

Projet de Physique P6-3
STPI/P6-3/2010 –037

RECUPERATION DE L'ENERGIE THERMIQUE DES GAZ D'ECHAPPEMENT SUR UNE AUTOMOBILE



Etudiants :

Fanny DUHAMEL

Céline MERHANT

Eurielle BOSSENEC

Charles-Antoine LAMBARD

Hugo RANDRIANASOLO

Orlane BREANT

Enseignant-responsable du projet :

Didier VUILLAMY

Date de remise du rapport : 18/06/10

Référence du projet : STPI/P6-3/2010 – 037

Intitulé du projet : **Récupération de l'énergie thermique des gaz d'échappement sur une automobile**

Type de projet : **Etude**

Objectifs du projet:

- **Déterminer les éléments constituant le système permettant de récupérer l'énergie dégagée par les gaz d'échappement.**
- **Déterminer les caractéristiques du système en termes de température, pression, débit massique et rendement.**
- **Dimensionner les éléments du système afin qu'ils répondent aux caractéristiques attendues et dans l'objectif de les adapter sur une automobile.**

TABLE DES MATIERES

1.	Introduction	6
2.	Méthodologie / Organisation du travail	6
3.	Travail réalisé et résultats	7
3.1.	Deux types de moteur possibles.....	7
3.1.1.	Moteur à gaz	7
3.1.1.1.	Présentation générale.....	7
3.1.1.2.	Travail mécanique récupéré et rendement.....	8
3.1.1.3.	Quelques applications	8
3.1.2.	Moteur à changement de phase.....	8
3.1.2.1.	Généralité thermodynamique sur le cycle de Rankine	9
3.1.2.2.	Montage du moteur.....	10
3.1.2.3.	Rendement du moteur	11
3.1.3.	Limites et choix du dispositif de récupération d'énergie thermique	12
3.2.	Etude du moteur à changement de phase.....	13
3.2.1.	Les échangeurs.....	13
3.2.1.1.	Echangeur de chaleur.....	13
3.2.1.2.	Types de transferts	13
3.2.1.3.	Types d'échangeurs	13
3.2.1.4.	Choix du type d'échangeur pour la machine imaginée.....	16
3.2.1.5.	Dimensionnement des échangeurs chaud et froid	16
3.2.2.	Le choix du liquide de refroidissement	17
3.2.2.1.	Recherche d'un liquide	17
3.2.2.2.	Conditions particulières pour les réfrigérants	18
3.2.2.3.	Les liquides de refroidissement	18
3.2.2.4.	Choix final.....	19
3.2.2.5.	Quelques mots sur l'eau	20
3.2.3.	Système de détente	21
3.2.3.1.	Le moteur à piston.....	21
3.2.3.2.	Les turbomachines	22
4.	Conclusions et perspectives.....	28
5.	Bibliographie	31
6.	Annexe.....	34
6.1.	Liste des réfrigérants.....	34

NOTATIONS, ACRONYMES

Notations :

n : Nombre de moles du gaz

R : Constante de Boltzmann

T_{\max} et T_{\min} : Les températures maximales et minimales atteintes lors du cycle (en Kelvin)

V_{\max} et V_{\min} : Les volumes occupés respectivement lors du refroidissement et du chauffage.

η : Rendement

P : Pression

T : Température

ρ : Masse Volumique

Q_m : Débit massique

V : Vitesse d'écoulement du fluide

D : Diamètre de l'échangeur

S : Section de l'échangeur

X_e : Grandeur en entrée

X_s : Grandeur en sortie

P_{th} : Puissance théorique.

q_D : Débit massique du gaz sortant de la turbine.

$c_{p,g}$: Capacité thermique massique moyenne du gaz à pression constante.

$c_{v,g}$: Capacité thermique massique moyenne du gaz à volume constant.

$\gamma = c_{p,g} / c_{v,g}$

T_C : Température de la vapeur en entrée de la turbine.

T_D : Température de la vapeur en sortie de la turbine.

P_D / P_C : Rapport de détente de la turbine (rapport de la pression en sortie et de la pression en entrée).

W : Travail reçu par le fluide

Q_c : Energie thermique reçue par le fluide provenant du thermostat chaud, les gaz d'échappement.

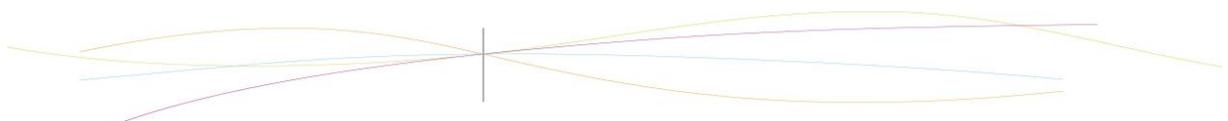
Q_f : Energie thermique reçue par le fluide provenant du thermostat froid, l'air ambiant.

Acronymes :

CFC : les chlorofluorocarbures

HCFC : les hydrochlorofluorocarbures

HFC : les hydrofluorocarbures



1. INTRODUCTION

Les gaz d'échappement ont jusqu'ici mauvaise réputation puisqu'ils fument, polluent et sentent mauvais. De plus, il faut savoir que, dans le meilleur des cas, seul 30% de l'énergie contenue dans le réservoir d'une automobile est transformé en force motrice. Les deux tiers restants sont dissipés sous forme de chaleur : 30% dans le circuit de refroidissement et 30% dans le pot d'échappement.

Cependant, les gaz d'échappement, par leur très haute température, offrent un énorme potentiel énergétique jusqu'ici inutilisé. En effet, ces gaz, principalement composés d'azote, de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone, recèlent un potentiel énergétique qui correspond à plus du tiers de l'énergie originelle contenue dans le carburant. Cette source d'énergie récupérée et réinvestie dans le moteur peut donc permettre d'abaisser la consommation des voitures. Ainsi, la récupération d'énergie des gaz d'échappement peut permettre de réaliser une économie de carburant pouvant atteindre 20%.

Le but de notre projet est de concevoir un système, placé en amont du pot d'échappement, permettant de récupérer l'énergie des gaz d'échappement.

Pour ce faire, dans notre première partie, nous avons étudié deux types de moteurs utilisables dans notre système. Puis nous nous sommes intéressés au moteur à changement de phase dans notre seconde partie.

2. METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Lors des premières séances, nous avons déterminé quels éléments pouvaient nous permettre de récupérer l'énergie thermique des gaz d'échappement, à savoir deux échangeurs et une machine ditherme. En parallèle, nous avons fait des recherches personnelles afin de mieux cerner notre sujet.

Nous nous sommes ensuite intéressés plus particulièrement au cycle que pouvait suivre notre système ainsi qu'au choix de la machine ditherme et du fluide utilisé dans notre circuit. Nous nous sommes réparti les tâches de la manière suivante :

Eurielle et Hugo ont travaillé sur les deux types de moteurs correspondant à notre problématique, respectivement le moteur à gaz et le moteur à changement de phase.

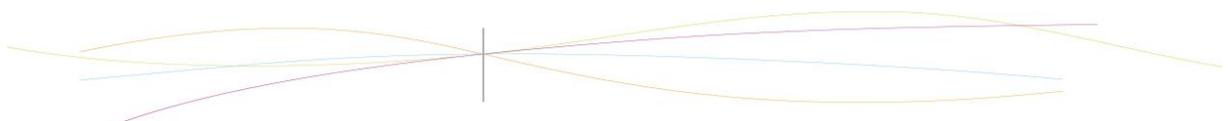
Charles-Antoine a réalisé l'étude des échangeurs que nous allons utiliser dans le système.

Céline et Orlane ont fait de nombreuses recherches consistant à choisir quel réfrigérant était le plus adapté à notre système. Elles ont également déterminé les caractéristiques du cycle de Rankine.

Enfin, Fanny et Hugo ont travaillé sur les systèmes de détente et en particulier sur les turbines.

Pendant la réalisation de notre projet, nous nous tenions régulièrement informés de l'avancée de chacune de nos tâches car les éléments utilisés dans notre système dépendent fortement les uns des autres.

La principale difficulté que nous avons rencontrée concernait la recherche de données chiffrées, en particulier pour dimensionner les turbines. Cependant, M.Vuillamy nous a fourni des documents afin de remédier à ce problème.



3. TRAVAIL REALISE ET RESULTATS

3.1. Deux types de moteur possibles

3.1.1. Moteur à gaz

3.1.1.1. Présentation générale

Afin de récupérer l'énergie des gaz d'échappement, une possibilité est d'utiliser un moteur à air chaud couplé au moteur normal. Le moteur à air chaud regroupe le moteur Stirling et le moteur Ericsson, mais le principal représentant reste le moteur Stirling. C'est pourquoi, dans la suite, nous utiliserons ce dernier afin d'expliquer le fonctionnement.

Le principe général de ces moteurs est simple : un gaz (air, hélium ou hydrogène) est soumis à un cycle fermé de 4 phases :

- le chauffage isochore (à volume constant), la chaleur provient d'une source extérieure, ici les gaz d'échappement. Le gaz contenu prélève la chaleur. Cette étape correspond aux points 4 à 1 du diagramme de Clapeyron.
- la détente isotherme ou à température constante, qui avoisine les 400°C. Points 1 à 2.
- le refroidissement isochore, qui fournit de l'énergie mécanique. Points 2 à 3.
- la compression isotherme. Points 3 à 4.

Il faut noter que lors de ce cycle, le fluide ne sort pas du système, contrairement au moteur Diesel par exemple.

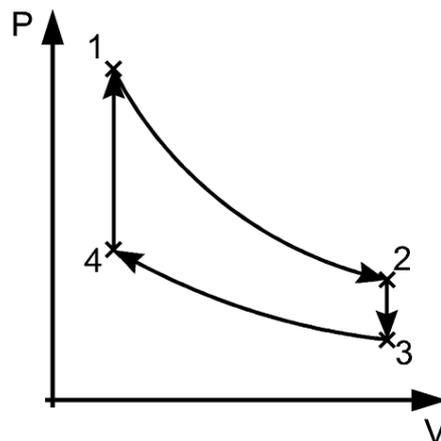
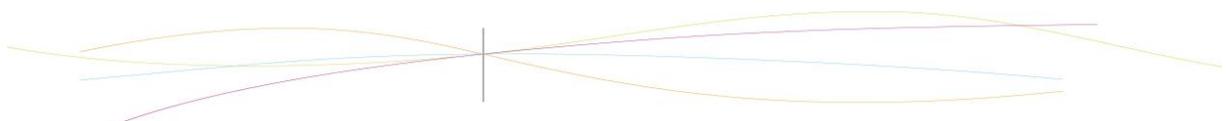


Figure 1 : Diagramme de Clapeyron du cycle de Stirling



3.1.1.2. Travail mécanique récupéré et rendement

Le travail récupéré lors de ce cycle correspond à la somme du travail récupéré lors de la détente (travail positif) et de celui fourni lors de la compression du gaz (travail négatif).

$$W = nR (T_{\max} - T_{\min}) \ln V_{\max} / V_{\min}$$

Le rendement du cycle de Stirling peut être équivalent à celui du cycle de Carnot sous réserve que l'échangeur soit parfait et qu'il n'y ait pas de pertes de chaleur lors du cycle. Dans ce cas, on a :

$$\eta = 1 - (T_{\min}/T_{\max})$$

En considérant que $T_{\min} = 293K$ (température ambiante) et $T_{\max} = 673K$, on obtient $\eta = 55\%$. On récupérerait donc plus de la moitié de l'énergie dissipée dans les gaz d'échappement. Cependant, le dispositif n'est pas parfait, et le rendement réel du cycle de Stirling est plus proche des 40%.

