



UNIVERSITE  
D'ANTANANARIVO



**FACULTE DES SCIENCES**

FORMATION DOCTORALE EN PHYSIQUE



DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

**Laboratoire de Thermodynamique, Thermique et Combustion**

**MEMOIRE**

*Pour l'obtention du diplôme de :*

**MASTER EN PHYSIQUE ET APPLICATION**

*Parcours:* Energétique

*Sur :*

**MODELISATION D'UNE COUEUSE ARTISANALE :  
ETUDE DE LA TEMPERATURE DE L'AIR INTERIEUR**

*Présenté par*

RANDRIANAIVO  
Andriamparany Herizo

*Devant la commission d'examen composée de :*

<i>Président</i>	: Mr RAKOTOMALALA Minoson	Professeur Titulaire
<i>Examineurs</i>	: Me RANDRIAMANANTANY Zely Arivelo	Professeur Titulaire
	Mr RASAMIMANANA François de Salle	Maître de Conférences
<i>Rapporteur</i>	: Mr ROBELISON Solofonirina	Maître de Conférences

Le 04 Juillet 2015.





UNIVERSITE  
D'ANTANANARIVO



**FACULTE DES SCIENCES**

FORMATION DOCTORALE EN PHYSIQUE



DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

**Laboratoire de Thermodynamique, Thermique et Combustion**

**MEMOIRE**

*Pour l'obtention du diplôme de :*

**MASTER EN PHYSIQUE ET APPLICATION**

*Parcours: Energétique*

*Sur :*

**MODELISATION D'UNE COUVEUSE ARTISANALE :  
ETUDE DE LA TEMPERATURE DE L'AIR INTERIEUR**

*Présenté par*

RANDRIANAIVO  
Andriamparany Herizo



*Devant la commission d'examen composée de :*

<i>Président</i>	: Mr RAKOTOMALALA Minoson	Professeur Titulaire
<i>Examineurs</i>	: Me RANDRIAMANANTANY Zely Arivelo	Professeur Titulaire
	Mr RASAMIMANANA François de Salle	Maître de Conférences
<i>Rapporteur</i>	: Mr ROBELISON Solofonirina	Maître de Conférences

Le 04 Juillet 2015.



## REMERCIEMENTS

Cette étude a été faite dans le Laboratoire de Thermodynamique, Thermique et Combustion de l'Institut pour la Maîtrise de l'Energie (IME) de l'Université d'Antananarivo.

En premier lieu, je remercie Monsieur RAHERIMANDIMBY Marson, le Doyen de la faculté des sciences, Professeur Titulaire à l'Université d'Antananarivo, qui a accepté de m'accueillir à étudier à la Faculté des Sciences.

Je tiens à remercier vivement Monsieur RAKOTOMALALA Minoson, Professeur Titulaire à l'Université d'Antananarivo, d'avoir accepté d'être le Président du jury de ce mémoire, malgré ses toutes occupations.

Mes remerciements s'adressent aussi à Madame RANDRIAMANANTANY Zely Arivelo, Professeur Titulaire à l'Université d'Antananarivo et à Monsieur RASAMIMANANA François de Salle, Maître de Conférences à l'Université d'Antananarivo, en tant qu'Examineurs de ce mémoire malgré leurs occupations.

Mes profonds remerciements vont à Monsieur ROBELISON Solofonirina, Maître de Conférences à l'Université d'Antananarivo, qui a accepté de m'encadrer et aussi en tant que Rapporteur de ce mémoire. Il m'a encouragé et donné les directives, les conseils et les instructions pour la préparation de ce mémoire.

Je remercie à toutes les équipes de l'IME, à mes collègues et à toute personne qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire pour les informations, les collaborations et surtout les aides et conseils.

Je remercie aussi ma famille pour leurs soutiens moraux et financiers ainsi que leur encouragement.

# TABLE DES MATIERES

<b>TABLE DES MATIERES.....</b>	<b>I</b>
<b>NOMENCLATURE .....</b>	<b>III</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>V</b>
<b>LISTE DE TABLEAUX .....</b>	<b>VI</b>
<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : MATERIELS ET METHODES .....</b>	<b>2</b>
1. SCHEMA DU MODELE .....	2
2. MATERIAUX DE CONSTRUCTIONS D'UNE COUVEUSE .....	2
3. INTERVALLE DE TEMPERATURE NECESSAIRE POUR L'INCUBATION DES ŒUFS DE POULES .....	3
4. HYPOTHESES .....	3
5. BUTS .....	4
6. GENERALITES SUR LES DIFFERENTS ECHANGES THERMIQUES .....	4
6.1. <i>Echange de chaleur par Conduction.....</i>	<i>4</i>
6.2. <i>Echange de chaleur par Convection.....</i>	<i>6</i>
6.3. <i>Echange de chaleur par rayonnement.....</i>	<i>7</i>
6.4. <i>Inertie thermique [12]: .....</i>	<i>8</i>
7. APPLICATIONS : ECHANGE THERMIQUE POUR LA COUVEUSE.....	8
7.1. <i>Flux de chaleur par convection entre l'air intérieur et le contre-plaqué .....</i>	<i>9</i>
7.2. <i>Flux de chaleur par convection entre l'air extérieur et le contre-plaqué.....</i>	<i>9</i>
7.3. <i>Flux de chaleur par conduction à travers le contre-plaqué .....</i>	<i>9</i>
7.4. <i>Flux de chaleur par rayonnement à la surface du contre-plaqué .....</i>	<i>10</i>
7.5. <i>Flux de chaleur stocké par inertie du contre-plaqué.....</i>	<i>10</i>
7.6. <i>Flux de chaleur stocké par inertie de l'air intérieur .....</i>	<i>11</i>
7.7. <i>Puissance dissipée par l'air du ventilateur [12].....</i>	<i>11</i>
8. SCHEMA EQUIVALENT ELECTRIQUE D'UNE COUVEUSE SANS BAC A EAU .....	12
8.1. <i>Analogie thermique – électrique .....</i>	<i>12</i>
8.2. <i>Simplification du schéma équivalent.....</i>	<i>13</i>
9. MISE EN EQUATIONS DU MODELE .....	14
9.1. <i>Mise en place des équations en chaque nœud.....</i>	<i>14</i>
9.2. <i>Mise en forme matricielle.....</i>	<i>16</i>
10. SCHEMA EQUIVALENT ELECTRIQUE D'UNE COUVEUSE AVEC BAC A EAU .....	19
11. ORGANIGRAMME .....	21
<b>FIGURE 8: ORGANIGRAMME .....</b>	<b>21</b>
<b>CHAPITRE II : RESULTATS ET DISCUSSIONS .....</b>	<b>23</b>
1. ESSAI DE VALIDATION DE LA PROGRAMMATION EN <i>TURBO C++</i> PAR LE LOGICIEL <i>DESIGN BUILDER</i> .....	23
1.1. <i>Résultats provenant de la modélisation sous Turbo C++ (Couveuse sans bac à eau) ...</i>	<i>23</i>
1.2. <i>Résultats provenant de la simulation par le Design Builder (Couveuse sans bac à eau).....</i>	<i>25</i>
1.3. <i>Comparaison des résultats et validation du modèle en Turbo C++.....</i>	<i>28</i>
1.4. <i>Conclusion .....</i>	<i>29</i>
2. EXPLOITATION DE LA MODELISATION.....	29
2.1. <i>Comparaison des résultats pour une couveuse sans et avec bac à eau.....</i>	<i>29</i>

2.2.	<i>Effet du bac à eau au niveau de la couveuse.....</i>	30
2.3.	<i>Compromis pour que toutes les températures soient dans l'intervalle nécessaire.....</i>	31
3.	DETERMINATION DE LA PUISSANCE DE LA LAMPE EN FONCTION DU VOLUME DE LA COUVEUSE .....	32
3.1.	<i>Principe.....</i>	32
3.2.	<i>Résultat .....</i>	33
<b>CONCLUSION.....</b>		<b>35</b>
<b>WEBOGRAPHIES .....</b>		<b>36</b>
<b>ANNEXES .....</b>		<b>37</b>
ANNEXE I : HISTORIQUE ET GENERALITE.....		37
ANNEXE II : LES TEMPERATURES AMBIANTES DES ŒUFS DANS UNE COUVEUSE [6] .....		40
ANNEXE III : PROPRIETES PHYSIQUES DES COMPOSANTS UTILISES .....		41
ANNEXE IV : LA VIE DES ŒUFS DURANT L'INCUBATION .....		42
ANNEXE VI : PROGRAMMATION SOUS TURBO C++ .....		50

# NOMENCLATURE

$C_a$	Capacité d'inertie de l'air intérieur	$Wh. K^{-1}$
$C_c$	Capacité d'inertie du contre-plaqué	$Wh. K^{-1}$
$C_e$	Capacité d'inertie de l'eau	$Wh. K^{-1}$
$C_{p_a}$	Chaleur spécifique de l'air	$Wh. k_g^{-1}. K^{-1}$
$C_{p_c}$	Chaleur spécifique du contre-plaqué	$Wh. k_g^{-1}. K^{-1}$
$C_{p_e}$	Chaleur spécifique de l'eau	$W. h. k_g^{-1}. K^{-1}$
$D_e$	Débit d'air	$m^3/h$
$e$	Épaisseur du contre-plaqué	$m$
$h_e$	Coefficient de convection de l'air extérieur	$W. m^{-2}. K^{-1}$
$h_i$	Coefficient de convection de l'air intérieur	$W. m^{-2}. K^{-1}$
$h_{i_e}$	Coefficient de convection de d'eau	$W. m^{-2}. K^{-1}$
$h_r$	Inverse de la résistance par rayonnement pour une unité de surface	
$i$	Indice de ligne ou indice de la face de la couveuse	
$j$	Indice de colonne	
$P_l$	Puissance de l'ampoule	$W$
$P_v$	Puissance dissipée par l'air du ventilateur	$W$
$R_i$	Résistance par convection de l'air intérieur	$K. W^{-1}$
$R_c$	Résistance par conduction du contre-plaqué	$K. W^{-1}$
$R_{c_e}$	Résistance par conduction de l'eau	$K. W^{-1}$
$R_e$	Résistance par convection de l'air extérieur	$K. W^{-1}$
$R_{i_e}$	Résistance par convection entre l'eau et l'air	$K. W^{-1}$
$R_{i_p}$	Résistance par convection entre l'eau et le plastique	$K. W^{-1}$
$R_r$	Résistance par rayonnement du contre-plaqué	$K. W^{-1}$
$S$	Surface du contre-plaqué	$m^2$
$t$	Temps	$h$
$T$	Température du contre-plaqué	$K$
$T_{a,i}$	Température de l'air intérieur	$K$
$T_{a,e}$	Température de l'air extérieur	$K$

### Lettres Grecques

$\alpha$	Résistance équivalente en série	$K.W^{-1}$
$\varepsilon$	Émissivité	
$\lambda_c$	Conductivité thermique du contre-plaqué	$W.m^{-1}.K^{-1}$
$\lambda_e$	Conductivité thermique de l'eau	$W.m^{-1}.K^{-1}$
$\lambda_p$	Conductivité thermique du plastique	$W.m^{-1}.K^{-1}$
$\rho_a$	Masse volumique de l'air	$kg.m^{-3}$
$\rho_c$	Masse volumique du contre-plaqué	$kg.m^{-3}$
$\rho_e$	Masse volumique de l'eau	$kg.m^{-3}$
$\sigma$	Constante de Boltzmann	$W.m^{-2}.K^{-4}$
$\varphi$	Densité de flux de chaleur	$W.m^{-2}$
$\phi$	Flux de chaleur	$W$

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Vue en perspective d'une couveuse [2].....	2
Figure 2: Schéma du transfert de chaleur par conduction. [9] .....	4
Figure 3 : Schéma du transfert de chaleur par convection [10].....	6
Figure 4 : Schéma du transfert de chaleur par rayonnement [11].....	7
Figure 5 : Schéma équivalent électrique .....	12
Figure 6 : Schéma simplifié.....	13
Figure 7 : Schéma équivalent électrique d'une couveuse avec bac à eau .....	19
Figure 8: Organigramme .....	21
Figure 9 : Courbes de température intérieure d'une couveuse sous <i>Turbo C++</i> .....	23
Figure 10 : Bâtiment contenant la couveuse .....	25
Figure 11 : la couveuse construite dans le <i>Design Builder</i> .....	26
Figure 12 : Courbes de température intérieure d'une couveuse sous <i>Design Builder</i> .....	27
Figure 13 : Courbes de validation du résultat.....	28
Figure 14 : Courbes de comparaisons des températures intérieures .....	29
Figure 15 : Courbe de température intérieure d'une couveuse après le changement .....	31
Figure 16 : Courbe représentative de l'évolution de la puissance .....	33
Figure 17: Vaisseaux sanguins dans l'œuf miré [15].....	43



## LISTE DE TABLEAUX

Tableau 1: Effectifs des températures de la couveuse sans bac à eau .....	30
Tableau 2: Effectifs des températures de la couveuse avec bac à eau .....	30
Tableau 3: Effectifs des températures de l'air dans la couveuse suivant la valeur de puissance de l'ampoule en fonction du volume .....	32
Tableau 4: Evolution de la puissance en fonction du volume de la couveuse. ....	33
Tableau 5: Données sur l'incubation des œufs du canard de Pékin.....	40
Tableau 6: Données sur l'incubation des œufs de la dinde. ....	40
Tableau 7: Données sur l'incubation des œufs de la caille. ....	40
Tableau 8: Données sur l'incubation des œufs de la pintade. ....	40
Tableau 9: propriété des matériaux.....	41
Tableau 10: Propriété de l'eau et de l'air .....	41
Tableau 11 : Résultats des températures de la couveuse avec bac à eau .....	44
Tableau 12: Pour un volume de 0 ,03m <sup>3</sup> .....	45
Tableau 13: Pour un volume de 0,04m <sup>3</sup> .....	45
Tableau 14: Pour un volume de 0,05 m <sup>3</sup> .....	46
Tableau 15 : Pour un volume de 0,06 m <sup>3</sup> .....	47
Tableau 16: Pour un volume de 0,07m <sup>3</sup> .....	48
Tableau 17: Pour un volume de 0,08m <sup>3</sup> .....	49

# INTRODUCTION

Dans la recherche scientifique, les chercheurs ont trouvé que les poules couveuses peuvent être remplacées par un système physique basé sur la thermique au moment de l'incubation. D'où la fabrication d'une couveuse ou l'incubateur artificiel. Le résultat peut être observé sous forme d'un graphe après avoir modélisé l'interaction entre les matériaux, en faisant des analogies électriques et des échanges énergétiques du système comme dans la méthodologie de *Bond Graph* concernant la modélisation thermique d'un bâtiment monozone [1]. Cette méthode a tenu compte les éléments de résistances, de l'inertie, la source de flux... dans le bâtiment et qui ont quelque ressemblance à celle des éléments à l'intérieur d'une couveuse.

Dans cette étude, il s'agit d'une couveuse artisanale, sa spécificité est d'utiliser quatre types d'éléments essentiels et complémentaires : une ou plusieurs ampoules électriques, un boîtier en contre-plaqué et deux ventilateurs mécaniques, ainsi qu'un bac à eau. Leurs rôles sont de modifier la température à l'intérieur de la couveuse afin d'obtenir les températures utiles durant l'incubation.

Les objectifs, de ce travail, sont : primo, de calculer les températures de l'air intérieur d'une couveuse avec et sans bac à eau et d'en déduire quand est- ce que le bac à eau a dû être tiré et quand- est- ce qu'il a dû être placé dans une couveuse ; secundo, de déduire la puissance électrique nécessaire à utiliser en fonction du volume de la couveuse.

Ce mémoire a contenu deux chapitres tels que :

Le premier chapitre concerne les matériels et méthodes nécessaires pour la modélisation d'une couveuse. Non seulement, il a illustré les fonctionnements et les propriétés physiques des différents types des matériaux, mais aussi a présenté les étapes pour la résolution des équations obtenues. La méthode numérique utilisée est la *méthode de Gauss*.

Le deuxième chapitre présente les résultats et discussions du modèle. Il affiche les résultats sous forme de courbes à partir des valeurs obtenues du programme sous *Turbo C++* et puis validés par le logiciel *Design Builder*. Après, d'en déduire l'intervalle de temps durant la présence ou l'absence du bac à eau à l'intérieur d'une couveuse. Et enfin, il montre la variation de la puissance électrique de la lampe en fonction du volume de la couveuse.

# CHAPITRE I : MATERIELS ET METHODES

## 1. Schéma du modèle

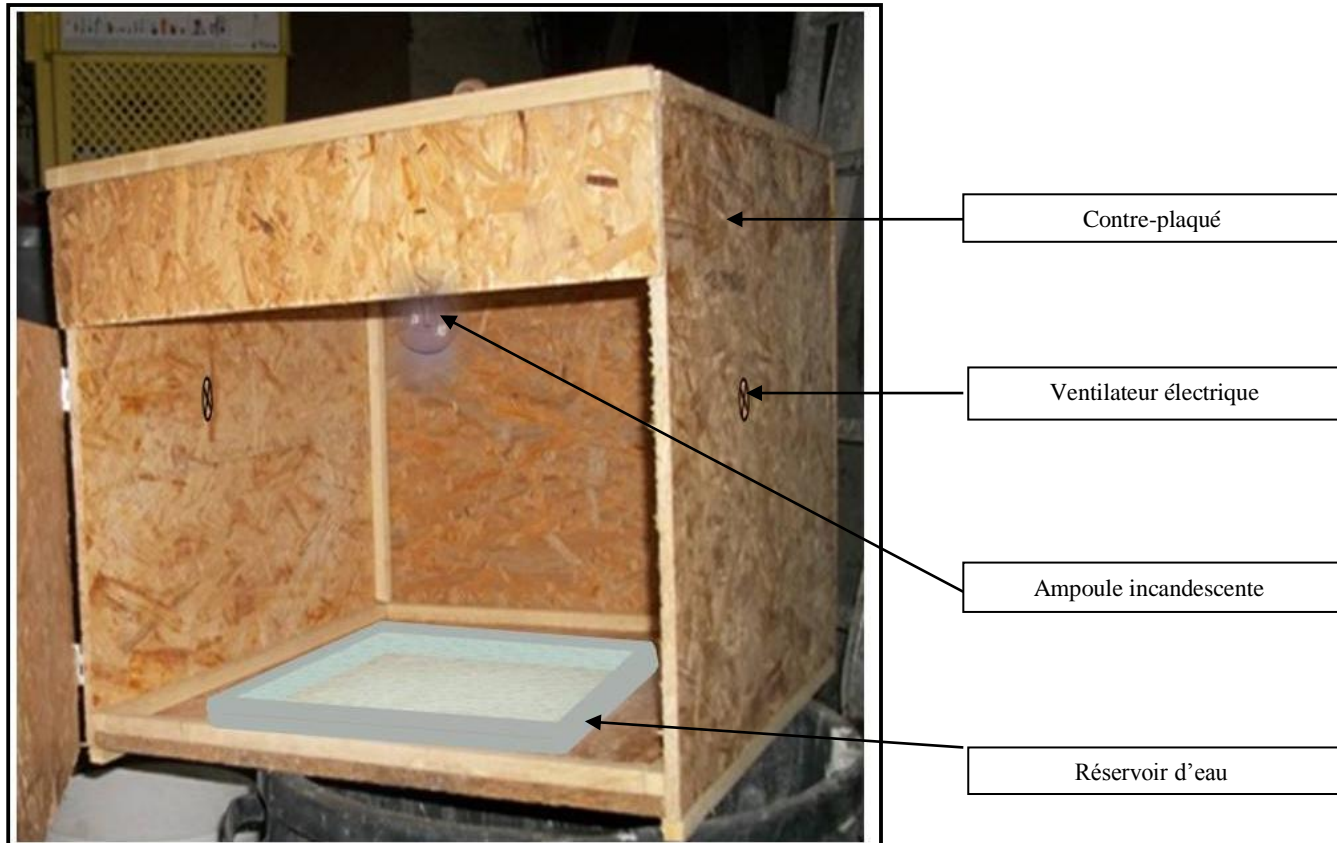


Figure 1 : Vue en perspective d'une couveuse [2]

## 2. Matériaux de constructions d'une couveuse

La couveuse est constituée d'un boîtier en contre-plaqué de surface lisse à l'intérieur et à l'extérieur et d'épaisseur  $0,02m$ . Ce boîtier comporte d'une grande ouverture en vue de face et deux petits trous sur les faces gauches et droites pour l'emplacement de deux ventilateurs électriques.

