

UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE D'ANTANANARIVO

DEPARTEMENT GENIE MECANIQUE PRODUCTIQUE
DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE

FILIERE : GENIE INDUSTRIEL

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR EN GENIE INDUSTRIEL



**METHODES OPTIMALES DE CALCUL ET
INFORMATISATION DE L'ISOLATION DES
CHAMBRES FROIDES
(Conception du logiciel FRISOL 1.0)**

N° d'ordre : 11 / 04

Présenté par : NAMBININTSOA Alain Heriniaina

Rapporteur : M. RANAIVOSON ANDRIAMBALA Hariniaina
Maître de conférences

Promotion 2004

UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE D'ANTANANARIVO

DEPARTEMENT GENIE MECANIQUE PRODUCTIQUE
DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE

FILIERE : GENIE INDUSTRIEL

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR EN GENIE
INDUSTRIEL



**METHODES OPTIMALES DE CALCUL ET
INFORMATISATION DE L'ISOLATION DES
CHAMBRES FROIDES
(Conception du logiciel FRISOL 1.0)**

N° d'ordre : 11 / 2004

Présenté par : NAMBININTSOA Alain Heriniaina
Président du jury : Monsieur RANARIJAONA Jean Désiré,
Maître de conférences
Examineur : Monsieur RAMELINA Lala Arimonjy
Monsieur RANDRIAHERINDRAINY Selmer
Rapporteur : Monsieur RANAIVOSON ANDRIAMBALA
Hariniaina, Maître de conférences

Date de soutenance : 26 Février 2005

Promotion 2004

REMERCIEMENTS

*Nous exprimons notre profonde gratitude à Monsieur **RANDRIANOELINA Benjamin**, Directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, qui nous a permis de mener à terme nos études sous sa responsabilité.*

Nos sincère gratitude à:

*Monsieur **RANDRIANATOANDRO Joeliharitahaka**, Chef du département Génie mécanique et productique de l'ESPA,*

*Monsieur **RANDRIANARISON Yvon**, Chef du département génie électrique de l'ESPA pour leur grand dévouement que nous avons pu constaté pendant nos années de formation.*

Nous adressons nos vifs remerciements à

*Monsieur **RANARIJONA Jean Désiré**, Maître de conférences en acceptant de présider cette séance de soutenance.*

Nous exprimons notre haute et fidèle considération à

*Monsieur **RANAIVOSON ANDRIAMBALA Hariniaina**, Maître de conférences pour sa clairvoyance, ses conseils et directives lors de l'encadrement de ce mémoire.*

Nous remercions chaleureusement :

*Monsieur **RAMELINA Arimonjy***

*Monsieur **RANDRIAHERINDRAINY Selmer***

Enseignants à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo qui ont voulu juger ce modeste travail. Puissent il trouver dans cet ouvrage les fruits de leurs cours respectifs ;

Le corps des enseignants de la filière génie industriel de l' E.S.P.A auquel nous devons notre formation durant ces années d'études ;

*A Monsieur **Eddie**, ingénieur de la société **S.M.E.F.** ;*

*A Monsieur **Orlando**, ingénieur de la société **T.F.M.** ;*

*A Monsieur **Mika**, Technicien Supérieur frigoriste de la **Poissonnerie MANDA** ; qui nous ont accueilli à bras ouvert, nous permettant l'acquisition des données techniques réelles et pratiques.*

Nous dédions nos sincères gratitude envers nos parents et toute la famille pour leur soutien moral et matériel au cours de l'élaboration de ce mémoire.

A tous les amis et connaissances

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de l'ouvrage.

Merci à tous

SOMMAIRE

REMERCIEMENT

SOMMAIRE

Listes des symboles

Listes des figures

Listes des tableaux

INTRODUCTION

PARTIE I : BASES THEORIQUES

CHAPITRE I : LA PRODUCTION DU FROID

CHAPITRE II : TRANSFERT THERMIQUE

PARTIE II : PRINCIPE D'ISOLATIONS DE CHAMBRES FROIDES

CHAPITRE I : MATERIAUX D'ISOLATIONS FRIGORIFIQUES

CHAPITRE II : ISOLATION SELON LE TYPE DE CONSTRUCTION

CHAPITRE III : PROBLEMES ACTUELS DE L'ISOLATION

PARTIE III : OPTIMISATION DE CALCULS D'ISOLATION DE CHAMBRES FROIDES

CHAPITRE I : PARAMETRE DE CALCULS DES ISOLATIONS

CHAPITRE II : FORMULES POUR LES CALCULS D'EPAISSEURS DES ISOLANTS

CHAPITRE III : OPTIMISATION DES CALCULS D'ISOLATION

CHAPITRE IV : EXEMPLE D'APPLICATION DE CALCUL POUR UNE CHAMBRE FROIDE A MADAGASCAR

CHAPITRE V : CARACTERISATION ET UTILISATION DU KAPOK COMME ISOLANT THERMIQUE

CHAPITRE VI : ISOLATION COMPOSITE

PARTIE IV : CONCEPTION DU LOGICIEL FRISOL 1.0

IV.1 PRESENTATION DU LOGICIEL

IV.2 LA BASE DE DONNEES

IV.3 CORPS DU LOGICIEL

IV.4 INTERFACES UTILISATEURS

ETUDE D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES

LISTES DES SYMBOLES

Générale

$Q_{\square}$: Quantité de chaleur

$H_{\square}$: Enthalpie

$\Delta T_{\square}$: Ecart de température

L : Liquide pur

L+V : Liquide et vapeur

V : Vapeur pure

Δt : intervalle de temps

$A_{\square}$: Surfaces

COP : Coefficient de performance ou effet frigorifique de la machine

$HR_{\square}$: Humidité relative

{ $\square$ } : Renvois aux références bibliographiques

Températures

$T_{\square}$: Température

ΔT : Ecart de température

T_r : température de condensation de l'air

Flux thermiques

$\Phi_{\square-\square}$: Flux calorifique échangé

$\phi_{\square}$: Flux unitaire ou déperdition unitaire

Rayonnement

$\varepsilon_{\square}$: Emissivité

h_r : coefficient d'échange radiatif

$F_{\square-\square}$: Facteur de forme d'échange radiatif entre corps noirs

S : Surfaces

Convection

h_c : coefficient d'échange convectif

ρ : masse volumique

μ : Viscosité dynamique

C_p : Chaleur spécifique

Re : nombre de Reynolds

Gr : nombre de Grashoff

Pr : nombre de Prandtl

Nu : nombre de Nusselt

Conduction

$\lambda_{\square}$: coefficient de conductivité thermique

h_e : coefficient d'échange convectif extérieur

h_i : coefficient d'échange convectif intérieur

$T(j)$: Température des contacts entre couche de matériaux différent

$R_{\square}$: Résistances thermiques

a : diffusivité thermique

$e_{\square}$: épaisseur

ΔT : Laplacien de la température

K : coefficient d'échange global

R_m : Somme des résistance thermique des éléments constituant la paroi isolante et les résistances surfaciques retranchés de celle de l'isolant.

Propriétés des matériaux

ϕ_{mi} : Perméabilité à la vapeur du matériau isolant

R_{di} : Résistances à la diffusion de vapeur de l'isolant

C_i : Constante de diffusion de vapeur de l'isolant.

IPVE : Condition normalisé pour la mesure des caractéristiques d'un matériau déterminé

α : Coefficient de dilatation linéaire

ΔL : Déformation

Pressions

$P_{\square}$: Pression

$P_{s\square}$: Pression de saturation de la vapeur d'eau contenue dans l'air

$P_{v\square}$: Pression partielle de la vapeur d'eau contenu dans l'air.

ΔP_v : Ecart de la pression partielle de la vapeur d'eau

Valeurs économiques :

m : durée de vie de l'isolant

C_e : Coût unitaire de l'énergie

C_{um} : Coût du m^3 de l'isolant

C_{ist} : coût total de l'isolation

Organigramme :

$T_{e(i)}$: températures des faces externe de chaque paroi

$R_{s\square}$: résistances surfaciques des faces de la paroi

M_d : Masse de denrée entreposée

α : Coefficient d'occupation du sol

σ : Contrainte de compression

ϕ_{pp}, ϕ_{psol} : perméabilité à la vapeur des matériaux pare vapeur

ϕ_{is}, ϕ_{issol} : perméabilité à la vapeur des isolants

λ_d : Coefficient de conductivité des matériaux constituant la construction en dure

λ_r : Coefficient de conductivité des matériaux constituant le revêtement

T_{ma} : temps de marche annuelle

ϕ_{opt} : déperdition optimale

ϕ_{df} : déperdition admise

D_a : dépense annuelle

T_c : Température de contact entre couche de matériaux différents.

LISTE DES FIGURES

PARTIE I

- Fig. 1.1.1 Schémas de principe d'une machine à compression
- Fig. 1.1.2 Représentation dans un diagramme enthalpique d'une machine frigorifique
- Fig. 1.1.3 Schémas fluidique d'un système à régulation « Pump down »
- Fig. 1.2.1 variation de la température dans une paroi plane
- Fig. 1.2.1 variation de la température dans une paroi plane
- Fig. 1.2.2 Allure des courbes de températures dans un mur composite
- Fig. 1.2.3 Paroi cylindrique à surface latéral isotherme
- Fig. 1.2.4 Paroi cylindrique composite en contact avec deux fluides

PARTIE II

- Fig. 2.1.1 Courbe de variation de la conductivité par rapport à la température
- Fig. 2.1.2 Courbe de variation de la conductivité en fonction de la masse d'eau fixée
- Fig. 2.1.3 Courbes des températures et des pressions partielles de la vapeur dans une paroi.
- Fig. 2.1.4 Courbes des températures et pression de la vapeur dans une paroi avec matériaux pare vapeur.
- Fig. 2.2.1 Isolation du sol
- Fig. 2.2.2 Isolation des murs avec croisement des joints
- Fig. 2.2.3 Isolation des plafonds
- Fig. 2.2.4 Coupe de panneaux isolant en PUR
- Fig. 2.2.5 Mise en œuvre des isolants préfabriqués et éléments d'angles préfabriqués
- Fig. 2.3.1 Quelques exemples type d'éviction de ponts thermiques
- Fig. 2.3.2 Retrait ; évaluation des retraits
- Fig. 2.3.3 : déformations dues à la dépression interne de l'enceinte
- Fig. 2.3.4 Congélation du sol
- Fig. 2.3.5 Vue en coupe de l'isolation sol avec vide sanitaire

PARTIE III

- Fig. 3.1.1 Température intérieure d'un cloisonnement isolante selon la nécessité.
- Fig. 3.2.1 Allure des courbes de température dans la paroi isolante
- Fig. 3.2.2 Diagramme (PV) de la vapeur d'eau contenue dans l'air
- Fig. 3.3.1 Principe d'un psychromètre
- Fig. 3.3.2 Diagramme de l'air humide à 760 mm de Hg
- fig. 3.3.3 courbes des dépenses annuelles pour l'isolation en polystyrène ;
chambre froide positive
- fig. 3.3.4 courbes des dépenses annuelles pour l'isolation en polyuréthane ;
chambre froide positive
- Fig. 3.3.5 courbes des dépenses annuelles pour l'isolation en balles de riz ;
- fig. 3.3.6 courbes des dépenses annuelles pour l'isolation en polystyrène ;
chambre froide négative
- fig. 3.3.7 courbes des dépenses annuelles pour l'isolation en balle de riz ;
chambre froide négative
- fig. 3.3.8 courbes des dépenses annuelles pour l'isolation en polyuréthane ;
chambre froide négative

Fig.3.3.9 Courbes des épaisseurs pour les différentes méthodes de calculs. Isolation en polystyrène expansée
 Fig.3.3.10 Courbes des épaisseurs pour les différentes méthodes de calculs. Isolation en polyuréthane
 Fig.3.3.11 Courbes des épaisseurs pour les différentes méthodes de calculs. Isolation en balle de riz
 Fig 3.3.12 Courbes des déperditions optimales pour quelques isolants
 Fig. 3.3.13 Courbe donnant le choix de l'isolant en cas d'emploi de la formule ASHRAE
 Fig.3.4.1 Coupe de la chambre froide (vue de dessus)
 Fig.3.4.2: Parois vertical isolé avec le kapok
 Fig.3.4.3:plafond isolé en kapok
 Fig.3.4.5 Structure de l'isolation du sol
 Fig. 3.4.6 :Courbes de dimensionnement de l'isolation composite

PARTIE IV

Fig.4.4.1 : Page d'accueil de FRISOL
 Fig. 4.4.2 : Interface : Définition des données climatiques
 Fig. 4.4.3 : Interface : Définition des conditions internes
 Fig. 4.4.4 Interface : Choix du type de construction et des isolants utilisés
 Fig. 4.4.5 : Interface : Choix des matériaux de construction selon le type de construction.
 Fig. 4.4.6 : Interface : Vérification des paramètres
 Fig.4.4.7 : Interface : choix de la méthode de calcul
 Fig. 4.4.8 : Interface : Affichage des résultats
 Fig. 4.4.9 : Interface : Calcul économique
 Fig. 4.4.10 : Interface : Isolation composite
 Fig. 4.4.11 : INTERFACE : Résultat de calcul pour l'isolation composite.
 Fig. 4.4.12 : Courbe des températures pour une isolation simple tracé avec la page des résultats de l'isolation composite.

LISTES DES TABLEAUX

PARTIE I

Tableau 1.2.1 Résistances thermiques superficielles des parois d'une chambre froide.

PARTIE II

Tableau 2.1. 1 : caractéristiques des isolants catégorie I
 Tableau 2.1. 2 : Caractéristiques des isolants catégorie II
 Tableau 2.1. 3 : Caractéristiques des isolants catégorie II
 Tableau 2.1. 4 : Caractéristiques des isolants catégorie II

PARTIE III

Tableau 3.3.1 épaisseurs normalisées des différents isolants
 Tableau 3.3.2: Pressions de saturation de la vapeur d'eau dans l'air à 760 mm de Hg
 Tableau 3.3.3 Caractéristiques techniques des matériaux isolants étudiés
 Tableau 3.3.4 Caractéristiques techniques des matériaux pare vapeurs utilisés
 Tableau 3.3.5 Conductivité thermique des matériaux de constructions
 Tableau 3.3.6 Résultats des calculs pour l'isolation en polystyrène ; chambre froide positive
 Tableau 3.3.8 Résultats des calculs pour l'isolation en polyuréthane ; chambre froide positive
 Tableau 3.3.9 Résultats des calculs pour l'isolation en Balle de riz ;
 chambre froide positive

Tableau 3.3.10 Résultats des calculs pour l'isolation en polystyrène ; chambre froide négative

Tableau 3.3.11 Résultats des calculs pour l'isolation en balles de riz ; chambre froide négative

Tableau 3.3.12 Résultats des calculs pour l'isolation en polyuréthane ; chambre froide négative

Tableau 3.3.13 Résultats des calculs

Tableau 3.4.1 : Déperdition optimale pour chaque parois

Tableau 3.4.2 : Conductivité thermique expérimentale de l'isolant fabriqué avec du kapok

Tableau 3.4.3 : Données significatives

Tableau 3.4.4 : Résultats des calculs

Tableau 3.4.5 : Tableau comparatif des résultats économiques

ABSTRACT

This dissertation refers to the principles of thermal insulations optimisation applied to the field of freezing and notions connected to them. The basic principles are to design and to measure in all field of freezing application a reliable insulation taking into consideration:

- the economy of energies
- the economy of matter
- the economy of currency

The valuations of parameters which may influence the measuring allow us to affect them to the optimised arithmetic in which the results will be compared with that of classic methods. Moreover, this work contains the importance of some local materials and their practical use in the field of freezing.

In order to make the acquisition of the results of arithmetic easier to concerned people, the software " FRISOL1.0" has been designed to contain the directives of insulation depending on supplied parameters.

INTRODUCTION

« L'économie de l'énergie ». Tel est le sujet occupant une grande partie des recherches appliquées à notre époque.

Selon l'Institut International du Froid (I.I.F), une réduction de 30 à 50%, selon les applications, de la consommation énergétique unitaire des installations frigorifiques doit constituer l'objectif à atteindre à l'horizon 2020.

Le froid joue un rôle fondamental dans l'alimentation des populations en permettant la conservation des denrées alimentaires aux différentes étapes de la chaîne : transport, entreposage, distribution, présentation à la vente, et entreposage à domicile. Son rôle est essentiel dans des domaines tels que la santé (conservation des vaccins, mais aussi cryothérapie et cryochirurgie) et la biodiversité (cryobiologie). Grâce au conditionnement d'air, le froid permet la création d'environnements propices au travail dans des zones géographiques aux climats chauds et humides telles que le nôtre.

La réduction de la consommation énergétique des installations frigorifiques est, depuis longtemps, une préoccupation majeure des concepteurs et constructeurs de matériels. Cette recherche de l'efficacité optimale de chacun des composants d'un système frigorifique doit être adaptée en permanence aux nombreuses évolutions.

On peut citer à cet égard le cas des mousses isolantes : une isolation très performante est essentielle à la réduction de la consommation d'énergie d'équipements tels que réfrigérateurs, chambres froides et véhicules de transport frigorifique. La recherche et l'adoption de nouveaux matériaux performants pour l'isolation constituent un véritable défi. Il semble en effet difficile d'obtenir des performances identiques sans une augmentation de l'épaisseur des parois isolantes, lorsque cela est possible. Encore, les méthodes employées pour le dimensionnement repose sur des notions empiriques et face à la nécessité croissante de précision de calcul, on est amené à la révision de ces méthodes afin de les optimiser sans s'éloigner des notions théoriques qui demeurent toujours adaptées.

Le présent mémoire donnera son rapport sur les résultats des recherches concernant « METHODES OPTIMALES DE CALCUL ET INFORMATISATION DE L'ISOLATION DES CHAMBRES FROIDES ».

L'ouvrage comportera quatre grandes parties. La partie I sera composée d'un bref rappel théorique sur les techniques de production de froid et les lois régissant les phénomènes de transfert de chaleur. La partie II traitera les principes d'isolation de chambres froides. Dans la partie III, nous aborderons l'optimisation de calculs d'isolation des chambres froides pour aboutir à la dernière partie qui contiendra la présentation du logiciel FRISOL 1.0.

PARTIE I

BASES THEORIQUES

Chapitre I : PRODUCTION DU FROID

I.1 Généralité

Le froid est produit par extraction de chaleur d'un médium à refroidir.

Nombre de moyen peut être adopté pour obtenir le froid artificiel selon son utilité parmi lesquels on peut citer la production du froid par :

- mélange de réfrigérants,
- détente de gaz comprimé,
- effet Peltier,
- évaporation d'un fluide pur.

Dans le cas d'une chambre froide, le froid est surtout produit par l'évaporation d'un liquide pur. Ce principe est utilisé par les machines à absorption, les machines à compression et les machines à éjection.

Sauf quelques exceptions, la plus grande part des chambres froides existant actuellement utilise des machines à compression.

I.2 Production du froid par compression.

I.2.1 Description de la machine à compression

Une telle machine comporte :

- Un échangeur thermique appelé EVAPORATEUR dans lequel le fluide frigorigène, introduit essentiellement à l'état liquide se vaporise sous basse pression et à basse température, en absorbant de la chaleur au milieu à refroidir à la température T_1 . Ce milieu est isolé thermiquement par une isolation thermique convenable permettant de maintenir la température obtenue.
- Un COMPRESSEUR qui aspire les vapeurs formées et les refoule sous haute pression.
- Un second échangeur thermique appelé CONDENSEUR dans lequel les vapeurs à haute pression en sortie du compresseur se liquéfient. Le condenseur est refroidi par un fluide extérieur (air ou eau) à la température T_2 .
- Un réservoir ou BOUTEILLE ACCUMULATRICE de fluide comportant une certaine réserve de fluide.
- Un dispositif de détente appelé régleur ou DETENDEUR, abaissant la pression du fluide liquide de la haute pression à la basse pression tout en régulant le débit du fluide admis à l'évaporateur.

I.2.2 Principe

Le principe de la machine à compression se base sur l'extraction de la chaleur du milieu à refroidir par évaporation du fluide dans l'évaporateur. L'énergie à fournir au compresseur servira à comprimer le fluide, en phase vapeur, permettant de nouveau sa condensation. Le liquide condensé sera détendu avant son admission à l'évaporateur.

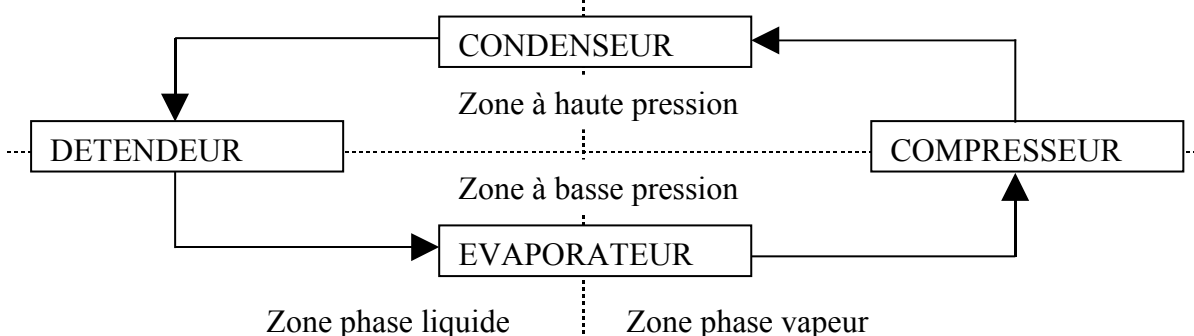


Fig. 1.1.1 Schéma de principe d'une machine à compression

1.2.3 Cycle frigorifique et diagramme enthalpique.

Pour le cycle frigorifique, on utilise souvent le diagramme entropique et le diagramme enthalpique. Ce dernier, également appelé diagramme du frigoriste, est le plus utilisé dans les industries du froid.

Le froid se produit pendant le passage du fluide de l'état (6) à l'état (1) (cf. figure :1.1.2). Pour pouvoir produire le froid continuellement dans le temps, il faut assurer l'alimentation en fluide de ce passage pendant tout le temps de « marche en froid » de l'installation. De ce fait, le fluide à l'état (1) sera transformé en fluide à l'état (6) et boucle le cycle. Ceci explique le cycle fermé de la figure et ses différentes transformations

On trace le cycle frigorifique sur le diagramme enthalpique en sachant le besoin en froid et les conditions de marche de l'installation. Ce diagramme permet de schématiser et de repérer l'évolution du système pour les différentes phases parcourues par le fluide. Il renseigne sur la correspondance entre la pression et l'enthalpie du fluide pour un point déterminé du cycle.

Le diagramme enthalpique est utilisé :

- au dimensionnement ou choix des éléments constitutifs principaux
- à l'examen du comportement de l'installation

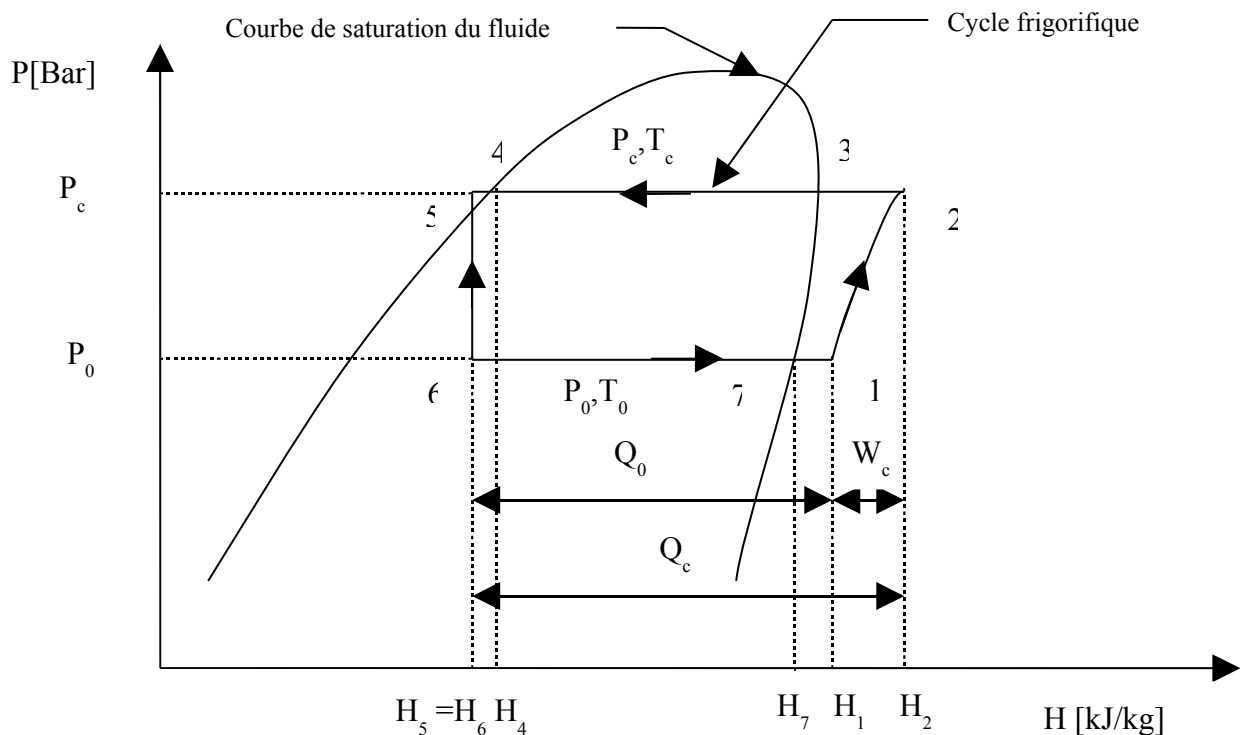


Fig. 1.1.2 Représentation dans un diagramme enthalpique d'une machine frigorifique

Q_0 : quantité de chaleur absorbée par l'évaporateur

$$Q_0 = H_1 - H_6 \quad [\text{kJ/kg}] \quad (\text{I.1})$$

W_c : Energie fournie par le compresseur au fluide correspondant au travail technique;

En effet, d'après le premier principe de la thermodynamique:

$$dW = dU + dQ$$

$$\text{avec } dW = -p dV \text{ et } H = U + PV \text{ ou } U = H - PV$$

$$dQ + dH - pdV - vdP = dW$$

$$dH = VdP \text{ (travail technique)}$$

$$W_c = H_2 - H_1 \text{ [kJ/kg]} \quad (I.2)$$

Dans la pratique, le compresseur fonctionne de façon polytropique et non isentropique

Q_c : Quantité de chaleur évacuer au condenseur.

$$Q_c : H_2 - H_5 = W_c + Q_0 \text{ [kJ/kg]} \quad (I.3)$$

Autres valeurs utiles de température :

ΔT_{SR} : Sous refroidissement : $T_4 - T_5$

ΔT_{Surc} : Surchauffe : $T_1 - T_7$

1.2.4 Régulation.

Le système de régulation est composé des différents éléments mis en fonction pour maintenir les conditions souhaitées et le bon fonctionnement de la machine. Des appareillages automatiques sont mis en œuvre pour assurer ces fonctions. L'ambiance intérieure de la chambre est surtout caractérisée par sa température T_i et son humidité relative HR_i . Les appareillages permettant de mesurer ces valeurs, parmi lesquels on peut citer les thermostats et les hygrostats, agissent directement sur les organes de commande concernés pour régulariser l'ambiance.