3.1.1.3. Quelques applications

Utiliser un moteur à air chaud en parallèle d'un moteur essence ou Diesel a déjà fait l'objet de recherches. On peut noter l'association d'un moteur Stirling au moteur principal, d'abord sur les sous-marins militaires suédois puis japonais Soryu (équipés d'un moteur Diesel électrique), permettant ainsi d'augmenter l'autonomie du bâtiment en rechargeant les batteries, même en immersion.

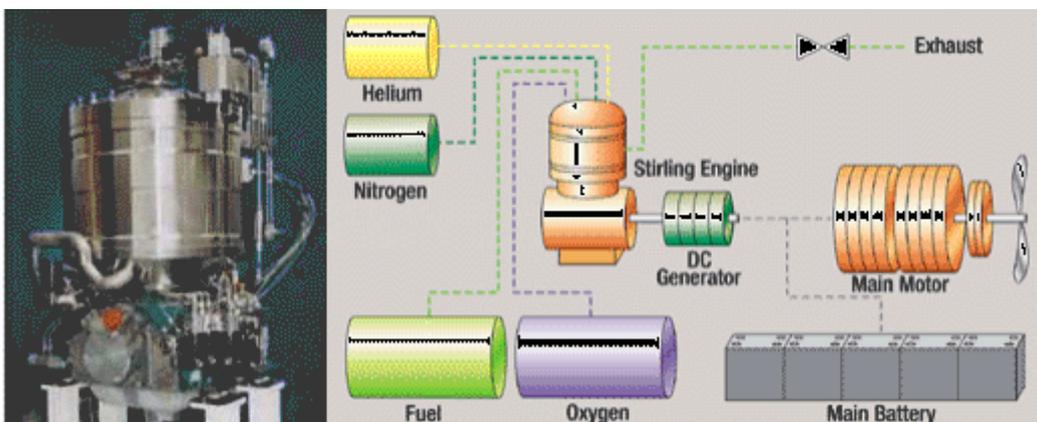
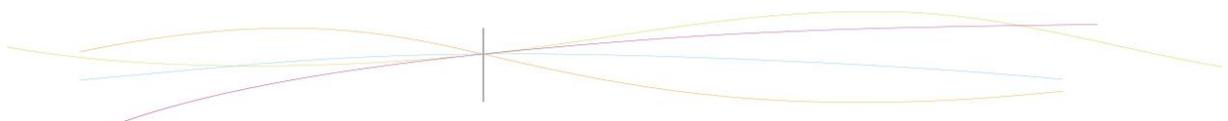


Figure 2 : Schéma du fonctionnement sur un sous-marin

3.1.2. Moteur à changement de phase

Une autre solution de cycle qui utilise l'énergie calorifique d'un thermostat chaud que constituent les gaz d'échappement du véhicule automobile pour produire du travail mécanique est le cycle de Rankine. Une application mécanique suivant ce dernier est un moteur thermique avec fluide à changement de phase.

Ainsi, pour comprendre méthodiquement le principe de fonctionnement et l'intérêt de l'utilisation d'un tel moteur, la connaissance des principes fondamentaux de thermodynamique aident au suivi du cycle de Rankine, déjà abordées en P1 en première année, puis revues en T1.



3.1.2.1. Généralité thermodynamique sur le cycle de Rankine

Le cycle de Rankine envisagé repose sur la récupération d'énergie calorifique des gaz du pot d'échappement à l'aide d'un fluide : une série de transformations de celui-ci par passage d'un état liquide à un état vapeur, et vice-versa, donnera lieu à une libération de travail et un transfert de chaleur au thermostat froid, l'air ambiant. Ce fluide peut éventuellement être sous une phase de mélange liquide-vapeur mais cela dépendra du choix des conditions de température et de pression.

Le fameux bilan d'énergie sur les machines dithermes est respecté et exploité :

$W + Q_c + Q_f = 0$ soit : $W + Q_f = -Q_c$ donc communément: l'énergie thermique des gaz est absorbée et transformée en travail et en chaleur dissipée dans l'air.

Un graphique permettant de décrire et visualiser l'évolution de pression, température et de volume du système fluide choisie lors du cycle est le diagramme de la pression P en fonction du volume v (P,v), ou diagramme de Clapeyron.

Le cycle de Rankine s'effectue donc en quatre temps, qui entraînent des changements d'états du fluide.

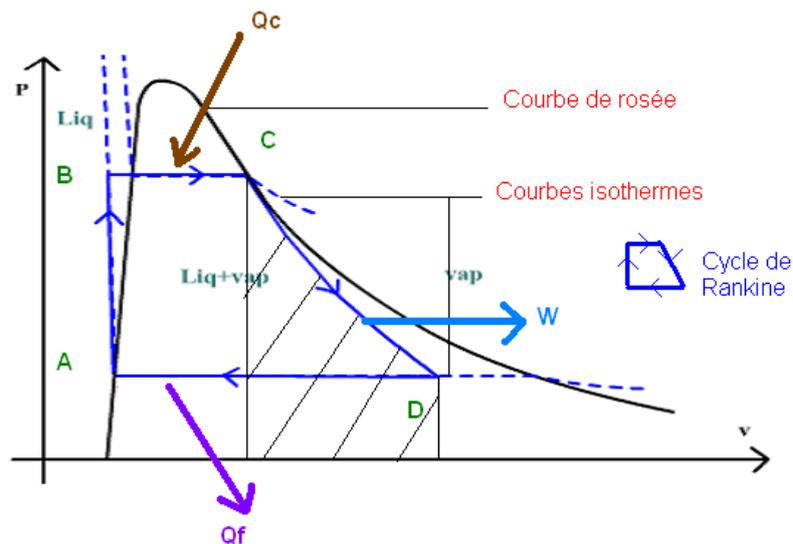


Figure 3: Diagramme de Clapeyron (P,v) du cycle de Rankine

Source illustration: <http://physiquecira.free.fr/CoursPhys/InstallVapeur/pvFlash.htm>

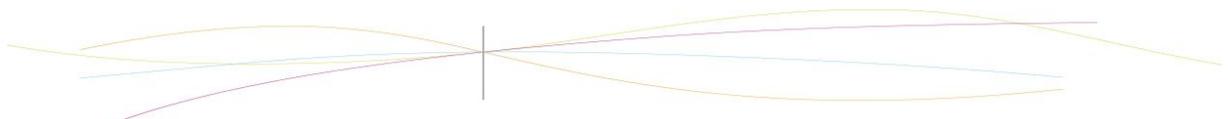
AB : Compression isentropique (transformation réversible sans échange de chaleur) du fluide.

BC : Échauffement isobare et vaporisation du fluide : l'énergie thermique Q_c des gaz d'échappement est absorbée lors de cette phase.

CD : Détente isentropique des vapeurs du fluide : elle provoquera par la variation de volume, la libération de travail mécanique W .

DA : Condensation du mélange et libération de chaleur Q_f dans l'air ambiant.

Les généralités du cycle étant abordées, il est nécessaire de constituer un montage concret pour la réalisation du cycle fermé par le fluide et ainsi mettre en marche notre moteur.



3.1.2.2. Montage du moteur

Afin de réaliser le cycle, on utiliserait de préférence du matériel déjà existant dans l'industrie. A chacune des quatre étapes subies par le fluide correspond un dispositif permettant la transformation voulue. On pourrait résumer la liste de l'équipement nécessaire de la façon suivante :

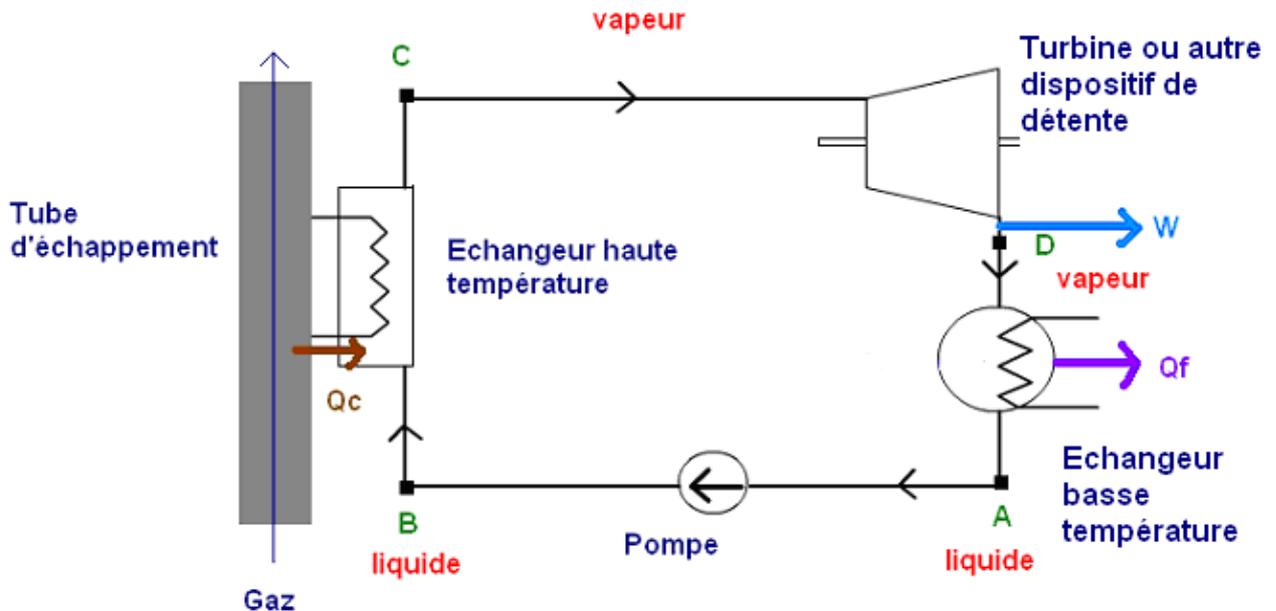
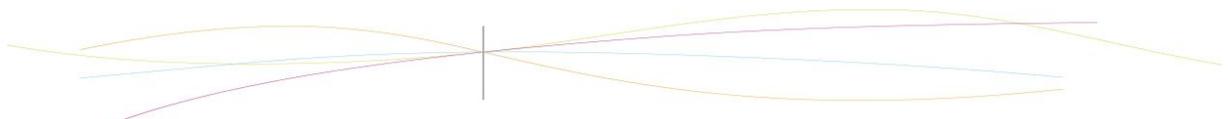


Figure 4: schéma du montage d'un moteur à changement de phase suivant le cycle de Rankine

- La compression AB du liquide se fait par une pompe qui lui donnera de nouvelles propriétés.
- L'échauffement et le changement d'état liquide BC en vapeur du fluide réalisés en BC s'effectuent dans un échangeur de haute température qui permet aux gaz chauds de communiquer leur énergie thermique au fluide sous forme liquide à l'entrée du dispositif.
- La détente CD de la vapeur obtenue se déroule dans une turbine qui fournit le travail, objet de convoitise de notre projet.
- Enfin la vapeur 'détendue' revient à l'état liquide (DA) par un échangeur basse température qui refroidit le gaz à l'air ambiant.
- Dans le cas où l'on opte pour ce système, plusieurs contraintes seront à prendre en compte lors du choix du type des éléments du circuit.