Ces deux ventilateurs électriques sont utilisés pour échanger l'air entrant et sortant dans la couveuse, parce que les œufs ont besoin d'oxygène et dégagent du  $CO_2$  [3] durant l'incubation. Chaque ventilateur a les mêmes dimensions égales à 35mm de longueur, 35mm de largeur et 7,5mm de hauteur, de puissance maximale  $0,4W$ , et de débit d'air  $1,62m^3/h$  [4].

Sur la face supérieure du boîtier, une ampoule incandescente doit y être suspendue. Cette ampoule est utilisée comme source de chaleur afin de chauffer les œufs.

Sur la face inférieure du boîtier, c'est-à-dire sur le plancher, un bac à eau est placé et qui produit de l'humidité dans la couveuse. Cette humidité est nécessaire pour que la membrane intérieure de la coquille de l'œuf ne soit pas desséchée. Puis, elle empêche la fissure de la coquille. [5]

Il est nécessaire aussi d'utiliser un thermomètre et un hygromètre, afin de vérifier et marquer, la température et l'humidité à l'intérieur de la couveuse.

### **3. Intervalle de température nécessaire pour l'incubation des œufs de poules**

La plupart des temps de l'incubation se trouvent dans les dix-huit premiers jours (c'est-à-dire : 18jours/21jours soit 85,7% de la durée de l'incubation) [6], alors l'étude de la couveuse a été basée pendant ces dix-huit premiers jours.

La température de l'air à l'intérieur de la couveuse doit être comprise entre 36°C à 39,4°C [7] entre le premier et le 18<sup>ème</sup> jour. Au-delà de ces deux valeurs durant quelques jours, les températures sont mortelles pour les embryons et peuvent diminuer fortement le nombre des œufs éclos [7]. Ces deux températures extrêmes sont utilisées dans la suite comme des températures fourchettes durant l'incubation.

### **4. Hypothèses**

- Les œufs à incuber sont des œufs de poules.
- La température de l'air à l'intérieur de la couveuse est considérée comme uniforme.
- La maison construite dans le logiciel *Design Builder* est un << bloc de composant >>.

Alors, la température extérieure est égale à celle de la température intérieure et égale aussi à la température extérieure de la couveuse.

Cette température extérieure est aussi utilisée dans la programmation sous *Turbo C++*.

Dans cette étude, la couveuse a été construite par des << blocs de bâtiments >> tandis que la maison où on a mis cette couveuse a été fabriquée par des << blocs de composants >> ; parce qu'un bloc de bâtiment ne peut pas inclure dans un autre bâtiment situé à l'intérieur.

Le << boc de composant >> est, en général utilisé pour cacher dans l'ombre la partie de la maison, il n'intervient pas dans le calcul thermique. En effet il empêche le rayon solaire de refléter sur la couveuse. [8]

## 5. Buts

- Déterminer la température de l'air intérieur dans la couveuse en utilisant la modélisation sous *Turbo C++*.
- Déterminer la puissance électrique nécessaire de l'ampoule en fonction du volume de la couveuse.

## 6. Généralités sur les différents échanges thermiques

### 6.1. Echange de chaleur par Conduction

Il s'agit d'un mode de transfert de chaleur au niveau macroscopique d'un même matériau ou entre plusieurs matériaux accolés sans déplacement de matière. Ce mode de transfert se passe spontanément de la surface à température plus élevée vers la surface à température moins élevée.

La densité de flux de chaleur est proportionnelle au gradient de température et régit par la *loi de Fourier* :

$$\vec{\varphi} = -\lambda \cdot \vec{\text{grad}}(T) \quad (1)$$

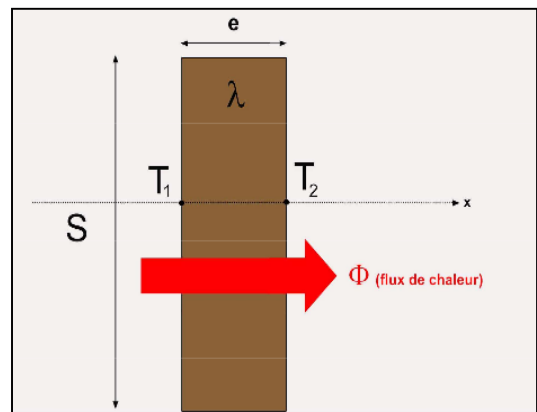


Figure 2: Schéma du transfert de chaleur par conduction. [9]

Tels que :  $\lambda$  est la conductivité thermique en *watt* par mètre-Kelvin et  $T$  la température en fonction de l'épaisseur du matériau, mesuré en Kelvin.

Dans cette étude, toutes les surfaces des matériaux sont planes (contre-plaqué).

Le flux à travers une surface est donné par :

$$\Phi = \iint_S \vec{\varphi} \cdot \vec{n} \cdot dS \quad (\text{Théorème de Gauss})$$

Avec :

$$\vec{\varphi} \cdot \vec{n} = \varphi * 1 * \cos(\alpha), \text{ tel que } \alpha = (\vec{\varphi}, \vec{n})$$

Or  $\vec{\varphi}$  et  $\vec{n}$  sont de même direction et de même sens.

Et on a :  $\alpha = 0$ ,

$$\begin{aligned} \vec{\varphi} \cdot \vec{n} &= \varphi * 1 * \cos(0) \\ \vec{\varphi} \cdot \vec{n} &= \varphi \end{aligned} \quad (2)$$

D'où :

$$\boxed{\Phi = \varphi \cdot S} \quad (3)$$

Et l'équation (1) donne :

$$\boxed{\varphi = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x}} \quad (4)$$

En remplaçant  $\varphi$  par son expression :

$$\Phi = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \cdot S \quad (5)$$

$$\boxed{\Phi = \lambda \cdot S \frac{(T_1 - T_2)}{e}} \quad (6)$$

La résistance qui caractérise le ralentissement du transfert de chaleur par conduction est tirée de l'équation (6).

On a :

$$\boxed{R = \frac{e}{\lambda \cdot S}} \quad (7)$$

Telles que :

$R$  : La résistance thermique par conduction du matériau d'épaisseur  $e$  en mètre ( $m$ ), de conductivité  $\lambda$  en *watt par mètre-Kelvin* ( $W/m.K$ ) et de surface  $S$  en mètre carré ( $m^2$ ).

$T_1 - T_2$  : La différence de température entre deux surfaces en *Kelvin* ( $K$ )

$\Phi$  : Le flux de chaleur en *Watts* ( $W$ )

## 6.2. Echange de chaleur par Convection

La convection est un mode de transfert de chaleur entre un solide-fluide (ex : le contre-plaqué et l'air dans le cas de la couveuse).

Lorsque le mouvement du fluide est provoqué naturellement ou par la différence de températures de la région, il s'agit d'une convection naturelle ou convection libre. Par contre, si le mouvement du fluide est sous l'effet direct des forces extérieures (ex : force de pression venant d'une pompe), il s'agit d'une convection forcée [10].

Ce mécanisme de transfert est donné par la *loi de Newton* :

$$\phi = h_c * S * (T_1 - T_2) \quad (8)$$

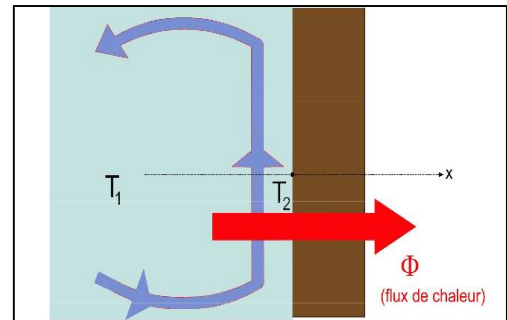


Figure 3 : Schéma du transfert de chaleur par convection [10].

Avec :

$\phi$  : flux de chaleur en *watt* ( $W$ )

$h_c$  : le coefficient de transfert thermique en  $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$

$T_1$  : température du fluide loin de la surface en *Kelvin*

$T_2$  : température de la surface du matériau

Et la résistance thermique par convection  $R$  est donné par :

$$R = \frac{1}{h_c \cdot S} \quad (9)$$

### 6.3. Echange de chaleur par rayonnement

C'est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces séparées par le vide ou par l'air [11]. Exemple: rayonnement entre les contre-plaqués).

La puissance rayonnée par un corps est exprimée par la loi de *Stefan-Boltzmann*:

$$\phi = \sigma * \varepsilon * S * (T_1^4 - T_2^4) \quad (10)$$

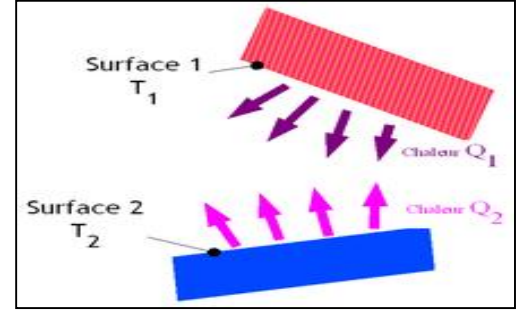


Figure 4 : Schéma du transfert de chaleur par rayonnement [11].

Avec :

$\sigma$  : Constante de *Stefan-Boltzmann* ( $5,6703 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ )

$\varepsilon$ : Émissivité tel que, égale à 1 pour un corps noir et comprise entre 0 et 1 selon l'état de surface du matériau [11]

$S$ : Superficie du corps ( $\text{m}^2$ )

$T$ : Température de la surface du corps (K)

L'équation (8) peut s'écrire :

$$\phi = \sigma * \varepsilon * S * (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)(T_1 - T_2) \quad (11)$$

$$\phi = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{1}{\sigma * \varepsilon * S * (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)}} \quad (12)$$

De la relation (9), l'expression de la résistance par rayonnement est égale à :

$$R = \frac{1}{\sigma * \varepsilon * S * (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)} \quad (13)$$

$$R = \frac{1}{h_r * S} \quad (14)$$

$$\text{Où } h_r = \sigma * \varepsilon * (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2) \quad (15)$$



#### 6.4. Inertie thermique [12]:

Les matériaux sont capables de stocker et de dégager de l'énergie sous forme de chaleur par inertie thermique. Sa valeur dépend de la caractéristique du matériau.

Le flux thermique emmagasiné par inertie d'un matériau se traduit par :

$$\phi = C \cdot \frac{dT}{dt} \quad (16)$$

Avec :

T : la température du matériau (K)

C : la capacité d'inertie du matériau (Wh. K<sup>-1</sup>)

Pour un matériau homogène et isotrope :

$$C = \rho \cdot e \cdot S \cdot C_p \quad (17)$$

Telles que :

$\rho$ : masse volumique

$e$ : épaisseur

$S$ : surface du matériau

$C_p$ : chaleur spécifique du matériau (Wh. Kg<sup>-1</sup>. K<sup>-1</sup>)

#### 7. Applications : Echange thermique pour la couveuse

Dans cette étude, la source de chaleur est posée à l'intérieur. Elle s'est accrochée au milieu de la face supérieure de la couveuse.

La puissance dégagée par la lampe, sous forme de flux de chaleur, chauffe l'air intérieur puis l'air fait un phénomène de convection à la surface du contre-plaqué.

Ce phénomène est dû à la différence de températures entre l'air intérieur et le contre-plaqué.

Il y a aussi un échange de chaleur par rayonnement entre les faces en contre-plaqué qui constituent la cage.

Puis, le flux de chaleur traverse le contre-plaqué par le phénomène de conduction.

Enfin, la convection de l'air extérieur à la surface externe du contre-plaqué.

### **7.1. Flux de chaleur par convection entre l'air intérieur et le contre-plaqué**

$$\phi_i = h_i * S * (T_{a,i} - T) \quad (18)$$

Avec :

$h_i$ : Le coefficient de convection interne de l'air

$T_{a,i}$ : La température de l'air intérieur

$T$ : La température du contre-plaqué

$S$ : La surface du contre-plaqué

Et la résistance par convection interne est :

$$R_i = \frac{1}{h_i * S} \quad (19)$$

### **7.2. Flux de chaleur par convection entre l'air extérieur et le contre-plaqué**

$$\phi_e = h_e * S * (T_{a,e} - T) \quad (20)$$

Avec :

$h_e$ : Le coefficient de convection externe de l'air

$T_{a,e}$ : La température extérieure

Et la résistance par convection externe est :

$$R_e = \frac{1}{h_e * S} \quad (21)$$

### **7.3. Flux de chaleur par conduction à travers le contre-plaqué**

$$\phi_c = \lambda_c * S * \frac{(T_{a,e} - T)}{e} \quad (22)$$

Avec :

$e$ : L'épaisseur du contre-plaqué

$\lambda_c$ : La conductivité du contre-plaqué ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )

Et la résistance par conduction est :

$$R_c = \frac{e}{\lambda_c \cdot S} \quad (23)$$

#### 7.4. Flux de chaleur par rayonnement à la surface du contre-plaqué

$$\phi_r = \sigma * S * \varepsilon * (T_{a,i}^4 - T^4) \quad (24)$$

$$\phi_r = \sigma * \varepsilon * S * (T_{a,i}^2 + T^2)(T_{a,i} + T)(T_{a,i} - T) \quad (25)$$

L'expression de la résistance par rayonnement est égale à :

$$R_r = \frac{1}{\sigma * \varepsilon * S * (T_{a,i}^2 + T^2)(T_{a,i} + T)} \quad (26)$$

$$R_r = \frac{1}{h_r \cdot S} \quad (27)$$

$\varepsilon$ : Émissivité du contre-plaqué

#### 7.5. Flux de chaleur stocké par inertie du contre-plaqué

$$\phi_{ic} = C_c \cdot \frac{dT}{dt} \quad (28)$$

Avec :

$C_c$ : La capacité d'inertie du contre-plaqué telle que  $C_c = \rho \cdot e \cdot S \cdot Cp_c$

$Cp_c$ : La chaleur spécifique du contre-plaqué ( $Wh.Kg^{-1}.K^{-1}$ )

### 7.6. Flux de chaleur stocké par inertie de l'air intérieur

$$\phi_{a,i} = C_a \cdot \frac{dT}{dt} \quad (29)$$

Avec :

$C_a$ : La capacité d'inertie de l'air telle que  $C_a = \rho_a \cdot e_a \cdot S \cdot C_{p_a}$

$C_{p_a}$ : La chaleur spécifique de l'air ( $Wh \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )

$e_a$ : L'épaisseur de l'air à l'intérieur de la couveuse (m)

### 7.7. Puissance dissipée par l'air du ventilateur [12]

$$P_v = D_e \cdot C_{p_a} (T_{a,i} - T_{a,e}) \quad (30)$$

Avec  $D_e$  est le débit d'air qui est donnée numériquement par  $D_e = 1,62 \text{ m}^3/h$  [4].

Ce débit a été conçu par le constructeur du ventilateur. Donc il est fixé quelque soit le volume de la couveuse.

## 8. Schéma équivalent électrique d'une couveuse sans bac à eau

### 8.1. Analogie thermique – électrique

L'analogie entre la thermique et l'électricité [12] c'est-à-dire la résistance thermique est analogue à la résistance électrique, la température est analogue à la tension électrique, flux thermique à l'intensité du courant, l'inertie thermique à la capacité d'un condensateur et le courant aux flux ont été adoptés.

D'où la figure 5 ci-après.

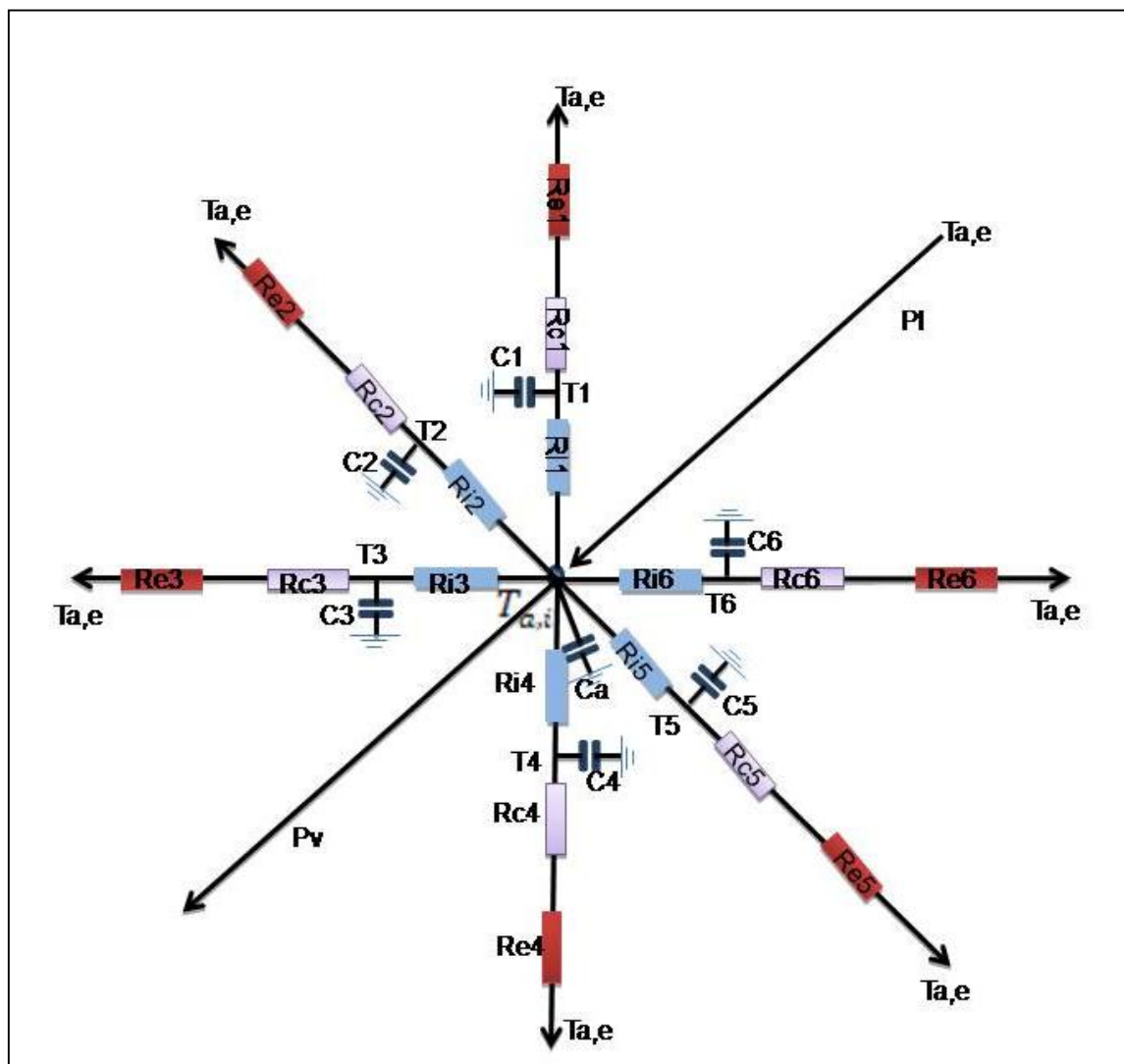
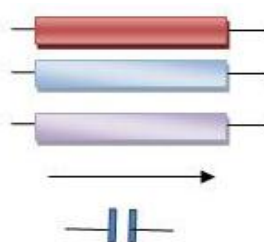


