



Bundesamt für Energiewirtschaft
Office fédéral de l'énergie
Ufficio federale dell'energia
Uffizi federal d'energia



Programme de recherche:
Solaire thermique et stockage de chaleur

CSIP3

Projet détaillé d'une minicentrale pilote électro-thermo-solaire de 10 kWe

Partie A: Résumé étendu

Préparé par
Favrat D
EPFL-DGM-LENI
1015 Lausanne

Sur mandat de
l'Office fédéral de l'énergie

Résumé étendu

Pour les travaux de recherche définis dans le mandat : DIS 55740

Titre du projet :Projet détaillé d'une mini-centrale pilote électrothermosolaire de 10 kWe

Parmi les techniques de conversion d'énergie solaire en électricité, la voie électrothermosolaire à l'aide de cycles de Rankine et de turbines à vapeur est celle qu', en tout cas pour les centrales à grande puissance, permet de se rapprocher le plus de coûts de production économiquement viables. Cette filière est également la mieux adaptée au couplage avec d'autres énergies (combustibles fossiles, biomasse, etc) afin d'assurer la production de puissance avec stockage thermique réduit.

Le présent projet complète l'étude CSIP2, qui avait démontré la faisabilité des principaux composants hermétiques propres à garantir la fiabilité d'une centrale de faible puissance, par des études complémentaires sur:

- a) le comportement de cycles superposés en régime transitoire avec l'identification confirmée expérimentalement de la validité d'une première stratégie de gestion énergétique,
- b) les performances d'un capteur à concentration à lamelles qui ont été testées sur un stand conçu pour des essais à l'huile thermique ou en évaporation directe d'un fluide de travail. Seuls les essais à l'huile ont été réalisés en raison de la tenue insatisfaisante des tubes collecteurs (relâchement des soudures et vide non stabilisé) qui ont nécessité la recherche de nouveaux composants. Néanmoins les mesures réalisées ont permis de choisir définitivement l'option de capteurs sans CPC et à orientation nord-sud avec suivi.
- c) une nouvelle conception de capteur modulaire permettant un changement rapide des surfaces réfléchissantes et une meilleure adaptation à la production,
- d) la combinaison des modules de programmes de calcul existants en vue de faciliter l'optimisation thermoéconomique de la centrale,
- e) le comportement des turbines scroll notamment pour le cycle à "haute" température. Le nouveau modèle de turbine a pu être validé tant théoriquement qu'expérimentalement avec des rendements globaux isentropes (puissance électrique / puissance isentrope) jusqu'à 70% et des puissances électriques fournies allant de 3 à 8 kWe (en connection directe au réseau). Des essais à haute température jusqu'à 150°C d'entrée turbine ont été réalisés. Ces derniers essais peuvent être considérés comme positifs dans la mesure où ils ont confirmé la tenue de la turbine à ces hautes températures, avec de bons niveaux de performance. Ils ont toutefois permis d'identifier la nécessité de remplacement d'un composant polymère dans la turbine ainsi que l'existence de problèmes d'instabilités à haut débit-masse dans l'évaporateur à plaque du stand d'essai, mais des solutions ont été identifiées qui pourront être implémentées dans la future centrale prototype.
- f) les tenants et aboutissants ainsi que la conception détaillée de la centrale prototype proposée sont exposés dans les parties B à D du rapport et sont résumés ci-dessous:

Mandataire : Prof. D. Favrat / LENI / EPFL

Rapporteurs : Y.Allani, M.Kane, R.Zanelli, D.Favrat

Adresse : LENI / DGM / EPFL 1015 Lausanne

Téléphone : 021 / 693 3510 - 021 / 693 35 06

I-Centrale prototype:

Principe:

Le principe de centrale électrothermosolaire à cycles de Rankine à fluide "organique" proposé, même s'il inclut de nombreux éléments généralisables à toute centrale à cycle de Rankine, est essentiellement basé sur l'utilisation de modules comprenant comme éléments principaux des:

- turbines volumétriques rotatives de type scroll hermétiquement encapsulées avec leur génératrice électrique.
- capteurs solaires à concentration et tubes collecteurs sous vide

L'idée de base en ce qui concerne les turbines est d'utiliser des unités convertues à partir de compresseurs du marché, à faible coût spécifique en raison d'une production annuelle par millions d'unités. Le prototype de centrale proposé comprendra donc, dans un premier temps, seulement de telles unités dérivées de produits de série avec comme inconvénient partiel le fait que ces machines impliquent un contact direct entre l'huile de lubrification et le fluide organique de travail. Afin de permettre une progression ultérieure vers des températures encore plus élevées ($>150^{\circ}\text{C}$) une phase suivante prévoit l'introduction de turbines prototypes dites sans huile, c'est-à-dire sans contact entre huile et fluide de travail, au niveau du cycle à haute température.

D'un marché de compresseur très dynamique où apparaissent régulièrement de nouvelles unités¹, donc de nouvelles potentialités pour les turbines qui nous intéressent, nous avons, au cours des phases antérieures, modifié et testé deux machines à savoir:

- une turbine de type H² d'une puissance maximale d'environ 3.5 kWel dans la version testée
- une turbine de type T³ d'une puissance maximale d'environ 8.5 kWel avec des modules disponibles sur le marché allant de 8.5 à 12.2 kWel dans la marque testée. Sous toute réserve, des machines de T, fabriquées sous licence par un autre fabricant pourraient éventuellement permettre d'étendre le domaine de puissance vers le bas avec des unités de 5.2 kWel environ de puissance maximale. Cette option n'a cependant pas été vérifiée expérimentalement.

Le deuxième type, qui fait l'objet des essais les plus récents, présente l'avantage de gammes de puissance plus élevées, de basse pression de fluide de travail dans l'enveloppe et requiert le moins de modifications par rapport aux unités de compresseurs standards, ce qui, dans l'optique de réduction des coûts est important.

Tout en gardant à l'esprit que ce type de centrale peut couvrir à l'aide de modules en parallèle une plage allant de quelques kWel à quelques centaines de kWel, le choix de la puissance de la centrale prototype proposée est essentiellement dicté par les turbines actuellement testées, à savoir les turbines T. Comme le plus petit modèle présente une puissance maximale unitaire proche de 8.5 kWel et que la configuration minimale comprend deux cycles superposés, il nous paraît judicieux de proposer une centrale à puissance maximale de 16.5 kWel⁴ permettant d'exploiter l'équipement installé avec la plus grande efficacité possible.

Sur cette base, la centrale proposée correspond au diagramme d'écoulement de la figure 1

sont apparus sur le marché des machines scroll des machines à rapports de volume installés plus élevés. Même si ces machines, de type C (compresseurs Copeland), ne sont pas exactement similaires à celles testées (compresseurs Hitachi et Trane) une analyse de l'une d'entre elle a montré la perspective d'utilisation en turbine moyennant toutefois une modification plus conséquente que celle requise par la machine de type T. Par ailleurs, ces machines sont équipées d'un port intermédiaire qui pourrait peut-être utilisé comme soutirage. Sont apparus dans le même type de famille de type T des unités doubles montées d'usine comprenant deux machines de volumes aspirés différents qui permettraient un ajustement séquentiel des puissances des turbines sans électronique de puissance.