En effet, celles-ci sont données par :

- La nature du fluide : point d'auto-inflammation, températures de changement de phase...
- Les matériaux utilisés dans la fabrication des pièces : ce métal supporte-t-il ces températures élevées ?
- Le dimensionnement des pièces : l'appareil peut-il être facilement installé sur une voiture ?
- La quantité de travail W espérée
- Le coût matériel.

3.1.2.3. Rendement du moteur

Le rendement d'un tel moteur nous donne une indication sur le lien entre la proportion d'énergie thermique à apporter par les gaz d'échappement, et le travail récupéré en conséquence.

$$\text{Rendement} : \eta = \text{énergie utile} / \text{énergie apportée} = -W / Q_c$$

Or le cycle étudié suit le même raisonnement qu'un cycle de Carnot au niveau du calcul de η : en effet, le cycle de Rankine est une amélioration de la machine de Carnot. Les formules du cours nous donnent :

$$\eta = 1 - (T_f / T_c)$$

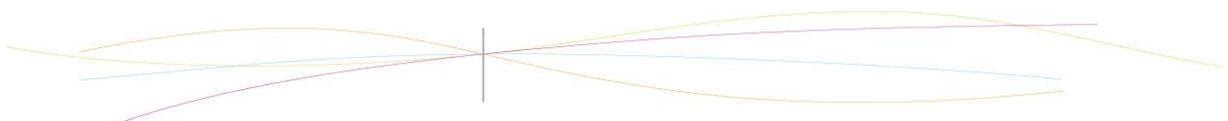
où T_f représente la température du système provenant du thermostat froid c'est-à-dire l'air ambiant ; T_c celle provenant du thermostat chaud, en l'occurrence la température des gaz d'échappement.

Application numérique :

Si grossièrement, la température des gaz est $T_c = 300^\circ\text{C}$, et la température de l'air environnant le dispositif $T_f = 30^\circ\text{C}$ si on considère que la voiture roule à puissance peu élevée.

$$\eta = 1 - (373/573) = 34.9\%$$

Ce rendement serait plutôt intéressant dans la mesure où l'on sait qu'un tiers de l'énergie thermique du carburant est dissipée dans les gaz d'échappement.



3.1.3. *Limites et choix du dispositif de récupération d'énergie thermique*

Deux possibilités sont donc envisageables pour exploiter l'énergie thermique émise par les gaz: l'utilisation d'un moteur à air chaud ou celle d'un moteur thermique faisant intervenir les changements d'état d'un fluide porteur d'énergie.

Il est essentiel de voir quels sont les paramètres qui nous permettent d'affirmer qu'un système est plus avantageux à implémenter que l'autre

Utiliser un moteur à air chaud à la suite d'un moteur à combustion afin de récupérer l'énergie des gaz d'échappements a plusieurs avantages. Dans un premier temps, le rendement, même s'il est fonction des températures maximale et minimale, est assez élevé. D'un point de vue écologique, il ne pollue pas, et il s'agit d'un moteur fiable nécessitant peu de maintenance.

Cependant, plusieurs inconvénients apparaissent : l'utilisation de gaz pose le problème de l'étanchéité et les échanges de chaleur sont assez délicats dans ce cas, ce qui implique l'utilisation d'appareils volumineux (donc peu adaptés pour une voiture). L'un des plus gros problèmes avec un moteur type moteur Stirling est son manque d'adaptation, les puissances nominales constantes lui convenant mieux que les variations rapides de puissance que l'on peut rencontrer lors de l'utilisation d'une voiture.

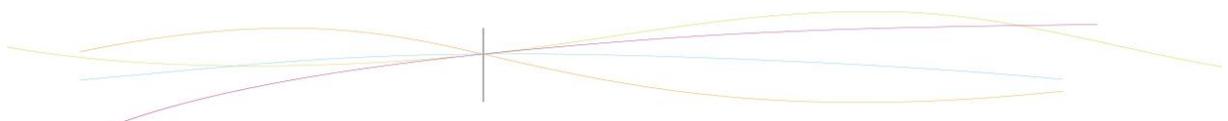
L'utilisation d'un moteur à air chaud pour récupérer de l'énergie des gaz d'échappement semble donc compromise actuellement.

Maintenant, si l'on considère le cycle de Rankine suivi par un moteur impliquant des changements de phase, l'amélioration proposée par rapport à un cycle de Carnot suivi par le moteur Stirling consiste à dimensionner l'échangeur basse température de façon à obtenir une liquéfaction totale de la vapeur de fluide.

Dans ces conditions, le travail de compression ne se fera uniquement que sur une phase liquide, ce qui permettra d'utiliser une pompe moins consommatrice d'énergie par rapport à d'autres compresseurs de moteurs classiques à air chaud, car la variation de volume du fluide est bien plus faible.

Par conséquent, avec cette économie d'énergie consommée, le travail net récupéré au niveau de la turbine ou du dispositif de détente de vapeur est plus important.

En prenant ces éléments en compte, il semble judicieux d'utiliser le moteur à changement de phase.



3.2. Etude du moteur à changement de phase

3.2.1. Les échangeurs

3.2.1.1. Echangeurs de chaleur

Dans le cadre de cette étude, la machine imaginée nécessitera deux échangeurs de chaleur lors des deux transitions de phase du liquide frigorifique.

Avant de regarder les contraintes de dimensionnement et les calculs physiques, nous allons faire l’inventaire des différentes solutions concernant les échangeurs de chaleur.

Un échangeur est un dispositif qui permet un échange d’énergie thermique entre deux fluides circulant dans des circuits séparés. L’un des exemples les plus importants de ce dispositif dans l’industrie est le générateur de vapeur des centrales nucléaires qui échange l’énergie thermique de la fission du circuit primaire vers le circuit d’eau secondaire, lié au couple turbine-alternateur.

On trouve plusieurs types de positionnement pour le transfert et différents types d’échangeurs.

3.2.1.2. Types de transferts

On peut trouver des transferts :

- A courant co-courant : où les fluides circulent en parallèle et dans le même sens.
- A contre-courant : parallèle mais de sens opposés.
- A courant croisé : les fluides circulent en parallèle.
- A tête d’épingle : un des fluides va faire un demi-tour dans un compartiment traversé par le deuxième fluide. Une moitié sera donc co-courant et l’autre contre-courant.
- A contact direct ou mélange.

3.2.1.3. Types d’échangeurs

Les tubes en U (= Générateur de vapeur, nucléaire).

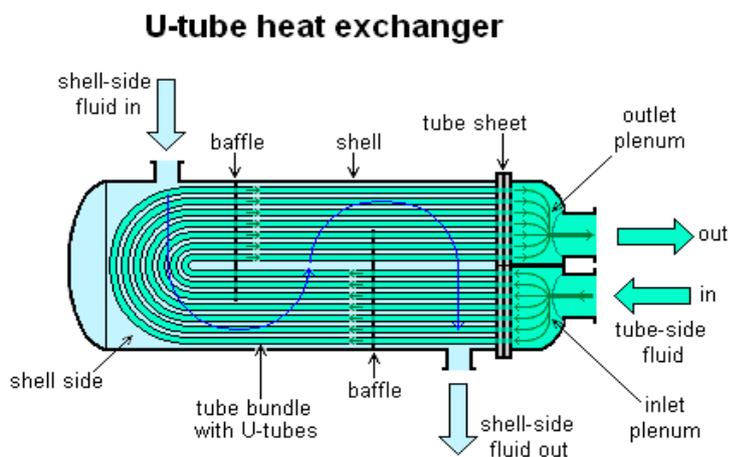
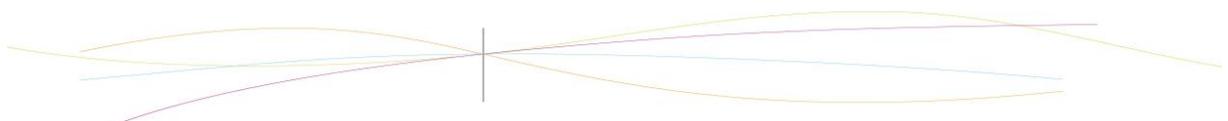


Figure 5 : Schéma d’échangeur en U



Les échangeurs à faisceau (horizontal ou vertical).

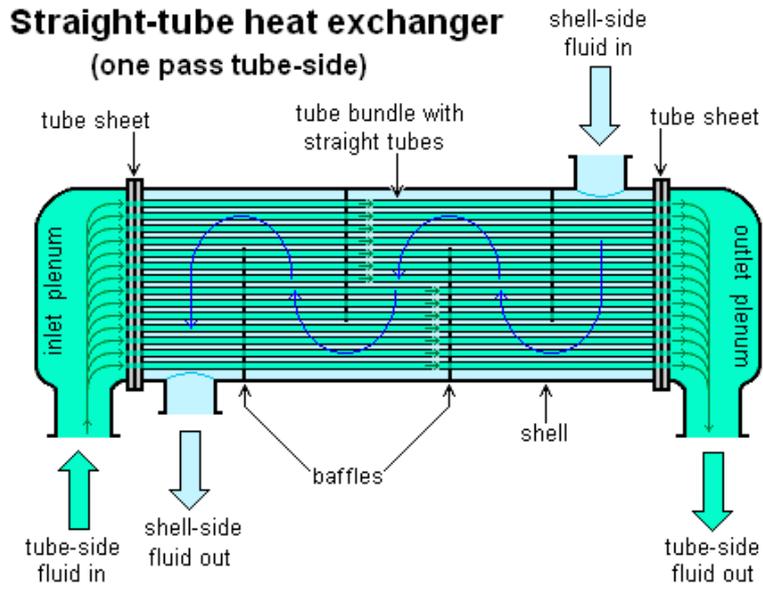


Figure 6 : Schéma d'échangeur à faisceau horizontal

Les échangeurs à spirales.

