

## Concept d'une minicentrale électro-thermo-solaire hybride adaptée aux pays en voie de développement

M. Kane, R. Zanelli, D. Favrat

Laboratoire d'énergétique industrielle (LENI), Département de Génie Mécanique,  
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, CH1015 Lausanne, Suisse.

Y. Allani, E. Glauser

(COGENER), Parc scientifique, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne,  
CH1015 Lausanne, Suisse.

### Abstract :

This paper presents the analysis of a original design of small hybrid solar plant using Organic Rankine Cycles with hermetic scroll expander-generators. The hot supply is provided from vacuumed collector tubes along the focal line of solar concentrators made of mirror bands fixed on a plane surface (CEP). The plant is integrated with a cogeneration Diesel engine unit to ensure power availability independently from the variations of solar radiation. It is primarily intended for isolated sites in developing countries.

Measurements on the power unit of 13 kWel show an excellent behavior over a broad range of parameters with an efficiency of the order of 18% (50% exergetic efficiency), which is very promising particularly when considering that the concept of superposed cycles will allow operations at higher supply temperatures with further technological developments.

### Résumé :

Cet article présente l'analyse d'un concept original de mini-centrale solaire hybride basé sur des expandeurs-générateurs volumétriques hermétiques de type "scroll" fonctionnant à l'aide de cycles de Rankine superposés. La source chaude est fournie par des capteurs solaires à concentration à lamelles réfléchissantes extra-plats (CEP) et complétée par les rejets thermiques d'un moteur à cogénération. L'utilisation possible de petites unités modulaires, pouvant inclure d'autres services notamment la réfrigération, ouvre la voie à une solution adaptée au cadre des pays en voie de développement avec un système solaire énergétique intégré. Les mesures effectuées sur les cycles de Rankine superposés ont permis d'établir les performances et de vérifier son bon fonctionnement sur une large plage de paramètres. Pour la gamme de puissance envisagée (de quelques kWe à quelques dizaines de KWe), l'efficacité de cycle mesurée (de l'ordre de 18%), est particulièrement élevée en comparaison avec d'autres installations fonctionnant à des niveaux de température comparables. Ce résultat est d'autant plus encourageant que d'excellentes perspectives existent en matière d'augmentation du niveau supérieur de température

### 1. INTRODUCTION

La problématique de la génération d'électricité solaire comprend notamment a) la faible densité d'énergie incidente imposant des surfaces de captage importantes, b) les coûts d'investissement élevés s'agissant de technologies spécifiques à production limitée et c) les inégalités et l'absence de fiabilité de la disponibilité de puissance, intrinsèquement liées aux cycles solaires et aux conditions météorologiques [1]. Les progrès technologiques récents ouvrent des perspectives intéressantes aux centrales solaires-fossiles intégrées (ISFCS: Integrated Solar Fossil Cycle System) qui, dans le contexte de préoccupations environnementales croissantes, offrent la possibilité d'accélérer la substitution, même partielle, des énergies fossiles par l'énergie solaire tout en garantissant la disponibilité de production électrique [2,3].

Selon des critères thermo-économiques classiques (performances/coûts), plusieurs options d'intégration sont communément citées.[4]. Il convient, notamment, de distinguer: a) les concepts de centrales SEGS californiennes (entre 30 et 80 MWe) basés sur des capteurs cylindro-paraboliques accompagnés de brûleurs ou de chaudières à gaz utilisés comme source d'appoint thermique pour faire fonctionner un cycle conventionnel de Rankine. Cependant, l'énergie fossile n'est alors pas utilisée de façon thermodynamiquement optimale et ne contribue que modestement à l'élargissement des durées d'utilisation des équipements ; b) les concepts de centrales dits ISCCS : Integrated Solar Combined Cycle System, (PAESI [6], ISSCS-Nevada, USA [7]) basés sur des cycles combinés permettent d'optimiser autant