² modifié à partir d'un compresseur Hitachi

³ modifié à partir d'un compresseur Trane

⁴ Une puissance plus réduite de 8 kWel de pointe serait envisageable avec des modules de type C, dont la modification a fait l'objet d'une analyse dans le cadre du présent projet sans toutefois qu'une transformation et des essais aient été réalisés, ce qui présenterait donc un risque potentiel. Ce type ne permettrait pas des essais à vitesse variable qui, bien que non prioritaires, seraient intéressants dans le cadre de la centrale prototype

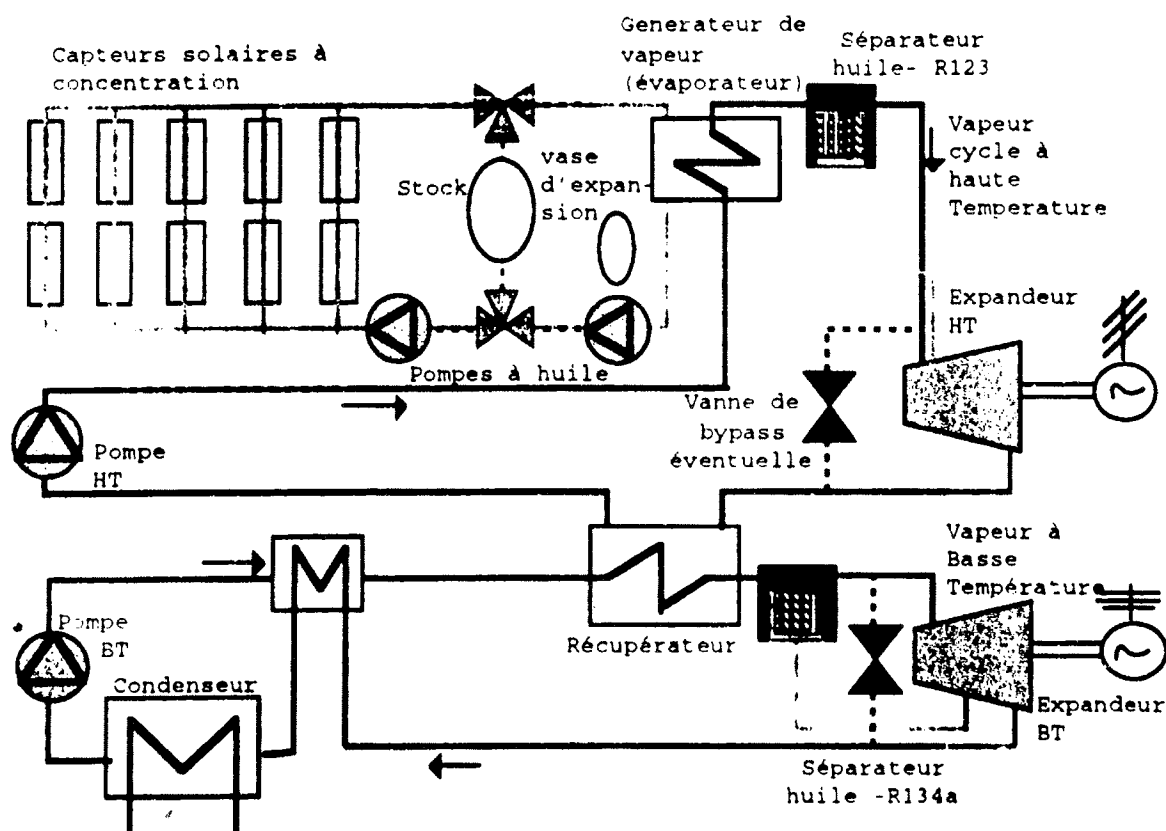


Figure 1: Diagramme d'écoulement de la centrale proposée (puissance électrique maximale de 16.5 kWel)

Liste de composants principaux:

- 154 m² de capteurs solaires à concentration par lamelles réfléchissantes disposées dans un plan à mécanisme orientable et tubes absorbeurs sous vide refroidis par huile thermique. Ces capteurs sont disposés en deux lignes parallèles orientées nord-sud.
- Un circuit d'huile thermique comprenant un petit stock tampon de réglage (pas encore optimisé) comprenant la circulation d'huile thermique, vraisemblablement des matériaux solide de stockage en quantité ajustable pour les essais de la centrale prototype, et deux pompes de circulation.
- Un cycle à haute température au R123 comprenant une pompe volumétrique à vitesse variable, un évaporateur à plaque huile-R123, un séparateur d'huile, une turbine-génératrice scroll de type T de 8.5 kWel, et un condenseur (R123) - évaporateur (R134a) à plaque.
- Un cycle à basse température au R134a comprenant une pompe volumétrique à vitesse variable, l'évaporateur (-condenseur) susmentionné, un séparateur d'huile, une turbine-génératrice scroll de type T de 8.5 kWel, un échangeur interne (désurchauffeur-préchauffeur) et un condenseur R134a-eau
- Initialement, un PC de contrôle, remplacé ultérieurement par un automate programmable

Cycles de Rankine et variations de charge

Parmi les modes possibles de réglage, le mode le plus simple consiste à travailler avec les deux turbines directement accrochées au réseau sans électronique intermédiaire. Ce mode testé avec succès en laboratoire implique une vitesse constante et des niveaux de pressions glissants en

fonction de la charge avec une légère perte de rendement. Les conditions de fonctionnement dans ce mode sont données⁵ au tableau 1:

Puissance-transformation huile	Puissance électrique	Température d'évaporation HT	Efficacité de cycles
KW	KW	°C	-
93.8	16.6	148	17.4
81.2	14.1	141	17.1
68.5	11.4	131	16.4
55.9	8.6	122	15.3

Tableau 1: Puissances et conditions thermodynamiques des cycles de Rankine pour quatre puissances-transformation du réseau d'huile thermique.

La figure 2 illustre dans un diagramme température - puissance transformation (différence d'enthalpie), les états correspondant aux deux cas extrêmes du tableau 1. Cette représentation permet de visualiser les écarts de température liés aux échanges de chaleur et suggère l'introduction d'un échangeur interne au cycle inférieur, échangeur que nous avons, en dernière minute, décidé d'introduire dans le futur prototype⁶ (voir figure 1). Les niveaux de pression correspondent bien au domaine de pression requis pour de bonnes performances de machines volumétriques. Les écarts de température, donc les pertes exergetiques les plus importantes sont liées au préchauffage du réfrigérant liquide de chacun des cycles. Une amélioration ultérieure à considérer en cas d'utilisation de turbines C⁷ équipée d'un port d'économiseur serait d'envisager un soutirage avec réchauffeur à surface pour effectuer une cogénération interne au cycle lui-même⁸.

Même si la stratégie opérationnelle proposée avec une vitesse constante des turbines est la stratégie qui devrait à terme être la moins onéreuse, nous proposons néanmoins, au niveau du prototype de prévoir un convertisseur de fréquence sur chaque turbine afin de pouvoir explorer d'autres modes de réglage, à savoir:

- niveaux de pression constants avec vitesse variable de chaque turbine
- niveaux de pression moins glissants avec une seule des turbines à vitesse variable (en tant que possibilité de limiter les coûts d'électronique de puissance)

Lubrification de turbines et opération accidentelle en vapeur humide à l'entrée.