Figure 5 : Schéma équivalent électrique



Résistance par convection de l'air extérieur

Résistance par convection de l'air intérieur

Résistance par conduction

Sens du flux de chaleur

Capacité thermique

## 8.2. Simplification du schéma équivalent

Comme en électricité, les résistances en série peuvent se ramener en une résistance équivalente :

$$\sum R_i = R_{eq} \quad (31)$$

$$\alpha_i = R_{ci} + R_{ei} \quad (32)$$

Donc on peut écrire :

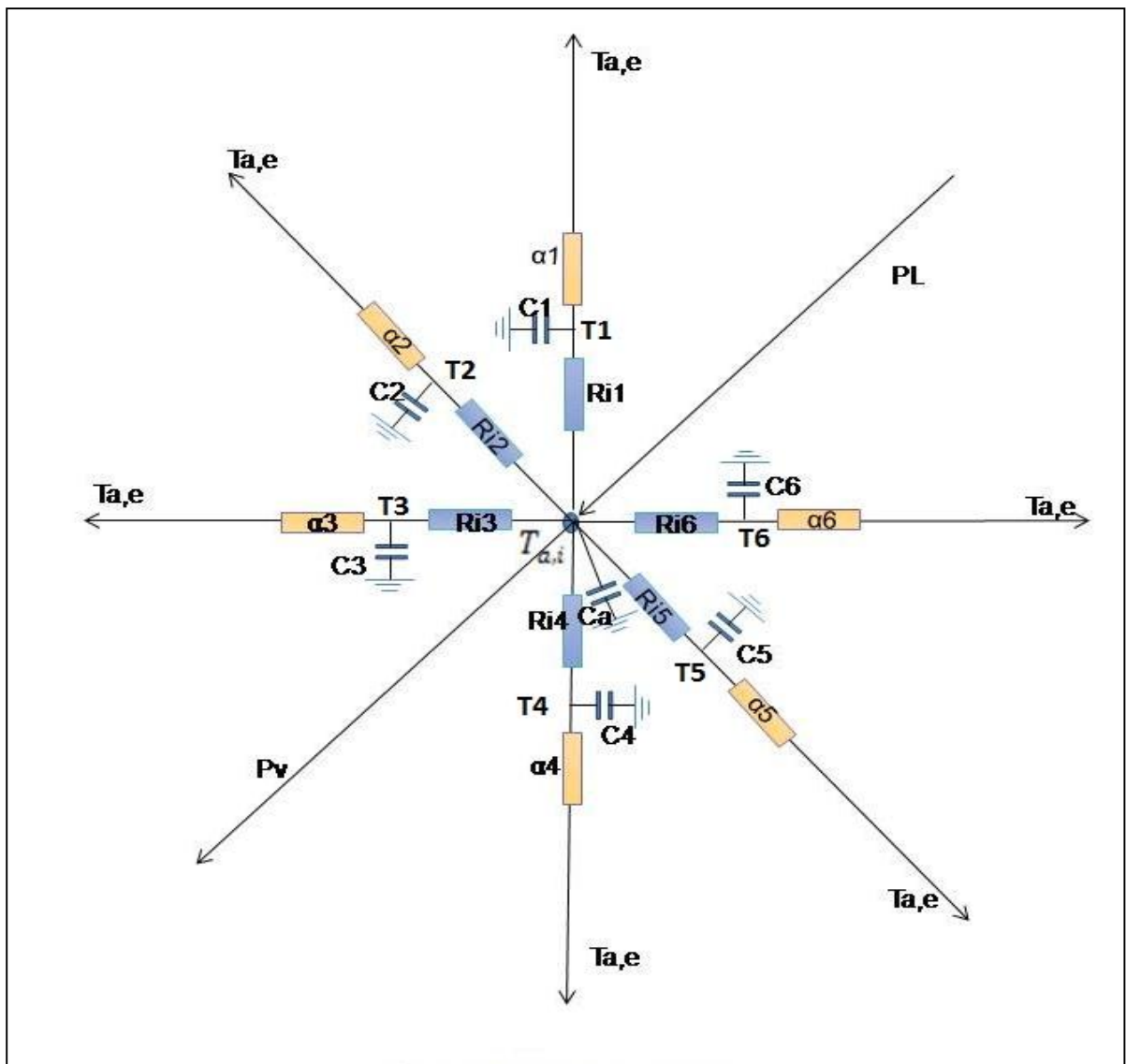


Figure 6 : Schéma simplifié



Remarque :

Dues à la lourdeur de la présentation des résistances thermiques par rayonnement entre les six (6) faces, ces résistances sont omises dans les figures 5 et 6.

## **9. Mise en équations du modèle**

Pour établir les équations différentielles, on peut utiliser la loi des nœuds de Kirchhoff à partir de l'analogie thermique-électricité [12]. Cette loi s'écrit : la somme des courants entrant est égale à la somme des courants sortant pour chaque nœud.

### **9.1. Mise en place des équations en chaque nœud**

Sur chaque nœud, la somme des flux entrants est égale à la somme des flux sortants.

$$\text{Nœud 1 : } \phi_{i_1} = \phi_{r_1} + \phi_{ic_1} + \phi_{\alpha_1}$$

$$\text{Nœud 2 : } \phi_{i_2} = \phi_{r_2} + \phi_{ic_2} + \phi_{\alpha_1}$$

$$\text{Nœud 3 : } \phi_{i_3} = \phi_{r_3} + \phi_{ic_3} + \phi_{\alpha_3}$$

$$\text{Nœud 4 : } \phi_{i_4} = \phi_{r_4} + \phi_{ic_4} + \phi_{\alpha_4}$$

$$\text{Nœud 5 : } \phi_{i_5} = \phi_{r_5} + \phi_{ic_5} + \phi_{\alpha_5}$$

$$\text{Nœud 6 : } \phi_{i_6} = \phi_{r_6} + \phi_{ic_6} + \phi_{\alpha_6}$$

$$\text{Nœud 7 : } P_l = \phi_{i_1} + \phi_{i_2} + \phi_{i_3} + \phi_{i_4} + \phi_{i_5} + \phi_{i_6} + \phi_{a,i} + P_v$$

Avec :

L'indice  $k = 1$  à  $6$  est le numéro de la face de la couveuse.

$\phi_{i_k}$  : Flux de chaleur par convection de l'air intérieur et le contre plaqué

$\phi_{r_k}$  : Flux de chaleur par rayonnement à la surface du contre plaqué

$\phi_{ic_k}$  : Flux de chaleur stocké par inertie de l'air intérieur et le contre plaqué

$\phi_{\alpha_k}$  : Somme du flux de chaleur par convection de l'air extérieur et du flux de chaleur par conduction du contre plaqué

$\phi_{a,i}$  : Flux de chaleur stocké par inertie de l'air

$P_l$  : Puissance de l'ampoule incandescente

$P_v$  : Puissance dissipée par l'air du ventilateur

En remplaçant l'expression de chaque flux, les équations en chaque nœud deviennent :

$$\text{Nœud 1 : } h_{i1} * S_1 * (T_{a,i} - T_1) = h_{r1} * S_1 (T_{a,i} - T_1) + C_{c1} * \frac{dT_1}{\Delta t} + \frac{T_1 - T_{a,e}}{\alpha_1}$$

$$\text{Nœud 2 : } h_{i2} * S_2 * (T_{a,i} - T_2) = h_{r2} * S_2 (T_{a,i} - T_2) + C_{c2} * \frac{dT_2}{\Delta t} + \frac{T_2 - T_{a,e}}{\alpha_2}$$

$$\text{Nœud 3 : } h_{i3} * S_3 * (T_{a,i} - T_3) = h_{r3} * S_3 (T_{a,i} - T_3) + C_{c3} * \frac{dT_3}{\Delta t} + \frac{T_3 - T_{a,e}}{\alpha_3}$$

$$\text{Nœud 4 : } h_{i4} * S_4 * (T_{a,i} - T_4) = h_{r4} * S_4 (T_{a,i} - T_4) + C_{c4} * \frac{dT_4}{\Delta t} + \frac{T_4 - T_{a,e}}{\alpha_4}$$

$$\text{Nœud 5 : } h_{i5} * S_5 * (T_{a,i} - T_5) = h_{r5} * S_5 (T_{a,i} - T_5) + C_{c5} * \frac{dT_5}{\Delta t} + \frac{T_5 - T_{a,e}}{\alpha_5}$$

$$\text{Nœud 6 : } h_{i6} * S_6 * (T_{a,i} - T_6) = h_{r6} * S_6 (T_{a,i} - T_6) + C_{c6} * \frac{dT_6}{\Delta t} + \frac{T_6 - T_{a,e}}{\alpha_6}$$

$$\begin{aligned} \text{Nœud 7 : } Pl = & h_{i1} * S_1 * (T_{a,i} - T_1) + h_{i2} * S_2 * (T_{a,i} - T_2) + h_{i3} * S_3 * (T_{a,i} - T_3) + \\ & h_{i4} * S_4 * (T_{a,i} - T_4) + h_{i5} * S_5 * (T_{a,i} - T_5) + h_{i6} * S_6 * (T_{a,i} - T_6) + \\ & \frac{C_a}{\Delta t} * dT_{a,i} + Cp_a * D_e * (T_{a,i} - T_{a,e}) \end{aligned}$$

En appliquant la méthode de discrétisation vers l'arrière qui est donnée par :

$$\boxed{f'(t) = \frac{dy}{dt} = \frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{y(t) - y(t-1)}{\Delta t}} \quad (33)$$

Les équations suivantes sont obtenues :

$$\begin{aligned} \text{Nœud 1 : } (S_1 * (-h_{r1} + h_{i1}) + \frac{C_{c1}}{\Delta t} + \frac{1}{\alpha_1}) * T_1(t) - S_1 * (-h_{r1} + h_{i1}) * T_{a,i}(t) = & \frac{C_{c1}}{\Delta t} * \\ & T_1(t-1) + T_{a,e}(t) * \frac{1}{\alpha_1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Nœud 2 : } (S_2 * (-h_{r2} + h_{i2}) + \frac{C_{c2}}{\Delta t} + \frac{1}{\alpha_2}) * T_2(t) - S_2 * (-h_{r2} + h_{i2}) * T_{a,i}(t) = & \frac{C_{c2}}{\Delta t} * \\ & T_2(t-1) + T_{a,e}(t) * \frac{1}{\alpha_2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Nœud 3 : } (S_3 * (-h_{r3} + h_{i3}) + \frac{C_{c3}}{\Delta t} + \frac{1}{\alpha_3}) * T_3(t) - S_3 * (-h_{r3} + h_{i3}) * T_{a,i}(t) = & \frac{C_{c3}}{\Delta t} * \\ & T_3(t-1) + T_{a,e}(t) * \frac{1}{\alpha_3} \end{aligned}$$



$$\text{Nœud 4 : } (S_4 * (-h_{r_4} + h_{i_4}) + \frac{C_{c4}}{\Delta t} + \frac{1}{\alpha_4}) * T_4(t) - S_4 * (-h_{r_4} + h_{i_4}) * T_{a,i}(t) = \frac{C_{c4}}{\Delta t} * T_4(t-1) + T_{a,e}(t) * \frac{1}{\alpha_4}$$

$$\text{Nœud 5 : } (S_5 * (-h_{r_5} + h_{i_5}) + \frac{C_{c5}}{\Delta t} + \frac{1}{\alpha_5}) * T_5(t) - S_5 * (-h_{r_5} + h_{i_5}) * T_{a,i}(t) = \frac{C_{c5}}{\Delta t} * T_5(t-1) + T_{a,e}(t) * \frac{1}{\alpha_5}$$

$$\text{Nœud 6 : } (S_6 * (-h_{r_6} + h_{i_6}) + \frac{C_{c6}}{\Delta t} + \frac{1}{\alpha_6}) * T_6(t) - S_6 * (-h_{r_6} + h_{i_6}) * T_{a,i}(t) = \frac{C_{c6}}{\Delta t} * T_6(t-1) + T_{a,e}(t) * \frac{1}{\alpha_6}$$

$$\text{Nœud 7 : } -h_{i_1} * S_1 * T_1 - h_{i_2} * S_2 * T_2 - h_{i_3} * S_3 * T_3 - h_{i_4} * S_4 * T_4 - h_{i_5} * S_5 * T_5 - h_{i_6} * S_6 * T_6 + \left(\frac{C_a}{\Delta t} + Cp_a * D_e + h_{i_1} * S_1 + h_{i_2} * S_2 + h_{i_3} * S_3 + h_{i_4} * S_4 + h_{i_5} * S_5 + h_{i_6} * S_6\right) * T_{a,i} = \frac{C_a}{\Delta t} T_{a,i}(t-1) + P_l + Cp_a * D_e * T_{a,e}$$

Avec :

$C_{c_k}$  : Capacité d'inertie du contre-plaqué ( $Wh.K^{-1}$ )

$h_{i_k}$  : Coefficient de convection de l'air intérieur ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ )

$h_{r_k}$  : Inverse de la résistance par rayonnement pour une unité de surface

$S_k$  : Surface du contre-plaqué ( $m^2$ )

$\alpha_k$  : Résistance équivalent en série ( $K.W^{-1}$ )

$\Delta t = 1h$  : Différence entre deux temps successifs.

## 9.2. Mise en forme matricielle

Il s'agit d'une équation matricielle de la forme

$$\begin{pmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{17} \\ 0 & a_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{27} \\ 0 & 0 & a_{33} & 0 & 0 & 0 & a_{37} \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & 0 & 0 & a_{47} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{55} & 0 & a_{57} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{66} & a_{67} \\ a_{71} & a_{72} & a_{73} & a_{74} & a_{75} & a_{76} & a_{77} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1(t) \\ T_2(t) \\ T_3(t) \\ T_4(t) \\ T_5(t) \\ T_6(t) \\ T_7(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 T_1(t-1) \\ b_2 T_2(t-1) \\ b_3 T_3(t-1) \\ b_4 T_4(t-1) \\ b_5 T_5(t-1) \\ b_6 T_6(t-1) \\ b_7 T_7(t-1) \end{pmatrix} + Y(t) \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \\ c_6 \\ c_7 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ d_7 \end{pmatrix}$$

$$[A] * [T(t)] = [B.T(t - 1)] + Y(t)[C] + [D] \quad (34)$$

Qui peut se mettre aussi sous la forme :

$$[A] * [T(t)] = [E] \quad (35)$$

$[T(t)]$  est le vecteur contenant les variables de températures en fonction du temps à déterminer. Telles que :  $T_1(t), T_2(t), T_3(t), T_4(t), T_5(t), T_6(t)$  et  $T_{a,i}(t)$  sont respectivement les températures des six (6) faces et la température de l'air à l'intérieur de la couveuse. Et elles sont obtenues par la résolution de l'équation 27 par la *méthode de Gauss*.

$[A]$  est la matrice d'éléments  $a_{ij}$  dont i est la base suivant les lignes et j est la base suivant les colonnes.

$Y(t)$  est la variable de température de l'air extérieur durant 24h tirée dans le fichier météorologique [13] à utiliser dans le logiciel *Design Builder*.

Les éléments de la matrice  $[A]$  sont donnés par :

$$A_{11} = S_1 * (-h_{r1} + h_{i1}) + \frac{C_{c1}}{\Delta t} + \frac{1}{\alpha_1} = -\frac{1}{R_{r1}} + \frac{1}{R_{i1}} + \frac{C_{c1}}{\Delta t} + \frac{1}{\alpha_1}$$

$$A_{22} = S_2 * (-h_{r2} + h_{i2}) + \frac{C_{c2}}{\Delta t} + \frac{1}{\alpha_2} = -\frac{1}{R_{r2}} + \frac{1}{R_{i2}} + \frac{C_{c2}}{\Delta t} + \frac{1}{\alpha_2}$$

$$A_{33} = S_3 * (-h_{r3} + h_{i3}) + \frac{C_{c3}}{\Delta t} + \frac{1}{\alpha_3} = -\frac{1}{R_{r3}} + \frac{1}{R_{i3}} + \frac{C_{c3}}{\Delta t} + \frac{1}{\alpha_3}$$

$$A_{44} = S_4 * (-h_{r4} + h_{i4}) + \frac{C_{c4}}{\Delta t} + \frac{1}{\alpha_4} = -\frac{1}{R_{r4}} + \frac{1}{R_{i4}} + \frac{C_{c4}}{\Delta t} + \frac{1}{\alpha_4}$$

$$A_{55} = S_5 * (-h_{r5} + h_{i5}) + \frac{C_{c5}}{\Delta t} + \frac{1}{\alpha_5} = -\frac{1}{R_{r5}} + \frac{1}{R_{i5}} + \frac{C_{c5}}{\Delta t} + \frac{1}{\alpha_5}$$

$$A_{66} = S_6 * (-h_{r6} + h_{i6}) + \frac{C_{c6}}{\Delta t} + \frac{1}{\alpha_6} = -\frac{1}{R_{r6}} + \frac{1}{R_{i6}} + \frac{C_{c6}}{\Delta t} + \frac{1}{\alpha_6}$$

$$A_{77} = \frac{C_a}{\Delta t} + Cp_a * Qp + \sum_{k=1}^6 h_{i_k} * S_k = \frac{C_a}{\Delta t} + Cp_a * D_e + \sum_{k=1}^6 \frac{1}{R_{i_k}}$$

$$A_{17} = -S_1 * (-h_{r1} + h_{i1}) = \frac{1}{R_{r1}} - \frac{1}{R_{i1}}$$

$$A_{27} = -S_2 * (-h_{r2} + h_{i2}) = \frac{1}{R_{r2}} - \frac{1}{R_{i2}}$$

$$A_{37} = -S_3 * (-h_{r3} + h_{i3}) = \frac{1}{R_{r3}} - \frac{1}{R_{i3}}$$

$$A_{47} = -S_4 * (-h_{r4} + h_{i4}) = \frac{1}{R_{r4}} - \frac{1}{R_{i4}}$$

$$A_{57} = -S_5 * (-h_{r5} + h_{i5}) = \frac{1}{R_{r5}} - \frac{1}{R_{i5}}$$

$$A_{67} = -S_6 * (-h_{r6} + h_{i6}) = \frac{1}{R_{r6}} - \frac{1}{R_{i6}}$$

$$A_{71} = -h_{i1} * S_1 = -\frac{1}{R_{i1}}$$

$$A_{72} = -h_{i2} * S_2 = -\frac{1}{R_{i2}}$$

$$A_{73} = -h_{i3} * S_3 = -\frac{1}{R_{i3}}$$

$$A_{74} = -h_{i4} * S_4 = -\frac{1}{R_{i4}}$$

$$A_{75} = -h_{i5} * S_5 = -\frac{1}{R_{i5}}$$

$$A_{76} = -h_{i6} * S_6 = -\frac{1}{R_{i6}}$$

Avec :  $R_{i_k}$  : Résistance par convection de l'air intérieur

$R_{r_k}$  : Résistance par rayonnement entre les six faces du contre-plaqué

Et les éléments du vecteur  $[E]$  sont donnés par :

