



**HAL**  
open science

# Thermodynamique irréversible appliquée à l'étude et l'optimisation du cycle de Rankine organique alimenté par l'énergie solaire

Téo Polimann

► **To cite this version:**

Téo Polimann. Thermodynamique irréversible appliquée à l'étude et l'optimisation du cycle de Rankine organique alimenté par l'énergie solaire. Génie des procédés. 2014. hal-01836138

**HAL Id: hal-01836138**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01836138v1>**

Submitted on 12 Jul 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



## AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : [ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr](mailto:ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr)

## LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

[http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

**Université POLITEHNICA de Bucarest**  
Faculté de Génie Mécanique et Mécatronique

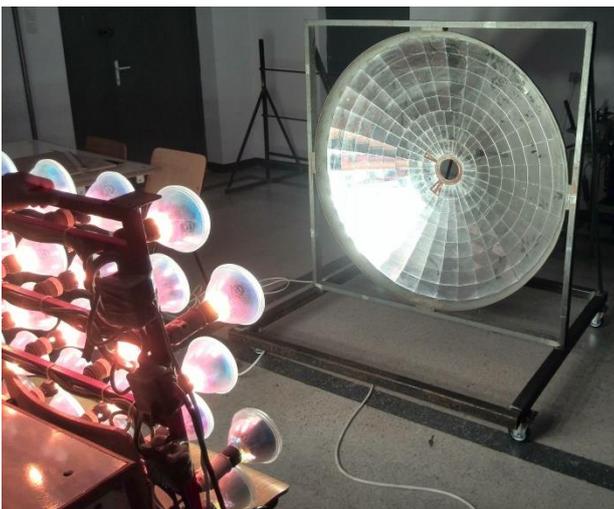
**Thermodynamique irréversible appliquée à  
l'étude et l'optimisation du cycle de Rankine  
organique alimenté par l'énergie solaire.**

**Irreversible Thermodynamic applied to the  
study and optimization of organic Rankine cycle  
powered by solar energy.**

**Téo POLIMANN**

II-ème année - Master Mécanique, Energie, Produits, Procédés

Université de Lorraine



Coordinateurs:

**Prof.dr.ing Monica COSTEA**

**Prof.dr.ing. Stoian PETRESCU**

**Ș.l.dr.ing Camelia STANCIU**

**Prof.dr.ing. Michel FEIDT**

**Session mercredi 3 septembre 2014**



# SOMMAIRE

NOMENCLATURE .....	5
I. INTRODUCTION GENERALE.....	7
II. PRESENTATION DU CYCLE DE RANKINE .....	10
a. LE CYCLE CLASSIQUE : .....	10
b. PARTICULARITE ENERGIE RENOUVELABLE.....	12
III. DOMAINE D'UTILISATION :.....	13
a. LA BIOMASSE .....	13
b. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE CENTRALE ORC A BIOMASSE.....	16
c. GEOTHERMIE .....	18
d. RECUPERATION DE CHALEUR FATALE .....	22
e. ENERGIE SOLAIRE.....	24
IV. LES DIFFERENTS TYPES DE CENTRALE SOLAIRE.....	31
V. CHOIX DU FLUIDE ORGANIQUE.....	36
VI. METHODE ANALYTIQUE D'ETUDE EN THERMODYNAMIQUE A VITESSE FINIE.....	39
a. INTRODUCTION.....	39
b. LOI DE LA THERMODYNAMIQUE EN VITESSE FINIE.....	41
c. EXEMPLE POUR L'ETUDE DE LA DETENTE A TRAVERS LA TURBINE.....	43
d. CONCLUSION .....	45
VII. CONCEPTION.....	47
a. ETUDE.....	47
b. REALISATION DU SUPPORT DE L'HELIOSTAT .....	56
VIII. RESULTATS EXPERIMENTAUX .....	60
IX. RESULTATS THEORIQUES .....	67
X. CONCLUSION GENERALE DE L'ETUDE.....	72
XI. OUVERTURE.....	73
BIBLIOGRAPHIE .....	76
ANNEXES .....	78
ABSTRACT AND KEYWORDS.....	99



## NOMENCLATURE

B	Coefficient comprenant les termes d'irréversibilité en TVF.
TVF	Thermodynamique en vitesse finie
TTF	Thermodynamique en temps finie
$W_p$	Vitesse du piston
S	Surface
$\alpha$	Absorptivité
$\varepsilon$	Emissivité
$\eta$	Rendement
f	Coefficient de friction
h	Enthalpie spécifique
c	Vitesse moléculaire
$C_p$	Chaleur spécifique
$C_v$	Chaleur spécifique
$\Delta P_f$	Chute de pression par friction
$\Delta P_{throt}$	Chute de pression par laminage
k	Coefficient d'adiabaticité
$\gamma$	Coefficient d'adiabaticité
$\lambda$	Conductivité thermique
P	Pression du fluide
$P_{gaz,m}$	Pression moyenne instantanée du gaz
$P_p$	Pression du piston
T	Température
$T_{m,i}$	Température moyenne instantanée
$T_{med,i-j}$	Température moyenne lors de la transformation i-j

$\rho$	Masse volumique
R	Constante des gaz parfaits
S	Entropie
s	Entropie spécifique
V	Volume
Tsat	Température de saturation
Psat	Pression de saturation
xv	Titre vapeur

# I. INTRODUCTION GENERALE

Dans le monde actuel, la problématique de la gestion énergétique est primordiale. En effet, la mondialisation dans son évolution rapide des populations accroît les demandes en énergie de façon exponentielle. Les industries, l'immobilier, les transports consomment de plus en plus les réserves naturelles fossiles, alors que leurs niveaux sont déjà extrêmement faibles. La nouvelle conquête du 21ème siècle est de pouvoir optimiser au mieux tous les systèmes existants et en découvrir de nouveaux plus propres. Cette transition énergétique doit s'inscrire dans une étape de développement durable, sociétale, environnementale et bien sûr économique. L'une des voies d'exploitation est « le vecteur chaleur ».

Les challenges :

- Meilleurs accès à l'énergie et de façon décarbonée (en prenant en compte les fluctuations journalières et saisonnières de la demande.)
- Prendre en compte des ressources énergétiques locales.
- Exploiter les grandes quantités de chaleur perdues dans la production d'électricité et les procédés industriels à haute et moyenne température.

On remarque que dans le monde, la chaleur est essentiellement produite par des combustibles fossiles. Une très grande quantité de chaleur est perdue sous forme d'effluents thermiques. Les pertes de chaleur dans la production électrique peuvent être réduites ou être utilisées à une autre fin par utilisation de la cogénération. Seulement 10% des installations sont équipées dans ce but. D'autres énergies (chaleurs naturelles) sont exploitables comme des ressources quasi-infinies et surtout gratuites comme la géothermie ou le solaire. Cette étude sera particulièrement centrée sur l'énergie solaire qui est le système employé à Bucarest pour différentes recherches thermodynamiques comme la nôtre.

La chaleur fatale correspond de la chaleur rejetée, inhérente à un procédé « chaud » et inévitable.

- Transformation de la matière : ciment, verre, métaux (acier, aluminium...)
- Production d'énergie : centrales thermiques (fioul, charbon, gaz), centrales nucléaires.

Cette chaleur fatale est caractérisée par la quantité de chaleur disponible. Le niveau de température et sa qualité (exergie) sont des facteurs décisifs de sa valorisation. Cette chaleur est également caractérisée par sa composition des effluents chauds, l'existence d'une température seuil et l'accommodation offre / demande.

Le niveau de température des effluents thermiques est un paramètre fondamental pour la récupération de la chaleur fatale. [1]

Limite basse	$T \geq 150^{\circ}\text{C}$
Limite moyenne	$T = 150^{\circ}\text{C} \text{ à } 650^{\circ}\text{C}$
Limite haute	$T \leq 650^{\circ}\text{C}$

*Department of Energy (USA)*

La conversion de cette chaleur peut se faire par 2 voies principales. Il s'agit d'une conversion directe (thermoélectrique, thermoïonique, piézoélectrique, photovoltaïque, thermique.) ou de conversion de chaleur en énergie mécanique qui actionne une génératrice électrique.

Différents coûts des systèmes de récupération pour produire de l'énergie électrique :

Conversion électrique Technologie de conversion	Gamme T	Source de chaleur récupérée (typique)	CAPEX
Cycle vapeur traditionnel	M, H	Echappement des turbines à gaz, fours, incinérateurs	950 €/kW
Cycle de Kalina	B, M	Echappement des turbines à gaz et chaudières, fours à ciment	1000 €/kW
Cycle organique de Rankine	B, M	Echappement des turbines à gaz et chaudières, fours à ciment	1000 à 2500 €/kW
Conversion thermoélectrique	M, H	Non démontré industriellement	15000 à 200000 €/kW
Conversion piézoélectrique	B	Non démontré industriellement	7 M€/kW
Conversion photovoltaïque thermique	M, H	Non démontré industriellement	Non disponible

Tableau 1 : Coût des énergies électriques

Echelle : Gamme T : gamme de température de la source chaude (B : Basse température ; M : Moyenne température ; H : Haute température). [1]

On remarque que le cycle ORC est très bien situé, et avec l'augmentation des prix de l'énergie fossile, son poids est devenu non négligeable. C'est pourquoi une multitude de laboratoires de recherche comme le laboratoire du LEMTA et celui de l'UPB (Université Polytechnique Bucarest) dirigent des recherches d'optimisation dans ces domaines prometteurs. Notre problématique, dans ce rapport, sera d'aborder l'étude du cycle organique de Rankine et ces variantes. En deuxième partie, nous aborderons le type de chaleur nécessaire pour faire tourner le cycle, le solaire en générale qui sera la base énergétique à Bucarest, la géothermie et la biomasse qui sont également les premières formes utilisées de développement possible à la réalisation d'un tel cycle. Par la suite, nous allons nous intéresser au choix particulier du fluide organique pour le cycle, ces différents critères de choix et les avantages et inconvénients de l'utilité de ces fluides à la capacité thermodynamique adaptée en fonction des zones de température exploitée. Nous finirons notre étude par une conclusion sur l'état de l'art thermodynamique ORC et sur le travail projeté.

## II. PRESENTATION DU CYCLE DE RANKINE

### a. LE CYCLE CLASSIQUE :

Ingénieur et physicien écossais né à Édimbourg et mort à Glasgow, William J. M. Rankine commence ses recherches par l'étude de la fatigue des métaux et son application aux essieux des locomotives (1843). S'intéressant ensuite aux propriétés thermodynamiques de la vapeur d'eau, il propose le cycle qui porte son nom et qui décrit les variations d'état de la vapeur dans une machine thermique. Ce cycle est surtout utilisé dans les cas où il y a condensation.

C'est Rankine qui a dégagé la notion d'énergie et fait la différence entre énergie potentielle et énergie cinétique. Le cycle de Rankine est un cycle thermodynamique moteur qui comprend deux isobares et deux adiabatiques. C'est le cycle qui se rapproche le plus du cycle de Carnot. Il se distingue de ce dernier par la substitution des deux transformations isothermes par deux transformations isobares qui rendent possible sa réalisation technique.

Dans le domaine des vapeurs condensables, ce cycle peut également s'appeler Rankine-Hirn, selon que la vaporisation est arrêtée à la sortie de la chaudière, ou qu'elle est prolongée par une surchauffe supplémentaire (point 5, cas de la turbine). La position de ce dernier point doit permettre d'accomplir la détente adiabatique ultérieure 5-6, à l'abri de toute manifestation de condensation. En effet, la vitesse généralement considérable atteinte par la vapeur au cours de sa détente provoquerait fatalement une dangereuse abrasion du métal des parois par suite de la projection violente des gouttelettes engendrées.

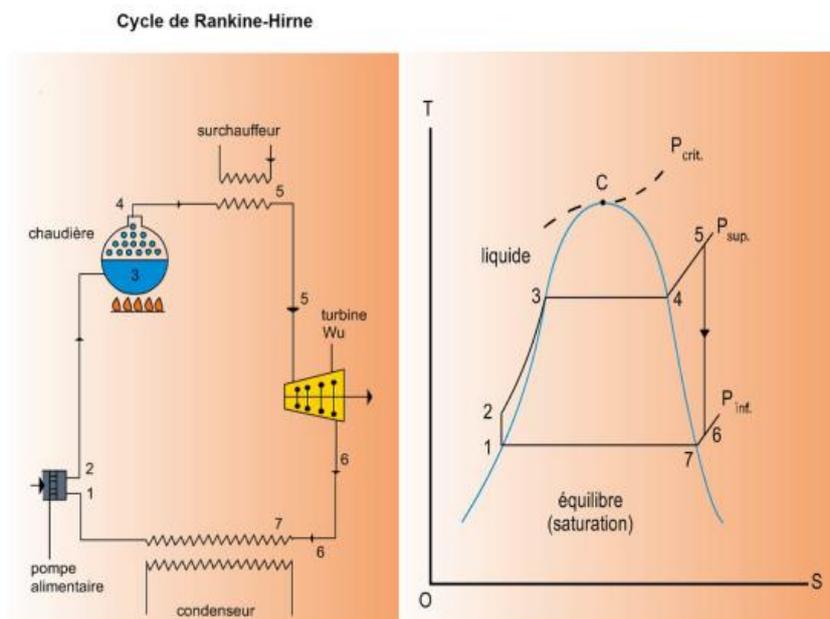


Schéma 1 : principe du cycle et digramme T-S [2]

Dans le cas fréquent où le volume spécifique du liquide est négligeable devant celui de la vapeur en équilibre, le travail utile de compression ( $V_{\text{liq}} \Delta p$ ) par unité de masse, consommé par la pompe d'alimentation de la chaudière, l'est également. Dès lors, les points 1 et 2 de la figure sont régulièrement confondus dans les diagrammes usuels (superposition du réseau des isobares de l'état liquide à la courbe limite de la zone d'équilibre  $x = 0$ ). Les conséquences du premier principe confèrent aux accroissements d'enthalpie, des propriétés énergétiques essentielles, telles que la mesure de la chaleur échangée avec le milieu extérieur le long d'un arc d'isobare, la mesure du travail utile ou celle d'un accroissement d'énergie cinétique, le long d'un tronçon d'adiabatique. Ces diverses propriétés ont largement contribué à mettre en valeur l'intérêt du diagramme enthalpie – entropie  $H, S$ , de Mollier, où ces accroissements sont directement mesurés par de simples différences d'ordonnées. Il possède de surcroît l'avantage de permettre la représentation graphique des propriétés des mélanges. En effet, les différents mélanges de composés organiques pour définir le fluide de fonctionnement sont également directement lisibles sur le diagramme T-S ainsi que pour l'optimisation du cycle, l'exergie et les différentes irréversibilités sont lisibles directement. Cela nous permettra de les comparer rapidement face à la référence du cycle de Carnot.

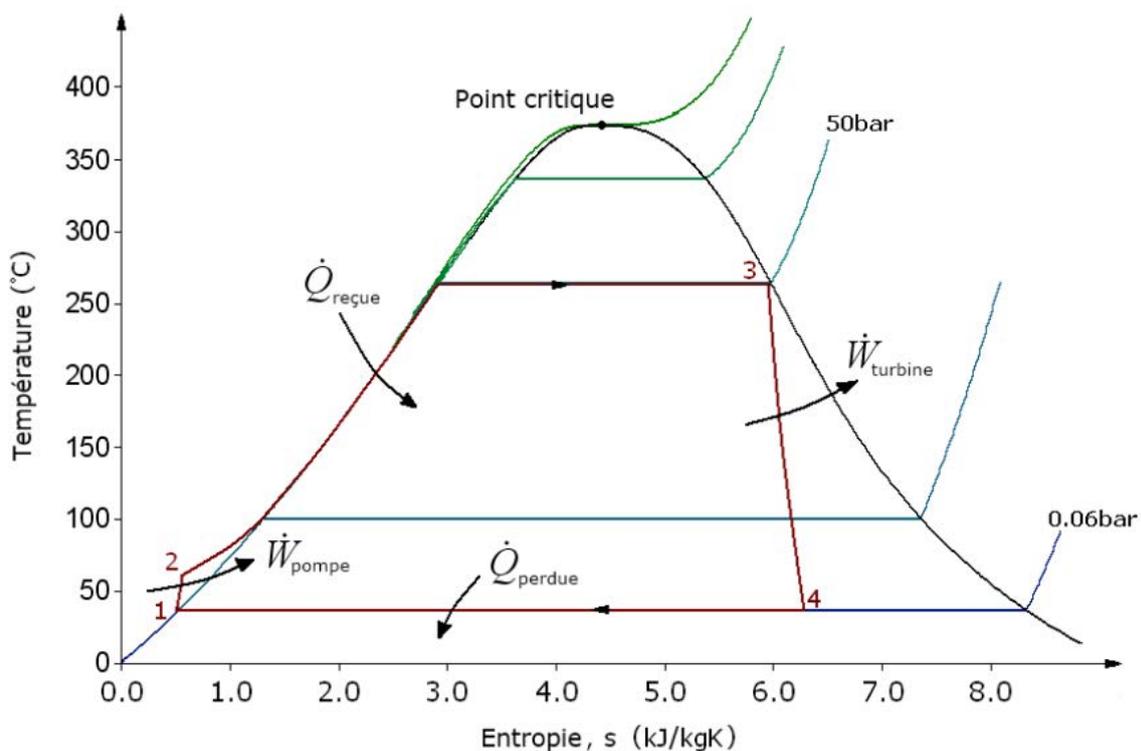


Figure 1 : Diagramme T-S cycle de Rankine classique [3].

Le cycle, parcouru dans le sens moteur, est composé des quatre transformations suivantes :

1→2 : Compression adiabatique et réversible (isentropique).

2→3 : Vaporisation isobare et irréversible.

3→4 : Détente adiabatique et réversible (isentropique).

4→1 : Liquéfaction isobare.

L'évaporation isobare du fluide peut être divisée en deux étapes successives : chauffe du liquide de façon isobare uniquement puis évaporation isobare et isotherme.

## b. PARTICULARITE ENERGIE RENOUVELABLE

Le cycle de Rankine a besoin d'une source chaude et d'une source froide pour fonctionner. Sa particularité est que grâce aux propriétés thermodynamiques du fluide organique, le cycle peut fonctionner avec des sources de température plus faibles que le cycle classique. En effet, ces fluides ont l'avantage de pouvoir changer d'état avec des écarts de température et pression beaucoup plus minces que pour l'eau. Leurs cloches sur le diagramme entropique sont très fines. Et c'est exactement ces exceptionnelles propriétés que nous allons exposer.

Nous ne pouvons parler d'énergie renouvelable sans évoquer la connexion obligatoire des procédés énergétiques. Par conséquent, notre étude portera forcément sur une cogénération pour la production d'eau chaude sanitaire. Les rendements sont indéniablement liés à l'utilisation de la totalité de l'énergie captée.

Dans cette partie nous allons nous intéresser aux différentes applications du cycle de Rankine avec l'utilisation des énergies renouvelables.

### III. DOMAINE D'UTILISATION :

## Applications



Biomasse



Cogénération



Géothermie



Solaire



Récupération  
de chaleur

#### a. LA BIOMASSE

##### i. Introduction :

Les centrales biomasses sont des centrales où l'on produit de la chaleur par la réaction de combustion de matière organique. Elle englobe plusieurs systèmes complexes, du système le plus simple qui implique de faire brûler du bois, à des systèmes complexes de gazéification où un gaz avec un PCI relativement élevé est utilisé ou encore la pyrolyse (de déchets ultimes comme par exemple les déchets d'hôpitaux) ou la carbonisation où l'on récupère du charbon. Tous ces procédés produisent une grande quantité d'énergie chaleur. Si la gestion de nos forêts et des ressources exploitables du sol est maîtrisée, nous pouvons par ce schéma d'équilibre utiliser les produits de l'environnement pour contrôler notre émission de surplus de dioxyde de carbone. En effet, si, par exemple, les déchets des scieries sont valorisés par ce procédé, en replantant le même nombre d'arbres qui a été consommé, nous pouvons, par le phénomène de photosynthèse équilibrer naturellement la concentration en carbone de la planète.

La maxime « Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme » attribuée à Lavoisier, qui est simplement la reformulation d'une phrase du philosophe grec Anaxagore : « Rien ne naît ni ne périt, mais des choses déjà existantes se combinent, puis se séparent de nouveau » est ici la pensée directive à adopter pour que plus aucun impact ne soit oublié à long terme. Pour l'instant, les installations ORC sont exploitées principalement en Italie, Autriche, Suisse

et en Allemagne. La majorité de ces installations utilisent la biomasse forestière comme carburant solide. La biomasse est la première source d'énergie renouvelable en France. En Roumanie, celle-ci est également présente en grande quantité. Une multitude de projets d'exploitation de la biomasse voient le jour pour pouvoir augmenter la part de production d'énergie renouvelable. Nous pouvons citer par exemple le projet de valorisation de la sciure de bois mis en œuvre dans le village de Tasca (région de Bucovine-Moldavie) ; il fait appel à une technique moderne de combustion qui a permis de trouver une solution à deux problèmes : l'un, écologique, posé par le rejet non contrôlé de déchets de scierie et l'autre, énergétique, à savoir l'approvisionnement en chaleur du village de Tasca et de sa population.

La biomasse est une ressource disponible en quantité et est particulièrement adaptée à la production d'énergie renouvelable sous forme d'électricité et de chaleur dans de petites centrales ORC de cogénération.

Ces types d'installations permettent :

- Le développement des industries du bois dans les territoires ruraux et forestiers.
- La sécurisation de l'approvisionnement en électricité d'un territoire et la réduction des besoins en lignes de transmission électrique en offrant une production décentralisée.
- Une solution de débouchés locale, pérenne et sécurisée pour l'industrie du bois et la sylviculture.
- Une optimisation des rendements énergétiques des scieries en valorisant au maximum la chaleur produite (séchage des produits, production de granulés de bois).
- La création d'emplois locaux dans l'exploitation de la centrale ORC et dans la filière d'approvisionnement en combustible.

Pour qu'une centrale à la biomasse soit exploitée pour une utilisation quotidienne, il est essentiel qu'elle livre une disponibilité élevée et que les frais de fonctionnement et d'entretien soient aussi faibles que possible. Dans de nombreux cas, les centrales ne sont pas exploitées par les producteurs d'énergie mais bien par des entrepreneurs qui souhaitent exploiter à des fins de cogénération leurs matières résiduelles en plus de leur corps de métier. Il est donc

particulièrement important que la centrale soit autonome et nécessite peu d'attention. Les centrales ORC offrent cette possibilité, car elles peuvent être exploitées sans surveillance constante. Bien entendu, l'efficacité est également déterminante puisque cela détermine la consommation de carburant, et ainsi le temps de retour sur investissement du système. Pour les puissances électriques de moins de 2 MW, les centrales ORC s'avèrent plus efficaces que des turbines à vapeur conventionnelles.

Cette solution de cogénération électrique industrielle est alimentée par des résidus de parterre de coupes forestières, de copeaux de bois, de copeaux de cultures énergétiques et/ou de déchets ultimes triés (gazéification). Pour son application à la cogénération à partir de biomasse, on utilise un caloporteur (huile thermique) et un fluide organique de travail. La plupart du temps un échangeur récupère la chaleur produite par la combustion directement ou (et) la chaleur des fumées avant de les rejeter à l'atmosphère. Cela augmente considérablement le rendement global de la centrale conventionnelle. Les fumées de combustion de biomasse produites par la chaudière étant à un niveau thermique relativement élevé, il est généralement souhaitable de prévoir une valorisation énergétique de ces dernières, comme une production d'eau chaude et/ou un préchauffage de l'air de combustion supplémentaire.

La taille des installations ORC, moins de 2MWe, et leur disponibilité très élevée (plus de 92% soit plus de 8000h/an), permet d'envisager de nombreuses implantations sur le territoire pour soutenir le réseau électrique et limiter les pertes liées au transport de l'électricité sur de longues distances.

## b. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE CENTRALE ORC A BIOMASSE

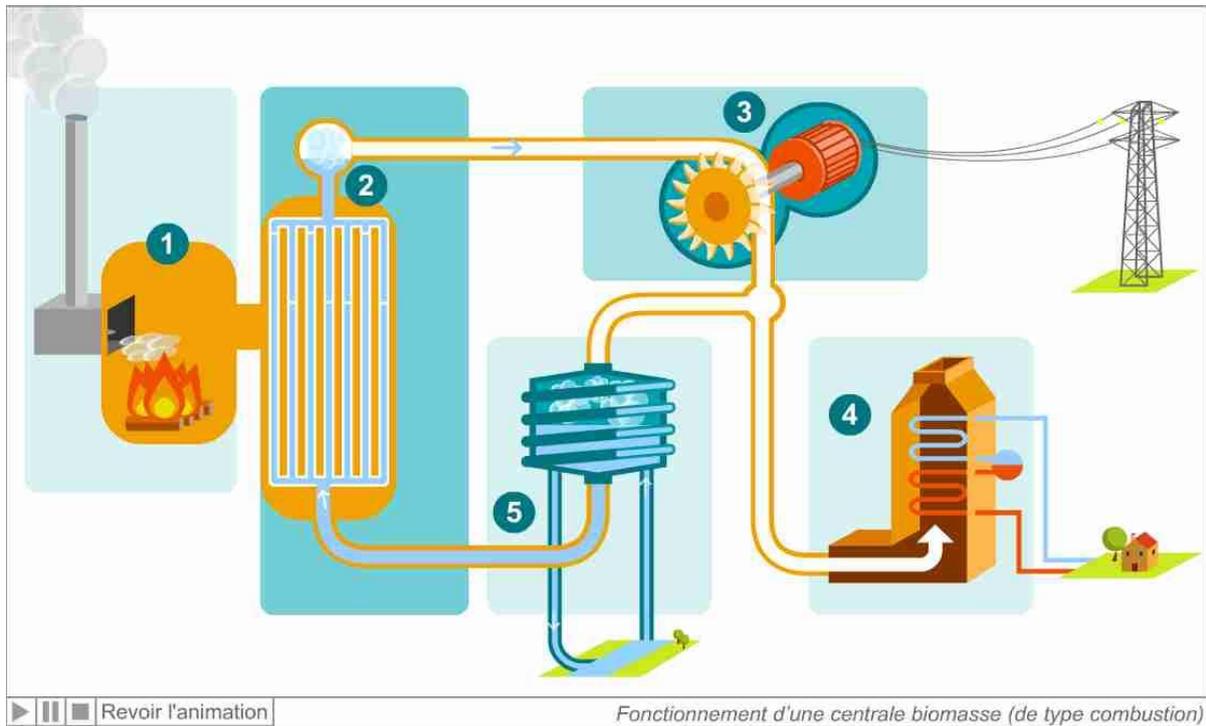


Figure 2 (source : site [www.enseignants.edf.com](http://www.enseignants.edf.com))

Dans une telle installation, la biomasse est brûlée dans une chaudière à huile. L'huile chauffée à 320-330°C, alimente le module ORC et permet la vaporisation du fluide organique. Une deuxième boucle d'huile thermique à plus basse température est généralement installée en parallèle pour optimiser la récupération de l'énergie thermique sur les fumées de combustion et ainsi augmenter le rendement de la chaudière biomasse : on atteint ainsi des efficacités supérieures à 85% selon le premier principe.

Les chaudières à huile possèdent des avantages indéniables comme leur compacité, l'absence de parties sous pression (l'huile est liquide à quelques bars même à plus de 300°C) et une automatisation qui permettent de limiter les heures de surveillance de la centrale ORC. Ainsi, l'exploitation de l'installation complète, module ORC et chaudière à huile, ne nécessite pas la présence permanente d'un opérateur comme dans le cas d'une centrale vapeur classique.

La boucle de fluide organique fonctionne entre 280 et 120°C. Cette configuration permet d'obtenir de l'eau chaude à 90°C au niveau du condenseur (l'eau revenant à une température de 60-70°C). L'énergie thermique disponible dans cette boucle d'eau chaude peut alors être valorisée dans un réseau de chaleur urbain par exemple ou pour du séchage de granulés. Ces types d'installation de cogénération peuvent alors atteindre des efficacités

(énergie thermique valorisée + énergie électrique / quantité de biomasse brûlée \* PCI de la biomasse) supérieures à 75%.