Par rapport à la configuration actuelle du stand d'essai de cycle de Rankine, une réflexion récente nous a conduit à proposer une modification avec simplification du circuit de lubrification des machines permettant d'éliminer le recours à des pompes à huile spécifiques aux turbines, tout en ouvrant la voie à un fonctionnement occasionnel (ou accidentel) en condition biphas à l'entrée des turbines. Fort de notre expérience en matière d'évaporation de mélanges huile-réfrigérant⁹ le dispositif proposé prévoit une séparation d'huile en sortie d'évaporateur avec réinjection commandée par vanne dans l'arbre creux de la machine. Idéalement ce nouveau système devrait encore être testé en laboratoire avant l'implantation de la centrale prototype.

⁵ sans toutefois prise en compte de l'échangeur interne du cycle basse température

⁶ cette amélioration n'est pas prise en compte dans les efficacités et puissances présentés

⁷ modifié à partir de compresseurs Copeland à port d'économiseur

⁸ L'alternative consistant à effectuer la majeure partie de ces préchauffages (en tout cas celui du cycle basse pression) à l'aide de capteurs plans a été écartée en raison des limites de pression et des faibles gains économiques à espérer

⁹ stand d'évaporateur tubulaire du LENT sur lequel divers projets OFEN ont permis une investigation détaillée des coefficients de transfert de chaleur de mélanges huile-réfrigérant

Source froide

Dans un premier temps et pour la centrale prototype, il est prévu d'utiliser de l'eau industrielle du réseau de l'EPFL pour le refroidissement du condenseur. Des versions ultérieures avec la possibilité d'utilisation d'une tour humide ou d'une cogénération d'eau chaude notamment devraient être étudiées en parallèle avec l'évolution du projet.

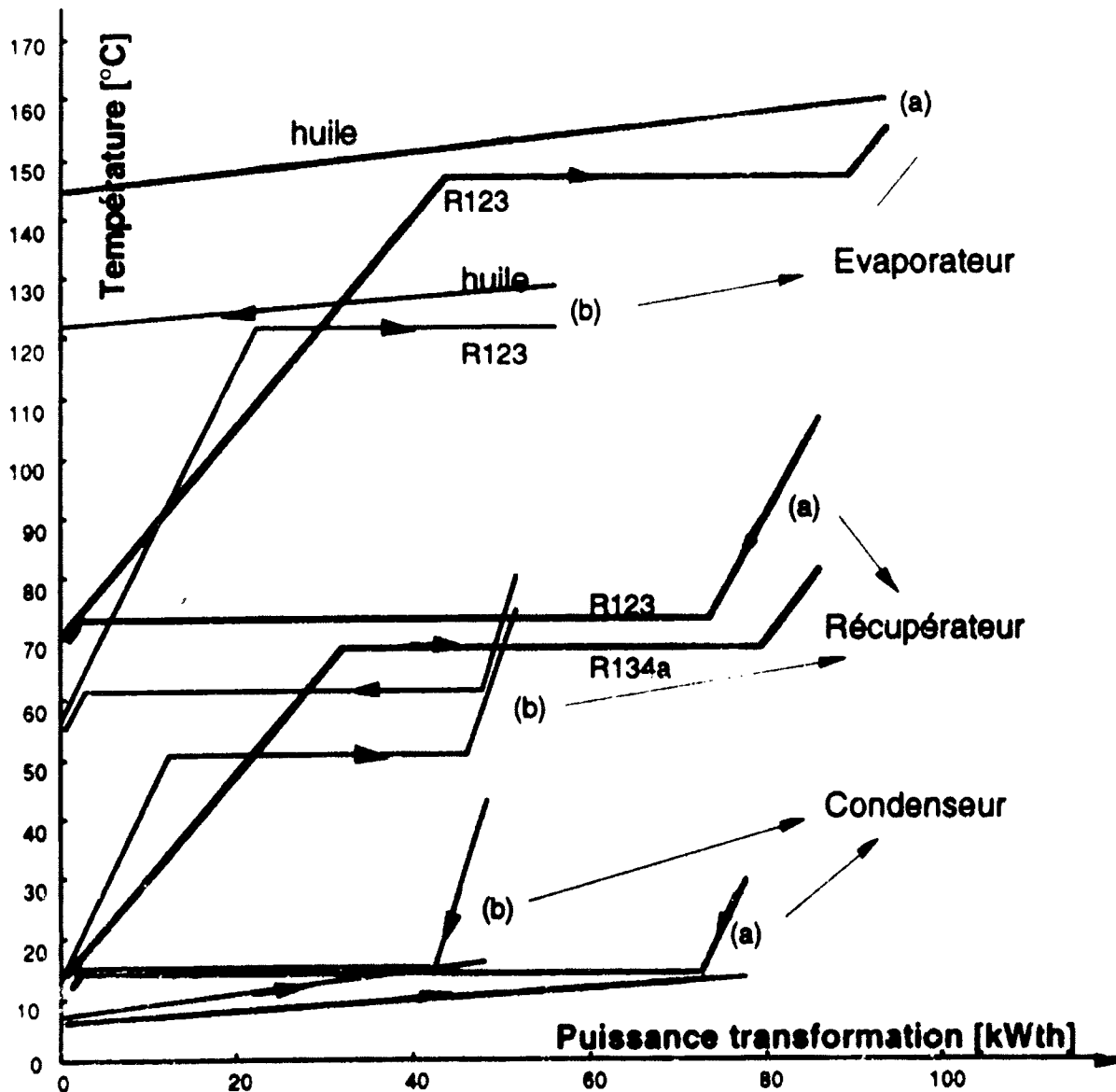


Figure 2 Diagramme température-puissance transformation (différence d'enthalpie) des principaux flux pour deux conditions de puissance: a) charge maximale des turbines (16 kW_e) et b) charge partielle (8 kW_e)

