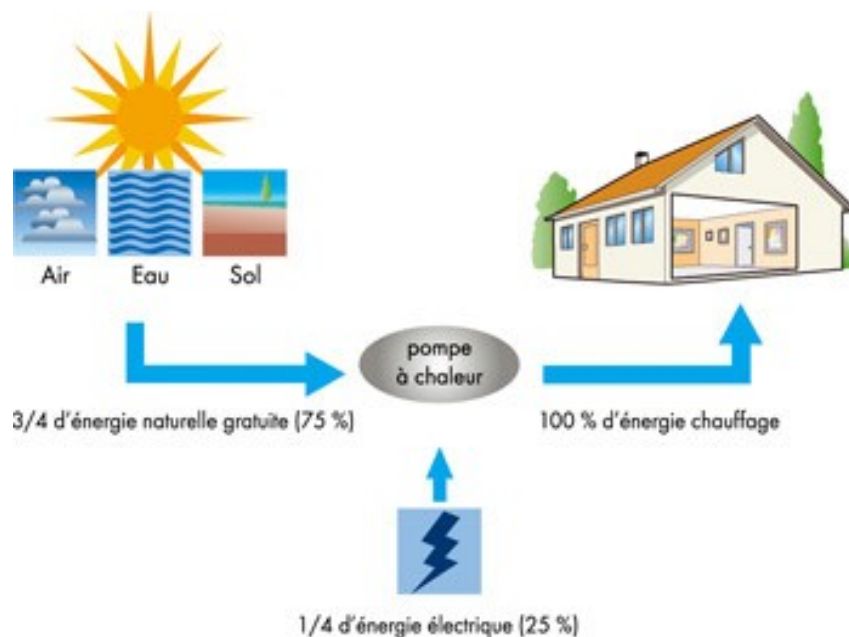


*Projet de Physique P6  
STPI/P6/2016 - 10*

*Etudes des cycles thermodynamiques (Turbine à gaz,  
Brayton, etc.) sous EES*



**Etudiants :**

**Guillaume SCOTTO D'APOLLONIA**

**Nathan LACOUTURE**

**Alexandre PERRET**

**Yuge SUN**

**Yann COUSIN D'ARQUE**

---

**Enseignant-responsable du projet :**

**Antoine VERDIER**

*Cette page est laissée intentionnellement vierge.*

---

Date de remise du rapport : 13/06/2016

Référence du projet : **STPI/P6/2016 – 10**

Intitulé du projet : **Etudes des cycles thermodynamiques (Turbine à gaz, Brayton, etc.) sous EES**

Type de projet : **Simulation**

Objectifs du projet (10 lignes maxi) :

**Le premier objectif de notre projet, via la manipulation du logiciel EES, était de modéliser des cycles théoriques et de les optimiser afin qu'ils traduisent au mieux la réalité. L'écologie étant une préoccupation majeure contemporaine, nous avons choisi de représenter un cycle de pompe à chaleur ayant une efficacité maximale.**

**Le deuxième objectif de notre projet, via la manipulation du logiciel CODYBA, était d'effectuer une étude thermique d'un bâtiment afin de se représenter l'impact que différents paramètres thermodynamiques, économiques et écologiques (isolation, météo, coût...) sur le rendement énergétique de la structure en question.**

Mots-clefs du projet (4 maxi) : **Thermique, isolation, rendement, écologie**

## TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction.....	6
2. Méthodologie / Organisation du travail.....	7
3. Travail réalisé et résultats.....	8
3.1. Etude d'un cycle thermodynamique sous EES.....	8
3.1.1. Présentation du logiciel EES.....	8
3.1.2. Exploitation du logiciel : modélisation d'un cycle de pompe à chaleur.....	9
3.1.3. Analyse critique de notre travail.....	13
3.2. Étude thermique d'un bâtiment sous Codyba.....	14
3.2.1. La Règlementation Thermique (RT) 2012.....	14
3.2.2. Étude du type d'isolation à adopter au cours de nos analyses.....	15
3.2.3. Présentation du logiciel Codyba.....	18
3.2.4. Étude de cas.....	19
3.2.5. Analyse critique de notre travail.....	21
4. Conclusions et perspectives.....	22
5. Bibliographie.....	23
6. Annexe.....	24
6.1. Rappels sur la Thermodynamique.....	24

## NOTATIONS, ACRONYMES

EES (Engineering Equation Solver) : logiciel de calcul appliqués à a physique

CODYBA (Comportement Dynamique des Batiments) : logiciel de modélisation et d'étude de bâtiments.

## 1. INTRODUCTION

Un cycle thermodynamique est une suite de transformations où le système thermodynamique part d'un état donné et revient à son état initial à la fin du cycle. On peut alors recommencer le même cycle. Les machines thermodynamiques utilisent des cycles.

Au cours du cycle, le système voit sa température, sa pression ou d'autres paramètres d'état varier, tandis qu'il échange du travail et de la chaleur avec l'extérieur. Les cycles se font en général en 4 étapes.

Les cycles les plus connus sont :

- le cycle de Carnot ( cycle idéal ) qui offre le rendement maximal
- le cycle de Beau de Rochas (ou Otto) qui est utilisé par le moteur à essence
- le cycle de Diesel
- le cycle de Stirling
- le cycle de Brayton ( ou cycle de Joule ) qui est utilisé par les turbines à gaz

Les cycles susnommés sont des cycles théoriques. Dans les machines réelles, ces cycles sont déformés, ce qui a pour conséquence un moins bon rendement.

Obtenir le meilleur rendement possible a toujours été l'objectif principal de la thermodynamique, on veut les meilleures performances en réduisant le plus possible le coût.

Les cycles peuvent être moteurs ou récepteurs.

Un cycle est dit moteur lorsqu'il utilise de la chaleur pour produire du travail. Typiquement, le moteur d'une voiture fonctionne grâce à la chaleur produite par l'échauffement d'un combustible qui est convertie en travail par le système piston-bielle-vilebrequin, ce travail permet donc aux roues de tourner et donc à la voiture d'avancer. Représenté dans un diagramme de Clapeyron, un cycle moteur est parcouru en sens horaire.

Un cycle est dit récepteur lorsqu'il utilise du travail pour refroidir la source froide ou chauffer la source chaude, cela dépend de ce qui nous intéresse. On parle de machine frigorifique ou de pompe à chaleur. Représenté dans un diagramme de Clapeyron, un cycle récepteur est parcouru en sens trigonométrique.

Le premier objectif de notre projet, via la manipulation du logiciel EES, était de modéliser des cycles théoriques et de les optimiser afin qu'ils traduisent au mieux la réalité. L'écologie étant une préoccupation majeure contemporaine, nous avons choisi de représenter un cycle de pompe à chaleur ayant une efficacité maximale.

Le deuxième objectif de notre projet, via la manipulation du logiciel CODYBA, était d'effectuer une étude thermique d'un bâtiment afin de se représenter l'impact que différents paramètres thermodynamiques, économiques et écologiques (isolation, météo, coût...) sur le rendement énergétique de la structure en question.

## 2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Ce projet s'est déroulé dans la cadre scolaire, chaque semaine nous avons une séance d'une heure et demi sous la tutelle de M. Antoine VERDIER durant laquelle nous faisons le point avec lui sur l'état de notre avancement, et réfléchissons aux problèmes que nous avons pu rencontrer.

Lors de la première séance, M. VERDIER nous a proposé ses idées de pistes pour traiter le sujet du projet, et nous les avons trouvées très pertinentes. Notre projet a alors été séparé en deux grandes lignes : L'étude de cycles thermodynamiques sous le logiciel EES et l'étude de l'efficacité thermique d'un bâtiment sous le logiciel Codyba.

Nous avons donc séparé le groupe en deux sous-groupes, chacune responsable d'une de ces études, en fonction des préférences de chacun afin que le travail soit le plus agréable possible. Nous avons dans un premier temps établi un calendrier global, mais nous nous sommes vite rendu compte que nos emplois du temps respectifs ne nous permettaient pas toujours de le respecter et nous avons alors décidé de nous organiser de manière plus personnelle, ce qui a très bien fonctionné.