### La biomasse une valorisation des déchets, mais pas n'importe lesquels !

La biomasse est selon l'article 19 de la loi de programme relative à la mise en œuvre du Grenelle Environnement la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales issues de la terre et de la mer, de la sylviculture et des industries connexes ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et ménagers. Dans la plupart des installations ce sont des résidus, des plaquettes de déchets de scierie ou de bois en fin de vie.

### Avantages / Inconvénients

La cogénération par cycle organique de Rankine présente plusieurs avantages non négligeables.

L'huile thermique, aux environs de 300°C, est sous forme liquide à pression atmosphérique, ce qui réduit les dangers et donc les coûts de l'installation. Comme son inertie thermique est importante, le fonctionnement est peu sensible aux variations de charge de la chaudière.

Les composés organiques ont généralement une masse moléculaire plus élevée ce qui permet également une efficacité élevée de turbine. Un autre avantage des composés organiques est le fait qu'ils n'ont pas besoin d'être surchauffés ce qui limite l'érosion et la corrosion des aubages. Cependant, un système de détection de fuites est recommandé car ces composés organiques sont inflammables.

La turbine tourne à faible vitesse (3000 tr/min) ce qui permet de la coupler directement à l'alternateur, sans réducteur de vitesse intermédiaire.

Avantages : Valorisation énergétique de la biomasse (sous-produits forestiers et industriels)  
Réduction des émissions de gaz à effet de serre  
Production simultanée d'électricité et de chaleur  
Cycle ORC utilisable en continue

Contraintes : Mobilisation de la ressource en biomasse dans le cadre d'une gestion durable  
Nécessité d'utilisation des rejets thermiques pour une cogénération  
Température qui peut varier en fonction de la composition des déchets et leur humidité.

EXEMPLE DU MODUL TURBODEN voir l'annexe numéro 1

### c. GEOOTHERMIE

La géothermie est une énergie dite du sol. La chaleur sous terre augmente plus l'on creuse (en moyenne de 3 K par 100 mètres de profondeur). C'est l'exploitation de la chaleur stockée dans la croûte terrestre depuis des millions d'années. Cette énergie thermique est disponible lorsque la roche est suffisamment friable et donc gorgée d'eau. Car c'est la plupart du temps l'eau qui est utilisée pour réaliser la captation thermique.

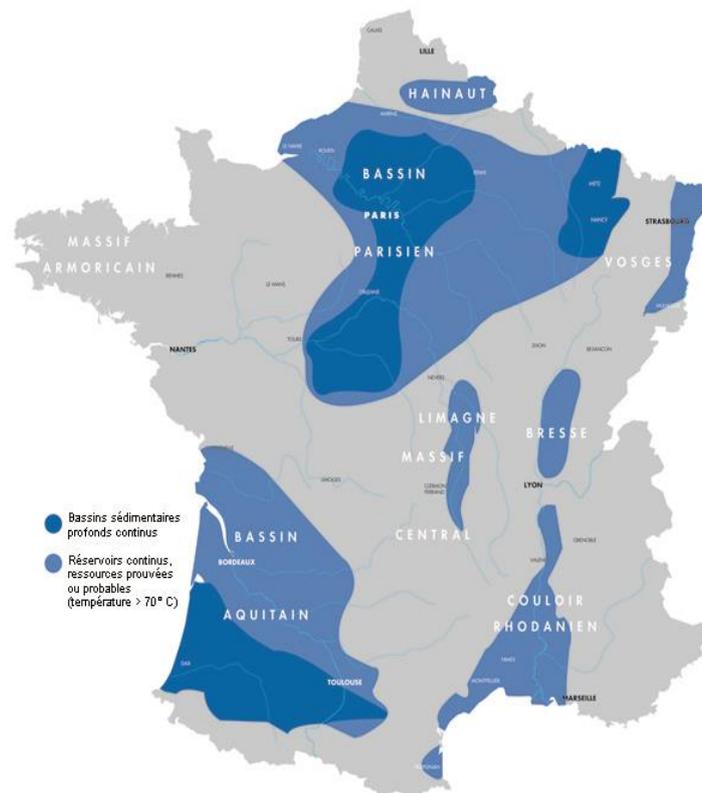
La géothermie est considérée comme inépuisable, mais il faut bien comprendre que si l'on effectue une extraction plus vite que le temps de régénération du flux de réchauffement de la croûte terrestre (flux solaire et dégradation thermonucléaire naturelle) il risque d'y avoir un déséquilibre catastrophique. Mais ce scénario est loin d'être atteint car la géothermie profonde dépend des sources internes de la terre qui sont chiffrées à une durée de vie en milliards d'années et la géothermie de surface dépend directement des apports solaires.

Cette énergie est en général diffuse et rarement concentrée, avec un flux moyen de 0,1 MW/km<sup>2</sup> et un niveau de température faible. La puissance exploitable économiquement est donc en règle générale réduite. Il arrive cependant qu'elle soit plus concentrée à proximité des failles tectoniques entre plaques terrestres, en particulier des formations volcaniques ou encore dans des formations géologiques favorables, comme dans le Bassin parisien. C'est pourquoi il faut distinguer plusieurs types d'utilisation de la géothermie suivant ses caractéristiques locales:

- la géothermie de surface à basse température: 5C°-15C°,
- la géothermie profonde 50C°-95C°, jusqu'à 2 000 m de profondeur,
- la géothermie très profonde à haute et très haute température, jusqu'à 10 000 m
- la géothermie volcanique de type geysir.

Son exploitation durable implique un débit d'extraction d'énergie limité au flux de chaleur alimentant la ressource, à défaut de l'épuiser pour une certaine période et ce même si certains sites géothermiques peuvent atteindre jusqu'à  $0,2 \text{ W/m}^2$ .

SOURCE EN FRANCE



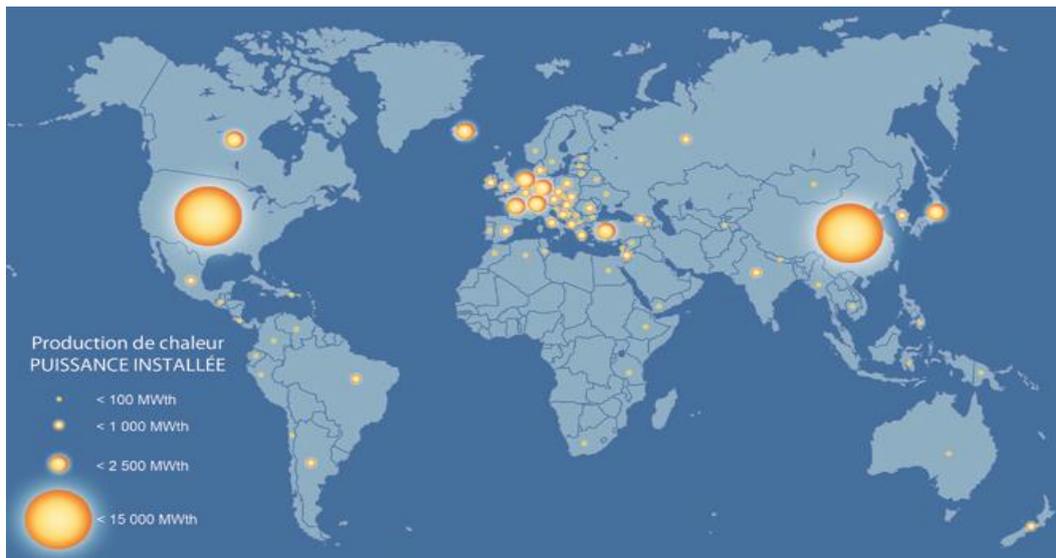
Carte des sources possible de géothermie en France. [4]

Utilisation dans le monde :

On peut se douter que son utilisation est très faible par rapport à la disponibilité de cette énergie dans le monde. Ces installations nous intéressent fortement. Elles pourront par leurs différentes températures similaires à notre cas solaire ainsi utiliser les données des différents cycles ORC déjà établis dans ce domaine. La géothermie est néanmoins beaucoup plus utilisée pour la valorisation thermique directe, l'utilisation pour la climatisation (chaude ou froide couplée à une pompe à chaleur) pour l'habitat que la production électrique.

Pour que la production électrique soit rentable actuellement, il faut pour le moment utiliser les sources hydrothermales (eau chaude ou vapeur) ou la température demeure relativement élevée. L'utilisation des sources pressurisées et des roches fracturées est encore à l'étude mais ces sources ont un très fort potentiel. Les sources hydrothermales sont elles-

mêmes séparées en deux catégories : les sources à haute et basse énergie. Les sources à haute énergie caractérisées par des hautes températures (plus de 200°C) et des pressions élevées se situent en général à proximité de zones fortement sismiques ou volcaniques (Philippines, Indonésie, Amérique centrale, l'Ouest de l'Amérique du Nord). Les sources à basse énergie, les plus abondantes, sont situées dans les bassins sédimentaires profonds (Europe, Canada, Alaska).



Carte du monde des productions de chaleur en MWh.

Les sources hydrothermales contiennent de la vapeur généralement sèche qui est utilisée directement dans un cycle vapeur classique. Si celui-ci est humide on appelle ce mélange de la brine (mélange vapeur-liquide). La vapeur est flashée : ce procédé abaisse la pression du mélange vapeur-brine pour séparer la vapeur et l'envoyer directement dans la turbine. La brine est elle, réinjectée dans le réservoir et n'est pas utilisée. Mais bien souvent les sources de moyenne et basse énergie ne disposent pas de titre vapeur supérieur à 30 % et donc dans ce cas cela n'est pas intéressant de flasher la vapeur-brine pour un cycle vapeur classique.

Les modules ORC sont utilisés pour valoriser ces dernières sources mais aussi le brine des sources à haute énergie. On appelle ce type de centrales des « centrales à cycle binaire », pour préciser que nous sommes en présence de 2 fluides : l'eau liquide/ vapeur et le fluide organique du cycle ORC.

Les modules ORC les plus puissants à l'heure actuelle sont installés sur des sources géothermiques flashant la vapeur (Philippines, Kenya...).

Le projet européen Low-Bin débuté en 2003 vise à produire de l'électricité à partir de sources de chaleur à très basse température (moins de 100°C). Le consortium comprend :

- Des universitaires roumains, italiens et portugais
- Un bureau d'études autrichien
- Des scientifiques islandais, allemands et français (le BRGM)
- Et le constructeur italien Turboden

Le module ORC développé au cours de ce projet utilise un réfrigérant appelé R134a dont les caractéristiques permettent la valorisation de sources à très basse température. Le prototype d'une puissance de 200kW est installé à Simbach-Brunau (à la frontière de l'Allemagne et de l'Autriche) et valorise une source géothermique à une température de 76°C. [6].

La première démonstration d'une centrale à cycle combiné a été réalisée en 1967 en Russie. Elle fut introduite aux États-Unis en 1981 à la suite de la crise de l'énergie de 1973 et de changements substantiels des politiques réglementaires. Cette technologie permet d'utiliser des ressources de bien plus faibles températures que celles qui étaient auparavant récupérables. En 2006, une centrale à cycle combiné à Chena Hot Springs en Alaska entra en service, produisant l'électricité à partir d'une température de fluide historiquement basse de 57°C.

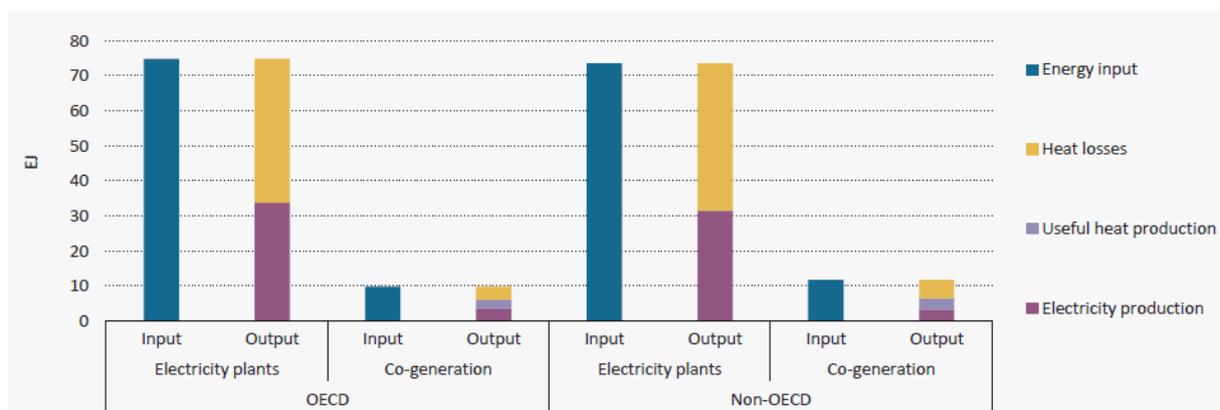
#### d. RECUPERATION DE CHALEUR FATALE

L'un des systèmes ORC les plus intéressants (d'après moi) du point de vue énergétique est la récupération de la chaleur issue de différents procédés industriels (Four, refroidissement, Cowper, Cokerie). Les procédés impliquant des hautes températures sont :

- La conversion de l'énergie, impliquant la production de vapeur surchauffée
- Les fours à ciment (1400°C)
- La réduction du minerai de fer (1250°C)
- La stérilisation dans l'industrie agroalimentaire
- Les procédés de séchage.

Une grande partie de la quantité de chaleur est perdue sous forme d'effluents thermiques. Une première piste serait une cascade thermique, pour utiliser cette chaleur directement pour réchauffer un autre procédé par exemple ou encore produire de l'eau chaude sanitaire. Mais les demandes en industrie ne sont souvent pas en adéquation avec l'énorme production de chaleur. De plus, les industries sont rarement connectées à un réseau thermique qui demande un investissement financier conséquent. Or l'électricité est omniprésente et chaque industrie est directement reliée au réseau pour une revente avantageuse (à EDF par exemple).

#### Chaleur perdue par région du monde dans le domaine de la production électrique[1]



On remarque que même dans la production d'électricité la performance est limitée par la perte thermique de l'énergie primaire. Des installations ORC de récupération de cette énergie, certes d'un niveau exergétique plus faible (température plus basse) restent néanmoins

exploitables pour les modules ORC. Ainsi elles pourraient redéfinir les centrales électriques où les rendements passeraient la fameuse barre des 33 %.

Il faut garder à l'esprit qu'un projet de récupération de chaleur sera toujours une production secondaire. C'est à dire que les différents paramètres liés à la production principale de l'entreprise sont fixes. L'installation ORC doit s'adapter au mieux sans perturber le procédé de fabrication. Il faudra donc privilégier une installation ORC qui produira plus de MWh, mais peut-être pas le meilleur rendement. Un des intérêts de la technologie des ORC est de posséder une large gamme de fluides et de cycles potentiels et ainsi d'optimiser les performances de l'installation de récupération de chaleur. Rien qu'en France plus de 50MWe pourraient être installés dans les aciéries et plus de 15MWe dans les cimenteries (Source Société Française de Chimie, 2005). Il faut noter que la production électrique sera également limitée dans le refroidissement de fumées.

Exemple : Pour des fumées qui contiennent des composés soufres, on ne pourra pas dépasser un refroidissement de celles-ci maximum pour des problèmes environnementaux et de corrosion (échangeur spécifique).



*Photographie d'un four industriel a gauche et du système ORC couplé a droite(annexe 1 turboden).*

Voici l'exemple de la récupération de chaleur dans un four industriel, la première plateforme de récupération de chaleur en électricité par ORC. La plateforme ORCHID© est installée dans une fonderie à Châteaubriant (Fonderie et Mécanique Générale Castelbraintaise). Elle a reçu la chaleur dans un four industriel installé en sortie de combustion d'un cubilot à vent chaud. Un cubilot permet la fonte de ferraille. Dans ce four, le métal à fondre est en contact direct avec le combustible (du coke). Il est généralement moins puissant que les hauts fourneaux, mais il s'agit d'un outil flexible utilisé dans les fonderies. Ce

procédé génère des quantités importantes de CO qui sont brûlées dans une chambre de combustion puis refroidies avant le traitement des fumées.

Le module ORCHID© de 1MW est installé sur le système de refroidissement des fumées et récupère de la chaleur sous forme d'huile thermique à 200°C. L'électricité produite par l'ORC est réinjectée directement dans le réseau interne de l'usine. Ce système génère donc environ 5000MWh par an. Ce refroidissement permet aussi d'arrêter les aéro-réfrigérants et donc une économie de 100MWh est réalisée [4]. Au prix de l'électricité c'est une réelle économie financière qui demande étude, bien sûr après soustraction du prix de maintenance (normalement très faible car c'est une construction fiable et solide, possible de fonctionner 24/24 sans maintenance) et le coût d'investissement. La société va réaliser cette étude et progressivement améliorer le système.

## e. ENERGIE SOLAIRE

### i. Introduction :

L'énergie solaire est en pleine expansion, car cette source nous permet d'obtenir des puissances significatives. Encore faut-il la maîtriser et capter cette énergie. C'est sur quoi le projet voit son axe directeur. Nous allons nous intéresser particulièrement à la concentration solaire. Les panneaux solaires thermiques de différentes technologies et géométries pour concentrer et absorber l'énergie thermique solaire et la transformer en énergies exploitables (électrique ou vecteur de chaleur) par l'utilisation de transferts thermiques et cycles thermodynamiques de Rankine.

### ii. Définition :

Le soleil est un astre central au niveau du système solaire. Cette boule de plasma d'environ 1 391 000 km de diamètre est une étoile. Ces rayonnement solaire résulte de la transformation matière-énergie selon le cycle thermonucléaire de Bethe (physique solaire). Ce cycle est l'une des deux réactions de fusion nucléaire par lesquelles les étoiles convertissent de l'hydrogène en hélium ; l'autre réaction est la chaîne proton-proton.

La température radiative du soleil à la surface est de 6350K. Mais la répartition spectrale du rayonnement ne correspond pas au corps noir. Le corps noir équivalent à une température de 5800K. La température thermodynamique est une mesure absolue parce qu'elle traduit directement le phénomène physique fondamental qui sous-tend la température : l'agitation des

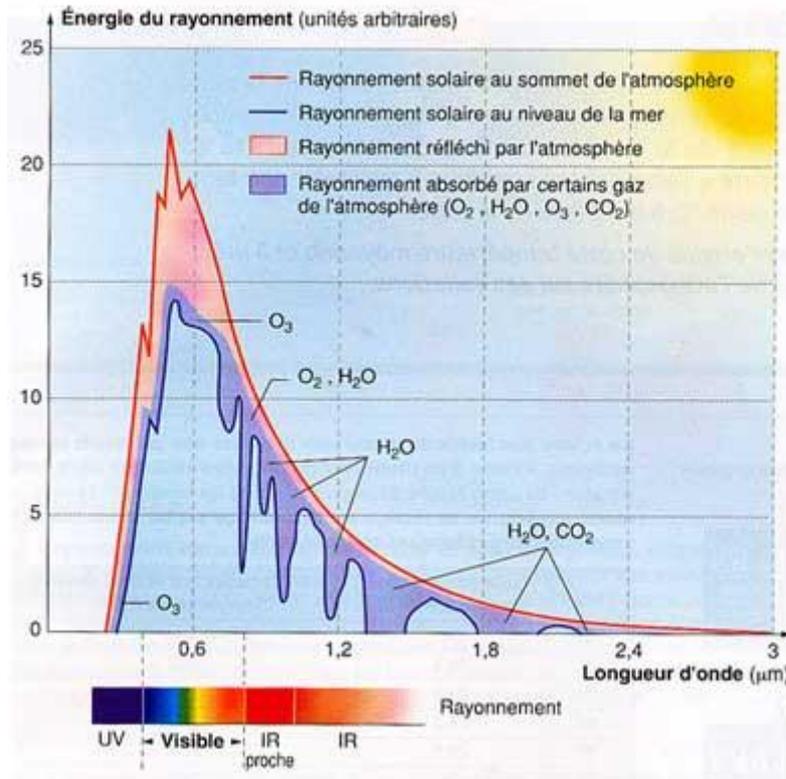
particules constituant la matière. Son point origine, ou zéro absolu, correspond à l'état de la matière où ces particules ont une agitation minimale et ne peuvent plus être refroidies. Ce qui nous explique que notre étoile a un fort potentiel thermique.

Cette énergie arrive sur terre en partie seulement à cause de l'absorption qui se fait par l'atmosphère. On définit aux équinoxes la constante solaire qui vaut :

- 1353 W/m<sup>2</sup>, selon les mesures de la NASA ;
- 1400 W/m<sup>2</sup>, valeur préconisée par l' AFEDES

La terre a une surface d'environ 10<sup>8</sup> km<sup>2</sup>, donc la puissance disponible sur terre avec le solaire et d'environ 1,4 .10<sup>17</sup> W. Cela équivaut à 9,3.10<sup>7</sup>réacteurs nucléaires !

Le rayon solaire perçu par le sol terrestre passe par plusieurs états qu'il modifie par rapport à son état d'origine. L'atmosphère gazeuse environnant la terre influe sur l'énergie transmise par le soleil jusqu'à la surface du globe, ainsi que sur la qualité du rayonnement reçu (répartition spectrale) au sol. En effet, la constante solaire varie de 1343 W/m<sup>2</sup> en juillet à 1436W/m<sup>2</sup> en décembre. Ce flux varie constamment en fonction de l'activité solaire et également de la composition atmosphérique (barrière entre le soleil et le sol terrestre). Le spectre solaire au niveau du sol reste compris entre 0,25 µm et 4µm.



Graphique représentant l'énergie du rayonnement en fonction de la longueur d'onde [4].

Les différents phénomènes de diffusion, diffraction, réfraction provoqués par les tranches atmosphériques successives de densité et de températures variables expliquent la différence qu'il existe entre le spectre du sol par rapport au spectre en haute atmosphère.

Deux constituants atmosphériques jouent un rôle important dans l'absorption sélective : l'ozone, responsable du « cut off » observé dans l'ultraviolet et les rayons X, le deuxième constituant est l'eau présente sous diverses formes et dont la concentration diminue rapidement avec l'altitude.

L'eau est le principal responsable des nombreuses bandes d'absorption particulièrement dans l'infrarouge proche. L'absorption par l'eau peut être caractérisée par l'épaisseur d'eau condensable, comme par exemple les nuages. Nous pouvons en conclure que pour installer un système à concentration solaire il faut un ciel clair afin d'obtenir un bon rendement de l'installation. C'est en outre pour cette raison que de nombreux pays ensoleillés d'Afrique et du monde réalisent de nombreuses recherches dans ces domaines.

### iii. Description :

Chaque km<sup>2</sup> de désert reçoit annuellement une énergie solaire équivalente à l'énergie contenue dans 1,5 million de barils de pétrole.

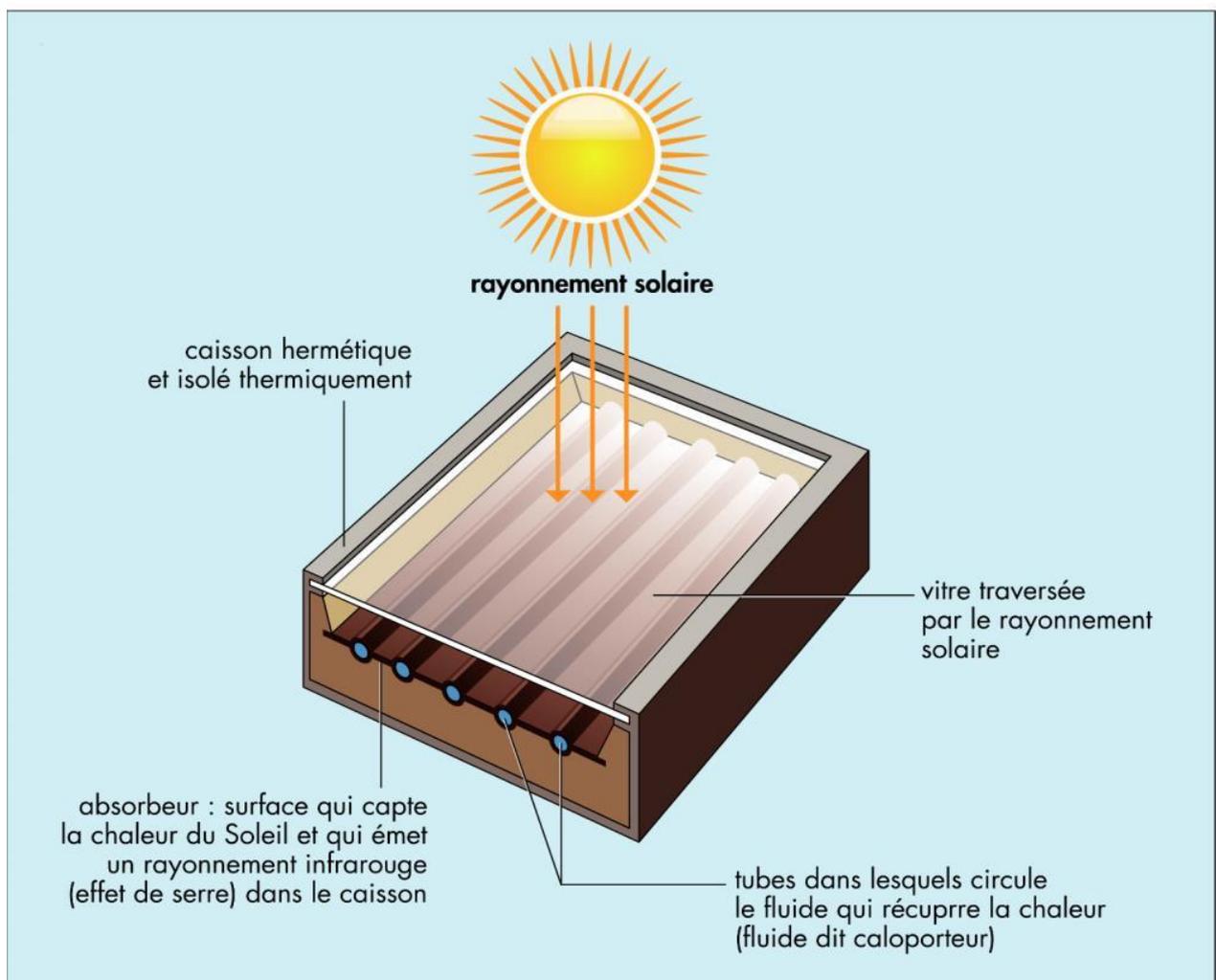
Les centrales solaires thermodynamiques recouvrent l'ensemble des techniques qui visent à transformer l'énergie rayonnée par le soleil en chaleur à température élevée, puis à convertir cette chaleur en énergie mécanique et électrique au moyen d'un cycle thermodynamique moteur couplé à une génératrice électrique. La première étape, la captation du rayonnement solaire, fait appel à des systèmes optiques. Les systèmes sans concentration captent les composantes directes et diffuses du rayonnement et produisent la chaleur à un niveau de température inférieur à 250 °C pour une utilisation en chauffage et climatisation de bâtiments ou sous forme de chaleur industrielle pour alimenter des procédés thermiques. Il faut inscrire dans cette catégorie les tours (ou cheminées) solaires qui sont des centrales thermodynamiques sans concentration. À cette dernière exception près, les centrales solaires thermodynamiques mettent en œuvre des systèmes concentrateurs, qui permettent de produire la chaleur à une température supérieure à 250°C avec d'excellents rendements thermiques, supérieurs à 70 %. Toutefois, ces systèmes ne captent que la composante directe du rayonnement solaire. La chaleur solaire transférée dans l'absorbeur au fluide caloporteur peut être stockée de manière temporairement pour éviter des passages nuageux, ou sur des périodes de quelques heures pour décaler l'utilisation en dehors des plages ensoleillées de la journée. L'hybridation, avec une source de chaleur fossile ou biomasse permet d'accroître la disponibilité des installations et de produire la chaleur de manière garantie. Cette chaleur est convertie en électricité par des cycles thermodynamiques, bien maîtrisés par l'industrie de la production électrique. Selon les machines utilisées et les cycles mis en œuvre, les rendements de conversion varient de 23 % à plus de 50 % pour les cycles combinés. Au final, le rendement instantané de conversion solaire-électricité est compris entre 20 % et 30 % selon la taille du groupe et le cycle utilisé. En moyenne annuelle, le rendement net de production d'énergie électrique se situe entre 10 % et 20 % selon la technologie mise en œuvre.