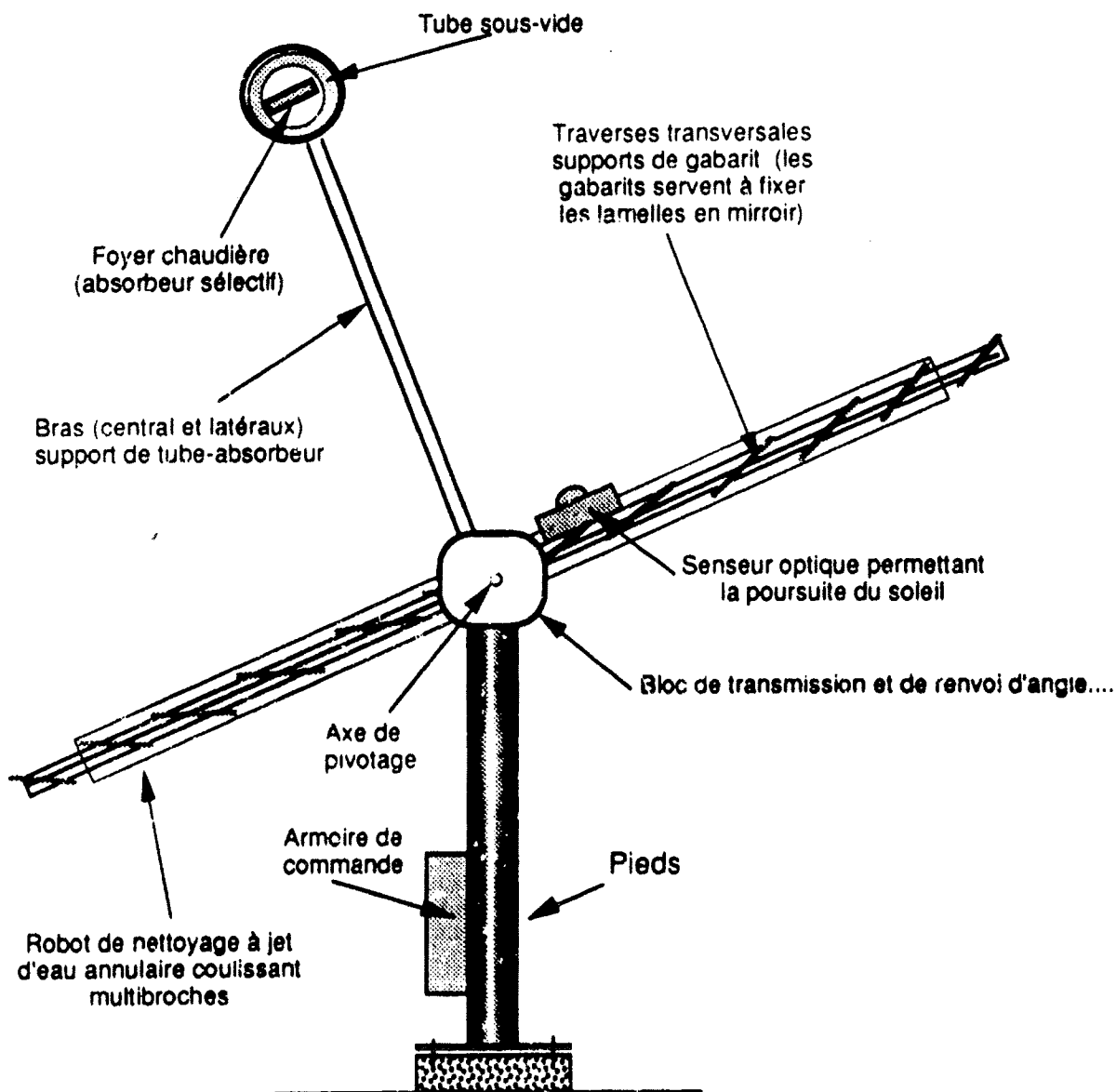
Capteurs extra-plats (CEP) à concentration

Nous proposons d'équiper la centrale de capteurs CEP d'une conception nouvelle (COGENER) par rapport aux phases précédentes du projet et avec un suivi (fig.3). Ce capteur comprend un support tubulaire, un plan réfléchissant orientable (suivi), un tube à ailette sous vide avec son support.

Le plan réfléchissant est constitué de lamelles réfléchissantes enclippées de façon à permettre un remplacement aisé et une flexibilité de tests ultérieurs de nouveaux matériaux en cas de nouvelles opportunités. Cette surface ouverte entre lamelles offre moins de prise au vent que les capteurs cylindro-paraboliques traditionnels ce qui est avantageux tant du point de vue de conception mécanique que de précision d'orientation.

Les tubes pourront eux-mêmes être aisément remplacés¹⁰. Ces tubes non satisfaisants au cours des essais du présent projet ont fait l'objet d'une nouvelle conception mettant en jeu, sous la responsabilité de COGENER, deux autres industries suisses de pointe et, bien que non encore testés, devraient permettre de répondre aux exigences requises.

MONTURE DU CONCENTRATEUR SOLAIRE CEP3



COGENER, AY, 15/6/97

Figure 3: Vue latérale d'une ligne de champ de capteurs

¹⁰ au cas notamment, où des essais sur de nouveaux tubes test entrepris en parallèle sur le stand de capteurs du LENI mis au point au cours du présent projet révélaient des progrès substantiels.

Dimensions retenues:

Concentration de "35 soleils" aux conditions nominales de design

Distance entre axe de tube et surface réfléchissante: 1.781 m

Largeur (hors-tout /active apparente) de la surface réfléchissante: 3.219m/2.62m

Nombre et largeur moyenne de lamelles réfléchissantes: 56 et 49 mm (moyenne car largeur effective est variable d'une lamelle à l'autre). Lamelles soit en sandwich de verre soit en polymère technique recouvert d'une couche de nitrure de titane

Diamètre (épaisseur) de tube de verre de qualité optique supérieure: 100mm (3.5mm)

Longueur de module de tube de verre: 4.8 m

Pression dans le tube de verre: 10^{-3} Torr

Largeur (longueur utile) de l'absorbeur en acier inox¹¹ avec revêtement sélectif¹²: 85mm (4.72m)

Huile thermique : Syltherm 800 (Dow)

Système de suivi: Atlantis AG

Site

La centrale prototype serait installée à l'EPFL sur un site à choisir entre le toit du laboratoire LENI, le parc scientifique deuxième tranche ou d'autres terrains attenants.

Performances d'exploitation annuelle

Des simulations effectuées par COGENER ont permis de définir les principaux paramètres de dimensionnement. Ceux-ci sont basés sur le classement et l'interprétation de données météo, de même que la paramétrisation du concentrateur. Ce programme développé par COGENER comprend les volets suivants:

1. La paramétrisation du concentrateur permet de dégager le taux de concentration requis en fonction de l'angle d'incidence des rayons solaires, ainsi que le décalage longitudinal de la tache focale sur le concentrateur. Cela permet de calculer l'énergie thermique réelle que le capteur peut produire à partir du gisement solaire local. La distance focale est aussi un paramètre de dimensionnement. Son influence sur le taux de concentration, de même que sur l'écart longitudinal de la tache, permet de dégager une valeur optimale de la distance focale. Pour chacun des paramètres modifiés, les caractéristiques géométriques du capteur sont calculés.
2. Un autre programme permet d'intégrer les valeurs météorologiques, afin de dégager les relations entre la puissance du gisement, l'angle d'incidence et le nombre d'heures pendant lesquelles ces paramètres se trouvent dans une même catégorie (classe). Le rayonnement¹³ est classé et pondéré en deux catégories principales selon que l'axe de rotation du champ solaire est choisi en direction Nord-Sud ou Est-Ouest. Les figures 2.2.1 et 2.2.3 montrent que pour le gisement local (données statistiques MétéoNorm pour Pully), la version Nord-Sud présente une ressource énergétique plus importante que dans l'autre cas.
3. Un couplage entre les deux volets précédents, de même qu'une intégration selon un modèle simple, à défaut d'une version complètement opérationnelle de "SolarPowerSystem", avec le cycle ORC¹⁴ et les turbines ont permis de dégager les performances envisageables pour divers choix dimensionnels.