En ce qui concerne donc la répartition du travail, Nathan et Yuge se sont chargés de la partie effectuée sur le logiciel EES, Guillaume et Alexandre se sont eux occupés de l'étude sur le logiciel Codyba, aidé par Yann qui a lui également pris en charge la présentation pour la soutenance.

### 3. TRAVAIL RÉALISÉ ET RÉSULTATS

#### 3.1. Etude d'un cycle thermodynamique sous EES

##### 3.1.1. *Présentation du logiciel EES*

EES (prononcé ISE) est l'abréviation de Engineering Equation Solver ou Solveur d'équations pour l'ingénierie. EES permet de résoudre des systèmes d'équations algébriques, des équations différentielles, des équations à variables complexes.

EES permet également d'optimiser les paramètres de modélisation d'un système, de calculer des régressions linéaires et non linéaires, de générer des courbes de grande qualité.

EES contient une vaste bibliothèque de fonctions mathématiques et thermodynamiques. Néanmoins, il est impossible de prévoir l'ensemble des besoins des utilisateurs. De fait, EES offre à l'utilisateur la possibilité d'entrer ses propres fonctions suivant trois méthodes :

1. Il est possible de saisir et d'interpoler des données numériques dans une table, pour ensuite les utiliser directement dans la résolution de système des équations.

2. EES comporte son propre langage de programmation. Il s'apparente au PASCAL et FORTRAN. Il permet à l'utilisateur de développer et sauvegarder dans des fichiers de librairie ses propres fonctions et procédures. Ces fichiers seront lus à chaque ouverture du logiciel et ainsi utilisables dans chaque session.

3. Enfin, les fonctions et les procédures compilées, écrites dans un langage de haut niveau tel le PASCAL, le C ou le FORTRAN, pourront être utilisées dans EES par le biais de bibliothèques dynamiques (DLL).

Il est ainsi possible d'étendre les capacités du logiciel.

EES est particulièrement utile pour les problèmes de conception dans lequel les effets d'un ou de plusieurs paramètre(s) ont besoin d'être déterminés. Le programme offre cette possibilité avec sa Table Paramétrique, similaire à une feuille de tableur.

L'utilisateur identifie les variables indépendantes en entrant leurs valeurs dans les cellules de table. EES calculera les valeurs des variables dépendantes dans la table. Le rapport des variables dans la table peut être visualisé sous forme de courbes, de diagrammes.



### 3.1.2. Exploitation du logiciel : modélisation d'un cycle de pompe à chaleur

Étant particulièrement sensibles aux problèmes écologiques, nous avons pris la décision de modéliser une pompe à chaleur plutôt qu'un moteur d'avion par exemple. C'est donc pour cela que par la suite nous avons choisi de vous parler de thermique du bâtiment.

Le cycle est composé de 4 transformations :

1 → 2 : compression isentropique jusqu'à la pression  $P_2=2\text{Mpa}$

2 → 3 : condensation isobare jusqu'à être un liquide saturant

3 → 4 : détente isenthalpique

4 → 1 : échauffement isobare jusqu'à être une vapeur saturante

Par conséquent on en déduit :

$$s_1 = s_2$$

$$P_2 = P_3$$

$$x_3 = 0$$

$$h_3 = h_4$$

$$P_4 = P_1$$

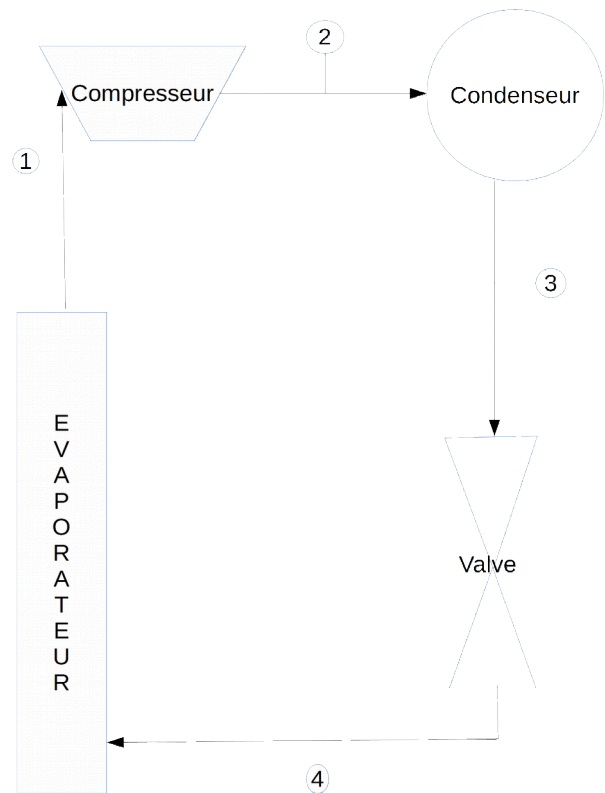
$$x_1 = 0$$

$$W_{12} = h_2 - h_1$$

$$Q_c = Q_{23} = h_3 - h_2$$

$$Q_{41} = h_1 - h_4$$

$$\eta = |Q_c/W| = -Q_c/W$$



Nous avons d'abord modéliser ce problème avec du R410A, soit le fluide frigorigène le plus employé.

"R410A"

"Point 1"

T[1]=Tinit  
x[1]=1  
P[1]=Pressure(R410A;T=T[1];x=x[1])  
s[1]=Entropy(R410A;T=T[1];x=x[1])  
h[1]=Enthalpy(R410A;T=T[1];x=x[1])

"Point 2"

P[2]=2  
s[2]=s[1]  
h[2]=Enthalpy(R410A;s=s[2];P=P[2])

"Point 3"

P[3]=P[2]  
x[3]=0  
h[3]=Enthalpy(R410A;x=x[3];P=P[3])

"Point 4"

h[3]=h[4]  
P[4]=P[1]

Q[12]=0

W[12]=h[2]-h[1]

Q[23]=h[3]-h[2]

W[23]=0

Q[34]=0

W[34]=0

Q[41]=h[1]-h[4]

W[41]=0

eta[0]=-Q[23]/W[12]

Nous avons d'abord modélisé ce problème avec une température initiale égale à -30°C et nous avons obtenu une efficacité de 3,7, ce qui est un très bon rapport. Cependant ceci est à relativiser car notre cycle est théorique.

Puis nous avons pris l'initiative de créer une table paramétrique pour étudier l'incidence de la température initiale

sur le rendement final. Encore une fois le caractère plausible de cette modalisation reste à prouver car il est sûrement plus difficile de condenser fluide initialement plus chaud.

Nous avons compris cet aspect lorsque nous avons paramétré notre table de -50 à 100°C et au dessus d'un certain nombre le logiciel nous indiquait que nous n'avions ni un gaz ni un liquide (en somme un fluide supercritique). Nous avons donc paramétré ainsi :

	1 Tinit	2 $\eta_0$
Run 1	-50	2,708
Run 2	-40	3,147
Run 3	-30	3,736
Run 4	-20	4,561
Run 5	-10	5,79
Run 6	0	7,799
Run 7	10	11,64
Run 8	20	21,77
Run 9	30	118,8

On voit bien qu'au dessus de -10°C nos valeurs de rendement deviennent aberrantes.

Comme vous pouvez le constater le codage sous EES est quelque peu rébarbatif, il faut bien renseigner chaque donnée sous peine d'avoir pour avertissement qu'il y a moins de variables que d'équations, ce qui a pour conséquence un problème insoluble.

Enfin, nous avons voulu savoir quel fluide frigorigène nous permettait d'avoir le meilleur rendement. Nous avons choisi en plus du R410A l'ammoniac (interdit désormais car nocif pour l'homme), le R22 (interdit aujourd'hui car détruit la couche d'ozone), le R407C et l'eau.