L'impact environnemental constitue aujourd'hui un critère de choix important dans la sélection de technologies concurrentes. Avec un taux d'émission estimé inférieur à 20 kg CO<sub>2</sub>/MWh e, l'électricité solaire thermodynamique se situe de ce point de vue au même niveau que l'électricité d'origine hydraulique (4 kg CO<sub>2</sub> /MWh e) ou nucléaire (6 kg CO<sub>2</sub>/MWh e), et avec l'électricité photovoltaïque (100 kg CO<sub>2</sub> /MWh e) ou encore

l'électricité issue de la combustion du charbon (900 kg CO<sub>2</sub> /MWh e). Les chiffres indiqués ici tiennent compte des émissions liées à la construction des centrales et également à l'extraction des combustibles. Comparé aux technologies conventionnelles de production de chaleur (hors nucléaire), chaque mètre carré de collecteur installé sous un ensoleillement de 2 000 kWh/ (m<sup>2</sup>.an) évite l'émission de 250 à 400 kg de CO<sub>2</sub> par an.

Le temps de retour énergétique (durée d'exploitation d'une installation nécessaire pour produire l'énergie nécessaire à sa fabrication) des installations solaires à concentration n'est que de 5 mois environ. Leur durée de vie est estimée à 25 – 30 ans, et une partie des composants en fin de vie est réutilisable (acier, verre).

### Capteur solaire thermique



Universalis France S.A.

*Schéma d'un capteur solaire thermique.*

Il est fondé sur le principe de l'effet de serre: le rayonnement solaire (visible et infrarouge proche) traverse la couverture transparente et vient chauffer la surface absorbante qui «réémet» un rayonnement dans l'infrarouge lointain qui ne peut retraverser le verre. L'énergie solaire incidente est donc piégée et, compte tenu de la bonne isolation thermique, on peut récupérer, grâce au fluide caloporteur, de l'énergie à des niveaux de températures adaptées au chauffage de l'eau sanitaire et des locaux.

Nous allons nous intéresser au capteur solaire à concentration car ce phénomène est utilisé dans les centrales thermiques et aussi à Bucarest.

Un capteur solaire thermique à concentration est composé :

- d'un châssis,
- d'un isolant permettant de limiter les fuites thermiques en sous face et sur les bords,
- d'un système de réflexion de la lumière,
- d'un absorbeur,
- d'un réseau de tubes en cuivre.

Les tubes en cuivre sont parcourus par un fluide caloporteur (eau + antigel). Cette eau se réchauffe au fil de l'écoulement dans les tubes.

Un système solaire à concentration thermodynamique exploite le rayonnement du Soleil en orientant, au moyen de miroirs, les flux de photons. Ce système thermique concentré permet d'atteindre des niveaux de température bien supérieurs à ceux des systèmes thermiques classiques non concentrés. Alors que les chauffe-eau domestiques produisent une eau à une cinquantaine de degrés, il est possible, par la concentration, de chauffer des fluides à des températures de l'ordre de 250 à 1 000°C. Il devient alors envisageable de les utiliser dans des processus industriels comme la génération d'électricité, on parle alors « d'électricité solaire thermodynamique ». D'autres utilisations directes ou indirectes des fluides chauds sont possibles comme le dessalement de l'eau de mer, le refroidissement ou encore la génération d'hydrogène. Ils existent plusieurs types de concentrateur solaire. Ceci résulte d'une amélioration technique des matières utilisées (verre plus performant, amélioration de l'absorbeur...) et surtout une amélioration géométrique. Cette amélioration géométrique

permet d'augmenter la concentration géométrique du capteur. La concentration géométrique est le rapport de la surface utile de captation du rayonnement à la surface éclairée de l'absorbeur.

### Le fonctionnement des centrales solaires thermodynamiques

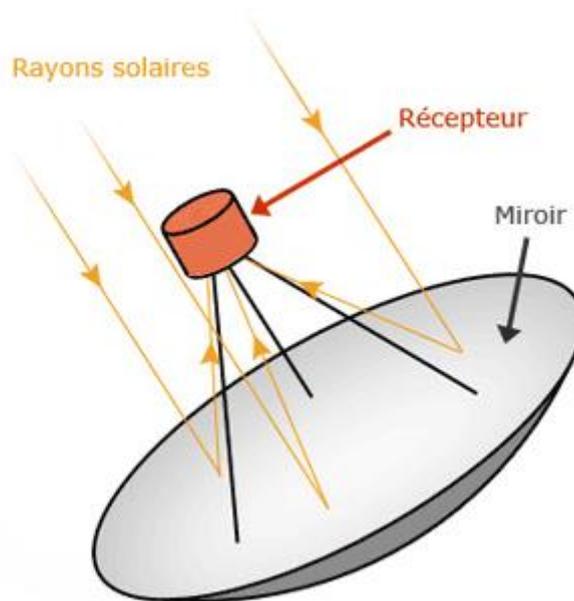
Les centrales solaires thermodynamiques utilisent une grande quantité de miroirs qui font converger les rayons solaires vers un fluide caloporteur chauffé à haute température. Pour ce faire, les miroirs réfléchissants doivent suivre le mouvement du soleil afin de capter et de concentrer les rayonnements tout au long du cycle solaire quotidien. Le fluide produit de l'électricité par le biais de turbines à vapeur ou à gaz. Il existe quatre grands types de centrales solaires thermodynamiques : les centrales à miroirs cylindro-paraboliques et leur variante à miroirs de Fresnel, les centrales à tour et enfin les concentrateurs paraboliques Dish-Stirling.

#### IV. LES DIFFERENTS TYPES DE CENTRALE SOLAIRE

##### Systemes de concentration linéaire

Le rayonnement solaire est concentré sur un ou plusieurs tube(s) absorbeur(s) installé(s) le long de la ligne focale des miroirs. Ce tube contient un fluide caloporteur porté à une température de l'ordre de 250 à 500°C.

##### Centrales à miroirs cylindro-paraboliques :



*Schéma d'une parabole solaire.*

C'est la technologie la plus répandue aujourd'hui. Le foyer d'une parabole est un point, celui d'un miroir cylindro-parabolique est un axe, sur lequel est placé un tube absorbeur (le récepteur) de couleur noire (corps noire le plus possible), pour capter un maximum de rayonnement. Dans ce tube circule le fluide caloporteur, qui se réchauffe jusqu'à une température d'environ 500°C et qui est ensuite centralisé et transporté jusqu'au bloc de génération électrique. L'ensemble miroir cylindro-parabolique/récepteur suit le mouvement du Soleil.

Exemples : Andasol, la plus grande centrale solaire thermique d'Europe en Espagne, Nevada

Solar One aux Etats-Unis.



*Miroirs cylindro-paraboliques d'Andasol, Espagne*

Centrales solaires à miroirs de Fresnel : plutôt que de courber les miroirs (processus industriel coûteux), les miroirs de Fresnel « miment » la forme cylindro-parabolique avec des miroirs très légèrement incurvés, et placés à un même niveau horizontal. Seuls les miroirs bougent, la structure et le tube absorbant sont tous deux stationnaires. Les coûts des centrales solaires à miroirs de Fresnel sont donc inférieurs à ceux des centrales à miroirs cylindro-paraboliques tant à l'installation qu'à la maintenance. La focalisation est toutefois dégradée dans ce système (puisque la parabole n'est pas parfaite) : le pari est donc que la baisse de coût « compense » la dégradation de l'efficacité d'un point de vue économique. Ce type de système est encore relativement peu répandu.

Exemple : Ausra en Californie ou bien encore Fresdemo en Espagne.



*Centrale solaire thermodynamique à miroirs de Fresnel*

### Systèmes de concentration par foyer

Le rayonnement solaire est concentré environ 1 000 fois à destination d'un foyer unique de taille réduite. La température peut atteindre de 500 à 1 000°C.

### Centrales à tour

Des centaines de miroirs suivant la course du soleil (les « héliostats ») réfléchissent et concentrent le rayonnement solaire sur un récepteur central situé au sommet d'une tour, dans lequel circule le fluide caloporteur. Comme dans les systèmes cylindro-paraboliques, la chaleur du fluide est alors transférée à un cycle classique à vapeur pour générer de l'électricité. Par rapport à un système cylindro-parabolique, la tour solaire offre l'avantage de ne pas avoir à faire circuler de fluide dans l'ensemble du champ de miroirs : les pertes thermiques sont donc significativement réduites. Par ailleurs, le niveau de concentration de l'irradiation peut être bien supérieur, et l'efficacité du cycle thermodynamique s'en trouve augmentée. Il reste que ces gains techniques doivent aussi se traduire par un gain technico-économique, limité par le coût de construction de la tour.



*Exemples : centrale Thémis en France, Solar One en Californie ou encore PS10 et PS20 en Espagne.*

### Tour solaire à concentration

### Centrales à miroir parabolique Dish-Stirling

Une parabole concentre le rayonnement sur un foyer en son point focal afin d'actionner un moteur dit « Dish-Stirling ». Une fois chauffé dans un circuit fermé, le gaz qu'il contient actionne un piston qui récupère l'énergie mécanique produite. Cette technologie n'est pas adaptée à une production industrielle de masse du fait de son coût élevé, d'où le retard de son développement. Cependant, c'est la seule technologie thermodynamique qui puisse être mise en œuvre dans des sites isolés de petite taille.

Exemple : site de Font-RomeuOreillo, siège des recherches du CNRS sur le sujet



*Paraboles solaires Dish-Stirling à Albuquerque, Australie*

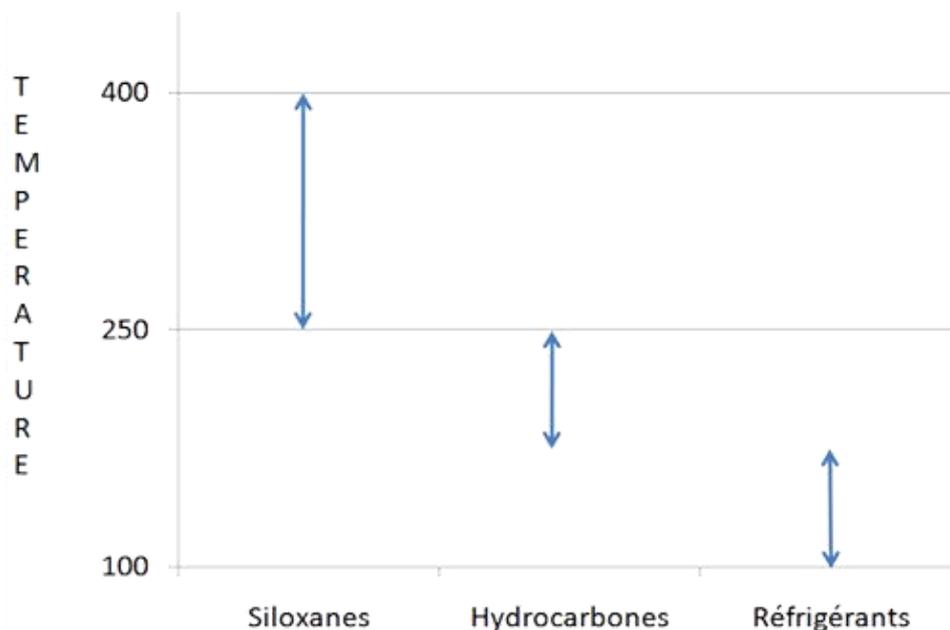
Les inconvénients de toutes ces installations sont qu'elles fonctionnent difficilement en cas de ciel nuageux. En effet, les concentrateurs doivent recevoir les rayons parallèlement à leur axe optique. Dans le cas d'une couche nuageuse étendue et très épaisse, la performance est donc quasiment nulle. En présence de nuages éparses ou de faible densité, une partie du rayonnement direct est dispersé (rayons diffus). Les performances de l'installation sont alors réduites en proportion de la part restante du rayonnement direct. Un seuil minimum de rayonnement direct est toutefois requis. Par ailleurs, le développement de solutions de stockage permet d'apporter une autonomie croissante aux installations, notamment en cas d'intempéries.

## V. CHOIX DU FLUIDE ORGANIQUE

Le choix du fluide est très important car celui-ci doit s'adapter au mieux à la source chaude.

- Les réfrigérants sont utilisés pour les sources basse température :  
>150°C (R134a)
- Des hydrocarbures permettent de valoriser des sources à moyenne température :  
150°C-250°C (Benzène)
- Pour les sources chaudes avec des températures bien plus élevées :  
>250°C

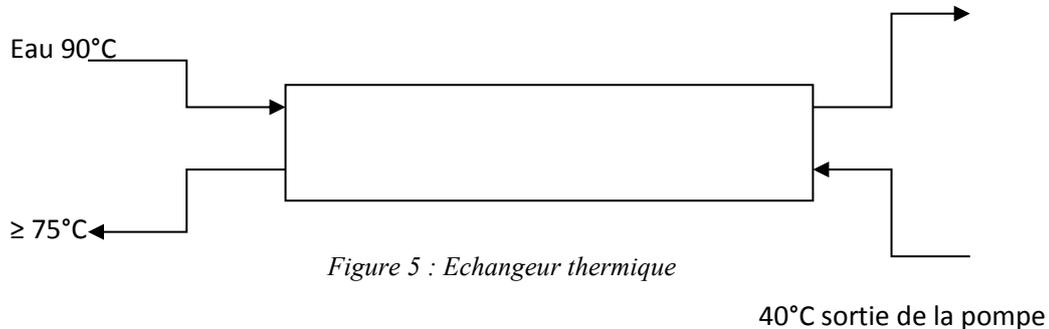
On utilise des fluides avec des chaînes carbonées possédant un ou plusieurs atomes de Silicium. On les appelle les « Siloxanes ».



*Figure 4 : types de fluide en fonction de la température(<http://www.enertime.com>).*

Il faut bien garder à l'esprit que l'un des critères de sélection, devant celui de la performance (rendement du cycle) pour le choix du fluide est celui de l'impact le plus faible sur l'environnement. Il faut essayer de respecter le protocole de Montréal, sur le fait que le potentiel de destruction de l'ozone (ODP) doit être nul.

Exemple d'une étude d'analyse de fluide organique pour un cycle ORC :



Paramètre de l'étude [5] :

- Température d'évaporation :  $T_e=75^\circ\text{C}$
- Température de condensation :  $T_c=35^\circ\text{C}$
- Rendement turbine mécanique :  $\eta_t=0,63$
- Rendement isentropique turbine :  $\eta_{ts}=0,70$
- Rendement pompe :  $\eta_p=0,80$

La température extérieure a été prise pour une variation très faible pour les villes Garoua (Cameroun), Bangkok (Thailand) et Bamako (Mali). Toutes les 3 sont proches de l'équateur et leurs températures extérieures pendant l'année oscillent entre  $25^\circ\text{C}$  et  $33^\circ\text{C}$ . [7]

Cette étude a été menée pour une production de 2KW de puissance électrique en sortie, et une source thermique obtenue par un panneau plan de captage solaire. La puissance de chauffe sera donc supposée égale au flux apporté par le soleil, situation propice dans cette région de la planète.

Pour cette grande étude complète, il en résulte la sélection de 5 fluides organiques adaptés, propres, performants :

- R134a
- R152a
- R290
- R600
- R600a

Tous ces fluides sont bien sûr étudiés et sélectionnés pour une chauffe solaire d'une température de 90°C. Pour l'utilisation du fluide R600, toutefois, il faudrait faire attention car il peut y avoir des risques d'entrée d'air car avant la pompe la pression est plus faible que la pression atmosphérique, donc on préférera utiliser le R600a.

Nous pouvons remarquer que tous ces fluides sont des fluides frigorigènes, cela est dû à la faible température de la source chaude. Ainsi la publication « Selection of working fluids for a level low-temperature geothermal-powered ORC based cogeneration system » de T. Guo, H.X. Wang, S.J. Zhang [6] nous montre que ces fluides sont adaptés pour l'utilisation en géothermie et pour des températures inférieures à 150°C.

Pour des températures beaucoup plus élevées que nous rencontrons dans les centrales à biomasse ou dans les centrales à concentration solaire les fluides utilisés comme expliqué plus haut sont des siloxanes.

Ces fluides ont la particularité d'avoir des propriétés thermodynamiques permettant l'exploitation de sources de température bien plus élevée. Voici l'exemple de plusieurs siloxanes utilisés dans une étude intitulée « Thermodynamic analysis of high-temperature regenerative organic Rankine cycles using siloxanes as working fluids » de F.J. Fernández, M.M. Prieto, I. Suárez. [7]

Compound	Molecular Mass, $M$ (kg/kmol)	Critical Pressure, $p_c$ (bar)	Critical Temp., $t_c$ (°C)	Boiling Temp., $t_b$ (°C)	Acentric Factor
MM	162.37752	19.39	245.60	100.52	0.419
MDM	236.531	14.15	290.94	152.53	0.5297
MD <sub>2</sub> M	310.685	12.27	326.25	194.35	0.668
D <sub>4</sub>	296.61576	13.32	313.35	175.00	0.589
D <sub>5</sub>	370.7697	11.60	346.00	210.95	0.6658
D <sub>6</sub>	444.924	9.61	372.63	244.99	0.7361

*Tableau 2 : Représentant les siloxanes potentiellement performant [8].*

On remarque que pour des pressions élevées, la température d'ébullition des fluides reste élevée. Ce qui nous permettra d'obtenir de grandes quantités d'énergie en production finale.

# VI. METHODE ANALYTIQUE D'ETUDE EN THERMODYNAMIQUE A VITESSE FINIE

## a. INTRODUCTION

La thermodynamique en vitesse finie (TVF) est une branche de thermodynamique où l'on prend en compte les irréversibilités internes. Il y a une nouvelle 1<sup>ère</sup> loi de la thermodynamique qui prend en compte la vitesse du piston, les chutes de pression occasionnées par des phénomènes de frottement mécanique ou laminage dus aux soupapes.

Il faut définir plusieurs nouvelles grandeurs :

- La pression du gaz à un instant  $t$ , qui varie avec la vitesse du piston  $w_p$  et on la considère dans un premier temps comme linéaire.
- La pression moyenne instantanée du gaz ( $P_{gaz,m}$ ), elle représente la base du problème et elle remplace la pression à l'équilibre en thermodynamique de l'équilibre pour des transformations réversibles.
- Pression du Piston ( $P_p$ ), il faut bien comprendre que  $P_p$  est différent de  $P_{gaz,m}$ .
- Deux courbes sont nécessaires sur le diagramme P-V celle de  $P_{gaz,m}$  et  $P_p$ .

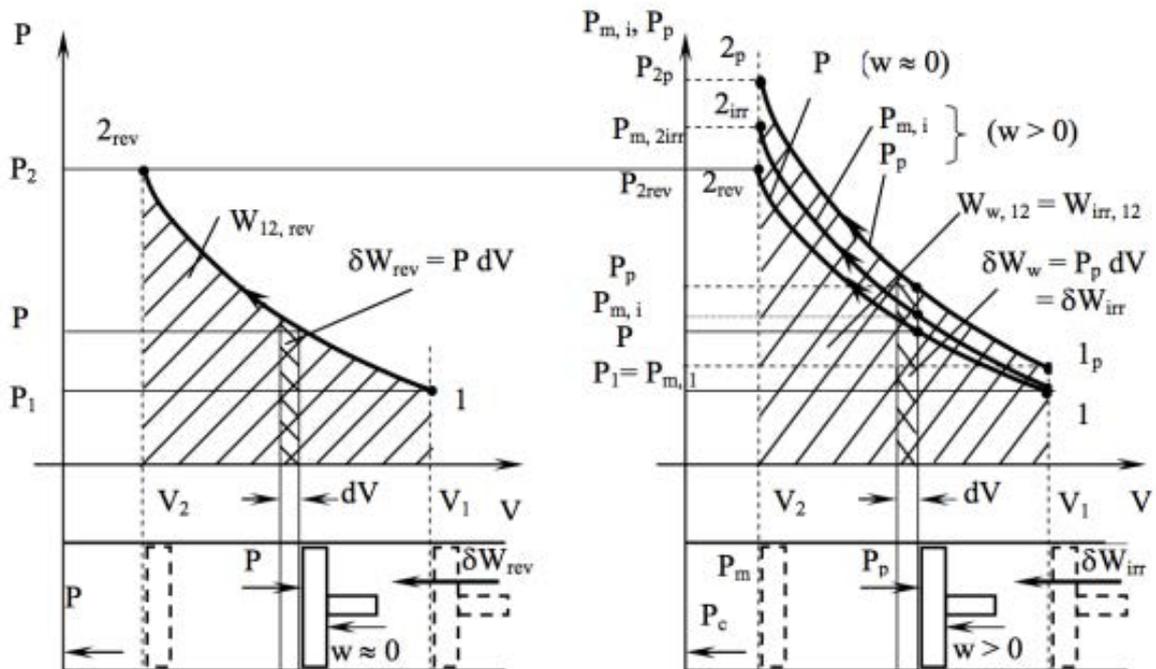


Figure 6 : Diagramme P-V pour une compression réversible à gauche et irréversible à droite en TVF[9].

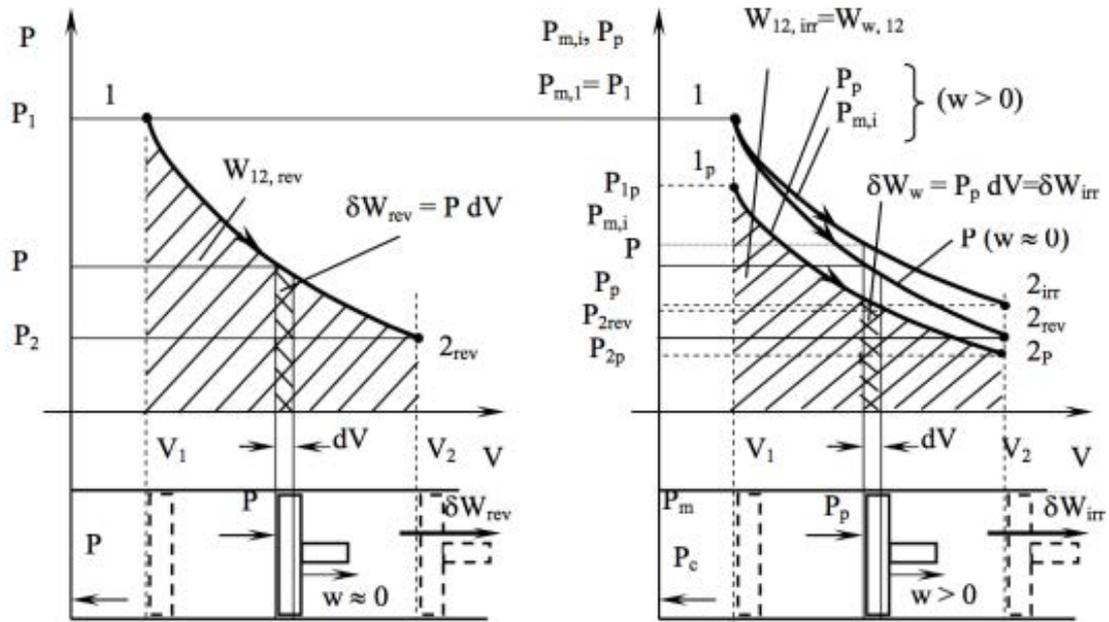
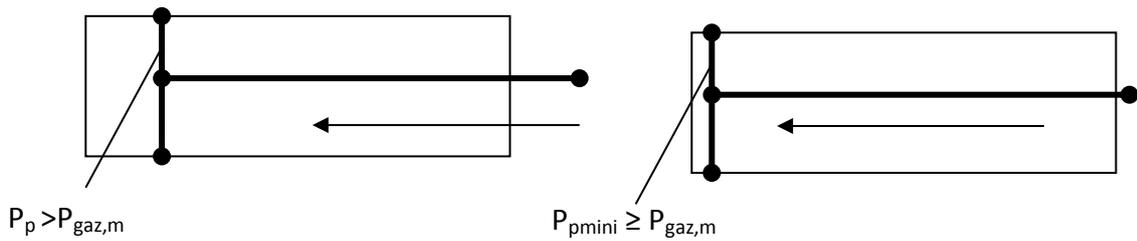
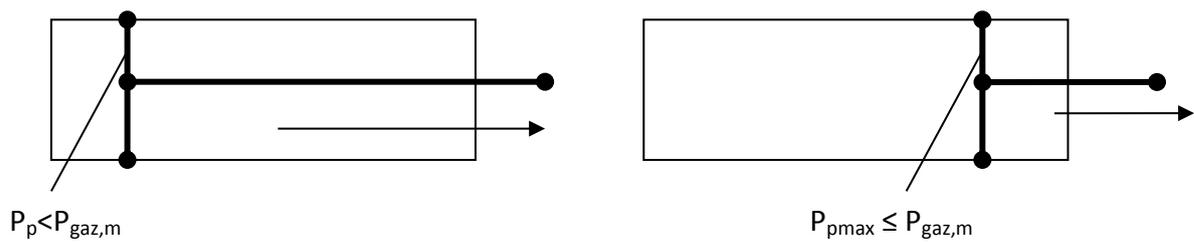


Figure 7 : Diagramme P-V pour détente réversible à gauche et irréversible à droite en TVF[9].

On remarque que pour la compression on a :



Pour la détente on a :



On remarque que dans les figures 6 et 7 si la transformation est réversible les 2 courbes de pression se superposent. Avec les irréversibilités les 2 courbes sont différentes et par conséquent l'air sous la courbe n'est pas la même et donc les travaux de compression et de détente également.

## b. LOI DE LA THERMODYNAMIQUE EN VITESSE FINIE

Première étude d'irréversibilité par rapport à la vitesse du piston, nous allons définir le Premier Principe [9] :

- Cycle réversible :  $dU_{rev} = \partial Q_{rev} - \partial W_{rev}$   
Succession d'état d'équilibre, donc l'énergie interne est uniforme :  $U = U_{rev} = m \cdot u$
- Cycle Irréversible :  $dU_{irr} = \partial Q_{irr} - \partial W_{irr}$   
La pression et la température variant à chaque moment du système il nous faut donc introduire le concept de  $T_{m,i}$  (Température moyenne instantanée) et  $u_{m,i}$  (énergie interne instantanée) :  $U_{irr} = \int u \cdot dm = m \cdot u_{m,i}$

Equation de joule pour un Gaz Parfait :

- $dU_{irr} = m \cdot du_{m,i} = m \cdot cv \cdot dT_{m,i}$   
 $\Delta U = m \cdot cv \cdot (T_{m,2} - T_{m,1}) \neq m \cdot cv \cdot (T_2 - T_1)$

Voici le Premier Principe:

$$dU = \partial Q - P_{m,i} \cdot \left[ 1 \pm \frac{a \cdot w}{c} \pm \frac{b \cdot \Delta P_{thr}}{2 \cdot P_{m,i}} \pm \frac{f \cdot \Delta P_f}{P_{m,i}} \right] \cdot dv$$

$$dW_{irr} = P_{m,i} \cdot \left[ 1 \pm \frac{a \cdot w}{c} \pm \frac{b \cdot \Delta P_{thr}}{2 \cdot P_{m,i}} \pm \frac{\Delta P_f}{P_{m,i}} \right] \cdot dv$$

Pertes par irréversibilités dû à la vitesse du piston

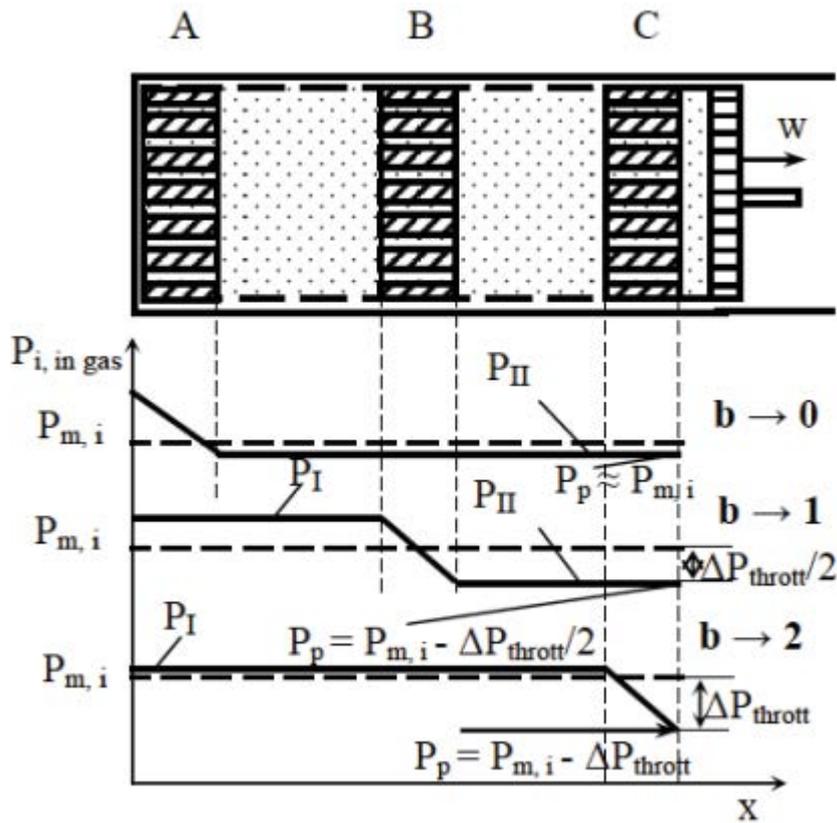
Pertes dû aux phénomènes de laminage aux seins des soupapes

Pertes par Friction mécanique entre les éléments du système (frottements)

On utilisera le signe + pour la compression et - pour la détente. Ainsi que les différents termes ci-dessous :

- $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$  (coefficient d'adiabaticité)
- $a = \sqrt{3\gamma}$
- $c = \sqrt{3rT}$  avec  $\left\{ \begin{array}{l} r = \text{constante spécifique des gaz parfaits} \\ T = \text{température} \end{array} \right.$
- $\Delta P_{thr} = C' \cdot w_p^2$
- $\Delta P_f = A' + B' \cdot w_p$  avec  $\left\{ \begin{array}{l} A' = 0,94 \\ B' = 0,045 \\ C' = 0,0045 \end{array} \right.$  [9]

- Le coefficient  $f$  détermine la part du frottement mécanique dans le système, il est compris entre 0 quand il n'y a pas de frottement et lorsque celle-ci est maximal.
- Le coefficient  $b$  représente l'effet du régénérateur avec la position du piston, ici nous le prendrons pour toute l'étude à mi-course donc  $b=1$  (il est nul quand nous sommes en position complètement rentrée et  $b=2$  lorsque nous sommes en butée de sortie du piston).