¹¹ concent Energie solaire SA avec canal formé de tôles embouties garantissant une irrigation sur toute la largeur de l'ailette

¹² revêtement sélectif Noir de chrome-nickel résistant jusqu'à 250°C (testé)

¹³ A noter que le terme rayonnement correspond ici aux termes d'irradiance des nouvelles normes européennes

¹⁴ ORC = Organic Rankine Cycle (cycle de Rankine à fluide organique tel que proposé)

Courbes de distribution annuelles, sans IAM (MeteoNorm Pully)

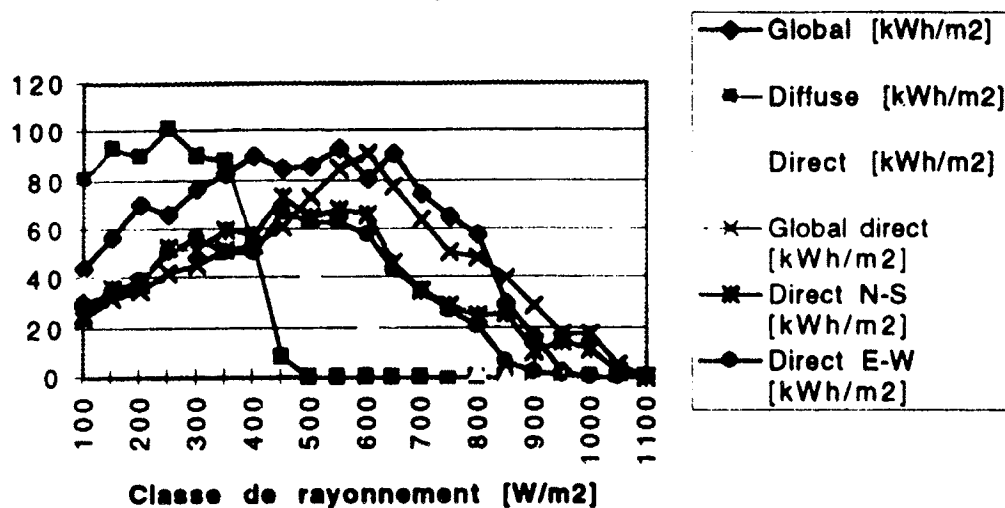


Figure 4: Courbes de distribution solaire annuelle en KWh /m² (non cumulé):
(rayonnement = irradiance, IAM= incident angle modifier,)

Global	Irradiation sur un plan horizontal tenant compte des rayons diffus et directs du soleil
Diffuse	Irradiation sur un plan horizontal tenant compte uniquement des rayons diffus.
Direct	Irradiation sur un plan horizontal tenant compte uniquement des rayons directs.
Global direct	Irradiation sur un plan suiveur, uniquement en tenant compte des rayons directs.
Direct N-S	Irradiation sur un plan mobile horizontal avec axe de rotation Nord-Sud, uniquement en tenant compte des rayons directs.
Direct E-W	Irradiation sur un plan mobile horizontal avec axe de rotation Est - Ouest, uniquement en tenant compte des rayons directs.

Courbes classées annuelles, sans IAM (MeteoNorm Pully)

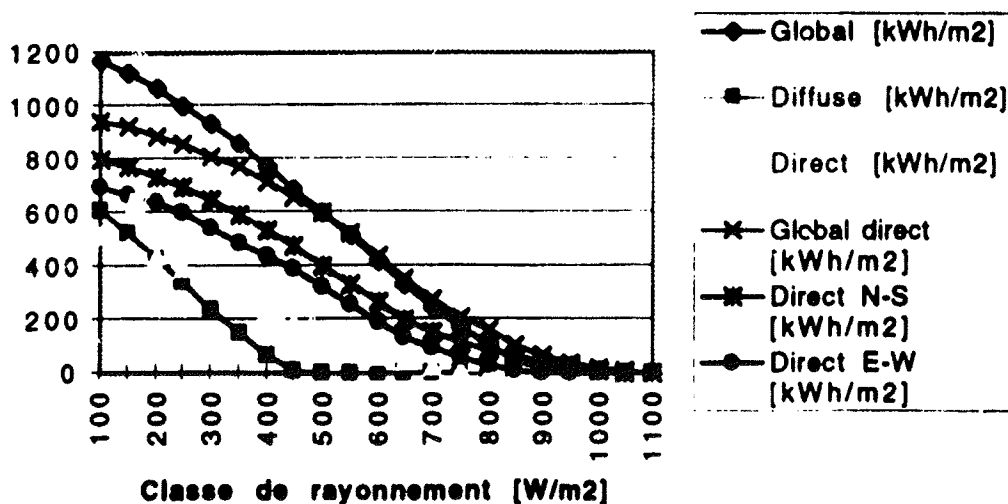


Figure 5: Gisement solaire annuel cumulé (en KWh/m²) en fonction de classes de rayonnement

Gisement solaire annuel [kWh/an]

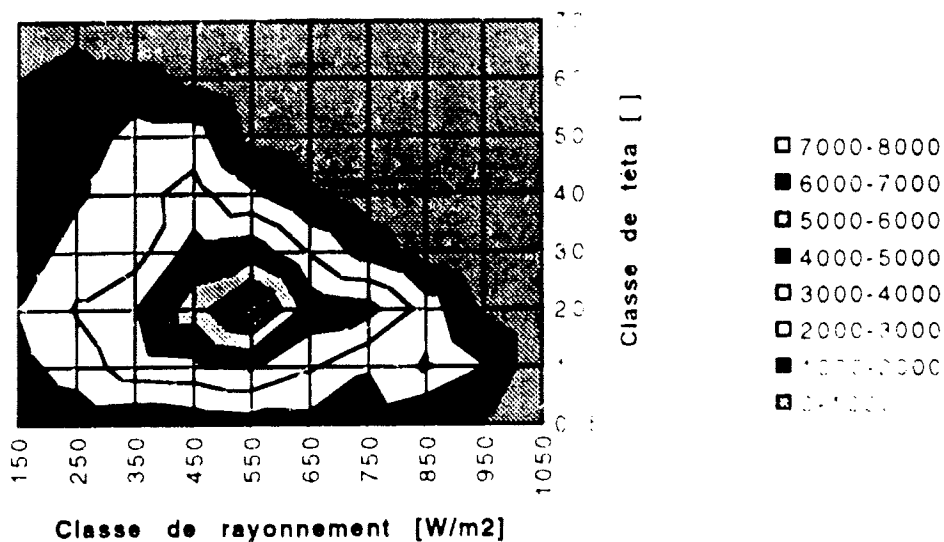


Figure 6. Gisement solaire annuel.

La figure 6 montre un maximum en ce qui concerne l'énergie annuelle pour la classe de rayonnement de 550 W/m² et pour un angle d'incidence entre 15 et 25°.

Les simulations intégrant les données précédentes donnent les résultats suivants, en fonction des différentes valeurs de design choisies.

Production spécifique annuelle [kWh/m²/an]

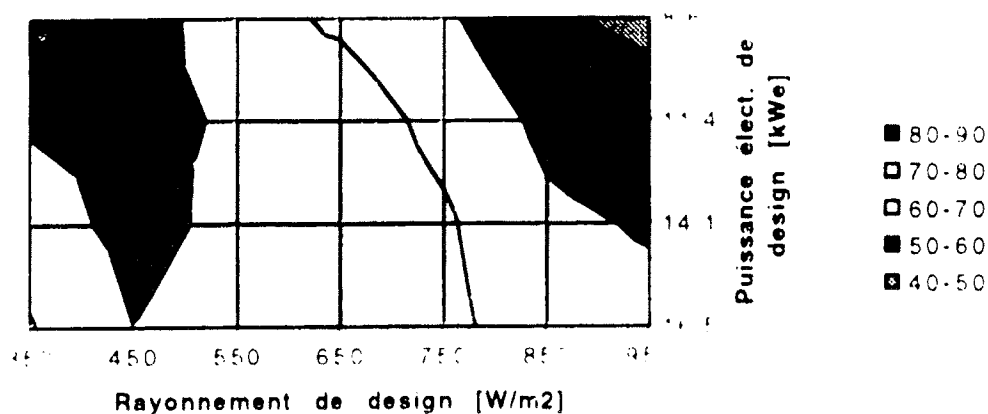


Figure 7. Puissance électrique et nombres d'heures.