"Ammonia"

"Point1"

$P1[1]=\text{Pressure}(\text{Ammonia};T=T[1];x=x[1])$   
 $s1[1]=\text{Entropy}(\text{Ammonia};T=T[1];x=x[1])$   
 $h1[1]=\text{Enthalpy}(\text{Ammonia};T=T[1];x=x[1])$

"Point 2"

$s1[2]=s1[1]$   
 $h1[2]=\text{Enthalpy}(\text{Ammonia};s=s1[2];P=P[2])$

"Point 3"

$P1[3]=P[2]$   
 $h1[3]=\text{Enthalpy}(\text{Ammonia};x=x[3];P=P1[3])$

"Point 4"

$h1[3]=h1[4]$   
 $P1[4]=P1[1]$

$W1[12]=h1[2]-h1[1]$   
 $Q1[23]=h1[3]-h1[2]$

$\text{eta}[1]=-Q1[23]/W1[12]$

"R22"

"Point1"

$P2[1]=\text{Pressure}(\text{R22};T=T[1];x=x[1])$   
 $s2[1]=\text{Entropy}(\text{R22};T=T[1];x=x[1])$   
 $h2[1]=\text{Enthalpy}(\text{R22};T=T[1];x=x[1])$

"Point 2"

$s2[2]=s2[1]$   
 $h2[2]=\text{Enthalpy}(\text{R22};s=s2[2];P=P[2])$

"Point 3"

$P2[3]=P[2]$   
 $h2[3]=\text{Enthalpy}(\text{R22};x=x[3];P=P2[3])$

"Point 4"

$h2[3]=h2[4]$   
 $P2[4]=P2[1]$

$W2[12]=h2[2]-h2[1]$   
 $Q2[23]=h2[3]-h2[2]$

$\text{eta}[2]=-Q2[23]/W2[12]$

"R407C"

"Point1"

$P3[1]=\text{Pressure}(\text{R407C};T=T[1];x=x[1])$   
 $s3[1]=\text{Entropy}(\text{R407C};T=T[1];x=x[1])$   
 $h3[1]=\text{Enthalpy}(\text{R407C};T=T[1];x=x[1])$

"Point 2"

$s3[2]=s3[1]$   
 $h3[2]=\text{Enthalpy}(\text{R407C};s=s3[2];P=P[2])$

"Point 3"

$P3[3]=P[2]$   
 $h3[3]=\text{Enthalpy}(\text{R407C};x=x[3];P=P3[3])$

"Point 4"

$h3[3]=h3[4]$   
 $P3[4]=P3[1]$

$W3[12]=h3[2]-h3[1]$   
 $Q3[23]=h3[3]-h3[2]$

$\text{eta}[3]=-Q3[23]/W3[12]$

"eau"

"Point1"

$P4[1]=\text{Pressure}(\text{water};T=T[1];x=x[1])$   
 $s4[1]=\text{Entropy}(\text{water};T=T[1];x=x[1])$   
 $h4[1]=\text{Enthalpy}(\text{water};T=T[1];x=x[1])$

"Point 2"

$s4[2]=s4[1]$   
 $h4[2]=\text{Enthalpy}(\text{water};s=s4[2];P=P[2])$

"Point 3"

$P4[3]=P[2]$   
 $h4[3]=\text{Enthalpy}(\text{water};x=x[3];P=P4[3])$

"Point 4"

$h4[3]=h4[4]$   
 $P4[4]=P4[1]$

$W4[12]=h4[2]-h4[1]$   
 $Q4[23]=h4[3]-h4[2]$

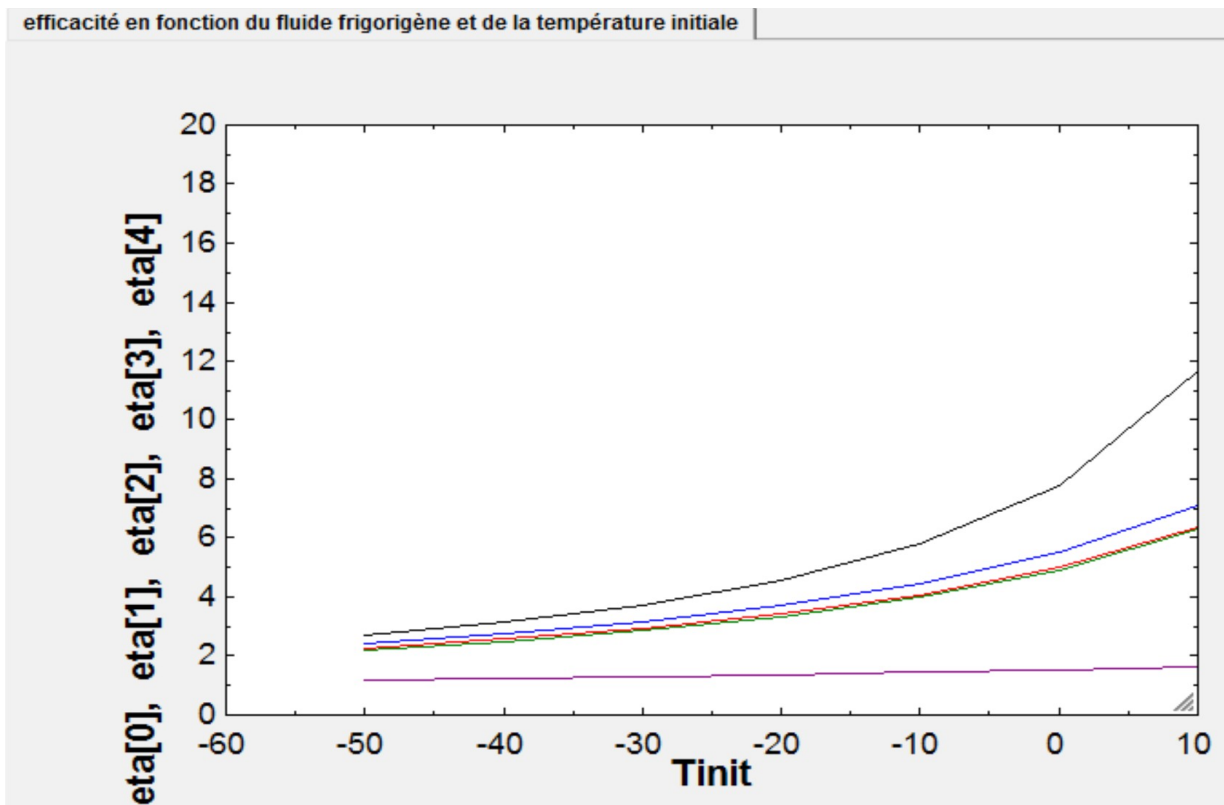
$\text{eta}[4]=-Q4[23]/W4[12]$

Comme vous pouvez le voir nous avons dû écrire un programme redondant car il était impossible de rentrer une variable qui pourrait avoir pour valeur un nom de fluide dans l'appel des fonctions thermodynamiques.

Suite à cela nous avons donc recréé une table paramétrique :

1.9	1 Tinit	2 $\eta_0$	3 $\eta_1$	4 $\eta_2$	5 $\eta_3$	6 $\eta_4$
Run 1	-50	2,708	2,42	2,281	2,186	1,2
Run 2	-40	3,147	2,751	2,575	2,476	1,248
Run 3	-30	3,736	3,17	2,947	2,846	1,304
Run 4	-20	4,561	3,717	3,431	3,33	1,37
Run 5	-10	5,79	4,455	4,082	3,985	1,449
Run 6	0	7,799	5,501	4,997	4,912	1,542
Run 7	10	11,64	7,089	6,369	6,315	1,636
Run 8	20	21,77	9,775	8,637	8,665	1,742
Run 9	30	118,8	15,26	13,07	13,37	1,863

On a donc tracé un graphique :



On observe que le R410A est plus performant que les autres fluides. La présence de l'eau est anecdotique puisqu'elle sous sa forme solide jusqu'à 0°C.

Sur une autre plage de donnée on observe ces rendements pour l'eau :

Table 1	Table 2	
1..10	$\eta_4$	Tinit
Run 1	1,636	10
Run 2	1,742	20
Run 3	1,863	30
Run 4	2,001	40
Run 5	2,159	50
Run 6	2,339	60
Run 7	2,548	70

Nous obtenons immédiatement des efficacités plus crédibles.

Nous nous sommes intéressés à l'eau car il existe des pompes à chaleur géothermiques qui exploitent une énergie renouvelable, à savoir l'eau contenue dans les nappes phréatiques qui a chaleur de la croûte terrestre. Celles-ci servent généralement à chauffer le plancher.