*Effet du régénérateur dans le cylindre sur le coefficient  $b$ [9].*

- On se place pour la compression et la détente dans le cas adiabatique donc  $\partial Q = 0$

La formule générale devient donc :

$$dU = -P_{m,i} \cdot \left[ 1 \pm \frac{\sqrt{3\gamma} \cdot w}{\sqrt{3rT}} \pm \frac{C' \cdot w_p^2}{2 \cdot P_{m,i}} \pm \frac{f \cdot (A' + B' \cdot w_p)}{P_{m,i}} \right] \cdot dV$$

c. EXEMPLE POUR L'ETUDE DE LA DETENTE A TRAVERS LA TURBINE

Nous voulons lors de notre étude trouver le meilleur fluide organique pour notre installation solaire donc la meilleure puissance récupérable par la turbine et une cogénération (production d'eau chaude sanitaire (environ 60°C et pour le chauffage basse température environ 45°C) possible avec des niveaux de température en sortie de la turbine qui le permettent.

A cet effet, nous allons à l'aide d'une liste de fluides organiques adéquate à nos températures et la méthode directe issue de la thermodynamique à vitesse finie définir notre choix. Ainsi pour développer les résultats analytiques, il faut plusieurs propriétés thermodynamiques des fluides tel que le coefficient d'adiabaticité qui définit la différence entre un fluide parfait et un fluide réel.

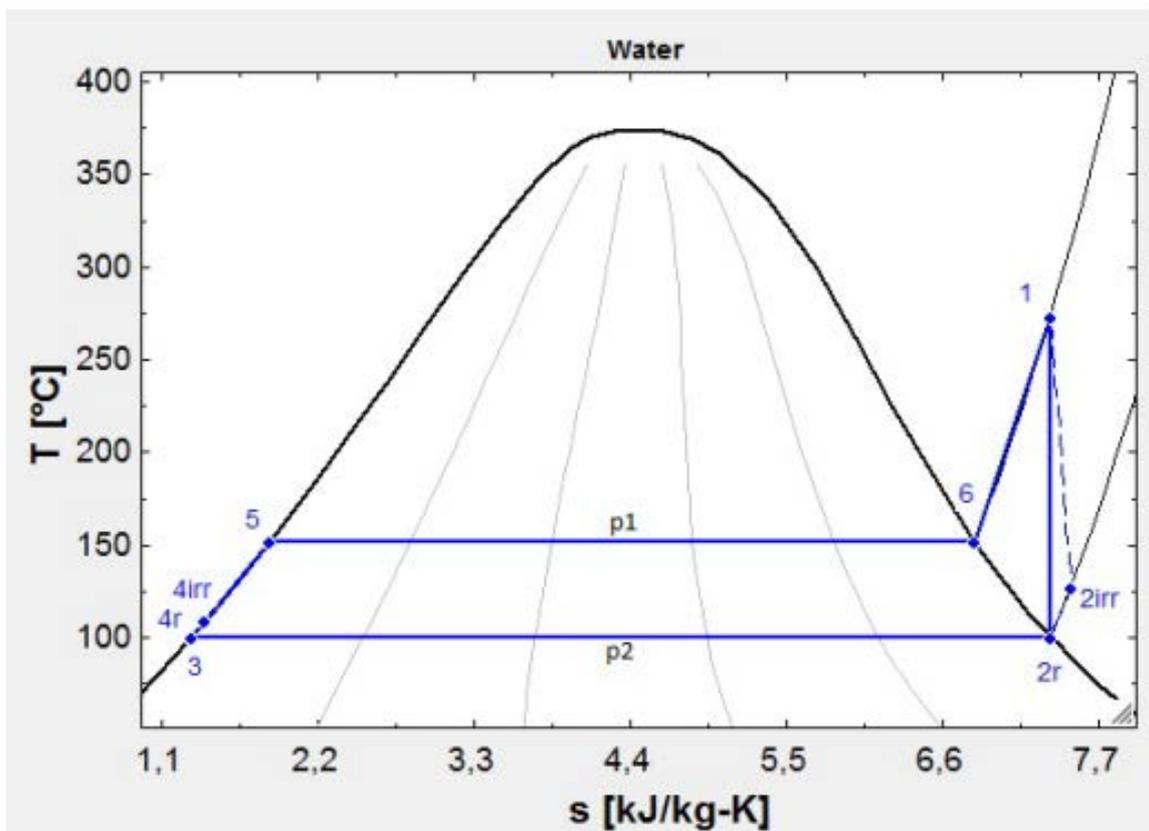


Figure 8 : diagramme T-S d'un exemple de cycle de Rankine

Nous nous plaçons dans le cas de la détente de 1 à 2<sub>irr</sub> ce qui représente la transformation à l'intérieur du piston, en thermodynamique à vitesse finie la détente et la compression sont simulées dans des pistons :

Nous supposons le gaz parfait.

$$dU = -P_{m,1,2} \cdot \left[ 1 - \frac{\sqrt{3\gamma} \cdot w}{\sqrt{3rT_{m,1,2}}} - \frac{C' \cdot w_p^2}{2 \cdot P_{m,1,2}} - \frac{f \cdot (A' + B' \cdot w_p)}{P_{m,1,2}} \right] \cdot dv$$

$$dU = -P_{m,1,2} \cdot [B] \cdot dv$$

$$m \cdot cv \cdot dT = -P_{m,1,2} \cdot [B] \cdot dv$$

$$m \cdot cv \cdot dT = -m \cdot r \cdot T \cdot [B] \cdot \frac{dv}{v}$$

$$\frac{cv \cdot dT}{B \cdot r \cdot T} = -\frac{dv}{v}$$

Or  $cv = \frac{r}{\gamma-1}$  d'après la relation de Mayer

Donc on a :

$$\frac{dT}{B \cdot (\gamma - 1)} = -\frac{dv}{v}$$

$$\int_{T_1}^{T_{2irr}} \frac{dT}{B \cdot (\gamma - 1)} = \int_{V_1}^{V_{2irr}} -\frac{dv}{v}$$

Avec B supposé constant :

$$\ln \frac{T_{2irr}}{T_1} = \ln \left( \frac{V_1}{V_{2irr}} \right)^{B \cdot (\gamma - 1)}$$

Par analogie, on peut donc avoir la température T<sub>2irr</sub> en fonction de la vitesse du piston et des irréversibilités présentée par la TVF :

$$T_{2irr} = T_1 \cdot \left( \frac{P_{2irr}}{P_1} \right)^{\frac{B \cdot (\gamma - 1)}{1 + \gamma \cdot (\gamma - 1)}}$$

Une fois la température définie en fonction des différents paramètres de l'étude, nous allons fixer la pression basse  $P_2$  à une la pression de saturation du fluide a une température  $T_2$  de  $75^\circ\text{C}$  pour assurer la cogénération et la température au puits chaud (apport solaire) et ainsi grâce aux différentes formules analytiques liant la température, pression, enthalpie et entropie en fonction de la vitesse du piston nous allons définir les puissances, rendement et efficacité du système.

Par contre, nous pouvons remarquer qu'il existe une donnée primordiale manquante propre à chaque fluide, c'est le coefficient  $\gamma$  d'adiabaticité. Il nous faut le déterminer comme ci-dessous pour chaque fluide et ainsi une fois cette équation enregistrée dans le programme nous pour simulerons le procédé.

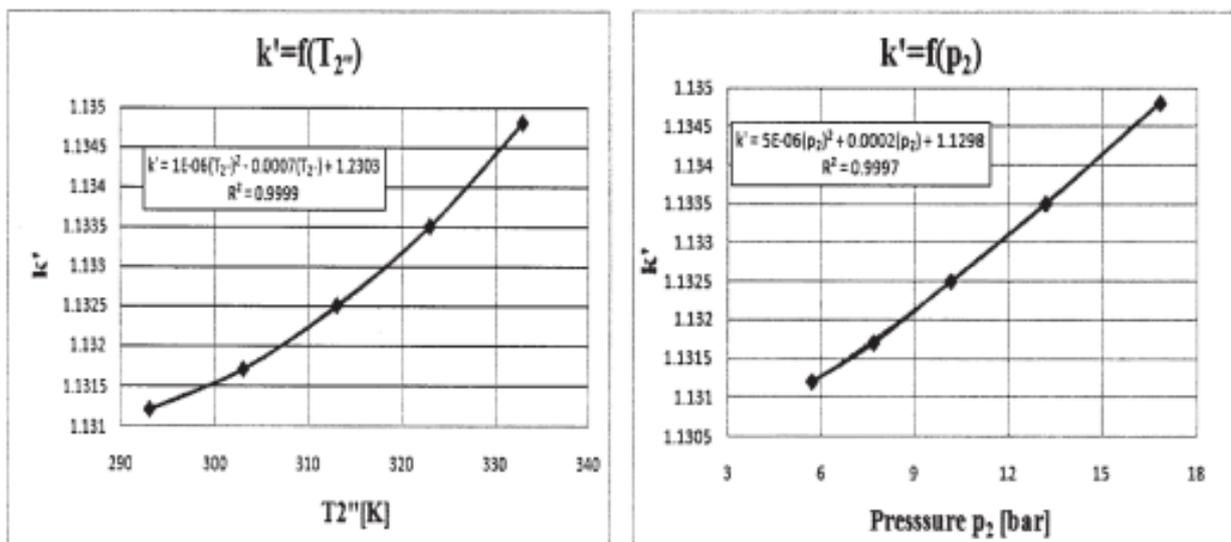


Figure 9 : équation et représentation du coefficient adiabatique  $\gamma = k'$  en fonction de la pression et de la température [10].

#### d. CONCLUSION

Dans ce rapport qui reflète l'état De l'art du système et la méthode de calcul qui sera étudiée en profondeur nous pouvons déjà dégager plusieurs lignes prometteuses :

- Cette technologie a fait ses preuves et peut être réalisée à échelle industrielle et domestique
- Son émission en carbone est nulle, elle n'a aucun impact sur l'environnement
- Le choix d'un fluide organique permet de problème de l'eau et d'utiliser un fluide plus performant lors de température plus basse que le cycle classique.

- Une fois optimisé, ce système promet de réaliser de l'énergie électrique compétitive.
- Avec un stockage de l'énergie chaleur, ce procédé peut devenir continu et le problème de l'intermittence résolu.

La suite de l'étude va porter sur la confection du système de concentration solaire et ainsi pouvoir définir la température de chauffe du soleil pour pouvoir définir les bornes de la simulation numérique. Nous allons réaliser une étude sur un concentrateur solaire parabolique. Nous sommes dans l'attente d'un capteur de température de France car l'ancien n'est plus fonctionnel.

Dans notre étude, il s'agira de définir le meilleur fluide pour l'application d'un cycle ORC avec une source solaire. Pour ce faire, il faudra encore déterminer le coefficient d'adiabaticité  $\gamma$  pour chaque fluide, vérifié que la programmation est juste par rapport à des valeurs de référence pour l'air effectuées en étude l'année dernière. Il nous faut obtenir les relations analytiques pour chaque grandeur impliquée dans les différents calculs du cycle, ainsi nous pourrons déterminer l'importance de chaque perte et faire varier indépendamment chaque paramètre pour apercevoir leurs influences.

Une fois le tableau complété, nous pourrons définir les différentes analyses de puissances et les rendements du système et ce en fonction des fluides organiques choisis.

## VII. CONCEPTION

### a. ETUDE

Problématique : Réalisation d'une installation de concentration solaire, à partir d'une parabole et d'un soleil artificiel.

Pour répondre à cette problématique nous avons utilisé différents outils de conception et avons participé à plusieurs réunions dans le but de mettre en commun nos différentes idées.

Bête à Cornes :

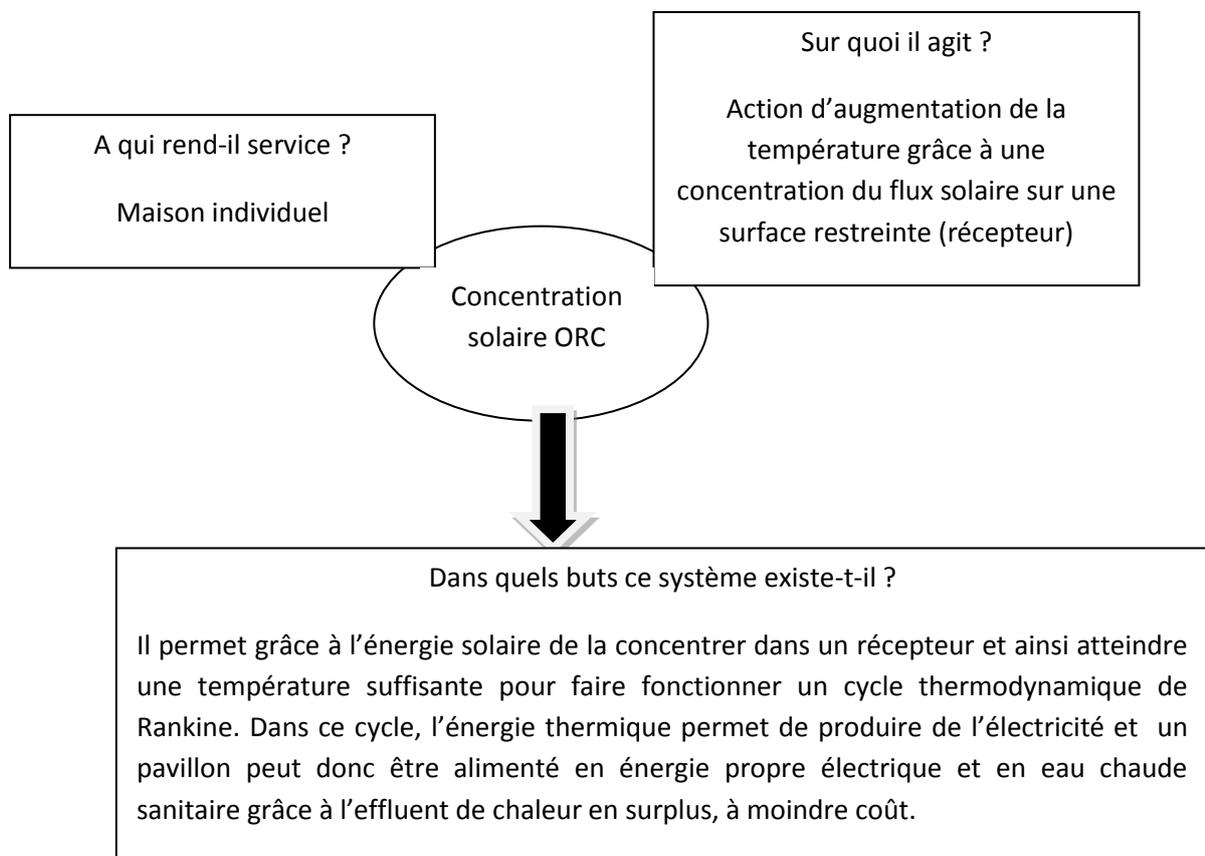
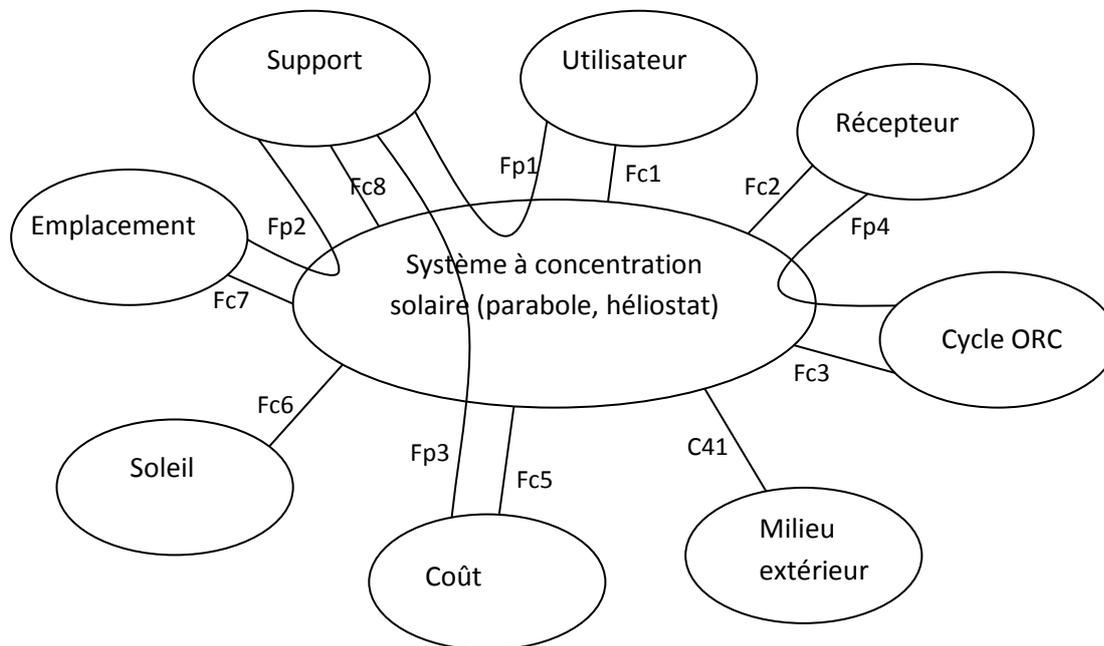


Diagramme pieuvre d'analyse fonctionnelle :



Fp1 : Doit être facilement transportable.

Fp2 : Doit s'adapter aux différentes surfaces de sol.

Fp3 : Doit être simple et peu coûteux à la conception.

Fp4 : Doit alimenter le récepteur et le cycle ORC.

Fc1 : Permettre la production de chaleur et d'électricité.

Fc2 : Performant et mobile pour capter le flux solaire concentré.

Fc3 : Performant pour transformer la chaleur en électricité.

Fc4 : Résistant au temps et à l'environnement extérieur (pluie, poussières, rouilles ...)

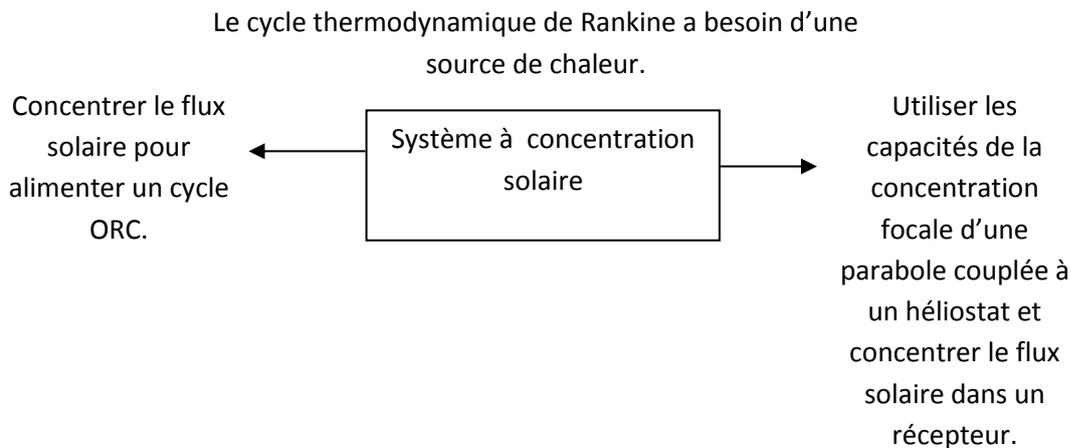
Fc5 : Coût peu onéreux, une conception simple en recyclant le maximum du matériel déjà disponible.

Fc6 : Capter, concentrer le soleil et suivre son mouvement.

Fc7 : Emplacement disponible avec un ciel dégagé et non loin de la maison.

Fc8 : Sécurisant, facile à concevoir et résistant.

## Analyse fonctionnelle technique :



### 1<sup>er</sup> phase : discussions et mise en commun des idées

Après plusieurs discussions et différents calculs, nous partons sur l'idée que la parabole concentre le soleil dans un récepteur mobile. Le soleil artificiel lui est trop puissant pour son utilisation directe à l'UPB donc nous allons détourner celui-ci en héliostat.

### 2<sup>ème</sup> phase : Possibilités

Il faut déterminer la distance focale des coupes de l'héliostat. Pour cela, nous décidons de les recouvrir d'aluminium de type alimentaire. En effet, celui-ci a de bonnes propriétés de réflexion et reste peu cher.

Nous avons donc recouvert les coupes cylindriques du soleil artificiel d'aluminium. Grâce à cette installation en carton, le soleil rentre dans la coupe et se reflète sur le carton central. Lors ce que la tache est la plus lumineuse et la plus petite nous sommes à la bonne distance focale. Ce qui représente la concentration la plus forte des rayons solaires en une surface restreinte.



*Photo de l'installation qui a servi à mesurer la distance focale sur les coupes recouvertes d'aluminium.*

Nous calculons et confirmons par expérience que la distance de la tache focale est de 7,5cm. La tache mesure 2cm de largeur et 39cm de longueur donc une surface de 78cm<sup>2</sup>. Ce qui nous donne une concentration focale de :

$$\textit{Concentration focale} = \frac{\textit{Surface module}}{\textit{Surface projetée}}$$

$$\textit{Concentration focale} = \frac{36,5 * 39}{78}$$

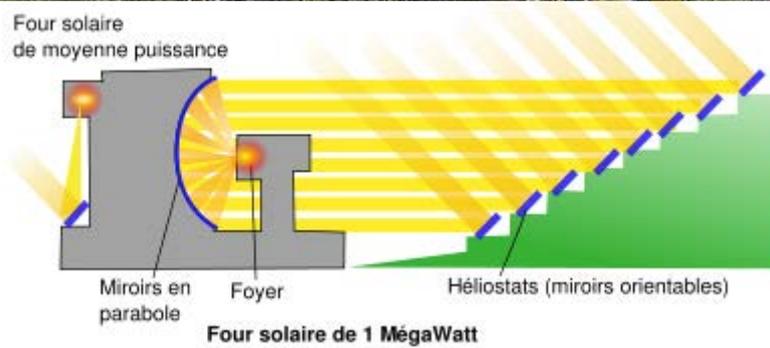
$$\textit{Concentration focale} = 18,25$$

Pour un système de concentration simple cela est relativement intéressant, ce qui va nous permettre d'approfondir notre étude.

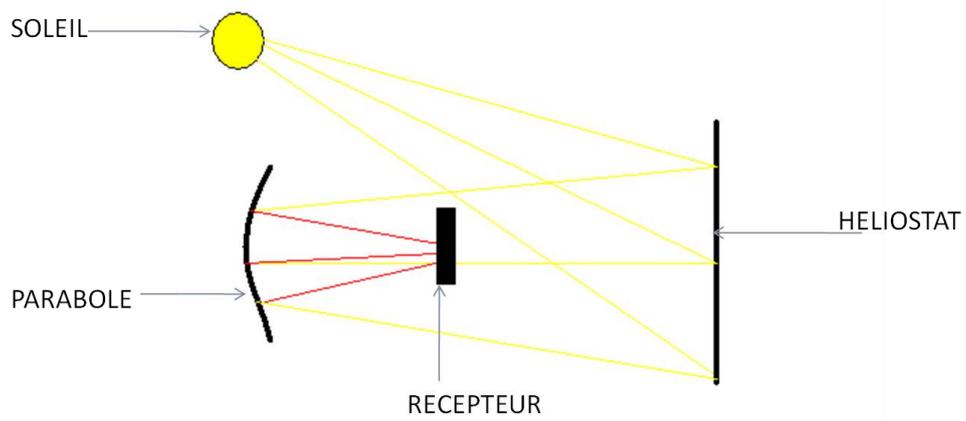
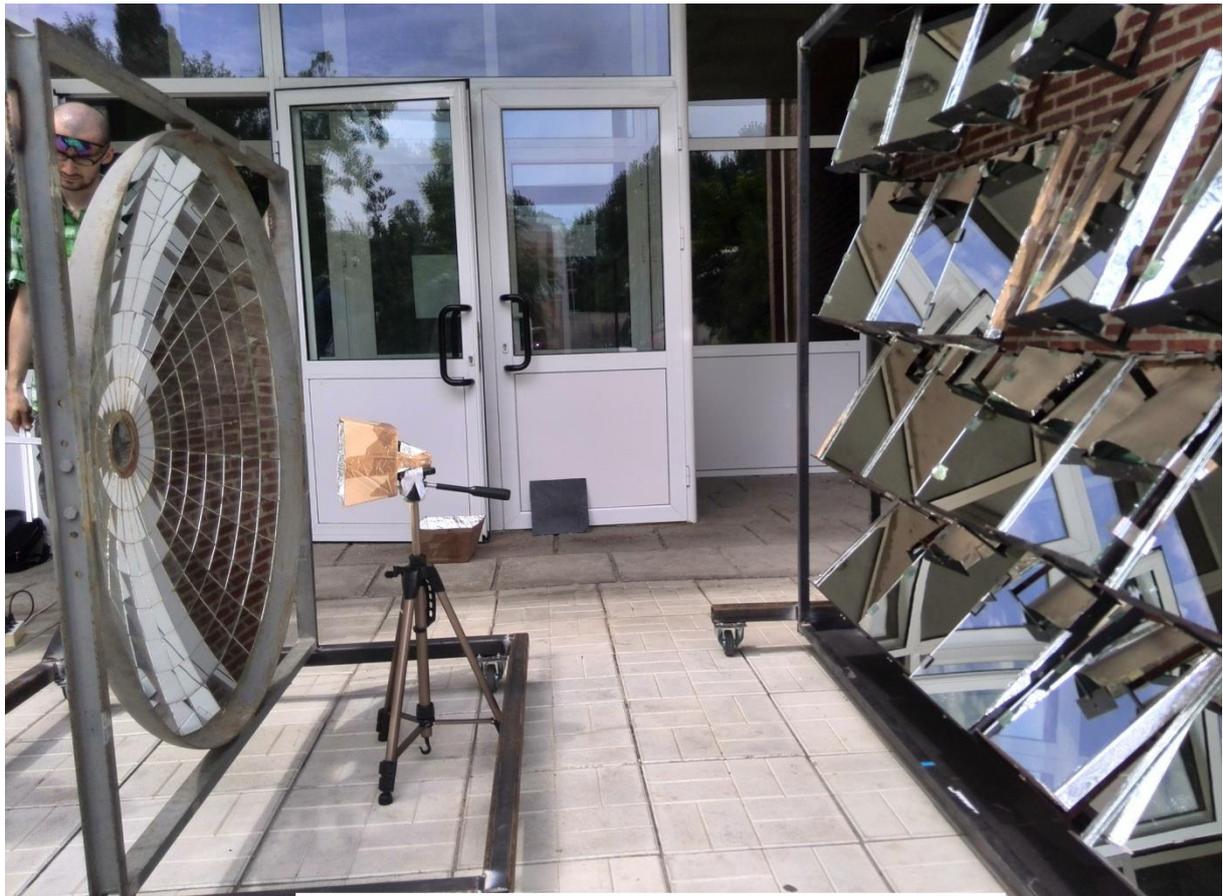
Nous pouvons conclure que pour jouer le rôle d'héliostat, chaque module doit être recouvert d'une surface plane. En effet, le rôle de l'héliostat est de refléter une grande surface du soleil dans la parabole. Par cette méthode, malgré quelques pertes (absorption, diffusion...), on concentre 3 fois (héliostat, parabole, récepteur).