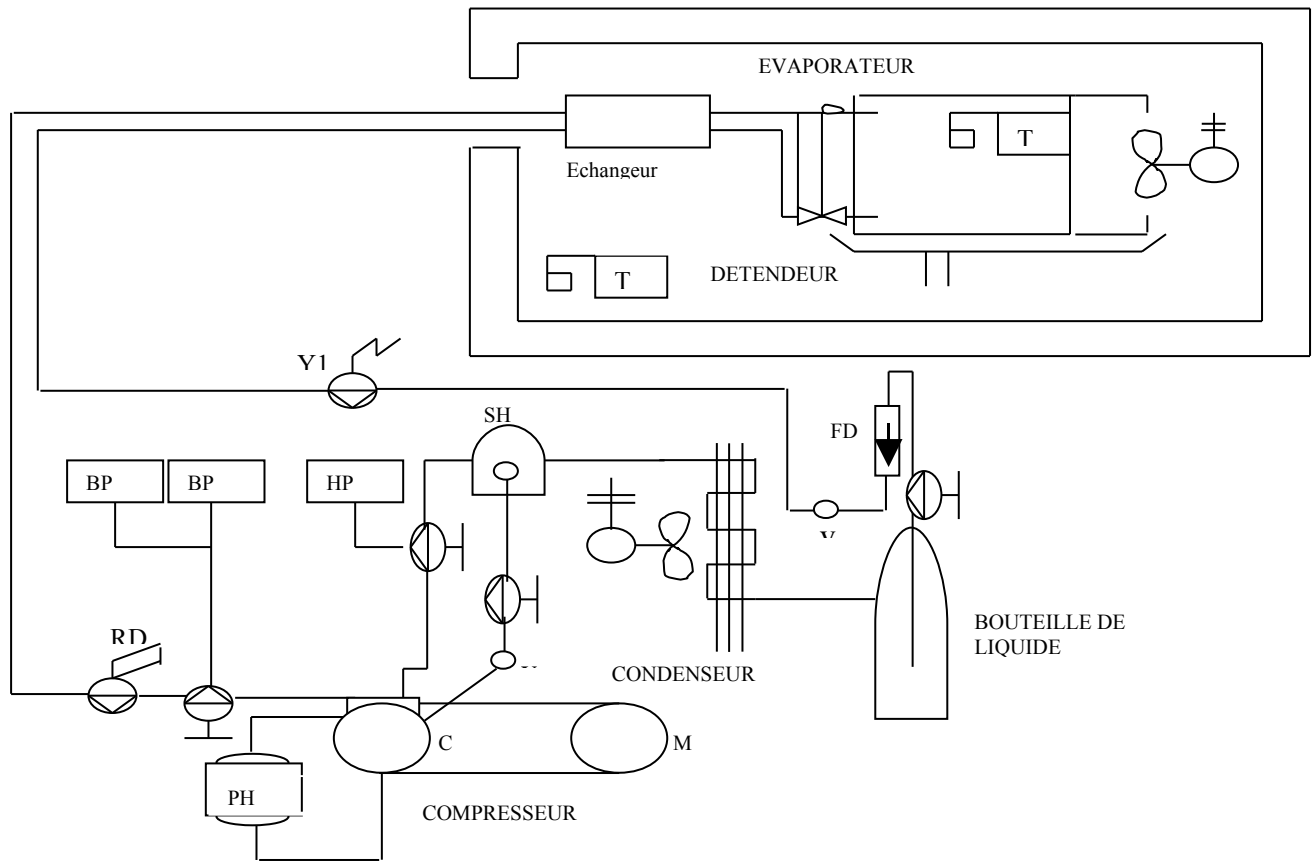


Fig. 1.1.3 Schéma fluide d'un système à régulation « Pump down »

Légende

T : Thermostat

BP : Pressostat basse pression

HP : Pressostat haute pression

SH : séparateur d'huile

C : Compresseur

PH : Pression d'huile

M : Moteur

FD : Filtre déshydrateur

V : Voyant de liquide

RD : Régulateur de démarrage

Y1 : électrovanne

Chapitre II : TRANSFERT THERMIQUE

La chaleur est une forme de l'énergie dont le support est l'ensemble des molécules d'un corps. La transmission de chaleur peut être définie par le passage de la chaleur d'un corps ou un milieu plus chaud vers un autre plus froid.

La puissance calorifique est la quantité de chaleur mise en jeu pendant une unité de temps. Elle est appelée puissance frigorifique si la chaleur est absorbée, puissance calorifique si produite et flux de chaleur ou flux thermique si transférée. Le flux thermique peut être composé, d'une manière qualitative et non quantitative, de flux radiatif, de flux convectif et de flux conductif.

II.1 Le flux radiatif

II.1.1 Définition

Le flux radiatif est la puissance calorifique transférée entre deux corps ou la transmission de chaleur s'effectue par RAYONNEMENT. Un flux radiative Φ_i reçu par un corps sera fractionné, par ce corps même selon sa nature, en trois parties. Une partie Φ_t sera transmise, une partie Φ_r réfléchie et une partie Φ_a absorbée.

On définit alors les coefficients $\alpha = \Phi_a / \Phi_i$; $\rho = \Phi_r / \Phi_i$; $\tau = \Phi_t / \Phi_i$ qui sont respectivement le facteur d'absorption, de réflexion et de transmission du corps donné.

Ils sont liés par la relation $\alpha + \rho + \tau = 1$; pour un corps opaque : $\tau = 0$ et $\alpha + \rho = 1$

II.1.2 Lois de Boltzmann

D'après la loi de Boltzmann, pour un corps noir

$$M^0 = \sigma \cdot T^4 \quad [\text{W/m}^2] \quad (\text{I.4})$$

T : température du corps en [K]

$\sigma = 5,678 \cdot 10^{-8} [\text{W/m}^2 \cdot \text{K}]$: constante de Boltzmann

M^0 : exitance énergétique.

$$\text{Et pour un corps gris : } M^0 = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (\text{I.5})$$

ou ε : émissivité ou facteur d'émission

II.1.3 Facteur de forme

Le flux radiatif échangé entre deux surfaces 1 et 2 de deux corps différents est défini par :

$$\Phi_{1-2} = \frac{M_1^0 - M_2^0}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 \cdot S_1} + \frac{1}{S_1 \cdot F_{1-2}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 \cdot S_2}} \quad [\text{W}] \quad \{5\} \quad (\text{I.6})$$

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$: émissivité respective des deux surfaces

$\varepsilon = 1$ pour un corps noir

F_{1-2} : Facteur de forme dépendant de la position géométrique des deux surfaces.

II.1.4 Coefficient d'échange radiatif

On définit l'échange radiatif par le coefficient h_r , tel que

$$\Phi_{1-2} = h_r \cdot S_1 \cdot (T_1 - T_2) \quad [\text{W}] \quad (\text{I.7})$$

$$h_r = \frac{1}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{1-2}} + \frac{(1 - \varepsilon_2) \cdot S_1}{\varepsilon_2 \cdot S_2}} \cdot \sigma \cdot \frac{T_1^4 - T_2^4}{T_1 - T_2}$$

Et de (I.5), (I.6), (I.7) on trouve

$$(\text{I.8})$$

Si $|T_1 - T_2| \leq 100^\circ \text{C}$ on peut écrire la formule approchée

$$h_r = \frac{4 \cdot \sigma \cdot T_m^3}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{1-2}} + \frac{(1-\varepsilon_2)}{\varepsilon_2} \cdot \frac{S_1}{S_2}} \quad [\text{W/m}^2 \cdot \text{K}] \quad (\text{I.9})$$

On consultera aux annexes les valeurs des différentes émissivités des corps les plus couramment rencontrés.

II.2 Le flux convectif

II.2.1 Définition

Le flux convectif est la puissance calorifique échangée quand l'un des milieux est fluide. Le mode de transmission de chaleur engendrant ce flux s'appelle LA CONVECTION. Elle peut s'apparaître sous deux formes :

- Convection avec changement de phase du fluide convectif
- Convection sans changement de phase du fluide.

Selon le mécanisme provoquant le mouvement du fluide, on distingue :

- La convection naturelle :

Dans ce cas le mouvement du fluide est provoqué par la différence de champ de force extérieur, généralement la pesanteur, provoqué par la variation de la température de la couche fluide plus proche de la paroi.

- La convection forcée

On parle de convection forcée quand d'autres moyens extérieurs sont mis en œuvre pour faire circuler la fluide.

II.2.2 Loi de Newton

D'après la loi de Newton le flux convectif est proportionnel à l'écart de température entre la paroi et le fluide.

$$\Phi_c = h_c \cdot S \cdot (T_p - T_f) \quad [\text{W}] \quad \{5\} \quad (\text{I.10})$$

II.2.3 Coefficient d'échange convectif

Résoudre un problème de convection revient à déterminer la valeur de h_c .

Le coefficient d'échange convectif est fonction :

- des caractéristiques géométriques du milieu (dimension, forme, état de surface),
- des caractéristiques physiques du fluide (*) (ρ , μ , C_p , λ)
- de l'écoulement du fluide (vitesse, régime d'écoulement)

En raison du grand nombre de paramètre permettant d'évaluer h_c , sa détermination analytique n'est pas aisée. On a recours à la formulation de certains nombres sans dimensions, ces nombres eux-mêmes étant fonction de h_c . Les nombres adimensionnels sont des constantes descriptives de la convection. Ils sont formulés à partir des paramètres cités ci-dessus.

Parmi les plus employés on peut citer : Re (nombre de Reynolds), Pr (nombre de Prandtl), Gr (nombre de Grashoff) et Nu (nombre de Nusselt)

(*) Caractéristiques dépendant elles-mêmes de la température du fluide.

Le coefficient d'échange convectif s'obtient par :

$$h_c = \frac{\lambda \cdot Nu}{l} \quad [\text{W/m}^2 \cdot \text{K}] \quad (\text{I.11})$$

Où λ : coefficient de conductivité thermique du fluide.

Nu : Nombre de Nusselt

l : longueur caractéristique de la surface de la paroi.

Nombre de Nusselt

En convection forcée, le nombre de Nusselt équivaut à :

$$Nu = A \cdot Re^m \cdot Pr^n$$

et en convection naturelle

$$Nu = A \cdot Gr^p \cdot Pr^q$$

A, B, m, n, p, q sont des valeurs expérimentales

Nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds renseigne sur le régime d'écoulement du fluide. Il est également employé dans les calculs de convection forcée.

$$Re = \frac{V \times l \times \rho}{\mu} \quad \{4\}$$

V : vitesse du fluide loin de la paroi

l : longueur caractéristique de la surface

ρ : masse volumique du fluide

μ : viscosité dynamique du fluide

Nombre de Prandtl

Le nombre Prandtl caractérise les propriétés physiques et thermiques du fluide.

$$Pr = \frac{\mu \times Cp}{\lambda} \quad \{4\}$$

Cp : chaleur massique du fluide

λ : conductivité thermique du fluide

Nombre de Grashoff

Le nombre de Grashoff remplace le nombre de Reynolds lors des phénomènes de convection naturelle. L'écart de température a une influence directe sur le nombre de Grashoff.

$$Gr = \frac{\beta \times g \times \rho^2 \times l^3 \times \Delta t}{\mu} \quad \text{où } \Delta t : \text{écart de température entre la surface de la paroi et le fluide}$$

β : Coefficient de dilatation volumique du fluide

g : accélération de la pesanteur

ρ : masse volumique du fluide

μ : sa viscosité dynamique

Dans la pratique, pour les échanges convectifs entre l'air et les surfaces des parois isolantes, il est recommandé de prendre une valeur de h_c entre 5 à 7 W/m².K pour les faces intérieures et de 15 à 20 W/m².K pour les faces extérieures. Les valeurs du coefficient d'échange dépendant essentiellement de la circulation du fluide, on retient surtout les valeurs suivantes :

Coté externe de la paroi	1/h_i [m².K/W]	Coté interne de la paroi	1/h_e [m².K/W]
Cas où il est contact avec l'air extérieur	0,03	Cas d'une chambre froide en ventilation mécanique	0,06
Cas où il est contact avec un autre local	0,12	Cas d'une chambre froide en ventilation naturelle	0,12

Tableau 1.2.1 Résistances thermiques superficielles des parois d'une chambre froide. {13}

II.3 Flux conductif

II.3.1 Définition

Le flux conductif est le flux thermique traversant un corps opaque dans lequel la chaleur se propage de proche en proche sans déplacement apparent de matière.

L'importance du flux est fonction de la nature du milieu et de la variation de la température le long des lignes de flux.

II.3.2 Loi de Fourier

D'après la loi de Fourier, le flux de chaleur traversant une surface d'aire A est définie par :

$$\Phi_{cd} = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \cdot A \quad (\text{I.12})$$

où $\frac{\partial T}{\partial n}$: exprime la dérivée normale de la température

n : Vecteur normal à la surface isotherme

λ : Coefficient de conductivité thermique du matériau.

Et la quantité de chaleur échangée pendant un intervalle de temps Δt s'écrit :

$$\Delta Q = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \cdot A \cdot \Delta t \quad (\text{I.13})$$

Pour un milieu homogène et isotrope, la conductivité λ ne dépend que de la température. Pour des écarts de températures assez faibles, on peut considérer λ comme constante pour un milieu donné.

II.3.3 Equation générale de la conduction

L'équation générale de la conduction pour un milieu homogène et isotrope s'écrit :

$$\Delta T + \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{P}{\lambda} \quad (\text{I.14})$$

$\frac{\partial T}{\partial t}$: Variation de la température par rapport au temps

$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_v}$: Diffusité thermique du milieu

P : puissance fournie par les sources internes

ΔT : Laplacien de la température

En régime permanent l'équation devient :

$$\Delta T + \frac{P}{\lambda} = 0 \quad (\text{I.15})$$

En régime permanent et sans source de chaleur interne on aura :

$$\Delta T = 0 \quad (\text{I.16})$$

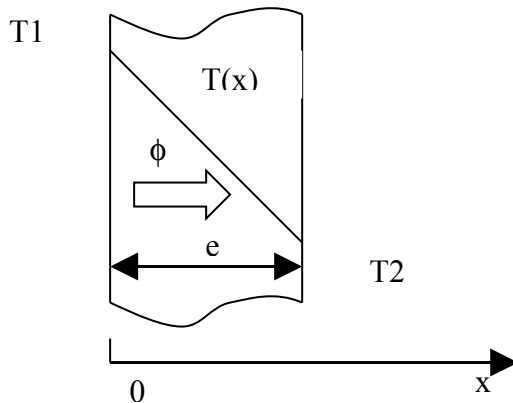
II.3.4 Conduction unidirectionnelle dans une paroi homogène à face parallèle et en régime permanent

D'après (I.16) $\Delta T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \Rightarrow T = a.x + b$ La température varie linéairement en fonction de la profondeur x .

$x = 0 ; T = T_1$

$x = e ; T = T_2$

$$T(x) = \frac{T_2 - T_1}{e} . x + T_1$$



Comme il s'agit d'un flux unidirectionnel suivant l'axe Ox, l'équation (I.12) devient :

$$\Phi_{cd} = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} . A \quad \text{ou} \quad dT = -\frac{\Phi}{\lambda \cdot S} . dx \quad \text{et}$$

l'intégration de l'équation pour la température variant de T_1 à T_2 donne

$$T_2 - T_1 = -\frac{\Phi}{\lambda \cdot S} . (x_2 - x_1) \quad \text{ou}$$

$$T_2 - T_1 = \frac{e}{\lambda \cdot S} \Phi \quad (I.17)$$

Fig. 1.2.1 variation de la température dans une

paroi plane

Analogie électrique

On définit la résistance thermique R_t entre deux surfaces isothermes T_1 et T_2 traversé par un flux Φ par la relation $T_2 - T_1 = R\Phi$. Cette notion est obtenue par analogie avec la loi d'ohm $E_2 - E_1 = RI$ où R est la résistance électrique et I l'intensité de courant la traversant.

Pour la paroi étudiée ci-dessus

$$R_t = \frac{e}{\lambda \cdot S} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K/W}] \quad (I.18)$$

Cas d'un mur accolé à n couche de matériaux différents

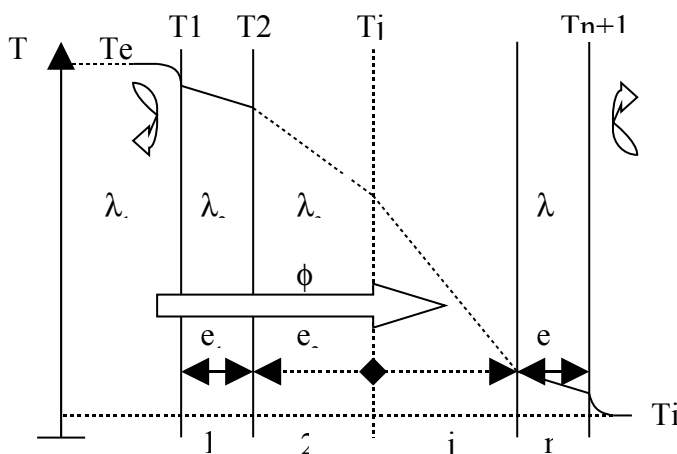


Fig.1.2.2 Allure des courbes de températures dans un mur composite
 $T_1 - T_{n+1} = (T_1 - T_2) + (T_2 - T_3) + \dots + (T_n - T_{n+1})$

Par conservation du flux Φ :

$$T_1 - T_{n+1} = \frac{e_1}{\lambda_1 \cdot S} \cdot \Phi + \frac{e_2}{\lambda_2 \cdot S} \cdot \Phi + \frac{e_3}{\lambda_3 \cdot S} \cdot \Phi + \dots + \frac{e_n}{\lambda_n \cdot S} \cdot \Phi = \Phi \cdot \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i \cdot S} \quad (I.19)$$

La résistance thermique totale du mur composite est $R = \sum_{i=1}^n R_i = \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i \cdot S}$

II.3.5 Conduction combinée

Dans la pratique, les trois modes de transmission de chaleur se font simultanément pour un système donné. Ce mode de transfert de chaleur recombine la transmission de chaleur par convection et conduction (cf. fig.1.2.2). C'est ce cas que l'on rencontre essentiellement pour une paroi séparant deux atmosphères. Il y a convection entre la surface extérieure (respectivement intérieure) et le fluide, conduction à l'intérieur de la paroi même.

Par conservation du flux, on peut écrire les trois égalités suivantes:

$$\Phi = h_{ce} \cdot S \cdot (T_e - T_1) \quad (I.20) \quad : \text{Convection à l'extérieur}$$

D'après (I.19)

$$\Phi = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i \cdot S}} (T_1 - T_{n+1}) \quad (I.21) \quad : \text{Conduction à l'intérieur de la paroi.}$$

$$\Phi = h_{ci} \cdot S \cdot (T_{n+1} - T_i) \quad (I.22) \quad : \text{Convection à l'intérieur}$$

On définit alors le coefficient d'échange globale K tel que :

$$\Phi = K \cdot S \cdot (T_e - T_i) \quad (I.23) \quad \text{avec } T_e - T_1 = \frac{\Phi}{h_{ce} \cdot S}$$

$$T_1 - T_{n+1} = \Phi \cdot \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i \cdot S}$$

$$T_{n+1} - T_i = \frac{\Phi}{h_{ci} \cdot S}$$

$$\text{En additionnant ces termes on obtient : } T_e - T_i = \left(\frac{1}{h_{ce} \cdot S} + \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i \cdot S} + \frac{1}{h_{ci} \cdot S} \right) \cdot \Phi \quad (I.24)$$

$$\text{Et de (I.23) et (I.24)} \quad K = \frac{1}{\frac{1}{h_{ce} \cdot S} + \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i \cdot S} + \frac{1}{h_{ci} \cdot S}}$$

Par la suite, les températures des différents contacts entre couches de matériaux distincts et la température des surfaces de la paroi (cf. figure 1.2.2) est donnée par :

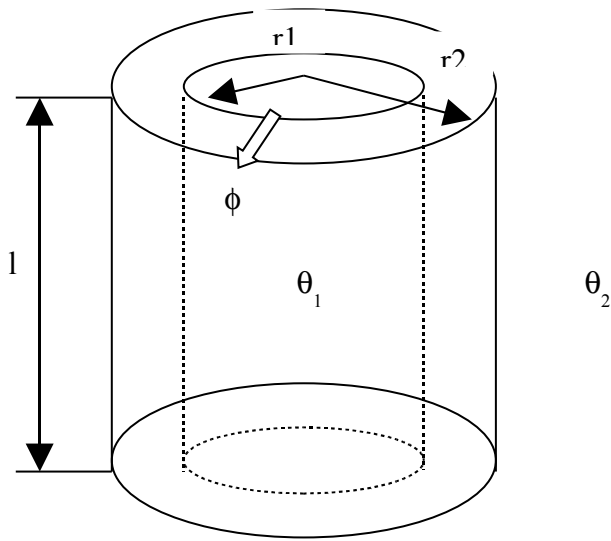
$$T_1 = T_e - \frac{\Phi}{h_{ce}} = T_e - \frac{K \cdot S \cdot (T_e - T_i)}{h_{ce}} \quad (I.25)$$

$$\text{et pour } j \text{ variant de } 2 \text{ à } n+1 \quad T(j) = T(j-1) - \frac{\Phi}{\frac{\lambda_j}{e_j}} = T(j-1) - \frac{K \cdot S \cdot (T_e - T_i)}{\frac{\lambda_j}{e_j}} \quad (I.26)$$

Cas des parois cylindriques :

Le flux conductif est donné par la relation :

$$\Phi = 2\pi l \lambda \cdot \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad [\text{W}]$$

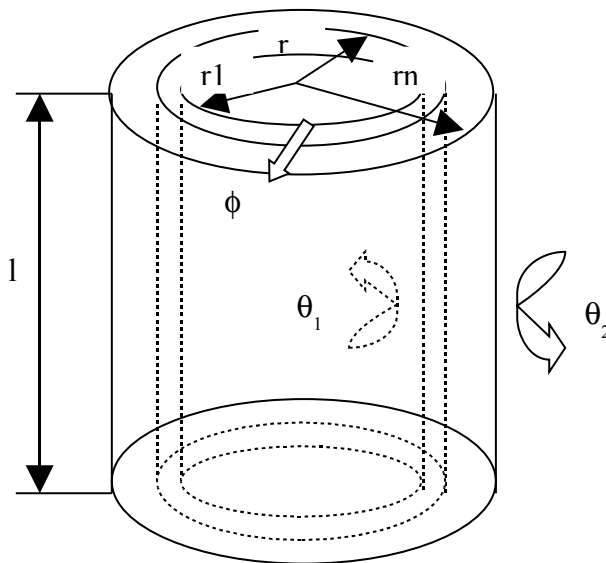


et résistance thermique par :

$$R = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi \lambda l} \quad \{15\}$$

Fig. 1.2.3 Paroi cylindrique à surface latérale isotherme

Cas d'une paroi cylindrique composite en contact avec deux fluides



Le flux de chaleur est donné par :

$$\Phi = \frac{\theta_1 - \theta_2}{R_{c1} + \sum_{i=1}^n R_i + R_{c2}}$$

et les résistances thermiques

$$R_i = \frac{\ln\left(\frac{r_{i+1}}{r_i}\right)}{2\pi \lambda l}$$

$$R_{c1} = \frac{1}{h_{c1} \cdot S_1}$$

$$R_{c2} = \frac{1}{h_{c2} \cdot S_2}$$

Fig. 1.2.4 Paroi cylindrique composite en contact avec deux fluides

PARTIE II

PRINCIPES D'ISOLATION DE CHAMBRES FROIDES

Chapitre 1 : MATERIAUX D'ISOLATIONS FRIGORIFIQUES

L'objectif de l'étude des matériaux d'isolations frigorifiques se rapporte sur le choix de ces derniers suivants leurs conditions d'emplois.

La connaissance des propriétés de ces matériaux peut contribuer à l'optimisation de leur utilisation.

A cause de leur importance dans l'isolation frigorifique, deux espèces de matériaux vont diriger l'objet de notre étude :

- Les matériaux isolants
- Les matériaux pare vapeur ou d'étanchéité

Les caractéristiques spécifiques des autres matériaux de construction seront consultées à l'annexe.

I.1 : LES ISOLANTS THERMIQUES

I.1.1 Définition

La fonction primordiale qu'un isolant thermique doit accomplir serait de limiter le flux de chaleur entre deux milieux. Les isolants sont alors avant tout des mauvais conducteurs de chaleur.

Certains ouvrages dictent qu'on peut considérer comme isolants frigorifiques les matériaux dont le coefficient de conductivité équivalent est inférieur à $0,06 \text{ W/m.}^{\circ}\text{C}$ ($0,05 \text{ kcal/h.m.}^{\circ}\text{C}$). {4}

Les gaz sont les corps les plus médiocrement conducteurs de chaleur. Pour utiliser cette propriété des gaz en isolation thermique, il faut éliminer les mouvements de convection qui tendent à accroître la conductivité thermique de l'isolant. Pour se faire, on immobilise la phase gazeuse dans une matrice poreuse convenable.

Les matériaux isolants sont donc formés de deux corps matériels distincts : la matrice poreuse et la phase gazeuse.

Notons que les deux corps formants l'isolant possèdent leur coefficient de conductivité respectif. Pour la suite, le coefficient de conductivité d'un isolant sous entendra son coefficient de conductivité équivalent.

I.1.2 Classification et propriétés

I.1.2.1. Classification des isolants

A partir de la structure des composants de l'isolant, on peut les classer en deux catégories :

- les particules solides en milieu gazeux ;
- les cellules gazeuses en milieu solide plus ou moins continu.