### 3.1.3. Analyse critique de notre travail

La première difficulté fut d'abord d'envisager le cycle que nous allons représenter. Nous avons d'abord songé à modéliser un cycle de Stirling récepteur mais son application semblait trop éloignée de l'objectif premier que nous avons pour notre machine thermique, à savoir chauffer une maison. En effet nous nous doutions qu'aucune maison n'était chauffée par une pompe à chaleur fonctionnant d'après un cycle de Stirling récepteur.

Nous avons donc sélectionné un cycle frigorifique présenté dans le cours de thermodynamique du troisième semestre et nous avons juste calculé un rendement différent puisque l'énergie utile devenait l'énergie cédée à la source chaude et non l'énergie prélevée à la source froide comme présenté dans l'exercice.

Ensuite, la principale difficulté fut de comprendre les instructions qu'attendait le logiciel. Au début naturellement nous rentrions des formules telles que  $dh=VdP$  pour la première transformation ( $s_1=s_2$ ) mais on se retrouvait vite avec plus d'inconnues que d'équations. On a fini par comprendre que le logiciel servait à faire les calculs à notre place et que nous devons juste le guider.

Tout ce retard pris a fait que notre contenu n'est pas considérable mais nous pensons que notre travail reste intéressant et pertinent en dépit d'un certain nombre d'incohérences physiques que nous avons su cependant mettre en évidence.

## 3.2. Étude thermique d'un bâtiment sous Codyba

### 3.2.1. La Règlementation Thermique (RT) 2012

A l'issue des tables rondes du Grenelle de l'environnement 2007, la mutation écologique de la France a été annoncée. Les lois Grenelle I et II ont été votées, et se traduisent notamment par l'élaboration des principes de la RT 2012.

**But :** Cet ensemble de règles a pour but de réduire la consommation des bâtiments neufs à 50 kWhep/(m<sup>2</sup>.an).

**Application :** L'application des règles de la RT 2012 débute a débuté dès octobre 2011 pour certains bâtiments neufs du secteur tertiaire (bureaux, bâtiment d'enseignement...), et en janvier 2013 pour les habitations et les autres bâtiments du secteur tertiaire.

#### Trois exigences fondamentales :

- Le Bbio (le Besoin Bioclimatique) : optimisation du chauffage, de la climatisation et de l'éclairage (ex : favoriser l'apport solaire en hiver, s'en protéger l'été ; privilégier un éclairage naturel; limiter les pertes thermiques à l'aide d'une bonne isolation) ;
- Le Cep (le coefficient de **C**onsumation conventionnelle d'**é**nergie **p**rimaire) : il porte sur la consommation annuelle concernant le chauffage, la climatisation, eau chaude sanitaire, l'éclairage et auxiliaires comme les pompes et ventilateurs ;
- Le Tic (Température intérieure conventionnelle) : limiter la température intérieure lors de grosses chaleurs pour éviter les surchauffes et sans avoir besoin de climatiser.

Afin de respecter la RT 2012 ces 3 coefficients (Bbio, Cep, Tic) doivent être inférieurs à des valeurs maximales qui varient en fonction de la position géographique, de la surface et des économies de gaz à effet de serre.

La RT 2012 impose le recours à une source d'énergie renouvelable :

- capteurs solaires thermiques (production eau chaude)
- panneaux photovoltaïques (production d'électricité)
- chaudières ou poêles à bois (chauffage intérieur)
- le raccordement à un réseau de chaleur alimenté à plus de 50% par des énergies renouvelables.

**Objectifs futurs :** Dans le futur, (RT 2020), l'objectif sera de construire des bâtiments à énergie positive, cet à dire qui produisent plus d'énergie qu'ils n'en consomment. Les murs, toits, voire fenêtres pourront être mis à profit dans l'accumulation et la restitution de la chaleur ou dans la production d'électricité. L'excédent en énergie se fera grâce à des principes bioclimatiques et constructifs mais aussi par le comportement des usagers qui vont limiter leur consommation.



### 3.2.2. Étude du type d'isolation à adopter au cours de nos analyses

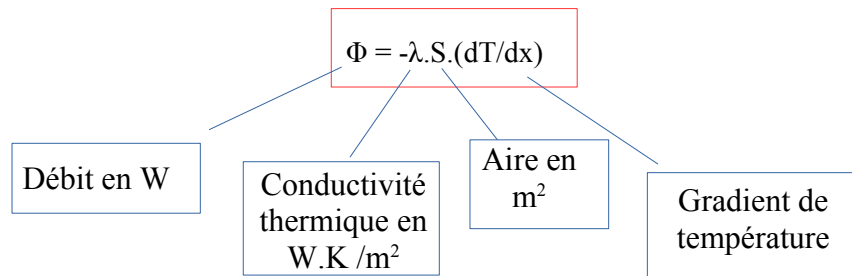
Tout d'abord nous allons nous intéresser à la méthode d'isolation thermique.

Est-il préférable, d'un point de vue thermique, d'isoler une maison de l'intérieur ou de l'extérieur ?

Cette question préalable nous semble pertinente, pour ainsi pouvoir réaliser au mieux nos expériences sur le logiciel Codyba et obtenir un rendu réaliste.

Il faut savoir que le ressenti de la chaleur dans une pièce n'est pas dû par la température ambiante, mais par la température des parois.

Notre but sera donc de calculer la température intérieure d'une paroi. Pour cela nous nous servirons de la loi de Fourier qui permet de calculer un débit de chaleur pour tout plan d'aire  $S$  traversé par la chaleur.



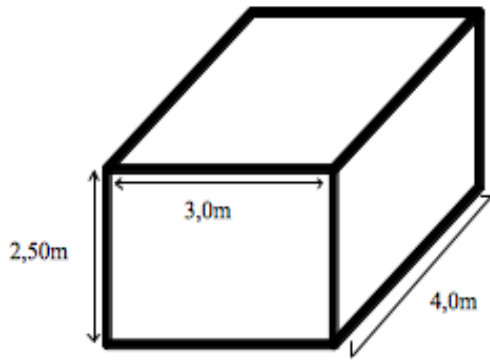
En intégrant cette formule pour un mur de surface plane, et  $e$  étant l'épaisseur de la paroi, on obtient facilement :

$$\Phi = \lambda.S. \frac{(T_1 - T_2)}{e}$$

La conductivité thermique représente l'aptitude d'un corps à conduire la chaleur. Un bon isolant a donc une conductivité thermique faible.

Pour répondre à notre question nous allons dans un premier temps calculer la puissance de chauffage nécessaire pour maintenir la température d'une pièce constante puis dans un second temps calculer la température interne de la paroi. Prenons comme pièce un parallépipède rectangle de 2,5m de haut et de 4,0m sur 3,0m. On supposera que les pertes au sol sont négligeables et que toutes les parois sont identiques. Nous prendrons des parois composées de 35cm de pierre et 10cm de laine de verre. La température extérieure sera de 5°C et la température de la pièce à maintenir constante sera de 19°C.