### 3ème phase : Aboutissement

Nous décidons de réaliser un mini central solaire proche du modèle français du « four solaire d'Odeillo » dans les Pyrénées-Orientales [11].



*Photo et schéma de la centrale Odeillo.*



*Photo et schéma de notre installation.*

#### 4ème phase : Création des supports

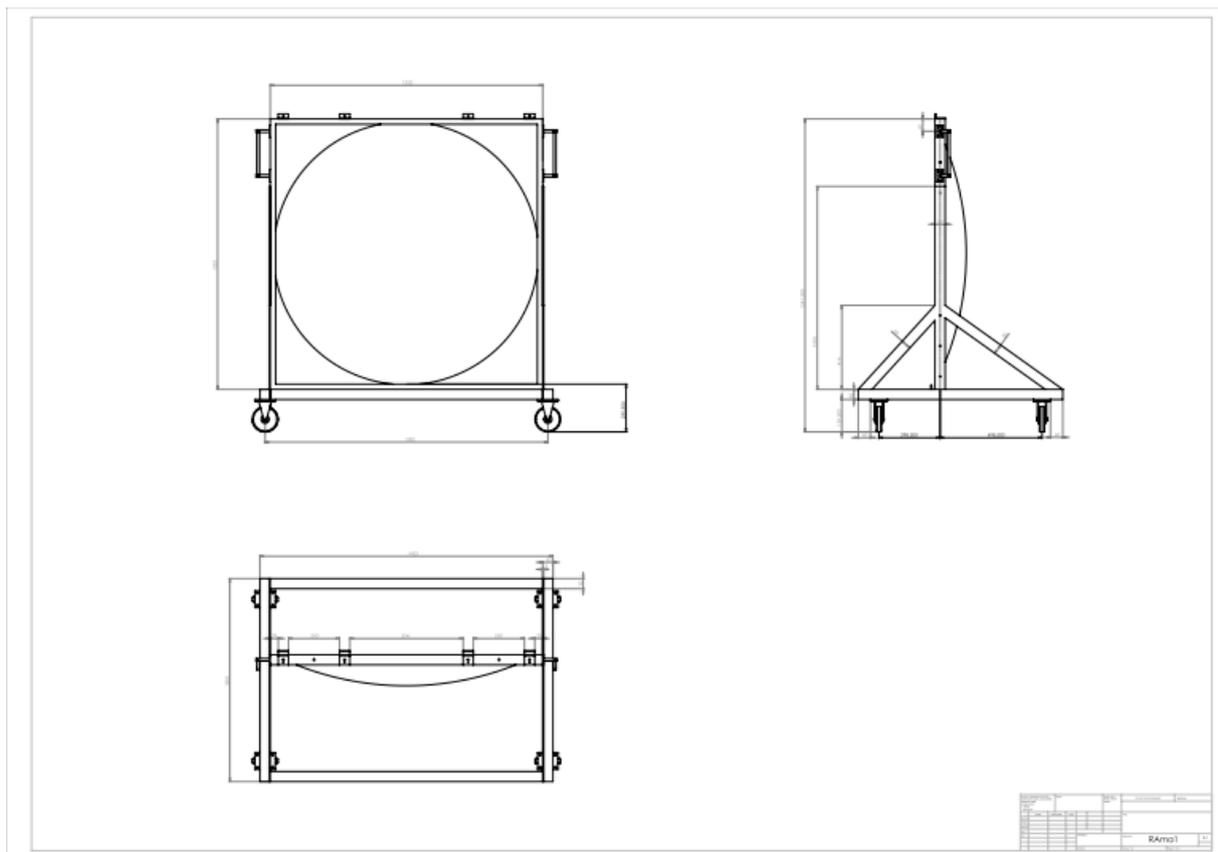
Nous allons réaliser un support pour la parabole.

Pour cela il doit être :

- Mobile pour le déplacement
- Capable de traverser différents terrains
- Solide pour durer dans le temps
- Simple d'utilisation et de construction
- Bon marché

Après discussion, la parabole sera fixe dans son support pour ainsi le simplifier.

Une simulation de résistance des matériaux et d'équilibre a été réalisée grâce au logiciel solidworks :



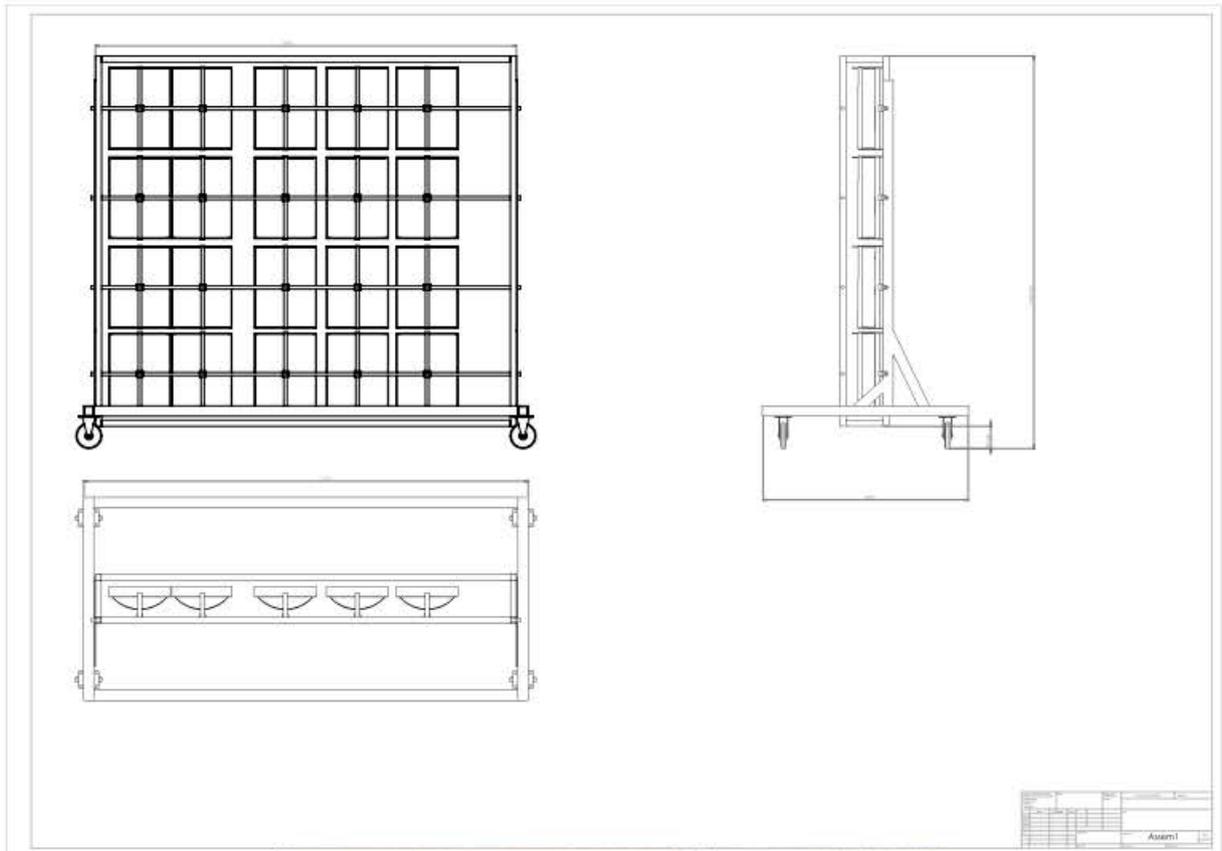
Plan du support de la parabole.



*Photo : support réalisé en collaboration avec les techniciens de l'université.*

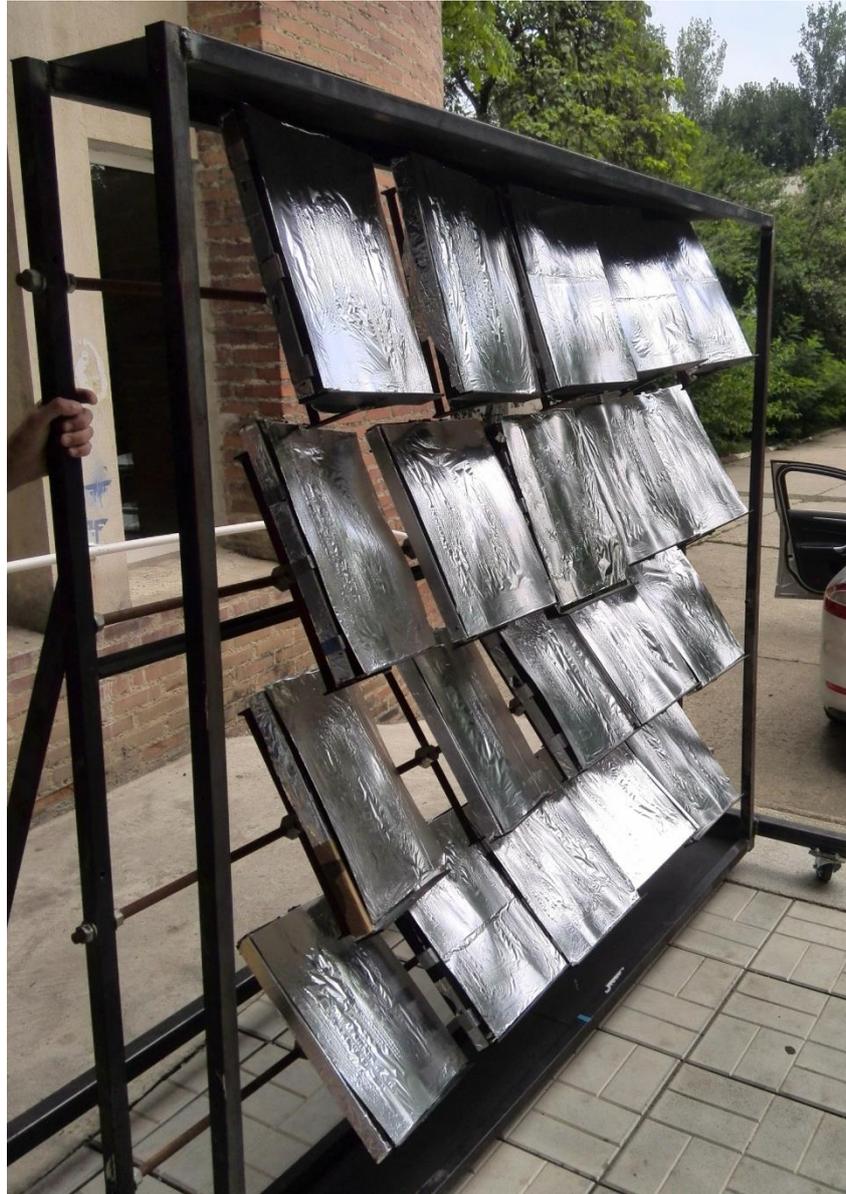
## b. REALISATION DU SUPPORT DE L'HELIOSTAT

Les différentes coupes doivent être mobiles et orientables dans un support. Nous avons donc recyclé entièrement l'ancien soleil artificiel et nous avons aligné 5 coupes en longueur et 4 en horizontal.



*Schéma et photo de l'héliostat et de son support.*

Les coupes sont équipées de miroirs. Les miroirs ne sont pas collés, il a fallu trouver une idée ingénieuse pour les fixer. Cette fixation a été réalisée grâce à des morceaux de 2 cm sur 8cm de tôle qui sont pincés et pliés pour maintenir les miroirs en place. Pour comparaison, nous les recouvrons lors de la phase de test d'aluminium afin de déterminer la performance entre l'aluminium et le miroir et ainsi décider s'il est vraiment indispensable d'utiliser des matériaux plus coûteux. Pour les recouvrir nous avons opté pour une solution extrêmement rapide, nous avons découpé des plaques de carton de la dimension des miroirs et recouvert d'aluminium collé. Ensuite, derrière chaque plaque d'aluminium nous avons replié sur eux-mêmes plusieurs morceaux de ruban adhésif. Ce procédé nous permettra de recouvrir rapidement chaque miroir et ainsi de ne pas subir l'influence du temps. Lors de la phase de test, nous diminuons également le nombre de lignes de miroirs pour voir l'influence d'une telle concentration.



*Photo des coupes recouvertes d'aluminium.*

Nous avons décidé de réaliser un 3<sup>ème</sup> appareil très simple pour réaliser une concentration directe linéaire grâce aux coupes recouvertes d'aluminium. Cela représente une installation cylindro-parabolique. Dans la même idée que pour l'héliostat nous choisissons de montrer s'il y a une différence importante entre l'utilisation d'aluminium (peu coûteux) et des lames de miroir de 2cm de largeur entreposées dans le cylindre.



*Photo de la coupe recouverte de miroirs de 2 cm de largeur (18 miroirs de 2 cm et 1 miroir de 1 cm pour compenser l'écartement et la place prise par la colle).*

## VIII. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Nous avons pu réaliser dans la dernière semaine du stage une prise de température. En effet, l'ancien capteur de température pour ce type d'utilisation était défectueux et après l'envoi de celui-ci par Monsieur Feidt, les techniciens ont conclu qu'il était irréparable.

Une deuxième solution s'est offert à nous, un ancien professeur de l'UPB, maintenant ministre de la recherche nous offre gracieusement son aide. Il possède une caméra Infra Rouge très performante qui permet de prendre le flux et la température de surface. Lui seul est habilité à l'utilisation de cette caméra. L'expérience se déroula le mercredi 31 juillet 2014.

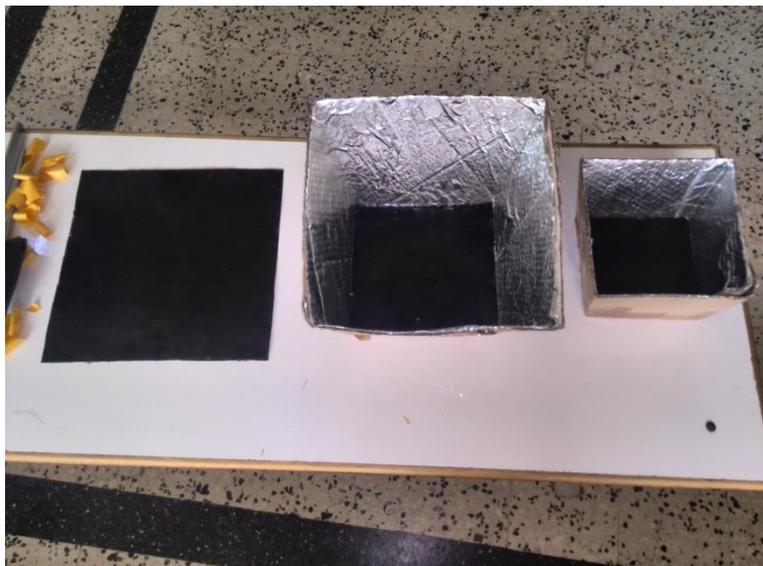
Pour profiter du matériel nous avons réalisé le maximum de mesures et d'expériences. Il est vrai que nous sommes tributaires des conditions climatiques et extérieures. C'est pour ces

raisons que toutes ces différentes mesures doivent être présent à titre indicatif et avec beaucoup de recul.

Nous avons réalisé différentes mesures :



Caméra Silver 420M.(voir annexe 2 le document technique sur la caméra)



Récepteurs de plus en plus petit.



*Installation de la caméra pour la prise de température.*



*Installation en fonctionnement avec l'héliostat au complet.*

Par la suite, nous allons effectuer des mesures en enlevant une ligne de miroirs à l'héliostat pour voir l'influence de la surface de miroirs sur la température. Puis nous finirons les mesures en utilisant seulement la parabole sans héliostat.



*Ici l'installation cylindrique, la plus simple, nous allons être surpris par les températures relevées.*

Récapitulatif des températures prises lors de cette journée :

<b>Experiments solaire, UPB-Bucarest, 31 juillet 2014</b>			
<b>Heure</b>	<b>Temp. [degree C]</b>	<b>Conditions</b>	<b>Montage utilise</b>
13h15	129	avec des nuages	hélioestat 4 lignes avec miroirs + parabole
13h20	126	avec des nuages	hélioestat 4 lignes avec Alu + parabole
13h23	126	avec moins de nuages	hélioestat 4 lignes avec Alu + parabole
13h26	164	soleil-oui, mais pas trop	hélioestat 4 lignes avec Alu + parabole
13h29	160	soleil-oui, mais pas trop	hélioestat 3 lignes avec Alu + parabole
13h30	148	soleil-oui, mais pas trop	hélioestat 2 lignes avec Alu + parabole
13h32	140	soleil-oui, mais pas trop	hélioestat 1 ligne avec Alu + parabole
13h39	136-137	Soleil + nuages	parabole concentrant sur la tôle
13h40	136-137	Soleil + nuages	parabole concentrant sur le récepteur incline
13h52	64-68	pas trop de nuages	la coupe avec Aluminium
13h57	60	nuages	la coupe avec petits miroirs

## a. PREMIERES CONCLUSIONS

Nous remarquons qu'il est très difficile de prendre des mesures. En effet, les nuages sont présents et cela influence de façon importante les températures. De plus, le soleil effectue sa trajectoire, il faut donc replacer les héliostats constamment. Cependant, nous pouvons déjà constater :

- Les nuages diminuent fortement les performances de l'installation
- L'aluminium a des propriétés très proches du miroir
- La diminution de surface de l'héliostat diminue fortement la température dans le récepteur
- La taille du récepteur a peu d'influence sur la température
- Pour l'installation cylindrique l'aluminium a des performances plus grandes que les miroirs.

Nous pouvons expliquer partiellement ces différents résultats. En effet, nous pensons que l'aluminium pour une utilisation domestique à moindre coût offre de belles performances.

La taille des récepteurs influence peu, dans la limite que celui-ci soit de la dimension de la tache focale ( $Tache\ focal = 0,4 \times 0,4 = 0,16m^2$ ) Le plus petit des récepteur a été dimensionné pour que le cadre soit évasé (le premier qui laisse entre les rayons) soit de la dimension de la tache focale de la parabole. L'expérience a été réalisée avec un soleil artificiel en face de la parabole et nous avons mesuré la distance et la surface du projeté de la parabole.



*Prise de la surface de la tache focale.*

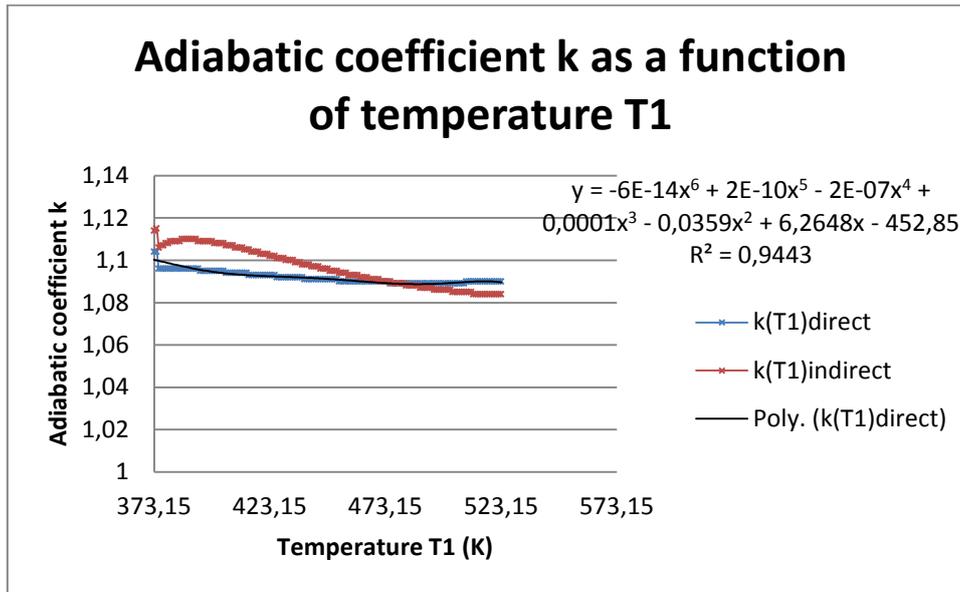
Le plus grand des récepteur, la simple plaque noire mesure la dimension de la tache focale et le dernier est de dimension intermédiaire.

Pour l'utilisation de l'installation simple nous avons remarqué qu'une étude optique aurait permis de diriger chaque lame de miroir collée sur le cylindre pour que la concentration soit linéaire. Cela explique pourquoi l'aluminium, qui lui épouse parfaitement la surface est plus performant. Néanmoins, nous avons été surpris par la température relevée malgré des nuages et un niveau de technicité très simple et peu coûteux. Ce type d'installation demeure très intéressant pour une utilisation domestique, production d'eau chaude sanitaire, chauffe de bassin ...

## IX. RESULTATS THEORIQUES

Grâce aux différentes prises de mesures, les différents calculs sur Excel et le logiciel EES. Nous allons pouvoir sortir différentes analyses issues de l'étude.

Il a fallu premièrement déterminer les coefficients adiabatiques caractéristiques de chaque fluide étudié.

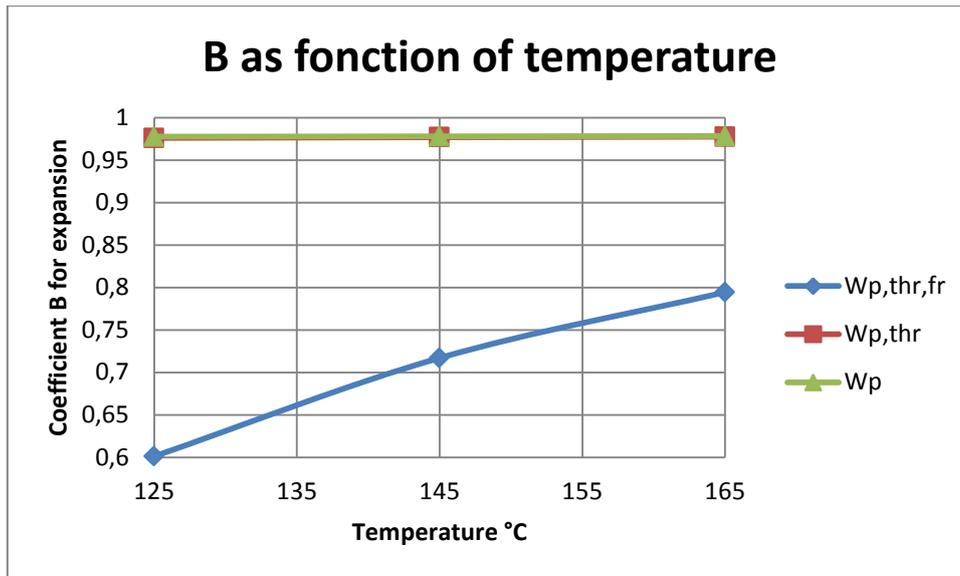


*Coefficient adiabatique en fonction de la température à l'entrée de la détente pour le Benzène.*

Nous remarquons que quelle que soit la méthode de calcul, qu'elle soit intégrée directement par le logiciel ou par nos soins, la variation du coefficient d'adiabaticité est très faible. Mais nous en tiendrons compte dans notre étude et notre programme sur Excel. Nous choisirons la méthode directe intégrée par le logiciel qui atteint une précision plus grande car il n'y a pas d'étape intermédiaire.

Dans la seconde étape, nous allons appliquer les différents modèles de calcul et exposer les différents résultats obtenus :

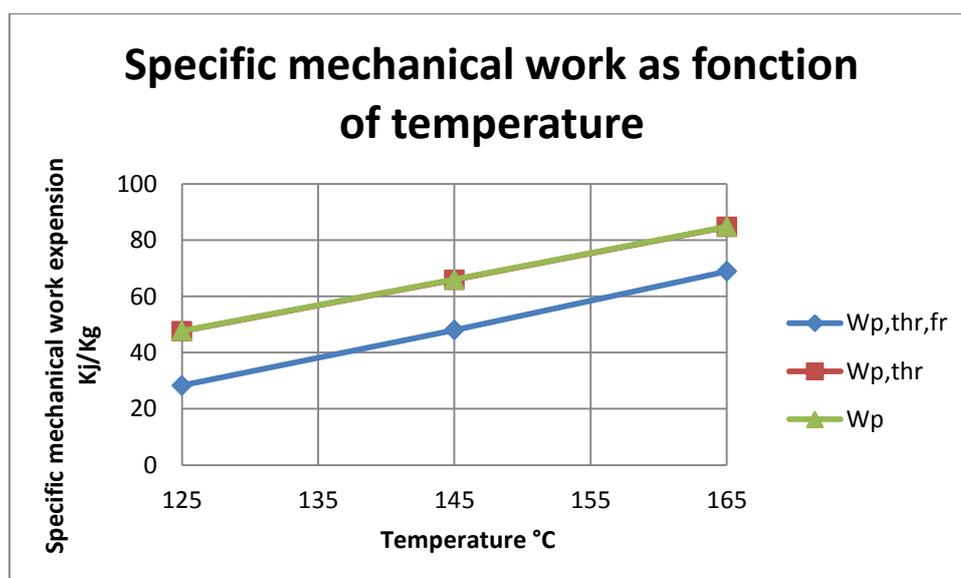
*Voir annexe 3 (tableau thermodynamique p91)*



Résultat du coefficient caractéristique de la thermodynamique en vitesse finie.

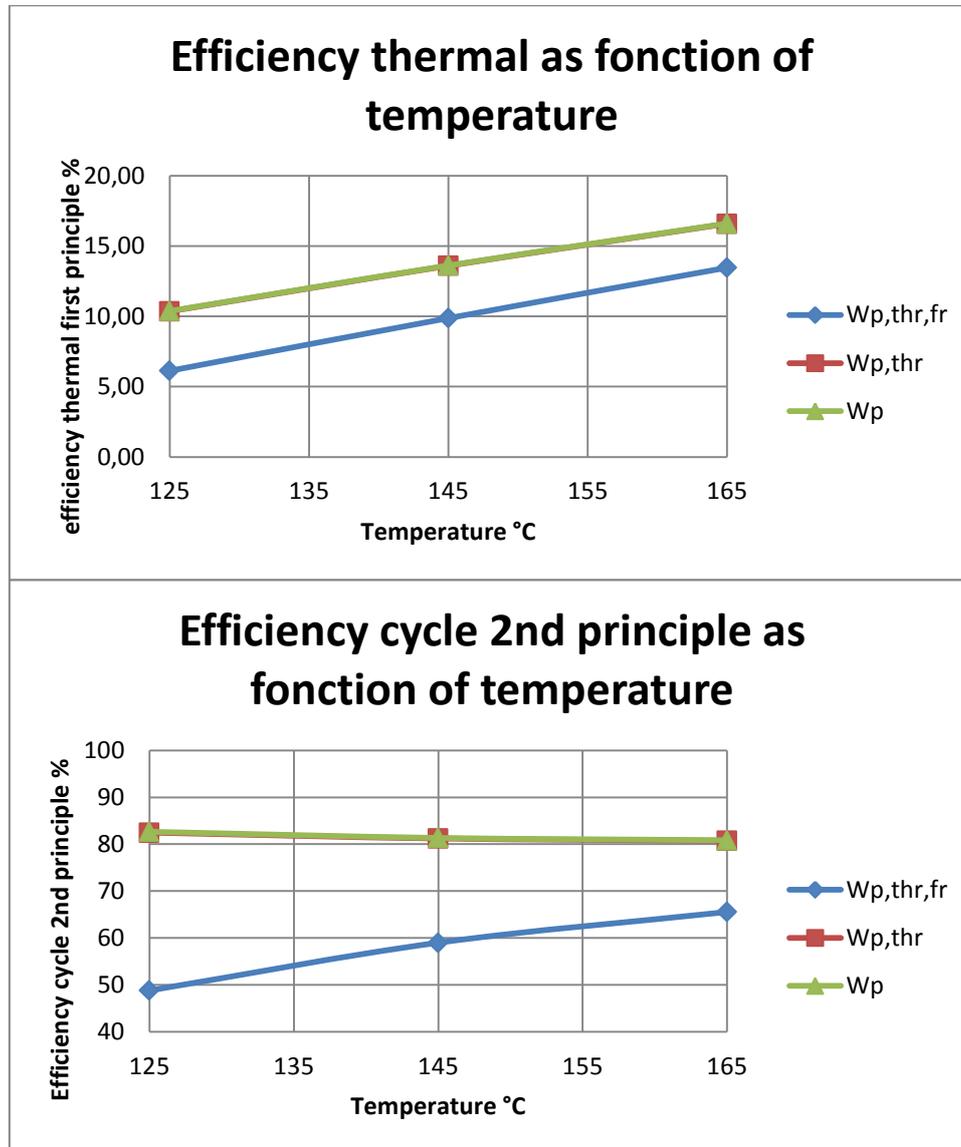
Il augmente quand la température augmente. Il est très proche du rendement et donc laisse percevoir que plus la température est grande plus nous allons récupérer du travail lors de la détente.

