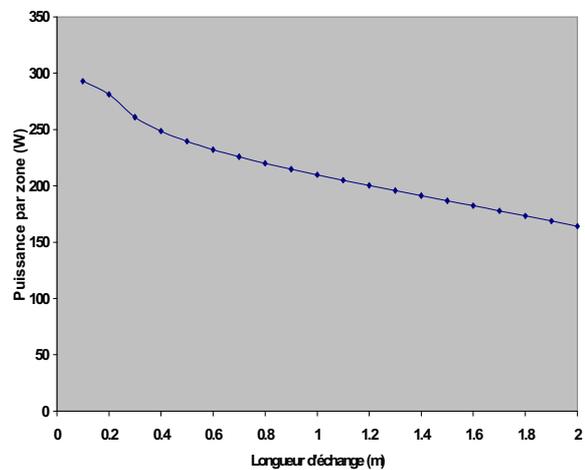


Figure 5 : Evolution de la puissance échangée par zone. L'abscisse 0 correspond à l'entrée dans le tube du haut.

II -2.3.4. *Conclusions*

Le logiciel qui a été développé permet de dimensionner un évaporateur - condenseur à film tombant dans le cas où l'évaporation est externe aux tubes et la condensation interne. Le logiciel est disponible et opérationnel comme le montrent les résultats présentés ici. Par ailleurs, l'architecture modulaire du programme permet d'apporter aisément des améliorations dans le futur.

### **III. Collaboration avec d'autres institutions, notamment avec l'industrie, et collaboration internationale entretenues en 2002.**

- a. Collaboration avec le laboratoire de transfert de chaleur et de masse (LTCM) de l'EPFL  
Conception du programme de calcul de l'échangeur à film tombant
- b. COGENER Sarl, M. Allani et M. Peccoud, PSE, Lausanne (CH/VD).  
Conception du nouveau collecteur

### **IV. Publications éditées ou soumises en 2002.**

- a. S. Martin, M. Kane, D. Favrat, Small Hybrid Solar Power System: First Field Test Results, HEFAT 2002. 1st International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics. 8-10 April 2002, Kruger Park, South Africa, [http://leniwww.epfl.ch/publications/Show?record\\_id=386](http://leniwww.epfl.ch/publications/Show?record_id=386)
- b. M. Kane, D. Favrat, Multicriteria Optimisation of Small Hybrid Solar Power System, EuroSun 2002, June 23-26, 2002, University of Bologna « San Giovanni in Monte », Bologna, Italy