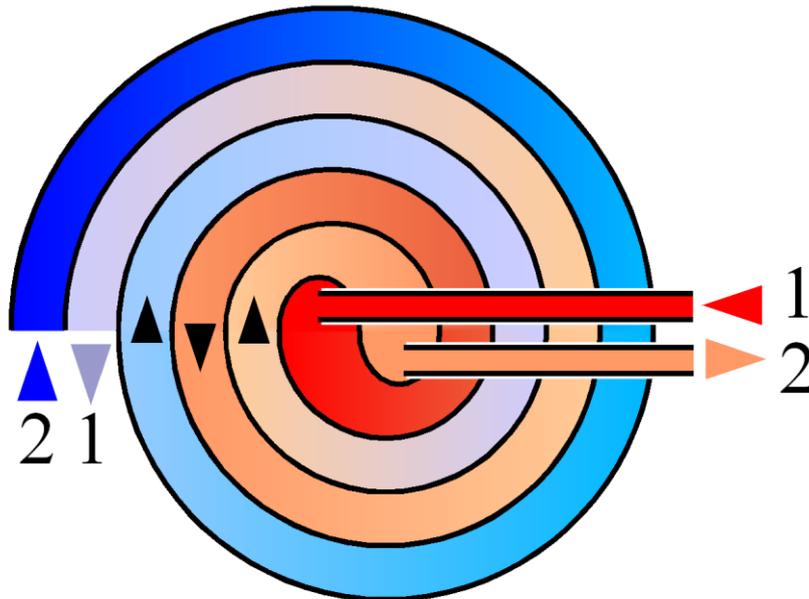
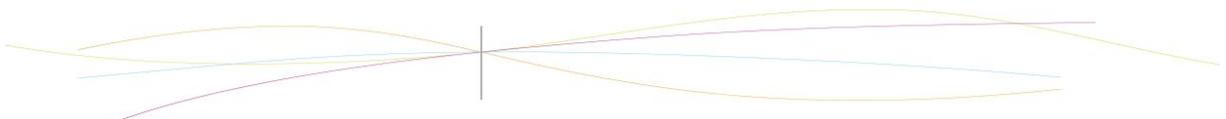


Figure 7 : Schéma d'échangeur à spirales



Les échangeurs à plaques.

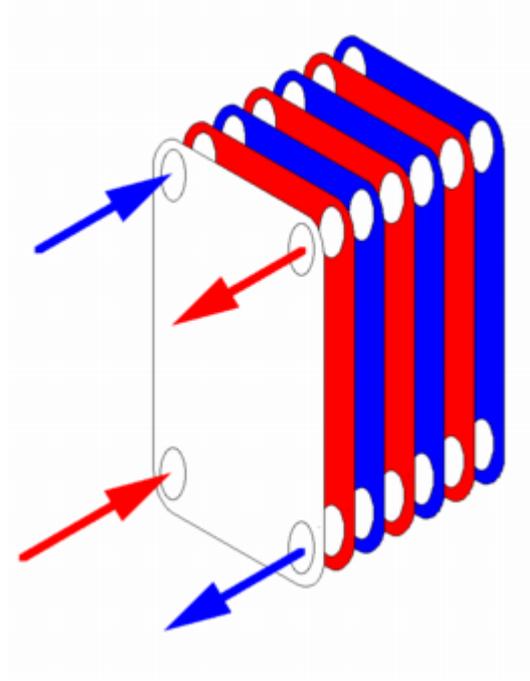
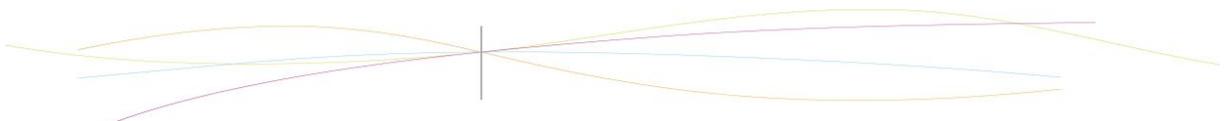


Figure 8 : schéma d'échangeur à plaques

Les échangeurs à ailettes.



Figure 9 : Photo d'échangeur à ailettes



3.2.1.4. *Choix du type d'échangeur pour la machine imaginée*

Le premier point à prendre en considération dans la réalisation de cette machine est que nous sommes élèves ingénieurs, en projet de physique. Il est donc évident que nous ne pouvons nous permettre de créer une machine trop onéreuse.

De ce fait, l'idée de choisir le type « tube en U » est à exclure. De plus, ce dispositif est très encombrant et nous souhaitons réaliser une petite machine peu volumineuse.

Comme il a été constaté, nous nous sommes souvent inspirés de la technologie utilisée en automobile pour réaliser cette machine, et à cet effet, les échangeurs à ailettes semblent être une bonne solution. Cependant, nous n'avons pas opté pour ce type non plus à cause de sa grande sensibilité aux chocs qui peuvent perturber le bon fonctionnement de la machine.

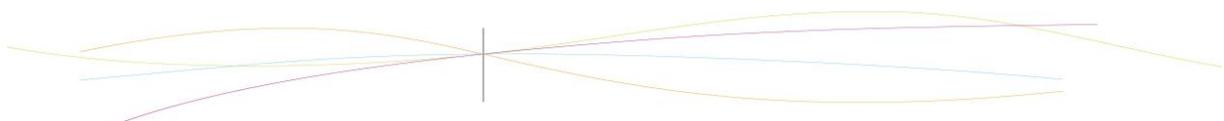
Résumons donc, pas cher, résistant et peu sensible aux chocs. Ce sont les caractéristiques d'un échangeur à faisceau tubulaire. Oui ! Mais ce système présente deux problèmes : c'est un système qui est difficile à entretenir. Donc, tant que l'on reste sur l'eau en liquide réfrigérant, cela passera, mais pour des fluides plus corrosifs ou « salissants », il faudra changer d'échangeur. Sans oublier que ce type d'échangeur est soumis à des poches d'air qui dérèglent fortement la machine. Donc choix intéressant mais on peut trouver mieux.

Il reste alors les échangeurs à spirales et à plaques. Le deuxième type présente un très gros problème : ce dispositif perd de la charge, il peut donc avoir une fuite de liquide. Il impose donc des conditions limitées en température et pression. Mais surtout, il est impossible de travailler avec autre chose que de la vapeur d'eau ! (Citer similarité entre filtre Ifrachimie et échangeur).

Au final, la solution miracle se trouve dans l'échangeur à spirales. Dans la pratique, ce type présente l'inconvénient de limiter l'écart de température, ce qui n'est pas grave car nous travaillons sur un écart plutôt petit, il est donc facile de bien dimensionner la machine. De plus, c'est l'un des types les moins chers, les moins encombrants. Ils sont particulièrement conseillés pour condenser et enfin, c'est un système autonettoyant !

3.2.1.5. *Dimensionnement des échangeurs chaud et froid*

La seule différence qui résidera entre les échangeurs sera la longueur. Pour réussir la condensation, l'échangeur froid sera légèrement plus long que l'échangeur chaud. Par contre, le dimensionnement sera le même.



Pour illustrer le dimensionnement, appuyons-nous sur l'exemple de l'échangeur chaud.

En entrée :

$P = 1 \text{ bar}$
 $T = 50\text{-}60^\circ\text{C}$
 Eau liquide ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$)
 $Q_m = 10 \text{ g/s}$
 $V_e = 5 \text{ m/s}$
 $D_e = ?$

En sortie :

$P = 20 \text{ bar}$
 $T = 300^\circ\text{C}$
 Eau vapeur ($\rho = 8 \text{ kg/m}^3$)
 (Lecture diagramme Mollier)
 $Q_m = 10 \text{ g/s}$
 $V_s = 100 \text{ m/s}$
 $D_s = ?$

Pour calculer les diagrammes en entrée-sortie, on reprend les deux formules :

$$S = \pi \times D^2 / 4$$

$$Q_m = \rho V S$$

Après avoir fait les applications numériques, on trouve :

$$S_e = 2.10^{-6} \text{ m}^2 \rightarrow D_e = 2 \text{ mm.}$$

$$S_s = 1,25^{-5} \text{ m}^2 \rightarrow D_s = 4 \text{ mm.}$$

3.2.2. Le choix du liquide de refroidissement

3.2.2.1. Recherche d'un liquide

Pour ce dispositif, il nous faut un fluide. Nous avons tout de suite pensé à prendre un réfrigérant. En effet, le cycle d'une pompe à chaleur fonctionne dans le sens inverse de notre cycle. Par conséquent, il ne serait pas faux de penser qu'il pourrait fonctionner dans un sens comme dans l'autre.

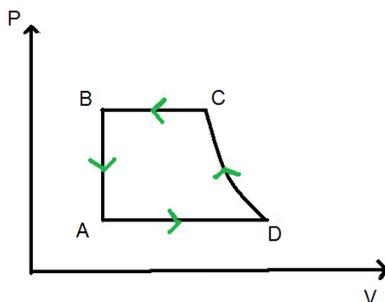


Figure 10 : Cycle d'une pompe à chaleur

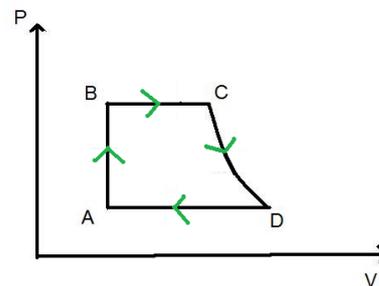
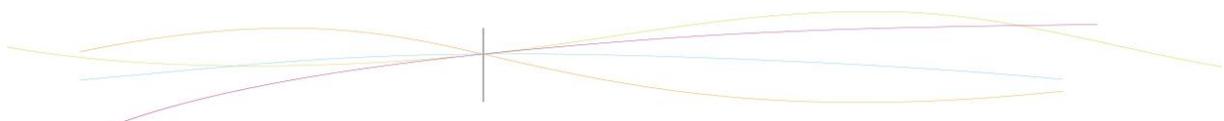


Figure 11 : Notre cycle



Dans un second temps, nous avons cherché s'il n'y avait pas d'autres composés chimiques qui pourraient à la fois valider nos critères (cf au paragraphe suivant) et coïncider avec notre cycle. Et c'est à ce moment, qu'une idée nous est venue. Pourquoi ne pas directement regarder les liquides de refroidissement d'une voiture ? En effet, le cycle de refroidissement d'un moteur est identique à notre cycle. Plus tard, nous avons élargi nos recherches au cycle d'un climatiseur de voiture.

3.2.2.2. Conditions particulières pour les réfrigérants

Cependant, et c'est là qu'est la difficulté, le réfrigérant doit respecter certains critères.

Tout d'abord celui-ci ne doit pas être inflammable. En effet, dans une pompe à chaleur, le réfrigérant n'a pas besoin de résister à une température excédant la température ambiante, mais dans notre montage, le liquide sera soumis à une température de plus de 400°C. De plus, en cas d'accident, un liquide inflammable peut être très dangereux. Nous éliminerons donc tous les produits inflammables vers 400°C et moins, or de nombreux éléments sont sensibles à la chaleur, ce qui réduit énormément les possibilités.

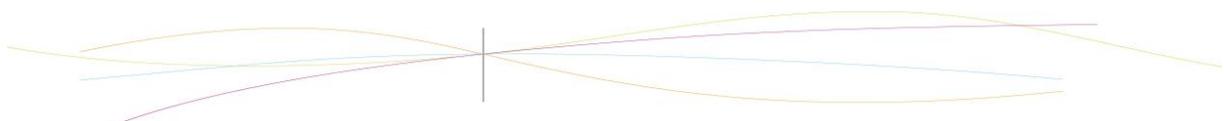
Dans un second temps, le réfrigérant utilisé devra respecter les normes environnementales. Celles-ci ont d'ailleurs été modifiées et sont devenues plus strictes afin d'éviter la propagation des gaz les plus néfastes à la couche d'ozone et ceux ayant un impact important sur l'effet de serre. De nos jours, les réfrigérants de type CFC, HCFC et HCF sont donc interdits. Là encore, un grand nombre de composés chimiques peuvent être enlevés de notre liste (voir produits surlignés en bleu en annexe 1).