Les particules solides en milieu gazeux

Pour ce type d'isolant, la phase gazeuse est emprisonnée à l'intérieur des espacements entre les éléments solides.

Ces isolants sont surtout caractérisés par leur grande perméabilité aux gaz et à la vapeur d'eau.

Le tableau 1.3.1 montre quelques exemples de matériaux d'isolations de ce type et ses différentes caractéristiques utiles.

Les cellules gazeuses en milieu solide plus ou moins continu

Le milieu solide est de structure cellulaire. Les cellules peuvent être ouvertes (structure spongieuse) ou fermées (structure alvéolaire).

La structure cellulaire de l'isolant est généralement obtenue par expansion lors de la fabrication.

Ces isolants résistent mieux à l'infiltration de vapeur que ceux cités précédemment.

I.1.2.2. Propriétés des matériaux isolants

Nous distinguerons dans cette partie les propriétés les plus intéressantes à connaître pour le matériau utilisé en isolation frigorifique.

De part leur importance pour le choix, le dimensionnement et la mise en œuvre de l'isolant, nous aborderons les propriétés physiques et intrinsèques de l'isolant, l'influence de l'eau sur ces propriétés, les propriétés mécaniques et certains caractéristiques techniques à savoir sur l'isolant.

a- Les propriétés physiques et intrinsèques de l'isolant

➤ La conductivité thermique équivalente de l'isolant

C'est la première propriété à savoir d'un isolant. Elle est inversement proportionnelle à la résistance thermique du matériaux (cf. conduction thermique).

Pour un corps donné, la conductivité thermique définit sa capacité de conduire la chaleur.

Cette valeur est généralement fournie par un résultat de laboratoire suivant des normes conventionnelles donc pour des conditions bien déterminées. Beaucoup de facteurs extérieurs peuvent influencer une variation de cette valeur.

En effet, la température peut induire une variation plus ou moins grande sur ce coefficient. Il est nécessaire d'être en possession de la courbe de variation du coefficient λ en fonction de la température en cas d'utilisation pour des conditions bien déterminées.

La figure 2.1.1 définit la variation de la conductivité de divers matériaux isolants

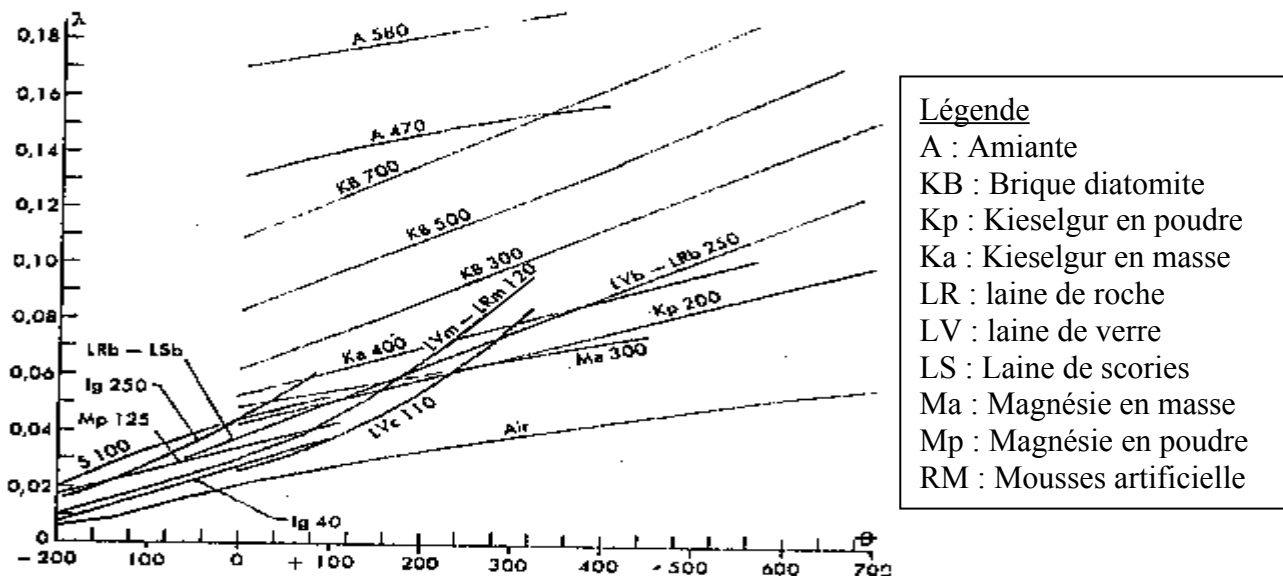


Fig.2.1.1 Courbe de variation de la conductivité par rapport à la température de quelques matériaux isolants

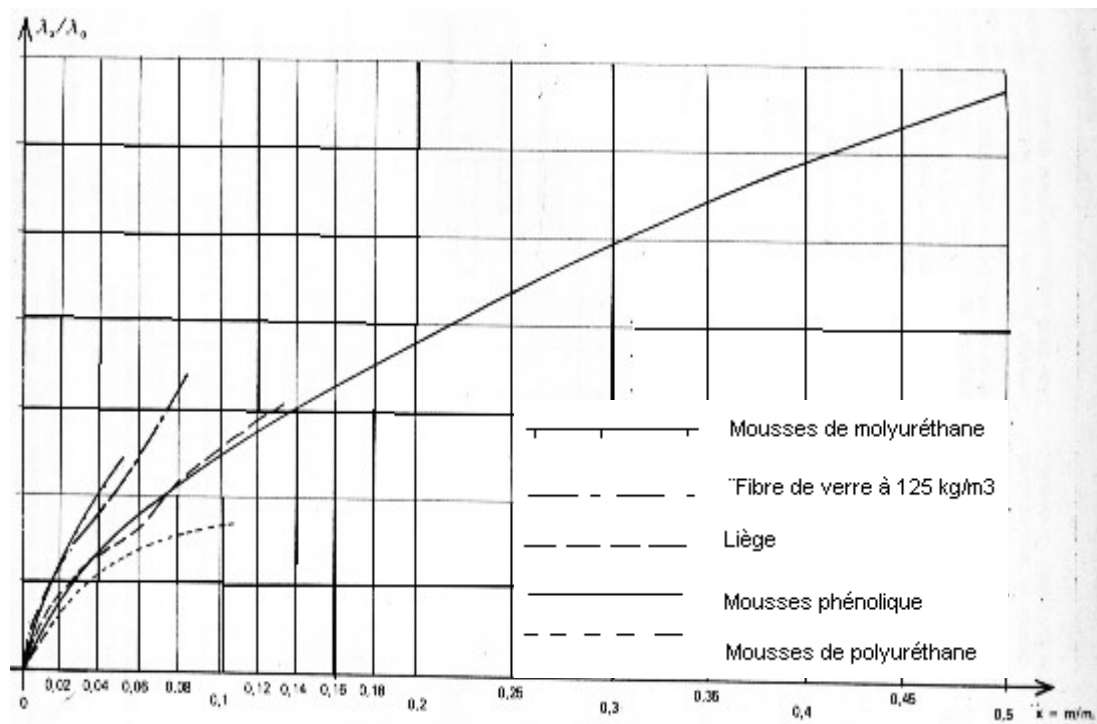


Fig. 2.1.2 Courbe de variation de la conductivité en fonction de la masse d'eau fixée

Nous constaterons aussi une diminution du pouvoir isolant en fonction de la masse d'eau fixée à l'intérieur de l'isolant. La fixation d'eau peut provenir de l'adsorption au cours de stockage des isolants ou la migration de la vapeur d'eau et condensation au cours de son utilisation.

La figure 2.1.2 permet de caractériser ce phénomène.

Remarque :

Certains isolants imprégnés avec du gaz à faible coefficient de conductivité possèdent un coefficient λ évoluant dans le temps. La conductivité thermique de ces matériaux a tendance à s'accroître ceci est dû au remplacement progressif des gaz renfermés dans les cellules par de l'air.

Exemple : le R 11 est le gaz d'imprégnation du polyuréthane

$$\lambda_{R11} = 0,007 \text{ kcal/m.h}$$

$$\lambda_{\text{air}} = 0,020 \text{ kcal/m.h}$$

Les valeurs des coefficients de conductivité données par les tableaux 2.1.1, 2.1.2, 2.1.3 et 2.1.4 sont des valeurs applicables pour les calculs d'épaisseurs de l'isolant employé avec un matériau pare vapeur efficace.

➤ La masse volumique

La masse volumique détermine la qualité ou la classe de l'isolant pour une série fabriquée avec le même matériau.

Cette valeur doit être considérée pour :

- le mode de pose de l'isolant (mise en œuvre, fixation,...) ;
- l'isolation des engins de transports ;
- le problème de régime variable dans l'isolation (influence sur la diffusité $a = \lambda / \rho * c$)
- le choix de l'utilisation de l'isolant (mur, sol, plafond)

Pour une série d'isolant de même type mais de qualité différente, le plus dense possède :

- une meilleure résistance mécanique ;
- une perméabilité au gaz plus faible ;
- un prix plus élevé.

Des facteurs extérieurs peuvent également faire varier la valeur de la masse volumique.

La variation dimensionnelle causée par la température et les contraintes mécaniques modifierait sa valeur. La variation massique occasionnée par la fixation de l'eau sera aussi prise en compte surtout lors des utilisations au plafond.

➤ La variation dimensionnelle

La variation dimensionnelle d'un matériau isolant est surtout fonction de la température. Ces déformations sont plus ou moins irréversibles pour un isolant donné.

Le coefficient de dilatation linéique est défini par :

$$\alpha = \frac{1}{L_0} \times \frac{\Delta L}{\Delta \theta} \quad [K^{-1}] \quad (II.1) \quad L_0 : \text{longueur initiale}$$

ΔL : variation de longueur

$\Delta \theta$: variation de la température

Il faut tenir compte de ce coefficient surtout au niveau du retrait pour les isolants de dimension importante.

➤ Perméabilité aux gaz

La perméabilité aux gaz renseigne sur la capacité du matériau isolant à résister à la migration de différents gaz.

On peut citer pour l'isolation frigorifique la migration de la vapeur et d'oxygène O_2 du milieu extérieur vers le milieu intérieur et du gaz carbonique CO_2 dans le sens inverse.

La valeur de la perméabilité du matériau isolant sera prise en compte dans le calcul du matériau d'étanchéité mis en œuvre avec celui-ci.

Le coefficient caractéristique de la perméabilité à la vapeur d'eau est déduit des essais exécutés dans des conditions conventionnelles :

- Epaisseur de l'échantillon : 25 mm

- Conditions tropicales : $T = 38^{\circ}\text{C}$; $\text{HR} = 88,5\%$
- Conditions tempérées : $T = 23^{\circ}\text{C}$; $\text{HR} = 88\%$

La résistance à la diffusion de vapeur d'eau de l'isolant sera donnée par :

$$R_{di} = \frac{e}{C} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{mm de Hg} / \mu\text{g}] \quad (\text{II.2}) \quad \begin{array}{l} e : \text{épaisseur de l'isolant} \\ C : \text{coefficient de diffusion de l'isolant donné} \end{array}$$

La détermination de C découle du résultat des mesures normalisées

$$C = \frac{\varphi_m \times e}{\Delta p} \quad (\text{II.3}) \quad \begin{array}{l} \varphi_m : \text{flux massique mesuré selon la norme employée} \\ e : \text{épaisseur employée lors de la mesure} \\ \Delta p : \text{écart de pression partiel lors de la mesure.} \end{array}$$

b- Propriétés mécaniques

Nombres de contraintes mécaniques peuvent s'appliquer à l'isolation mise en fonction.

La contrainte de compression mérite d'être étudiée soigneusement à cause de son importance dans tous les types de construction. Exprimée en [kPa], elle est appliquée normalement à la surface de l'isolant et s'exerce sur toute la totalité de celle-ci.

Certaines contraintes de compressions consultées dans les tableaux sont les contraintes appliquées pour un affaissement relatif de 10%. Cette déformation n'est pas acceptable dans le domaine d'isolation frigorifique. Dans la pratique, il est à conseiller de ne pas dépasser les contraintes donnant une déformation de 3 à 4 mm pour l'isolant.

La déformation est donnée par :

$$\Delta L = \frac{L_0}{E} \sigma = \frac{L_0}{E} \times \frac{F}{A} \quad (\text{II.4}) \quad \begin{array}{l} L_0 : \text{épaisseur hors contrainte} \\ E : \text{module d'élasticité} \\ F : \text{force de compression normale} \\ A : \text{surface d'application de la force F} \end{array}$$

c- Réaction aux feux

Cette notion est très utile sur le plan de la sécurité et sur le plan économique de l'exploitation. Des essais normalisés regroupent les matériaux en six catégories suivant leur réaction aux feux :

M0 : pour les matériaux incombustibles

M1 : matériaux inflammables

M2 : matériaux difficilement inflammables

M3 : matériaux moyennement inflammables

M4 : matériaux facilement inflammables

M5 : matériaux très facilement inflammable

Les matériaux d'origines minérales sont reconnus pour leur bonne réaction au feu (M0).

d- Résistances aux agents chimiques

La résistance aux agents chimiques caractérise la réaction de l'isolant vis-à-vis des matériaux susceptibles d'entrer en contact avec celui-ci et des matériaux employés lors des confections des chambres froides.

e- Résistances aux rongeurs et aux insectes

Les isolants, compte tenue de leur caractéristique tendre, sont l'objet de déprédation causé par les rongeurs et les insectes plus particulièrement la thermite. Il convient de bien protéger les matériaux d'isolations de l'action de ces derniers pour assurer la continuité et l'efficacité de l'isolation.

Les tableaux 2.1.1, 2.1.2, 2.1.3 et 2.1.4 donnent les caractéristiques les plus intéressantes à savoir pour certains isolants couramment utilisés.

Ces caractéristiques sont figurées pour un produit donné dans la fiche technique livré avec celui-ci. Nous donnerons en annexe un exemple type de fiche technique d'un isolant

CATEGORIE I : Particules solides en milieux gazeux

	Fibre de verre		Fibre minérale	Perlite	
Structure	fibreuse		Mêmes caractéristiques que la fibre de verre	granuleux	
Origine	minérale			minérale	
Caractéristiques	Valeurs	Remarques		Valeurs	Remarques
Conductivité thermique [W/m °C]	0,035			0,035	
Perméabilité à la vapeur d'eau	Grande	Utilisation avec pare vapeur soigné		grande	
Dilatation linéaire [K ⁻¹]	8.10 ⁻⁶	Stable*			
Incombustibilité	M0	Incombustible*		M0	Incombustible*
Résistance à la compression [kPa]	faible	Utilisation aux sols à proscrire		faible	
Résistance aux agents chimiques	Bonne*			Bonne*	
Résistance aux rongeurs et insectes	Bonne*			Bonne*	
Masse volumique [kg/m ³]	22 (PI.156) 29 (PSF)		70 à 100	45 à 65	

Tableau 2.1. 1 : caractéristiques des isolants catégorie I

(*) : Point fort de l'isolant

CATEGORIE II : Cellules gazeuses en matière solide plus ou moins continue

	Verre cellulaire (Foamglass)		Liège expansé pur		Polystyrène expansé	
Structure cellulaire	à cellules fermées		à cellules fermées		à cellules fermées	
Origine	minérale		végétale		synthétique	
Gaz ^(**)	CO2		air		air	
Caractéristiques	Valeurs	Remarques	Valeurs	Remarques	Valeurs	Remarques
Masse volumique [kg/m³]	125 (T2) 135 (S3)	Elevé, précaution pour utilisation au plafond	110 à 120	Elevé, précaution pour utilisation au plafond	20	
Conductivité thermique [W/m °C]	0,047	Très élevé	0,040 à 24 °C		0,039 à 23°C	
Perméabilité à la vapeur d'eau [µg/m².s]	# 0	Etanche *	800 à 900 (IPVE 23)	moyenne	400 (IPVE 23)	
Dilatation linéaire [K⁻¹]	8,5.10 ⁻⁶	Stable *	Bonne stabilité dimensionnelle	Elastique*	7.10 ⁻⁵	Elevé : Prévoir les retraits
Incombustibilité	M0	Incombustible*	M4	moyen	M4	
Résistance à la compression [kPa]	T2 :490 S3 :680	Bonne*	220	Convenable* au sol	30 à 150	
Résistance aux agents chimiques	Bonne*					
Résistance aux rongeurs et insectes	Bonne*		mauvais	Protéger les parties non induites		
Température d'utilisation [°C]	-260 à 430	Vaste plage d'utilisation*			-200 à 85	Convenable à l'utilisation frigorifique

Tableau 2.1. 2 : Caractéristiques des isolants catégorie II

(*) : Point fort de l'isolant

(**) : Gaz d'imprégnation utilisé

	Polystyrène extrudé (Styrofoam)		Chlorure polyvinyle expansé (klégécell)	
Structure cellulaire	à cellules fermées		à cellules fermées	
Origine	synthétique		synthétique	
Gaz ^(**)	air		CO2	
Caractéristiques	Valeurs	Remarques	Valeurs	Remarques
Masse volumique [kg/m³]	28		28 (isolant léger) 90 (isolant dense)	
Conductivité thermique [W/m °C]	0,033		0,018 à 0,020	
Perméabilité à la vapeur d'eau [µg/m².s]	179	Faible*	80 (isolant léger) 180 (isolant dense)	Faible*
Dilatation linéaire [K⁻¹]	7.10 ⁻⁵	Elevé : Prévoir les retraits	3,5.10 ⁻⁵	moyen
Incombustibilité	M1	-Auto extinguable* -Protéger l'isolant contre le soleil		
Résistance à la compression [kPa]	250 pour un affaissement de 5%	Bonne*	200 à 1200 *	
Résistance aux agents chimiques				
Résistance aux rongeurs et insectes				
Température d'utilisation [°C]			<80°C *	

Tableau 2.1 3 : caractéristiques des isolants catégorie II

(*) : Point fort de l'isolant

(**) : Gaz d'imprégnation utilisé

	Mousses rigides de polyuréthane (PUR)		Mousses phénoliques	
Structure cellulaire	à cellules fermées		à cellules fermées	
Origine	synthétique		synthétique	
Gaz ^(**)	R 11 ou R 12			
Caractéristiques	Valeurs	Remarques	Valeurs	Remarques
Masse volumique [kg/m³]	35 (par projection) 45 (par injection)	Mises en œuvre 'in situ'	40	
Conductivité thermique [W/m °C]	0,020 à 0,023*		0,037	
Perméabilité à la vapeur d'eau [µg/m².s]	900 à 1400	élevé	1500	élevé
Dilatation linéaire [K⁻¹]	6 à 7.10 ⁻⁵	Prévoir les retraits	2,9.10 ⁻⁵	moyen
Incombustibilité	M5 (mousses standard) M1 (mousses ignifuges)			
Résistance à la compression [kPa]	140 à 600	Bonnes pour la qualité Q3, Q4, Q5	200	
Résistance aux agents chimiques	Bonne aux acétone et tri chlorobenzène			
Résistance aux rongeurs et insectes				
Température d'utilisation [°C]	<80 °C			

Tableau 2.1.4 : caractéristiques des isolants catégorie II

(*) : Point fort de l'isolant

(**) : Gaz d'imprégnation utilisé

I.2 : MATERIAUX PARE VAPEUR ET D'ETANCHEITE

Dans la plupart des cas, surtout pour les chambres à « atmosphère contrôlée », on maintient à l'intérieur d'une enceinte frigorifique une atmosphère beaucoup plus pauvre en oxygène O₂ et en vapeur d'eau et beaucoup plus riche en gaz carbonique que l'atmosphère extérieure.

On constate qu'il en résulte des transferts de masse de ces gaz à travers la paroi isolante.

On se préoccupe d'avantage à la migration de la vapeur d'eau qui est d'une importance capitale quant à la bonne tenue de l'ouvrage et l'installation frigorifique tout entière.

I.2.1 – Mécanisme de migration de la vapeur d'eau

En général, presque tous les isolants possèdent une certaine perméabilité à la vapeur d'eau à l'exception de quelques uns précisés dans les paragraphes concernant les isolants.

De part et d'autre d'une paroi isolante, limitant une enceinte frigorifique, existe une différence de pression partielle de vapeur d'eau à l'intérieur, p_i , et à l'extérieur, p_e , de l'enceinte froide. Cet écart ($p_e - p_i$) va induire la migration de la vapeur d'eau généralement du milieu extérieur plus chaud et plus humide vers l'intérieur plus froid et plus sec de la chambre froide.

Le flux massique de vapeur d'eau pénétrant une paroi est défini par :

$$\phi_m = \frac{\delta_m}{a \cdot \text{Re} \cdot T_m} \times \frac{p_e - p_i}{e} \quad [\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}] \quad (\text{II.5})$$

δ_m : coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air immobile à la température T_m de la paroi isolante

a : rapport entre le coefficient de diffusion de l'air immobile d'une part et de la matrice d'autre part

Re : constante des gaz de la vapeur d'eau

e : épaisseur de la paroi

Par analogie avec la conduction thermique, on peut considérer le coefficient λ_m

$$\lambda_m = \frac{\delta_m}{a \cdot \text{Re} \cdot T_m} ; \text{ comme conductivité massique de la paroi}$$

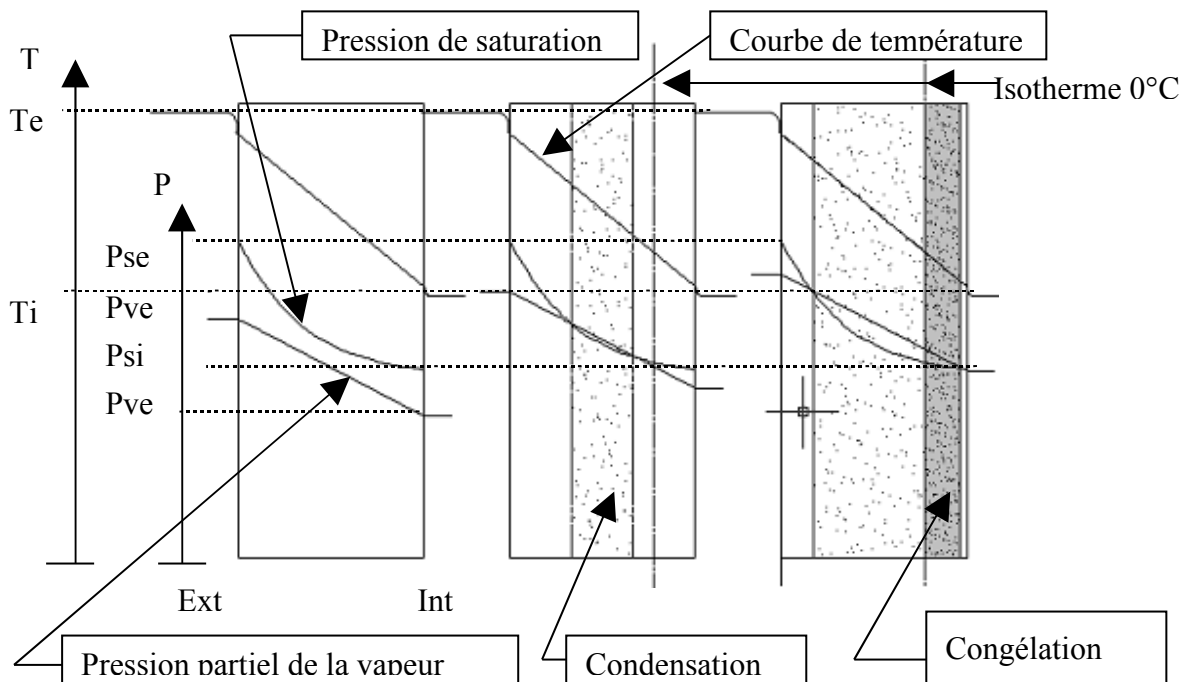
Cette migration de la vapeur d'eau peut provoquer une condensation à l'intérieur de la paroi isolante et plus grave même une congélation des masses d'eau condensée.

La figure 2.1.3 permet de visualiser graphiquement les phénomènes pouvant se produire à l'intérieur d'une paroi isolante concernant la migration de la vapeur d'eau.

La détermination des pressions de saturations ou des pressions partielles se fait à l'aide du diagramme de l'air humide à la pression atmosphérique et comportant un axe vertical des pressions partielles de la vapeur (fig. 3.3.1). La pression de saturation est la pression partielle de la vapeur à la saturation (humidité relative $\psi=1$).

Le phénomène de condensation apparaît quand, à un milieu donné, la pression partielle de la vapeur d'eau est supérieure à la pression de saturation pour la température de ce milieu. Il y a

congélation si la condensation se situe dans les zones dont les températures sont inférieures à la température de congélation de l'eau (0°C).



A : Aucun risque de condensation B : condensation C : condensation associée à la congélation de l'eau condensée.

Fig. 2.1.3 : Courbes des températures et des pressions partielles de la vapeur dans une paroi.

En effet, connaissant l'humidité relative de l'air pour le milieu considéré (intérieur ou extérieur de la chambre) et sa température, on peut déduire du diagramme de l'air humide toutes ses caractéristiques y compris la pression partielle de la vapeur d'eau.

I.2.2 – Classification et propriétés

A l'exception de certains matériaux isolants comme les verres cellulaires, et d'autres matériaux étanches à la migration de la vapeur d'eau, presque la totalité des matériaux isolants possèdent une perméabilité plus ou moins grande à la vapeur d'eau.