**Données :**  $\lambda_{\text{pierre}} = 0,936 \text{ W.K/m}^2$  ,  $\lambda_{\text{laine de verre}} = 0,040 \text{ W.K/m}^2$



Surface de la paroi à  
considérer pour la suite :

$$S = (3 \times 4) + 2(4 \times 2,5) + 2(2,5 \times 3) = 47 \text{m}^2$$

1) Isolation à l'extérieur

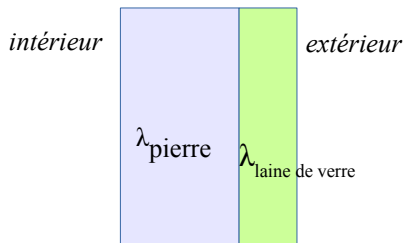


Schéma de la paroi

2) Isolation à l'intérieure

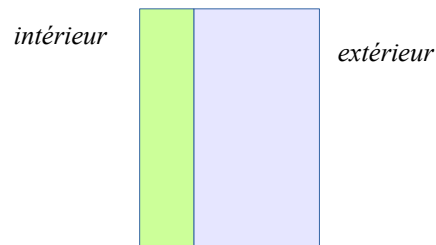
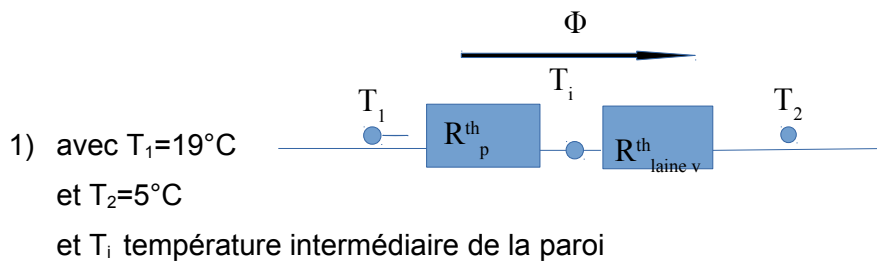


Schéma de la paroi

Nous allons faire une analogie électrique et considérer nos matériaux comme des résistances thermiques. Par convention on considère que le courant électrique va des hauts potentiels vers les bas potentiels. La différence de température provoque l'écoulement de la chaleur des hautes températures vers les basses températures. La résistance thermique joue donc le même rôle que la résistance électrique :

$$T_1 - T_2 = R_{th} \cdot \Phi$$



$$T_1 - T_i = R_p^{th} \cdot \Phi$$

$$T_i - T_2 = R_{laine v}^{th} \cdot \Phi \quad (1)$$

$$\Rightarrow T_1 - T_2 = (R_p^{th} + R_{laine v}^{th}) \cdot \Phi \Leftrightarrow \Phi = \frac{T_1 - T_2}{R_p^{th} + R_{laine v}^{th}} \quad (2)$$



Or d'après la relation de Fourier en mur plan :

$$\Phi = \lambda.S. \frac{(T_1 - T_2)}{e}, \text{ donc } R^{\text{th}} = \frac{e}{\lambda.S}$$

$$(2) \iff \Phi = \frac{T_1 - T_2}{\frac{e_p}{\lambda_p} + \frac{e_{\text{laine v}}}{\lambda_{\text{laine v}}}} . S$$

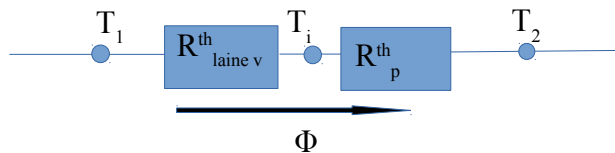
A.N :  $\Phi = 229\text{W}$

Après avoir calculé la puissance de chauffage nécessaire pour maintenir la température de la pièce constante nous n'avons plus qu'à trouver la température  $T_i$  qui représente la température de la paroi.

Reprenons (1) :  $T_i = R^{\text{th}}_{\text{laine v}} . \Phi + T_2 \iff T_i = \frac{e_{\text{laine v}}}{\lambda_{\text{laine v}} . S} \Phi + T_2$

A.N :  $T_i = 17^\circ\text{C}$

2)



$$T_1 - T_i = R_{\text{laine v}}^{\text{th}} . \Phi$$

$$T_i - T_2 = R_p^{\text{th}} . \Phi \quad (3)$$

→ La puissance de chauffage de change pas et nous retrouvons 229W

Reprenons (3) :  $T_i = R_p^{\text{th}} . \Phi + T_2 \iff T_i = \frac{e_p}{\lambda_p . S} \Phi + T_2$

A.N :  $T_i = 7^\circ\text{C}$

La température de la paroi lorsqu'on isole à l'extérieur est bien plus élevée que lorsqu'on isole à l'intérieur. L'isolation extérieure est donc plus efficace.

Cependant l'isolation extérieure présente plusieurs inconvénients. Le premier est qu'il faut une plus grande quantité d'isolant donc cela est plus onéreux. Le deuxième, étant le principale défaut, est que la laine de verre est un matériau poreux, son contact avec l'extérieur, donc les intempéries la détériore très rapidement, cela nécessite donc une protection supplémentaire.

Pour ces différentes raisons, la plupart des habitations sont isolées par l'intérieure. Pour la suite de notre étude nous avons donc choisi une isolation intérieure sur le logiciel Codyba pour être se rapprocher au mieux de la réalité.

### **3.2.3. Présentation du logiciel Codyba**

Codyba est un logiciel de simulation conçu afin de prévoir le COmportement DYnamique des BAtiments. Il permet d'analyser l'influence de paramètres comme le matériau isolant, les données météo ou encore l'orientation du bâtiments et des ouvertures (portes, fenêtres).

La principale issue de ces simulations est de prévoir la consommation énergétique du bâtiment étudié en prenant en compte l'évolution temporelle de la température, de l'humidité, et selon les systèmes de chauffage ou de régulation de température présents à l'intérieur.

Les paramètres d'entrée du logiciel comprennent la géométrie et la constitution de l'édifice, c'est à dire les volumes d'air, les parois et ouvertures, les différents matériaux utilisés avec leurs caractéristiques thermiques, les régulateurs de température et les charges internes qui comprennent les personnes présentes, les équipements et les éclairages.

En sortie, on obtient la température intérieure et extérieure du bâtiment, ainsi que la puissance sensible nécessaire pour ces atteindre ces températures.

Afin de simplifier notre utilisation du logiciel et de passer plus rapidement aux simulations et à l'analyse des résultats, nous avons décidé de construire un bâtiment comprenant un seul volume cubique séparé en deux pièces par une cloison.

#### **L'utilisation du logiciel peut être décomposée en 3 parties :**

##### **-La construction du bâtiment :**

Dans un premier temps, il faut créer le bâtiment sur lequel on souhaite effectuer des simulations. On construit d'abord les murs, le plancher et le plafond un à un en les orientant de manière à ce qu'ils forment un espace clos. On choisit le matériau de chacun des murs (ils sont déjà tabulés dans le logiciel avec la valeur de leur conductivité thermique), ainsi que son épaisseur et le matériau isolant que l'on souhaite y insérer (côté extérieur ou côté intérieur au choix).

Il faut ensuite créer les fenêtres on définissant leurs propriétés (épaisseur, matériaux, conductivité thermique), ainsi que leur position sur les murs.

Finalement, il faut choisir la météo du lieu dans lequel on souhaite positionner notre bâtiment. Pour cela, un fichier météo intégré au logiciel contient déjà les fichiers météos moyens sur une année de certaines grandes villes françaises au climat différent d'une ville à l'autre. Cela permet notamment à l'utilisateur de réfléchir aux régulateurs de température qu'il faudra disposer dans le bâtiment (un bâtiment situé dans le Nord de la France aura par exemple besoin de plus de chauffage et moins de climatisation qu'un bâtiment situé dans le Sud de la France).

**-La création des tables qui informent sur la puissance des appareils ou des personnes :**

Chaque pièce ou volume d'air peut contenir un nombre quelconque de régulateurs thermiques (climatisation ou chauffe) selon la volonté de l'utilisateur. Les régulateurs sont supposés avoir une efficacité parfaite. La puissance et l'activité de ces régulateurs doivent être réglés selon les besoins. C'est à dire que l'utilisateur définit la puissance voulue heure par heure sur une journée ou une semaine. C'est également lors de cette étape que l'on définit le nombre de personnes habitant le bâtiment ainsi que leur « emploi du temps » c'est à dire leurs horaires de présence. En effet chaque personne représente une puissance qui chauffe (à moindre mesure) son environnement et qui en peut pas être négligée.