Enfin, notre produit devra être ni irritant, ni nocif, cela afin d'éviter tout problème au niveau de la maintenance et de la production. De même, lors d'un accident des produits de ce type sont, là aussi, dangereux.

3.2.2.3. Les liquides de refroidissement

Nous avons constaté que les constructeurs automobiles utilisaient de l'eau, avec quelques composés chimiques, pour diminuer la température de fusion, dans le but d'éviter que l'eau gèle pendant les jours de grand froid (température en dessous de 0°C). De plus, ce liquide a l'avantage de ne pas coûter très cher.

Lors de la journée de l'automobile à l'INSA, des intervenants nous ont confié qu'ils travaillaient plutôt avec un mélange eau-éthanol comme liquide de refroidissement.



Cependant, ne trouvant pas de diagramme de Mollier ou autre concernant ce mélange, nous avons été obligés de mettre ce dernier de côté. En effet, sans diagramme, il est difficile de faire des calculs précis pour la suite de l'étude.

Le groupe VOLVO envisage quant à lui d'utiliser le HFC-245fa (=R245fa) comme fluide pour un cycle de récupération de l'énergie des gaz d'échappement. Par manque d'informations concrètes à son sujet, nous avons dû arrêter les recherches sur cette voie.

En ce qui concerne les fluides de climatiseur, nous avons découvert que le R134a est utilisé à cet effet. Cependant, à cause de sa toxicité pour l'environnement, un nouveau produit appelé le HFO-1234yf va le remplacer. Ses propriétés chimiques respectent bien nos critères toutefois, ses caractéristiques physiques restent secrètes. La raison peut être la découverte récente de ce produit, donc de sa protection avec un brevet.

3.2.2.4. Choix final

Résumons nos possibilités.

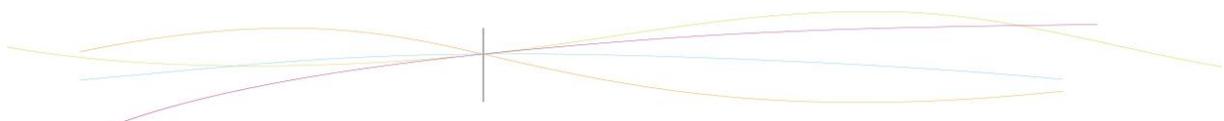
Nous avons beaucoup de réfrigérants susceptibles de convenir à notre cycle, cependant le manque de données à leur sujet les met de côté.

Pour les différents liquides utilisés pour la voiture, nous avons l'eau, l'éthanol, le HFO-1234yf et le HFC-245fa.

D'après les différentes observations et recherches effectuées, nous avons choisi l'eau comme liquide pour toutes les raisons suivantes :

- elle n'est pas inflammable
- elle n'est pas dangereuse pour l'environnement ni pour l'homme
- elle n'est pas très coûteuse à exploiter
- toutes ses propriétés chimiques et physiques sont disponibles
- nous avons un diagramme de Mollier pour faire des calculs précis.

Nous allons donc prendre ce choix pour le reste de l'étude.



3.2.2.5. Quelques mots sur l'eau

Température de fusion : $T_f = 0^\circ\text{C}$

Température d'ébullition : $T_{eb} = 100^\circ\text{C}$

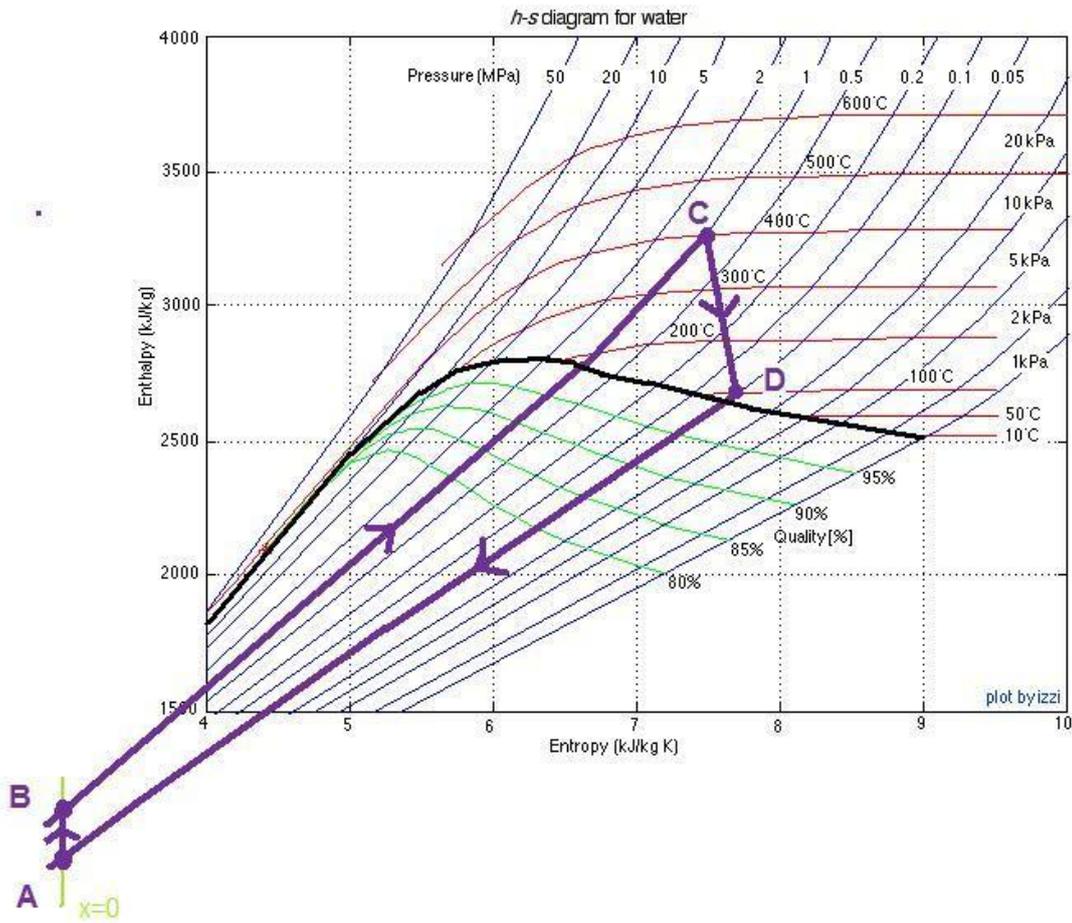


Figure 12 : Notre cycle sur un diagramme de Mollier de l'eau

AB : compression par une pompe

BC : échangeur haute température

CD : détente par une turbine

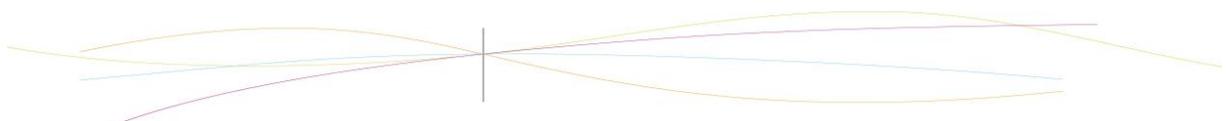
DA : échangeur basse température

En A : $T = 100^\circ\text{C}$ $P = 1\text{bar}$

En B : $T = 100^\circ\text{C}$ $P = 20\text{bar}$

En C : $T = 400^\circ\text{C}$ $P = 20\text{bar}$ $\rho = 0,14 \text{ m}^3/\text{kg}$

En D : $T = 400^\circ\text{C}$ $P = 1\text{bar}$ $\rho = 18 \text{ m}^3/\text{kg}$



3.2.3. Système de détente

Nous l'avons vu précédemment dans la description du cycle de Rankine, la détente de l'eau sous l'état de gaz à la sortie peut s'effectuer par une turbine ou par un autre dispositif tel que le moteur à pistons.

Avec le cycle de Rankine, nous espérons pouvoir atteindre un rendement de 10% à 300°C avec un débit de 200 g/s.

3.2.3.1. Le moteur à piston

Une première solution pour effectuer la détente isentropique des gaz permettant la libération d'énergie mécanique est l'utilisation d'un moteur à piston rotatif, le moteur Wankel.

Description :

Le moteur à piston rotatif Wankel se compose des pièces suivantes:

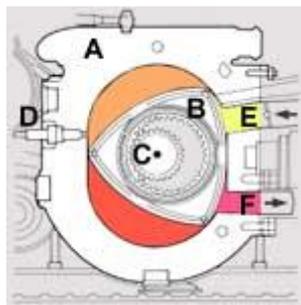


Figure 13 : Schéma d'un moteur à piston rotatif Wankel.

A: Stator, B: Rotor, C: Arbre Excentrique, D: Bougie, E: Admission, F: Échappement.

Fonctionnement :

Le moteur rotatif Wankel fonctionne selon le cycle à quatre temps. Ces schémas en montrent les différentes phases.

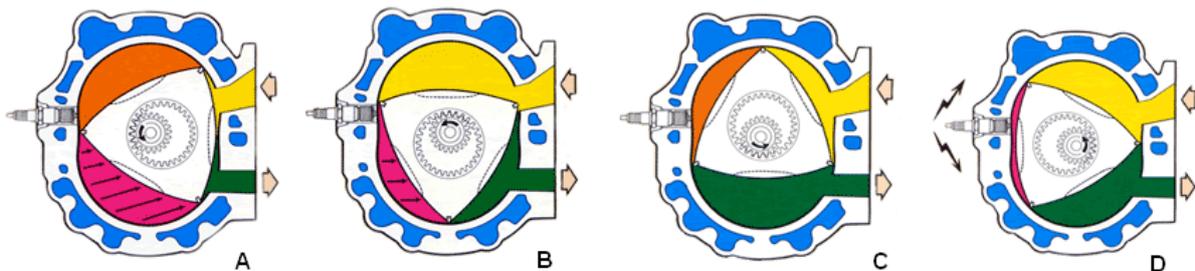
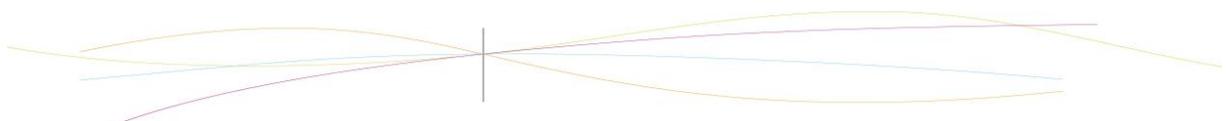


Figure 14 : Phase du cycle à quatre temps



Le mélange gaz-carburant (jaune) pénètre par le conduit d'admission E, c'est le premier temps.

Dans le deuxième temps, le rotor obture l'orifice d'aspiration et amorce la compression des gaz (orange, figures A et B). L'étincelle produite par la bougie provoque l'explosion du mélange air-essence au moment où la compression est maximum (rose), (figure C).