que possible l'efficacité du cycle en mode fossile simple tout en réduisant les coûts de production électrique (jusqu'à 42%) par rapport aux centrales SEGS [7, 8]. Pour les deux cas cités, la caractéristique d'efficacité est cependant limitée par la température de stabilité de l'huile et des concepts préconisant l'évaporation directe (DSG) dans les capteurs cylindro-paraboliques sont à l'étude [9, 10]; c) les concepts de centrales utilisant des héliostats à haut rendement de conversion, qui permettent l'intégration du solaire à un niveau d'exergie plus élevé pour le préchauffage, voire le chauffage complet en pointe de l'air de combustion des turbines à gaz pour certains systèmes [11] ou pour le réformage du gaz naturel pour d'autres [12]. Ce type d'intégration présente, a priori, des avantages énergétiques et potentiellement économiques vis à vis des systèmes décrits ci-dessus, mais requiert des chambres de combustion externes et modifiées par rapport à celles des turbines à gaz conventionnelles.

Il convient, tout de même, de signaler que ces concepts avancés de centrales sont généralement adaptés à des niveaux de puissances de plusieurs mégawatts, voire même de quelques centaines de MWe qui impliquent une connexion à un réseau électrique conséquent, souvent absent de nombreuses régions des pays de la ceinture solaire. La présente discussion portera essentiellement sur des petites centrales (HSPS : Hybrid Solar Power System<sup>1</sup>) de quelques kWe à quelques dizaines de kWe en guise de solutions adaptées principalement aux sites isolés de pays en voie de développement. Ce type de système solaire énergétique intégré, peut également inclure d'autres services comme la réfrigération et se prête bien à la cogénération domestique

## 2. PRINCIPE ET PROBLEMATIQUE D'UN HSPS

Une centrale solaire hybride est à la base une centrale solaire conventionnelle constituée d'un système solaire de production de chaleur (source chaude) qui alimente des turbines dans un cycle thermique de production d'électricité. L'hybridation consiste à utiliser un système actif d'appoint à combustible fossile qui permet d'assurer la disponibilité de puissance en période de rayonnement solaire insuffisant. L'idée clef est que les combustibles fossiles constituent le moyen de stockage de loin le plus économique par rapport au stockage thermique ou électrique à l'aide de batteries dont la capacité et le recyclage sont notoirement problématiques.

Une telle intégration présente l'avantage de pouvoir égaliser les fluctuations en jouant sur la souplesse de l'unité de cogénération à combustible fossile. En revanche, l'optimisation du dimensionnement et des séquences opérationnelles de composants technologiques variés avec des niveaux exergétiques d'apport différents, ne sont pas élémentaires et font intervenir un nombre élevé de facteurs. Par ailleurs et pour les petites puissances considérées, les contraintes de maintenance en site isolé conduisent, de préférence, à des systèmes hermétiques au niveau de l'unité de puissance, chargés en fabrique, permettant de limiter les interventions sur site.

Il s'agit également de trouver un compromis entre:

- le pourcentage d'apport solaire et d'apport fossile en fonction de la courbe de charge et des objectifs environnementaux recherchés,
- l'augmentation d'efficacité thermodynamique et les pertes croissantes des capteurs aux températures élevées
- L'efficacité énergétique et la complexité de la régulation (robustesse d'utilisation)

## 3. CONCEPT D'UNE CENTRALE HSPS

### 3.1 Choix du concept de centrale prototype

La problématique exposée ci-dessus, a conduit à faire les choix de conception suivants:

- Capteurs à concentration qui s'imposent lorsque, comme c'est le cas ici, des températures supérieures à 150°C sont souhaitables. Par ailleurs, la recherche de robustesse et de simplicité de fabrication, adaptées au cadre des pays en développement, conduit au développement et à l'utilisation de capteurs plats (CÉP) avec des lamelles réfléchissantes judicieusement inclinées, avec moindre résistance au vent et remplacement aisé des lamelles. Le tube capteur est sous vide afin de limiter les pertes et de mieux exploiter les possibilités d'exploitation ultérieures à plus haute température.