Pour éviter les problèmes cités ci-dessus qui se traduisent surtout par :

- l'augmentation des apports calorifiques en provenance des parois,
- l'accroissement du temps de marche de la machine frigorifique,
- la dégradation mécanique de l'isolant en cas de congélation de l'eau condensée,
- le givrage excessif des frigorifères

On utilise les matériaux pare vapeur qui limitent le flux de vapeur pénétrant dans la chambre froide et éloignent la courbe des pressions de vapeur de la courbe de saturation évitant ainsi la

condensation. On considère généralement comme acceptable une diffusion de vapeur d'eau n'excédant pas $1 \text{ g/m}^2 \cdot \text{jour}$ ($11,57 \text{ } \mu\text{g/m}^2 \cdot \text{s}$). {4}

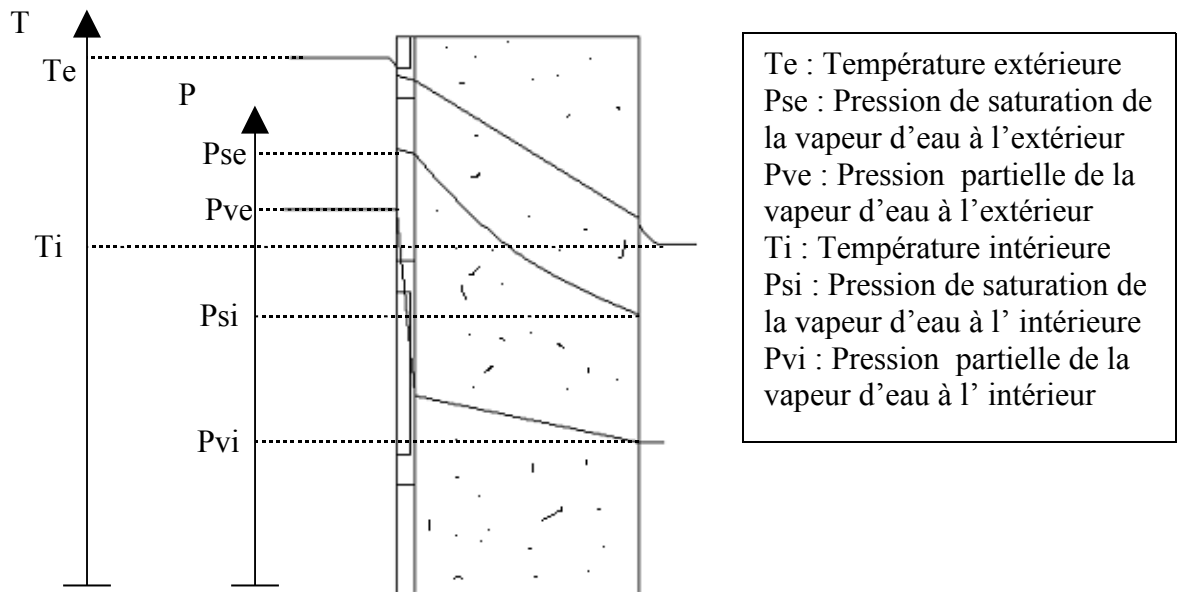


Fig. 2.1.4 : Courbes des températures et pression de la vapeur dans une paroi avec matériaux pare vapeur.

I.2.2.1– Classification

On peut classer ces matériaux en deux grandes catégories :

- les matériaux en feuilles
 - Aciers
 - Feuilles d'aluminium
 - Voiles plastiques
 - Feutres bitumeux
 - Matériaux composites

Ces matériaux sont surtout appréciés pour leur épaisseur régulière permettant des calculs précis pour la perméabilité

Il faut surtout s'assurer, en cas d'utilisation, de l'étanchéité au niveau des joints.

- Les matériaux d'enduction
 - Les émulsions de bitume
 - Les bitumes fondus
 - Les mastics solvantés
 - Les résines polymérisables

En opposition avec les matériaux en feuilles, les matériaux d'enduction présente une meilleure continuité mais leurs irrégularités ne facilitent pas leur contrôle.

I.2.2.2– Propriétés et caractéristiques

La première caractéristique des matériaux pare vapeur est sa résistance à la migration de la vapeur, sa perméabilité exprimée en $[\mu\text{g}/\text{m}^2.\text{s}]$ ou $[\text{g}/\text{h.m.mm de Hg}]$ est donc très réduite.

Correspondance : $1 [\text{g}/\text{h.m.mm de Hg}] = 1,99 [\mu\text{g}/\text{m}^2.\text{s}]$

Il faut surtout tenir compte des conditions de mesure normalisée pour déduire, des valeurs de perméabilité données, les valeurs à employer dans les conditions réelles d'exploitation.

Souvent la norme NF H 00.030 définit ces mesures dans deux conditions d'essais :

	-	Condition tempérée
T=25°C	}	$\Delta p = 2849 \text{ Pa (21 mm de Hg)}$
HR=90%		

	-	Condition tropicale
T=38°C	}	$\Delta p = 5960 \text{ Pa (44.7 mm de Hg)}$
HR=90%		

La perméabilité aux gaz O_2 et CO_2 est à considérer pour contrôler l'atmosphère des chambres de conservation de denrées. La diffusion de ces gaz résultant elle aussi de la différence de pression partielle.

On tient aussi compte de :

- la solidité du matériau face aux pliages et aux poinçonnages pour les matériaux en feuilles et pour les matériaux d'enduction sa souplesse et son déformabilité sans se fissurer ;
- leurs températures d'emploi dont le non respect peut modifier irréversiblement les propriétés physiques des matériaux ;
- son inflammabilité pour des raisons de sécurité ;
- la toxicité des vapeurs des solvants pour les matériaux d'enduction solvantés ;
- la compatibilité de ces matériaux avec l'isolant employé et les produits de jointoyage ;
- sa tenue aux agents chimiques.

Chapitre II : ISOLATION SELON LE TYPE DE CONSTRUCTION

On peut classer le type d'isolation des chambres froides en trois systèmes :

- le système classique ou traditionnel ;
- le système sandwich ou isolation intégrée ;
- le système métallique ou isometal.

La différence se situe surtout au niveau des matériaux employés et la mise en œuvre.

II.1 Le système d'isolation traditionnel

L'isolation traditionnelle utilise les matériaux isolants classiques. Les différentes couches de la paroi isolante sont exécutées séparément, mur support (maçonnerie), pare vapeur, couche isolante et revêtement.

II.1.1 Isolation du sol

L'isolation du sol, si elle est nécessaire, est presque commune pour les trois types de construction sauf pour les petites chambres modulaires.

La barrière de vapeur est munie d'un remonté vertical à raccorder avec celle des parois verticales. Un matériau d'étanchéité à l'eau sera placé sous le dallage pour protéger l'isolant contre l'humidité lors des lavages de la chambre ou lors de la réalisation des dallages eux-mêmes.

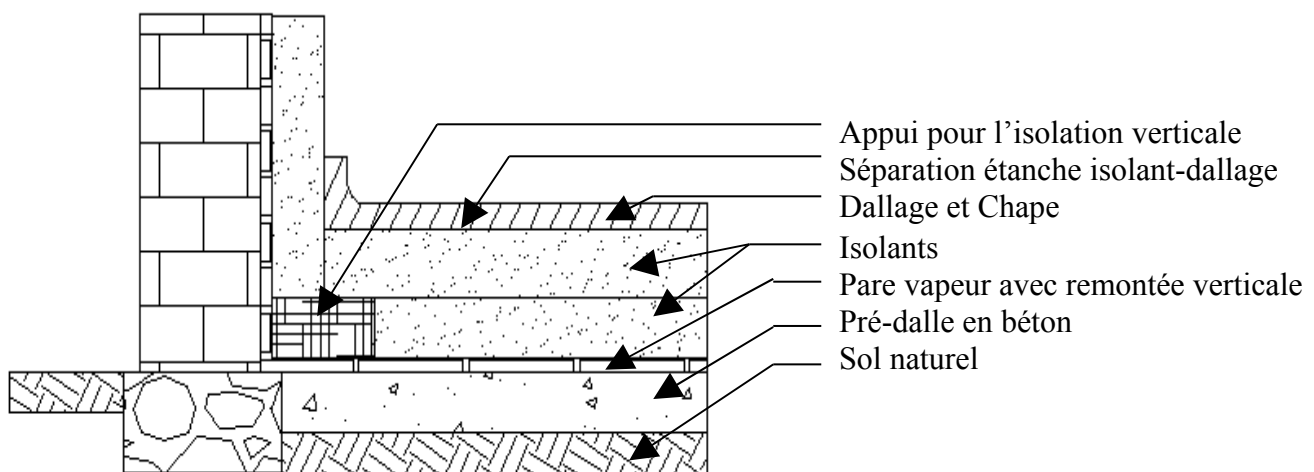


Fig. 2.2.1 Isolation du sol

II.1.2 Isolation des parois verticales

Les isolants employés seront les isolants de faible coefficient de conductivité thermique. Ils sont fixés aux parois soit par collage ; par attache mécanique ou par attache mécanique et collage.

Pour les isolants fibreux la fixation nécessite une ossature, généralement en bois traité, permettant aussi la fixation du revêtement.

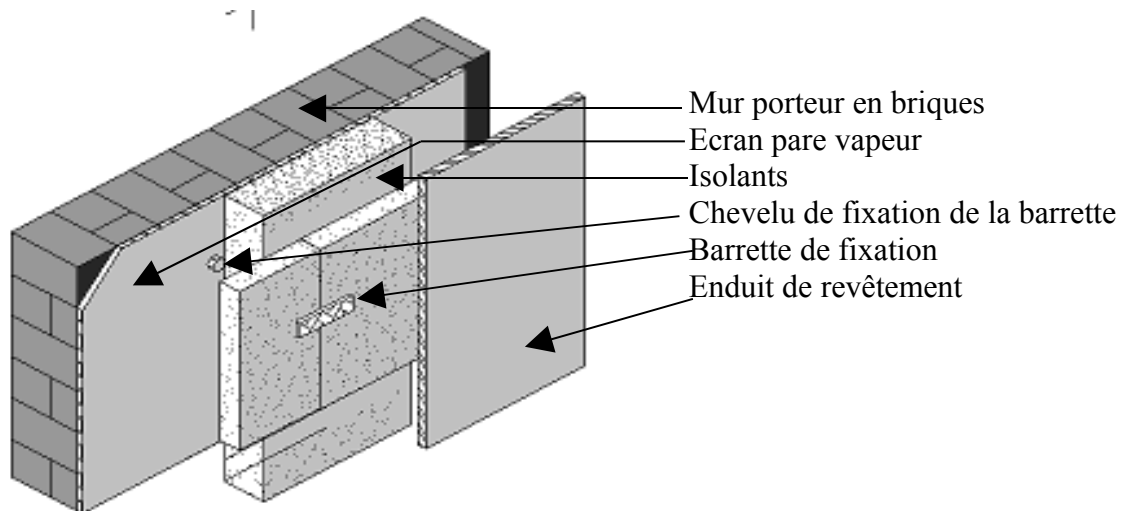


Fig. 2.2.2 Isolation des murs avec croisement des joints

II.1.3 Isolation des plafonds

Les isolants choisis seront les isolants de faible masse volumique. La fixation peut se faire soit par chevelue ou par entretoise plastique. Le plafond peut s'isoler de quatre façons : par-dessus, par-dessous, sous les solives ou en suspente.

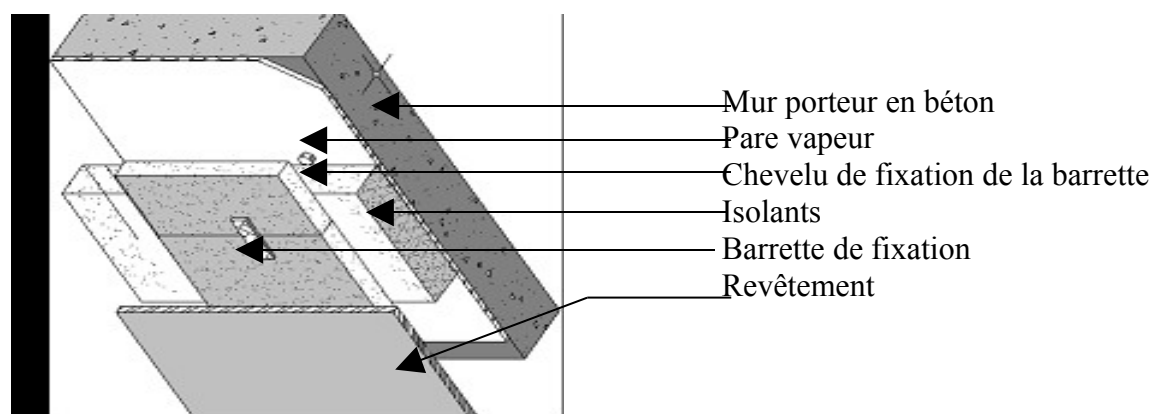


fig.2.2.3 Isolation des plafonds

II.2 le système sandwich ou isolation intégrée

Pour ce type de construction, l'isolant constitue l'essentiel. La maçonnerie du système classique est remplacée par une ossature destinée à supporter l'isolation. L'ossature peut être même supprimée pour les petits et moyens volumes d'où l'appellation de ce système « autoportante ».

La technique sandwich est très utilisée pour ce type de construction ; l'isolant est inséré entre deux revêtements appliqués par collage en usine. Le revêtement inclut la barrière pare vapeur.

II.2.1 Avantages :

- Nombre d'opération de mise en œuvre réduit par rapport au système classique ;
- Rapidité de la mise en œuvre et coût de la réalisation réduit ;
- Plus économique car fabrication en série en usine ;
- Retrait très réduit au niveau de l'isolant ;
- Possibilité de démontage et d'agrandissement pour les petites et moyennes chambres froides

II.2.2 Inconvénients

- Protection contre l'insolation nécessaire à cause de la suppression de la construction en dur, l'isolant est exposé plus ou moins directement au soleil.
- La différence des coefficients de dilatation peut induire des décollements avec les revêtements pour les panneaux sandwich.

II.2.3 – Isolants

L'isolant utilisé est sous forme de panneaux de grande dimension. Par nécessité de meilleure résistance mécanique (flexion, compression, flambage) et pour donner à l'isolation la possibilité d'être employée pour les différentes parois (mur et plafond), on emploie des matériaux isolants rigides comme les :

- Polystyrènes de bonne qualité ;
- Polystyrènes extrudés ;
- Mousses rigides de chlorure de polyvinyle ;
- Mousses rigides de polyuréthane injectées 'in situ' entre deux revêtements métalliques.

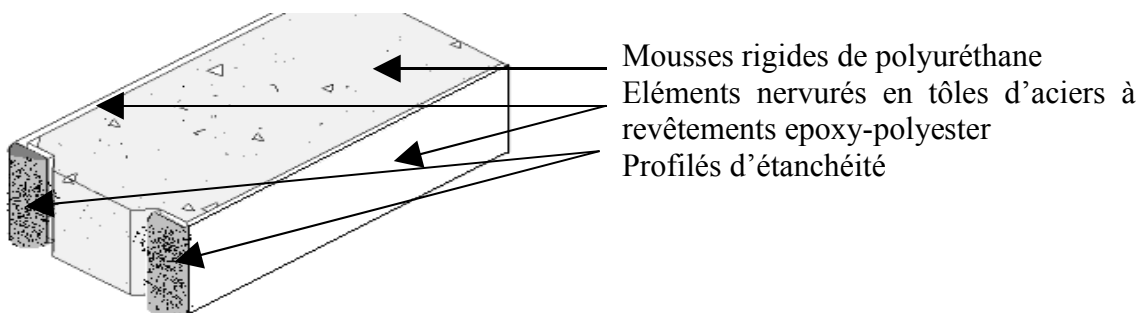


Fig. 2.2.4 Coupe de panneaux isolant en PUR

II.2.4 Revêtements

Ils doivent être fortement collés sous pression à l'isolant. On utilise les :

- Contre-plaques revêtus d'aluminium
- stratifiés, polyester, fibre de verre ;
- tôles galvanisés ou aluminium

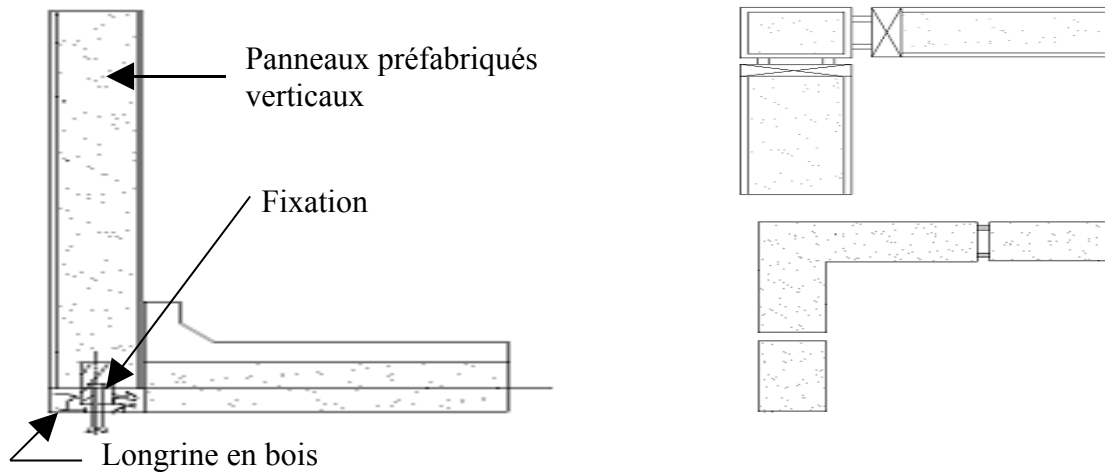


Fig. 2.2.5 Mise en œuvre des isolants préfabriqués et éléments d'angles préfabriqués

II.3 le système d'isolation métallique

Le système d'isolation métallique est une forme particulière de l'isolation intégrée. Les deux possèdent généralement l'avantage d'avoir :

- une faible déperdition ;
- une excellente étanchéité à la vapeur.

De cette dernière, l'isolation métallique appelée aussi enceinte métallique étanche est particulièrement intéressante pour les chambres à atmosphère contrôlée (chambre de conservation de fruit,...) grâce à son étanchéité parfaite à la vapeur d'eau et aux gaz.

Le risque d'incendie est très réduit à cause des revêtements métalliques ce qui par effet diminue le coût d'assurance

II.3.1 Construction

Ce type de construction est généralement employé pour les grands volumes à partir de 1000 m³. Le prix de la construction est un peu plus élevé que celui de l'isolation intégrée mais avec un coût d'exploitation moindre due à la faible déperdition.

L'ossature du bâtiment est ici nécessairement externe.

II.3.2 Isolants

L'étanchéité totale à la vapeur d'eau d'une paroi métallique épaisse et continue permet l'utilisation des isolants fibreux et d'autre isolant fort perméable.

Les éléments isolants sont séparés du milieu extérieur par une tôle nervurée épaisse de grande dimension assemblée sur le chantier par soudage en continue.

Chapitre III : PROBLEMES ACTUELS DE L'ISOLATION

Connaissant les différents types de construction existants, pour pouvoir optimiser le choix concernant l'isolant et le type de construction à adopter, il est aussi indispensable d'être au courant des problèmes d'isolation les plus souvent rencontrés sur le chantier.

Les solutions qui devraient répondre à ces problèmes sont surtout dictées par les règles générales de l'isolation : efficacité, continuité, imperméabilité et solidité.

III 1. Problème au niveau des murs et plafonds

La résolution des problèmes rencontrés sur les trois points de vue suivants détermine la qualité de l'isolation :

- La continuité de l'isolation thermique ;
- La continuité de l'étanchéité à la vapeur d'eau ;
- Les déformations au niveau de l'isolation

III 1.1 la continuité de l'isolation thermique

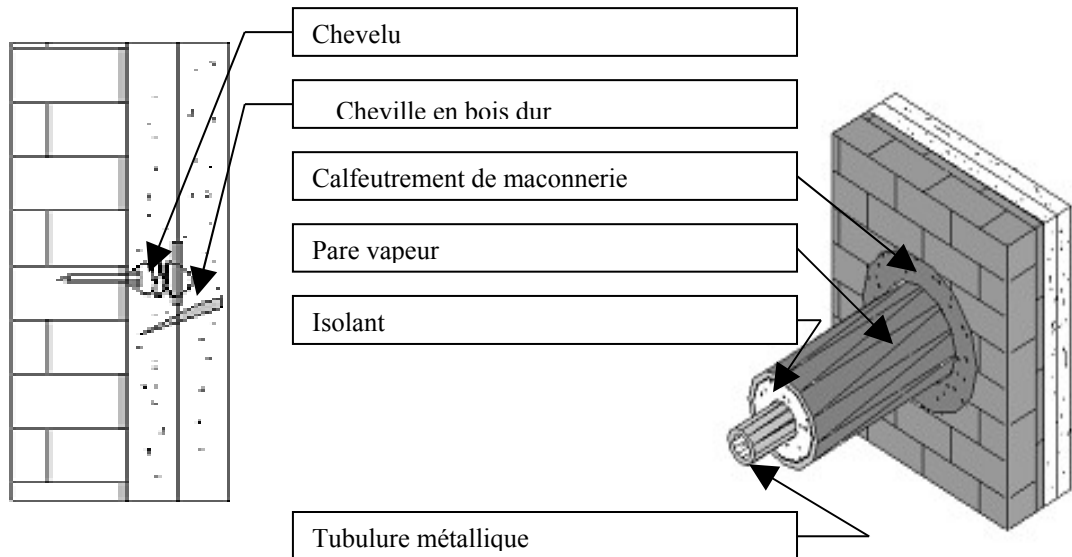
III. 1.1.a – les ponts thermiques

Un corps non isolant qui a tendance à diminuer la résistance thermique d'une portion de surface de l'isolation constitue un pont thermique.

Toute construction de cloisonnement frigorifique est contrainte de résoudre quelques problèmes de pont thermique. On peut citer par exemple les traversées métalliques inévitables (éléments tubulaires, suspente de fixation, poutres métalliques,...)

Même si l'effet n'est pas trop important, en raison de son grand nombre, les fixations métalliques des isolants (chevelus, ...) constituent des ponts thermiques qui méritent d'être étudiés et solutionnés.

Le calcul des déperditions supplémentaires créées par les chevelus doubles en fils de fer de 2.5 mm donne une augmentation de 6,5% pour un isolant de conductivité $0,035\text{W/m}^2.\text{°C}$.

A- Fixation par cheville de la 2^{ème} couche

B-Traversé d'un tubulure métallique

fig.2.3.1 : Quelques exemples type d'éviction de ponts thermiques

III. 1.1.b – joints et discontinuités

Le problème de joint s'impose toujours et nuit à la continuité de l'isolation. De plus, la régularité des plaques isolantes et les coupes sur le chantier généralement de mauvaise qualité laisse l'existence des espacements de discontinuité de l'isolation.

Une technique très employée pour résoudre ce problème est le croisement de joint (Cf. figure 2.2.2) et le bourrage en mastics isolants des parties vides.

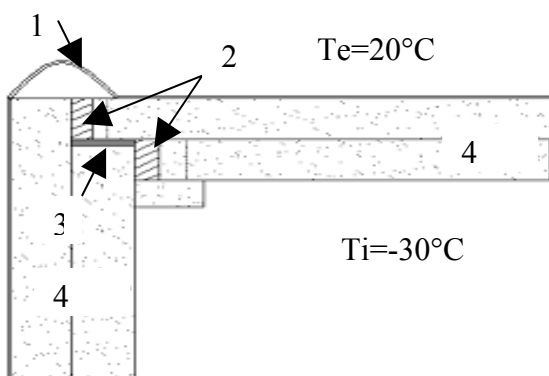
III 1.2 Continuité de l'étanchéité à la vapeur d'eau

Ce problème se pose surtout sur les points particuliers qui sont les angles et les traversés inévitables. La figure 2.3.1B et 2.3.2 montre quelques types de solution.

III 1.3 Les déformations

III 1.3.a – les retraits

Ce problème se pose surtout aux parois composées par des panneaux de grande dimension et employés à basse température (chambres de congélations).



Légende

- 1 : Soufflet pare vapeur
- 2 : Joint précomprimé
- 3 : Mastics plastiques à basse température
- 4 : Isolants

fig. 2.3.2 Retrait ; évaluation des retraits

Coefficient de dilatation linéaire de l'isolant : $7 \cdot 10^{-5}$ [K]

Longueur : 30 m

Calcul des retraits et dimensionnement des joints précomprimés (fig.2.3.2)

Retrait de la couche inférieure : $\theta_{\text{moyen}} = -17,5^\circ\text{C}$

$$\Delta\theta = 20 - (-17,5) = 37,5 \quad [^\circ\text{C}]$$

$$\delta_1 = 30 \times 37,5 \times 7 \cdot 10^{-5} = 7,87 \text{ cm}$$

Retrait de la couche supérieure : $\theta_{\text{moyen}} = 7,5^\circ\text{C}$

$$\Delta\theta = 20 - 7,5 = 12,5 \quad [^\circ\text{C}]$$

$$\delta_2 = 30 \times 12,5 \times 7 \cdot 10^{-5} = 2,62 \text{ cm}$$

III. 1.3.b – Différence de pression

Lors de la marche en froid de la machine frigorifique, une différence de pression peut s'installer entre l'intérieur et l'extérieur de la chambre. Généralement, le côté froid est soumis à une dépression mais des surpressions intérieures peuvent aussi avoir lieu.

Ces pressions peuvent contraindre les parois isolantes à se déformer surtout pour les isolations étanches.

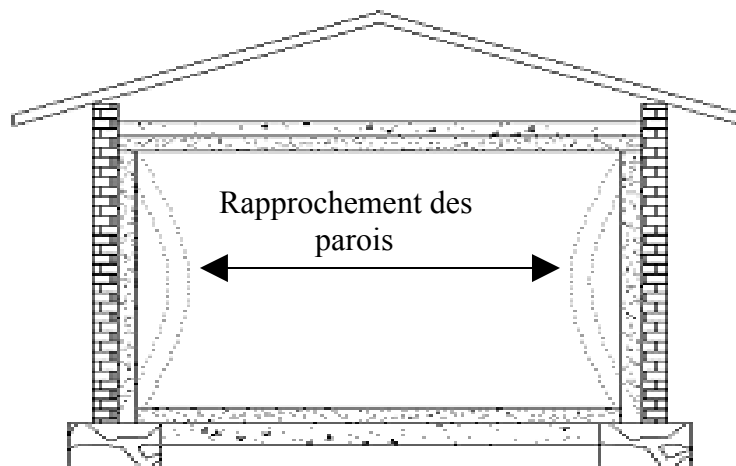


fig. 2.3.3 : déformations dues à la dépression interne de l'enceinte

La variation de la pression interne résulte du passage de la température de T_1 à T_2 .

;

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta T}{T} \Rightarrow \Delta P = P_1 \times \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

P_1 : pression à l'intérieure de la chambre à la température T_1 ;

T_1 : température initiale ;

T_2 : température finale à l'intérieur.

Exemple de calcul : pour un tunnel de congélation de -40°C ;
 $\Delta T = 65^\circ\text{C}$; $P_1 = 101325 \text{ Pa}$; $T_1 = 25^\circ\text{C}$ $\Rightarrow \Delta P = 22100 \text{ Pa}$ soit une charge de 2200 daN/cm^2

La mise en fonction de dispositif d'équilibrage de pression s'avère nécessaire surtout pour les chambres à atmosphère contrôlé généralement étanche.

Les soupapes d'équilibrage de pression permettent de mettre en communication l'ambiance interne et externe de la chambre éliminant les dépressions ou surpressions excessives.