$$E_1 = \frac{C_1}{\Delta t} * T_1(t-1) + T_{a,e}(t) * \frac{1}{\alpha_1}$$

$$E_2 = \frac{C_2}{\Delta t} * T_2(t-1) + T_{a,e}(t) * \frac{1}{\alpha_2}$$

$$E_3 = \frac{C_3}{\Delta t} * T_3(t-1) + T_{a,e}(t) * \frac{1}{\alpha_3}$$

$$E_4 = \frac{C_4}{\Delta t} * T_4(t-1) + T_{a,e}(t) * \frac{1}{\alpha_4}$$

$$E_5 = \frac{C_5}{\Delta t} * T_5(t-1) + T_{a,e}(t) * \frac{1}{\alpha_5}$$

$$E_6 = \frac{C_6}{\Delta t} * T_6(t-1) + T_{a,e}(t) * \frac{1}{\alpha_6}$$

$$E_7 = \frac{C_a}{\Delta t} * T_{a,i}(t-1) + T_{a,e}(t) * Cp_a * D_e + P_l$$

## 10. Schéma équivalent électrique d'une couveuse avec bac à eau

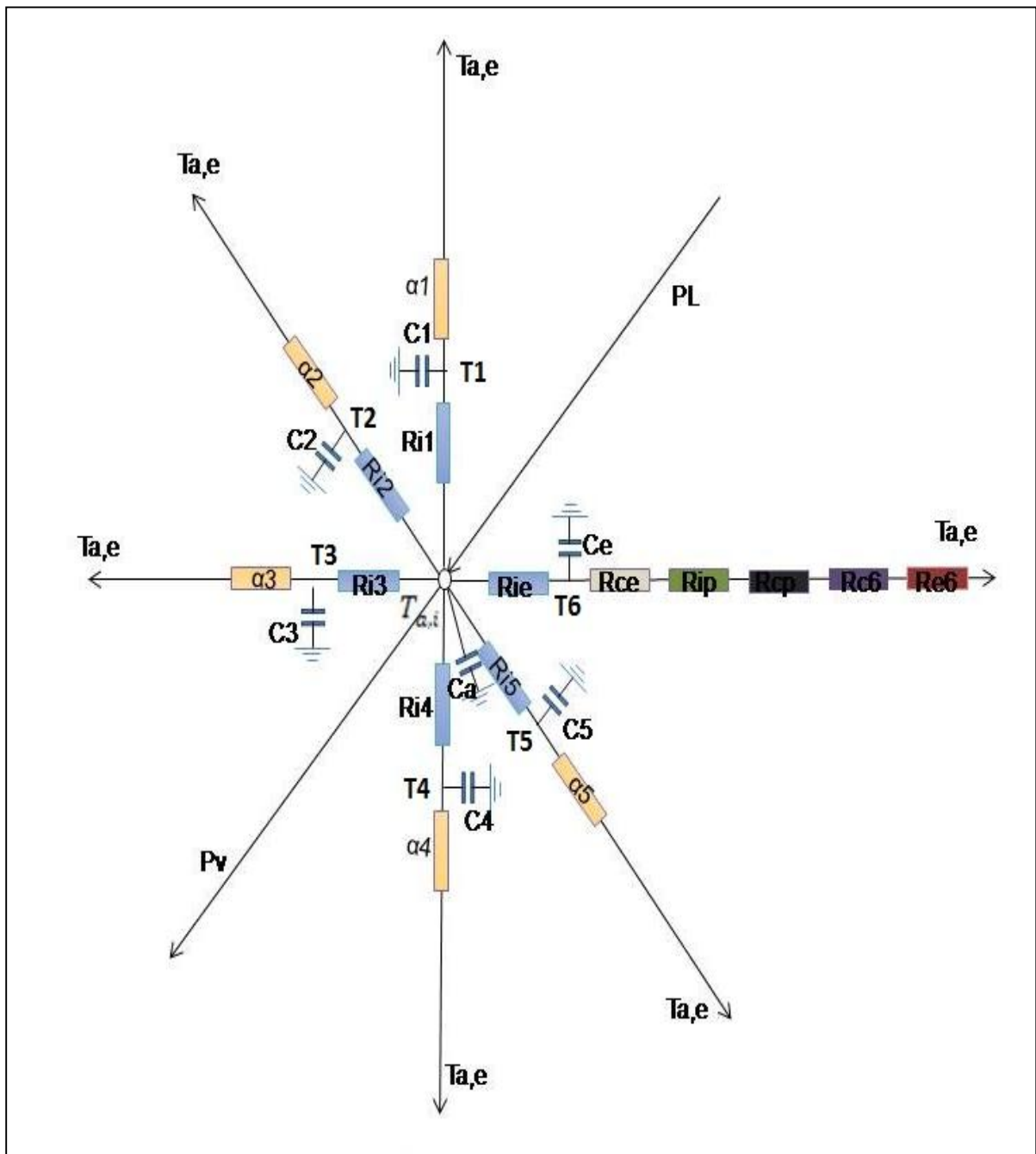


Figure 7 : Schéma équivalent électrique d'une couveuse avec bac à eau

	<b>Résistance par convection entre l'eau et l'air intérieur</b>
	<b>Résistance par conduction de l'eau</b>
	<b>Résistance par convection entre l'eau et le plastique</b>
	<b>Résistance par conduction du plastique</b>

D'après l'équation (31) : la résistance équivalente  $\alpha_6$  devient :

$$\alpha_6 = R_{ce} + R_{ip} + R_{cp} + R_{c_6} + R_{e_6} \quad (36)$$

#### Mise en équation du modèle en tenant compte le bac à eau

Après avoir écrit les différentes équations en chaque nœud de la figure 7, et en utilisant la méthode de discrétisation vers l'arrière, la même forme matricielle que représente l'équation 34 a été obtenue :

$$[A] * [T(t)] = [B.T(t-1)] + Y(t)[C] + [D] \quad (37)$$

#### Remarques

Dans la résolution de l'équation matricielle, toutes les expressions des éléments de la matrice dans le modèle sans bac à eau et celui du modèle avec bac à eau sont les mêmes, sauf dans ce dernier, les expressions suivantes vont changer telles que :

- $\alpha_6$  est remplacée par l'équation (36)
- La résistance par convection entre l'air intérieur et le contre-plaqué  **$R_{i_6}$  est remplacée par  $R_{i_e}$**  où  $R_{i_e}$  la résistance par convection entre l'eau et l'air intérieur et donnée par :

$$R_{i_e} = \frac{1}{h_i * S} \quad (38)$$

- La résistance par rayonnement du contre-plaqué  $R_{r_6}$  est remplacée par la résistance par rayonnement de l'eau  $R_{r_e}$  qui est donnée par :

$$R_{r_e} = \frac{1}{\sigma * \varepsilon * S * (T_{a,i}^2 + T_6^2)(T_{a,i} + T_6)} \quad (39)$$

Avec  $\varepsilon$  l'émissivité de l'eau

- La capacité d'inertie du contre-plaqué  $C_6$  est remplacée par la capacité d'inertie de l'eau  $C_e$  qui est exprimée par :

$$C_e = \rho_e * e * S * Cp_e \quad (40)$$

Avec :

$\rho_e$  : Masse volumique de l'eau ( $Kg/m^3$ )

$e$  : Épaisseur de l'eau ( $m$ )

$Cp_e$  : Chaleur spécifique de l'eau ( $Wh.kg^{-1}.K^{-1}$ )

## 11. Organigramme

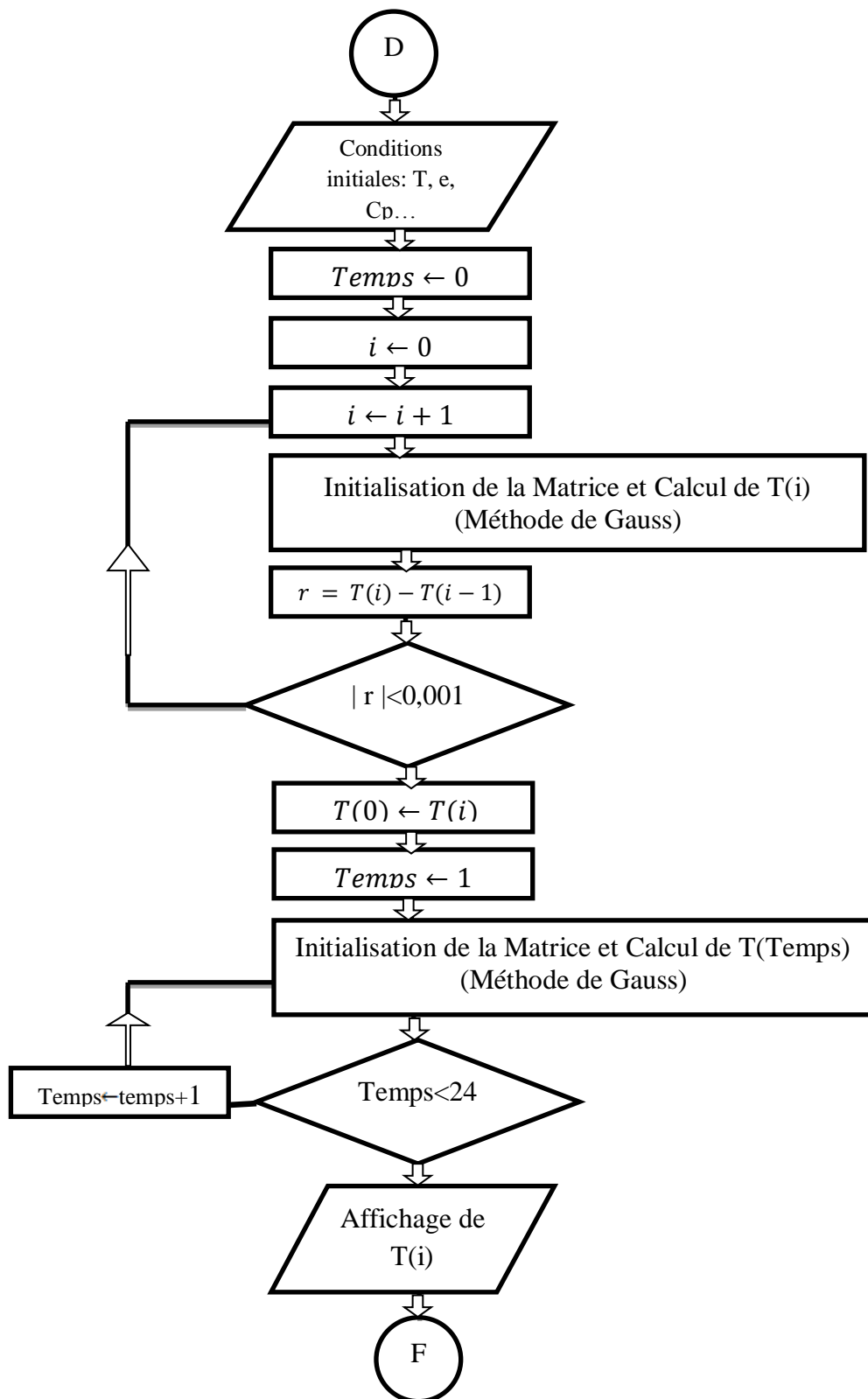


Figure 8: Organigramme

L'organigramme affiché par la figure 8 est divisé en quatre (4) étapes :

Initialisation de tous les paramètres de calcul comme la température intérieure, la température extérieure, et les différentes constantes caractéristiques des matériaux utilisés pour la couveuse : les masses volumiques, les coefficients de convection et conduction...

A l'instant  $t=0$  ; initialisation des éléments de la matrice et celle du second membre, puis calcul des températures à la surface et celle de l'intérieur de la couveuse, jusqu'à ce que le résultat soit proche de l'intervalle de température nécessaire pour l'incubation des œufs. C'est-à-dire : calcul de la valeur absolue de la différence de température entre deux moments successifs. Ce calcul va se terminer lorsque cette différence est inférieure à  $r = 10^{-3}$ .

Dans cette étude, la température de l'air dans le volume intérieur est supposée uniforme.

A l'instant  $t=1h$  à  $24h$  ; réinitialisation des éléments de la matrice et celle du second membre, puis calcul des températures à la surface et celle de l'intérieur de la couveuse, puis calcul de la température intérieure en fonction de sa valeur précédente et à chaque changement de la température extérieure avec un pas de une heure pendant 24 heures.

Affichage des résultats.

## CHAPITRE II : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Dans le lancement du programme sous *Turbo C++* et la simulation au *Design Builder*, le volume a été fixé de  $0,04 \text{ m}^3$  tandis que la puissance de la lampe a été varié de 0 à 120 Watts par étape de 40 Watts pendant 24 heures.

### 1. Essai de validation de la programmation en *Turbo C++* par le logiciel *Design Builder*

#### 1.1. Résultats provenant de la modélisation sous *Turbo C++* (Couveuse sans bac à eau)

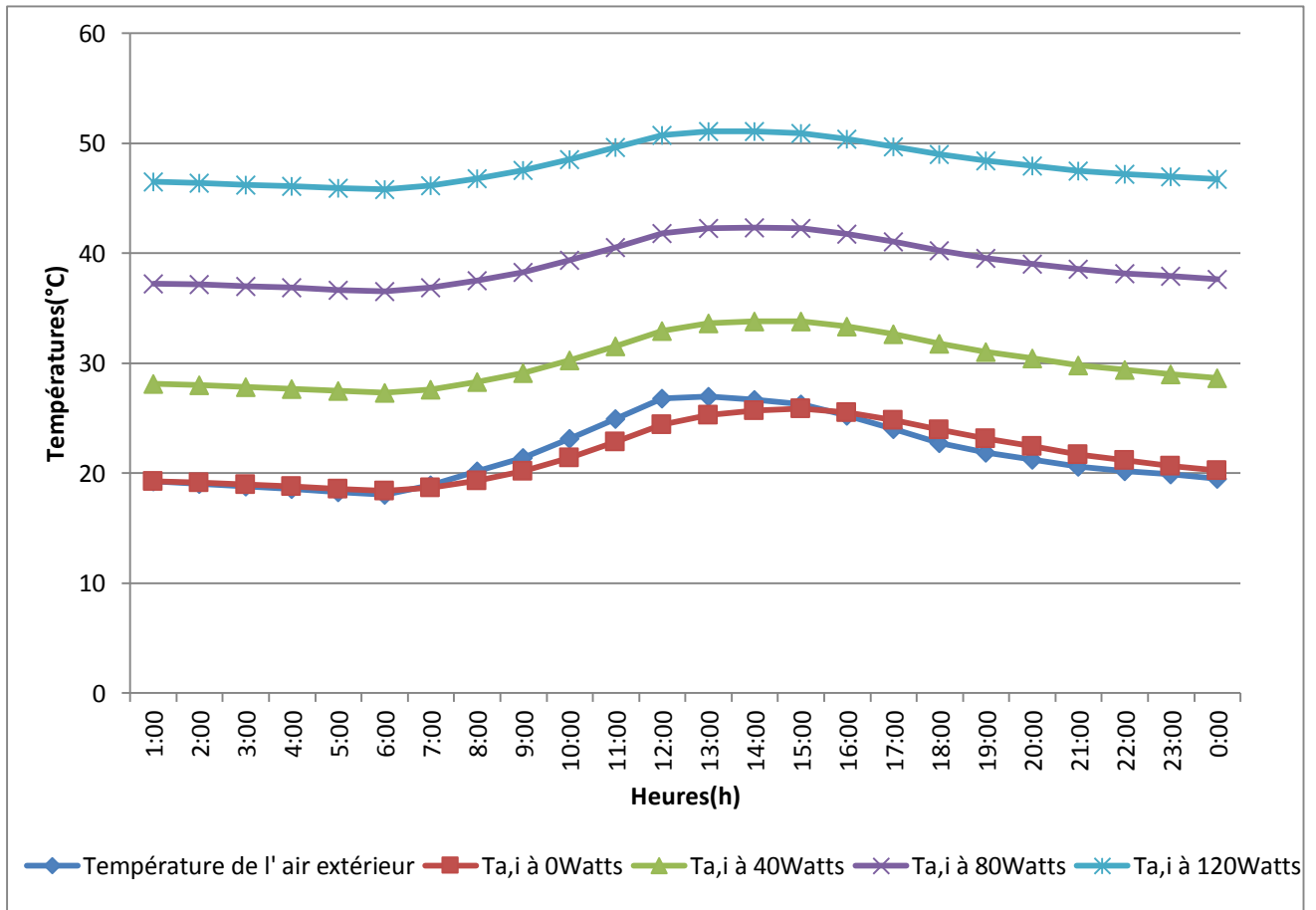


Figure 9 : Courbes de température intérieure d'une couveuse sous *Turbo C++*

$T_{a,i}$  : température de l'air intérieur de la couveuse



D'après la figure 9, toutes les courbes ont la même forme.

La température de l'air extérieur présente un maximum à 12h, due à la température la plus élevée de la journée.

Par contre les températures de l'air intérieur présentent un maximum à 14h, à cause de la résistance thermique du contre-plaqué.

Lorsque la puissance a été augmentée, les niveaux de la courbe augmentent aussi, c'est-à-dire :

D'une part, pendant l'absence de l'ampoule (la puissance égale à 0Watt), la température intérieure se rapproche bien avec la température extérieure en une journée.

Alors pour ces deux courbes (courbe colorée en bleu et en rouge) peuvent se diviser en trois (3) parties :

Partie 1 : à partir de 1h jusqu'à 7h du matin, les deux températures ont presque la même valeur puisque, le flux thermique à l'intérieur et à l'extérieur de la couveuse sont identiques.

Partie 2 : à partir de 8h jusqu'à 16h, les températures ont augmenté en même temps. Tels que : l'allure de la température extérieure a été au-dessus de la température intérieure. A cause de la résistance thermique du contre-plaqué, la température dans la couveuse diminue.

Partie 3 : mais à partir de 17h, les températures ont diminué en même temps. Tels que : l'allure de la température extérieure a été au-dessous de la température intérieure, due à la chaleur emmagasinée du contre-plaqué, tel que lors de la décharge, ce flux de chaleur est emmagasiné par le système. D'où la température intérieure ne suit pas directement l'allure de la température extérieure, grâce à la capacité thermique du matériau.

D'autre part, en présence de l'ampoule allumée, c'est-à-dire : la puissance est différente de 0Watt. Chaque courbe de température intérieure a la même allure, mais de niveau différent: quand la puissance augmente, la température augmente aussi.

L'interprétation de ces courbes est identique à celle de la puissance égale à 0Watt.

## 1.2. Résultats provenant de la simulation par le Design Builder (Couveuse sans bac à eau)

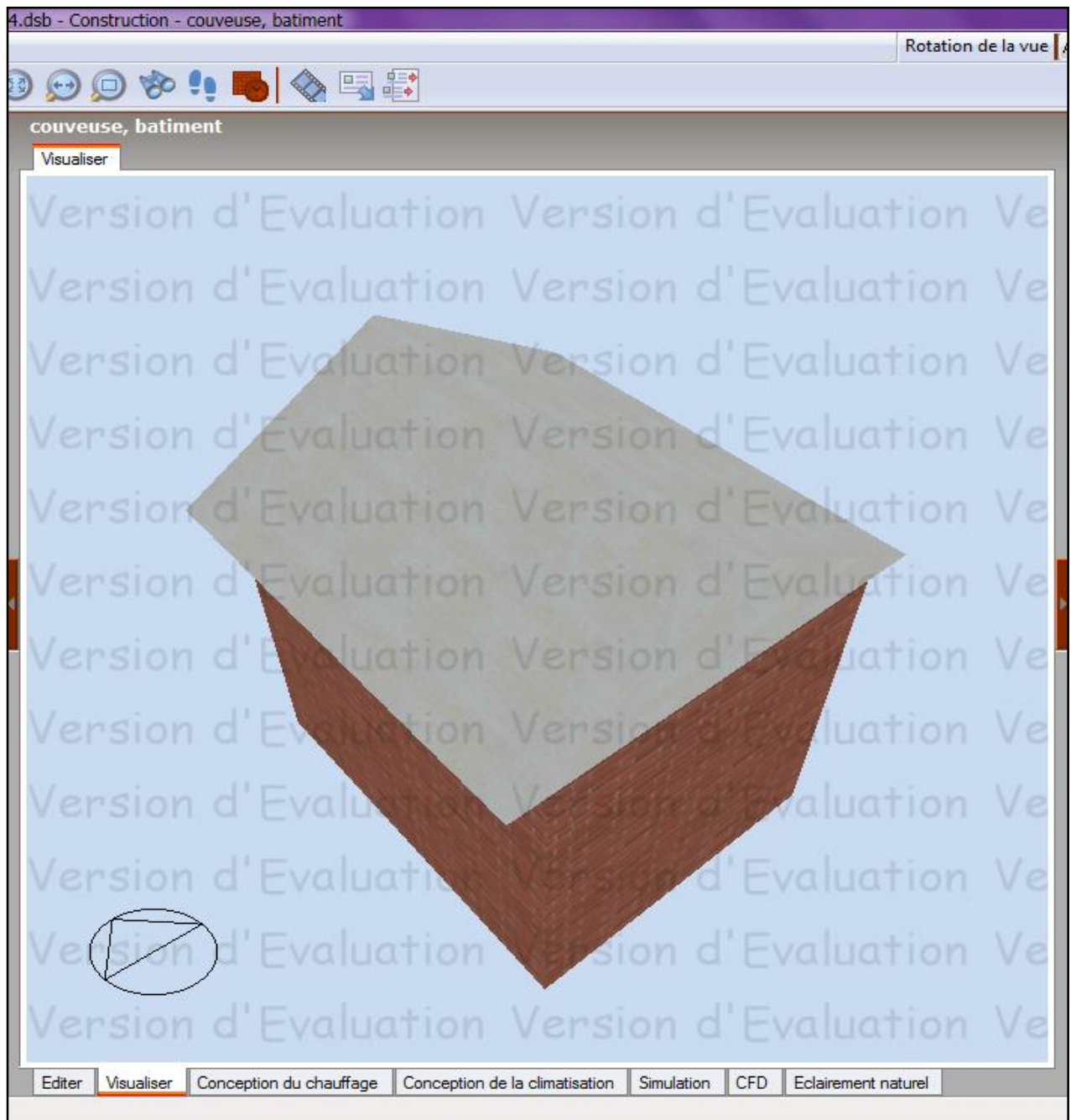


Figure 10 : Bâtiment contenant la couveuse

La figure 10 représente le schéma de la maison construit dans le logiciel *Design Builder* où l'on a mis la couveuse affichée par le schéma ci-après.