---

<sup>1</sup> Les auteurs remercient l'Office fédéral suisse de l'énergie pour sa contribution financière à ce projet

- L'utilisation d'expandeurs-générateurs volumétriques hermétiques de type "scroll" fonctionnant dans le cadre de cycles de Rankine à fluide organique (ORC), car dans les gammes de puissance en question, les turbines de type dynamique à vapeur sont insatisfaisantes. D'autre part, les impératifs économiques imposent autant que possible le choix de composants à large diffusion ce qui est le cas de la majeure partie des composants de turbines volumétriques scroll considérés dans notre approche. Ces turbines, moyennant une gestion d'huile adéquate sont peu sensibles aux coups de liquide et permettent une alimentation occasionnellement en régime diphasique. Ces turbines ont cependant des régimes de fonctionnement optimums dans des gammes de pressions (25 à 3 bars) et de rapports de pression restreintes (typiquement inférieurs à 8). Si l'on considère qu'il est essentiel de conserver une marge d'amélioration future de cycle vers des températures d'évaporation plus élevées que les 150 degrés envisagés à ce stade, ces contraintes de turbines nous conduisent au choix de:
- Cycles ORC superposés avec évaporateur-condenseur intermédiaire permettant grâce à l'utilisation de deux fluides différents de rester dans les gammes d'opération optimales des turbines tout en réduisant le volume des équipements à basse température en comparaison avec un cycle monofluide bi-étagée qui serait l'alternative possible.
- Moteur Diesel à cogénération: Le choix d'utiliser un moteur Diesel est d'une part motivé par les aspects de rendement (nominal et en charge partielle) en raison de la nécessité de fonctionner fréquemment à charge partielle avec une bonne caractéristique de performance (en début de matinée ou en fin de journée) et d'autre part par des aspects pratiques de conditions d'acheminement du carburant vis à vis du gaz naturel qui nécessite des infrastructures beaucoup plus lourdes, et ce, pour des zones désertiques ou difficiles d'accès. D'autre part de telles unités existent fréquemment dans les zones concernées où elles fournissent souvent l'essentiel de l'énergie. D'autres technologies notamment les turbines à gaz de faible puissance qui commencent à apparaître sur le marché pourraient être considérées dans le futur pour des unités proches de la centaine de kW. Les unités moteurs Diesel ou Otto permettent une récupération de chaleur à deux niveaux. Le niveau supérieur d'évaporation du cycle supérieur pour la majeure partie de l'énergie des gaz de combustion et le niveau intermédiaire d'évaporation du fluide du cycle inférieur pour l'énergie de refroidissement du moteur proprement dit et de son huile de lubrification.

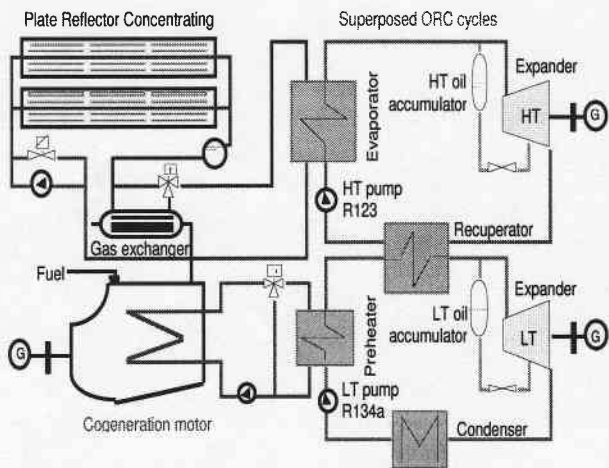


Fig.1 : Concept d'une centrale HSPS

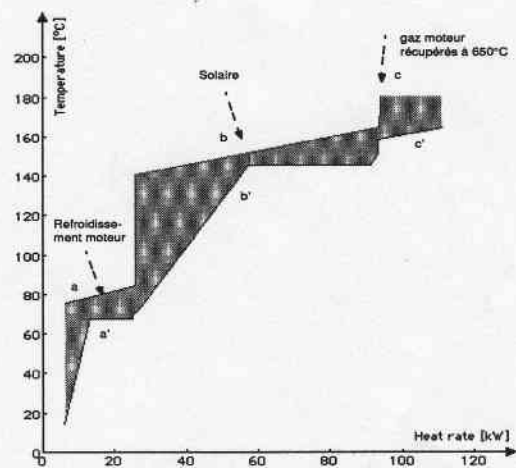


Fig.2 : Diagramme de composites obtenu avec intégration d'un moteur diesel de 15 kW<sub>e</sub> (cas avec apport solaire de 50 kW<sub>th</sub>)