III 1.4 L'insolation

On est dans des cas particuliers confronté à des problèmes d'insolation surtout au niveau de la toiture. En effet, si aucune mesure n'est prise la température des combles peut s'élever excessivement sous l'ensoleillement de la toiture. L'insolation de la paroi augmente aussi le coefficient d'échange global K . La ventilation des combles et la protection de la paroi isolante contre l'insolation peuvent remédier ce problème.

Les méthodes de calcul de l'élévation de température des faces des parois ensoleillées seront consultées aux annexes.

III.2 Problème au niveau du sol

III.2.1 congélation du sol

Généralement, sauf pour les petites et moyennes chambres froides, le sol est isolé suivant les principes traditionnels.

A la différence avec les parois verticales ou le plafond, l'isolation du sol présente un problème particulier au niveau de la dissipation du « froid » surtout pour les tunnels de congélation. Pour les parois citées en premier, le froid les traverse et se dissipe dans l'air ambiant sans autres conséquences que la perte d'énergie. La déperdition est juste fonction du coefficient d'échange globale K dépendant essentiellement de la nature et de l'épaisseur de l'isolant.

Pour les isolations du sol reposant directement sur le terrain, on est en présence d'une paroi d'épaisseur infinie et le froid s'accumule petit à petit jusqu'à une certaine profondeur où l'état d'équilibre est pratiquement atteint.

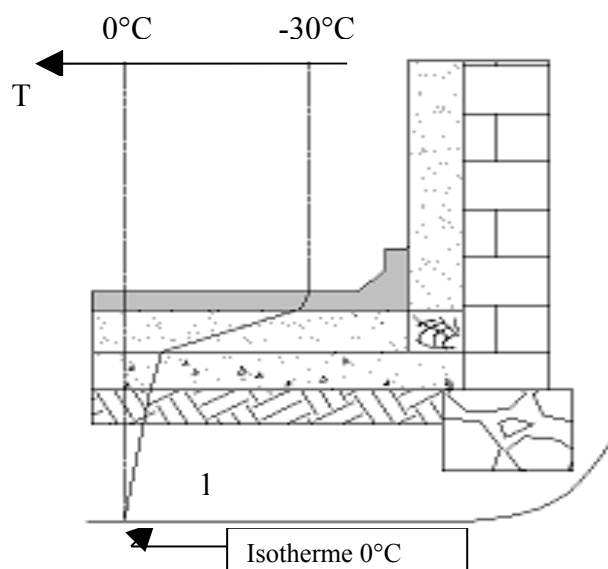


Fig. 2.3.4 Congélation du sol

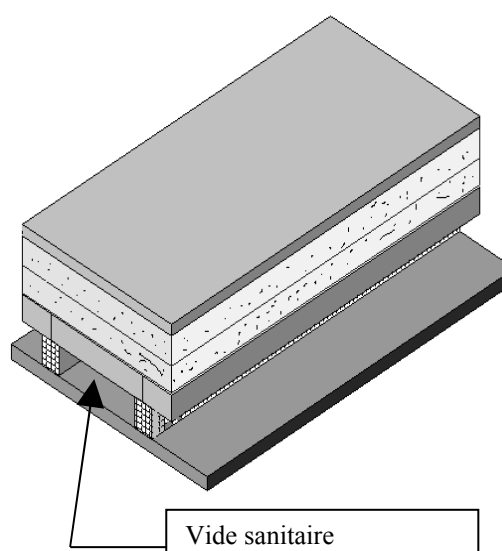


Fig.2.3.5 Vue en coupe de l'isolation sol avec vide sanitaire

Si la zone (1) indiquée par la figure 2.3.4 contient de l'humidité, qui est généralement caractéristique du milieu (lieu, climat), par congélation de l'eau, le risque imminent est le soulèvement du terrain.

III 2.2 Solutions

Ce problème peut être évité par dissipation de ce froid traversant le sol. Trois moyens seront à considérer :

- Par réchauffage électrique : résistance électrique noyée dans une couche de béton de telle sorte que la température sous l'isolation soit de 6 à 8°C.
- Par réchauffage hydraulique : circulation de liquide chaud sous l'isolation.
- Par ventilation sous le sol (vide sanitaire): ce procédé a l'avantage d'être plus économique (surtout si la ventilation est naturelle) que ce soit pour la construction ou pour l'exploitation cf.fig .(2.3.5).

Ce problème va influencer le dimensionnement et les moyens à mettre en œuvre pour l'isolation du sol dans des conditions extrêmes.

On doit aussi considérer le problème de la charge et l'étanchéité à l'eau pour le sol qui va limiter le choix de l'isolant. Des appuis semi isolant (en bois,...) peuvent être proposés pour les charges locales excessives.

III.3 Problèmes au niveau de la menuiserie isolante

La menuiserie isolante est constituée des différentes obturations permettant l'accès à la chambre froide.

III.3.1 Effet bilame :

Ce problème engendre une déformation au niveau de la porte. Cette dernière étant exposée à une différence de température entre ses deux faces, il en résulte une déformation temporaire par dilatation différentielle.

III.3.2 Blocage des portes :

Le blocage des portes lors du fonctionnement de la machine peut être causé par la dépression interne de la chambre ou collage, par formation de glace, des joints à la partie fixe. Il convient dans ce cas de réchauffer les surfaces comportant ces joints.

III.3.3 Charges thermiques supplémentaires

Les ouvertures constituent aussi des sources de quantités de chaleur supplémentaires pénétrant dans l'enceinte ainsi que de la vapeur d'eau. Cette quantité de chaleur est définie par :

$$Q = K.t.\rho_i.S_p.\sqrt{H.(1 - \frac{T_i}{T_a}).\Delta h} \quad \{10\}$$

$$K = 0.48 + 0.004.\Delta \theta$$

Q : quantité de chaleur en [kJ]

t : temps d'ouverture de la porte ;

ρ_i : masse volumique de l'air intérieur;

T_i : Température interne absolue ;

H : hauteur de la porte ;

S_p : surface de la porte ;

Δh : différence enthalpique.

Ta : Température ambiante absolue ;

La mise en place d'un sas, enceinte intermédiaire derrière la porte limitant l'entrée massive de vapeur, et la contre-porte limite les conséquences de ce problème.

Il est aussi à indiquer que pour des raisons de rapidité et de légèreté, on a tendance à diminuer le poids de la porte ce qui implique une diminution de l'épaisseur de l'isolant causant l'élévation du coefficient global d'échange au niveau de ces menuiseries isolants.

III.4 Problème économique

Le problème économique au niveau de la menuiserie isolant se situe sur l'optimisation du coût de la construction et le coût d'exploitation. Par exemple, une diminution de volume l'élément isolant à employer lors de sa confection va augmenter la perte en froid donc perte d'énergie et élévation du coût d'exploitation.

L'étude de ce facteur économique va influencer le choix et le dimensionnement de l'isolant tout en optimisant ces deux facteurs.

III.5 Conclusion :

En bref, la connaissance de ces problèmes d'isolations est nécessaire concernant les paramètres et solutions à considérer lors de la conception, la mise en œuvre, le choix et le dimensionnement d'une isolation d'une enceinte frigorifique.

La partie suivante aura pour objet d'évaluer ces paramètres et les utiliser aux calculs et optimisation d'une isolation frigorifique.

PARTIE III

OPTIMISATION DE CALCULS
D'ISOLATION DE CHAMBRES
FROIDES

Chapitre I : PARAMETRES DE CALCULS DES ISOLATIONS

I.1 Les données climatiques

I.1.1 Température extérieure

La température extérieure est un facteur influant sur les différents calculs menés pour l'isolation. Elle est variable selon les lieux et les saisons. Les calculs se plaçant dans les conditions de régimes permanents, il est plus convenable de prendre comme valeur la température maximale du lieu pendant l'année.

Il est à noter qu'à la différence avec les pays tempérés, pour les pays tropicaux comme le nôtre, la température extérieure à la chambre est toujours positive durant toute l'année. Le flux de chaleur passe toujours du milieu extérieur vers l'intérieur tout le long de l'année.

I.1.2 La Température du sol

La température du sol est nécessaire pour le calcul de l'isolation du plancher des chambres froides. Elle est surtout employée dans les calculs si la dalle est appliquée directement sur terre pleine.

I.1.3 La vitesse moyenne du vent.

La vitesse moyenne du vent influe sur la grandeur du coefficient d'échange thermique superficiel extérieur entre les parois et l'air.

Le coefficient d'échange extérieur est donné par la formule

$$h_{v_{ext}} = 5,67 + 3,86 \cdot V_{ext} \text{ [kcal/h.m.}^{\circ}\text{C]}$$

Exemple : Pour une vitesse moyenne du vent $V_{ext} = 3,5 \text{ m.s}^{-1}$ le coefficient d'échange extérieur $h_e = 19,18 \text{ kcal/h.m.}^{\circ}\text{C}$

I.1.4 L'humidité relative

L'humidité relative ou l'hygrométrie donnée en [%] suivant les lieux est nécessaire pour les calculs d'infiltration des vapeurs d'eau à travers les parois isolantes et pour le choix et la dimensionnement des matériaux pare vapeurs.

I.1.5 La température de condensation

La température de condensation de la vapeur d'eau contenu dans l'air est fonction de sa température et de son humidité relative. Sa détermination est nécessaire pour éviter la condensation de la vapeur d'eau sur la face externe de la paroi isolante.

I.1.6 L'ensoleillement

L'ensoleillement quotidien est variable suivant les saisons et les heures de la journée. La valeur du flux thermique généré par ce dernier varie entre 0 à 7 kWh/m².jour, soit un flux global maximum de 291,6 W/m². Cette valeur est nécessaire pour calculer l'élévation de température des faces externes des parois ensoleillées.

I.2 Conditions de conservation des denrées dans une chambre froide ou conditions internes.

Selon le type de produit entreposé et la durée de conservation, les conditions dans lesquelles il est placé, peuvent varier. Les principales caractéristiques sont la température de conservation, l'humidité relative et la circulation de l'air dans de la chambre.

I.2.1 La température intérieure

Connaissant les conditions extérieures, cette valeur définit l'écart de température entre les deux cotés des parois isolantes qui sera proportionnel au flux de chaleur. On définit aussi les différents modes de conservation des denrées à partir de la température intérieure de la chambre froide :

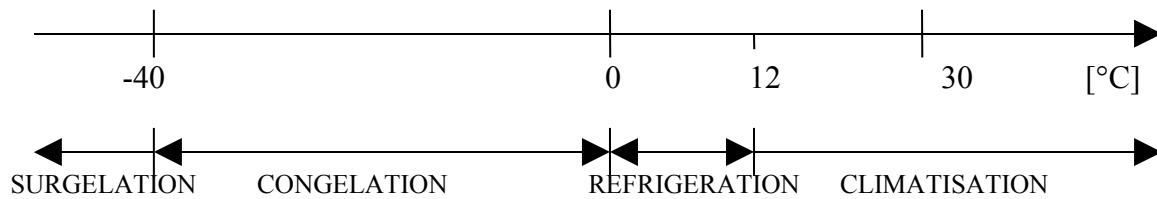


Fig. 3.1.1 Température intérieure d'un cloisonnement isolante selon la nécessité.

1.2.2 L'humidité relative intérieur

Elle définit la différence de pression partielle de la vapeur d'eau Δp_v entre l'ambiance interne et externe de la chambre. Cet écart est aussi proportionnel au flux massique de la vapeur d'eau à travers les parois.

1.2.3 Le coefficient d'échange convectif intérieur

Il est fonction de la circulation de l'air, plus ou moins active due à la ventilation.

1.3 Facteurs technico-économiques

1.3.1 L'isolant

1.3.1.1 La conductivité thermique de l'isolant

La conductivité thermique (λ) est un facteur déterminant pour le choix et le calcul d'épaisseur de l'isolant. Ce choix tiendra aussi compte des conditions d'emplois et des différentes caractéristiques étudiées dans la partie I.

1.3.1.2 Le coût de l'isolant

Le coût de l'isolant est calculé pour le prix du m^3 . Elle sera désignée par le coefficient C_{um} . Le coût du m^2 pour une isolation donnée est définie par $C_m = C_{um} \cdot e$ [Fmg/m^2] ou « e » désigne l'épaisseur de l'isolant.

Actuellement : $C_{um} = 5.000.000 \text{ Fmg}/m^3 = 1.000.000 \text{ Ar}/m^3$ pour les isolants en polystyrène

$C_{um} = 9.000.000 \text{ Fmg}/m^3 = 1.800.000 \text{ Ar}/m^3$ pour ceux en polyuréthane

1.3.1.3 Durée de vie de l'isolant.

La durée de vie de l'isolant entre dans les calculs économiques de l'isolation. Elle est variable suivant l'isolant et surtout suivant les conditions d'utilisation (pare vapeur, température d'utilisation,...)

On considère que dans des bonnes conditions d'utilisation, un isolant donné garde ses performances techniques les 15 premières années de son utilisation.

1.3.2 L'effet frigorifique

Nous parlons ici de l'effet frigorifique ou le coefficient de performance de l'installation tout entière. Elle est définie par le rapport :

$$COP = \frac{\text{Quantité de chaleur absorbée par la machine}}{\text{Quantité d'énergie consommée par l'installation}} \quad (\text{III.1})$$

Le coefficient COP est généralement inférieur à 3.8

1.3.3 Le coût de l'énergie

C'est le prix unitaire de l'énergie consommée par l'installation. L'énergie utilisée est généralement l'énergie électrique. Le coefficient 'Ce' désignera alors le coût du kWh.

Actuellement : $C_e = 1650 \text{ Fmg}/kWh$ ou $330 \text{ Ar}/kWh$.

Chapitre II : FORMULES POUR LES CALCULS D'ÉPAISSEURS DES ISOLANTS

Différents ouvrages dictent plusieurs formules et méthodes de calculs permettant de dimensionner les épaisseurs de l'isolation en fonction des conditions de fonctionnement d'une installation frigorifique. Les résultats obtenus avec ces calculs sont fonction des paramètres de calculs définis dans le chapitre précédent. L'écart de température est le facteur commun qui relie ces méthodes de calcul. En effet, certaines méthodes de calcul ne prennent en compte que quelques paramètres pouvant être mis en jeu pour le dimensionnement alors que d'autres en considèrent un grand nombre. Les valeurs obtenues ne sont pas alors toujours identiques. Il est de notre objectif d'optimiser ces calculs et de déterminer dans quelle mesure ces calculs peuvent être utilisés et adaptés pour des constructions basées à Madagascar.

II.1 La formule des déperditions fixées

Cette formule découle directement de la loi de FOURIER qui dicte que le flux unitaire traversant une paroi est proportionnel à l'écart de température entre ses deux cotés.

$$\varphi = K \Delta T \quad \text{où } K \text{ est le coefficient d'échange globale}$$

$$\varphi = \frac{\Delta T}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{e_{is}}{\lambda_{is}} + \frac{e_{is}}{\lambda_{is}} + \frac{1}{Rm}} \quad [\text{W/m}^2] \quad (\text{III.2})$$

En fixant la déperdition unitaire à une valeur bien déterminée, on peut obtenir l'épaisseur e_{is} de l'isolant correspondant qui sera donnée par :

$$e_{df} = \lambda_{is} \left(\frac{\Delta T}{\varphi} - \overline{Rm} \right) \quad [\text{m}] \quad (\text{III.3})$$

où φ est la déperdition admise

Pour les calculs classiques, cette déperdition est fixée à 8 W/m² pour les chambres froides à température intérieure positive (chambres de réfrigération) et à 6 W/m² pour les chambres négatives (chambres de congélation ou tunnels de congélation).

II.2 La formule de ($\Delta T/2$)

Cette règle de calcul est conseillée par un auteur appelé P. Clément [4]. Il dicte que l'épaisseur en [cm] d'une isolation ayant un coefficient λ aux environs de 0.035 W/m.°C (polystyrène, styrofoam, ...) doit être de l'ordre de la moitié de l'écart de la température ΔT en [°C].

$$e_{df} = \frac{\Delta T}{2} \quad [\text{cm}] \quad (\text{III.4})$$

En effet, en fixant un flux thermique de 7 W/m² et en négligeant le terme $\lambda \overline{R}$ de l'équation (III.3) on obtient : $e = \lambda \left[\frac{\Delta T}{7} \right]$; et pour les isolants cités précédemment où $\lambda \approx 0.035$ W/m.°C, on a

$$e = \frac{35 \cdot 10^{-3}}{7} \Delta T = 5 \cdot 10^{-3} \Delta T = \frac{\Delta T}{2} \cdot 10^{-2} \quad [\text{m}].$$

Cette formule est assez simple et permettant des calculs rapides. Elle est surtout utilisée pour le calcul d'estimation d'avant projet.

II.3 La formule ASHRAE

La formule ASHRAE est une formule empirique utilisée aux Etats-Unis pour les calculs d'isolation. Elle a l'avantage d'être simple. Elle ne prend en compte dans les calculs que le coefficient λ de l'isolant et l'écart de température ΔT .

L'épaisseur de l'isolation sera donnée par :

$$e_{ashrae} = 0,15 \cdot \lambda \cdot \Delta T \text{ [m]} \text{ (III.4)}$$

Par analogie avec la formule des déperditions fixées, en négligeant le terme $\lambda \bar{R}$ de (III.3) :

$$e_{df} = \lambda \left[\frac{\Delta T}{\phi} \right]$$

$$e_{ashrae} = 0,15 \cdot \lambda \cdot \Delta T$$

On peut en conclure que la formule ASHRAE impose une valeur de la déperdition tel que $(1/\phi)=0.15$ ou $\phi=6,66 \text{ W/m}^2$

II.4 L'épaisseur anti-condensation

L'épaisseur anti-condensation est l'épaisseur minimum de l'isolation requise pour éviter la condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air sur la face externe de la paroi isolante. Les calculs donnent généralement des valeurs assez faibles comparées avec celle d'autres formules.

L'hypothèse de ces calculs est d'avoir une température de la face externe de l'isolation supérieure à la température de condensation (T_r) de la vapeur d'eau de l'air.

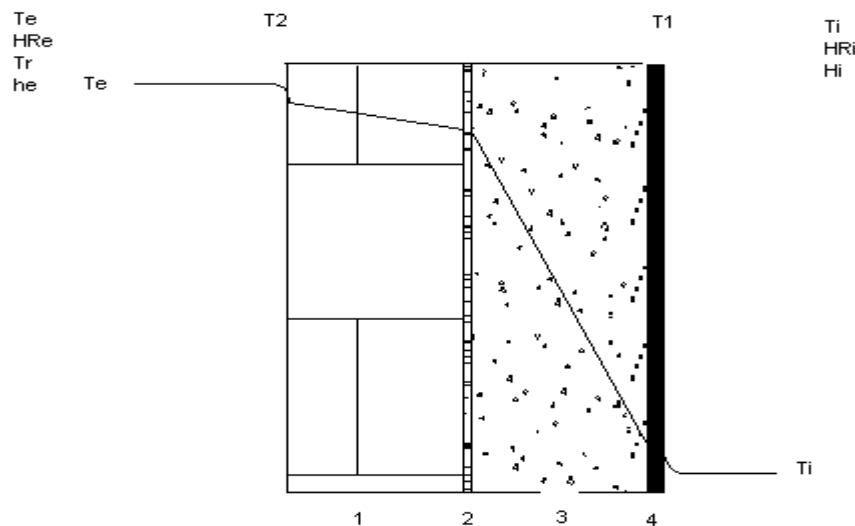


Fig.3.2.1 Allure des courbes de température dans la paroi isolante

En effet, initialement l'air contient de l'eau en phase vapeur avec une pression partielle de vapeur de $P_v = P_{ve}$. Soumis à une température inférieure ou égale à sa température de saturation, la vapeur d'eau de l'air tend à se transformer en phase liquide.

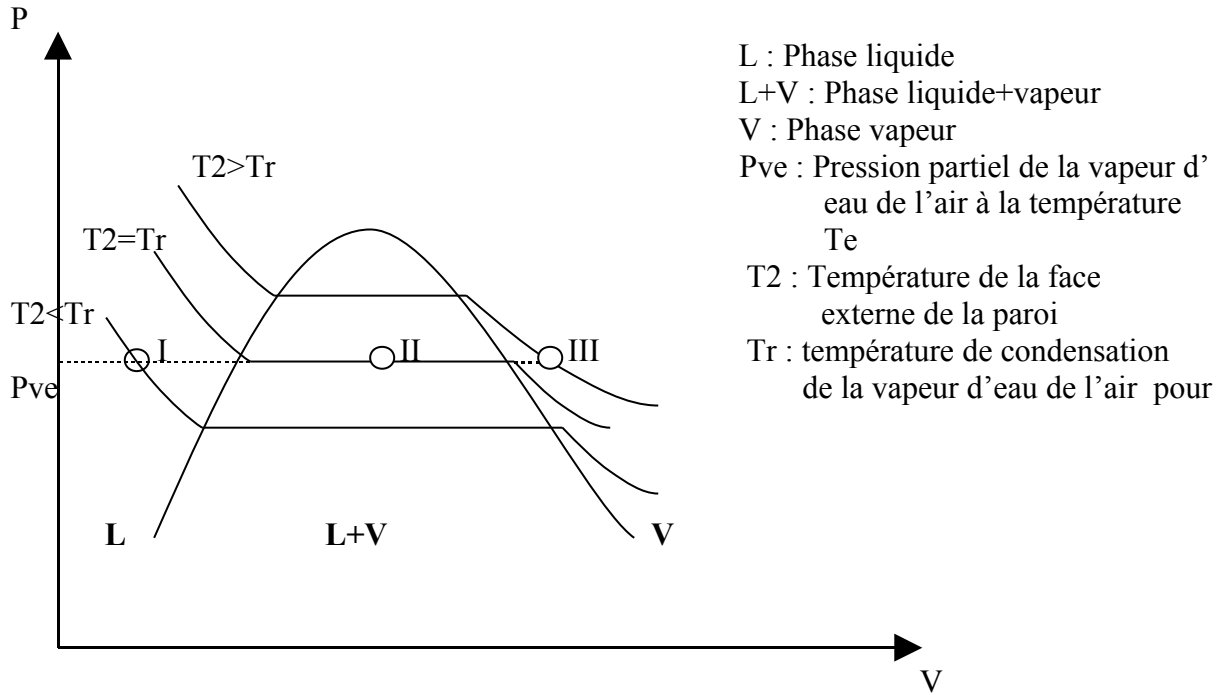


Fig.3.2.2 Diagramme (PV) de la vapeur d'eau contenue dans l'air

- (I) - $T_2 < T_r$: Condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air sur la surface externe
 (II) - $T_2 = T_r$: Dépôt de gouttelette d'eau sur la face externe
 (III) - $T_2 > T_r$: La vapeur d'eau contenue dans l'air reste vapeur, sans risque de condensation.

Partant de cette hypothèse, $T_2 > T_r$ on a :

$$T_e - T_2 < T_e - T_r$$

Avec

$$T_e - T_2 = \frac{1}{h_e} \times \phi = \frac{1}{h_e} \left(\frac{T_e - T_i}{\frac{e_{is}}{\lambda_{is}} + Rm} \right)$$

$$\frac{1}{h_e} \left(\frac{T_e - T_i}{\frac{e_{is}}{\lambda_{is}} + Rm} \right) < T_e - T_r$$

et on trouve :

$$e_{is} = e_{ac} > \lambda_{is} \left[\frac{\frac{1}{h_e} (T_e - T_i)}{T_e - T_r} - Rm \right] \quad (III.5)$$

II.5 Remarques

- Quel que soit le type de construction ou la disposition des couche des parois isolantes, ces formules et méthodes de calcul sont applicables à toutes les parois (murs, sol, plafond).
- Pour une chambre froide donnée l'écart ΔT n'est toujours pas le même pour les différentes parois.

- Le coefficient 'Rm' varie suivant les parois et les types de construction des chambres froides.

Chapitre III OPTIMISATION DES CALCULS D'ISOLATION

III.1 Facteurs d'optimisation

III.1.1 Epaisseur de l'isolant

La détermination de l'épaisseur à adopter pour un projet de construction de chambre froide, est un objectif de tout calcul d'isolation. L'épaisseur de l'isolant dépend surtout de sa nature et de ses caractéristiques physico-thermiques.

Il est cependant à faire remarquer que l'épaisseur calculée pour un type d'isolation ne coïncide pas toujours avec les produits existants. Compte tenu du développement de la préfabrication, les isolants sont dans la plupart des cas produits avec des dimensions normalisées. On est donc amené à employer la dimension la plus proche des valeurs données par les calculs.

ISOLANTS	Epaisseurs normalisées [mm]	Surfaces des panneaux [m2]
Polystyrène expansé	40, 60, 80, 100, 120	1 x 0,5 ; 1 x 0,61 ; 2 x 1 ; 2 x 1,2
Polyuréthane	20, 25, 30, 40, 50, 60, 80, 120	1 x 1 ; 1 x 2 ; ... ; 1 x 6

Tableau 3.3.1 épaisseurs normalisées des différents isolants

III.1.2 La diffusion de vapeur d'eau et calcul de flux massique.

III.1.2.1 Calcul de la diffusion de vapeur

La valeur de la diffusion de vapeur sera à considérer dans l'optimisation pour la comparaison des valeurs obtenues avec les différentes méthodes de calculs et les valeurs optimales.

Elle est aussi à considérer pour le choix et le dimensionnement des matériaux utilisés. La plupart des matériaux d'isolation sont plus ou moins perméables à la vapeur d'eau. On considère comme acceptable une diffusion de vapeur d'eau à travers la paroi isolante entre 1 et 2 g/m².24h.

Le flux massique de vapeur est défini par la formule :

$$\phi_m = \frac{p_e - p_i}{R_{di} - R_{de}} \quad [\mu\text{g}/\text{m}^2.\text{s}] \quad (\text{III.6})$$

p_i et p_e : pression partielle de la vapeur d'eau de l'air à l'intérieur et à l'extérieur de la chambre en [m².s.mm de Hg].

R_{di} et R_{de} résistance à la diffusion de vapeur du matériaux pare vapeur et de l'isolant.

III.1.2.1 Pression partielle de la vapeur d'eau

Les pressions partielles de la vapeur d'eau p_i et p_e sont calculées à partir des relations :

$$p_i = \frac{p_{si} \times HR_i}{100} \quad \text{et} \quad p_e = \frac{p_{se} \times HR_e}{100} \quad [\text{mm de Hg}]$$

HR_i et HR_e pourcentage de l'humidité relative de l'air à l'intérieur et à l'extérieur

p_{si} et p_{se} pression de saturation de la vapeur d'eau contenue dans l'air à la température du milieu considéré (intérieur ou extérieur).