On voit également que lorsque l'on enlève les phénomènes de friction et de laminage au sein des soupapes nous avons un coefficient très proche de celui obtenu lorsqu'on enlève seulement les phénomènes de frictions. Nous avons donc une vitesse de piston de 1,2 m/s et nous pouvons en déduire peut être que le phénomène de perte le plus important est dû aux pertes par frictions mécaniques entre les éléments du système (frottements).



Le travail dans la détente du cycle augmente avec la température d'entrée dans la détente.

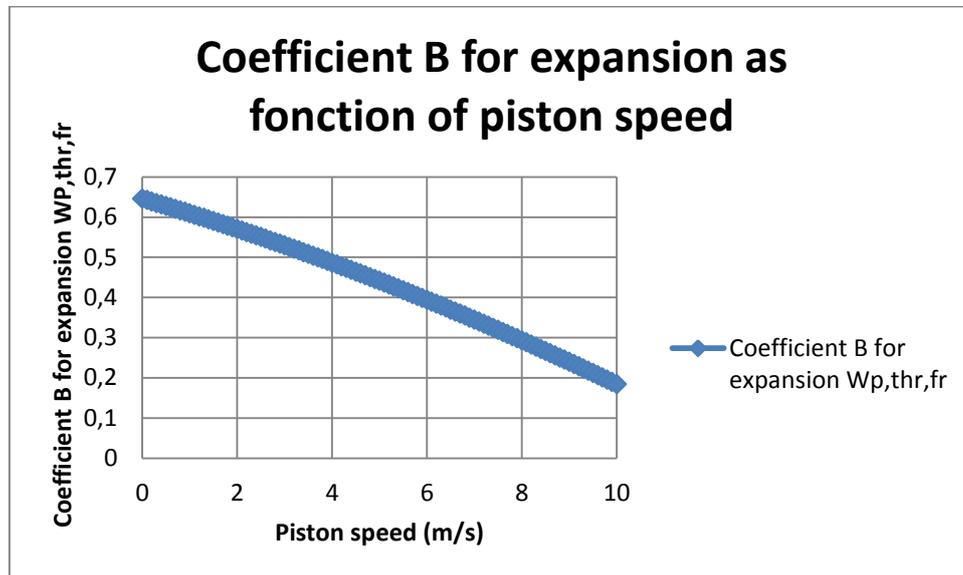
Cela s'explique avec la définition de base par l'augmentation de l'enthalpie du fluide avec la température.



*Représentation des rendements selon le premier principe et le second principe du cycle ORC alimentée par du Benzène.*

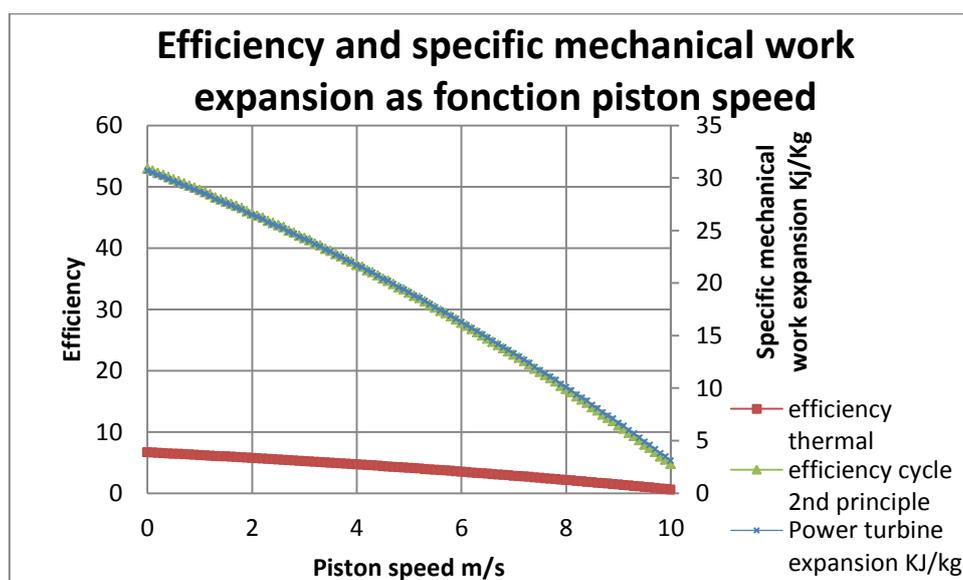
Nous pouvons conclure que le rendement selon le premier principe [12] augmente en fonction de la température, cela est dû à l'augmentation du travail récupérée nette. Mais le plus intéressant est de voir que pour un tel fluide le rendement selon le second principe de la thermodynamique augmente lorsque toutes les pertes sont en jeu mais diminue légèrement lorsque nous ne prenons plus en compte toutes les pertes ( $W_{p, thr, fr}$ ). Nous nous éloignons donc de l'idéal établi par un cycle de Carnot entre deux sources chaudes et froides.

Nous remarquons, malgré tout, que nous atteignons de très bons rendements par rapport à Carnot, ce qui montre que le cycle ORC est bien proche de celui de Carnot [11] et [12] son utilisation peut être prometteuse.



Le coefficient B caractéristique de la thermodynamique en vitesse finie diminue lorsque la vitesse du piston augmente cela est dû à l'importance des pertes qui sont de plus en plus grande quand la vitesse du piston augmente.

La température augmente avec la vitesse du piston, engendrée par l'échauffement dû aux frottements mécaniques.



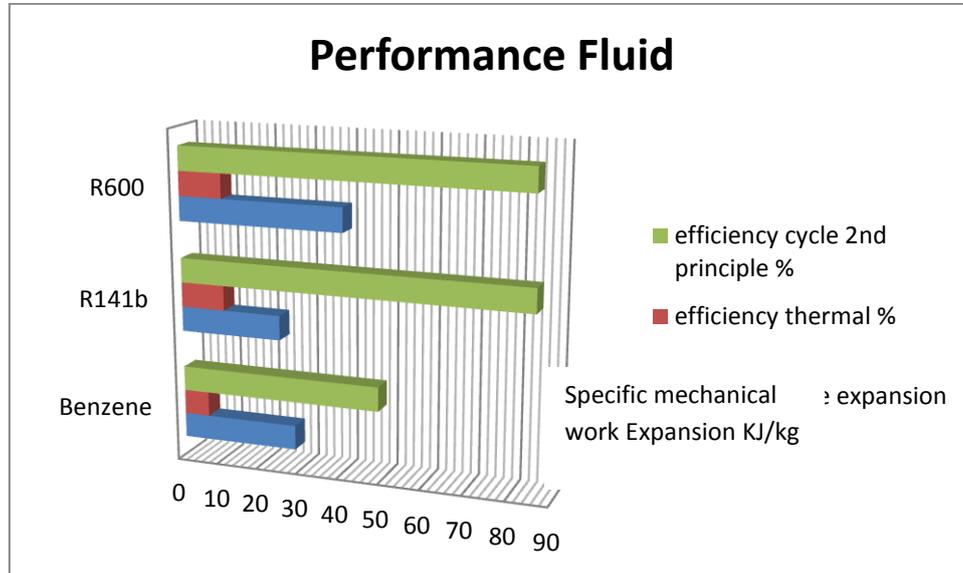
Les rendements et le travail mécanique spécifique décroissent en fonction de l'augmentation de la vitesse du piston. Cela s'explique par l'augmentation en fonction de la vitesse du piston des différentes pertes. Plus il y a de pertes, plus les rendements sont mauvais. Il faut donc dans une étude approfondie de celle-ci trouver un compromis entre vitesse et pertes.

Nous allons passer à la comparaison des différents fluides pour nos températures choisies. Nous avons sélectionné en début d'étude 4 fluides organiques Benzène, R134a, R141b et R600 par leurs performances, neutralité avec l'environnement. Nous allons maintenant fixer la vitesse du piston à 3m/s et la température en entrée de la détente à 125°C. Nous remarquons que la température critique du R134a est de 101°C et sa pression critique de 40,59 bars donc lors d'une autre étude plus approfondie nous pourrions utiliser ce fluide dans un cycle subcritique, mais pour le moment nous choisissons de le mettre de côté pour l'étude.

Types of fluids	Hot temperature (K)	Expansion temperature (K)
Benzene	398,15	371,532
R141b	398,15	353,78
R600	398,15	351,4

*Tableau récapitulatif des températures atteintes au début et à la fin de la détente.*

Nous remarquons que le Benzène a la température de sortie de détente la plus élevée donc ce fluide est le plus disposé à la réalisation d'une cogénération.



*Histogramme représentatif des performances de chaque fluide dans des conditions réelles de notre installation.*

Sans hésitation, nous constatons que le R600 est le fluide le plus performant, c'est celui qui développe le plus de puissance lors de la détente, ce qui est le plus intéressant puisque c'est le travail que l'on veut récupérer. D'autre part, ses rendements sont les plus importants. Par ailleurs, le Benzène développe un peu moins de puissance mais est surtout beaucoup moins performant en terme de rendement. En outre, ce fluide provoque beaucoup d'irréversibilité au sein du cycle et est moins adapté pour notre cycle que les deux autres.

Le R141b est aussi performant en terme de rendement que le R600 mais la puissance que l'on peut récupérer par sa détente est beaucoup plus faible car sa courbe de saturation est de plus faible épaisseur ( $T_{critique\ R600}=151,95^{\circ}C$ ,  $T_{critique\ R141b}=204,25^{\circ}C$ , et  $T_{critique\ Benzène}=288,85^{\circ}C$ ) et nous remarquons également que les fluides avec le rendement le plus grands sont les fluides qui ont leur température critique proche de la température la plus élevée du cycle (entrée détente dans le piston). En effet, on se retrouve proche du sommet de la courbe de saturation donc la détente ne peut que être la plus importante.

## X. CONCLUSION GENERALE DE L'ETUDE

Il s'agissait de développer une installation solaire ORC à moindre cout avec une parabole et un soleil artificiel. Nous avons réalisé ceci par la découpe de miroirs, la réparation de la parabole et la conception des supports. Grâce au recyclage de l'ancien soleil artificiel, des calculs optiques et plusieurs échanges, nous sommes parvenus à conclure sur la faisabilité d'une installation de captage solaire d'une parabole couplée à un héliostat et un récepteur sur le modèle du four solaire d'Odeillo par hasard.

Après la réalisation de chaque pièce, nous avons fait plusieurs tests, réglages et avons choisi d'étudier la différence entre matériaux aux propriétés similaires, à savoir l'aluminium et les miroirs. Une troisième petite installation qui servira de travaux pratiques pour l'UPB a été réalisée et nous a permis de connaître les performances d'une installation à très faible coût avec toujours ce souci de comparaison entre l'aluminium et les miroirs. Cette fois-ci se sont de petites lames de miroirs qui feront office de surfaces réfléchissantes.

L'installation construite, nous avons réalisé pendant une heure, différents tests à l'aide d'une caméra thermique qui ont permis de définir une plage de température minimale que notre installation peut délivrer dans des conditions nuageuse.

La température maximale était de  $165^{\circ}C$  grâce à l'installation complète et les 4 lignes de miroirs de l'héliostat et la minimale de  $125^{\circ}C$  pour une installation sans l'héliostat juste avec la parabole. La troisième installation nous délivre des températures aux alentours de 60-70 degrés ce qui est très fort pour une installation de cette ampleur.

Pour l'installation principale, les températures atteintes sont acceptables mais peuvent être nettement améliorées, avec des conditions climatiques plus clémentes et surtout une préparation et un réglage de l'héliostat plus fin.

Avec ces différentes températures, une étude en vitesse finie du cycle ORC a été étudiée avec Excel et EES. Nous avons étudié l'impact de la variation de la température et l'importance des différentes pertes (Pertes par irréversibilités dues à la vitesse du piston ( $W_p$ ), pertes dues aux phénomènes de laminage aux seins des soupapes (thr), pertes par Friction mécanique (fr) entre les éléments du système) sur les performances du cycle particulièrement sur le benzène car c'est le fluide le plus commun et accessible pour une expérience réelle future. Nous avons donc fixé les autres paramètres tels que la vitesse du piston à 3m/s. Ensuite c'est la vitesse du

piston qui fut modifiée et la température fixe à  $125^{\circ}\text{C}$ . Puis finalement, nous avons fait varier la nature du fluide pour comparer les fluides et déterminer le plus performant.

Par conséquent, la température améliore les performances de notre installation. Plus la température est élevée plus les rendements et le travail mécanique spécifique récupérables dans la détente sont importants. Nous pouvons juste remarquer une légère baisse du rendement selon le second principe de comparaison avec le cycle idéal de Carnot, cela signifie que l'on s'éloigne légèrement du cycle parfait.

La variation des différentes pertes, nous fait remarquer que les pertes sont principalement dues aux pertes par frictions mécaniques ( $f_r$ ) soit les différents frottements.

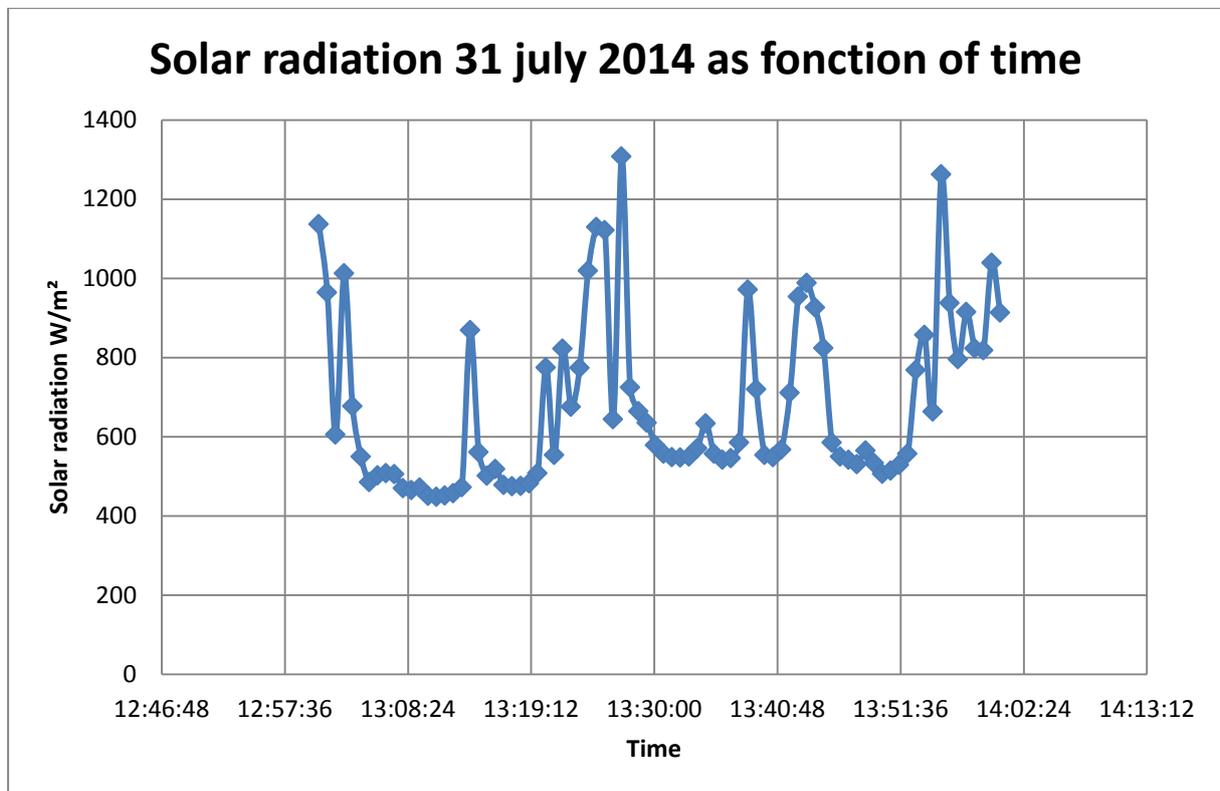
Lorsque l'on fait varier la vitesse du piston on constate que la température du point en fin de détente augmente, c'est-à-dire qu'il s'éloigne de plus en plus du point de détente isentropique et donc il y a de plus en plus d'irréversibilité. Ce qui induit que plus la vitesse du piston augmente plus on les rendements et l'énergie de détente diminuent, jusqu'à atteindre une valeur nulle. Il faut donc impérativement utiliser une vitesse la plus lente possible.

Dans notre dernière étude, nous choisissons de confronter les performances de 3 fluides déjà prés sélectionnés en début d'étude, le Benzène, le R141b et le R600. Les conditions sont identiques, une température d'entré en détente de  $125^{\circ}\text{C}$  et une vitesse de piston de 3m/s. Le fluide qui ressort comme le plus performant a tous les points de vue (puissance récupérable en détente et rendement les différents rendements) est le R600. Ce fluide a les caractéristiques thermodynamiques les plus adaptés, température critique, pression, courbe de saturation...

## XI. OUVERTURE

Cette étude m'aura apporté de l'expérience et notamment développé le sens du travail en équipe. Il m'a permis de construire un projet du début jusqu'à sa réalisation complète et le tout dans un environnement et une culture différentes. J'ai pu connaître une nouvelle façon d'aborder les fondamentales de la thermodynamique. Utiliser des logiciels de CAO, de simulations numériques de problème thermique. Comprendre une demande et y répondre en sélectionnant parmi une multitude de possibilités. Je me suis rendu compte de l'importance de chaque corps de métier et le fait que chaque discipline s'entrecroisait pour l'optimisation et la compréhension de chacun et de l'ensemble de l'étude. Par exemple, lors de la réalisation des supports, il a fallu expliquer aux techniciens nos choix et face à eux et être directifs. Apprendre à faire en situation réelle, dans des conditions particulières tout en tenant compte des règles spécifiques de l'administration, des conditions climatiques, des moyens budgétaires et d'un temps relativement limité.

Cette étude permet une multitude d'ouvertures et de pistes de recherche. En effet, plusieurs améliorations peuvent être apportées, d'autres mesures effectuées pour augmenter la précision des mesures, des améliorations de réglage et de précision dans le temps. Une étude peut être également étudiée en fonction des données météorologiques.



On pourrait comparer les performances de plusieurs jours de mesure. L'énergie récupérable par notre système par rapport au flux solaire et ainsi déterminer le rendement global de notre machine en fonction de la météo. Et pourquoi ne pas prévoir ces puissances sur une année et faire une analyse de rentabilité économique pour finaliser le projet dans sa totalité.

A titre d'exemple : les différentes dépenses envisageables pour le projet :

Produits	Produs	No	Prêt (RON)	Furnizor
Roue pivotante $\Phi 80$ mm	Roti pivotante $\Phi 80$ mm	4	114,76	HORNBACH
Roue fixe $\Phi 80$ mm	Roti fixe $\Phi 80$ mm	4	101,56	HORNBACH
Ecrou de sécurité M8	Piulita de siguranta M8		5,9	HORNBACH
Boulon M8x40	Surub M8x40		3,16	HORNBACH
Rondelle plate 8	Saiba plata 8		1,16	HORNBACH
Boulon M8x20	Surub M8x20		9,04	HORNBACH
Disque de coupe	Discuri de debitat	5	26,45	HORNBACH
Tube rectangulaire 50x50x5	Teava rectangulara, 50x50x5	2*6 m	101,4	BADUC
Tube rectangulaire 50x50x4	Teava rectangulara, 50x50x4	2*6 m	100,5	BADUC
Barre plate 50x5	Platbanda 50x5	2*6 m	37,2	BADUC
Barre plate 50x4	Platbanda 50x4	2*6 m	29,64	BADUC
Taxe de coupe de l'acier	Debitare		7,03	BADUC
Electrode pour soudure	Electrozi	1 kg	16	
Papier aluminium	Folie aluminiu	1 rola	7,45	METRO
Colle aracet	Adeziv fix aracet	1 buc	6,2	BRICOSTORE
Miroirs 390x320mmx2	Oglinzi 390x320x2	30	200	
		Total RON	767,45	
		Total EUR	174,42	

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Lemoine. F, *Chaleur fatale V3*, pdf cours ENSEM, 2014, p82
- [2] Paul GLANSDORFF, « THERMODYNAMIQUE - Thermodynamique technique », Encyclopædia Universalis [en ligne], <http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/thermodynamique-thermodynamiquetechnique/> consulté le 27 janvier 2014
- [3] Pierre MOYEN, « RANKINE WILLIAM JOHN MACQUORN - - (1820-1872) », Encyclopædia Universalis [en ligne]: <http://www.universalisedu.com/encyclopedie/william-john-macquorn-rankine/> consulté le 27 janvier 2014
- [4] <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-thermodynamique-concentration> consulté le 10/01/14
- [5] Fankam Tchanche. B, Papadakis. G, Lambrinos. G, Frangoudakis. A, *Fluid selection for low-temperature solar organic Rankine cycle*, Applied thermal Engineering 29 (2009) 2468-2476
- [6] Guo.T, Wang. H-X, Jhang, S-J, *Selection of working fluids for a novel low-temperature geothermal powered ORC based cogeneration system*, Energy Conversion and Management (2011), pp 946-952
- [7] Jiangfeng. W, Zhequan. Y, Man .W, Shaolin .M, Yiping .D, *Thermodynamic analysis and optimization of an (organic Rankine cycle) ORC using low grade heat source*, Energy, Volume 49, 1 January 2013, Pages 356-365.
- [8] Saleh B, Koglbauer G, Wedland M, Fischer J, *Working fluids for low-temperature Organic RankineCycles*, Energy 32 (2007) 1210-1221
- [9] Petrescu, S., Costea M., *Development of Thermodynamic with Finite Speed and the Direct Method*, edition AGIR, 2011.
- [10] Petrescu. S, Dobre. C, Stanciu. C, Costea. M, Trica-Dragomirescu. G, Feidt. M, *The direct method from thermodynamics with finite speed used for performance computation of quasi-Carnot-irreversible cycles, I. Evaluation of coefficient of performance and power for refrigeration machines with mechanical compression of vapour*. 8p

- [11] Petrescu. S, Zaiser. J, Harlab. C, Petrescu. V, Costea. M, Florea. T, Petre. C, Florea. T-V, Florea. E, *Advanced Energy conversion* , MECH 422/622 Volume II Bucknell University Mechanical Engineering Departement, Lewisurg (U.S.A) Febuary 2006, 355p
- [12] Goni Boulama. K, *Valorisation de sources de chaleur à basse température par conversion en travail mécanique*, Article au collège militaire royal du Canada, 2010. 6p
- [13] Feidt.M, Kheiri. A, Le. V, *Analyse exégétique d'un cycle organique d'un cycle organique de Rankine (COR) sous-critique pour récupérer les chaleurs perdues à basses température*, Efficacité énergétique-sources d'énergies renouvelables-protection de l'environnement COFRET'12, Sozopol, 2012, 6p

# **ANNEXES**



clean energy ahead  
**TURBODEN**

A PRATT & WHITNEY POWER SYSTEMS COMPANY

1980-2010: 30 years of organic rankine systems. The power of experience.



APPLICATIONS  
BIOMASSE  
UNITES CHP  
AVEC SPLIT

## Unités CHP pour cogénération à partir de la biomasse

Les installations de cogénération avec un module ORC Turboden permettent de produire énergie électrique et chaleur à partir de biomasse ligneuse avec un rendement optimal et une extrême simplicité d'exploitation. La puissance des turbogénérateurs est généralement comprise entre 200kW électriques et 3 MW électriques. Le système split Turboden permet de maximiser la production électrique pour une consommation de biomasse donnée grâce à une exploitation plus efficace de la puissance thermique de la chaudière.



ANNEXES: Station de Turboden 10

### APPLICATIONS

- Réseau de chauffage urbain
- Séchage du bois de scierie
- Séchage de la sciure pour production de granulés
- Préchauffage de l'air pour la production de MDF
- Serres, piscines, installations thermales
- Réfrigération

### COMBUSTIBLES

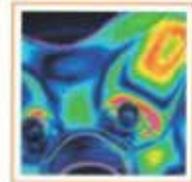
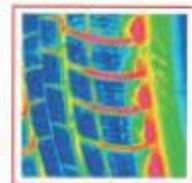
- Biomasse ligneuse : sciure, copeaux de bois, écorce, bois traité
- Autre biomasse : boues biologiques, paille, résidus d'élagage, cosses de céréales, etc.
- Déchets



## SILVER 420M

High performance infrared camera  
for Research and Development applications

- High sensitivity InSb focal plane array
- 320x256 format for sharp imagery
- 3-5  $\mu\text{m}$  spectral range
- 150 Hz maximum frame rate in full format
- Up to 25 000 Hz in sub arrays windowing mode
- External triggering capabilities
- 14 bit dynamic range
- Full radiometric capabilities
- Motorized filter wheel and focus control
- Plug & Play interface with USB2.0 output



# > The SILVER 420M is the new standard for Research & Development applications

The SILVER 420M is specifically designed for the most demanding users of IR technology, who want to perform thermal measurements with the highest sensitivity, accuracy and speed at an affordable cost.

## Ultra high sensitivity InSb focal plane array

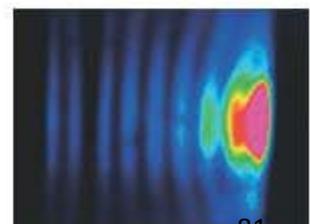
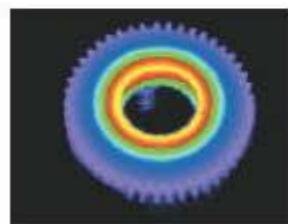
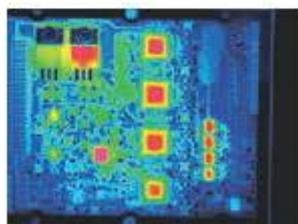
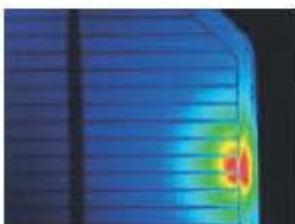
The 320x256 format InSb detector offers sensitivity better than than 20mK, while keeping an extraordinary dynamic range and perfect linearity.

## Frame rate, sub arrays windowing mode and external triggering

The frame rate is programmable from 1 Hz up to 150 Hz in full frame format. Sub arrays windowing modes are user friendly and flexible. Integration time is adjustable in 1 $\mu$ s increments. External triggering allows synchronizing the image capture to the most fugitive events.