Sur la figure 7 est représentée la production spécifique annuelle pour chacun de cas simulés. On voit que la production spécifique est maximale pour un rayonnement de design de 450 W/m². Pour chacune des puissances électriques de design simulées, la surface de captage est calculée et représentée dans le tableau 2.

Le tableau 2 donne un aperçu de l'énergie convertie en fonction de la surface du champ considéré pour les mêmes types de turbines:

Surface	Energie électrique annuelle	Energie électrique annuelle unitaire
m ²	KWh	KWh/m ²
263	21000	80
230	19200	83
194	16600	86
154	13150	85

Tableau 2 Energie électrique possible en fonction de la grandeur de champ solaire
mais pour le même groupe force

Sur cette base et afin de limiter les investissements requis pour la centrale prototype, proposition est faite de se limiter à 154 m² de capteur à distribuer en deux lignes parallèles d'orientation nord-sud et formant une épingle pour le circuit d'huile thermique (aller et retour à la centrale)¹⁵.

De ce choix de dimensionnement, il ressort les résultats des figures suivantes.

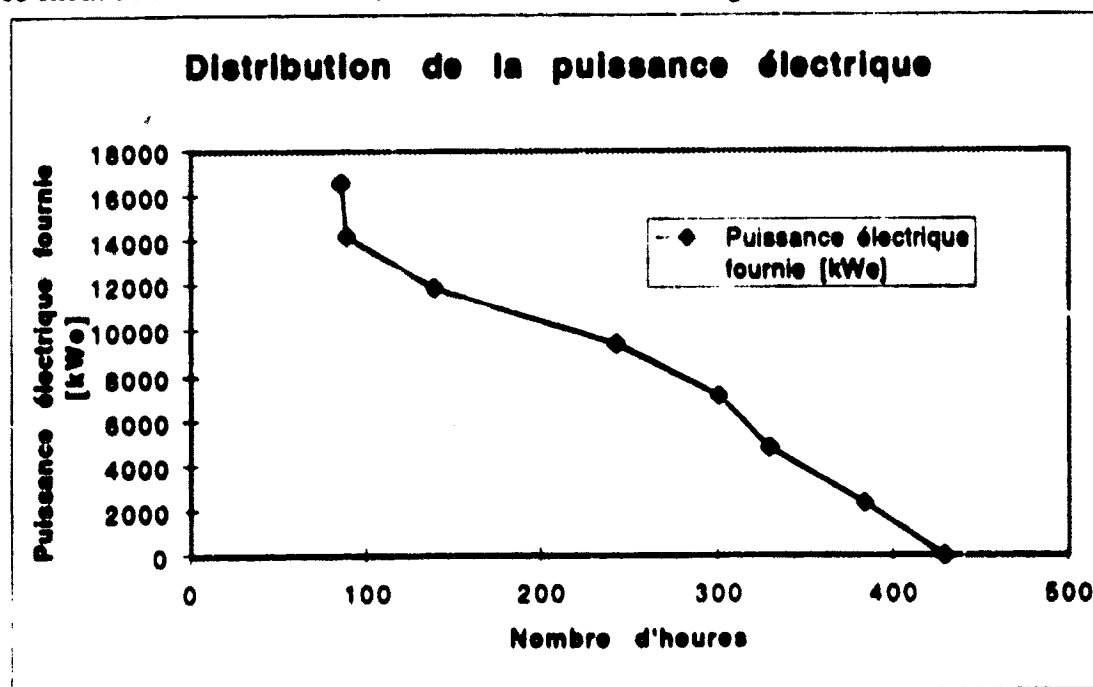


Figure 8: Distribution de la puissance électrique fournie

La figure 8 montre que la puissance électrique fournie est supérieure à 7 kWe pendant une période correspondant à la somme des points de cette tranche, soit 851 heures sur les 1994 exploitables au niveau du capteur. Le cycle ORC étant à considérer comme peu fonctionnel en continu et à vitesses de turbine fixes au dessous de cette puissance, il convient, soit de travailler en turbine à condensation ce qui est possible avec le nouveau système de lubrification envisagé mais pas encore démontré expérimentalement, soit de faire intervenir un stockage énergétique minimum pour utiliser les 1200 heures restantes en minimisant le nombre d'enclenchement.

¹⁵ Un calcul thermoeconomique plus complet incluant les pertes de charge du circuit d'huile est en cours mais pas encore complètement opérationnel.

déclenchement des turbines. Décision finale à ce propos sera prise au terme de la première phase. D'ailleurs sur les 13'000 kWh de production annuelle potentielle, la figure 9 montre que l'énergie produite, pour un rayonnement supérieur à 450 W/m², correspond déjà à environ 10000 kWh

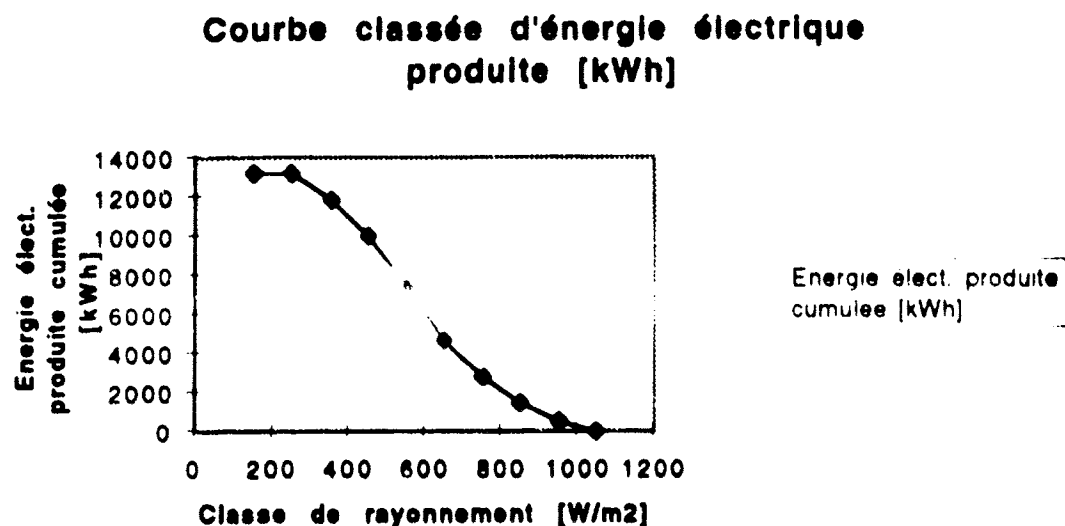


Figure 9 Courbe classée d'énergie électrique produite

Optimisation thermoéconomique

Différents modules de programme modélisant les différentes parties de la centrale avaient été réalisés au cours de la phase précédente. Il faudra noter que ces modules avaient essentiellement pour objectif de simuler le système existant par une étude paramétrique (avec uniquement comme paramètre, la température du collecteur). A cet effet, un programme appelé "SolarPowerSystem" a été mis sur pied et est toujours au stade du déverminage. Son but est d'optimiser le dimensionnement et la gestion de fonctionnement en tenant compte de tous les paramètres internes (surfaces d'échange, capacités des turbines) et externes (énergie solaire, température d'eau de refroidissement, etc.), des variables indépendantes sur lesquelles on peut agir pour bien régler la centrale (débits des deux fluides de travail, pressions de condensation) et des coûts des différents composants. Il comprend trois couches:

- une première couche de configuration et de prédimensionnement qui est essentiellement basée sur les essais de performance récemment faits sur la turbine et sur la caractéristique extrapolée du capteur CEP2. Il permet d'évaluer les surfaces d'échanges requises (échangeurs), celle du champ solaire et les marges de débits et de pressions de fonctionnement.
- une deuxième couche de gestion optimale est constituée d'un module d'optimisation intégré avec un module de résolution du cycle à charge partielle. Il détermine, pour des surfaces fixées et suite à une variation de la température du collecteur ou de la puissance solaire, les débits et pressions optimum de travail pour obtenir la puissance électrique maximale.
- une troisième couche de dimensionnement optimal, qui est la réelle couche de dimensionnement utilise un module dit "suiveur du rayonnement solaire" [3], le module de gestion optimale [4] et un module d'optimisation thermoéconomique [5]. Selon l'expérience acquise au niveau des équipements déjà commandés et avec l'aide de certains catalogues de prix, une fonction de coût est attribuée à chaque composante des cycles, le prix d'un m² de capteur étant évalué par COGENER. Un module de calcul de ces coûts intégrés dans cette couche de dimensionnement ¹⁶ optimal permet de fixer le prix du kW installé. L'intégration

[3] : à partir de fichier de type "Météonorme" pour un site donné

[4] : de la couche N°2 ci-dessus.

[5] : Module d'optimisation du dimensionnement tenant compte des coûts

annuelle des rayonnements, combinée avec le module de gestion optimale, permet de déterminer les performances annuelles de la centrale avec un coût minimum du kWh produit.

Coûts (en US\$ ou en %)

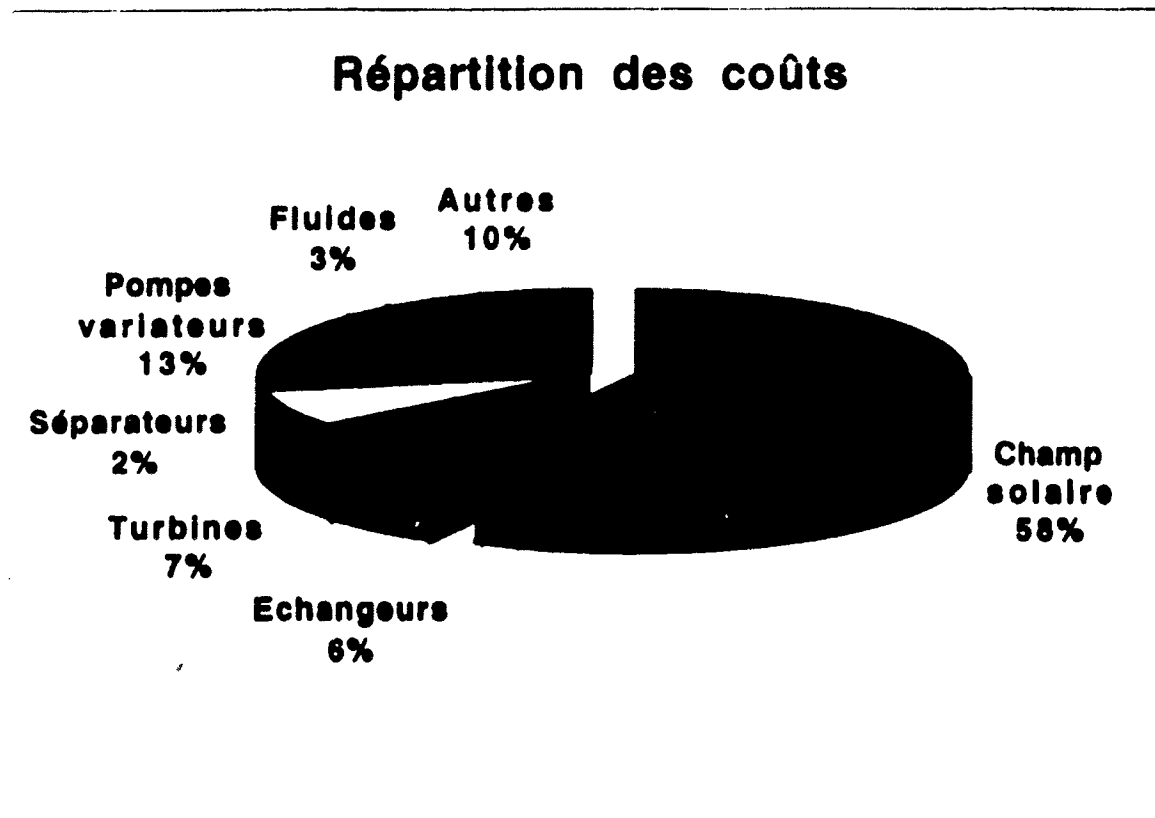


Figure 10: distribution relative des coûts (espérés) entre composants de la centrale

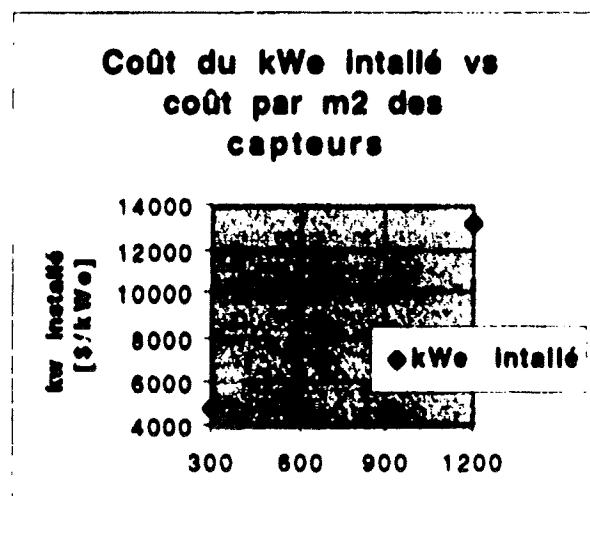


Figure 11: Coût spécifique d'investissement estimé d'une centrale de série en fonction des coûts de capteurs

Coûts (US\$)						
Champ solaire	Echangeurs	Turbines	Séparateurs	Pompes avec variateurs	Fluides	Autres
46000	4900	6000	1200	10700	2100	8300

Tableau 3: Estimation de coût des composants d'une centrale solaire (de série) de 16.5 kWel (154 m² de capteurs)
La distribution de coûts relatifs met clairement en évidence les principaux points à soigner dans le futur:

- Poursuivre les efforts de rationalisation des capteurs
- Augmenter l'efficacité des cycles de conversion (poursuivre les efforts vers des température de cycle encore plus élevées)
- Améliorer et rendre moins onéreuses les pompes de réfrigérant

Démarche proposée

La centrale proposée est d'abord une unité pilote qui constituerait une bonne installation de recherche. Elle doit permettre de lever un certain nombre d'inconnues pour une application à long terme. Il est donc souhaitable de réaliser le champ de capteurs avec un dispositif de suivi et avec un système conçu en une phase préliminaire suivie de trois phases principales. Les deux stands d'essai actuels (cycles en laboratoire et stand d'essai de module de capteur sur le toit du LENI) seraient conservés dans un premier temps pour des essais préliminaires ou annexes.