La détente (rose), (figures D et A) provoque la rotation du rotor et fournit l'énergie motrice grâce aux forces de pression exercées sur la face du rotor : c'est le 3e temps ou temps moteur.

Enfin, dans la dernière étape, le rotor démasque l'orifice d'échappement qui permet aux gaz brûlés de s'évacuer.

Caractéristiques techniques :

Nous avons trouvé que sur un exemple d'une cylindrée-moteur de 125 cm³ et de diamètre 26, ce type de moteur peut tourner jusqu'à 17000 tours par minute ce qui, a priori, pourrait convenir. De plus, un avantage de ce moteur, est que pour des vitesses élevées de rotation, les vibrations sont peu nombreuses par rapport à d'autres systèmes.

Cependant, des limites sont à prendre en compte : il est souvent souligné le manque d'étanchéité au niveau du piston 'triangulaire', problème majeur qui pourrait endommager la totalité du moteur.

De même, il est fréquemment mentionné que ce type de moteur est souvent couplé à un turbocompresseur, ce qui finalement ne présente aucun intérêt car il ferait double emploi avec le dispositif envisagé par la suite ; cela signifie qu'il est peu performant mécaniquement à lui seul.

3.2.3.2. Les turbomachines

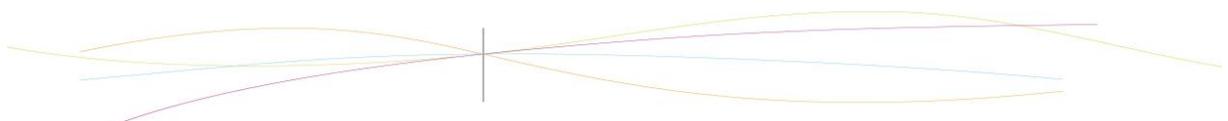
Afin d'effectuer la détente entre les deux échangeurs, nous utiliserons une turbomachine. En effet, une turbomachine en régime stationnaire est une machine tournante dont le rôle est d'assurer un échange d'énergie mécanique entre un rotor animé d'un mouvement de rotation à vitesse constante autour d'un axe et d'un fluide, ici l'eau, en écoulement quasi-permanent dans son stator.

En ce qui concerne les turbines, il est naturel de penser à celles déjà utilisées dans les moteurs automobiles avec les turbocompresseurs. Il s'agit des turbines centrifètes.

3.2.3.2.1. Turbine centripète

En observant les sites constructeurs de turbocompresseurs pour automobiles tels que Garrett ou Honeywell, la turbine centripète employée est radiale ; cela veut dire que le débit du gaz entrant dans la turbine se déplace de façon « circulaire » pour provoquer la rotation d'un axe.

La turbine radiale centripète est universellement utilisée sur les moteurs de traction routière : ses dimensions sont bien adaptées aux débits des gaz considérés et son comportement est bien adapté aux valeurs de pression des circuits d'échappement.



Description d'une turbine centripète :

Dans le sens de l'écoulement du gaz, une turbine centripète est constituée d'une bride d'admission, d'une volute, d'un distributeur, d'une roue mobile en rotation, d'un diffuseur et d'une bride d'échappement.

Les principaux éléments de la turbine radiale centripète sont représentés sur les figures ci-dessous :

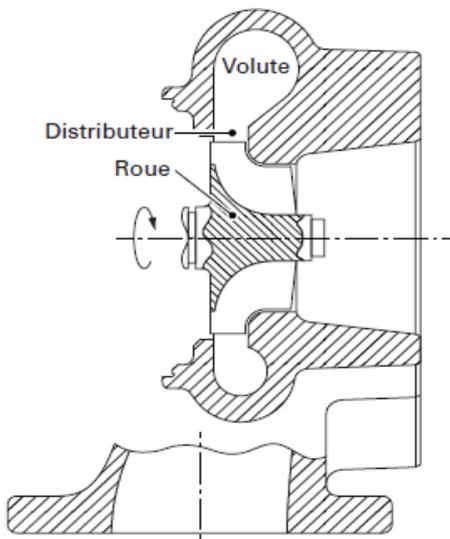


Figure 15 : schéma d'une coupe longitudinale d'une turbine centripète

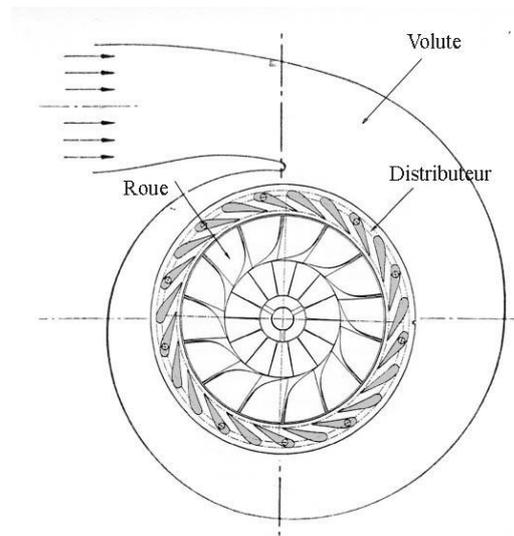


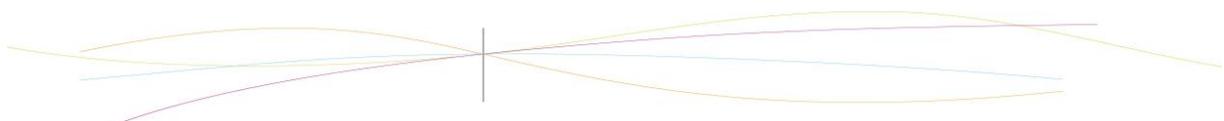
Figure 16 : schéma descriptif simplifié d'une turbine centripète

Fonctionnement :

L'entrée de l'étage, appelée volute, collecte et répartit uniformément le fluide sur toute la périphérie du distributeur. Le distributeur accélère et guide ensuite l'écoulement vers le rotor. Le rôle du rotor est de récupérer le travail du fluide. Ce procédé assure la détente progressive des gaz d'échappement. Il est possible de monter plusieurs étages en série afin d'augmenter la récupération d'énergie, mais c'est rarement effectué pour les turbines radiales.

Évaluation théorique de la puissance fournie :

Dans la description du cycle de Rankine, nous avons défini la détente isentropique et adiabatique. En effet, le débit de gaz porteur d'énergie est qualitativement et relativement conséquent devant les pertes thermiques.



D'après le document issu de *Techniques de l'Ingénieur*, la puissance théorique P_{th} libérée par la turbine est proportionnelle au débit massique q_D du gaz sortant de la turbine centrifète ainsi qu'à la différence de température due à la détente de la vapeur en question. La puissance théorique obtenue lors de la détente isentropique est donnée par:

$$P_{th} = q_D * c_{p, g} * (T_C - T_D)_{is}$$

avec $(T_C - T_D)_{is} = T_C [1 - (P_D / P_C)^{((\gamma-1)/\gamma)}]$, formule déduite de principe de Laplace pour des transformations isentropiques.

Application numérique sur une turbine centrifète d'un turbocompresseur :

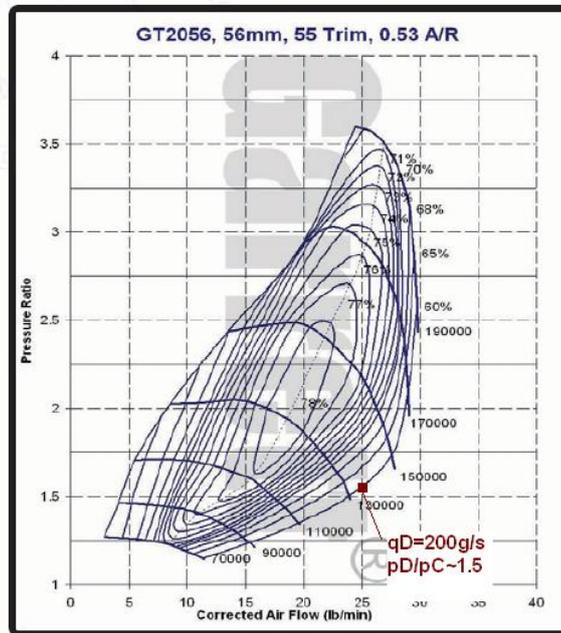
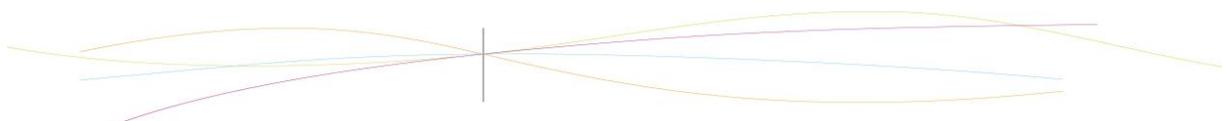
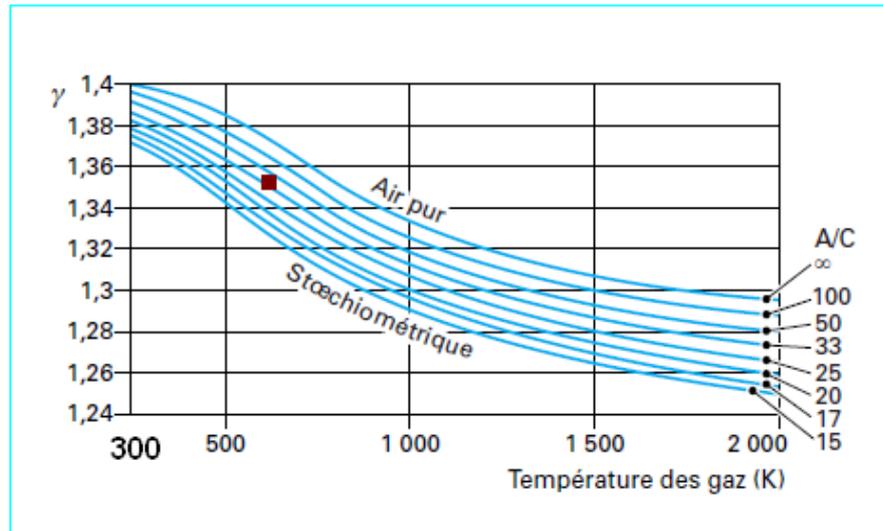


Figure 17 : Graphique caractéristique de la turbine du turbo GT2056 par Garrett des rapports de pression en fonction du débit massique des gaz.

Notre objectif étant de prouver la faisabilité de production d'un travail compris entre 5 et 10 kW, nous pouvons prendre les valeurs suivantes pour donner un ordre d'idée du travail produit sur un exemple de turbine montée sur un turbocompresseur en supposant un rendement de 0,6 propre à la turbine :

- $q_D = 200 \text{ g/s}$ (valeur fixée initialement, soit environ 25 l/min)
- $c_{p, g} \sim 1000 \text{ J/K/kg}$
- $P_D / P_C \sim 1.5$
- $\gamma \sim 1.35$ pour une température des gaz de 300°C soit 573K.