Cette maison est construite par des <<blocs de composants >> pour que la couveuse soit cachée dans l'ombre et ne soit pas directement à l'exposé du vent et du soleil. En effet, les résistances thermiques de ces blocs n'interviennent pas dans la simulation de la couveuse.

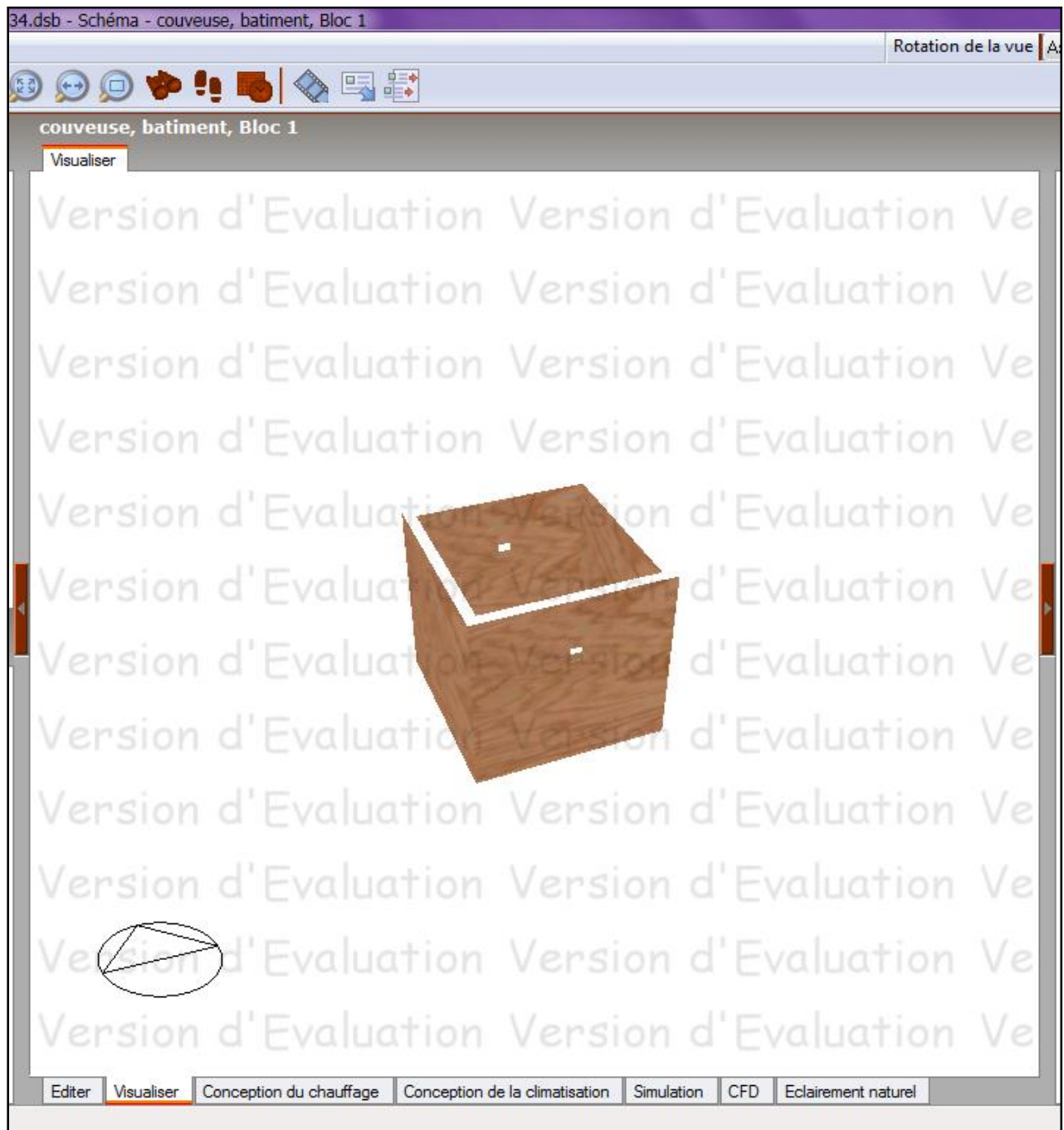


Figure 11 : la couveuse construite dans le *Design Builder*

La figure 11 affiche le schéma d'une couveuse tracé dans le logiciel *Design Builder*. Ce schéma est construit par des <<blocs de bâtiments>>, donc tous les échanges thermiques à l'intérieur et à l'extérieur de la couveuse sont tenus comptes dans la simulation.

A chaque simulation, la puissance de l'ampoule incandescente a été changée entre 0Watt à 120Watts par étape de 40Watts en une journée.

Les courbes suivantes ont été obtenues :

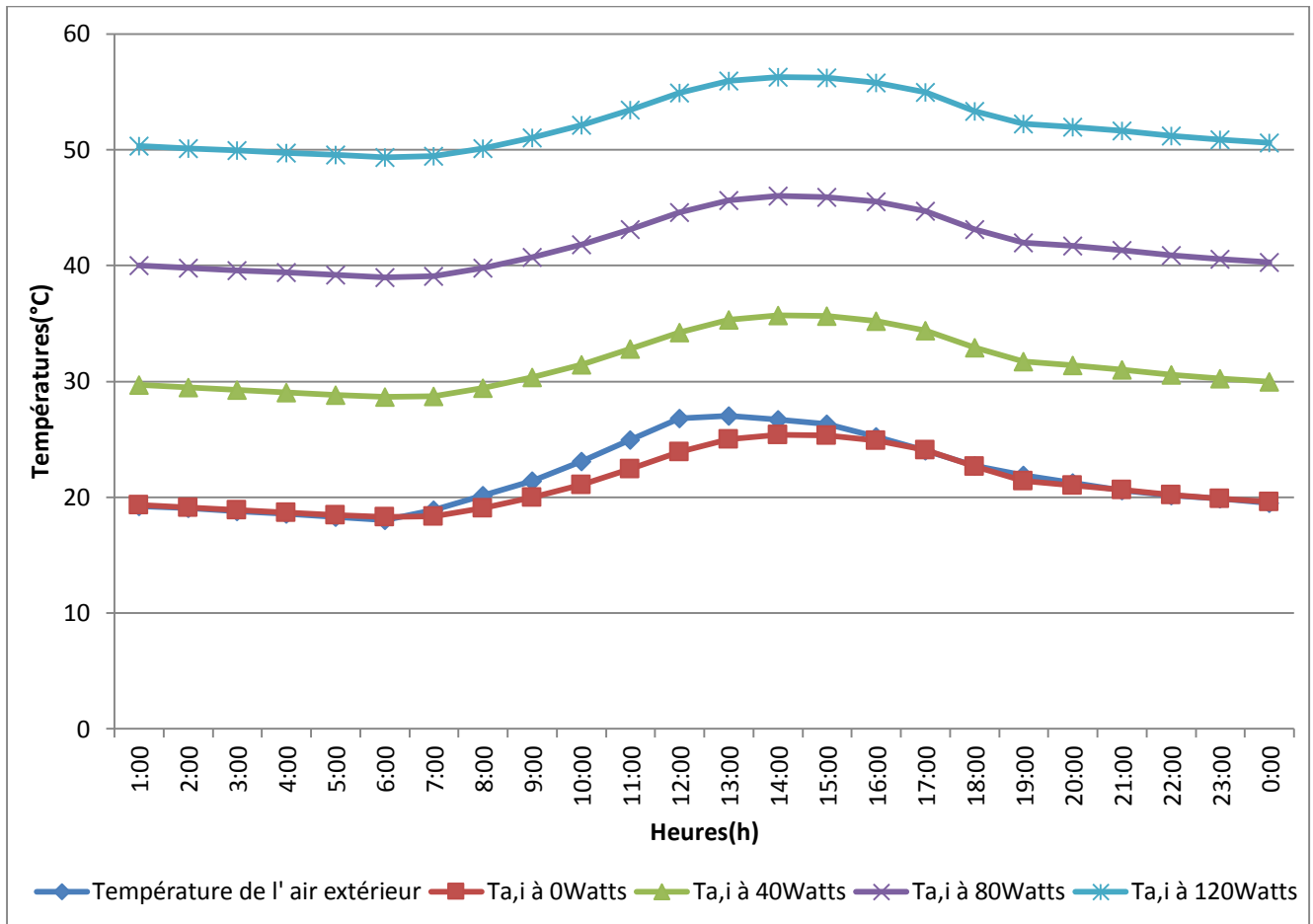


Figure 12 : Courbes de température intérieure d'une couveuse sous *Design Builder*

**$T_{a,i}$  : température intérieure de la couveuse**

D'après la figure 12, toutes les courbes ont la même forme.

Ces courbes présentent des maximums à l'instant  $t = 14$ heures, due à la résistance thermique du contre-plaqué.

Lorsque la puissance a été augmentée, les niveaux de la courbe augmentent aussi. Alors c'est la même interprétation à celle de la figure 9, mais la façon de représentation graphique qui a été différente.

### 1.3. Comparaison des résultats et validation du modèle en Turbo C++

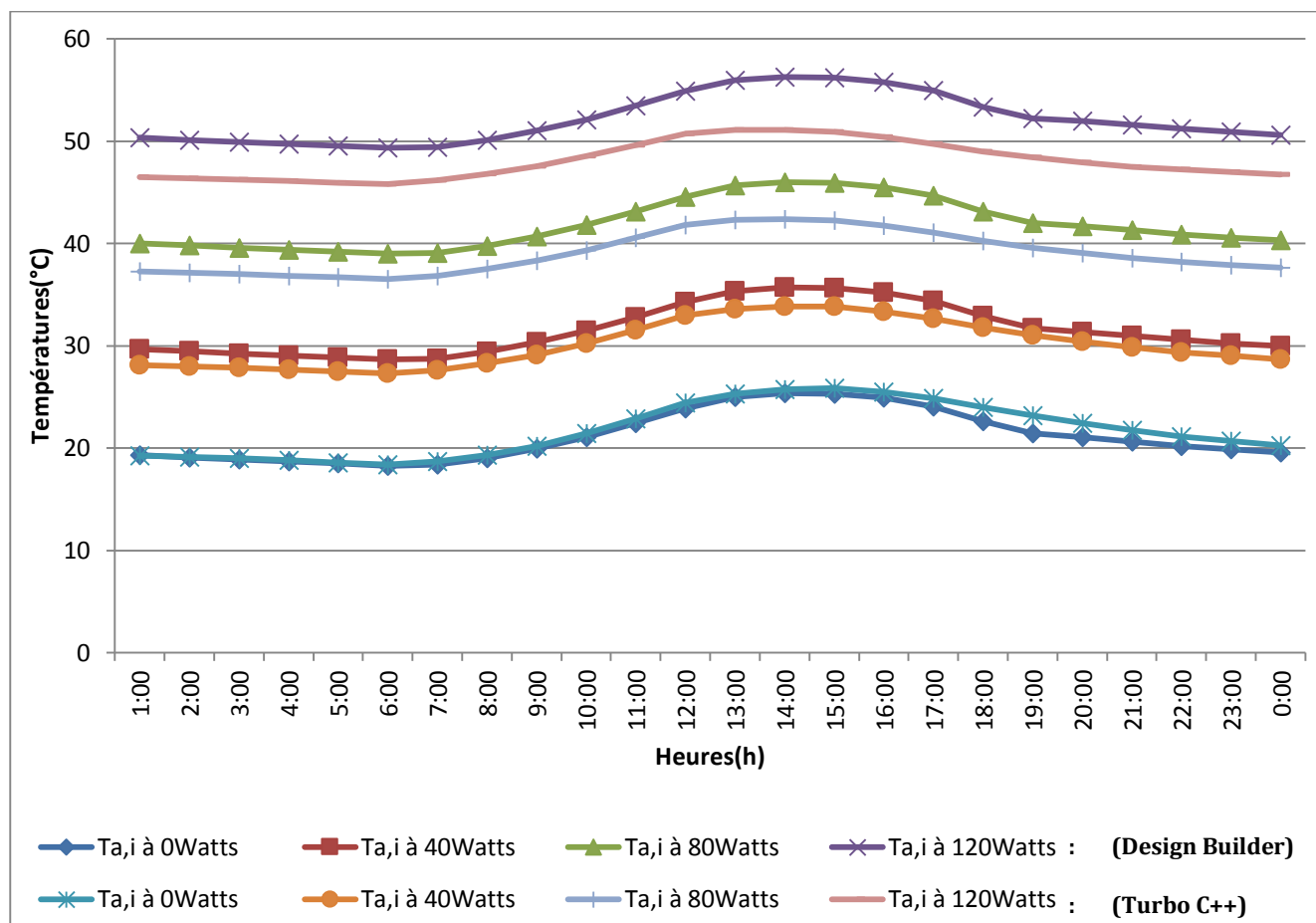


Figure 13 : Courbes de validation du résultat

$T_{a,i}$ : Température intérieure de la couveuse

D'après la figure 13, les courbes de températures ont les mêmes allures.

Jusqu'à 11h du matin, les températures calculées sous *Turbo C++* et les températures simulées par le logiciel *Design Builder* sont presque confondues.

Mais à partir de 12h chaque couple de courbes va s'écarter peu à peu. Tels que les résultats donnés par le *Design Builder* sont supérieurs à celui des résultats calculés sous *Turbo C++*. Cet écart est dû à la méthode mathématique utilisée.

Dans le *Turbo C++*, l'analogie Thermodynamique-électricité a été utilisée pour la programmation de température tandis que l'Energie Plus a été simulée le modèle tracé dans le *Design Builder*.

### Pourcentage de l'écart de température

A l'instant  $t = 17$  h et pour la puissance 120Watts où cet écart est maximal dans cet étude, la température donnée par *le Design Builder* et *le Turbo C++* sont respectivement égales à 55,77822°C et 50,40103°C.

Cet écart donné par :

$$Ecart(\%) = \frac{55,77822 - 50,40103}{55,77822} = 9,64030$$

L'écart entre les deux résultats est donc environ 10%.

### 1.4. Conclusion

La modélisation sous *Turbo C++* est validée à 10% près au maximum. Alors ce décalage est acceptable. Cette modélisation a été utilisée pour la suite.

## 2. Exploitation de la modélisation

### 2.1. Comparaison des résultats pour une couveuse sans et avec bac à eau

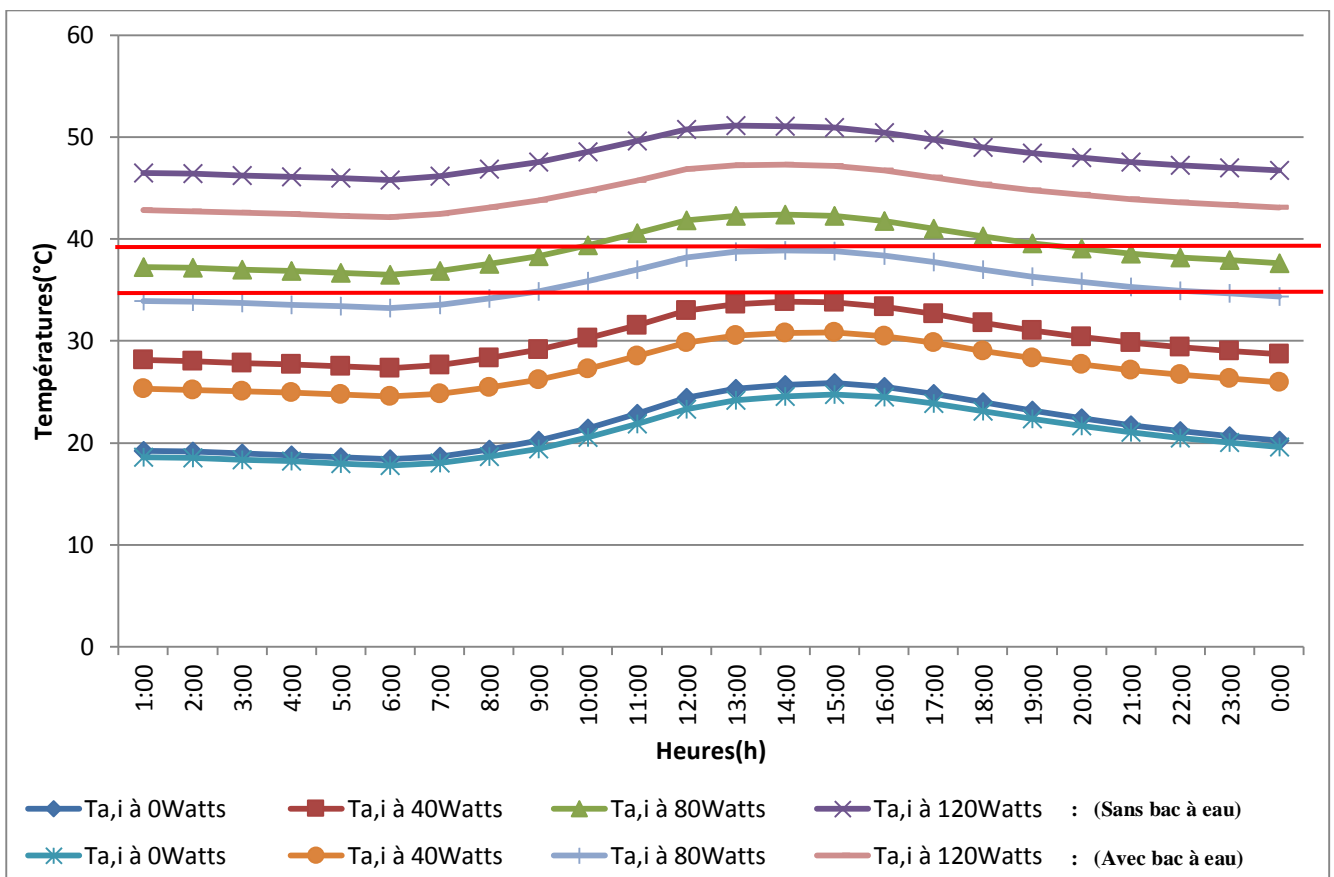


Figure 14 : Courbes de comparaisons des températures intérieures

D'après la figure 14, les courbes de températures ont les mêmes allures.