Un schéma de la centrale prototype est donné à la figure 1 et la figure 2 illustre les composites pour un cas de fonctionnement avec 50 kW<sub>th</sub> d'apport solaire et pour un fonctionnement en régime nominal du moteur Diesel (15 kW<sub>e</sub>). Ces composites illustrent bien les principaux éléments d'intégration énergétique, à savoir:

- (a et a') : récupération de 19.3 kW<sub>th</sub> à environ 75°C sur l'eau de refroidissement du moteur et évaporation à 68°C d'une partie du fluide du cycle inférieur.

- (b et b') : évaporation à 146°C du fluide du cycle supérieur par le fluide caloporteur solaire (chauffé par apport solaire et par apport des gaz de combustion)
- (c et c') récupération de 17 kWth de 650°C à 160°C sur les gaz de combustion du moteur pour le chauffage complémentaire du fluide caloporteur solaire

Il va sans dire que ces composites se modifient en fonction des variations du rayonnement solaire et de la charge du moteur pour répondre à la demande.

### 3.3 Capteurs et fluide caloporteur

Les capteurs choisis sont des capteurs à concentrateurs extra-plats focalisant le rayonnement solaire sur un tube absorbeur sous vide contenant le fluide caloporteur :

Leur originalité conceptuelle réside essentiellement dans le plan réflecteur constitué de lamelles de verre plates et réfléchissantes formant un miroir de Fresnel. Ces lamelles sont clipées sur une structure plane de façon à permettre un remplacement aisé. Celle-ci offre moins de prise au vent avec des phases de construction caractérisées par une faible complexité technologique industrielle. L'inclinaison respective de chacun de ces miroirs est choisie de façon à concentrer le rayonnement sur une même ligne focale. L'ensemble du capteur est orienté Nord-Sud avec suivi du soleil en Ouest. Ces capteurs présentent un net avantage optique par rapport aux solutions classiques, avantage qui réside essentiellement dans la maîtrise de la tache focale lumineuse et en particulier en ce qui concerne la répartition de sa densité lumineuse:

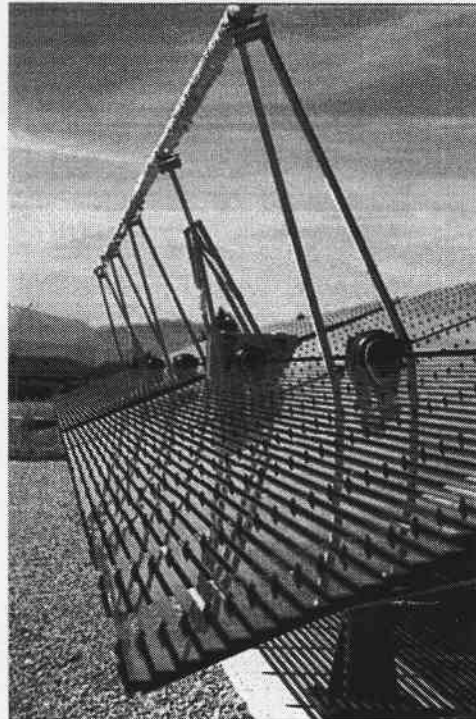


Fig.3 : vue d'une seule ligne de capteur CEP type COGENER

#### Configuration

- deux rangées de capteurs d'une puissance totale de 60 kWth (pour une intensité moyenne du flux solaire de 900W/m<sup>2</sup>)
- Surface active totale des deux lignes de 100 m<sup>2</sup>
- tubes absorbeurs sous vide type SOLEL
- Fluide caloporteur : eau sous pression (possibilité de fonctionner aussi avec de l'huile)
- température moyenne à l'absorbeur : 150°C-160°C (possibilité de monter à 380°C avec de l'huile)

Après échauffement dans le tube collecteur, le fluide caloporteur est encore chauffé dans un échangeur placé en série sur les gaz d'échappement du moteur avant de passer à l'évaporateur pour évaporer le liquide organique sous pression du cycle supérieur. La circulation du fluide caloporteur est assurée par une pompe d'alimentation des capteurs en présence d'une vanne de réglage du débit.