Phase préliminaire (août 97 - janv.98):

- Construction et test de nouveau tube sous vide (stand d'essai actuel sur le toit du LENI)
- Modification et test du nouveau concept de lubrification de turbine (stand d'essai actuel de cycles de Rankine à fluide organique avec chauffage à huile thermique au laboratoire du LENI)
- Construction et test fonctionnel d'un élément d'une ligne de capteur et test de rigidité et du système de suivi

Principales phases souhaitable du futur projet

Phase 1 (fév 98- sept 99):

- Construction d'une ligne complète de capteur
- Construction et test de la centrale complète avec:
 - Utilisation de l'huile comme fluide caloporteur dans les capteurs.
 - Cycles superposés.
 - Unités de turbines avec mélange réfrigérant-huile

ainsi qu'en parallèle:
au LENI:

- des essais préliminaires d'évaporation directe sur stand capteur et essais préliminaires de turbine sans huile sur stand laboratoire (synergie avec le projet NEFF de compresseur scroll sans huile)
- poursuite des développements de modélisation thermoéconomique en vue d'avoir un outil propre à optimiser des centrales sur une large gamme de puissance (5 à 200 kWel) intégrées ou non à une autre source (biomasse, etc.)
- test sur stand de turbine de type C avec rapport de volume installé supérieur et port de soutirage et essais avec entrée en vapeur humide
- tour de refroidissement

- essai sur stand d'autres fluides 245ca ou eau, ou butane au cycle BP,(3ème cycle superposé?)
- étude du couplage à un moteur chaleur-force de puissance électrique similaire

à COGENER

- Etude et essais des lamelles réfléchissantes
- Poursuite de l'optimisation thermoéconomique du capteur et de l'effort de rationalisation des choix techniques.
- Intégration du programme de COGENER d'étude de la statistique du gisement solaire, de l'optimisation et de la conception du CEP au programme SPS du LENI.

Phase 2 (oct 99- dec 2000):

- Evaporation directe d'un fluide organique du type HCFC dans la boucle supérieure
- Circulation directe dans les capteurs "once through" ou avec recirculation.
- Unités de turbines avec mélange réfrigérant-huile.
- Essais éventuels avec moteur chaleur-force avec, en parallèle,
 - Essais préliminaires de turbine sans huile mais à la vapeur d'eau et à des températures jusqu'à 220°C
 - Poursuite des développements de modélisation thermoéconomique

Phase 3:

- Evaporation directe d'un fluide organique du type HFC ou H2O dans la boucle supérieure.
- Circulation directe dans les capteurs "once Through" ou avec recirculation.
- Une unité de turbine (au cycle supérieur) sans mélange réfrigérant-huile

Vue d'ensemble

La figure 15 donne une vue d'ensemble de la centrale prototype projetée. Si, dans un premier temps les équipements de puissance sont logés dans une cabane afin de faciliter l'accès, il est envisageable à terme d'intégrer l'unité de puissance entre pieds de support d'une ligne de capteur pour rendre le tout plus compact.

Conclusions

Le concept de centrale solaire à cycle de Rankine de petites à moyennes puissances est réalisable et prometteur, compte tenu également des perspectives additionnelles d'application intégrée en centrale-chaleur force ou en mode hybride solaire - moteur ou solaire - biomasse par exemple. Les études préliminaires exposées dans ce rapport ont permis d'éclaircir les principaux points en vue de la réalisation d'une centrale prototype.

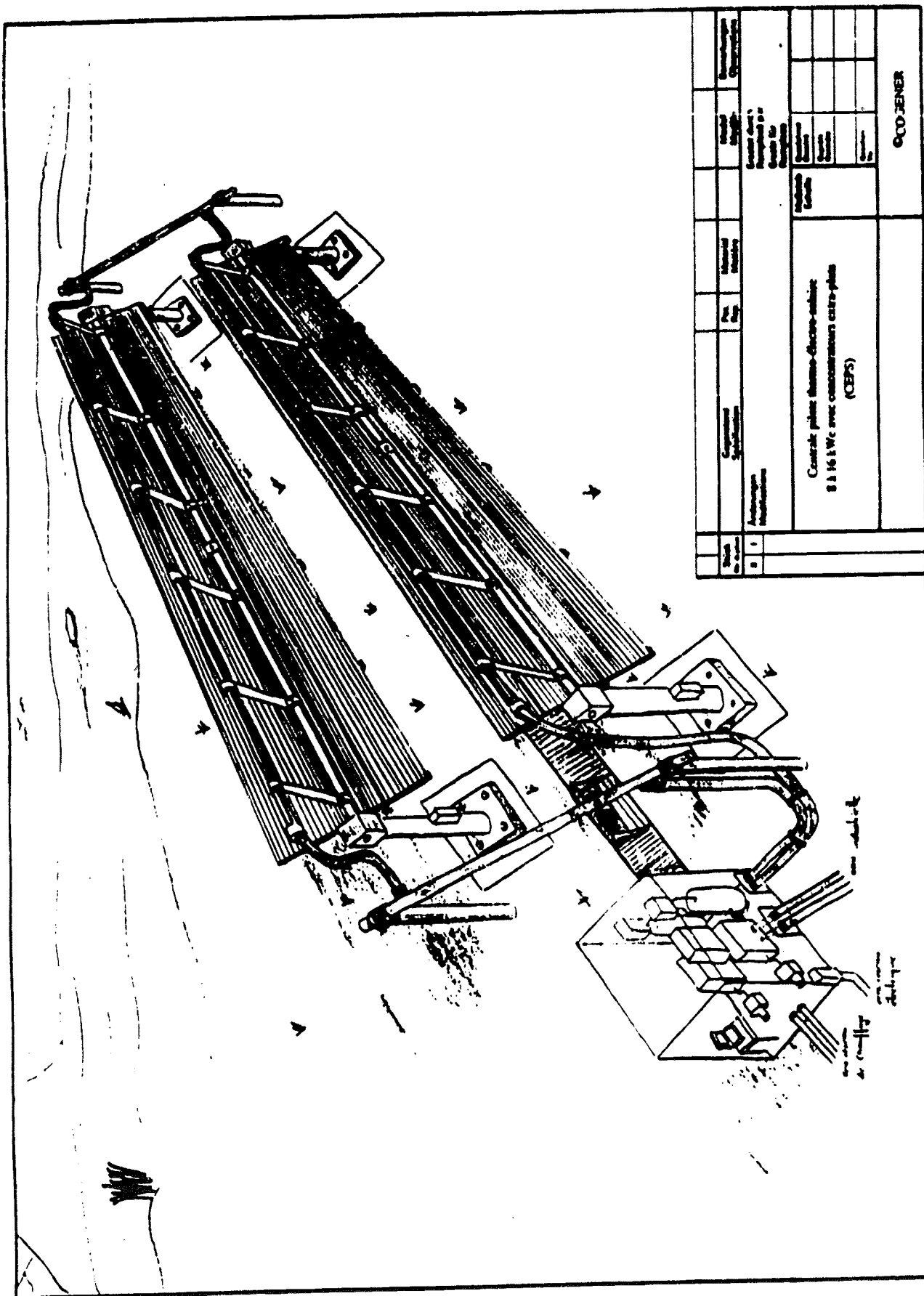


Figure 15: Vue d'ensemble de la centrale projetée