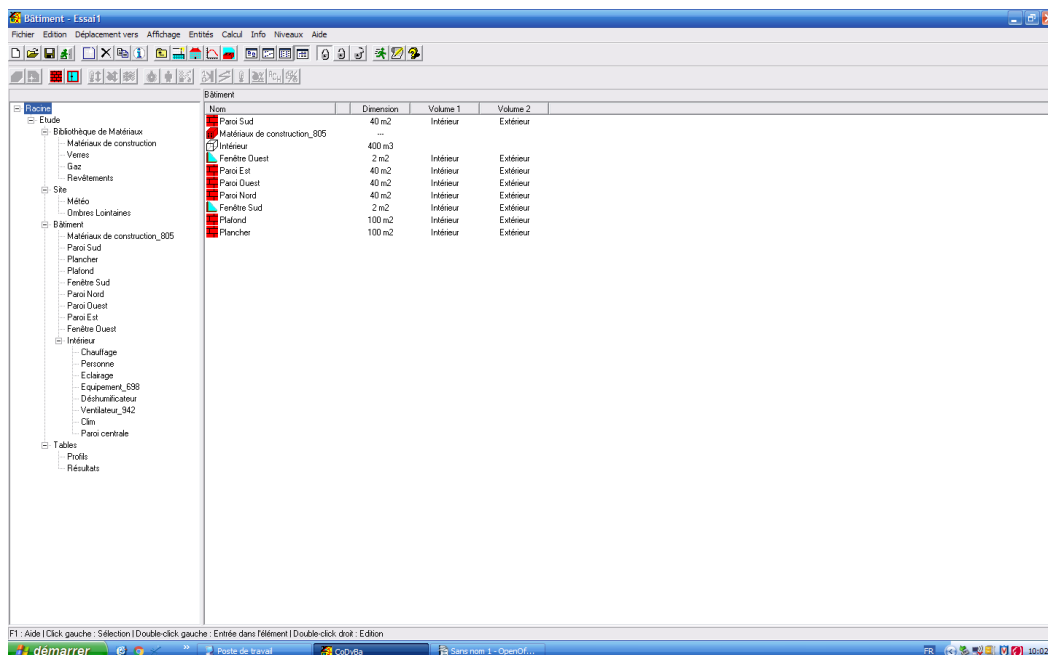
**-Le lancement de la simulation qui permettra d'exploiter les caractéristiques de la maison et d'apporter des modifications si nécessaire :**

En sortie, lorsque l'on lance la simulation, on obtient la température réelle intérieure ainsi que la puissance sensible du régulateur de température ou encore la puissance perdue au niveaux des ouvertures et des fenêtres. Cela permet à l'utilisateur de lancer un grand nombre de simulations en changeant à chaque fois des paramètres comme la nature des matériaux isolants ou des matériaux utilisés, la période de l'année, ou encore la localisation de la construction, et d'effectuer des comparaisons dans l'optique de trouver la configuration la moins coûteuse en énergie.

Ce logiciel est donc un réel atout pour l'étude d'un bâtiment avant sa construction, pour le rendre le plus efficace possible et le plus proche des attentes de la réglementation en vigueur, c'est à dire de la RT 2012 actuellement.

**3.2.4. Étude de cas**

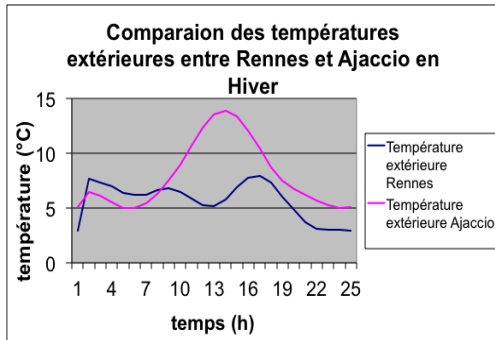
Nous avons donc réalisé un bâtiment simple, cubique, comportant une fenêtre orientée Sud et une orientée Ouest. L'interface principale se présente comme ci-dessous. On y trouve le détail de chaque paroi et volume, que l'on peut modifier à notre gré.



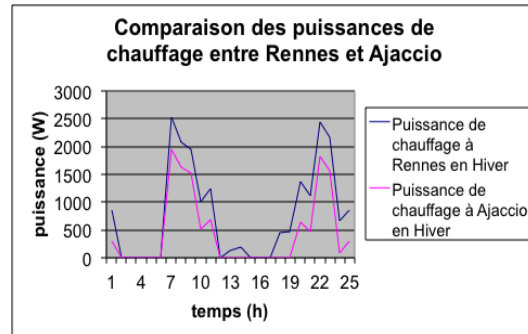
*Illustration 1: Interface de création du bâtiment*

Dans le cadre du projet, nous avons réalisé 3 simulations sur Codyba, en changeant les paramètres de localisation (et donc de température extérieure), de saison, et de matériaux (de l'isolant et des parois).

Notre première étude s'est portée sur la comparaison entre la température extérieure à Rennes et à Ajaccio en Hiver et la puissance de chauffage nécessaire pour maintenir la température souhaitée dans le bâtiment.

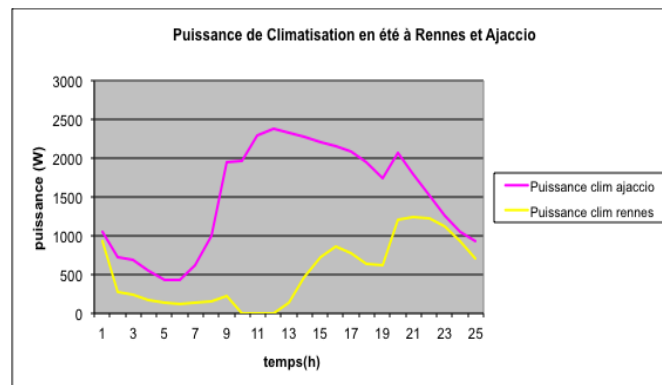


*Illustration 2: Comparaison des températures entre Rennes et Ajaccio en hiver*



*Illustration 3: Comparaison entre la puissance de chauffage nécessaire à Rennes et Ajaccio*

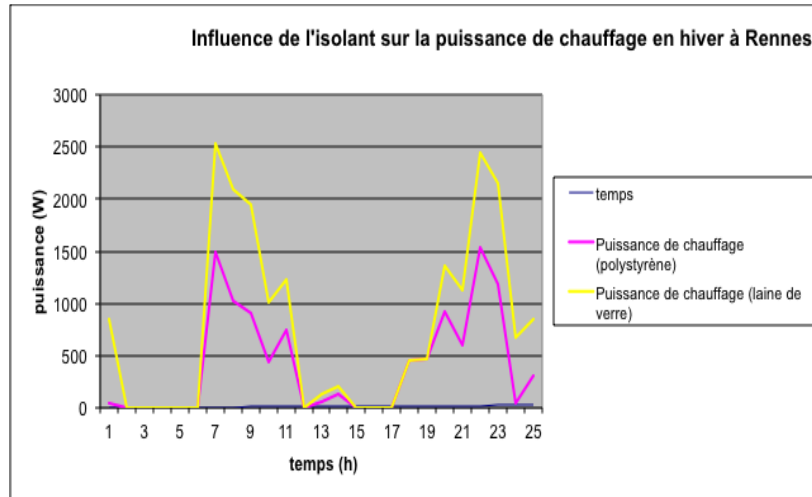
Suite à cette comparaison, nous pouvons clairement remarquer la relation entre température extérieure et puissance de chauffage nécessaire. À Ajaccio, du fait du climat plus méditerranéen que celui de Rennes, le bâtiment sera moins gourmand en énergie de chauffage en hiver. Mais cette différence de consommation en hiver s'inverse en été lorsqu'il faut climatiser de manière bien plus importante à Ajaccio, comme nous pouvons le voir sur le graphique comparatif ci-dessous.



*Illustration 4: Comparaison de la puissance de climatisation nécessaire entre Rennes et Ajaccio*

Dans un second temps nous avons souhaité étudier l'impact du choix de l'isolant sur la puissance de chauffage nécessaire, en se plaçant à Rennes, en hiver. Pour notre comparaison nous avons choisi comme isolant la laine de verre et le polystyrène.

Selon la RT 2012, il faut opter pour une bonne performance thermique de l'enveloppe du bâtiment et choisir des valeurs minimales de performance, à savoir une résistance de 4 m<sup>2</sup>.K/W pour les murs en façade. Notre choix de ces deux matériaux isolants est donc judicieux, la laine de verre ayant une résistance environ égale à 5 m<sup>2</sup>.K/W et le polystyrène environ 7 m<sup>2</sup>.K/W.