### 3.4 Le système thermodynamique de conversion

Pour cette installation prototype le fluide choisi pour le cycle supérieur est le R123. La vapeur de réfrigérant R123 produite est détendue dans une turbine scroll à haute température (étage supérieur HT), puis refroidie et liquéfiée dans un condenseur assurant l'évaporation et la surchauffe du fluide R134a. Le liquide R123 est, par la suite, repris par une pompe pour alimenter l'ensemble des éléments constituant le cycle supérieur.

Au niveau du cycle inférieur, le choix s'est porté sur le R134a: Les vapeurs de réfrigérant R134a sont détendues dans la turbine scroll de l'étage inférieur (LT). Après condensation dans un échangeur à eau de refroidissement (condenseur) fixant la pression de condensation, le liquide R134a est repris par une pompe, puis envoyé vers un échangeur placé sur le circuit eau de refroidissement du moteur qui assure son préchauffage.

Pour ce prototype et contrairement au système testé antérieurement de pompage séparé d'huile de lubrification des expandeurs, l'huile de lubrification circule avec le fluide de travail. Un séparateur en fin d'évaporateur permet ensuite d'alimenter les paliers par simple différence de pression. Cet arrangement permet de travailler plus aisément en turbine à condensation.

Cycle HT:

- Unité turbine scroll d'une puissance maximale de 5 kWe (cylindrée: 72 cm<sup>3</sup>, rapport de volume installé de 2.3
- Fluide organique : R123 évaporé entre 140°C et 150°C

cycle BT :

- Unité turbine scroll d'une puissance maximale de 8kWe (cylindrée : 72cm<sup>3</sup>, rapport de volume installé : 2.3)
- Fluide organique : R134a évaporé entre 60°C et 70°C
- Source de refroidissement: eau à 7°C

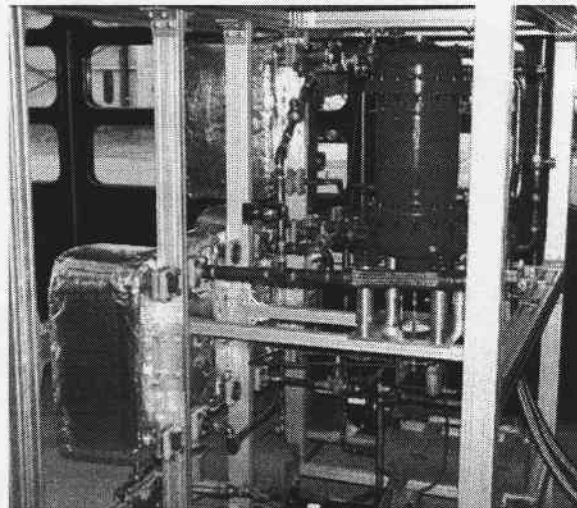


Fig.4 : cycles de Rankine superposés

**4. RESULTAT ET DISCUSSION**

Le but des mesures, lors d'une étude de gestion d'une centrale solaire en charges partielles, est de trouver les points de fonctionnement qui maximisent ses performances en rapport avec les variations rapides du rayonnement solaire. Dans notre cas, seuls des essais en laboratoire du comportement des cycles superposés ont déjà été effectués et ce, avec de l'huile thermique chauffée par une chaudière électrique (mais sans appoint moteur). La température de chauffage ainsi que la puissance étaient modulables afin de simuler l'apport solaire thermique. Les mesures portaient sur les puissances transformations au niveau de l'évaporateur en considérant d'une part un aspect quantitatif chiffré par les performances globales de la machine (efficacité, puissance électrique) et d'autre part un aspect qualitatif correspondant au comportement de la machine par rapport aux régimes fortement variables (marges de fonctionnement, paramètres de réglage).