## Plug & play

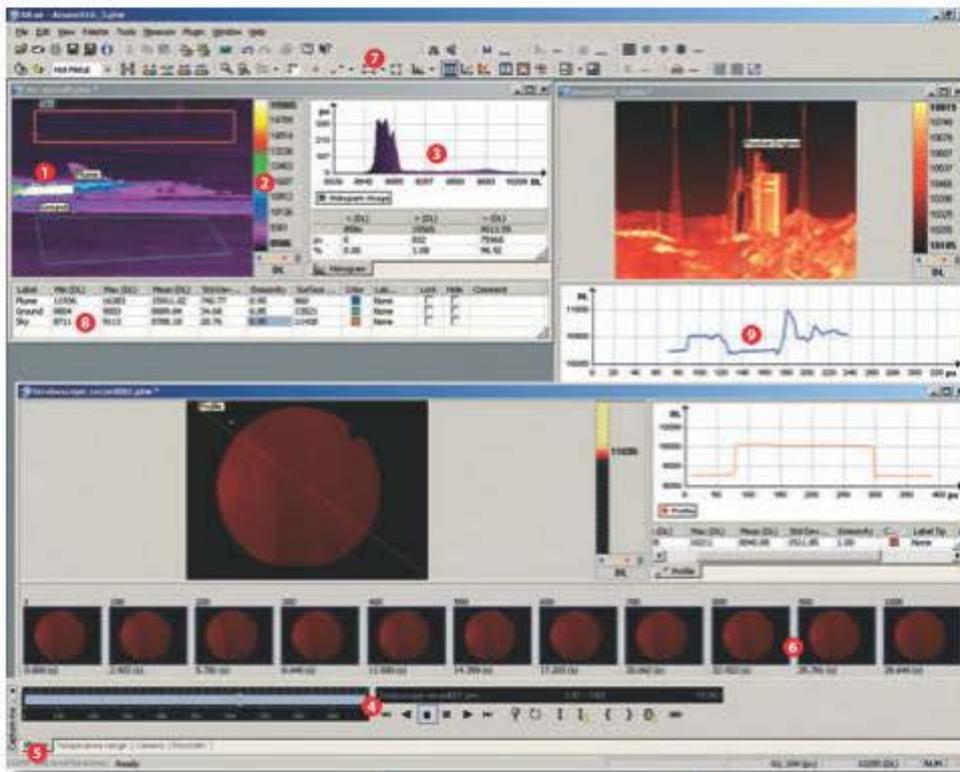
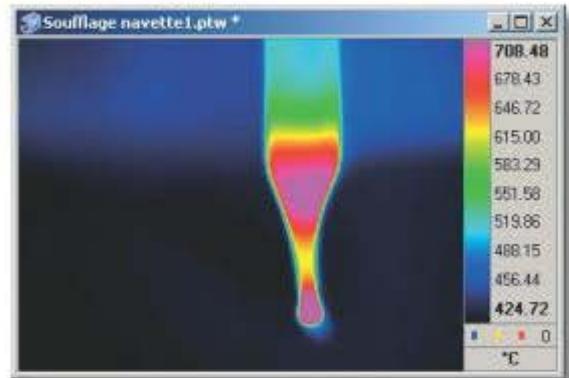
The SILVER 420M is truly plug & play using USB2.0 output for digital video or optional CAMLINK for more demanding users. No proprietary frame grabber cards are required.



# > SILVER 420M and ALTAIR software provides outstanding radiometric performances and ease of use

## Fast and simple

Only one USB2.0 cable is required to connect the SILVER 420M with ALTAIR software. ALTAIR intuitive user interface allows click and go setup of the camera. ALTAIR displays and stores radiometric images at full frame rate to the hard disk with full 14 bit dynamic range. Advanced image analysis features and functionality dedicated to thermal measurements are standard.



- 1 Live image display and live tools
- 2 Image scale, multiple color palette, multiple units
- 3 Histogram on image or on ROI
- 4 Digital video recorder & player
- 5 Camera control & temperature range
- 6 Temporal analysis image by image
- 7 Detachable tool bar with external plug in access
- 8 Editable tools (ROI) stored as files
- 9 Temperature profile

The SILVER 420M is available in the following package configurations

- **BASIC PACK** :The standard SILVER camera for immediate access to high performance IR imaging.
- **THERM PACK** :For thermography users requiring accurate temperature measurement, wavelength filtering, extended temperature range, emissivity corrections.
- **VISION PACK** :For demanding on line process control and imaging applications where connectivity to the vision world is necessary.
- **FULL PACK** :The most advanced SILVER version with all options installed.

# > SILVER 420M High performance infrared camera for Research and Development applications

Feature List for the SILVER 420M	SILVER 420M	Vision Pack	Therm Pack	Full Pack
Sensor 320x256 pixels - In5b - Pitch 30 µm	✓	✓	✓	✓
Waveband 3,6 - 5,0 µm	✓	✓	✓	✓
NETD < 20 mK	✓	✓	✓	✓
Frame rate 100 Hz	✓		✓	
Frame rate 150 Hz		✓		✓
Integral stirling cooler	✓	✓	✓	✓
Motorized lens - focal length 25 mm	✓	✓	✓	✓
Optical interface : bayonet 1/4 turn	✓	✓	✓	✓
Internal shutter	✓	✓	✓	✓
USB 2.0 output for digital video and commands	✓	✓	✓	✓
Programmable integration time 10 µs to 10 ms	✓	✓	✓	✓
14 bits digital video format	✓	✓	✓	✓
S-video output	✓	✓	✓	✓
Power supply 80-240 VAC input 12 VDC output	✓	✓	✓	✓
ALTAIR software for Windows XP/2K	✓	✓	✓	✓
Input trigger : 0-3 VDC		✓		✓
Trigger jitter - start of the integration time < 250 ns		✓		✓
Trigger output (start of integration time) : 3 VDC		✓		✓
CAMLINK interface		✓		✓
Labview drivers for USB and CAMLINK interface		✓		✓
Windowing : half format & quarter format		✓		✓
Filter wheel			✓	✓
Extended dynamic range (multiple integration time)			✓	✓
Composer software for extended dynamic range option			✓	✓
Temperature calibration (range TBD)			✓	✓
Emissivity normalization software			✓	✓

Physical specifications	
Size (LxWxH)	310 x 135 x 165 mm
Weight	3,6 kg
Base mounting	Standard 1/4"
Operational temperature	-15 °C to +50 °C
Shock	Operational 25 G, IEC 68-2-29
Vibration	Operational 2 G, IEC 68-2-26
Input voltage	+12 VDC
Power consumption	30 Watt

Optional lenses - bayonet mount
Microscope lens G1 : X1 - 25 µm resolution
Close up lens : 100 µm resolution
12 mm FOV 38°
50 mm FOV 11°
200 mm FOV 2,5°



Tableau caractéristique thermodynamique pour le benzène, coefficient adiabaticité k et courbe de saturation :

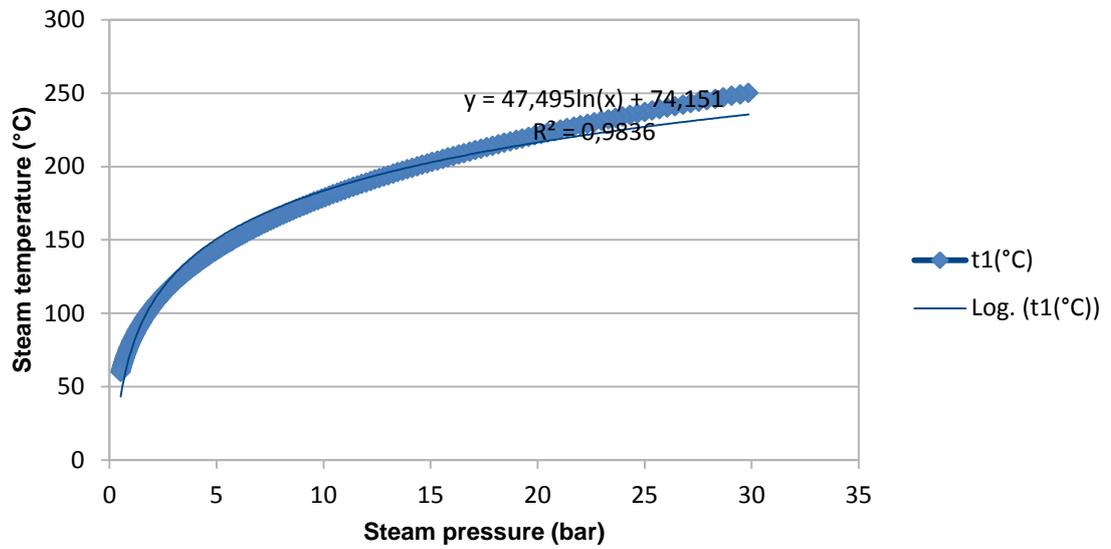
P1(bar)	t1(°C)	Xv	T1 (K)	P1 (Bar)	T2 (K)	P2 (Bar)	k formule dir	k formule ind	S1=S2 Kj/kg.K
29,86	250	1	523,2	29,86	348,2	0,2206	1,09	1,084	1,265
29,47	249	1	522,2	29,47	348,2	0,2217	1,09	1,084	1,265
29,07	248	1	521,2	29,07	348,2	0,2229	1,09	1,084	1,264
28,68	247	1	520,2	28,68	348,2	0,2242	1,09	1,084	1,264
28,3	246	1	519,2	28,3	348,2	0,2255	1,09	1,084	1,263
27,92	245	1	518,2	27,92	348,2	0,2268	1,09	1,084	1,262
27,54	244	1	517,2	27,54	348,2	0,2283	1,09	1,084	1,262
27,17	243	1	516,2	27,17	348,2	0,2298	1,09	1,084	1,261
26,8	242	1	515,2	26,8	348,2	0,2313	1,09	1,084	1,26
26,43	241	1	514,2	26,43	348,2	0,233	1,09	1,084	1,259
26,07	240	1	513,2	26,07	348,2	0,2346	1,09	1,084	1,259
25,71	239	1	512,2	25,71	348,2	0,2364	1,09	1,084	1,258
25,36	238	1	511,2	25,36	348,2	0,2382	1,09	1,084	1,257
25,01	237	1	510,2	25,01	348,2	0,24	1,09	1,085	1,256
24,66	236	1	509,2	24,66	348,2	0,2419	1,09	1,085	1,255
24,32	235	1	508,2	24,32	348,2	0,2438	1,09	1,085	1,254
23,98	234	1	507,2	23,98	348,2	0,2458	1,089	1,085	1,253
23,64	233	1	506,2	23,64	348,2	0,2479	1,089	1,085	1,253
23,31	232	1	505,2	23,31	348,2	0,25	1,089	1,085	1,252
22,98	231	1	504,2	22,98	348,2	0,2522	1,089	1,085	1,251
22,65	230	1	503,2	22,65	348,2	0,2544	1,089	1,085	1,25
22,33	229	1	502,2	22,33	348,2	0,2567	1,089	1,085	1,249
22,01	228	1	501,2	22,01	348,2	0,259	1,089	1,086	1,248
21,7	227	1	500,2	21,7	348,2	0,2613	1,089	1,086	1,247
21,38	226	1	499,2	21,38	348,2	0,2638	1,089	1,086	1,246
21,08	225	1	498,2	21,08	348,2	0,2662	1,089	1,086	1,245
20,77	224	1	497,2	20,77	348,2	0,2687	1,089	1,086	1,244
20,47	223	1	496,2	20,47	348,2	0,2713	1,089	1,086	1,243
20,17	222	1	495,2	20,17	348,2	0,2739	1,089	1,086	1,242
19,87	221	1	494,2	19,87	348,2	0,2766	1,089	1,086	1,241
19,58	220	1	493,2	19,58	348,2	0,2793	1,089	1,087	1,24
19,29	219	1	492,2	19,29	348,2	0,2821	1,089	1,087	1,239
19,01	218	1	491,2	19,01	348,2	0,2849	1,089	1,087	1,237
18,73	217	1	490,2	18,73	348,2	0,2878	1,089	1,087	1,236
18,45	216	1	489,2	18,45	348,2	0,2907	1,089	1,087	1,235
18,17	215	1	488,2	18,17	348,2	0,2937	1,089	1,087	1,234
17,9	214	1	487,2	17,9	348,2	0,2967	1,089	1,088	1,233
17,63	213	1	486,2	17,63	348,2	0,2998	1,089	1,088	1,232
17,36	212	1	485,2	17,36	348,2	0,3029	1,089	1,088	1,231
17,09	211	1	484,2	17,09	348,2	0,3061	1,089	1,088	1,23
16,83	210	1	483,2	16,83	348,2	0,3093	1,089	1,088	1,229
16,57	209	1	482,2	16,57	348,2	0,3125	1,089	1,088	1,227
16,32	208	1	481,2	16,32	348,2	0,3159	1,089	1,089	1,226
16,07	207	1	480,2	16,07	348,2	0,3192	1,089	1,089	1,225
15,82	206	1	479,2	15,82	348,2	0,3226	1,089	1,089	1,224
15,57	205	1	478,2	15,57	348,2	0,3261	1,089	1,089	1,223
15,33	204	1	477,2	15,33	348,2	0,3296	1,089	1,089	1,222

15,08	203	1	476,2	15,08	348,2	0,3332	1,089	1,089	1,22
14,85	202	1	475,2	14,85	348,2	0,3368	1,089	1,09	1,219
14,61	201	1	474,2	14,61	348,2	0,3405	1,09	1,09	1,218
14,38	200	1	473,2	14,38	348,2	0,3442	1,09	1,09	1,217
14,15	199	1	472,2	14,15	348,2	0,3479	1,09	1,09	1,216
13,92	198	1	471,2	13,92	348,2	0,3517	1,09	1,09	1,214
13,7	197	1	470,2	13,7	348,2	0,3556	1,09	1,091	1,213
13,47	196	1	469,2	13,47	348,2	0,3595	1,09	1,091	1,212
13,26	195	1	468,2	13,26	348,2	0,3634	1,09	1,091	1,211
13,04	194	1	467,2	13,04	348,2	0,3674	1,09	1,091	1,21
12,82	193	1	466,2	12,82	348,2	0,3715	1,09	1,091	1,208
12,61	192	1	465,2	12,61	348,2	0,3756	1,09	1,092	1,207
12,4	191	1	464,2	12,4	348,2	0,3797	1,09	1,092	1,206
12,2	190	1	463,2	12,2	348,2	0,3839	1,09	1,092	1,205
11,99	189	1	462,2	11,99	348,2	0,3881	1,09	1,092	1,204
11,79	188	1	461,2	11,79	348,2	0,3924	1,09	1,093	1,202
11,59	187	1	460,2	11,59	348,2	0,3967	1,09	1,093	1,201
11,4	186	1	459,2	11,4	348,2	0,4011	1,09	1,093	1,2
11,2	185	1	458,2	11,2	348,2	0,4055	1,09	1,093	1,199
11,01	184	1	457,2	11,01	348,2	0,41	1,09	1,093	1,198
10,82	183	1	456,2	10,82	348,2	0,4145	1,09	1,094	1,196
10,64	182	1	455,2	10,64	348,2	0,419	1,09	1,094	1,195
10,45	181	1	454,2	10,45	348,2	0,4236	1,09	1,094	1,194
10,27	180	1	453,2	10,27	348,2	0,4283	1,09	1,094	1,193
10,09	179	1	452,2	10,09	348,2	0,433	1,091	1,095	1,192
9,915	178	1	451,2	9,915	348,2	0,4377	1,091	1,095	1,19
9,741	177	1	450,2	9,741	348,2	0,4425	1,091	1,095	1,189
9,568	176	1	449,2	9,568	348,2	0,4473	1,091	1,095	1,188
9,398	175	1	448,2	9,398	348,2	0,4521	1,091	1,096	1,187
9,23	174	1	447,2	9,23	348,2	0,457	1,091	1,096	1,186
9,064	173	1	446,2	9,064	348,2	0,4619	1,091	1,096	1,184
8,9	172	1	445,2	8,9	348,2	0,4669	1,091	1,096	1,183
8,739	171	1	444,2	8,739	348,2	0,4719	1,091	1,097	1,182
8,58	170	1	443,2	8,58	348,2	0,4769	1,091	1,097	1,181
8,423	169	1	442,2	8,423	348,2	0,482	1,091	1,097	1,18
8,268	168	1	441,2	8,268	348,2	0,4871	1,091	1,097	1,179
8,115	167	1	440,2	8,115	348,2	0,4923	1,091	1,098	1,177
7,964	166	1	439,2	7,964	348,2	0,4974	1,091	1,098	1,176
7,816	165	1	438,2	7,816	348,2	0,5026	1,091	1,098	1,175
7,669	164	1	437,2	7,669	348,2	0,5079	1,092	1,098	1,174
7,525	163	1	436,2	7,525	348,2	0,5132	1,092	1,099	1,173
7,382	162	1	435,2	7,382	348,2	0,5184	1,092	1,099	1,172
7,242	161	1	434,2	7,242	348,2	0,5238	1,092	1,099	1,171
7,103	160	1	433,2	7,103	348,2	0,5291	1,092	1,1	1,169
6,967	159	1	432,2	6,967	348,2	0,5345	1,092	1,1	1,168
6,832	158	1	431,2	6,832	348,2	0,5399	1,092	1,1	1,167
6,699	157	1	430,2	6,699	348,2	0,5453	1,092	1,1	1,166
6,569	156	1	429,2	6,569	348,2	0,5508	1,092	1,101	1,165
6,44	155	1	428,2	6,44	348,2	0,5562	1,092	1,101	1,164
6,313	154	1	427,2	6,313	348,2	0,5617	1,092	1,101	1,163
6,188	153	1	426,2	6,188	348,2	0,5672	1,092	1,101	1,162
6,065	152	1	425,2	6,065	348,2	0,5727	1,093	1,102	1,161

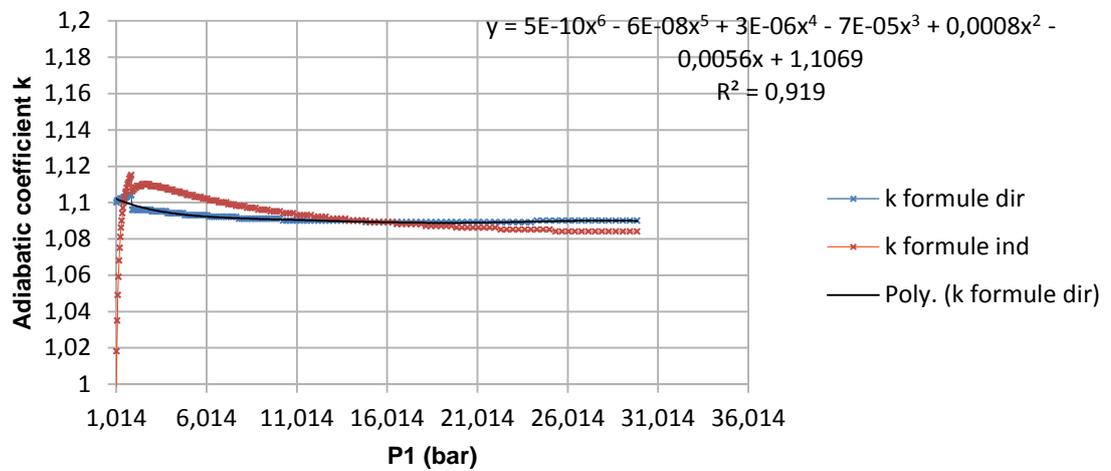
5,944	151	1	424,2	5,944	348,2	0,5782	1,093	1,102	1,16
5,824	150	1	423,2	5,824	348,2	0,5838	1,093	1,102	1,158
5,706	149	1	422,2	5,706	348,2	0,5893	1,093	1,103	1,157
5,59	148	1	421,2	5,59	348,2	0,5949	1,093	1,103	1,156
5,476	147	1	420,2	5,476	348,2	0,6004	1,093	1,103	1,155
5,364	146	1	419,2	5,364	348,2	0,606	1,093	1,103	1,154
5,253	145	1	418,2	5,253	348,2	0,6115	1,093	1,104	1,153
5,144	144	1	417,2	5,144	348,2	0,6171	1,093	1,104	1,152
5,037	143	1	416,2	5,037	348,2	0,6226	1,093	1,104	1,151
4,931	142	1	415,2	4,931	348,2	0,6282	1,093	1,104	1,15
4,827	141	1	414,2	4,827	348,2	0,6337	1,093	1,105	1,149
4,725	140	1	413,2	4,725	348,2	0,6393	1,094	1,105	1,148
4,624	139	1	412,2	4,624	348,2	0,6448	1,094	1,105	1,147
4,525	138	1	411,2	4,525	348,2	0,6503	1,094	1,106	1,146
4,428	137	1	410,2	4,428	348,2	0,6558	1,094	1,106	1,145
4,332	136	1	409,2	4,332	348,2	0,6612	1,094	1,106	1,145
4,238	135	1	408,2	4,238	348,2	0,6667	1,094	1,106	1,144
4,145	134	1	407,2	4,145	348,2	0,6721	1,094	1,107	1,143
4,054	133	1	406,2	4,054	348,2	0,6774	1,094	1,107	1,142
3,964	132	1	405,2	3,964	348,2	0,6828	1,094	1,107	1,141
3,876	131	1	404,2	3,876	348,2	0,6881	1,094	1,107	1,14
3,789	130	1	403,2	3,789	348,2	0,6934	1,095	1,108	1,139
3,704	129	1	402,2	3,704	348,2	0,6986	1,095	1,108	1,138
3,62	128	1	401,2	3,62	348,2	0,7038	1,095	1,108	1,137
3,538	127	1	400,2	3,538	348,2	0,7089	1,095	1,108	1,137
3,457	126	1	399,2	3,457	348,2	0,714	1,095	1,108	1,136
3,377	125	1	398,2	3,377	348,2	0,719	1,095	1,109	1,135
3,299	124	1	397,2	3,299	348,2	0,724	1,095	1,109	1,134
3,222	123	1	396,2	3,222	348,2	0,7289	1,095	1,109	1,134
3,147	122	1	395,2	3,147	348,2	0,7338	1,095	1,109	1,133
3,073	121	1	394,2	3,073	348,2	0,7386	1,095	1,109	1,132
3	120	1	393,2	3	348,2	0,7433	1,095	1,109	1,131
2,929	119	1	392,2	2,929	348,2	0,7479	1,096	1,109	1,131
2,859	118	1	391,2	2,859	348,2	0,7524	1,096	1,11	1,13
2,79	117	1	390,2	2,79	348,2	0,7569	1,096	1,11	1,129
2,722	116	1	389,2	2,722	348,2	0,7612	1,096	1,11	1,129
2,656	115	1	388,2	2,656	348,2	0,7655	1,096	1,11	1,128
2,591	114	1	387,2	2,591	348,2	0,7697	1,096	1,11	1,127
2,527	113	1	386,2	2,527	348,2	0,7738	1,096	1,11	1,127
2,465	112	1	385,2	2,465	348,2	0,7777	1,096	1,11	1,126
2,403	111	1	384,2	2,403	348,2	0,7816	1,096	1,109	1,126
2,343	110	1	383,2	2,343	348,2	0,7854	1,096	1,109	1,125
2,284	109	1	382,2	2,284	348,2	0,789	1,096	1,109	1,125
2,226	108	1	381,2	2,226	348,2	0,7925	1,096	1,109	1,124
2,169	107	1	380,2	2,169	348,2	0,7959	1,096	1,109	1,124
2,113	106	1	379,2	2,113	348,2	0,7991	1,096	1,108	1,123
2,059	105	1	378,2	2,059	348,2	0,8022	1,096	1,108	1,123
2,005	104	1	377,2	2,005	348,2	0,8052	1,096	1,107	1,122
1,953	103	1	376,2	1,953	348,2	0,808	1,096	1,107	1,122
1,901	102	1	375,2	1,901	348,2	0,8107	1,096	1,106	1,121
1,851	101	1	374,2	1,851	348,2	0,8646	1,104	1,115	1,121
1,802	100	1	373,2	1,802	348,2	0,8646	1,104	1,114	1,121

1,753	99	1	372,2	1,753	348,2	0,8646	1,104	1,113	1,12
1,706	98	1	371,2	1,706	348,2	0,8646	1,104	1,111	1,12
1,66	97	1	370,2	1,66	348,2	0,8646	1,104	1,11	1,12
1,615	96	1	369,2	1,615	348,2	0,8646	1,103	1,108	1,12
1,57	95	1	368,2	1,57	348,2	0,8646	1,103	1,106	1,12
1,527	94	1	367,2	1,527	348,2	0,8646	1,103	1,105	1,119
1,484	93	1	366,2	1,484	348,2	0,8646	1,103	1,102	1,119
1,443	92	1	365,2	1,443	348,2	0,8646	1,103	1,1	1,119
1,402	91	1	364,2	1,402	348,2	0,8646	1,102	1,097	1,119
1,362	90	1	363,2	1,362	348,2	0,8646	1,102	1,094	1,119
1,324	89	1	362,2	1,324	348,2	0,8646	1,102	1,09	1,119
1,286	88	1	361,2	1,286	348,2	0,8646	1,102	1,086	1,119
1,248	87	1	360,2	1,248	348,2	0,8646	1,102	1,081	1,119
1,212	86	1	359,2	1,212	348,2	0,8646	1,101	1,075	1,119
1,177	85	1	358,2	1,177	348,2	0,8646	1,101	1,068	1,119
1,142	84	1	357,2	1,142	348,2	0,8646	1,101	1,059	1,119
1,108	83	1	356,2	1,108	348,2	0,8646	1,101	1,049	1,119
1,075	82	1	355,2	1,075	348,2	0,8646	1,101	1,035	1,119
1,043	81	1	354,2	1,043	348,2	0,8646	1,1	1,018	1,12
1,011	80	1	353,2	1,011	348,2	0,8646	1,1	0,9942	1,12
0,9804	79	1	352,2	0,9804	348,2	0,8646	1,1	0,9606	1,12
0,9504	78	1	351,2	0,9504	348,2	0,8646	1,1	0,9094	1,12
0,9211	77	1	350,2	0,9211	348,2	0,8646	1,1	0,8215	1,121
0,8925	76	1	349,2	0,8925	348,2	0,8646	1,099	0,6367	1,121
0,8646	75	1							
0,8374	74	1							
0,8108	73	1							
0,785	72	1							
0,7598	71	1							
0,7352	70	1							
0,7113	69	1							
0,688	68	1							
0,6653	67	1							
0,6432	66	1							
0,6217	65	1							
0,6007	64	1							
0,5804	63	1							
0,5605	62	1							
0,5413	61	1							
0,5225	60	1							

### Tsat as fonction of P to the benzene on the curve saturation



### Adiabatic coefficient k as a function of pressure P1



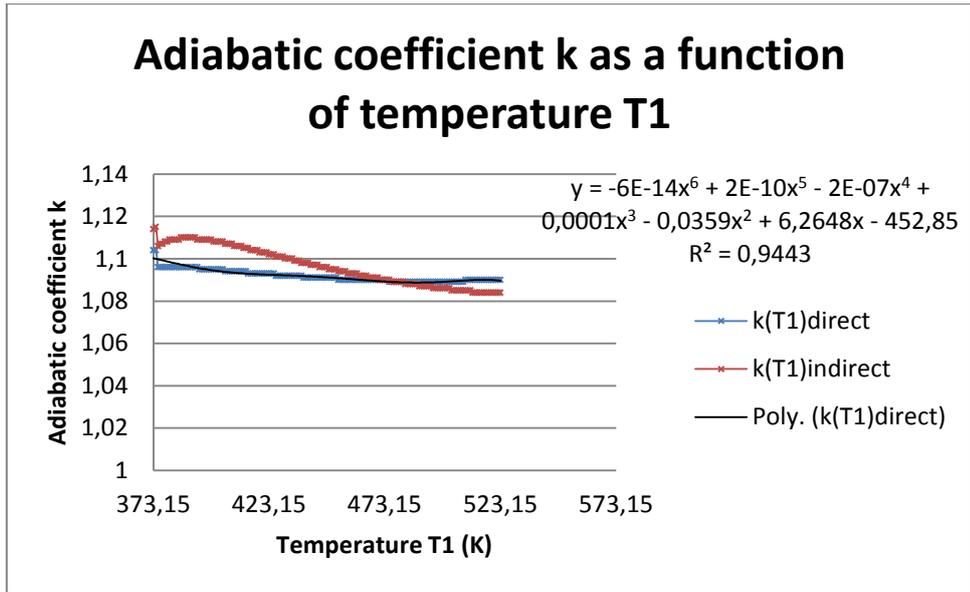


Tableau pour le R600 :

P(bar)	t(°C)	Xv
36,73	150	1
36,13	149	1
35,54	148	1
34,96	147	1
34,39	146	1
33,82	145	1
33,27	144	1
32,73	143	1
32,19	142	1
31,66	141	1
31,14	140	1
30,63	139	1
30,12	138	1
29,62	137	1
29,13	136	1
28,65	135	1
28,17	134	1
27,7	133	1
27,23	132	1
26,77	131	1
26,32	130	1
25,87	129	1
25,43	128	1
25	127	1
24,57	126	1
24,15	125	1
23,73	124	1
23,32	123	1
22,91	122	1
22,51	121	1