Valeurs de γ en fonction du rapport air/combustible A/C et de la température des gaz d'échappement

Figure 18 : Courbe de valeurs de γ en fonction de la température du fluide

Avec la formule théorique établie précédemment : $P_{th} = - 6.0 \text{ kJ}$

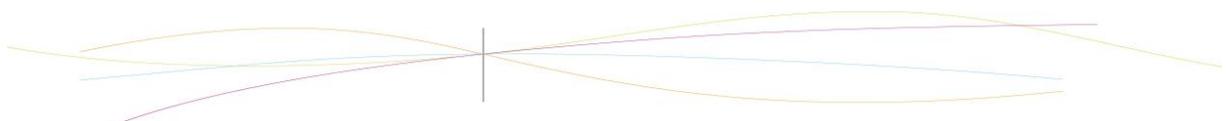
Nous nous rendons ainsi compte que l'utilisation de ce type de turbine convient bien dans l'application du cycle de Rankine.

Avantages de la turbine centrifète :

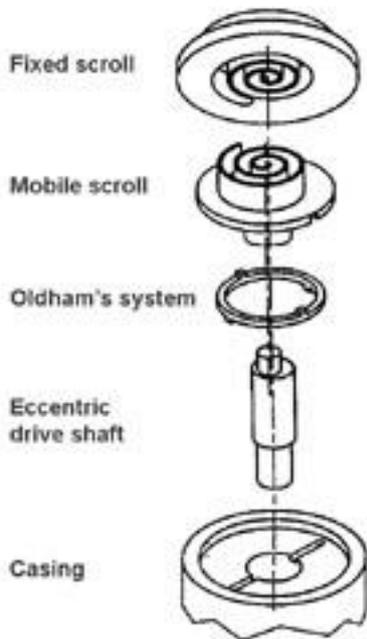
Le principal avantage de la turbine centrifète est qu'elle peut produire de fort taux de détente tout en étant peu encombrante (le diamètre de la roue mesure 50 mm pour un véhicule de 2,5 L). De plus, comme nous l'avons dit précédemment, ce type de turbine est particulièrement bien adapté aux pulsations de pression des circuits d'échappement. D'autre part, les turbines centrifètes sont très robustes.

3.2.3.2.2. Turbine Scroll

Une autre solution correspondant à notre système est d'utiliser les turbocompresseurs Scroll comme turbine. Cette technologie nous permet de constituer une turbine volumétrique à spirales qui fonctionne parfaitement au sein d'un cycle de Rankine.



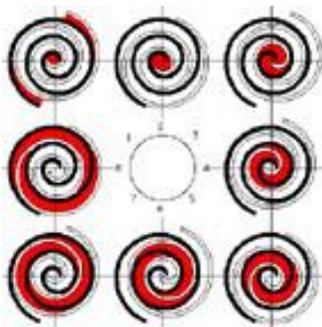
Description de l'unité hermétique de la turbine Scroll :



Cette turbine est composée d'une chambre d'expansion volumétrique délimitée par deux volutes d'un scroll fixe supérieur et d'un scroll mobile inférieur. L'ensemble est positionné avec un déphasage de 180° de façon à former une série successive de sous chambres d'expansion séparées. Le mouvement orbital par rapport au scroll fixe est réalisé par la rotation de l'arbre moteur comportant un système de paliers excentriques ainsi qu'un accouplement particulier effectué avec la bague de Oldham.

Figure 19 : Schéma d'une turbine Scroll

Principe de fonctionnement :

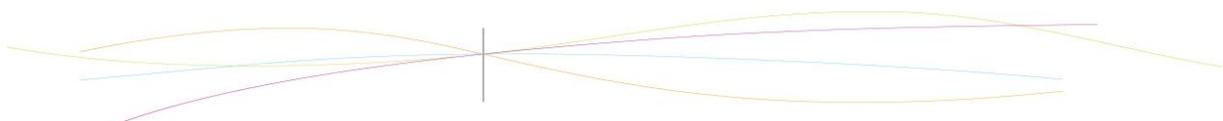


Le mouvement orbital de la spirale mobile entraîne une augmentation du volume des chambres qui se déplacent du centre vers la périphérie. Pendant l'expansion, le fluide réfrigérant à haute pression est introduit au centre de l'unité formant une poche centrale de gaz comme le montre la première figure. Suite au mouvement orbital, le fluide évolue progressivement vers la périphérie comme l'illustrent les figures 1 à 8. Après avoir atteint sa pression de décharge, le fluide s'échappe au niveau des flancs périphériques (figure 8 à 1).

Figure 20 : Fonctionnement de la spirale mobile

Caractéristiques :

- Température d'entrée maximale : 250°C
- Pression d'entrée maximale : 25 bar
- Vitesse de rotation : de 300 à 6000 tr/min
- Puissance électrique : entre 3 et 5 kW.
- Dimensions (Hauteur x longueur x largeur) en mètres : 0,6 x 0,3 x 0,3
- Poids : 45 kg



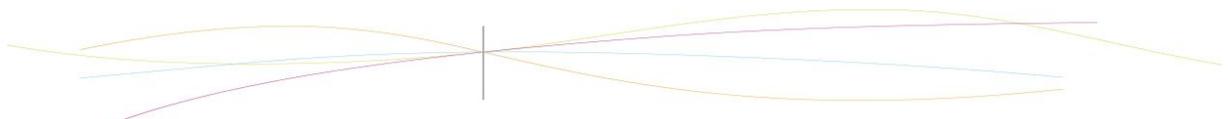
Les dimensions de cette turbine étant importantes, il est préférable d'utiliser deux turbines scroll plus petites qui auront les mêmes caractéristiques mécaniques et énergétiques.

Malgré nos nombreuses recherches, nous n'avons pas trouvé suffisamment de données chiffrées relatives au fonctionnement des turbines Scroll. Nous n'avons donc pas pu évaluer la puissance théorique fournie comme nous l'avons fait pour les turbines centripètes.

Cependant, les caractéristiques que nous avons présentées ici nous font penser que ce type de turbine pourrait correspondre à nos besoins.

Avantages des turbines Scroll :

Un des atouts principaux de la turbine scroll est qu'elle possède un processus de détente quasi-continu avec un excellent rendement volumétrique. De plus, cette machine est très robuste et produit de très faibles vibrations mécaniques, et de ce fait est peu bruyante. D'autre part, la constitution de cette turbine est simple (il y a peu d'éléments), ce qui garanti un faible coût ainsi qu'une grande qualité et peu de maintenance sera nécessaire.



4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Pour conclure sur le projet en lui-même, nous pouvons dire que les différents buts fixés qui étaient de trouver un fluide et des composants adaptés ont été atteints malgré des problèmes persistants. Le principal problème rencontré fut le dimensionnement de la turbine. En effet, le peu de données concernant ce point nous a ralenti et pris un bon nombre de séance. Mais avec l'aide de notre enseignant ainsi qu'avec notre détermination, nous avons réussi à trouver des chiffres satisfaisants notamment au niveau de la puissance.

Un autre problème est survenu un peu près vers la fin de notre étude. Nos calculs sur le rendement se sont avérés trop optimistes. En effet, nous nous sommes rendus compte, après avoir reçu des informations pendant la journée de l'automobile organisée par l'INSA, que nos évaluations sur la température de sortie des gaz d'échappement étaient un peu trop élevées. Nos valeurs correspondaient à un moteur de camion ou à une voiture fonctionnant à plein régime, ce qui ne s'accordait pas avec notre étude. En effet, celle-ci était plus axée sur une voiture d'un particulier utilisant un peu près la moitié de la puissance du moteur. Cependant nous avons très vite rectifié ce point et continué sur la bonne voie. Mis à part ces deux aspects, les autres composants et le fluide ont été choisis assez rapidement.

Finalement notre système permet de fournir une puissance de 3 kW avec un rendement de l'ordre de 20% au lieu de 53%.

En ce qui concerne le groupe, nous pouvons dire que notre bonne coordination ainsi que la répartition des tâches selon les préférences de chacun ont été des facteurs essentiels contribuant à notre efficacité tout au long de ce projet. Cette répartition nous a permis de trouver un intérêt personnel dans ce projet et d'avancer efficacement, dans la bonne humeur. De plus, le travail en groupe nous a appris à échanger nos doutes quant aux résultats obtenus et à remettre en question ces derniers afin de se réorienter rapidement en cas de fausse route. De plus, travailler en groupe a été une réelle source de motivation. Ce projet, bien plus qu'une simple étude scientifique, fut une expérience très enrichissante au niveau humain.

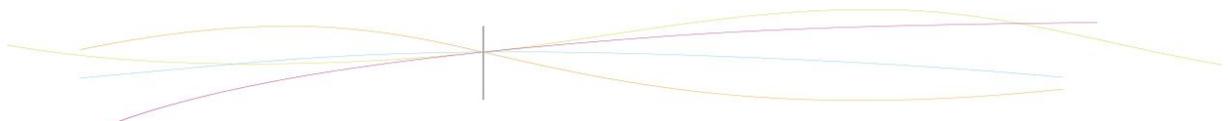
Afin de conclure sur nos apports personnels, chacun d'entre nous a rédigé un bref rapport sur ses ressentis.

Fanny:

Tout d'abord, ce projet m'a permis d'étudier des applications concrètes des notions de thermodynamique et de mécanique des fluides vues en cours, ce qui a été très enrichissant. D'autre part, rechercher des solutions pour répondre à la problématique de notre projet est un aspect du travail que j'ai particulièrement apprécié. Enfin, mes recherches sur les turbines m'ont beaucoup intéressée, ce qui a confirmé ma volonté de m'orienter en énergétique et propulsion.

Hugo :

J'ai eu la chance d'avoir été affecté dans ce projet qui était mon premier choix de sujet : aux vues de ma volonté de m'orienter en département d'énergétique et propulsion, l'EC P6-3 est une motivation supplémentaire. Celle-ci a été l'occasion idéale pour moi par des recherches documentaires d'élargir une culture scientifique souvent résumée à des cours, des exercices et des travaux pratiques. En traitant la description du cycle de Rankine, calculant la puissance



fournie par une turbine centripète et étudiant son fonctionnement, j'ai apprécié la mise en application des connaissances thermodynamiques et de mécanique des fluides acquises depuis le début de STPI sur un système concret ; de plus, le besoin de coopérer avec les étudiants de notre groupe et notre enseignant encadrant m'a stimulé et m'a donné un avant-goût d'un travail d'équipe qu'un ingénieur est obligé d'expérimenter.

Eurielle :

Espérant pouvoir intégrer l'année prochaine le département EP, le sujet du projet m'a plu car il traite de thèmes en rapport avec ce département (les moteurs, l'énergie), mais il m'a aussi permis de mettre en application certaines connaissances de thermodynamique en travaillant sur un sujet concret (qui s'avère être l'objet d'études sérieuses) et de découvrir ce que peut être un travail d'ingénieur en équipe ou lors de recherches. De plus, j'ai pu élargir ma culture scientifique grâce aux recherches effectuées lors de ce projet, que je n'aurais probablement pas faites autrement, mais qui sont très intéressantes.