Les grandeurs mesurées étaient les pressions d'évaporation et de condensation des cycles inférieur et supérieur, les températures aux entrées et sorties des différents composants ainsi que la puissance électrique obtenue à la sortie de chaque génératrice. Les figures 5 et 6 illustrent les variations des performances globales ainsi que les rapport de pression effectifs des deux cycles en fonction de l'apport thermique avec des conditions de température de la source chaude variant entre 130°C à 165°C. La figure 6 montre qu'en absence d'appoint thermique moteur au cycle inférieur et compte tenu du surdimensionnement de la turbine BT, les rapports de pression n'étaient dans tous ces essais pas parfaitement adaptés.

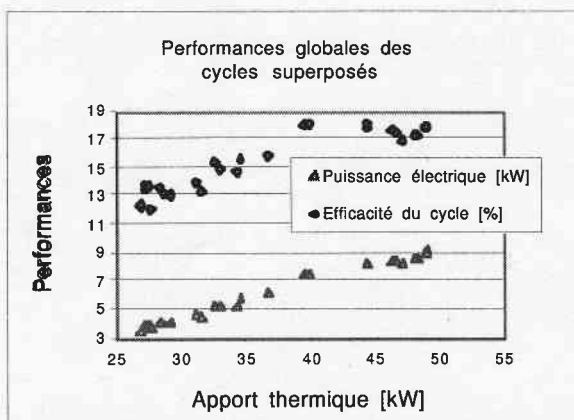


Fig. 5 : Performances des cycles superposés

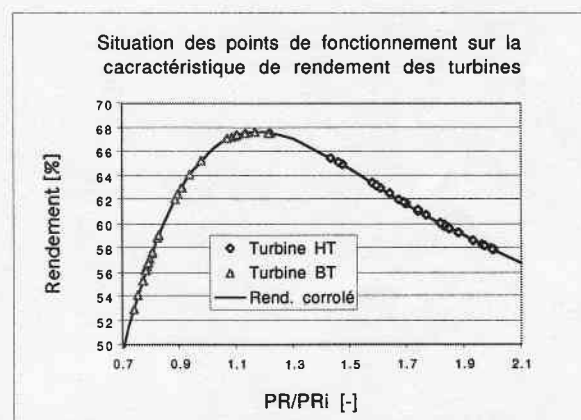


Fig. 6 : Rendements et marges de fonctionnement des turbines haute et basse température

L'efficacité du cycle, de l'ordre de 18% au maximum (soit 50% de rendement exergetique : efficacité/facteur de Carnot) est très satisfaisante si elle est comparée au 20% (soit 59% de

rendement exergetique) obtenu avec des cycles superposés à turbines dynamiques d'une puissance environ cent fois supérieure [14]. La diminution de l'efficacité vers les plus faibles puissances met en évidence les pertes par un fonctionnement à pressions inadaptées de la turbine basse température (figure 6). Il convient également de signaler que les deux turbines sont directement accrochées au réseau sans électronique intermédiaire de variation de vitesse. Ce mode de fonctionnement, même s'il s'avère avantageux par la simplification du système de réglage, implique une vitesse constante et donc des niveaux de pressions glissants en fonction de la charge. Une régulation de vitesse des turbines permettrait cependant de mieux optimiser les régimes de travail en améliorant encore l'efficacité à charge partielle.

## 5. CONCLUSION

Une analyse d'un concept original d'une mini-centrale solaire hybride a été effectuée. Elle vise une solution adaptée au cadre d'un pays en voie de développement avec un système solaire énergétique intégré. La réalisation et l'intégration des différentes unités (capteurs solaires, cycles superposés, moteur de cogénération) sont en phase de construction. Les performances attendues en pointe sont de 12% pour le cycle solaire seul (puissance électrique/puissance solaire incidente), de 53% pour la centrale en se référant seulement au combustible fossile (puissance électrique totale/apport fossile) et de 22% pour le cycle global (puissance électrique totale/(puissances solaire+fuel)).