22,12	120	1
21,73	119	1
21,35	118	1
20,97	117	1
20,59	116	1
20,22	115	1
19,86	114	1
19,5	113	1
19,15	112	1
18,8	111	1
18,45	110	1
18,11	109	1
17,78	108	1
17,45	107	1
17,12	106	1
16,8	105	1
16,48	104	1
16,17	103	1
15,86	102	1
15,56	101	1
15,26	100	1
14,97	99	1
14,68	98	1
14,39	97	1
14,11	96	1
13,83	95	1
13,56	94	1
13,29	93	1
13,02	92	1
12,76	91	1

12,5	90	1
12,25	89	1
12	88	1
11,75	87	1
11,51	86	1
11,27	85	1
11,03	84	1
10,8	83	1
10,57	82	1
10,35	81	1
10,13	80	1
9,909	79	1
9,695	78	1
9,484	77	1
9,277	76	1
9,073	75	1
8,872	74	1
8,675	73	1
8,481	72	1
8,29	71	1
8,102	70	1
7,917	69	1
7,736	68	1
7,558	67	1
7,382	66	1
7,21	65	1
7,041	64	1
6,874	63	1
6,711	62	1
6,55	61	1
6,393	60	1

### Tsat as fonction of pressure

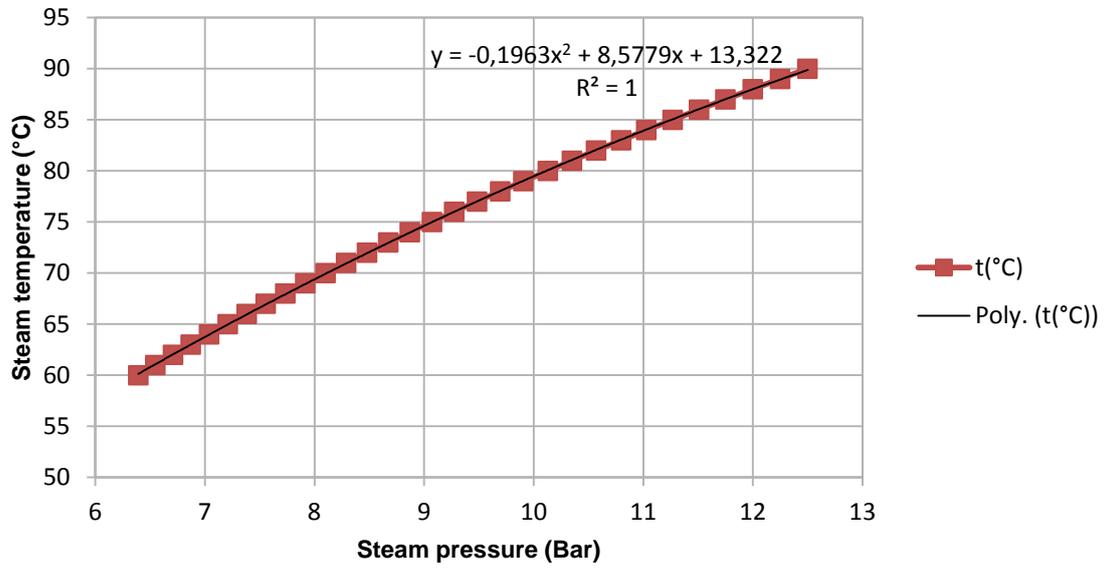


Tableau pour le R141b :

P(bar)	T(°C)	Xv
41,99	204	1
41,34	203	1
40,71	202	1
40,1	201	1
39,49	200	1
38,89	199	1
38,31	198	1
37,73	197	1
37,17	196	1
36,61	195	1
36,06	194	1
35,52	193	1
34,99	192	1
34,46	191	1
33,94	190	1
33,43	189	1
32,93	188	1
32,43	187	1
31,94	186	1
31,46	185	1
30,98	184	1
30,51	183	1
30,04	182	1
29,58	181	1
29,13	180	1
28,68	179	1
28,24	178	1
27,81	177	1
27,38	176	1
26,95	175	1
26,53	174	1
26,12	173	1
25,71	172	1
25,31	171	1

24,91	170	1
24,51	169	1
24,13	168	1
23,74	167	1
23,36	166	1
22,99	165	1
22,62	164	1
22,26	163	1
21,9	162	1
21,54	161	1
21,19	160	1
20,84	159	1
20,5	158	1
20,16	157	1
19,83	156	1
19,5	155	1
19,17	154	1
18,85	153	1
18,53	152	1
18,22	151	1
17,91	150	1
17,61	149	1
17,31	148	1
17,01	147	1
16,71	146	1
16,42	145	1
16,14	144	1
15,86	143	1
15,58	142	1
15,3	141	1
15,03	140	1
14,76	139	1
14,5	138	1
14,24	137	1

13,98	136	1
13,73	135	1
13,47	134	1
13,23	133	1
12,98	132	1
12,74	131	1
12,51	130	1
12,27	129	1
12,04	128	1
11,81	127	1
11,59	126	1
11,37	125	1
11,15	124	1
10,93	123	1
10,72	122	1
10,51	121	1
10,31	120	1
10,1	119	1
9,904	118	1
9,706	117	1
9,512	116	1
9,32	115	1
9,132	114	1
8,946	113	1
8,762	112	1
8,582	111	1
8,404	110	1
8,229	109	1
8,057	108	1
7,887	107	1
7,72	106	1
7,556	105	1
7,394	104	1
7,235	103	1

7,078	102	1
6,924	101	1
6,772	100	1
6,623	99	1
6,476	98	1
6,331	97	1
6,189	96	1
6,049	95	1
5,912	94	1
5,777	93	1
5,644	92	1
5,513	91	1
5,385	90	1
5,259	89	1
5,135	88	1
5,013	87	1
4,894	86	1
4,776	85	1
4,661	84	1
4,548	83	1
4,436	82	1
4,327	81	1
4,22	80	1
4,115	79	1
4,011	78	1
3,91	77	1
3,811	76	1
3,713	75	1
3,618	74	1
3,524	73	1
3,432	72	1
3,342	71	1
3,254	70	1
3,167	69	1
3,082	68	1
2,999	67	1
2,918	66	1
2,838	65	1
2,76	64	1
2,684	63	1
2,609	62	1
2,536	61	1
2,464	60	1

### Tsat du R141b as fonction of pressure

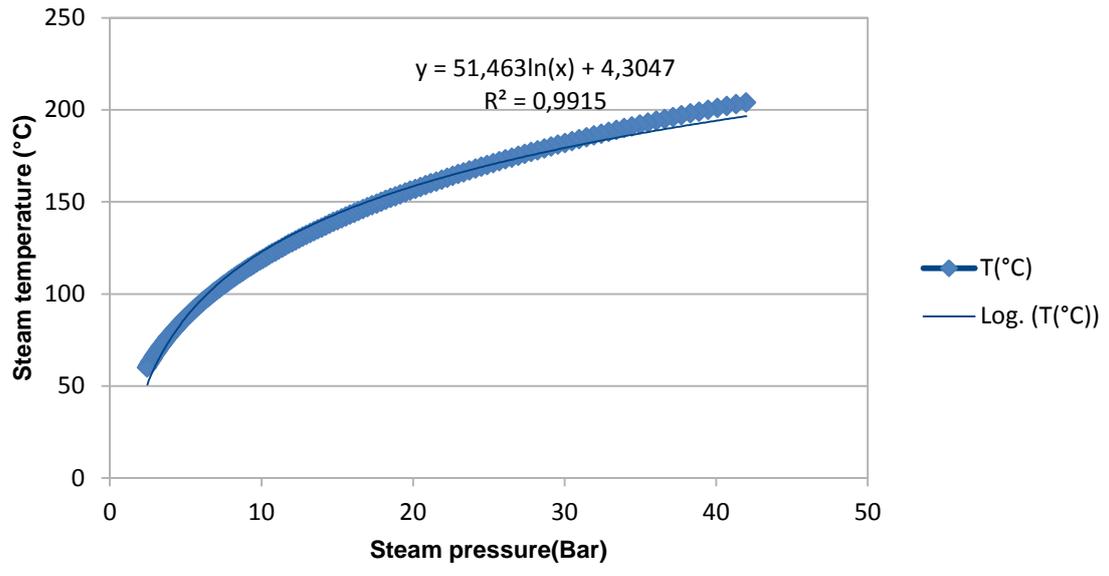


Tableau pour le R134a :

P(bar)	t(°C)	Xv
40,57	101	1
39,75	100	1
38,96	99	1
38,18	98	1
37,42	97	1
36,67	96	1
35,94	95	1
35,22	94	1
34,52	93	1
33,82	92	1
33,14	91	1
32,47	90	1
31,81	89	1
31,16	88	1
30,52	87	1
29,9	86	1
29,28	85	1
28,68	84	1
28,08	83	1
27,5	82	1
26,92	81	1
26,35	80	1
25,8	79	1
25,25	78	1
24,71	77	1
24,18	76	1
23,66	75	1
23,15	74	1
22,64	73	1
22,15	72	1
21,66	71	1
21,18	70	1
20,71	69	1
20,25	68	1
19,8	67	1
19,35	66	1
18,91	65	1
18,48	64	1
18,05	63	1
17,64	62	1
17,23	61	1
16,83	60	1

### Tsat as fonction of pressure

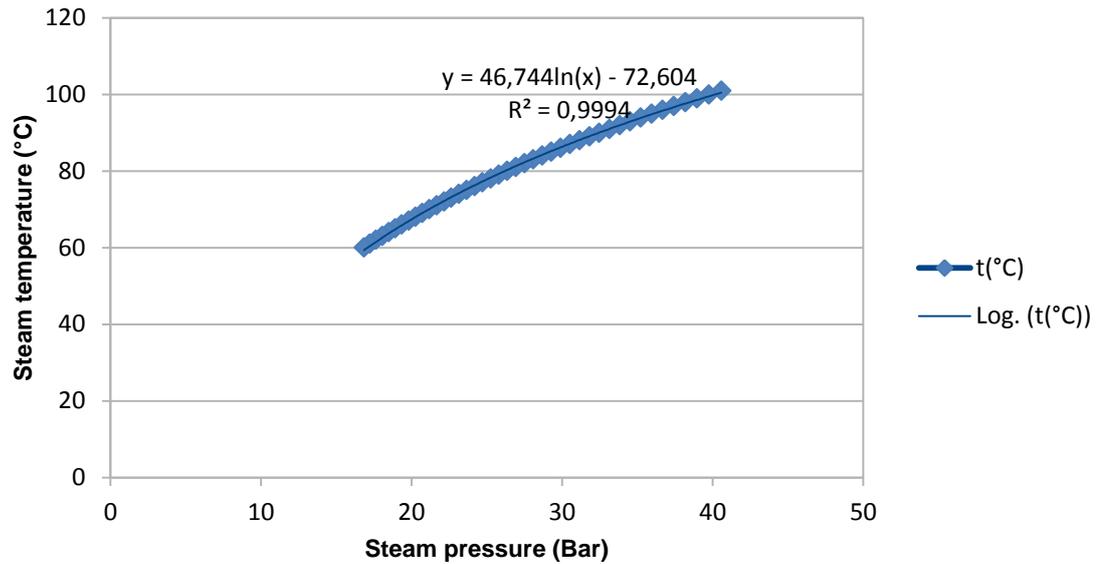


Tableau des points thermodynamiques pour le benzene :

Benzene T1=125°C						
Points	Temperature(°C)	Temperature(K)	Pressure(Bar)	Enthalpy(KJ/Kg)	Entropy(KJ/Kg.K)	Steam quality Xv
1	125	398,15	3,377	446,9	1,135	1
2 reversible	75	348,15	0,8646	386,3	1,11	1
2 irreversible(Wp,thr,fr)	98,382	371,532	0,8646	418,6	1,2	1
2 irreversible(Wp,thr)	83,918	357,068	0,8646	399,3	1,147	1
2 irreversible(Wp)	83,862	357,012	0,8646	399,2	1,147	1
3	75	348,15	0,8646	390,4	1,121	1
4	75	348,15	0,8646	-9,617	-0,02737	0
5 reversible	75,1	348,2	3,377	-9,26	-0,02737	0
6	125	398,15	3,377	89,3	0,237	0

Benzene T1=145°C						
Points	Temperature(°C)	Temperature(K)	Pressure(Bar)	Enthalpy(KJ/Kg)	Entropy(KJ/Kg.K)	Steam quality Xv
1	145	418,15	5,253	471,7	1,153	1
2 reversible	75	348,15	0,8646	388,2	1,126	1
2 irreversible(Wp,thr,fr)	102,1084257	375,2584257	0,8646	423,7	1,214	1
2 irreversible(Wp,thr)	88,80195304	361,951953	0,8646	405,8	1,165	1
2 irreversible(Wp)	88,74985098	361,899851	0,8646	405,7	1,165	1
3	75	348,15	0,8646	390,4	1,121	1
4	75	348,15	0,8646	-9,617	-0,02737	0
5 reversible	75,15	348,30	5,253	-9,082	-0,02737	0
6	145	418,15	5,253	89,3	0,237	0

Benzene T1=165°C						
Points	Temperature(°C)	Temperature(K)	Pressure(Bar)	Enthalpy(KJ/Kg)	Entropy(KJ/Kg.K)	Steam quality Xv
1	165	438,15	7,816	496,8	1,175	1
2 reversible	75	348,15	0,8646	388,7	1,143	1
2 irreversible(Wp,thr,fr)	105,1399972	378,2899972	0,8646	427,9	1,225	1
2 irreversible(Wp,thr)	93,5410401	366,6910401	0,8646	412,1	1,182	1
2 irreversible(Wp)	93,49522366	366,6452237	0,8646	412	1,182	1
3	75	348,15	0,8646	390,4	1,121	1
4	75	348,15	0,8646	-9,617	-0,02737	0
5 reversible	75,25	348,4	7,816	-8,769	-0,02737	0
6	165	438,15	7,816	89,3	0,237	0

Temperature(°C)	Coefficient B for expansion			specific mechanical work expansion KJ/kg		
	Wp,thr,fr	Wp,thr	Wp	Wp,thr,fr	Wp,thr	Wp
125	0,601156938	0,976109786	0,977637511	28,3	47,6	47,7
145	0,716963359	0,97693459	0,977993829	48	65,9	66
165	0,79436234	0,977575481	0,978321974	68,9	84,7	84,8
efficiency thermal			efficiency cycle 2nd principle			
Wp,thr,fr	Wp,thr	Wp	Wp,thr,fr	Wp,thr	Wp	
6,13	10,36	10,38	48,778961	82,4702	83	
9,87	13,60	13,62	58,973832	81,214	81	
13,46	16,59	16,61	65,53009	80,7446	81	

Wp (m/s)	Coefficient B for expansion Wp,thr,fr	Temperature 2 irreversible(Wp,thr,fr) (K)	Enthalpy(KJ/Kg)	specific mechanical work expansion KJ/kg	efficiency thermal	efficiency cycle 2nd principle
0	0,645416824	369,7461709	416,2	30,7	6,6518327	52,96854371
0,1	0,641845201	369,8894523	416,4	30,5	6,6079884	52,61941183
0,2	0,63825236	370,0337278	416,6	30,3	6,5641442	52,27027995
0,3	0,634638301	370,1790004	416,8	30,1	6,5202999	51,92114806
0,4	0,631003023	370,3252728	417	29,9	6,4764556	51,57201618
0,5	0,627346527	370,4725477	417,2	29,7	6,4326114	51,22288429
0,6	0,623668812	370,6208279	417,4	29,5	6,3887671	50,87375241
0,7	0,619969879	370,7701164	417,6	29,3	6,3449228	50,52462053
0,8	0,616249728	370,9204159	417,8	29,1	6,3010786	50,17548864
0,9	0,612508358	371,0717294	418	28,9	6,2572343	49,82635676
1	0,60874577	371,2240597	418,2	28,7	6,21339	49,47722488
1,1	0,604961963	371,3774099	418,4	28,5	6,1695458	49,12809299
1,2	0,601156938	371,5317828	418,6	28,3	6,1257015	48,77896111
1,3	0,597330694	371,6871814	418,9	28	6,0599351	48,25526328
1,4	0,593483232	371,8436087	419,1	27,8	6,0160908	47,9061314
1,5	0,589614552	372,0010678	419,3	27,6	5,9722466	47,55699952
1,6	0,585724653	372,1595618	419,5	27,4	5,9284023	47,20786763

1,7	0,581813536	372,3190936	419,7	27,2	5,884558	46,85873575
1,8	0,577881201	372,4796663	419,9	27	5,8407138	46,50960387
1,9	0,573927647	372,6412833	420,2	26,7	5,7749474	45,98590604
2	0,569952874	372,8039474	420,4	26,5	5,7311031	45,63677416
2,1	0,565956884	372,967662	420,6	26,3	5,6872589	45,28764227
2,2	0,561939675	373,1324303	420,8	26,1	5,6434146	44,93851039
2,3	0,557901247	373,2982554	421,1	25,8	5,5776482	44,41481257
2,4	0,553841601	373,4651406	421,3	25,6	5,5338039	44,06568068
2,5	0,549760737	373,6330892	421,5	25,4	5,4899597	43,7165488
2,6	0,545658654	373,8021046	421,7	25,2	5,4461154	43,36741692
2,7	0,541535353	373,9721899	422	24,9	5,380349	42,84371909
2,8	0,537390833	374,1433487	422,2	24,7	5,3365047	42,49458721
2,9	0,533225095	374,3155842	422,5	24,4	5,2707383	41,97088938
3	0,529038139	374,4888998	422,7	24,2	5,2268941	41,6217575
3,1	0,524829964	374,6632991	422,9	24	5,1830498	41,27262561
3,2	0,52060057	374,8387855	423,2	23,7	5,1172834	40,74892779
3,3	0,516349959	375,0153624	423,4	23,5	5,0734391	40,3997959
3,4	0,512078129	375,1930334	423,7	23,2	5,0076727	39,87609808
3,5	0,50778508	375,371802	423,9	23	4,9638285	39,5269662
3,6	0,503470813	375,5516718	424,2	22,7	4,8980621	39,00326837
3,7	0,499135328	375,7326464	424,4	22,5	4,8542178	38,65413649
3,8	0,494778624	375,9147294	424,7	22,2	4,7884514	38,13043866
3,9	0,490400702	376,0979245	424,9	22	4,7446072	37,78130678
4	0,486001562	376,2822353	425,2	21,7	4,6788408	37,25760895
4,1	0,481581203	376,4676656	425,4	21,5	4,6349965	36,90847707
4,2	0,477139626	376,6542191	425,7	21,2	4,5692301	36,38477924
4,3	0,47267683	376,8418996	425,9	21	4,5253858	36,03564736
4,4	0,468192816	377,0307108	426,2	20,7	4,4596194	35,51194954
4,5	0,463687583	377,2206567	426,5	20,4	4,393853	34,98825171
4,6	0,459161132	377,411741	426,7	20,2	4,3500088	34,63911983
4,7	0,454613463	377,6039676	427	19,9	4,2842424	34,115422
4,8	0,450044575	377,7973405	427,3	19,6	4,218476	33,59172418
4,9	0,445454469	377,9918636	427,5	19,4	4,1746317	33,24259229
5	0,440843144	378,1875409	427,8	19,1	4,1088653	32,71889447
5,1	0,436210601	378,3843763	428,1	18,8	4,0430989	32,19519664
5,2	0,43155684	378,582374	428,3	18,6	3,9992546	31,84606476
5,3	0,42688186	378,781538	428,6	18,3	3,9334882	31,32236693
5,4	0,422185662	378,9818723	428,9	18	3,8677219	30,79866911
5,5	0,417468245	379,1833812	429,2	17,7	3,8019555	30,27497128
5,6	0,41272961	379,3860687	429,5	17,4	3,7361891	29,75127346
5,7	0,407969757	379,5899391	429,7	17,2	3,6923448	29,40214157
5,8	0,403188685	379,7949966	430	16,9	3,6265784	28,87844375
5,9	0,398386395	380,0012455	430,3	16,6	3,560812	28,35474592
6	0,393562886	380,20869	430,6	16,3	3,4950456	27,8310481
6,1	0,388718159	380,4173345	430,9	16	3,4292792	27,30735027

6,2	0,383852213	380,6271833	431,2	15,7	3,3635128	26,78365245
6,3	0,378965049	380,8382408	431,5	15,4	3,2977464	26,25995462
6,4	0,374056667	381,0505114	431,8	15,1	3,23198	25,7362568
6,5	0,369127066	381,2639997	432,1	14,8	3,1662136	25,21255897
6,6	0,364176247	381,47871	432,4	14,5	3,1004472	24,68886115
6,7	0,35920421	381,6946468	432,7	14,2	3,0346808	24,16516332
6,8	0,354210954	381,9118149	433	13,9	2,9689144	23,64146549
6,9	0,34919648	382,1302187	433,3	13,6	2,903148	23,11776767
7	0,344160787	382,3498628	433,6	13,3	2,8373816	22,59406984
7,1	0,339103876	382,570752	433,9	13	2,7716152	22,07037202
7,2	0,334025746	382,7928909	434,2	12,7	2,7058488	21,54667419
7,3	0,328926398	383,0162842	434,5	12,4	2,6400824	21,02297637
7,4	0,323805832	383,2409368	434,9	12	2,5523939	20,3247126
7,5	0,318664047	383,4668534	435,2	11,7	2,4866275	19,80101478
7,6	0,313501044	383,6940389	435,5	11,4	2,4208611	19,27731695
7,7	0,308316822	383,9224981	435,8	11,1	2,3550947	18,75361912
7,8	0,303111382	384,152236	436,1	10,8	2,2893283	18,2299213
7,9	0,297884724	384,3832574	436,5	10,4	2,2016398	17,53165753
8	0,292636847	384,6155675	436,8	10,1	2,1358734	17,00795971
8,1	0,287367752	384,8491711	437,1	9,8	2,070107	16,48426188
8,2	0,282077438	385,0840734	437,5	9,4	1,9824184	15,78599811
8,3	0,276765906	385,3202795	437,8	9,1	1,9166521	15,26230029
8,4	0,271433155	385,5577946	438,1	8,8	1,8508857	14,73860246
8,5	0,266079187	385,7966237	438,5	8,4	1,7631971	14,0403387
8,6	0,260703999	386,0367721	438,8	8,1	1,6974307	13,51664087
8,7	0,255307594	386,2782451	439,2	7,7	1,6097422	12,8183771
8,8	0,249889969	386,5210479	439,5	7,4	1,5439758	12,29467928
8,9	0,244451127	386,7651859	439,8	7,1	1,4782094	11,77098145
9	0,238991066	387,0106645	440,2	6,7	1,3905209	11,07271769
9,1	0,233509787	387,2574891	440,5	6,4	1,3247545	10,54901986
9,2	0,228007289	387,5056651	440,9	6	1,2370659	9,850756094
9,3	0,222483573	387,755198	441,2	5,7	1,1712995	9,327058269
9,4	0,216938638	388,0060934	441,6	5,3	1,083611	8,628794502
9,5	0,211372485	388,2583569	442	4,9	0,9959225	7,930530735
9,6	0,205785114	388,511994	442,3	4,6	0,9301561	7,40683291
9,7	0,200176524	388,7670105	442,7	4,2	0,8424676	6,708569142
9,8	0,194546716	389,023412	443,1	3,8	0,754779	6,010305375
9,9	0,188895689	389,2812043	443,4	3,5	0,6890126	5,48660755
10	0,183223444	389,5403933	443,8	3,1	0,6013241	4,788343783

Tableau des points thermodynamiques pour le R141b :

R141b T1=125°C						
Points	Temperature(°C)	Temperature(K)	Pressure(Bar)	Enthalpy(KJ/Kg)	Entropy(KJ/Kg.K)	Steam quality Xv
1	125	398,15	11,37	359,3	1,031	1
2 reversible	75	348,15	3,121	329,7	1,031	1
2 irreversible(Wp,thr,fr)	80,63	353,78	3,121	334,6	1,045	1
3	75	348,15	3,121	328,4	1,016	1
4	75	348,15	3,121	128,7	0,4427	0
5 reversible	75,1	348,2	11,37	128,7	0,4427	0
6	125	398,15	11,37	195,7	0,6205	0

Warning: Properties for R141b in the subcooled region have been estimated assuming the fluid to be incompressible.

Tableau des points thermodynamiques pour le R600 :

R600 T1=125°C						
Points	Temperature(°C)	Temperature(K)	Pressure(Bar)	Enthalpy(KJ/Kg)	Entropy(KJ/Kg.K)	Steam quality Xv
1	125	398,15	24,15	744,4	2,514	1
2 reversible	75	348,15	7,365	697,1	2,514	1
2 irreversible(Wp,thr,fr)	78,25	351,4	7,365	704	2,534	1
3	75	348,15	7,365	689,7	2,468	1
4	75	348,15	7,365	389,4	1,606	0
5 reversible	75,1	348,2	24,15	392,3	1,606	0
6	125	398,15	24,15	544,5	2,012	0

## **ABSTRACT AND KEYWORDS**

### **Résumé : Thermodynamique irréversible appliquée à l'étude et l'optimisation du cycle de Rankine organique alimenté par l'énergie solaire**

Dans le monde actuel, la problématique de la gestion énergétique est primordiale. En effet, la mondialisation dans son évolution rapide des populations accroît les demandes en énergie de façon exponentielle. Les industries, l'immobilier, les transports consomment de plus en plus les réserves naturelles fossiles, alors que leurs niveaux sont déjà extrêmement faibles. La nouvelle conquête du 21ème siècle est de pouvoir optimiser au mieux tous les systèmes existants et d'en découvrir de nouveaux plus propres. Cette transition énergétique doit s'inscrire dans une étape de développement durable, sociétale, environnementale et bien sûr économique. L'une des voies d'exploitation est le cycle thermodynamique de Rankine (ORC).

Ce projet d'étude développe une analyse sur l'utilisation d'un cycle ORC pour l'alimentation d'un pavillon domestique en électricité et en eau chaude sanitaire. L'énergie primaire utilisée pour son fonctionnement est le solaire. Toute l'étude a été développée suivant la thermodynamique en vitesse finie.

Premièrement, nous avons réalisé une analyse approfondie des différents systèmes ORC existants et ainsi, leurs différents domaines d'exploitation. Nous approfondissons la méthode de thermodynamique à vitesse finie en prenant en compte les différentes irréversibilités pour être le plus proche de la réalité.

On a construit et optimisé une installation de concentration solaire avec une parabole, un héliostat et un récepteur. Des tests ont été menés pour mesurer les niveaux de température atteignables. Grâce à ces températures et une étude bibliographique sur les fluides organiques, nous avons calculé, à l'aide du logiciel EES et Excel en Thermodynamique à vitesse finie, les différentes puissances récupérables et les rendements de l'installation.

**Mots clés** : Energie solaire, Cycle de Rankine, Concentration solaire, Cycle Organique de Rankine, Fluide Organique, Parabole, Héliostat, Thermodynamique à vitesse finie.

**Abstract : Irreversible Thermodynamic applied to the study and optimization of organic Rankine cycle powered by solar energy**

Nowadays, the problem of energetic gestion is very important. Indeed, a fast globalization increase energetic requests. Industry, real estate sector, transportation use fossil fuels while the level is extremely low. The new issue of the century is to be able to improve the energy process, and find a new system. This energy transition is intended to promote sustainable development, societal dimension and of course economic. An alternative solution it is the organic Rankine cycle (ORC).

This project are expanding the use of ORC solution for brought electrical power to his household and of needs in hot water. The primary energy is solar. This study will be realized with finite speed thermodynamic , it takes into account the irreversible thermodynamic to provide a more realistic estimate.

We have built and optimized a solar concentrators with a solar dish, a heliostat and a solar receptor. we have been testing possible temperatures. We also conducted an extensive literature review. And with temperatures, literature review, finite speed thermodynamic, EES software and Excel software we then calculate the recovered energy and efficiency and performance.

**Keywords** : Solar energy, Rankine Cycle, Solar Concentration, Organic Rankine Cycle, Organic Fluid, Dish, Heliostat, Finite Speed Thermodynamic.