Charles-Antoine :

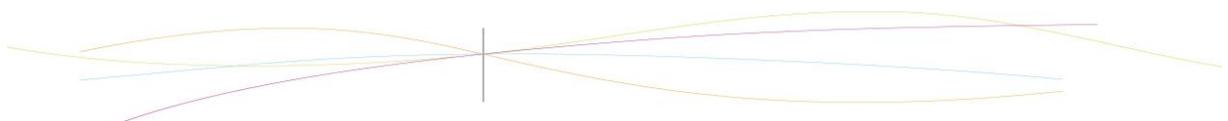
Personnellement, ce sujet n'était pas celui que j'attendais. Contrairement à une majorité de mes collègues masculins, l'automobile est une chose à laquelle je n'attache pas un grand intérêt, et comme la majorité des applications possibles de ce projet sont liées à l'automobile, je me sentais hors de mon domaine de prédilection. Néanmoins, j'ai pu constater que, dans tout projet, physique chimie et mathématiques sont pratiquement indissociables. En effet, l'étude du cycle, les dimensionnements, appartiennent au domaine physique mais en contrepartie, la chimie était présente grâce à l'étude des fluides réfrigérants. Et ça me rassure de savoir que, peu importe l'entreprise pour laquelle je pourrai travailler, j'aurai toujours la possibilité de me réfugier dans la chimie. A l'instar de mon stage ouvrier, ce projet me conforte dans l'idée d'entrer en département CFI l'année prochaine.

Orlane :

En ce qui me concerne, je souhaite fortement intégrer le département CFI l'année prochaine. Or au premier abord ce projet n'est en rien relié à la chimie. Néanmoins, j'ai pu remarquer au fil des séances que la chimie et la mécanique (mes deux thématiques de ce semestre) sont en réalité interdépendantes. En effet, je me suis en partie occupée de la section concernant les réfrigérants, j'ai donc pu constater que le choix d'un tel liquide devait reposer sur des bases de chimie tout en s'adaptant aux conditions dues à la mécanique. Ainsi ce projet m'a ouvert l'esprit sur les nombreux domaines à laquelle la chimie peut toucher, aussi éloignés soient-ils de l'idée d'origine que l'on s'en fait. Ce projet m'a également appris à travailler en groupe, ce qui est bien sûr une bonne expérience pour notre futur métier d'ingénieur.

Céline :

Le fait d'avoir étudié en priorité les réfrigérants et d'autres fluides, m'a permis d'une part de valider mon choix de département de l'année prochaine qui sera, je l'espère CFI. D'autre part les recherches apportées pour trouver un fluide qui calque bien avec notre cycle, m'ont aidées à mieux comprendre une partie de la thermodynamique avec un exemple plus concret. En ce qui concerne le sujet en général, il était pour moi très intéressant malgré quelques réticences envers le milieu de la mécanique. Il est vrai que cette étude m'a permis aussi de poser des sujets de



discussions avec mon entourage. En effet, j'ai deux professionnels en maintenance des véhicules particuliers dans ma famille, qui m'ont d'ailleurs bien aiguillé sur quelques problèmes rencontrés. Une chose est sûre je ne regarderai plus une voiture de la même façon.

Mise en perspective :

Au tout début de ce projet, nous savions ainsi que le professeur, M. Vuillamy, ne pensait absolument pas que ce processus était déjà en pleine expansion dans le monde automobile.

Ce n'est que plus tard dans l'avancée de notre projet que nous nous sommes rendus compte du sérieux de cette affaire et surtout de l'énorme implication de grands constructeurs tel que BMW pour mettre au point un système de ce type.

De plus, nous avons imaginé une machine, mais est-elle réellement viable ? En effet, nous n'avons fait qu'une étude théorique, nous n'avons pas pu faire le moindre test pratique.

Malgré tout, nous pouvons valider le réalisme de notre système car un article présentant un système similaire au notre est paru dans le *Science&Vie* de mai 2009.

Pour résumer l'étude de l'article, cette machine est expérimentée par BMW.

Les données du fluide chaud et froid sont très proches de nos estimations :

Dans l'article :

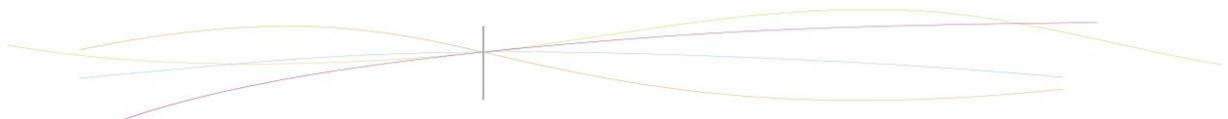
Tf = 50°C Tc = 200°C

Dans notre étude :

Tf = 50-60°C Tc = 250-300°C

Concernant les pressions, nous annonçons une gamme de pression comprise entre 1 et 20 bars. Le modèle de BMW lui, varie entre 4 et 80 bars. Nous fonctionnons bien dans le même rapport de pressions en entrée-sortie.

Et enfin, nous avons calculé un rendement d'environ 35%. Chiffre confirmé par l'étude si l'économie est maximale et idéale (c'est-à-dire en régime sur autoroute et sans pertes). Dans la majorité des cas, le rendement de récupération avoisine les 15-20%.



5. BIBLIOGRAPHIE

Pour le moteur à piston rotatif Wankel :

« Techniques de l'ingénieur, machines hydrauliques et thermiques. » Volume b14.

Lien internet :

http://www.mecamotors.com/a_mecanique/01_moteur/02_moteur_4_temps/029_rotatif/wankel01.html (*schéma descriptif du moteur Wankel*)

Pour les turbines centrifètes

Lien internet : http://web.univ-ubs.fr/limatb/EG2M/Disc_Seminaire/Nancy2001/articles/a394.pdf (*schéma descriptif de la turbine centrifète*)

Lien internet : <http://www.turbobygarrett.com/turbobygarrett/products/catalog.html> (*graphique des rapports de pression en fonction du débit massique des gaz utilisé par Garrett*)

Lien internet : http://82.234.166.107/site-ford-rs/Documentations/Doc_turbo/turbo.pdf (*graphique des valeurs de Gamma en fonction du rapport air/combustible et de la température des gaz d'échappement*)

Pour les turbines Scroll :

Lien internet : http://www.eneftech.com/projets_cours

Lien internet : <http://www.eneftech.com/technologies#scroll>

Informations relatives au cycle de Rankine :

Support de la présentation de Nicolas Espinosa du 26 mai 2010 concernant le cycle de Rankine utilisé afin de récupérer l'énergie thermique des gaz d'échappement des camions.

Lien internet : <http://physiquecira.free.fr/CoursPhys/InstallVapeur/>

« Thermodynamique, bases et applications », par Jean-Noël Foussard & Edmond Julien, ed. Dunod, 2005.

Echangeurs :

Lien internet : <http://www.apexclim.com/climatiseurs/echangeur-air-eau-montage-vertical-5.html> (valide à la date du 12/06/2010)

Lien internet : <http://www.olaer.fr/climatiseurs-air-eau.php> (valide à la date du 12/06/2010)

Lien internet : http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89changeur_de_chaleur (valide à la date du 11/06/2010)

Moteur à gaz :

Lien internet : <http://www.masc.ulg.ac.be/fiches/FR/moteurstirling.pdf>

Lien internet : <http://cm1cm2.ceyreste.free.fr/stirling.html>

Lien internet : http://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_Stirling

Lien internet : <http://www.moteurstirling.com/comment.php> Principes et théorie.

Lien internet : <http://www.pile-au-methanol.com/Systemes-alternatifs.htm>

Lien internet : <http://pagesperso-orange.fr/f4dxu/htaccs/Documents/moteur-stirling.pdf>

Fluide :

Wikipedia

INCONNU. *Fluide frigorigène.* http://fr.wikipedia.org/wiki/Fluide_frigorig%C3%A8ne. (valide à la date du 25 avril 2010).

Wikipedia

INCONNU. *Liste des réfrigérants.*

http://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_de_r%C3%A9frig%C3%A9rants

(valide à la date du 25 avril 2010).

HFO-1234yf :

Site sur l'innovation :

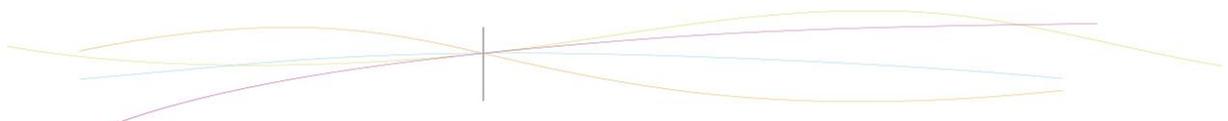
JEAN-FRANÇOIS PREVERAUD. *Un fluide frigorigène moins agressif pour l'environnement.*

<http://www.industrie.com/it/environnement/un-fluide-frigorigene-moins-agressif-pour-l-environnement.7553>, (valide le 3 Juin 2010).

Site commercial :

DUPONT. *Le fluide frigorigène HFO-1234yf offre le plus grand potentiel pour répondre aux besoins des consommateurs et environnementaux.*

<http://www.productivity.be/fr/article.php?art=399>, (valide le 4 Juin 2010).



HFC-245fa :

Document en ligne :

Un groupe d'Américains. *AN OVERVIEW OF THE PROPERTIES AND APPLICATIONS OF HFC-245fa*. AN OVERVIEW OF THE PROPERTIES AND APPLICATIONS OF HFC-245fa, (valide le 4 Juin 2010).

EAU :

Wikipedia

INCONNU. *Molécule d'eau*. http://fr.wikipedia.org/wiki/Mol%C3%A9cule_d%27eau, (valide le 12 avril 2010).

Cycle frigorifère :

INCONNU. *Etude d'un cycle frigorifique avec compresseur*.

<http://www.docstoc.com/docs/20472340/Etude-dun-cycle-frigorifique-avec-compresseur>, (valide le 25 Mars 2010).

Wikipedia :

INCONNU. *Réfrigérateur*. <http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9frig%C3%A9rateur>, (valide le 25 Mars 2010).

Article divers sur la recherche sur la récupération de l'énergie des gaz d'échappement :

Site sciences et vie :

DENIS DELBECQ. *Des gaz d'échappement électriques*. <http://mondedurable.science-et-vie.com/2008/07/des-gaz-dechappement-electriques/>, (valide le 26 Mars 2010).

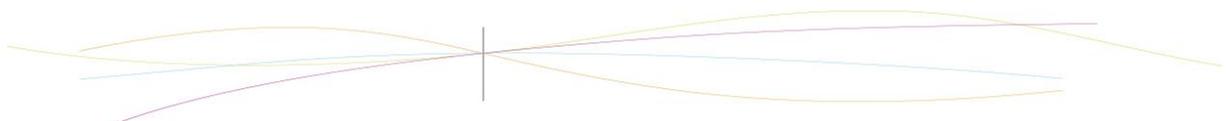
Site du ministère des affaires étrangères :

NADIA HESHMATI. *De l'énergie électrique à partir de la chaleur d'échappement*.

<http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/56941.htm>, (valide le 25 Mars 2010).

Site scientifique et technologique :

MATHIEU DAOUDI. *Récupération de gaz d'échappement pour la production d'électricité, 09-11-05*. <http://www.ambafrance-uk.org/Recuperation-de-gaz-d-echappement.html>, (valide le 27 Mars 2010)



6. ANNEXE

6.1. Liste des réfrigérants