Les mesures déjà effectuées sur les cycles de Rankine superposés ont permis d'établir ses performances et de vérifier son bon fonctionnement sur une large plage. Pour cette gamme de puissance de quelques kWe, l'efficacité mesurée est, de l'ordre de 18%, est particulièrement élevée en comparaison avec d'autres cycles fonctionnant à des niveaux de température comparables. Ainsi, la machine testée moyennant un minimum d'effort de réglage semble adaptée comme système de conversion thermodynamique au sein d'une centrale à moyenne et basse température.

L'approche proposée a l'avantage d'être adaptative car ce concept modulaire devrait, sans modification majeure, être adaptable à une évolution vers de plus hautes températures de fonctionnement au gré des progrès technologiques attendus en matière de turbines et de fluides notamment. L'intérêt de la nature modulaire des unités de puissance ne se limite de loin pas aux seules centrales solaires mais devrait ouvrir de nombreuses perspectives en matière de valorisation d'énergie thermique résiduelle y compris la cogénération domestique.

## 6. REFERENCES

- [1] Favrat, D. : Concept de centrale électrothermosolaire alpine, CISBAT'95, EPFL (1995).
- [2] Allani, Y., Favrat D. : Concept Global d'une Nouvelle Centrale Solaire à Cycle Combiné Dual Fuel", Entropie, Vol. 27, No. 164/165 (1991)
- [3] Allani, Y., Favrat, D., Spakovsky, V. : CO2 mitigation through the use of hybrid solar-combined cycles. Third Int. Conf. on Carbon Dioxide Removal Technologies (ICCDR-3), MIT, Cambridge, USA. 1996.
- [4] Bruk, R., Goebel, O., Koehne, R., Tamme, R., Trieb, F. : Avanced solar/fossil combined power plants. Proc. of the Int. Energy and Environment Conf, pp. 423-434, Changhai, (1998).
- [5] Kolb, G.J. : Evaluation of power production from the solar electric generating system at Kramer junction 1988 to 1993, Proc. ASME Int. Solar Energy Conf, pp. 499-504, Hawaii, (1997).
- [6] Allani, Y., Favrat D., Ziegler K., Kane M. et al. : Project PAESI, phase II. Final Report, Dec, (1997)
- [7] Pilkington Solar International GmbH : Status Report on Solar Thermal Power Plants, ISBN 3-9804901-0-6, January (1996).
- [8] Kane, M., Favrat, D. : Approche de conception et d'optimisation de centrale solaire intégrée à cycle combiné inspirée de la méthode du pincement (partie I: paliers de récupération). Int. J. Therm. Sci., Vol 38, No 6, pp 501-511, (1999).
- [9] Dagan, E., Muller, M., Lippke, F.: Direct Solar Steam Generation in Parabolic Trough Collector. Plataforma Solar de Almeria, PSE Report, Almeria, (1992).
- [10] Goebel, O. : Modelling of Two Phase Stratified and Annular Flow in Heated Horizontal Tubes. Proc. Conversion Flow and Pool Boiling Conf. Kloster Irsee, (1997).
- [11] H.W. Price, D.D. Whitney, H.I. Beebe: SMUD Kokhala Power Tower Study. Proc. of the 1996 international Solar Energy Conference. San Antonio, Texas (1996), pp. 273-279
- [12] A. Wornner, G. Brose, R. Buck, R. Tamme : Solar Reforming - Open and closed loop application. Workshop on the Use of Solar Energy, Tel Aviv (1995)
- [13] Allani, Y., Favrat D., Kane M., Zanelli R. et al. : CSIP3, Projet détaillé d'une mini-centrale pilote électrothermosolaire de 10 kWe. Rapport final pour OFEN, (1997)
- [14] VDI (Verein Deutscher Ingenieure): ORC-HP-Technology, Working fluid Problems. VDI-Verlag, (1984)