T [°C]	-20	-18	-16	-14	-12	-10	-8	-6	-4	-2
Ps [mm de Hg]	0,77	0,94	1,13	1,36	1,63	1,95	2,32	2,76	3,28	3,88
T [°C]	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
Ps [mm de Hg]	4,58	5,29	6,10	7,01	8,05	9,21	10,52	11,99	13,63	15,48
T [°C]	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
Ps [mm de Hg]	17,53	19,83	22,38	25,21	28,35	31,82	35,66	39,9	44,56	49,69
T [°C]	40	42	44	46	48	50				
Ps [mm de Hg]	55,32	61,5	68,26	75,85	83,71	92,51				

Tableau 3.3.2: Pressions de saturation de la vapeur d'eau dans l'air à 760 mm de Hg

III.1.2.2 Obtention de l'humidité relative de l'air

L'humidité relative de l'air peut être déterminée avec le diagramme de l'air humide ou diagramme psychrométrique de l'air à la pression atmosphérique.

En positionnant sur le diagramme le point caractéristique de l'air, on obtient son humidité relative. Ce point est déterminé en disposant de deux grandeurs caractéristiques de l'air considérée. Généralement on mesure la température de l'air (ou température de la bulbe sec) et la température humides ou température de la bulbe humide) avec un psychromètre.

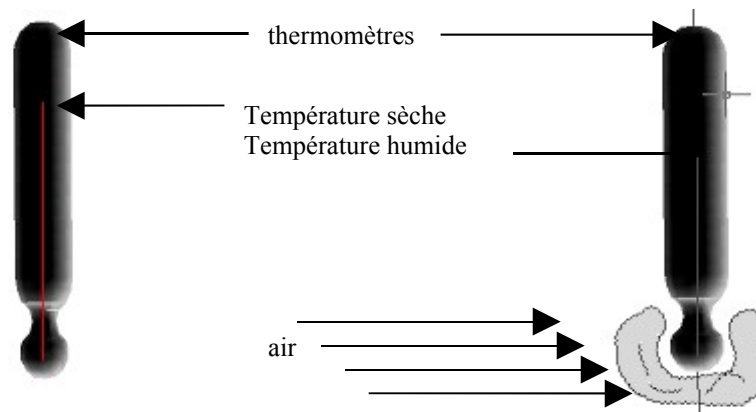


Fig.3.3.1 Principe d'un psychromètre

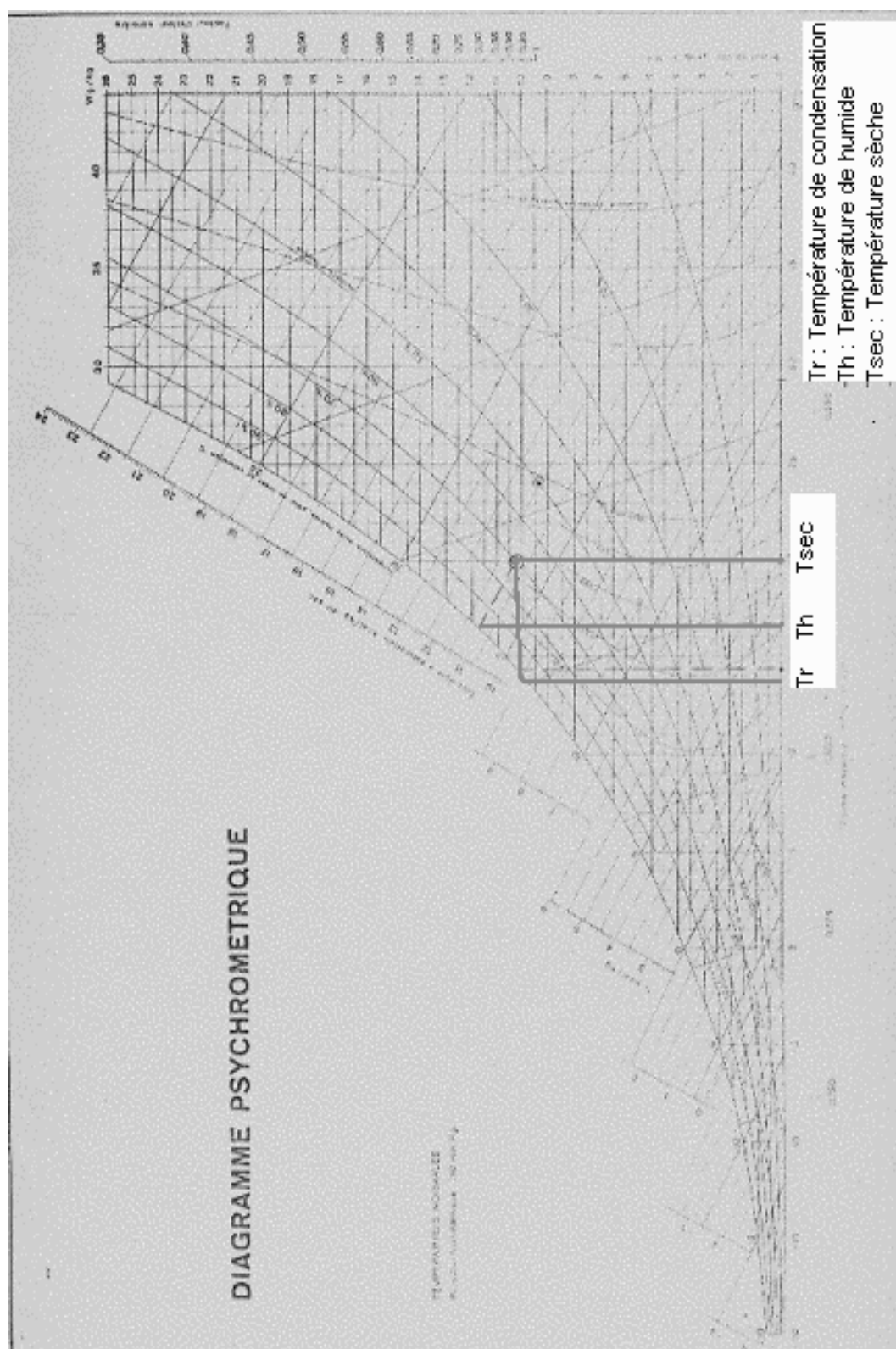


Fig.3.3.2 Diagramme de l'air humide à 760 mm de Hg

III.1.2.3 Température de la bulbe sec

C'est la température de l'air repéré à l'ombre et à l'abri de tout rayonnement. La mesure se fait en plaçant simplement un thermomètre dans les conditions citées ci-dessus.

III.1.2.4 Température de la bulbe humide

C'est la température de l'air considéré si elle est saturée en gardant constant son enthalpie.

La mesure se fait à l'aide d'un thermomètre placé dans les conditions de la figure (3.3.1) :

- La bulbe est recouverte d'un gaze humecté en permanence avec de l'eau distillée.
- La circulation de l'air est assurée par un ventilateur pour une vitesse de 2 à 3m/s

III.1.2.5 Température de rosée

C'est la température de l'air à la saturation en gardant son humidité spécifique ; l'humidité spécifique de l'air est le rapport entre la masse d'eau et la masse d'air sec que contient un volume de cet air.

III.1.2.6 Résistance à la diffusion de vapeur

Matériaux isolants

La résistance à la diffusion d'un matériau isolant est donnée par :

$$R_{di} = \frac{e_i}{c_i} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{mm de Hg} / \mu\text{g}]$$

e_i : épaisseur de l'isolant

c_i : constante de diffusion de vapeur du matériau considéré

$$c_i = \frac{\phi_{mi} \cdot e'}{\Delta p}$$

ϕ_{mi} : perméabilité du matériau

e' : épaisseur de l'échantillon mesuré en laboratoire

Δp : écart de pression partielle de vapeur appliqué lors de la mesure

Les conditions de mesure de la perméabilité d'un matériau isolant sont normalisées par la norme NF.T.56-105 :

- Epaisseur de l'échantillon : 25mm
- IPVE 23 : conditions tempérées :
 - T = 23°C
 - HR = 85,5 %
 - $\Delta p = 2287 \text{ Pa} = 17.9 \text{ mm de Hg}$
- IPVE 38 : conditions tropicales :
 - T = 38°C
 - HR = 88,5 %
 - $\Delta p = 5860,2 \text{ Pa} = 43.95 \text{ mm de Hg}$

Matériaux pare vapeur

Pour les matériaux pare vapeur, le flux massique de vapeur d'eau pouvant les traverser est donné suivant l'épaisseur utilisée.

Exemple pour le polyéthylène : $\phi_{mi} = 11,7 \mu\text{g} / \text{m}^2 \cdot \text{s}$ pour le matériau d'épaisseur $e = 200 \mu\text{m}$

Les choix des valeurs à prendre pour les différentes conditions de mesures doit être faits de telle sorte qu'on aura les mêmes conditions lors de l'utilisation des matériaux.

$$R_{dp} = \frac{\Delta p}{\phi_{mp}} \quad [\text{m2.s.mm de Hg}/\mu\text{g}]$$

Δp : écart de pression partielle de la vapeur appliqué lors de la mesure en laboratoire

ϕ_{mp} : flux massique de vapeur mesuré

III.1.3 Calcul de la déperdition

La déperdition exprime le flux thermique unitaire ou flux de perte en froid par unité de surface. Elle est définie par :

$$\phi = K \Delta T \quad [\text{W}/\text{m}^2]$$

ΔT : écart de température en $^{\circ}\text{C}$

K : coefficient d'échange globale en $[\text{W}/\text{m}^2. ^{\circ}\text{C}]$

La quantité de chaleur entrant dans l'enclenche pendant l'intervalle de temps Δt est définie par :

$$Q = \phi \Delta t = K.S.\Delta T.\Delta t.10^{-3} \quad [\text{KWh}]$$

S : surface d'échange $[\text{m}^2]$

Δt : intervalle de temps $[\text{h}]$

$$K = \frac{1}{R_i + \overline{R_i}} = \frac{1}{\frac{e}{\lambda} + \overline{R_i}}$$

R_i : Résistance thermique de l'isolant

$\overline{R_i}$: Résistance thermique de l'ensemble des autres éléments de la paroi et les résistances surfaciques

Le calcul de la déperdition permet d'évaluer la perte en « froid » par unité de surface de la paroi isolante. Le flux thermique total entrant (murs, sol, plafond) est donné par :

$$\Phi_{tp} = \Phi_m + \Phi_s + \Phi_{pl} = (K_m.S_m.\Delta T_m + K_s.S_s.\Delta T_s + K_{pl}.S_{pl}.\Delta T_{pl}).10^{-3} \quad [\text{kW}] \quad (\text{III.8})$$

III.1.4 Coût de la déperdition

La consommation d'énergie de l'installation occasionnée par les déperditions au niveau des parois est donnée par :

$$C_0 = \frac{\Phi_{tp} \cdot \Delta t}{\text{COP}} \quad [\text{kWh}] \quad (\text{III.9})$$

Δt : intervalle de temps ;

Φ_{tp} : déperdition au niveau des parois ;

COP : coefficient de performance de la machine.

La consommation journalière ainsi définie s'obtient en posant $\Delta t = 24\text{h}$.

Le coût de la déperdition est calculé par :

$$C_d = C_e \times C_0 = \frac{C_e \cdot \Phi_{tp} \cdot \Delta t}{\text{COP}} \quad [\text{fmg ou en Ar}] \quad (\text{III.10})$$

C_e : coût unitaire de l'énergie en $[\text{fmg}/\text{kWh ou en Ar}/\text{kWh}]$.

III.1.5 coût de l'isolation

Le coût de l'isolation par unité de surface est obtenu par :

$$C_{is} = C_{um} \times e \quad [\text{fmg/m}^2] \quad (\text{III.11})$$

C_{um} : prix du m³ du matériau isolant ;

e : épaisseur de l'isolant ;

III.2 PROPOSITION DE METHODE POUR L'OPTIMISATION DES CALCULS D'ÉPAISSEUR

Les calculs d'épaisseurs économiques ou épaisseurs optimales recombinent les calculs théoriques et les calculs économiques pour le dimensionnement de l'isolation.

Le but de l'étude d'isolation étant de trouver une isolation efficace avec un coût moindre, cette méthode de calcul est très intéressante quant à l'optimisation des calculs d'isolation.

Le principe réside dans la recherche de l'épaisseur de l'isolation correspondant au minimum de pertes et de dépenses occasionnées par l'isolation. D'un côté, on peut citer les pertes en froid dues aux déperditions thermiques qui ont leurs influences sur la consommation en énergie du moto compresseur et de l'autre côté le coût de l'acquisition et de la mise en œuvre de l'isolation. Ces facteurs sont évalués et optimisés en fonction de la dépense totale donnée par :

$Dt = \text{coût de l'isolation } (C_{is}) + \text{coût de la déperdition } (C_d)$

III.2.1. Coût de la déperdition

La consommation en énergie de la machine occasionnée par les déperditions est définie par :

$$C_0 = \frac{\Phi \cdot \Delta t \cdot 10^{-3}}{COP} \quad [\text{kWh}]$$

Φ : Déperdition thermique de la paroi considéré en [W]

Δt : Temps de fonctionnement en [h] de la chambre froide.

COP : effet frigorifique.

Le coût de la déperdition est alors donné par

$$C_d = \left(\frac{\Phi \cdot \Delta t \cdot 10^{-3}}{COP} \right) \times C_e = \frac{\Delta T \cdot S \cdot \Delta t \cdot C_e \cdot 10^{-3}}{COP \cdot \left(\frac{e_{is}}{\lambda_{is}} + Rm \right)} \quad [\text{Fmg}] \text{ ou en } [\text{Ar}]$$

où C_e est le coût unitaire de l'énergie [fmg/kWh] ou en [Ar/kWh].

On remarque que le coût de la déperdition est une fonction décroissante de l'épaisseur de l'isolant.

III.2.2 Le coût de l'isolation

Le coût total de l'isolation est donné par :

$C_{ist} = C_{um} \cdot e_{is} \cdot S \quad [\text{Fmg}] \text{ ou en } [\text{Ar}]$

C_{um} : Coût du m³ de l'isolant [fmg/m³] ou [Ar/m³]

e_{is} : épaisseur de l'isolant [m]

S : Totalité de la surface isolée [m²]

La durée de vie de l'isolation étant fixée à 'm'année, le coût annuel attribué à l'isolation est :

$$C_{isa} = \frac{C_{um} \cdot e_{is} \cdot S}{m}$$

Ici on remarque que le coût de l'isolation est une fonction croissante de l'épaisseur.

III.2.3 Calcul de l'épaisseur optimale

La dépense totale annuelle se calcul par :

$$D_a = \frac{C_{um} \cdot e_{is} \cdot S}{m} + \frac{\Delta T \cdot \Delta t \cdot S \cdot C_e \cdot 10^{-3}}{COP \cdot \left(\frac{e_{is}}{\lambda_{is}} + Rm \right)} \quad (\text{III.12})$$

Ici Δt désigne le temps de fonctionnement en heure de la chambre froide pendant l'année. La dépense totale est donc fonction de l'épaisseur de l'isolation, la courbe donnée par l'équation (III.12) présente un minimum pour une valeur 'EE' de l'épaisseur telle que :

$$\left[\frac{d}{de}(Da) = 0 \right]_{e=EE} \quad \text{ou}$$

$$\frac{Cum.S}{m} - \frac{\left(\frac{COP}{\lambda_{is}} \right) \Delta T \Delta t S.Ce.10^{-3}}{(COP)^2 \left(\frac{EE}{\lambda_{is}} + Rm \right)^2} = 0$$

et finalement on trouve :

$$EE = \lambda_{is} \left[\sqrt{\frac{\Delta T \Delta t S.Ce.m.10^{-3}}{\lambda_{is}.COP.Cum}} - Rm \right] \quad [m] \quad (III.13)$$

III.3 ETUDES COMPARATIVES DES CALCULS D'ISOLATION

III.3.1 choix des isolants :

Nous choisirons à comparer trois isolants :

- **Le polystyrène** : matériau isolant d'origine synthétique, il est le plus employé actuellement en matière d'isolation frigorifique. Son coût est peu élevé et l'approvisionnement est facile.
- **La mousse rigide de polyuréthane** : Isolant d'origine synthétique avec des caractéristiques thermiques très intéressantes, elle est à base d'isocyanates additionnées de polyol, d'un catalyseur et d'un agent gonflant. Généralement, le gaz R11 est utilisé lors de l'expansion de l'isolant.
Grâce à ses capacités de pouvoir être confectionné « in situ » permettant l'obtention de toutes les formes désirées, cet isolant est parmi les prévisions d'isolation du futur.
- **La balle de riz** : Des études faites sur la balle de riz ont pu la classer comme matériau pouvant être utilisé dans le domaine d'isolation frigorifique. Certaines constructions traditionnelles existantes à Madagascar utilisent déjà ce matériau ainsi. Ce matériau isolant a l'avantage d'être en abondance chez nous et avec un prix assez modéré.

III.3.2 Caractéristiques techniques des matériaux

Matériaux isolants

	Polystyrène Q3	Polystyrène Q5 (sol)	Polyuréthane	Balle de riz
Résistances à la compression [kPa]	90	150	140	inconnue
Conductivités thermiques [W/m.°C]	0,039	0,037	0,030	0,1
Perméabilités à la vapeur d'eau IPVE 23 ; ϕ_{mi}	600 $\mu\text{g}/\text{m}^2.\text{s}$	250 $\mu\text{g}/\text{m}^2.\text{s}$	1400 $\mu\text{g}/\text{m}^2.\text{s}$	inconnue
Masses volumiques [kg/m³]	16	25	30	100 non comprimé ; 200 comprimés

Tableau 3.3.3 Caractéristiques techniques des matériaux isolants.

Matériaux pare vapeur

	Complexe aluminium cellulose	Polyéthylène e=200 µm	Polyéthylène e=300 µm	Everfast	Bitume fondu
Perméabilité à la vapeur d'eau IPVE 38	2,3 µg/m ² .s	11,7 µg/m ² .s	9.3 µg/m ² .s	28.9 µg/m ² .s	inconnue

Tableau 3.3.4 Caractéristiques techniques des matériaux pare vapeurs

Matériaux de construction

	Brique	Béton	Enduit de ciment (mur)	Enduit de protection (plafond)	Chape d'usure (sol)	Béton armé
Conductivités thermiques [W/m.°C]	0,9	0,7	1,7	1,7	1,2	1,2

Tableau 3.3.5 Conductivité thermique des matériaux de construction

III.3.3 Calculs d'isolations avec les différentes formules existantes

Pour faire la comparaison entre les valeurs données par les différents modes de calculs, plaçons nous dans les conditions suivantes :

III.3.3.1 Chambre froide positive

Soit à calculer l'isolation pour une chambre froide de construction traditionnelle basée à Antananarivo. Cette chambre froide est destinée à la conservation de denrées alimentaires.

Conditions déterminantes

- Ambiance extérieure
Température : 27°C
HRe : 83 %
Coefficient de transfert de chaleur $h_e = 17 \text{ W/m}^2.\text{°C}$
- Ambiance intérieure
Température : +2°C
HRe : 80 %
Coefficient de transfert de chaleur $h_i = 6 \text{ W/m}^2.\text{°C}$

Soit $\Delta T = 25 \text{ °C}$: Ecart de température ;

$$\Delta p_v = (0,83 \cdot 26,74) - (0,8 \cdot 5,29) = 17,9 \text{ mm de Hg ;}$$

Δp_v : Ecart de pression partielle de la vapeur d'eau de l'air à l'intérieur et à l'extérieur de la chambre froide.

$T_r = 21,6\text{°C}$: Température de condensation de l'air à l'extérieur.

Matériau pare vapeur utilisé pour les trois isolants : Polyéthylène (200)

Résultats des calculs pour les murs

Isolant	Facteurs d'optimisation	Méthode de calcul d'épaisseur				
		Déperdition fixée	$\Delta T/2$	ASHRAE	Epaisseur anti-condensation	Epaisseur OPTIMALE
Polystyrène expansé ($\lambda=0,039\text{W/m}^\circ\text{C}$)	Expression de l'épaisseur	$e = \lambda \left[\frac{\Delta T}{\phi} - \bar{R} \right]$	$\frac{\Delta T}{2}$ [cm]	$0,15 \lambda \Delta T$	$e > \lambda \left[\frac{\Delta T}{h_e (T_r - T_i)} - \bar{R} \right]$	$\lambda \left[\sqrt{\frac{\Delta t \Delta T m C_e 10^{-3}}{COP \cdot \lambda \cdot Cum}} - \bar{R} m \right]$
	Epaisseur [m]	0,103	0,125	0,146	-	0,108
	Epaisseur normalisée [m]	0,100	0,120	0,140	-	0,100
	Flux massique de vapeur d'eau(*) [$\mu\text{g/m}^2.\text{s}$]	4,61	4,59	4,56	-	4,61
	Déperdition [W/m^2]	8,2161	7,0311	6,1449	-	8,2161
	Prix journalier de la déperdition [fmg/ $\text{m}^2.24\text{h}$]	124,1454	106,24	92,8488	-	124,1454
	Coût de l'isolant. [fmg/ m^2]	500.000	600.000	700.000	-	500.000
	Dépenses annuelles [fmg/an]	78.659	78.789	80.566	-	78.659

Tableau 3.3.6 Résultats des calculs pour l'isolation en polystyrène ; chambre froide positive

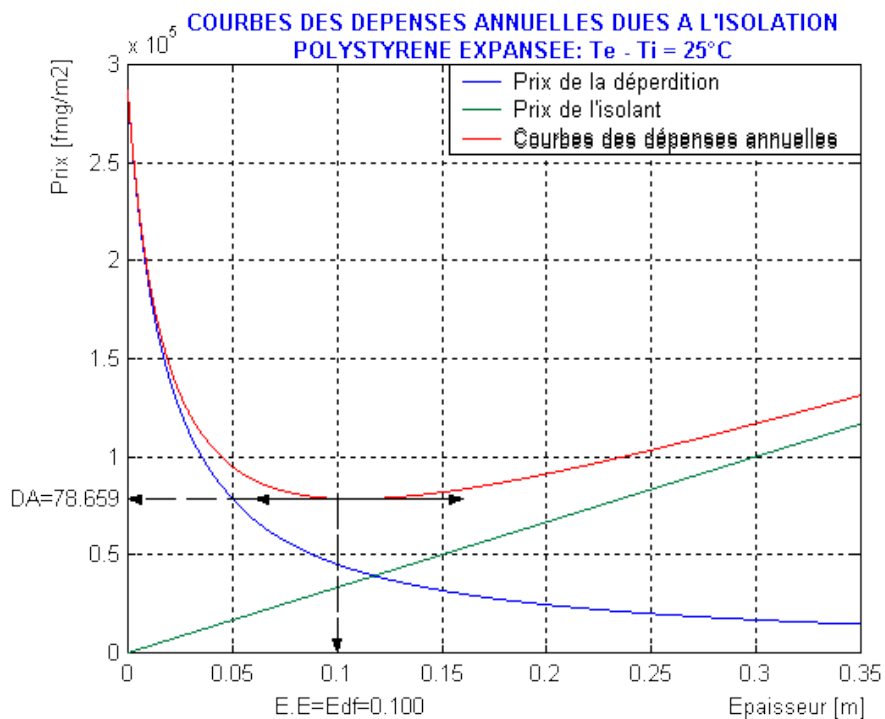
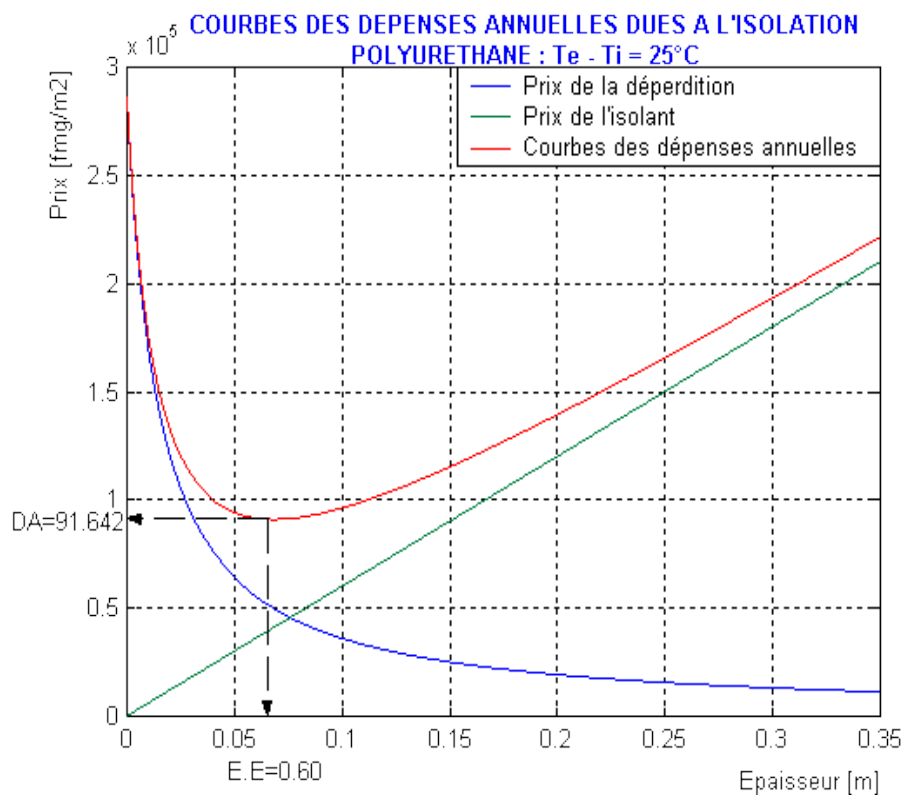


fig.3.3.3 courbes des dépenses annuelles pour l'isolation en polystyrène ; chambre froide positive

(*) Flux calculé avec le matériau pare vapeur et l'isolant

Isolant	Facteurs d'optimisation	Méthode de calcul d'épaisseur				
		Déperdition fixée	$\Delta T/2$	ASHRAE	Epaisseur anti-condensation	Epaisseur OPTIMALE
Polyuréthane ($\lambda=0,030\text{W/m}^\circ\text{C}$)	Epaisseur [m]	0,08	0,120	0,112	-	0,068
	Epaisseur normalisée [m]	0,08	0,120	0,120	-	0,060
	Flux massique de vapeur(*) d'eau [$\mu\text{g/m}^2.\text{s}$]	4,71	4,68	4,68	-	4,72
	Déperdition [W/m^2]	7,948	5,58	5,58	-	10,085
	Prix journalier de la déperdition [$\text{fmg/m}^2.24\text{h}$]	120,133	84,3437	84,3437	-	152,4
	Coût de l'isolant. [fmg/m^2].	720.000	1.080.000	1.080.000	-	540.000
	Dépenses annuelles [$\text{fmg/m}^2.\text{an}$]	91.848	102.794	102.794	-	91.642