En premier lieu, pendant l'absence de l'ampoule (Puissance = 0Watt) en une journée, les deux courbes sont confondues.

Ensuite, quand la puissance de l'ampoule a été variée (Puissance différent de 0 Watt), chaque couple de courbe à même valeur de puissance, s'écarte telle que la température de la couveuse avec bac à eau est inférieure par rapport à celle qui ne contient pas de l'eau.

Cet écart a été dû à la résistance par convection entre l'eau et l'air intérieur.

Donc, la température intérieure diminue lorsque le bac à eau a été mis dans la couveuse.

Les deux lignes droites sur la figure 14 montrent l'intervalle de température de confort à la couveuse. Dans cette figure, la puissance 80Watts est la plus proche de la puissance nécessaire à la couveuse.

## **2.2. Effet du bac à eau au niveau de la couveuse**

Pour mieux connaître l'effet du bac à eau, il suffit de déterminer les effectifs des températures comprises entre [36°C-39,4°C] durant 24h en fonction de la puissance de la lampe [10 à 120Watts].

Tableau 1: Effectifs des températures de la couveuse sans bac à eau

Puissances (Watts)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Effectifs	0	0	0	0	0	7	7	15	5	0	0	0

Tableau 2: Effectifs des températures de la couveuse avec bac à eau

Puissances (Watts)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Effectifs	0	0	0	0	0	0	5	9	13	12	0	0

Les tableaux 1 et 2 donnent les effectifs des températures de l'air intérieur dans la couveuse sans et avec bac à eau, ils sont tirés chacun dans le résultat des températures en fonction de la puissance durant 24 heures (voir annexe V), en utilisant les formules sous Excel.

Pour un même volume de couveuse égale à  $0,04 \text{ m}^3$ . Le tableau 1 montre que l'effectif de températures à des puissances inférieures ou égales à 50Watts est égal à 0, et d'effectif maximal égal à 15 correspondant à l'ampoule 80Watts. Tandis que pour le tableau 2 c'est-à-dire, la couveuse avec bac à eau, l'effectif de températures à des puissances inférieures ou

égales à 60Watts est égal à 0 et d'effectif maximal égal à 13 correspondant à l'ampoule 90Watts.

En effet, le bac à eau n'a aucune influence sur la température de la couveuse pour une puissance inférieure ou égale à 60Watts.

Dans ces deux tableaux, les effectifs maximaux 9 et 15 correspondent à la même puissance égale à 80Watts.

Mais pour que la couveuse soit bonne, il est nécessaire d'avoir un effectif de température égale à 24 entre l'intervalle voulu.

### **2.3. Compromis pour que toutes les températures soient dans l'intervalle nécessaire**

En principe, une couveuse est bonne, si la température est stable c'est-à-dire entre l'intervalle 36°C à 39,4°C.

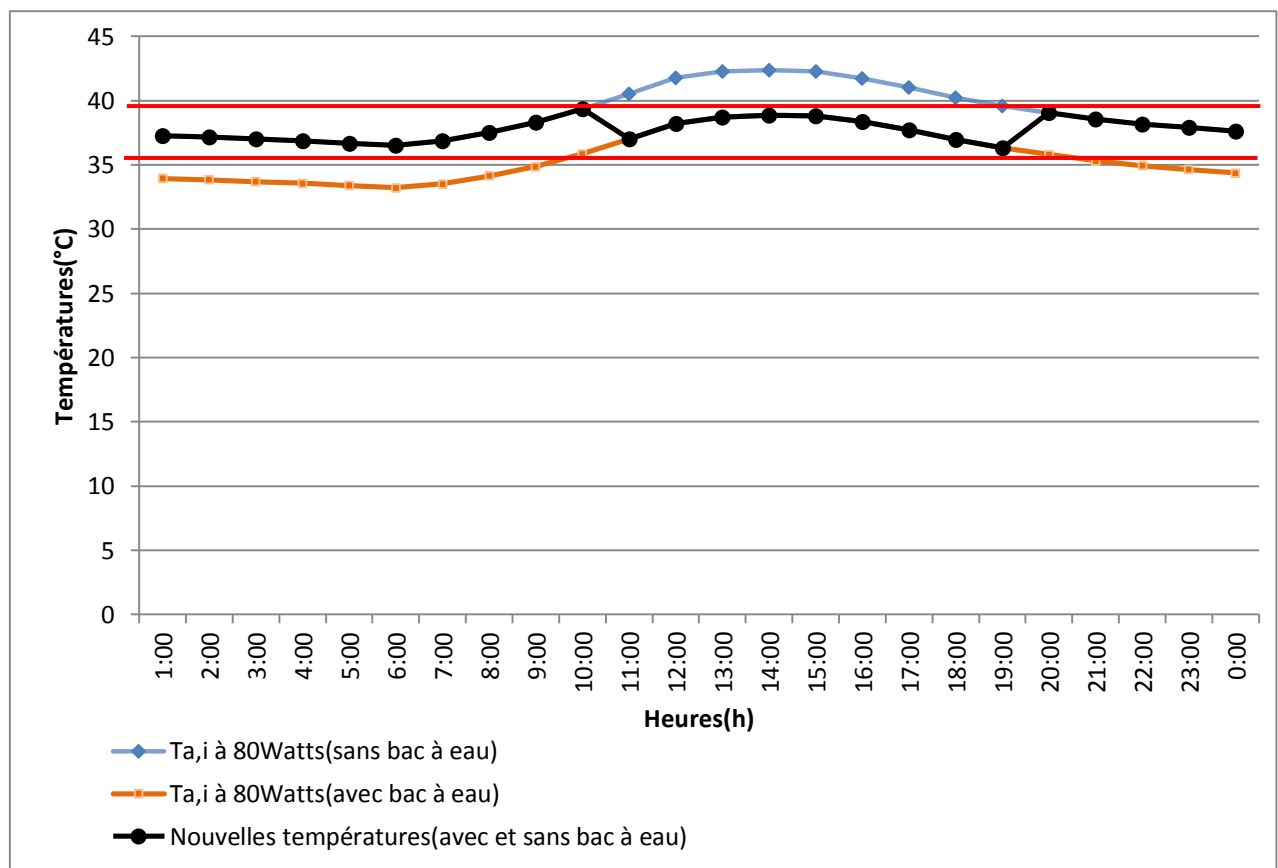


Figure 15 : Courbe de température intérieure d'une couveuse après le changement  
Pour que toutes les températures soient dans cet intervalle, deux choses doivent être faites :



Au moment où la température intérieure de la couveuse est très élevée c'est-à-dire que la température atteint le 39,4°C entre l'intervalle de **10h à 19h**, le bac à eau doit y être introduit afin de diminuer la température.

Par contre, lorsque cette température intérieure est inférieure à 36°C c'est-à-dire à partir de **19h du soir jusqu'à 10h du matin**, il est nécessaire de retirer le bac à eau dans la couveuse afin d'augmenter la température.

Dans le cas où la température intérieure de la couveuse sans bac à eau et celle de la couveuse avec bac à eau sont en même temps incluses dans l'intervalle [36°C - 39,4°C], la température la plus élevée doit être prise comme valeur utile.

### **3. Détermination de la puissance de la lampe en fonction du volume de la couveuse**

#### **3.1. Principe**

Le volume  $v$  de la couveuse a été varié entre 0,03 à 0,08  $m^3$  et la puissance de l'ampoule a été variée entre 40 à 140Watts à chaque changement.

Le tableau suivant a été obtenu :

Tableau 3: Effectifs des températures de l'air dans la couveuse suivant la valeur de puissance de l'ampoule en fonction du volume

	40W	50W	60W	70W	80W	90W	100W	110W	120W	130W	140W
<i>Pour <math>v = 0,03m^3</math></i>	0	6	9	<b>13</b>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Pour <math>v = 0,04m^3</math></i>	0	0	7	7	<b>15</b>	5	0	0	0	0	0
<i>Pour <math>v = 0,05m^3</math></i>	0	0	3	8	7	<b>16</b>	9	0	0	0	0
<i>Pour <math>v = 0,06m^3</math></i>	0	0	0	5	8	9	<b>16</b>	10	0	0	0
<i>Pour <math>v = 0,07m^3</math></i>	0	0	0	0	6	9	9	<b>16</b>	11	0	0
<i>Pour <math>v = 0,08m^3</math></i>	0	0	0	0	3	6	9	10	<b>16</b>	11	1

Le tableau 3 donne les effectifs des températures de l'air dans la couveuse sans bac à eau, ils sont tirés chacun dans les résultats des températures en fonction de la puissance de la lampe durant 24 heures (voir annexe V), en utilisant les formules sous Excel.

Dans ce tableau, l'effectif égal à 0 veut dire que la température de la couveuse ne se trouve pas dans l'intervalle [36°C à 39,4°].

Les chiffres en gras dans ce tableau représentent les effectifs maximaux de température nécessaire à la couveuse selon la valeur de la puissance correspondant au volume  $v$ .

Plus ses effectifs sont nombreux, plus la puissance utilisée est bonne. Donc pour déterminer la puissance de l'ampoule en fonction du volume, il suffit d'avoir l'effectif maximal de température.

Le tableau 3 est devenu :

Tableau 4: Evolution de la puissance en fonction du volume de la couveuse.

<b>Puissances (Watts)</b>	70	80	90	100	110	120
<b>Volumes (<math>m^3</math>)</b>	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08

### 3.2. Résultat

En faisant l'ajustement linéaire entre la puissance et le volume. La courbe suivant a été obtenue :

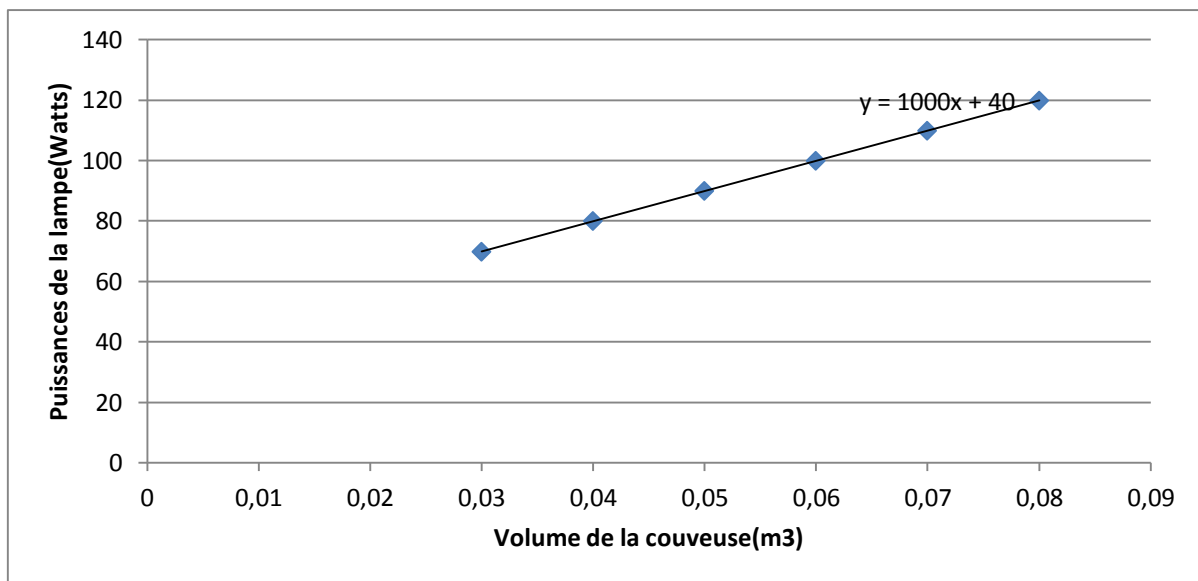


Figure 16 : Courbe représentative de l'évolution de la puissance en fonction du volume de la couveuse

Cette droite oblique croissante affichée par la figure 16 représente que la puissance varie linéairement en fonction du volume. L'équation de cette droite est obtenue après avoir fait l'ajustement sous Excel. On a :

$$P = 1000v + 40$$

(41)

La relation (41) représente l'équation linéaire de la droite qui a donné la puissance nécessaire de l'ampoule selon le volume de la couveuse à construire.

Lorsque le volume de la couveuse a été augmenté, il est nécessaire aussi d'augmenter la puissance de l'ampoule selon l'équation (41).

Une couveuse de volume  $1m^3$  a donc besoin d'une ampoule électrique de 1040Watts.

La surface moyenne occupée par un œuf de poule sur le plateau d'œufs est environ égale à  $0,0035m^2$ .

Le nombre des œufs à incuber peut se calculer par :

$$\text{Nombre des oeufs} = \frac{\text{Surface du plateau}}{\text{surface occupée par un oeuf}} \quad (42)$$

Une couveuse de capacité  $1m^3$  contenant un plateau de surface  $1m^2$  peut donc incuber 285 œufs au maximum.

## CONCLUSION

Le but de ce travail a été de modéliser la température intérieure d'une couveuse à partir des équations mathématiques. Tel que, le principe a été de construire le schéma analogique thermique-électrique. Ensuite, écrire les équations est nécessaire afin d'obtenir la forme matricielle. Puis, cette équation matricielle a été résolue par la méthode de *Gauss* après avoir fait une itération de la température intérieure. Et la programmation a été lancée sous *Turbo C++*.

Dans cette étude, la variation de la température à l'intérieur d'une couveuse est déterminée en deux étapes.

D'une part, la modélisation de la couveuse en absence d'un bac à eau. Alors, les courbes montrant l'allure de la température intérieure en fonction du temps ont été obtenues, selon la variation de puissance à volume fixe qui est égale à  $0,04m^3$ .

Ces courbes sont validées par le logiciel *Design Builder* avec un écart de 10% près, jusqu'à 120 *Watts*.

D'autre part, lorsqu'il y a présence de bac à eau, les courbes obtenues ont été les mêmes allures, mais la température a été diminuée.

Lors de la détermination de la puissance de l'ampoule, une équation linéaire de cette puissance en fonction du volume de la couveuse a été obtenue. Alors, à partir de cette équation, on peut estimer n'importe quelle valeur de puissance.

En effet, d'après ce résultat, il est donc nécessaire d'utiliser plusieurs ampoules pour une couveuse à grande volume, afin d'y mettre de nombreux œufs. Mais dans ce cas, la couveuse consomme beaucoup d'énergie électrique.

En réalité, la température de l'air intérieur de la couveuse à étudier, est différente en chacun de ces points : la partie supérieure est plus chaude par rapport à la partie inférieure, mais la température que l'on a essayée de modéliser est au milieu. D'où l'hypothèse sur l'uniformité de l'air intérieure de la couveuse, alors cette hypothèse est trop approximative ou simplificatrice.

Enfin, pour élaborer une nouvelle recherche, l'utilisation de l'énergie solaire peut évoluer ou moderniser une autre couveuse, afin de minimiser la consommation, et pour bien préciser de la température intérieure dans le volume, la méthode des éléments finis peut donner une meilleure précision de ces températures.

## WEBOGRAPIHIES

- [1] [http://gsite.univ-provence.fr/gsite/Local/sft/dir/user-3775/documents/actes/congres\\_2011/Communications/117.pdf](http://gsite.univ-provence.fr/gsite/Local/sft/dir/user-3775/documents/actes/congres_2011/Communications/117.pdf)
- [2] <http://www.google.com/imgres?imgurl=http://i42.servimg.com/u/f42/11/82/38/69/00221.jpg&imgrefurl=http://serama.forumgratuit.org/t621-couveuse-maison&h=480&w=640&tbnid=8w5A-y7ynAMABM:&zoom=1&docid=-Nc54RrVt-9tDM&ei=PZ92VYryAsWtsgGaiYLYDQ&tbn=isch&ved=0CB4QMygEMAQ&biw=1279&bih=729>
- [3] <http://www.erails.net/images/cote-divoire/euphry/materiel-et-intrant/file/INCUBATION%20DES%20EOUFS%20.pdf>
- [4] <http://www.conrad.fr/ce/fr/product/189330/Ventilateur-L-x-l-x-h-35-x-35-x-75-mm-5-VDC-80-mA-SEPA-HYB35C05PAD-113531009/?ref=detview1&rt=detview1&rb=1>
- [5] <http://www.ovo-site.net/topic/>
- [6] <http://www.erails.net/images/cote-divoire/euphry/materiel-et-intrant/file/INCUBATION%20DES%20EOUFS%20.pdf>
- [7] <http://fr.wikihow.com/couver-des-%C5%93ufs-de-poule>
- [8] <http://www.designbuilder.co.uk/helpv3.4/>
- [9] [http://www.lmd.jussieu.fr/~jldufres/Manip/annexe-condensation\\_RDenis.pdf](http://www.lmd.jussieu.fr/~jldufres/Manip/annexe-condensation_RDenis.pdf)
- [10] <http://docinsa.insa-lyon.fr/polycop/download.php?id=160504&id2=4>
- [11] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Rayonnement\\_thermique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Rayonnement_thermique)
- [12] <http://www.afriquescience.info/docannexe.php?id=1354>
- [13] [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather\\_data3.cfm/region=1\\_africa\\_wmo\\_region\\_1/country=MDG/cname=Madagascar](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=1_africa_wmo_region_1/country=MDG/cname=Madagascar)
- [14] <http://www.ovo-site.net/accueil/index.html>
- [15] [http://www.ifad.org/lrkm/pub/hatchery\\_f.pdf](http://www.ifad.org/lrkm/pub/hatchery_f.pdf)

# ANNEXES

## **Annexe I : Historique et généralité**

Au paravent, ce sont les Chinois, et les Egyptiens qui ont fabriqué les machines incubatrices ou couveuses artificielles comportant au-dessous des fours chauffés. Ces machines étaient de véritables constructions. Plusieurs milliers d'œufs pouvaient être incubés dans ces machines avec un contrôleur de température. Une machine était occupée par un seul homme et 80% des œufs couvés ont été éclos comme résultat.

Après l'invention d'un thermomètre par le Français Réaumur, il s'est intéressé à cette incubation et il a obtenu un grand succès. Mais M. Dimitri Liakhoff s'est servi d'une couveuse à pétrole durant la moitié du XIXe siècle, et il a réussi à donner des éclosions fortes satisfaisantes. [14]

De nos jours, il existe encore des couveuses à différent type de modèle. Tel que la couveuse à pétrole, à gaz ; mais les incubateurs sont presque fonctionnés à l'électricité. Chaque type d'incubateurs est presque le même principe de fonctionnement. Dont le boîtier isolant contenant principalement une source chaleur réglable par un thermostat. Et l'eau était utilisée comme source d'humidité, des trous pour renouveler l'air intérieur et le retournement des œufs peut être fait soit manuellement, soit en utilisant des organes mécaniques. Mais il y a deux types d'incubateur : statique et dynamique.

D'une part, les incubateurs sont dites statiques lorsque la source de la chaleur est placée en haut pour le modèle chauffé par une résistance, ou par une lampe incandescente. Dont la partie supérieure est plus chaude par rapport à la partie inférieure pour les modèles électriques. C'est-à-dire la température d'air à l'intérieur d'une couveuse n'est pas la même en général. D'où, ils ne contiennent qu'un seul plateau d'œufs. Mais, contrairement pour le cas du modèle à gaz ou à pétrole, la chaleur est distribuée directement sous l'action d'une flamme permanente et commandée par un thermostat mécanique ou sous l'action d'un réservoir d'eau. [14]

D'autre part, pour le modèle dynamique, la source de chaleur ne s'applique pas directement à l'intérieur de la couveuse. Mais peut s'appliquer par l'intermédiaire d'un autre mécanisme. Par exemple à l'aide d'un ventilateur ou d'un souffleur. De ce fait, la température d'air intérieur est généralement uniforme. Alors, quelques plateaux d'œufs peuvent y ajouter [14].

D'après les chercheurs, il existe plusieurs méthodes pour déterminer la température intérieure d'un endroit comme les bâtiments, les fours, les séchages ... et même les couveuses.