*Illustration 5: Influence de l'isolation sur la puissance de chauffage*

Sur ce graphique, on remarque bien le lien entre puissance de chauffage nécessaire et matériau isolant. De manière intuitive, on pourrait penser que même si cela peut parfois coûter plus cher à l'achat, sur le long terme il vaut mieux se munir d'un meilleur isolant qui mènera à une consommation énergétique du bâtiment bien moindre. Mais ce n'est pas le seul critère à prendre en compte, le polystyrène est par exemple un très mauvais isolant phonique comparé à la laine de verre.

### 3.2.5. Analyse critique de notre travail

Nous ne connaissions pas le logiciel Codyba au début du projet, c'est pourquoi nous avons mis du temps à plus ou moins le maîtriser, et que certaines fonctionnalités nous échappent encore. C'est pour cela que notre bâtiment est très simpliste et loin de la réalité. Il y a également plusieurs résultats que nous n'avons pas réussi pas à analyser telles que les pertes au niveau des fenêtres que nous aurions aimé pouvoir étudier. Nous n'avons pas non plus réussi à bien modéliser le toit, bien que dans la pratique, la majorité des déperditions de chaleur se font à ce niveau.

Avec plus de temps et de maîtrise nous aurions donc pu nous orienter vers a construction et l'étude de bâtiments plus évolués architecturalement et énergétiquement. Nous aurions effectivement pu exploiter la piste des habitations passives c'est à dire qui s'auto-suffisent en énergie.

Mais de manière globale, nous sommes satisfait de notre travail et de nos études car nous avons pu en quelques mois obtenir des résultats et valeurs cohérents à l'aide d'un logiciel qui nous était complètement inconnu.

#### 4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Durant notre projet nous avons modélisé des cycles de pompes à chaleur fonctionnant avec différents fluides afin d'étudier les plus efficaces. En effet, les pompes à chaleur avec le meilleur rendement possible sont très intéressantes pour le chauffage d'un bâtiment. Cependant, pour qu'une pompe à chaleur soit efficace il faut également que le bâtiment en question soit bien isolé.

L'étude thermique sur le logiciel CoDyBa nous a donc permis de tester les différents facteurs ayant un impact sur la consommation d'énergie d'un bâtiment, notamment les matériaux d'isolation qui tendent à être de plus en plus performant.

L'efficacité énergétique est devenue un enjeu majeur de nos jours pour des raisons aussi bien écologiques qu'économiques. Selon la RT 2012, la pompe à chaleur répond très bien aux exigences concernant le chauffage de la maison et l'eau chaude sanitaire. Nous avons donc pour ces raisons essayé de maximiser le rendement des pompes à chaleur et d'étudier la meilleure isolation pour un bâtiment, ce qui nous semblait être une problématique très actuelle.

Ce projet a été une bonne expérience du travail de groupe, et des aléas le concernant. Bien sûr, il nous a aussi permis d'étudier le domaine de la thermodynamique un peu plus en profondeur et nous nous sommes rendu compte que ses applications dans le quotidien sont nombreuses et variées. Ce projet nous a globalement conforté dans notre choix d'étude et de spécialisation.

## 5. BIBLIOGRAPHIE

[http://www.jnlog.com/pdf/IUP\\_Rouen08.pdf](http://www.jnlog.com/pdf/IUP_Rouen08.pdf) (valide à la date du 12/06/16)

<http://www.rt-batiment.fr/batiments-neufs/reglementation-thermique-2012/presentation.html>  
(valide à la date du 12/06/16)

<http://www.planbatimentdurable.fr/comprendre-la-rt-2012-r174.html> (valide à la date du  
12/06/16)

[http://www.jnlog.com/pdf/manuel\\_cdb\\_fr.pdf](http://www.jnlog.com/pdf/manuel_cdb_fr.pdf) (valide à la date du 12/06/16)

Manuel de cours de MRIE – Lionel Estel, INSA Rouen, 2016

## 6. ANNEXE

### 6.1. Rappels sur la Thermodynamique

#### I.1 GENERALITES

La thermodynamique étudie les rapports entre les phénomènes thermiques et mécaniques relatifs aux corps dans leurs états macroscopiques. Ne pas confondre avec la thermodynamique statistique, qui étudie le lien entre structure microscopique et propriétés macroscopiques (théorie cinétique des gaz).

→étude des transformations d'énergie-chaleur en énergie-travail et réciproquement.

##### I.1.1 Notion de système

On étudie une portion limitée de l'univers appelée système, celui-ci pouvant être limité par une surface servant de frontière réelle ou fictive (surface limitant une certaine masse de fluide). Le système est en relation avec le reste de l'univers ou milieu extérieur (atmosphère).

Un **système isolé** n'échange ni énergie ni matière avec l'extérieur.

Un système est décrit par des variables thermodynamiques :  $P, T, S, U, V, \rho \dots$

Les enceintes considérées :

- vase-clos (la masse de  $m_{fluide}$  est constante)
- transvasement (avec un débit de  $\dot{m}_{fluide}$ )

Les fluides considérées :

---



- de l'air (considéré comme un gaz parfait)
- de l'air+produits de combustion (considérés comme gaz parfait)
- de la vapeur d'eau (gaz réel, tables, diagramme de Mollier)

Convention de signe : signe positif lorsque le système reçoit de la chaleur ou du travail. On ne considère dans la suite que les valeurs absolues. Les bilans ne comporteront que des sommes algébriques.

### I.1.2 Lois d'état

La loi des gaz parfait :  $\frac{P}{\rho} = rT$  avec  $r_{air} = 287 J/kg.K$

capacité calorifique à pression constante  $C_p = \left(\frac{dH}{dT}\right)_p = cte$

capacité calorifique à volume constante  $C_v = \left(\frac{dH}{dT}\right)_v = cte$

Relations :  $C_p - C_v = r$  et  $\frac{C_p}{C_v} = 1,4$

Pour la vapeur d'eau, on utilise tables de vapeur et diagramme de Mollier.

## I.2 LES DEUX PRINCIPES DE LA THERMODYNAMIQUE

### I.2.1 Premier principe - Principe d'équivalence

Principe établi par Joule/Helmholtz vers 1850 : énergie-travail ↔ énergie-chaleur

"Travail et chaleur sont les deux seules façons possibles d'échanger de l'énergie entre systèmes fermés."

"Lorsqu'un système thermodynamique fermé quelconque subit un cycle de transformations qui la ramène à son état initial, la somme du travail W et de la chaleur Q échangés est nulle."

#### Energie interne

C'est une fonction d'état, c'est-à-dire que sa variation est indépendante de la transformation et ne dépend que des états initial et final. Elle est constituée de :

- énergie cinétique "microscopique" des particules constituant le système dans un référentiel où les particules sont globalement au repos.
- énergie des interactions entre particules
- énergie de liaison des molécules
- énergie de liaison des constituants de l'atome

Théorie cinétique de Boltzmann :  $U = \frac{3}{2}kT + U_0$ .

L'énergie interne  $U$  est définie à une constante additive près  $U_0$ .

Formulation mathématique du premier principe pour un système fermé :

$$\Delta U = W + Q \text{ ou } dU = \delta W + \delta Q$$

Pour un système ouvert (avec transvasement), on utilise l'**enthalpie**  $H = U + PV$ .

$$\Delta H + \Delta E_c + \Delta E_p = W + Q$$

où  $E_c$  est l'énergie cinétique du fluide et  $E_p$  l'énergie potentielle.

## I.2.2 Deuxième principe - Principe de hiérarchie

Dû aux travaux de Carnot (1824) et Clausius (1854).

Principe de hiérarchie : "la qualité d'une source de chaleur  $Q$  croît avec sa température  $T_{ch}$ ". La part transformable d'énergie-chaleur en énergie-travail de la source de chaleur  $Q$  à la température  $T_{ch}$  peut être quantifié au moyen de l'exergie  $Ex = Q \frac{T_{ch} - T_{atm}}{T_{ch}}$ .

Plus l'écart  $T_{ch} - T_{atm}$  est important, plus la part transformable est grande. Quand  $T_{ch} = T_{atm}$ , on ne peut plus rien récupérer de la source de chaleur.