Tableau 3.3.8 Résultats des calculs pour l'isolation en polyuréthane ; chambre froide positive

fig.3.3.4 Courbes des dépenses annuelles pour l'isolation en polyuréthane ;
Chambre froide positive

(*) Flux calculé avec le matériau pare vapeur et l'isolant

Isolant	Facteurs d'optimisation	Méthode de calcul d'épaisseur				
		Déperdition fixée	$\Delta T/2$	ASHRAE	Epaisseur anti-condensation	Epaisseur OPTIMALE
Balle de riz ($\lambda=0,1 \text{ W/m}^\circ\text{C}$)	Epaisseur [m]	0,264	0,125	0,375	-	1.09
	Flux massique de vapeur d'eau(**) [$\mu\text{g/m}^2.\text{s}$]	4,76	4,76	4,76	-	4,76
	Déperdition journalière [W/m^2]	8	14,46	5,912	-	2,19
	Coût de la déperdition [fmg/ m^2]	121,1242	218,516	89,3301	-	33,207
	Coût de l'isolant.	42.240	20.000	60.000	-	174.400
	Dépenses annuelles [fmg/ $\text{m}^2.\text{an}$]	47.039	81.116	36.615	-	23.747

Tableau 3.3.9 Résultats des calculs pour l'isolation en Balle de riz ; chambre froide positive

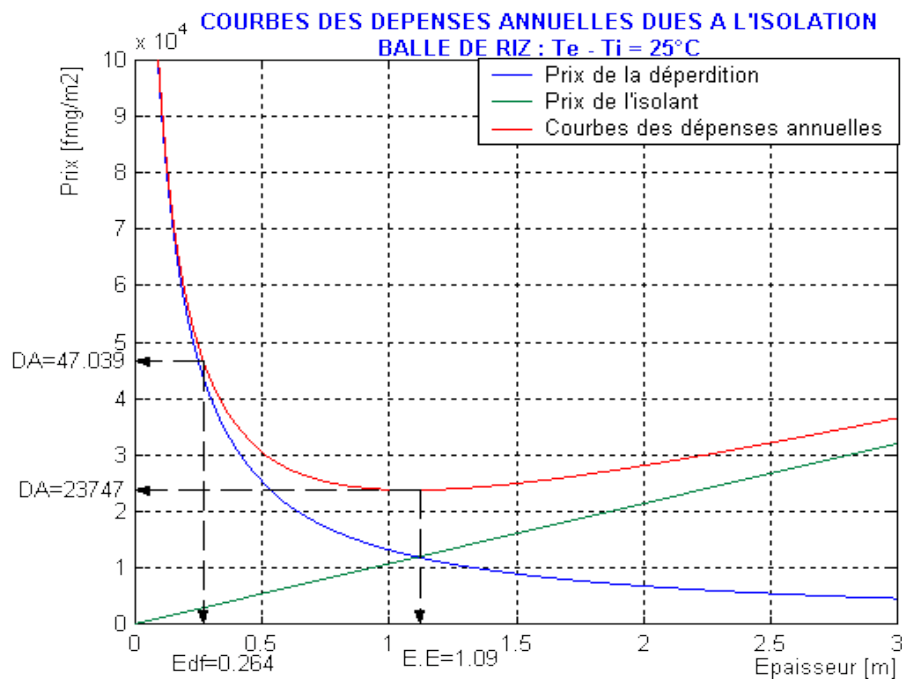


Fig.3.3.5 courbes des dépenses annuelles pour l'isolation en balles de riz ; chambre froide positive

III.3.3.2 Chambre froide négative

Conditions déterminantes

- Ambiance extérieure
Température : 27°C
HRe : 83 %
Coefficient de transfert de chaleur $h_e = 17 \text{ W/m}^2.\text{C}$
- Ambiance intérieure
Température : -20°C
HRe : 80 %

Coefficient de transfert de chaleur $h_i = 6 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

(*) Flux calculé avec le matériau pare vapeur seul

Soit $\Delta T = 47^\circ\text{C}$: Ecart de température ;

$\Delta p_v = (0,83 \cdot 26,74) - (0,8 \cdot 0,77) = 21,57 \text{ mm de Hg}$;

Δp_v : Ecart de pression partielle de la vapeur d'eau de l'air à l'intérieur et à l'extérieur de la chambre froide.

$T_r = 23,8^\circ\text{C}$: Température de condensation de l'air à l'extérieur.

Résultats des calculs pour les murs

Isolant	Facteurs d'optimisation	Méthode de calcul d'épaisseur				
		Déperdition fixée	$\Delta T/2$	ASHRAE	Epaisseur anti-condensation	Epaisseur OPTIMALE
Polystyrène expansé ($\lambda=0,039 \text{ W/m}^\circ\text{C}$)	Expression de l'épaisseur	$e = \lambda \left[\frac{\Delta T}{\phi} - \bar{R} \right]$	$\Delta T / 2$ [cm]	$0,15 \cdot \lambda \cdot \Delta T$	$e > \lambda \left[\frac{\Delta T}{h_e (T_r - T_i)} - \bar{R} \right]$	$\lambda \left[\frac{\sqrt{\frac{1}{COP} \cdot T_m \cdot C_e \cdot 10^{-3}}}{COP \cdot \lambda \cdot C_{um}} - \bar{R}_m \right]$
	Epaisseur [m]	0,286	0,235	0,275	$e > 0,015$	0,155
	Epaisseur normalisée [m]	0,280	0,240	0,280	0,040	0,16
	Flux massique de vapeur (*) d'eau [$\mu\text{g/m}^2 \cdot \text{s}$]	5,27	5,33	5,27	5,67	5,46
	Déperdition journalière [W/m^2]	6,13	7,0863	6,13	31,2429	10,25
	Coût de la déperdition [fmg/m^2]	92,7334	107,0735	92,7334	472,0805	155,06
	Coût de l'isolant.	1.400.000	1.200.000	1.400.000	200.000	800.000
	Dépenses annuelles [$\text{fmg/m}^2 \cdot \text{an}$]	127.191	119.093	127.191	185.694	109.931

Tableau 3.3.10 Résultats des calculs pour l'isolation en polystyrène ; chambre froide négative

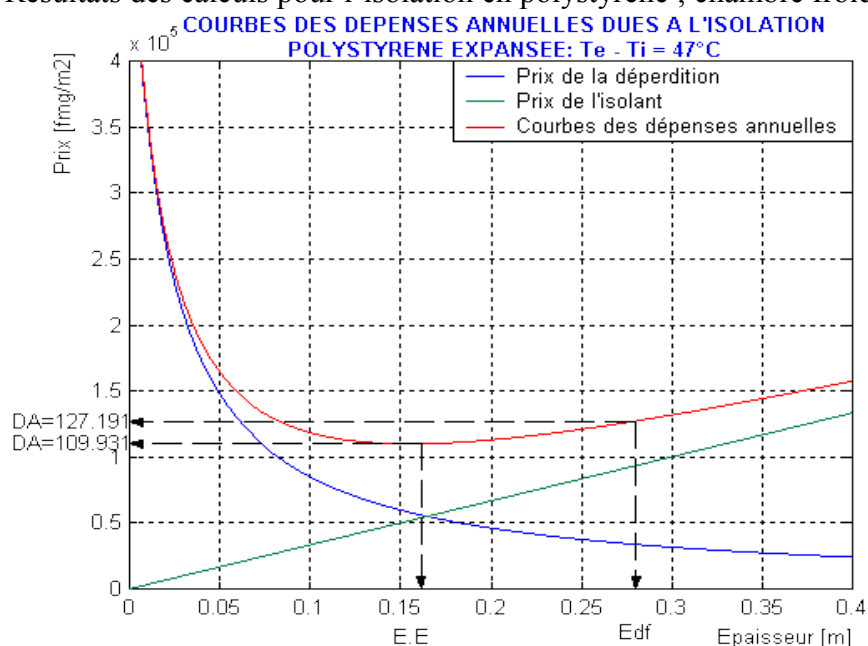


fig.3.3.6 courbes des dépenses annuelles pour l'isolation en polystyrène ; chambre froide négative

(*) Flux calculé avec le matériau pare vapeur et l'isolant

Isolant	Facteurs d'optimisation	Méthode de calcul d'épaisseur				
		Déperdition fixée	$\Delta T/2$	ASHRAE	Epaisseur anti-condensation	Epaisseur OPTIMALE
Balle de riz ($\lambda=0,1 \text{ W/m}^\circ\text{C}$)	Epaisseur [m]	0,73	0,235	0,705	$e>0,038$	1,51
	Flux massique de vapeur d'eau(*) [$\mu\text{g/m}^2.\text{s}$]	5,74	5,74	5,74	5,74	5,74
	Déperdition [W/m^2]	6	16,61	6,2428	54,7339	3,01
	Prix journalier de la déperdition [fmg/m ² .24h]	91,2967	251,058	94,3284	887,0292	45,59
	Coût de l'isolant. [fmg/m ²].	116.800	37.600	112.800	6.080	241.000
	Dépenses annuelles [fmg/m ² .an]	41.120	94.170	41.960	302.360	32.750

Tableau 3.3.11 Résultats des calculs pour l'isolation en balles de riz ; chambre froide négative

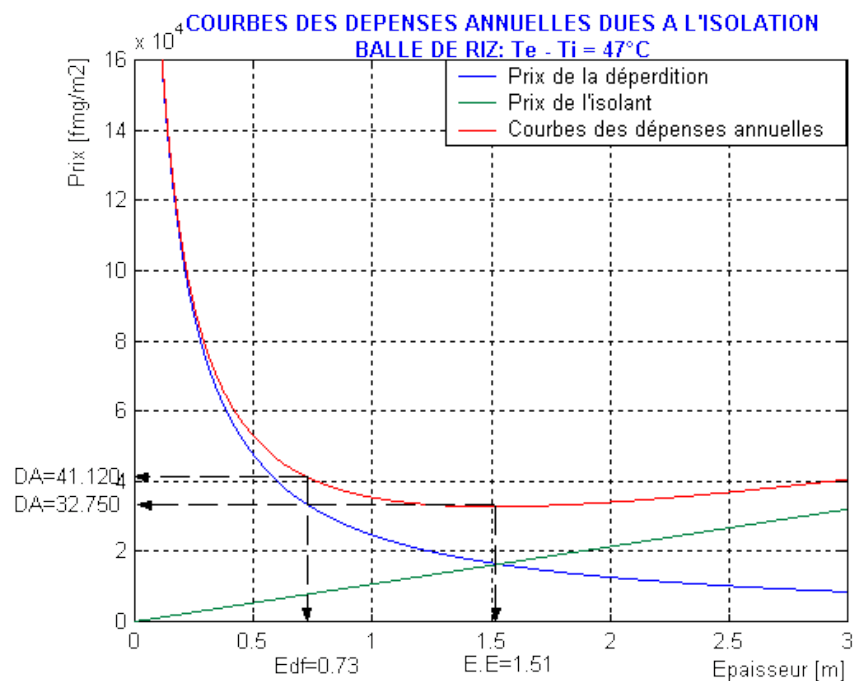


fig.3.3.7 courbes des dépenses annuelles pour l'isolation en balle de riz; chambre froide négative

(*) Flux calculé avec le matériau pare vapeur seul

Isolant	Facteurs d'optimisation	Méthode de calcul d'épaisseur				
		Déperdition fixée	$\Delta T/2$	ASHRAE	Epaisseur anti-condensation	Epaisseur OPTIMALE
Polyuréthane ($\lambda=0,030\text{W/m}^\circ\text{C}$)	Epaisseur [m]	0,22	0,235	0,2115	$e>0,011$	0,09
	Epaisseur normalisée [m]	0,22	0,240	0,22	0,02	0,10
	Flux massique de vapeur d'eau [$\mu\text{g/m}^2.\text{s}$](*)	5,57	5,56	5,57	5,72	5,66
	Déperdition journalière [W/m^2]	6	5,8433	6	41,0349	12,32
	Prix journalier de la déperdition [$\text{fmg/m}^2.24\text{h}$]	90,907	83,759	90,907	620,0373	186,35
	Coût de l'isolant. [fmg/m^2].	1.980.000	2.160.000	1.980.000	180.000	900.000
	Dépenses annuelles [$\text{fmg/m}^2.\text{an}$]	174.581	174.581	174.581	238.381	128.018

Tableau 3.3.12 Résultats des calculs pour l'isolation en polyuréthane ; chambre froide négative

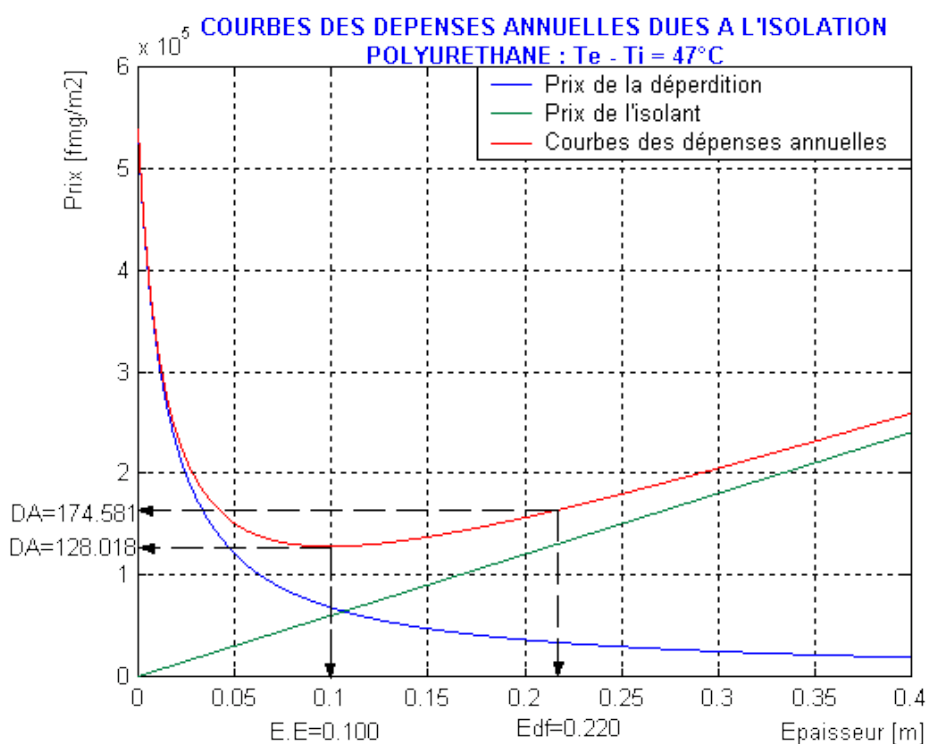


fig.3.3.8 courbes des dépenses annuelles pour l'isolation en polyuréthane ; chambre froide négative

(*) Flux calculé avec le matériau pare vapeur et l'isolant

III.3.4 Interprétation des résultats :

Notre but est de sélectionner et classer la formule appropriée pour un ensemble de conditions bien déterminées. Pour cela, nous avons pu noter les points suivants :

Les différentes méthodes de calculs d'épaisseurs donnent des valeurs différentes pour un isolant donné et avec des écarts plus ou moins grands selon le cas.

L'isolation en balles de riz est la plus économique parmi les trois isolants étudiés. Cependant, les calculs donnent des valeurs excessives de l'épaisseur (de l'ordre de 1 m).

La formule des déperditions fixées donne des valeurs très proches des épaisseurs économiques pour la chambre froide positive avec les isolants en polystyrène et en polyuréthane.

La déperdition donnée par les calculs d'épaisseur économique est très variable selon l'isolant.

La formule ASHRAE tend à fixer la déperdition aux alentours de 6 W/m^2

Le flux massique de la vapeur d'eau ne varie pas beaucoup avec l'épaisseur de l'isolant, la résistance à la diffusion de vapeur de l'isolant très faible devant celle du matériau pare vapeur.

Le calcul des épaisseurs économiques tend à diminuer les valeurs obtenues pour les isolant plus chère.

Pour la chambre froide négative, l'écart entre les valeurs obtenues avec les formules classiques et celles de calcul optimale est plus ou moins grand. Il en est de même pour les dépenses annuelles affectées à une unité de surface.

L'épaisseur anti-condensation est nulle pour la chambre froide positive. En effet, l'épaisseur des murs de soutien et l'enduit de revêtement suffisent pour éviter la condensation de la vapeur d'eau dans l'air extérieur dans ces conditions. Pour la chambre froide négative, les calculs donnent des valeurs assez faibles permettant l'éviction de la condensation.

III.3.5 Conclusion :

Pour les calculs des épaisseurs optimales, suivant les isolants et l'ambiance interne de la chambre, les valeurs obtenues donnent des déperditions très variées. La détermination de ces déperditions optimales permet de mener le calcul dans le sens inverse et il s'en suit que les valeurs calculées seront optimales.

La formule ASHRAE qui fixe la déperdition à $6,66 \text{ W/m}^2$ n'est alors optimale que pour certaines conditions réunies, La déperdition optimale étant variable suivant le cas.

Le dimensionnement du matériau pare vapeur ne devrait tenir compte que le flux de vapeur acceptable pour l'isolant et pour l'atmosphère de la chambre.

Les valeurs obtenues avec la formule d'épaisseur anti- condensation peut servir de limite inférieure quant à l'épaisseur de l'isolation.

III.4 EXPLOITATION DES METHODES DE CALCULS SELON LES CONDITIONS D'UTILISATIONS.

L'épaisseur optimale pour le calcul d'isolation tient compte de la durée de vie la construction. Il est calculé pour le minimum de dépense pendant toute la période d'exploitation que ce soit pour celles occasionnées par les déperditions à travers les parois où pour le coût de l'isolation. Cette méthode de calcul nécessite néanmoins beaucoup de paramètres, de données techniques et économiques assez difficiles à rassembler pour les nouvelles constructions.

Nous avons résolu alors de chercher des méthodes de calculs permettant d'exploiter

les autres formules et qui donnerait des valeurs optimales avec les conditions existantes à Madagascar.

III.4.1 Choix de méthode de calculs

On peut visualiser les différentes valeurs données par les calculs selon l'écart de température avec les figures ci-dessous en fixant les valeurs suivantes :

Fixons les valeurs suivantes :

- $C_e = 1650 \text{ fmg / kWh}$
- $\Delta t = (24 \times 365) \text{ h / an}$
- $\text{COP} = 2,62$

et soit pour les trois isolants suivants :

- Polystyrène : $\lambda = 0,039 \text{ W / m.}^\circ\text{C}$;
Cum = 5.000.000 fmg / m³
m = 15 ans
- Polyuréthane : $\lambda = 0,030 \text{ W / m.}^\circ\text{C}$;
Cum = 9.000.000 fmg / m²
m = 15 ans
- Balle de riz : $\lambda = 0,1 \text{ W / m.}^\circ\text{C}$;
Cum = 160.000 fmg / m³
m = 15 ans

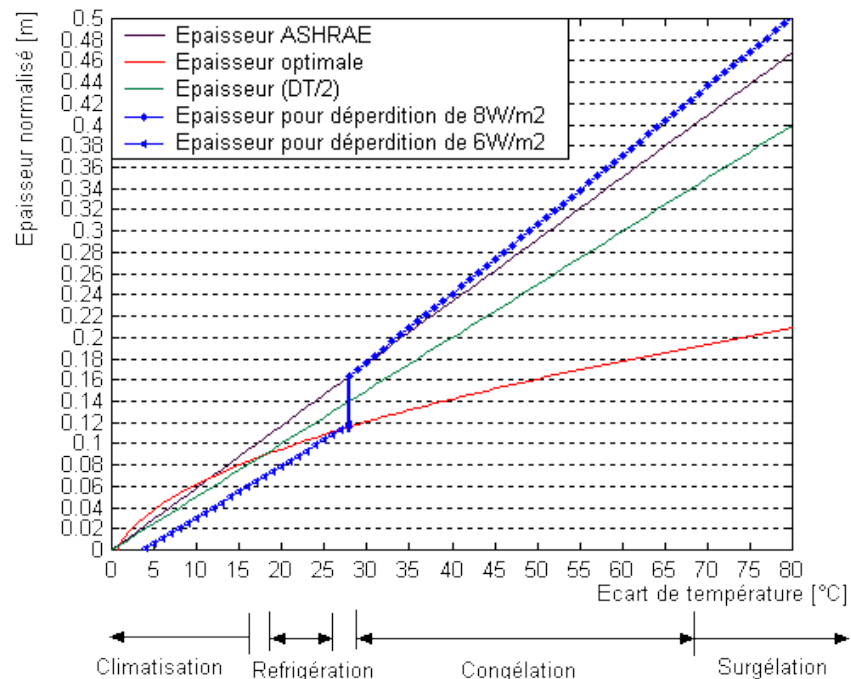


Fig.3.3.9 Courbes des épaisseurs pour les différentes méthodes de calculs. Isolation en polystyrène expansée.

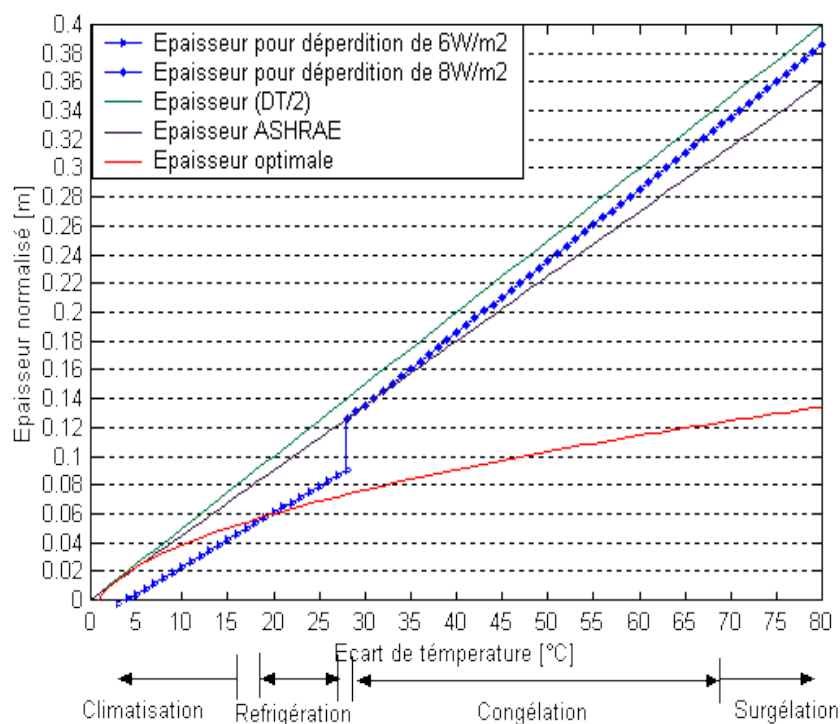


Fig.3.3.10 Courbes des épaisseurs pour les différentes méthodes de calculs. Isolation en polyuréthane

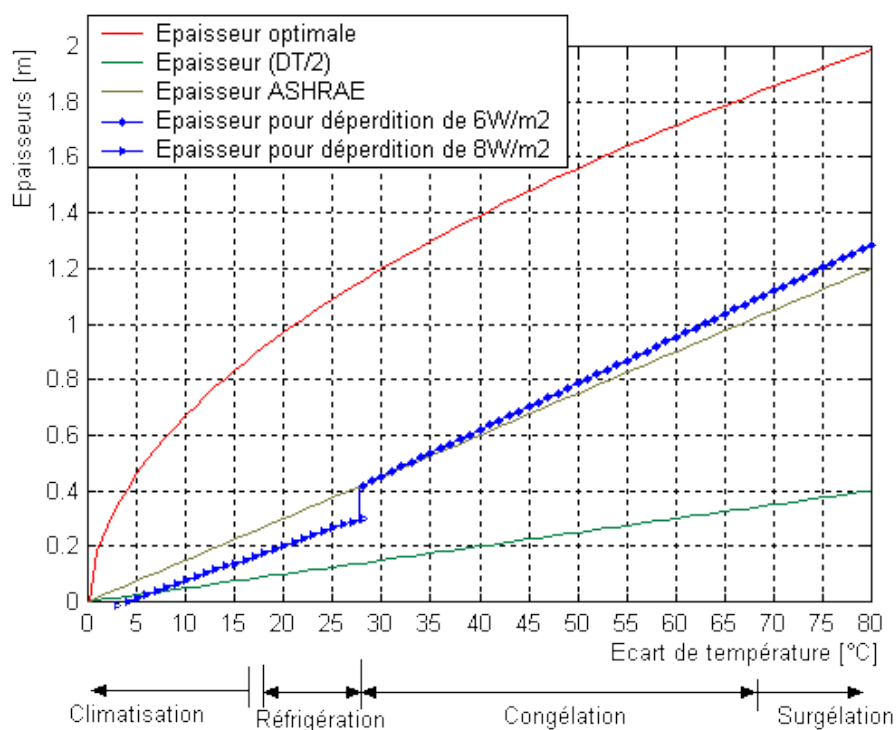


Fig.3.3.11 Courbes des épaisseurs pour les différentes méthodes de calculs. Isolation en balle de riz

Interprétation des résultats :

Pour l'isolation en polyuréthane et en polystyrène, les épaisseurs données par les différentes méthodes de calculs tendent à donner les mêmes valeurs dans la zone d'écart de température faible (climatisation, réfrigération). L'écart est devenu plus significatif dans les zones de congélation entre l'épaisseur optimale et les épaisseurs données par les autres méthodes de calculs où l'épaisseur optimale donne des valeurs moins élevées. Ceci est dû à la non linéarité des valeurs du coût total par rapport au coût de l'isolation.

Pour l'isolation en balle de riz, le matériau étant moins cher, l'épaisseur optimale calculée tend à diminuer au maximum le flux thermique pour diminuer les dépenses énergétiques. Il s'en suit que pour ce type d'isolation, les valeurs d'épaisseurs optimales sont plus élevées que les valeurs des épaisseurs données avec les autres formules.

Conclusions :**1-Chambres de réfrigération**

On peut conclure que pour les chambres froides positives destinées seulement au réfrigération des denrées, les formules pour les calculs d'épaisseurs sont valables et donnent des valeurs plus ou moins proches des valeurs optimales.