#### Méthode de Bond Graph [1]

Selon la modélisation thermique d'un bâtiment mono zone avec les Bond graphs, il s'agit d'un langage basé sur les analogies et les échanges énergétiques dans le système.

D'après ses modèles, les parois sont unidimensionnels dont les matériaux sont isotropes et homogènes.

L'objectif est d'étudier le transfert de chaleur à travers deux types de parois : cas d'un Mur avec condition de Fourier et cas d'une dalle avec des conditions de Fourier et de Dirichlet.

Alors, il a suivi deux étapes différentes: décomposer la paroi en couche et faire apparaître les éléments de Bond Graphs dans le système.

Puis, la résolution analytique est d'utiliser la méthode de séparation de variable. Et aussi, écrire l'équation de conduction et les conditions initiales et aux limites.

Ensuite, la validation du modèle suffit de comparer le résultat de simulation à ceux de la solution analytique.

Enfin, sur l'application des Bonds graphes, ils l'ont pratiquée sur un bâtiment mono zone. Ils ont été utilisés une chaudière à gaz comme système de chauffage avec une alimentation assurée par 8 aérothermes puis , les placés en suivant le long de la toiture. Et la température interne est contrôlée par des vannes hydrostatiques où la mesure de prélèvement se fait à chaque 3 jour. Mais des vannes thermostatiques aussi contrôlent la température interne et externe du système.

#### Méthode de bac à sable [15]

Dans cette méthode, il a comme matériel utilisé des lampes à pétrole, des thermomètres, de l'eau, de la caisse en bois, du coton et des plateaux en bois ou en métal pour la construction d'une couveuse.

La fabrication de cette couveuse est comme suit : la taille de la caisse dépend du nombre d'œufs à incuber ; ensuite la partie supérieure de cette caisse ou le toit qui comporte d'un boucle d'aération ; puis la surface intérieure de la couveuse est emballée d'une couche de coton ; et on a mis successivement vers le bas les plateaux, le bac à sable et le récipient contenant de l'eau et enfin la lampe à pétrole.

Pour le fonctionnement, la lampe à pétrole est utilisée comme source de chaleur pour chauffer l'intérieur de la couveuse. Par contre l'aération est utilisée comme source froide afin

de régler les températures internes qui sont surveillées par des thermomètres. Et en cas de variation brusque de température, il a utilisé le bac à sable afin de trouver la température idéale qui est variée entre 36,5°C et 37,5°C.

Dans cette méthode, l'eau étant très utile afin de garder l'humidité à l'intérieur de l'incubateur constante. L'humidité idéale pour cette méthode est de 70% à 80%. Le résultat pour les mini-couvoirs utilisant la méthode de bac à sable a atteint de 80% jusqu'à 85%

#### Agrodok 34 [6]

Selon l'Agrodok, la méthode n'est pas très différente à celle de la méthode de bac à sable, il utilise un réservoir d'eau en place d'un bac sable et ajoute un thermostat afin de régler automatiquement la variation de température en utilisant la capsule d'éther. C'est un matériau très sensible à la chaleur.

Un Camerounais expérimenté a obtenu un résultat assez bon dans son expérience selon cette méthode. Il a incubé 50 œufs et après 21<sup>ème</sup> et 22<sup>ème</sup> jour 40 œufs sont éclos c'est à-dire 80%.



## **Annexe II : Les températures ambiantes des œufs dans une couveuse [6]**

Tableau 5: Données sur l'incubation des œufs du canard de Pékin.

<b>Jour</b>	<b>Température (°C)</b>	<b>Humidité relative (%)</b>	<b>Cuvette humide (°C)</b>	<b>Perte maximale de poids (%)</b>	<b>Retourne-ments par jour</b>
1-24	38	70	32		5
24-26	38	60	31	} -	5
26-28	37,5	80	32,6		0

Tableau 6: Données sur l'incubation des œufs de la dinde.

<b>Jour</b>	<b>Température (°C)</b>	<b>Humidité Relative (%)</b>	<b>Cuvette humide (°C)</b>	<b>Perte maximale de poids (%)</b>	<b>Retournements par jour (minimum)</b>
1-24	39,0	60	31		5
				} 12	
24-28	37,5	75	33		0

Tableau 7: Données sur l'incubation des œufs de la caille.

<b>Jour</b>	<b>Température (°C)</b>	<b>Humidité Relative (%)</b>	<b>Cuvette humide (°C)</b>	<b>Perte maximale de poids (%)</b>	<b>Retournements par jour (minimum)</b>
1-16	37,7	60	31		7
				} 21,5	
16-18	37,2	90	34		0

Tableau 8: Données sur l'incubation des œufs de la pintade.

<b>Jour</b>	<b>Température (°C)</b>	<b>Humidité relative (%)</b>	<b>Cuvette humide (°C)</b>	<b>Perte maximale de poids (%)</b>	<b>Retournements par jour (minimum)</b>
1-24	37,2	70	29,1		5
24-26	37	60	29,6	} -	5
26-28	36,8	80	32,6		0

### **Annexe III : Propriétés physiques des composants utilisés**

Les matériaux utilisés et leurs propriétés pour la construction d'une couveuse sont des données relevées dans le logiciel Design Builder [8].

Tableau 9: propriété des matériaux

	Epaisseur (m)	Conductivité (W/m.K)	Chaleur spécifique (Wh/kg.K)	Masse volumique (Kg/m3)	émissivité
Contre-plaqué	0,02	0,15	0.694	560	0,9
Plastique Polyvinylchlori de (PVC))	0,001	0,16	0.278	1380	-

Tableau 10: Propriété de l'eau et de l'air

	Conductivité (W/m.K)	Chaleur spécifique (Wh/kg.K)	Masse volumique (Kg/m3)	Coefficient de convection interne (W/m².K)	Coefficient de convection externe (W/m².K)
Eau	0,63	1.164	990	250 à 1000	
air	0,025	0.28	1,23	2,5	11

## Annexe IV : La vie des œufs durant l'incubation

Les meilleurs œufs à incuber sont les œufs ni trop petits ni trop grands.  
Avant de déposer les œufs, il est préférable de chauffer la couveuse c'est à dire attendre jusqu'à ce que la température soit stable [5].

### **4.1. Santé des œufs**

A partir des pores de la coquille, l'embryon absorbe de l'oxygène et rejette du  $CO_2$  avec de l'eau durant l'incubation [5]. Il est donc nécessaire de bien renouveler l'air intérieur de la couveuse.

### **4.2. Humidité**

L'évaporation de l'eau dans le bac à eau, l'eau contenant dans l'œuf et le taux d'humidité de l'air qui provient de l'aération de la couveuse sont le facteur de la variation du taux d'humidité [5].

L'humidité idéale dans la couveuse est de 70-80% [15].

### **4.3. Retournement des œufs [5]**

Le développement de l'embryon de l'œuf dans la couveuse est nécessaire de retourner 2 fois par jour, à partir du 3<sup>ème</sup> jusqu'au 19<sup>ème</sup> jour d'incubation.

Trois possibilités peuvent retourner les œufs : soit automatiquement, soit semi-automatiquement ou non manuellement. Tels que :

Le retournement automatique des œufs si un moteur de retournement qui marche et s'arrête sans aider à la main, à l'intérieur de la couveuse.

Le retournement semi-automatique, lorsqu'un outil mécanique est manipulé avec les mains pour retourner les œufs ensemble.

Le retournement manuel, si on retourne les œufs un à un par la main.

#### 4.4. Le mirage

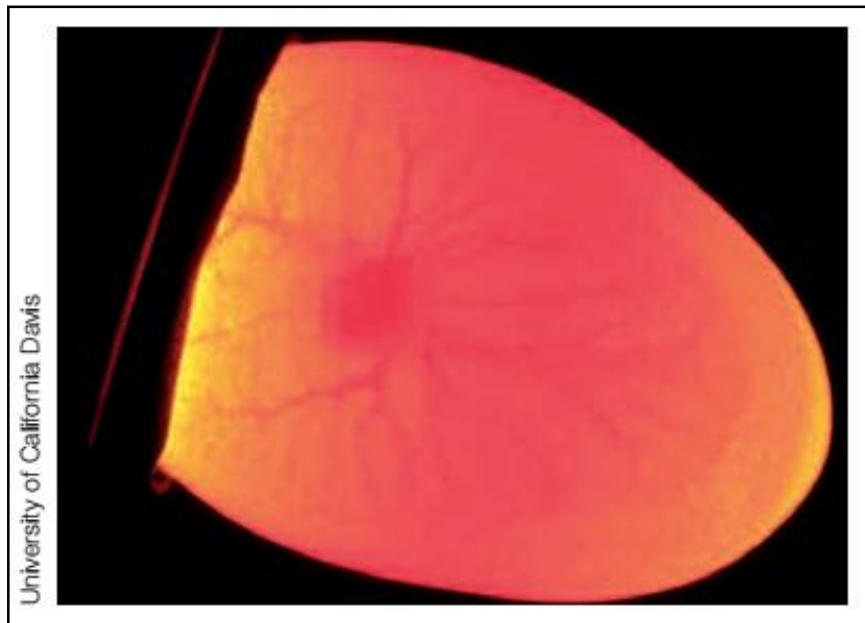


Figure 17: Vaisseaux sanguins dans l'œuf miré [15]

Le mirage est une méthode simple pour observer si l'œuf devra être continué à incuber ou non à partir du 7<sup>ème</sup> jour de l'incubation. A partir de cette méthode que l'on verra l'intérieur de l'œuf, des vaisseaux sanguins qui marquent s'il a été fécondé et ou non [5], [15].

## **Annexe V : Tableaux de résultats**

### **5.1. Températures à l'intérieur d'une couveuse de volume 0,04m<sup>3</sup> entre 40 à 120 Watts pendant 24h (avec bac à eau)**

Tableau 11 : Résultats des températures de la couveuse avec bac à eau

	40Watts	50Watts	60Watts	70Watts	80Watts	90Watts	100Watts	110Watts	120Watts
1h	25,29843	27,42566	29,56778	31,74454	33,931	36,13815	38,3537	40,57574	42,80493
2h	25,21072	27,33786	29,48001	31,65674	33,84338	36,05042	38,26599	40,48804	42,71738
3h	25,06229	27,19025	29,33368	31,51141	33,69922	35,90741	38,12418	40,34738	42,57767
4h	24,90695	27,03751	29,18378	31,36414	33,55447	35,76529	37,98462	40,21036	42,44333
5h	24,71924	26,8537	29,00381	31,18781	33,38196	35,59619	37,81888	40,04794	42,28394
6h	24,53912	26,67874	28,83374	31,02258	33,22128	35,43994	37,66678	39,89984	42,13968
7h	24,82303	26,96854	29,12921	31,32336	33,5271	35,75046	37,98184	40,21918	42,4631
8h	25,44278	27,58853	29,74924	31,94293	34,14597	36,36823	38,59817	40,83386	43,07578
9h	26,19583	28,33337	30,48587	32,67059	34,86505	37,07822	39,29895	41,52545	43,75794
10h	27,25507	29,37674	31,51343	33,68268	35,86163	38,05948	40,26541	42,47705	44,69498
11h	28,48569	30,58176	32,69397	34,83908	36,9949	39,17011	41,35388	43,54437	45,74176
12h	29,83225	31,89407	33,97369	36,08716	38,21277	40,35889	42,51477	44,67865	46,85031
13h	30,51257	32,53192	34,57175	36,64716	38,73663	40,84848	42,97201	45,10498	47,24731
14h	30,77914	32,75986	34,76407	36,80646	38,86578	40,94965	43,04752	45,15686	47,27759
15h	30,82941	32,78021	34,75824	36,77698	38,81586	40,8815	42,96344	45,05893	47,1676
16h	30,44727	32,37763	34,33881	36,34335	38,3703	40,42633	42,50052	44,58975	46,69385
17h	29,8176	31,7403	33,69641	35,69824	37,72461	39,78143	41,85767	43,95032	46,05838
18h	29,02905	30,95612	32,91879	34,9285	36,9639	39,03052	41,11731	43,22119	45,34049
19h	28,32938	30,27142	32,25012	34,27625	36,32849	38,41202	40,51566	42,63589	44,77152
20h	27,72797	29,6908	31,69003	33,73639	35,80838	37,91098	40,03284	42,17075	44,32324
21h	27,13776	29,1232	31,14417	33,21133	35,30298	37,4241	39,56357	41,71793	43,88565
22h	26,67981	28,68875	30,73184	32,81961	34,93054	37,06967	39,22562	41,3952	43,57727
23h	26,31329	28,34424	30,40762	32,51413	34,64212	36,79669	38,96692	41,14975	43,34347
24h	25,95871	28,00937	30,09058	32,21292	34,35547	36,52304	38,7052	40,89838	43,10193

**5.2. Températures intérieures en fonction de la puissance de  
l'ampoule à chaque changement du volume de la couveuse  
varié entre 0,03 à 0,08 m<sup>3</sup> pendant 24 h. (Sans bac à eau)**

**Tableau 12: Pour un volume de 0,03m<sup>3</sup>**

	40Watts	50Watts	60Watts	70Watts	80Watts	90Watts	100Watts	110Watts	120Watts
1h	29,79544	32,49972	35,21826	37,94617	40,67886	43,41446	46,14948	48,8826	51,61136
2h	29,69708	32,40161	35,12018	37,84784	40,58075	43,31625	46,05142	48,78445	51,51315
3h	29,53509	32,24133	34,96149	37,69083	40,42545	43,1626	45,89941	48,63419	51,36469
4h	29,37177	32,08185	34,80579	37,53879	40,2771	43,01773	45,75809	48,49618	51,22998
5h	29,17612	31,89157	34,62042	37,35818	40,10107	42,84607	45,5907	48,33267	51,07028
6h	28,9935	31,71561	34,45065	37,19427	39,94263	42,69299	45,44247	48,18927	50,93133
7h	29,33688	32,06625	34,80801	37,55792	40,31222	43,06796	45,82251	48,57397	51,32053
8h	30,03549	32,76352	35,50351	38,25092	41,00207	43,75436	46,50494	49,25201	51,99377
9h	30,8508	33,5658	36,2923	39,02618	41,76367	44,50205	47,23889	49,97214	52,7001
10h	31,98279	34,67535	37,37994	40,09232	42,80893	45,52701	48,24408	50,95831	53,66785
11h	33,27145	35,93033	38,60266	41,28403	43,97095	46,66049	49,35028	52,03836	54,7229
12h	34,65726	37,27268	39,90399	42,54654	45,1969	47,85171	50,50873	53,16562	55,82077
13h	35,26212	37,8262	40,40951	43,00738	45,61575	48,23148	50,85181	53,47427	56,09695
14h	35,42236	37,94403	40,48941	43,05322	45,63135	48,21991	50,81607	53,41711	56,02078
15h	35,3779	37,87143	40,39304	42,93701	45,49841	48,07349	50,65857	53,25095	55,8479
16h	34,88449	37,36209	39,87164	42,40671	44,96176	47,53268	50,11536	52,70663	55,30362
17h	34,16153	36,63904	39,15091	41,69055	44,25189	46,83023	49,42139	52,02182	54,62857
18h	33,30438	35,79511	38,32187	40,8772	43,45468	46,04944	48,65701	51,27383	53,89652
19h	32,58371	35,09851	37,64917	40,22787	42,82852	45,44562	48,0748	50,7124	53,35501
20h	31,98938	34,53192	37,10907	39,71304	42,33737	44,97675	47,62683	50,28381	52,9447
21h	31,41022	33,98007	36,5827	39,21002	41,85587	44,51492	47,18304	49,85648	52,53244
22h	30,98038	33,57712	36,20389	38,85336	41,51913	44,19641	46,88098	49,56964	52,25937
23h	30,6456	33,26584	35,91382	38,58194	41,26443	43,9566	46,65463	49,35522	52,05576
24h	30,3139	32,95425	35,61951	38,30295	40,99881	43,70285	46,41116	49,12112	51,8298

**Tableau 13: Pour un volume de 0,04m<sup>3</sup>**

	40Watts	50Watts	60Watts	70Watts	80Watts	90Watts	100Watts	110Watts	120Watts
1h	28,10791	30,37839	32,66251	34,95584	37,25677	39,56222	41,86969	44,1781	46,48636
2h	28,01328	30,28403	32,56799	34,86163	37,16217	39,46759	41,77515	44,08359	46,39182

3h	27,85361	30,12573	32,41125	34,70621	37,00845	39,31494	41,62408	43,93408	46,24359
4h	27,68897	29,96457	32,25333	34,55158	36,85684	39,1666	41,47879	43,79202	46,10449
5h	27,49173	29,77212	32,06519	34,36789	36,67734	38,99106	41,30716	43,62393	45,94
6h	27,30521	29,59146	31,89035	34,19839	36,51297	38,83157	41,1525	43,4736	45,79385
7h	27,62445	29,9173	32,22241	34,53625	36,85641	39,18018	41,50583	43,83167	46,15622
8h	28,30524	30,59741	32,90137	35,21375	37,5318	39,85312	42,17596	44,49869	46,81988
9h	29,1189	31,4003	33,69287	35,99362	38,2999	40,60941	42,92047	45,23123	47,54062
10h	30,24994	32,51135	34,78455	37,06634	39,35394	41,64533	43,93832	46,23193	48,52411
11h	31,54919	33,78058	36,0246	38,27835	40,53894	42,80414	45,07223	47,3414	49,61035
12h	32,95468	35,14688	37,35379	39,57187	41,79852	44,03143	46,26859	48,50824	50,74921
13h	33,61813	35,76361	37,92648	40,10287	42,29044	44,48636	46,68854	48,89533	51,10483
14h	33,82764	35,93341	38,05991	40,20343	42,36096	44,52942	46,70682	48,8909	51,07993
15h	33,81375	35,892	37,99469	40,11755	42,2572	44,41043	46,57492	48,74802	50,92798
16h	33,34979	35,41186	37,5014	39,61404	41,74554	43,89282	46,05267	48,22284	50,40103
17h	32,64053	34,7005	36,79053	38,90515	41,04059	43,19272	45,35883	47,5358	49,72162
18h	31,78375	33,85434	35,95609	38,08386	40,2327	42,39905	44,57932	46,77051	48,97037
19h	31,04559	33,13708	35,25986	37,40836	39,57785	41,76428	43,9642	46,17474	48,39322
20h	30,42923	32,54553	34,69238	36,86398	39,05548	41,26297	43,48297	45,71237	47,94864
21h	29,83176	31,97321	34,14377	36,33749	38,54968	40,77618	43,01389	45,25977	47,5116
22h	29,3801	31,54633	33,73972	35,95453	38,18601	40,43057	42,68475	44,94595	47,21158
23h	29,02618	31,21469	33,4281	35,66122	37,90939	40,16882	42,43658	44,70999	46,987
24h	28,68164	30,88886	33,11935	35,3674	37,62906	39,90048	42,1792	44,46234	46,74802

Tableau 14: **Pour un volume de 0,05 m<sup>3</sup>**

	40Watts	50Watts	60Watts	70Watts	80Watts	90Watts	100Watts	110Watts	120Watts
1h	26,96948	28,94659	30,93625	32,93487	34,94128	36,95258	38,96774	40,98575	43,00436
2h	26,87744	28,85468	30,8443	32,84299	34,84933	36,86078	38,87601	40,89374	42,9126
3h	26,71945	28,69809	30,68878	32,68897	34,69632	36,70923	38,72562	40,74472	42,76483
4h	26,55383	28,53534	30,52917	32,53217	34,5426	36,55817	38,57758	40,5993	42,62207
5h	26,35529	28,34119	30,33911	32,34619	34,36032	36,37973	38,40268	40,42783	42,4541
6h	26,16589	28,15729	30,16025	32,17227	34,19132	36,21527	38,24268	40,27203	42,30234
7h	26,46799	28,46552	30,4744	32,49197	34,51611	36,54498	38,57687	40,61081	42,64517
8h	27,13626	29,13345	31,14166	33,15817	35,18091	37,2081	39,23804	41,26956	43,30124