Enoncé de Clausius : "Le passage de la chaleur d'un corps froid vers un corps chaud n'a jamais lieu spontanément et sans modification simultanée du milieu extérieur."

Enoncé de Kelvin : "A l'aide d'un système qui décrit un cycle et qui n'est en contact qu'avec une seule source de chaleur, il est impossible de recueillir du travail."

→ on ne peut réaliser de machines thermiques monothermes. La transformation d'énergie-chaleur en énergie-travail s'associe d'une baisse de la température.

### Entropie

L'entropie  $S$  est une fonction d'état (en  $J/K$ ). La variation d'entropie au cours d'une transformation peut être décomposée en deux termes :

$$- \delta S_e \text{ entropie échangée avec le milieu extérieur : } \delta S_e = \frac{\delta Q}{T}$$

-  $\delta S_c > 0$  l'entropie créée au sein du système (due aux irréversibilités)

La variation d'entropie au cours d'une transformation s'écrit :

$$\Delta S = \frac{\delta Q}{T} + S_c \text{ ou } dS = \frac{\delta Q}{T}$$

Si la transformation de  $A$  vers  $B$  est **réversible**, il n'y a pas d'entropie créée  $S_c = 0$  et l'on a l'égalité :

$$S_b - S_a = \int_a^b \frac{\delta Q}{T}$$

Si la transformation est irréversible, il y a création d'entropie  $S_c > 0$  et l'on a l'inégalité :

$$S_b - S_a = \int \frac{\delta Q_{rev}}{T} \geq \int \frac{\delta Q_{irrev}}{T}$$

Pour tout cycle :  $\Delta S = 0$ . Inégalité de Clausius pour un cycle :  $0 > \int \frac{\delta Q_{irrev}}{T}$   
L'entropie d'un système isolé augmente et est maximale à l'équilibre.

Théorie cinétique de Boltzmann :  $S = k \ln \Omega$  où  $\Omega$  est le nombre d'état microscopique que le système peut réaliser.

Remarque : l'entropie est une mesure du désordre. La création d'entropie correspond à l'accroissement du désordre microscopique du système. Si l'on passe d'un état ordonné à un état désordonné, l'entropie augmente (par exemple lors d'un changement de phase solide  $\rightarrow$  liquide et liquide  $\rightarrow$  gaz).

L'entropie d'un corps augmente lorsque l'agitation moléculaire augmente c'est-à-dire lorsque la température s'élève.

Remarque : le troisième principe de la thermodynamique (ou principe de Nernst) concerne l'entropie molaire  $S_m$  d'un corps pur ( $S_m = S/n$ ) : l'entropie molaire de tous les corps purs parfaitement cristallisés dans leur état stable est nulle à  $0K$ . Ce qui signifie qu'il n'y a aucun désordre dans un cristal pur à  $T = 0K$ .

### I.3 LES FONCTIONS D'ETAT

C'est une fonction dont la variation est indépendante de la transformation et ne dépend que des états initial et final.

L'exergie interne  $U$  ; l'enthalpie  $H$ , l'entropie  $S$ , l'exergie  $E_x$ , l'anergie  $A_n$  sont

des fonctions d'état.

L'énergie mesure la part transformable d'énergie-chaleur en énergie-travail d'une source de chaleur  $Q$  à la température  $T_{ch}$ .

L'énergie mesure la part non transformable de la source  $Q$ .

$$Q = E_x + A_n, E_x = Q \frac{T_{ch} - T_{atm}}{T_{ch}}, A_n = Q \frac{T_{atm}}{T_{ch}}$$

### Relations utiles

Les deux relations suivantes sont valables quelque soit le fluide (parfait ou réel) :

$$dU = TdS - PdV \text{ et } dH = TdS + VdP$$

La quantité :  $-PdV = \delta W_{\text{vase-clos}}$  représente le travail en vase clos (piston...)

La quantité :  $VdP = \delta W_{\text{transvasement}}$  représente le travail avec transvasement (piston...)

Relations de Joule pour un gaz parfait :  $dU = C_v dT$  et  $dH = C_p dT$

Pour une transformation isentropique (adiabatique réversible), relation de Laplace :  $PV^\lambda = cte$

## I.4 BILAN DES MACHINES THERMIQUES DITHERMES

On distingue les machines motrices ( $W < 0$ ) et les machines réceptrices ( $W > 0$ ).

### I.4.1 Machine motrice

Conversion de chaleur en travail,  $W < 0$ .

La quantité de chaleur échangée avec la source froide est considérée comme perdue (point de vue "économique"). Thermodynamiquement,  $Q_{fr}$  n'est pas perdue et peut être valorisée.

$$\text{Rendement thermique } : \eta_{th} = \frac{W_{utile}}{Q_{ch}}$$

$$\text{Rendement exergetique } : \eta_{ex} = \frac{W_{utile}}{E_x} = \frac{\eta_{th}}{\eta_{Carnot}}$$



Le rendement exergetique quantifie la qualite thermodynamique du moteur.  $\eta_{ex} = 1$  correspond à un cycle idéal réversible (cycles de Carnot, Ericsson, Stirling...).

Le rendement exergetique mesure la quantité d'énergie maximale qu'on peut récupérer du système par rapport à celle fournie au système. Il permet de mesurer le degré d'irréversibilité d'une installation thermodynamique ou encore le degré de dégradation de l'énergie qu'il s'y produit. Un rendement exergetique de 10% indique de 90% de l'énergie a été dégradée dans les irréversibilités.

La notion d'exergie est due aux travaux du Français Louis-Georges GOUY (1854-1926) en 1889.

#### I.4.2 Machine receptrice

Transfère de la chaleur d'une source froide vers une source chaude (frigo, pompe à chaleur).

machine frigorifique : on définit un coefficient d'effet frigorifique :  $\Sigma = \frac{Q_{fr}}{W_{fourni}}$ .

pompe à chaleur : on définit un coefficient de performance (COP) :  $\theta = \frac{Q_{ch}}{W_{fourni}}$ .

### I.5 ETUDE DE TRANSFORMATIONS REVERSIBLES

Si la transformation est en plus adiabatique, elle est alors isentropique.

#### I.5.1 Compression ou détente isentropique

Le travail de compression isentropique est noté  $W_{is}^C$  et le travail de détente  $W_{is}^D$ .

##### Compression avec transvasement

Compression par changement d'état.

$$dh = \underbrace{T}_{=0} dS + V dP = \delta W_{transfert} = \delta W_{is}^C \text{ d'où } W_{is}^C = h_2 - h_1 = C_p(T_2 - T_1)$$

On définit le rapport thermique de compression :

$$\lambda = \left( \frac{HP}{BP} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \text{ d'où } W_{is}^C = C_p T_1 (\lambda - 1)$$

### Compression en vase-clos

Compression par réduction de volume.

$$dh = \underbrace{TdS}_{=0} - PdV = \delta W_{\text{vase-clos}} = \delta W_{\text{is}}^C \text{ d'où } W_{\text{is}}^C = u_2 - u_1 = C_v(T_2 - T_1)$$

On introduit le rapport volumétrique  $\rho = \frac{V_1}{V_2}$ .

Remarque : la compression avec transvasement coûte  $\gamma$  fois plus chère que celle en vase-clos.

### I.5.2 Compression isotherme avec transvasement

Le travail de compression isotherme est noté  $W_{\text{is}}^C$  et le travail de détente  $W_{\text{is}}^D$ .

Compression du gaz et refroidissement pour garder la température constante (irréalisable en pratique).

$$dh = \underbrace{TdS}_{=0} + \underbrace{VdP}_{=\delta W_{\text{transfert}}} = 0 \text{ d'où } W_{\text{is}}^C = Q = \int_1^2 VdP = rT_1 \ln \frac{P_2}{P_1} = C_p T_1 \ln \lambda$$

Remarque : le travail de compression isentropique est plus grand que le travail de compression isotherme.

### I.5.3 Cycle de Carnot

Cycle idéal réversible ( $\eta_{\text{ex}} = 1$ ) avec transvasement composé de quatre transformations :

- une compression isotherme et une compression isentropique
- une détente isotherme et une détente isentropique