9h	27,94925	29,93665	31,93506	33,94147	35,95386	37,97067	39,99008	42,0112	44,03241
10h	29,07996	31,04977	33,03058	35,01962	37,01514	39,01514	41,01837	43,02341	45,02893
11h	30,38727	32,32974	34,28394	36,24744	38,21811	40,19412	42,17392	44,1561	46,13989
12h	31,80789	33,71454	35,63446	37,56488	39,50397	41,44974	43,40045	45,35486	47,31186
13h	32,51379	34,37747	36,25629	38,14807	40,05026	41,96103	43,87854	45,80139	47,72824
14h	32,75912	34,58542	36,42999	38,28995	40,16287	42,04645	43,93915	45,83911	47,74503
15h	32,76779	34,56757	36,38867	38,22806	40,08273	41,95044	43,8291	45,71692	47,61227
16h	32,32529	34,10907	35,91684	37,745	39,59061	41,45123	43,32425	45,20758	47,09985
17h	31,62607	33,40668	35,21344	37,04233	38,8902	40,754	42,63129	44,52008	46,41803
18h	30,76938	32,55881	34,37558	36,21555	38,07486	39,95084	41,84067	43,74188	45,65271
19h	30,01877	31,82663	33,66208	35,52069	37,39877	39,29306	41,20105	43,12003	45,04807
20h	29,38626	31,21683	33,07431	34,95419	36,85294	38,767	40,69385	42,63104	44,5762
21h	28,77527	30,62912	32,50864	34,40939	36,32758	38,26022	40,20435	42,15778	44,11823
22h	28,30747	30,18433	32,08539	34,00626	35,94324	37,89316	39,85355	41,82187	43,79636
23h	27,93954	29,8374	31,75751	33,69595	35,64902	37,61374	39,58749	41,56845	43,55432
24h	27,58475	29,50064	31,43707	33,3902	35,35651	37,33319	39,31805	41,30878	43,30383

Tableau 15 : Pour un volume de 0,06 m<sup>3</sup>

	60Watts	70Watts	80Watts	90Watts	100Watts	110Watts	120Watts	130Watts	140Watts
1h	29,67777	31,46082	33,25095	35,04727	36,84741	38,65118	40,45654	42,26315	44,07046
2h	29,58774	31,37085	33,16119	34,9574	36,75757	38,56113	40,3667	42,17331	43,98044
3h	29,43314	31,21747	33,00909	34,80633	36,60779	38,41244	40,21896	42,02685	43,83518
4h	29,27216	31,0592	32,85342	34,65335	36,45737	38,2644	40,0737	41,88394	43,69461
5h	29,08041	30,87134	32,6691	34,47235	36,27972	38,09027	39,90253	41,71606	43,52963
6h	28,89862	30,694	32,49628	34,30389	36,1156	37,92996	39,74616	41,56332	43,38061
7h	29,19904	30,99966	32,80692	34,61923	36,43524	38,25384	40,07407	41,89502	43,71603
8h	29,85761	31,65747	33,46372	35,27472	37,08914	38,90604	40,72418	42,54285	44,36139
9h	30,65244	32,44327	34,2403	36,04199	37,84714	39,65445	41,46329	43,27237	45,0813
10h	31,75104	33,52609	35,30743	37,09384	38,88388	40,67633	42,47049	44,26535	46,06018
11h	33,0152	34,76657	36,52478	38,2887	40,05682	41,82806	43,60165	45,37647	47,15183
12h	34,38269	36,1033	37,83185	39,56717	41,30786	43,05277	44,8009	46,55115	48,30295
13h	35,04282	36,72684	38,42075	40,12293	41,83188	43,54642	45,26556	46,98816	48,71344
14h	35,24768	36,90134	38,56699	40,24268	41,92712	43,61911	45,31699	47,02002	48,72723



15h	35,22583	36,85898	38,50644	40,16589	41,836	43,5148	45,20151	46,89444	48,59287
16h	34,77069	36,39255	38,0303	39,68179	41,34537	43,01913	44,70166	46,39148	48,08771
17h	34,07361	35,6951	37,33383	38,98761	40,65414	42,33173	44,01874	45,7139	47,41565
18h	33,23312	34,86414	36,51306	38,17743	39,85489	41,54395	43,24249	44,94904	46,66226
19h	32,50659	34,15457	35,82046	37,50171	39,19611	40,90149	42,61612	44,33862	46,06729
20h	31,90292	33,57089	35,25598	36,95584	38,66821	40,39084	42,12213	43,86038	45,60431
21h	31,32376	33,01126	34,71521	36,43286	38,16177	39,90024	41,64645	43,39896	45,1561
22h	30,88541	32,59204	34,31387	36,04831	37,79309	39,5463	41,30627	43,07166	44,84088
23h	30,5444	32,26798	34,00537	35,75421	37,51245	39,27799	41,04938	42,82532	44,60461
24h	30,2146	31,95227	33,70279	35,46341	37,23248	39,008	40,78867	42,573	44,36017

**Tableau 16: Pour un volume de 0,07m<sup>3</sup>**

	60Watts	70Watts	80Watts	90Watts	100Watts	110Watts	120Watts	130Watts	140Watts
1h	28,71155	30,32938	31,95416	33,58383	35,21793	36,85626	38,49652	40,13867	41,78189
2h	28,62323	30,24081	31,86545	33,49527	35,12949	36,76761	38,40802	40,05035	41,69363
3h	28,46957	30,08829	31,71381	33,34467	34,98004	36,61917	38,26053	39,90387	41,5484
4h	28,30753	29,92871	31,55664	33,18997	34,82785	36,46921	38,1131	39,75864	41,4053
5h	28,11462	29,73908	31,3703	33,00711	34,64813	36,29257	37,93945	39,58792	41,23752
6h	27,93027	29,55911	31,19464	32,83545	34,48038	36,1286	37,77911	39,4314	41,08435
7h	28,21985	29,85364	31,49387	33,13919	34,78842	36,44067	38,09515	39,75095	41,40756
8h	28,87146	30,50482	32,14423	33,78851	35,43649	37,08734	38,74027	40,39413	42,04874
9h	29,66748	31,29263	32,92374	34,55957	36,19913	37,84137	39,48553	41,13083	42,77661
10h	30,76883	32,37921	33,99582	35,61734	37,24283	38,87125	40,50174	42,13367	43,76627
11h	32,04184	33,63007	35,22507	36,82538	38,43027	40,03867	41,64957	43,26245	44,87665
12h	33,42322	34,98251	36,54956	38,12295	39,70187	41,285	42,87164	44,46097	46,05249
13h	34,11386	35,63873	37,17276	38,71469	40,26315	41,81732	43,3761	44,93875	46,50458
14h	34,3443	35,84	37,34668	38,86298	40,38745	41,91922	43,457	45,00006	46,54749
15h	34,33838	35,81397	37,30252	38,80252	40,31232	41,83066	43,35666	44,88913	46,42715
16h	33,897	35,36118	36,83993	38,33139	39,83426	41,3468	42,86789	44,39655	45,93146
17h	33,20511	34,66818	36,14706	37,63992	39,14471	40,66028	42,185	43,71765	45,25732
18h	32,36279	33,83429	35,32208	36,82437	38,33914	39,86472	41,39987	42,94315	44,49329
19h	31,62567	33,11279	34,61633	36,13425	37,66464	39,20566	40,75607	42,31415	43,87894
20h	31,00943	32,51517	34,0368	35,57233	37,11969	38,67734	40,24347	41,81683	43,39642
21h	30,41922	31,94354	33,48306	35,03549	36,59909	38,17197	39,75269	41,34009	42,93271

<b>22h</b>	29,96851	31,51105	33,06784	34,63657	36,21533	37,80267	39,39697	40,99707	42,60175
<b>23h</b>	29,61664	31,17557	32,74741	34,33014	35,92212	37,52158	39,12732	40,73801	42,3526
<b>24h</b>	29,27896	30,85156	32,4361	34,03061	35,63327	37,24268	38,85754	40,47675	42,09934

**Tableau 17: Pour un volume de 0,08m<sup>3</sup>**

	<b>60Watts</b>	<b>70Watts</b>	<b>80Watts</b>	<b>90Watts</b>	<b>100Watts</b>	<b>110Watts</b>	<b>120Watts</b>	<b>130Watts</b>	<b>140Watts</b>
<b>1h</b>	24,99731	26,46552	27,94339	29,42853	30,92017	32,41794	33,91949	35,42484	36,93344
<b>2h</b>	24,90994	26,37817	27,85602	29,34125	30,83304	32,33063	33,83225	35,33765	36,84613
<b>3h</b>	24,75488	26,22421	27,70279	29,18906	30,68195	32,1803	33,68304	35,18942	36,69885
<b>4h</b>	24,58716	26,0589	27,53992	29,0285	30,52365	32,02429	33,52927	35,03793	36,54935
<b>5h</b>	24,3862	25,86136	27,34573	28,83762	30,33585	31,8396	33,34766	34,85919	36,37351
<b>6h</b>	24,19098	25,67062	27,15921	28,6553	30,15765	31,66528	33,17706	34,69223	36,21005
<b>7h</b>	24,46201	25,94675	27,44022	28,94089	30,44769	31,95956	33,4754	34,9946	36,51617
<b>8h</b>	25,1077	26,59265	28,08597	29,58643	31,09268	32,6037	34,11874	35,63666	37,1571
<b>9h</b>	25,91943	27,39703	28,88306	30,37595	31,87454	33,37796	34,88501	36,3952	37,90738
<b>10h</b>	27,05087	28,51462	29,98666	31,46582	32,9509	34,4408	35,93466	37,4317	38,93115
<b>11h</b>	28,37448	29,81641	31,26712	32,72537	34,18997	35,65997	37,13446	38,61246	40,09326
<b>12h</b>	29,82486	31,23758	32,66009	34,09103	35,5292	36,97366	38,42322	39,87717	41,33475
<b>13h</b>	30,61011	31,98746	33,37598	34,77429	36,18109	37,59534	39,01587	40,44202	41,87271
<b>14h</b>	30,92319	32,26883	33,62759	34,99786	36,3783	37,76752	39,16479	40,56876	41,97894
<b>15h</b>	30,97525	32,2977	33,63492	34,98572	36,34827	37,72131	39,10376	40,49439	41,89224
<b>16h</b>	30,57346	31,88086	33,20523	34,5444	35,89697	37,26147	38,63638	40,02072	41,41336
<b>17h</b>	29,89319	31,19641	32,51782	33,85547	35,20758	36,57254	37,94901	39,33545	40,73071
<b>18h</b>	29,0372	30,34598	31,67398	33,0191	34,37927	35,75272	37,13812	38,53369	39,93848
<b>19h</b>	28,26331	29,58609	30,92844	32,28799	33,66281	35,0509	36,45081	37,86093	39,27994
<b>20h</b>	27,60046	28,94147	30,3016	31,67877	33,07062	34,47543	35,89154	37,31741	38,75177
<b>21h</b>	26,9635	28,32352	29,70221	31,09695	32,50586	33,92709	35,35864	36,79941	38,24802
<b>22h</b>	26,46472	27,84409	29,24118	30,65341	32,07895	33,51563	34,96213	36,4169	37,87882
<b>23h</b>	26,06949	27,46674	28,88037	30,30832	31,74832	33,19879	34,65808	36,12488	37,59802
<b>24h</b>	25,69525	27,10791	28,53598	29,97714	31,42954	32,89142	34,36139	35,83801	37,32034

## Annexe VI : Programmation sous Turbo C++

```
#include<stdio.h>
#include<math.h>
main()
{
    float e[9]={0.02,0.02,0.02,0.02,0.02,0.02,0}; //épaisseur du contreplaqué en m (1 à 6-air)
    float L[9]/*longueur du côté du contre-plaqué-air-eau-plastique*/ ,S[9],V; //volume de la couveuse
    float lam[9]={0.15,0.15,0.15,0.15,0.15,0.15,0.025}; //coefficient de conduction lambda W/m.k
    float hi=2.5; //coefficient de convection interne de l'air en W/m2.k
    float he=11; //coefficient de convection externe de l'air en W/m2.k
    float Cp[9]={0.694,0.694,0.694,0.694,0.694,0.694,0.28}; //chaleur massique Wh/kg.K
    float ro[9]={560,560,560,560,560,560,1.23}; //masse volumique en kg/m3
    float Vol[9],C[9],Rc[9],Re[9],Rr[9],Ri[9],alf[9],Qp=1.62,emis=0.9;
    float Dt=1,Pl,sig=0.000000567; // heures
    float T[1000][7]={ {283,283,283,283,283,283,283} } ;
    float
    Text[24]={292.25,292.05,291.775,291.55,291.275,291.05,291.9,293.175,294.4,296.125,297.95,299.8
    25,300,299.675,299.3,298.225,297,295.725,294.875,294.25,293.575,293.175,292.875,292.5};
    int i,j,k,n=7,t,u,l;
    float m,x[7],s,a[7][7],b[7];
    printf("Puissance de la lampe:"); scanf("%f",&Pl);
    printf("Volume de la couveuse:"); scanf("%f",&V);
    for(i=0;i<7;i++) L[i]=pow(V,0.333);
    e[6]=L[6];
    for(i=0;i<7;i++) S[i]=L[i]*L[i];
    for(i=0;i<7;i++)
    {
        Vol[i]=S[i]*e[i];
        C[i]=ro[i]*Vol[i]*Cp[i];
        Rc[i]= e[i]/(lam[i]*S[i]);
        Ri[i]=1/(hi*S[i]);
        Re[i]=1/(he*S[i]);
    }
    for(i=0;i<6;i++) alf[i]=Rc[i]+Re[i];
    t=0;u=0;
    do{ u=u+1;
        for(i=0;i<6;i++)
        {Rr[i]=1/(sig*S[i]* emis* (T[u-1][6]*T[u-1][6]+T[u-1][i]*T[u-1][i])*(T[u-1][6]+T[u-1][i])); }
    }
    //-----les éléments de la matrice-----
    for(i=0;i<7;i++)
    {
        for(j=0;j<7;j++)
        {a[i][j]=0;b[i]=0; }
    }
    for(i=0;i<6;i++)
    {
        a[i][i]=C[i]/Dt+1/alf[i]+1/Ri[i]-1/Rr[i];
        b[i]=C[i]*T[u-1][i]/Dt+Text[t]/alf[i];
        a[i][6]=1/Rr[i]-1/Ri[i];
        a[6][i]=-1/Ri[i];
    }
    a[6][6]=C[6]/Dt+Cp[6]*Qp+1/Ri[0]+1/Ri[1]+1/Ri[2]+1/Ri[3]+1/Ri[4]+1/Ri[5];
    b[6]=C[6]*T[u-1][6]/Dt+Cp[6]*Qp*Text[t]+Pl;
    //-----méthode de Gauss-----
    for(k=0;k<n;k++)
    {
        for(i=k+1;i<n;i++)
        {
            m=a[i][k]/a[k][k];
            for(j=k;j<n;j++)
            { a[i][j]+=-m*a[k][j]; }
            b[i]+=-m*b[k];
        }
    }
}
```

```

    }
}
x[n-1]=b[n-1]/a[n-1][n-1];
for(i=n-1;i>=0;i--)
{ for(j=i+1,s=0;j<=n;j++)
    { s+=a[i][j]*x[j];
      x[i]=(b[i]-s)/a[i][i];
    }
}
for(i=0;i<7;i++)
T[u][i]=x[i];
printf("T[%d][6]=%f\n",u,T[u][6]-273);
}
while(fabs(T[u][6]-T[u-1][6])>0.001);
for(i=0;i<7;i++)
T[t][i]=T[u][i];
//
for(t=1;t<24;t++)
{ for(i=0;i<6;i++)
    { Rr[i]=1/(sig*S[i] emis * (T[t-1][6]*T[t-1][6]+T[t-1][i]*T[t-1][i])*(T[t-1][6]+T[t-1][i]));
      for(i=0;i<7;i++)
      { for(j=0;j<7;j++)
          { a[i][j]=0;b[i]=0;}
        }
      for(i=0;i<6;i++)
      { a[i][i]=C[i]/Dt+1/alf[i]+1/Ri[i]-1/Rr[i];
        b[i]=C[i]*T[t-1][i]/Dt+Text[t]/alf[i];
        a[i][6]=1/Rr[i]-1/Ri[i];
        a[6][i]=-1/Ri[i];
      }
      a[6][6]=C[6]/Dt+Cp[6]*Qp+1/Ri[0]+1/Ri[1]+1/Ri[2]+1/Ri[3]+1/Ri[4]+1/Ri[5];
      b[6]=C[6]*T[t-1][6]/Dt+Cp[6]*Qp*Text[t]+Pl;
    }
// méthode de Gauss
    for(k=0;k<n;k++)
    { for(i=k+1;i<n;i++)
        { m=a[i][k]/a[k][k];
          for(j=k;j<n;j++)
          { a[i][j]+=-m*a[k][j];
            b[i]+=-m*b[k];
          }
        }
    }
    x[n-1]=b[n-1]/a[n-1][n-1];
    for(i=n-1;i>=0;i--)
    { for(j=i+1,s=0;j<=n;j++)
        { s+=a[i][j]*x[j];
          x[i]=(b[i]-s)/a[i][i];
        }
    }
    for(i=0;i<7;i++)
    T[t][i]=x[i];
}
//-----affichage-----
printf("\nTempérature intérieure\n");
for(t=0;t<24;t++)
{ printf("T[%d][6]=%f\n",t,T[t][6]-273);
}
return 0;
}

```

**TITRE :** Modélisation d'une couveuse artisanale : Etude de la température de l'air intérieur

**RESUME :**

Les œufs deviennent des poussins au moment de l'éclosion, grâce à la température et l'humidité favorables dans la couveuse. Ces deux paramètres peuvent être modélisés à l'aide des équations mathématiques et être programmés sous *Turbo C++*. Seule la température a été étudiée dans ce travail. Ensuite, il est nécessaire de faire une analogie entre la thermique et l'électricité. Puis, d'écrire toutes les équations et résoudre l'équation matricielle obtenue par itération moyennant de la méthode de *Gauss*.

Les températures intérieures de la couveuse, pendant vingt- quatre heures, ont été étudiées. Donc les intervalles de temps, pendant lesquels le bac à eau doit être retiré ou placé, ont été trouvés. Après, la relation entre la puissance de la lampe et le volume de la couveuse est obtenue sous forme d'une droite afin de faire une estimation de l'énergie électrique nécessaire pour une couveuse de volume donné. Cette droite d'estimation montre que la consommation augmente avec le volume. Donc l'utilisation de l'énergie solaire pourra être envisagée pour couvrir cette dépense.

**Mots-clés** : Couveuse, Température intérieure, *Turbo C++*, flux de chaleur, bac à eau.

**ABSTRACT:**

*The eggs become chicks at the time of the bursting, thanks to the temperature and the favorable humidity in the brooder. These two parameters can be modelled with the help of the mathematical equations and can be program under Turbo C++. Only the temperature has been studied in this work. Then, it is necessary to make an analogy between the thermal and electricity. Then, write all equations and resolve the matrix equation obtained by iteration in return for the Gauss method.*

*The interior temperatures of the brooder, during twenty - four hours, have been studied. Therefore the intervals of time, during which the water tunk must be withdrawn or put, have been found. Next, the relation between the power of the lamp and the volume of the brooder is gotten as a straigh in order to make an evaluation of the necessary electric energy for a brooder of given volume. This straigh of evaluation shows that the consumption increases with the volume. Therefore the use of the solar energy will be able to be considered to cover this expense.*

**Keys- Words**: Brooder, interior Temperature, *Turbo C++*, flux of heat, water tunk.

**Encadreur :**

Dr. ROBELISON Solofonirina

**Impétrant :**

RANDRIANAIVO Andriamparany Herizo

Tél : 033 06 000 64

E-mail : andriamparanyherzoz@gmail.com

BM 356 Ambohidavenona Ampitatafika