2-Chambres de congélation

Pour les chambres de congélation, surtout si l'écart de température ΔT est très élevés, les différences des valeurs obtenues sont élevées et sont fonction croissante de ΔT . Il est indispensable dans ces cas de trouver des méthodes de calcul permettant d'approcher les valeurs optimales.

III.4.2 Déperdition optimale pour l'isolation frigorifique à Madagascar

Dans cette partie nous suggérons une méthode de calcul donnant la même valeur de l'épaisseur que le calcul de l'épaisseur optimale en déterminant la déperdition optimale. Pour ce faire, on se propose la méthode de calcul suivante :

➤ L'épaisseur économique se calcul par :

$$EE = \lambda \left[\sqrt{\frac{\Delta t \cdot \Delta T \cdot m \cdot Ce \cdot 10^{-3}}{COP \cdot \lambda \cdot Cum}} - \overline{R_m} \right]$$

➤ Le calcul de l'épaisseur par la méthode de déperdition fixée est donné par :

$$Edf = \lambda \cdot \left[\frac{\Delta T}{\varphi} - \overline{R_m} \right]$$

où φ est fixé pour le calcul classique à **6 W/m²** pour un chambre de congélation et **8W/m²** pour un chambre de réfrigération.

On se propose alors de chercher la valeur qu'on devrait imposer à la déperdition qui optimiserait le calcul. Pour que la valeur d'épaisseur trouvée soit la valeur optimale, on écrit :

$$EE = \lambda \left[\sqrt{\frac{\Delta t \cdot \Delta T \cdot m \cdot Ce \cdot 10^{-3}}{COP \cdot \lambda \cdot Cum}} - \overline{R_m} \right] = Edf = \lambda \cdot \left[\frac{\Delta T}{\varphi} - \overline{R_m} \right]$$

On trouve :

$$\boxed{\varphi = \frac{\Delta T}{\sqrt{\frac{\Delta t \cdot m \cdot \Delta T \cdot Ce \cdot 10^{-3}}{COP \cdot \lambda \cdot Cum}}}} \quad [W/m^2] \quad (III.14)$$

Les valeurs données par cette équation donnera les valeurs de la déperdition optimale pour les conditions d'utilisations insérées dans le calcul.

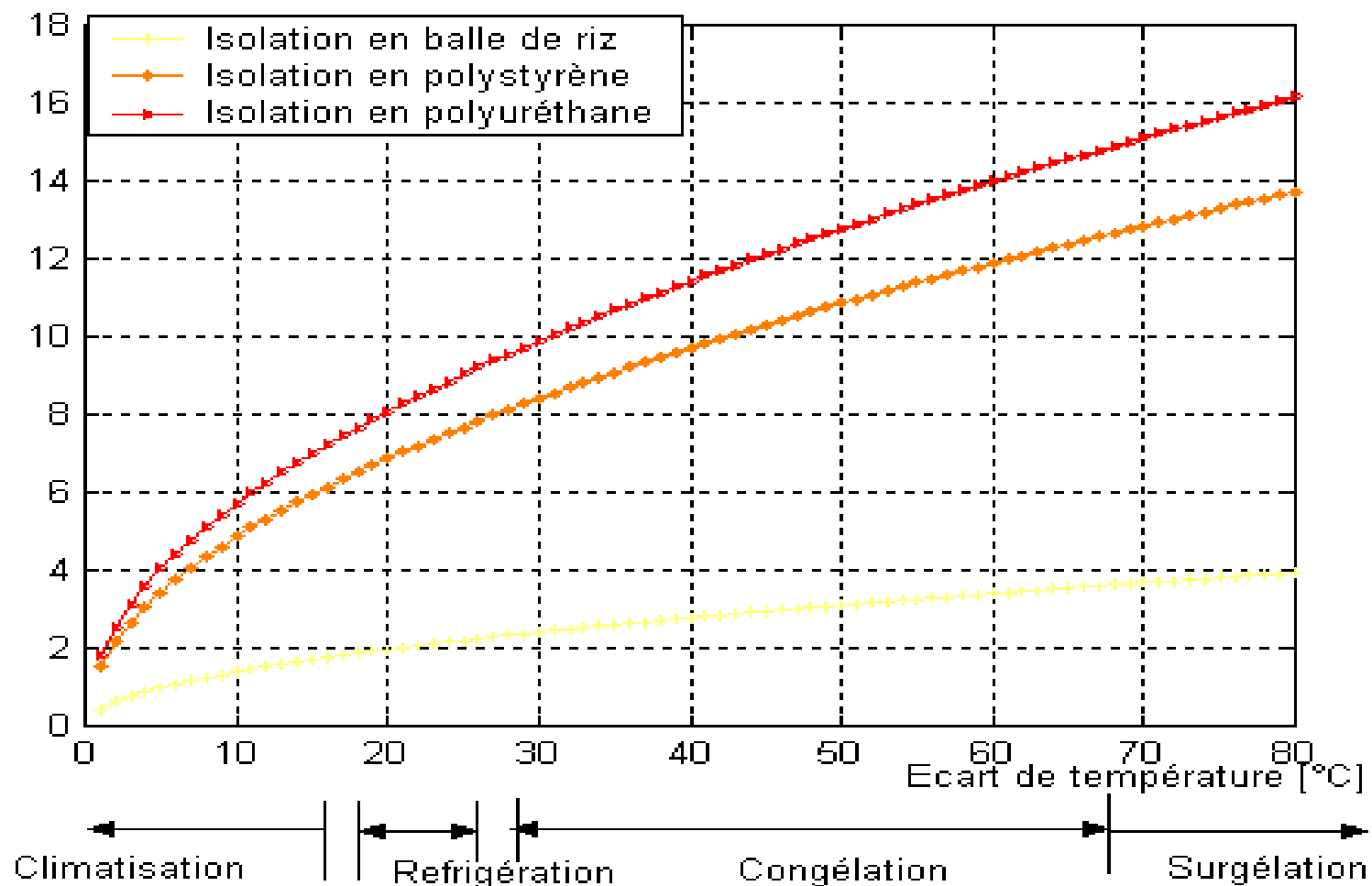
Déperdition optimale [W/m^2]

Fig 3.3.12 Courbes des déperditions optimales pour quelques isolants

Remarque : Les valeurs des paramètres fixées dans les calculs sont des valeurs technologiques et économiques vérifiables et valables à Madagascar actuellement. Par la suite, ces courbes pour les différents isolants ne sont pas utilisables que pour les constructions à Madagascar. Pour d'autres utilisations, il est conseillé d'utiliser la formule initiale.

Calculs prévisionnels

Il est à noter que pour les calculs des déperditions optimales, « Ce » est le prix du kWh. Durant la durée de vie de l'isolation, le coefficient « Ce » où le coût de l'énergie peut évoluer dans le temps. Il fallait donc prévoir cette variation pour la période prévue afin que l'épaisseur calculée reste optimale.

Pour ce calcul, on définit le coefficient « i » qui désignera la variation annuelle du coefficient « Ce ».

Pour l'année en cours : $Ce = Ce_0$

Pour l'année 1 : $Ce = Ce_1 = Ce_0 + Ce_0 \cdot i = Ce_0 \cdot (1 + i)$

Pour l'année 2 : $Ce = Ce_2 = Ce_1 + Ce_1 \cdot i = Ce_1 (1 + i) = Ce_0 \cdot (1 + i)^2$

.

.

.

Pour l'année m : $Ce = Ce_m = Ce_0 (1 + i)^m$

La déperdition optimale est donnée par :

$$\varphi = \frac{\Delta T}{\sqrt{\frac{\Delta t \cdot m \cdot \Delta T \cdot Ce \cdot 10^{-3}}{COP \cdot \lambda \cdot Cum}}}$$

En calculant le coût moyen de l'énergie :

$$Cem = \frac{Ce_0 + Ce_1 + Ce_2 + \dots + Ce_m}{m} ; \text{ où « m » est la durée de vie, en année, de l'isolation}$$

$$Cem = \frac{Ce_0 \cdot [(1+i) + (1+i)^2 + (1+i)^3 + \dots + (1+i)^m]}{m} = \frac{Ce_0 \cdot \left\{ \frac{1 - (1+i)^{m+1}}{1 - (1+i)} \right\}}{m}$$

$$Cem = \frac{Ce_0 \cdot ((1+i)^{m+1} - 1)}{i \cdot m}$$

Donc la formule finale de la déperdition optimale s'écrit :

$$\varphi = \frac{\Delta T}{\sqrt{\frac{\Delta t \cdot m \cdot \Delta T \cdot Cem \cdot 10^{-3}}{COP \cdot \lambda \cdot Cum}}} \quad \text{où}$$

$$\varphi = \frac{\Delta T}{\sqrt{\frac{\Delta t \cdot \Delta T \cdot 10^{-3} \cdot C_{e0} \cdot ((1+i)^{m+1} - 1)}{COP \cdot \lambda \cdot Cum \cdot i}}} \quad (III.15)$$

Où « m » est la durée de vie de l'isolation et « i » le taux de variation annuel du coût de l'énergie.

Exemple : Pour $i = 5\%$;
 $C_{e0} = 1650 \text{ fmg/kWh}$;
 $m = 15 \text{ ans}$;

$$C_{em} = \frac{1650 \cdot ((1 + 0,05)^{15+1} - 1)}{0,05 \cdot 15}$$

$$C_{em} = 2602 \text{ fmg/kWh}$$

III.4.3 Exploitation de la formule ASHRAE pour les constructions à Madagascar

Le calcul de l'isolation par la méthode ASHRAE est très employé aux Etats-Unis en matière d'isolation. Elle annonce que l'épaisseur de l'isolation est définie par :

$$E_{ashrae} = 0,15 \cdot \lambda \cdot \Delta T$$

Pour adopter la formule à notre environnement technico-économique, nous suggérons la démarche suivante :

$$E_{ashrae} = 0,15 \cdot \lambda \cdot \Delta T = EE = \lambda \left[\sqrt{\frac{\Delta t \cdot \Delta T \cdot m \cdot C_e \cdot 10^{-3}}{COP \cdot \lambda \cdot Cum}} - \overline{R_m} \right]$$

On trouve :

$$\lambda \cdot Cum = \frac{\Delta t \cdot m \cdot \Delta T \cdot C_e \cdot 10^{-3}}{COP \cdot (0,15 \cdot \Delta T + \overline{R_m})^2} \quad (III.17)$$

Le second membre de l'équation (III.17) ne dépend que des conditions climatiques et des conditions technico-économiques tandis que le premier membre ne dépend que de l'isolant.

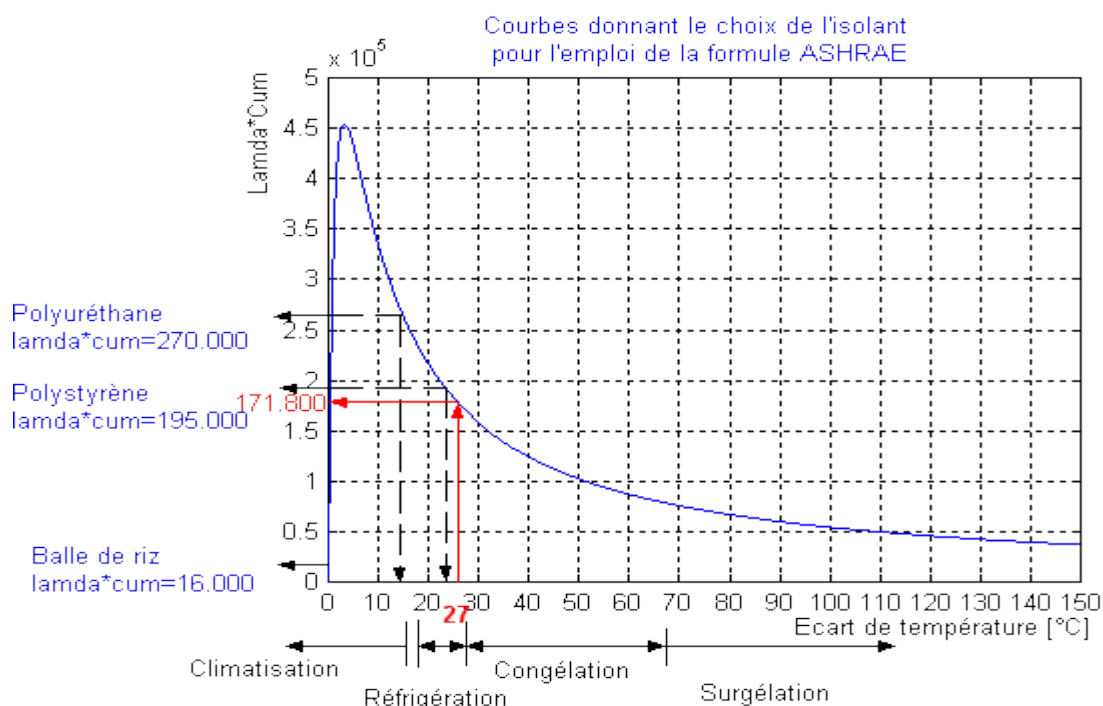


Fig. 3.3.13 Courbe donnant le choix de l'isolant en cas d'emploi de la formule ASHRAE.

La connaissance de l'écart de température ΔT donnera donc une valeur de « $\lambda \cdot \text{Cum}$ »

Exemple : soit une chambre de réfrigération :

$$\Delta T = 27^\circ\text{C}$$

$$h_e = 17 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$h_i = 6 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

On trouve d'après la courbe : $\lambda \cdot \text{Cum} = 171.800$

On sait qu'à chaque isolant correspond un coefficient « $\lambda \cdot \text{Cum}$ » selon son prix (cf. figure précédant). L'isolant le plus adapté à la formule pour les conditions imposées sera déterminé à partir de la courbe.

Les calculs faits pour les différents isolants existants ont permis de dresser le tableau suivant :

	Polystyrène	Polyuréthane	Balle de riz
λ [W/m.°C]	0,039	0,030	0,1
Cum [fmg/m ³]	5.000.000	9.000.000	160.000
$\lambda \cdot \text{Cum}$	195.000	270.000	16.000
Épaisseur ASHRAE $E_{ashrae} = 0,15 \cdot \lambda \cdot \Delta T$	0,146	0,1125	0,375
Coût de l'isolant [fmg/m ²]	730.000	1.012.500	60.000
Déperdition [W/m ²] $\phi = \frac{\lambda}{e} \times \Delta T$	6,67 [W/m ²]	6,66 [W/m ²]	6.66 [W/m ²]

Tableau 3.3.13 Résultats des calculs

Pour l'écart de température de 27°C l'isolant le plus adapté à la formule ASHRAE est le polystyrène (voir figure).

Vérification : Pour $\Delta T = 27^{\circ}\text{C}$

Isolant en Polystyrène : $\lambda = 0.039 \text{ W/ m.}^{\circ}\text{C}$

On trouve :

$$E_{\text{ashrae}} = 0,15 \cdot \lambda \cdot \Delta T = 0,157 \text{ m}$$

Et en calculant l'épaisseur optimale, on trouve :

$$E.E = 0,147 \text{ m}$$

Remarque :

1-Le coefficient « $\lambda.Cum$ » peut être défini comme étant un coefficient caractéristique d'un isolant donné. Ce coefficient recombine la performance thermique et la propriété économique de l'isolant.

2-Pour la figure nous n'avons inscrit que trois valeurs de « $\lambda.Cum$ » correspondant à ceux des trois isolants. Pour optimiser le choix, on peut inscrire les valeurs de « $\lambda.Cum$ » pour tous les isolants existants sur l'axe vertical.

3-La courbe de la figure est tracée pour une durée de vie de l'isolant de 15 ans. Pour d'autres conditions, il est recommandé d'employer la formule initiale (III.17).

Interprétation des résultats

1-Les calculs d'épaisseurs sont faits avec la formule ASHRAE. On constate que pour chaque isolant, on a les mêmes déperditions par unité de surface. Pour les conditions citées ci-dessus, l'isolant conseillé par la courbe est celui qui aura une valeur de $\lambda.Cum = 171.800$. Le polystyrène donne un coefficient $\lambda.Cum = 195.000$ qui est le plus proche de la valeur. On peut conclure que la formule ASHRAE est mieux exploitée dans ces conditions à Madagascar pour le polystyrène.

2- La courbe peut informer aussi sur les domaines où peut être employé et optimisé un isolant donné et calculé avec la formule ASHRAE.

3-Pour la balle de riz, la méthode ASHRAE n'est jamais conseillée que pour de grand écart température. Cependant, dans ces conditions, les calculs donneront une épaisseur d'isolation inacceptable (plus de 1m). La balle de riz aussi n'est donc pas conseillée pour être employée avec cette méthode de calcul.

III.4.4 Conclusions

a- Conclusion 1

L'établissement des courbes de déperditions optimales pour les différents isolants existants permet d'obtenir des valeurs directement applicables aux calculs de dimensionnement de l'épaisseur de l'isolation. La valeur de la déperdition optimale sera donnée en utilisant la courbe correspondant à l'isolant (cf. fig. 3.3.12). On utilise les valeurs obtenues avec la méthode de déperdition fixée. L'épaisseur de l'isolation ainsi calculée est l'épaisseur optimale du point de vue technique, concernant la déperdition, et économique pour toute la durée de vie de l'exploitation.

Les paramètres imposés dans le calcul sont des valeurs réelles vérifiables à Madagascar, Les courbes établies sont alors nécessairement appropriées au pays.

b- Conclusion 2

Nombre d'ouvrages proposent plusieurs formules pour le calcul d'épaisseur d'isolation, la formule ASHRAE est très employée aux Etats-Unis en matière d'isolation. Seulement la formule ne tient pas compte du coût technico-économique pour son utilisation dans un pays comme la notre. Nous avons donc établi la formule (III.17) permettant d'adapter cette méthode. En procédant de la manière suggérée précédemment, cette méthode de calcul peut être optimisée pour des conditions et isolants bien déterminés.

Chapitre IV : EXEMPLE D'APPLICATION DE CALCUL POUR UNE CHAMBRE FROIDE A MADAGASCAR

IV.1 Paramètres de calculs

Données climatiques

$T_e = + 32^\circ\text{C}$

$T_{sol} = + 42^\circ\text{C}$

$(1/h_e) = 0.03 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ (Parois en contact avec l'air externe)

$HRe = 82 \%$

$T_r = 28,5^\circ\text{C}$

Flux global due à l'ensoleillement: $F_g = 291,6 \text{ W/m}^2$

Condition de conservation

$T_i = -5^\circ\text{C}$

$HR_i = 90 \%$

$(1/h_i) = 0,06 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ (Ventilation mécanique)

Facteur technico-économique

$COP = 2.62$

$C_e = 1650 \text{ fmg/kWh}$ ou 330 Ar/kWh

Isolation des parois verticales et du plafond en POLYURETHANE

$\lambda = 0,030 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

$\text{Cum (1)} = 9.000.000 \text{ fmg/m}^3 = 1.800.000 \text{ Ar/m}^3$

$m = 15 \text{ ans}$

Isolation du sol en POLYSTYRENE de QUALITE Q5

$\lambda = 0,037 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$

$\text{Cum (2)} = 5.000.000 \text{ fmg/m}^3 = 1.000.000 \text{ Ar/m}^3$

$m = 15 \text{ ans}$

IV.2 Description de la chambre froide

La chambre froide choisie est destinée à la congélation de viandes de bœufs qui devraient être maintenue à une température de -5°C avec une humidité relative interne de 90%.

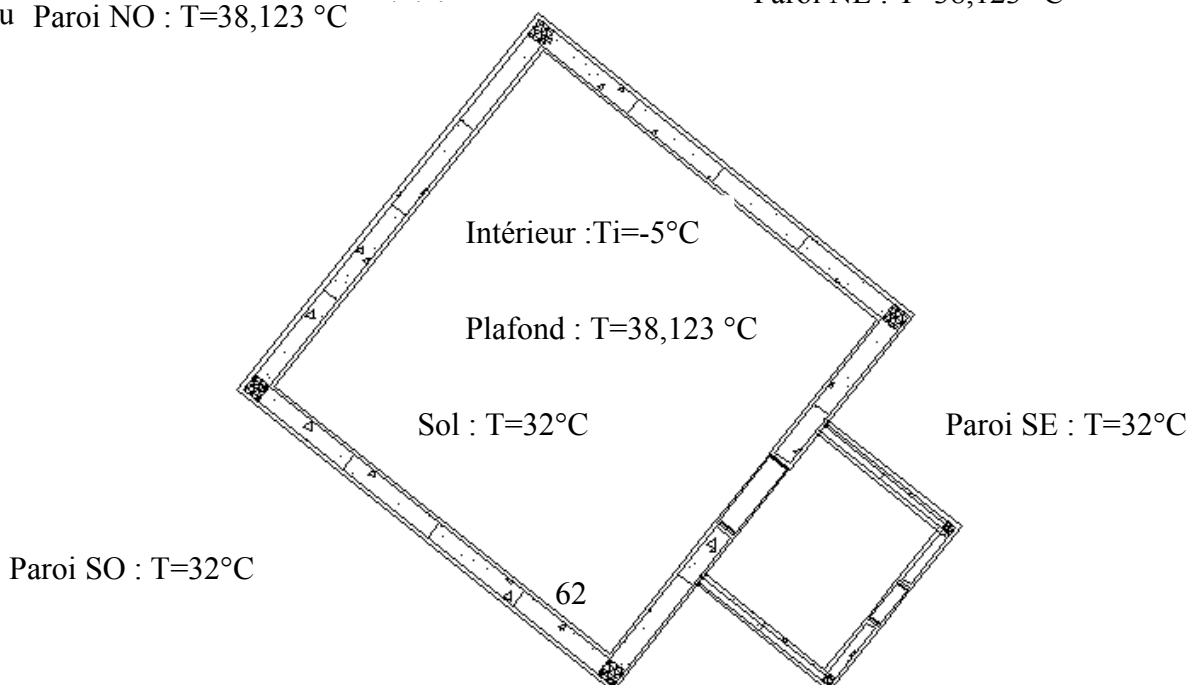
Les dimensions intérieures de la chambre froide sont les suivantes :

- Longueur : 10 m
- Profondeur : 10 m
- Hauteur isolée : 6 m

Soit une surface totale de 440 m^2 pour un volume de 600 m^3 .

L'isolation utilisée sera formée par des panneaux sandwich à l'éthane

pour Paroi NO : $T = 38,123^\circ\text{C}$



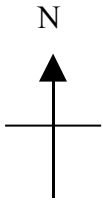


Fig.3.4.1 Coupe de la chambre froide (vue de dessus)

Les parois NORD-OUEST et NORD-EST sont ensoleillées.

IV.3 Modèle de calcul classique

Il s'agit d'une chambre froide négative, la déperdition admise est de $\varphi = 6 \text{ W/m}^2$.

Avec

$$e = \lambda_{is} \cdot \left[\frac{\Delta T}{\varphi} - \overline{Rm} \right] \quad \text{et} \quad \overline{Rm} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} = 0,09 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

L'élévation de la température des faces ensoleillées est donnée par :

$$\theta = \frac{a}{h_e} \cdot Fg = 0,7 \cdot 0,03 \cdot 291,6 = 6,123^\circ\text{C}$$

soit pour les différentes parois :

Sol (avec vide sanitaire)	$\Delta T = 37^\circ\text{C}$
Plafond : (toiture ensoleillée)	$\Delta T = 43,123^\circ\text{C}$
Murs : Paroi NO et NE (ensoleillées)	$\Delta T = 43,123^\circ\text{C}$
Paroi SO et SE	$\Delta T = 37^\circ\text{C}$

- Pour les murs SO et SE :

$$e = 0,03 \left[\frac{37}{6} - 0,09 \right] = 0,1823[m]$$

$e_{n1} = 0,180 [m]$: épaisseur normalisée

et la déperdition réelle : $\varphi_{1.\text{réelle}} = 6,07 \text{ W/m}^2$

Pour les murs NO et NE :

$$e = 0,03 \left[\frac{43,123}{6} - 0,09 \right] = 0,2129[m]$$

$e_{n2} = 0,22 [m]$: épaisseur normalisée

et la déperdition réelle : $\phi_{2,\text{réelle}} = 5,8 \text{ W/m}^2$

Plafond :

$$e = 0,2129 \text{ m}$$

$$e_{\text{np}} = 0,22 \text{ m}$$

$$\phi_{\text{p,réelle}} = 5,8 \text{ W/m}^2$$

- Sol : Isolation en polystyrène de qualité Q5 : $\lambda = 0,037 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$

$$e = 0,2248 \text{ m}$$

$$e_{\text{ns}} = 0,22 \text{ m}$$

$$\phi_{\text{s,réelle}} = 6,12 \text{ W/m}^2$$

IV.4 Modèle de calcul proposé

En consultant la courbe des déperditions optimales, on trouve les valeurs suivantes pour les déperditions :

Parois	Isolant	$\Delta T [^\circ\text{C}]$	Déperdition optimale
Murs NO et NE	Polyuréthane	43,123	11,86 W/m ²
Murs SO et SE	Polyuréthane	37	10,98 W/m ²
Plafond	Polyuréthane	43,123	11,86 W/m ²
Sol	Polystyrène	37	9,09 W/m ²

Tableau 3.4.1 : Déperdition optimale pour chaque parois

Soit pour les épaisseurs

- Murs : NO et NE :

$$e = 0,03 \cdot \left[\frac{43,123}{11,86} - 0,09 \right] = 0,106 \text{ m}$$

$$e_{\text{n2}} = 0,100 \text{ m}$$

$$\phi_{2,\text{réelle}} = 12,59 \text{ W/m}^2$$

- Murs SO et SE

$$e = 0,03 \cdot \left(\frac{37}{10,98} - 0,09 \right) = 0,098 \text{ m}$$

$$e_{\text{n1}} = 0,100 \text{ m}$$

$$\phi_{1,\text{réelle}} = 10,80 \text{ W/m}^2$$

- Plafond :

$$e = 0,03 \cdot \left(\frac{43,123}{11,86} - 0,09 \right) = 0,106 \text{ m}$$

$$e_{\text{np}} = 0,100 \text{ m}$$

$$\phi_{\text{p,réelle}} = 12,89 \text{ W/m}^2$$

- Sol :

$$e = 0,037 \cdot \left(\frac{37}{9,09} - 0,09 \right) = 0,147 \text{ m}$$

$$e_{\text{ns}} = 0,140 \text{ m}$$

$$\phi_{\text{s,réelle}} = 9,55 \text{ W/m}^2$$

IV.5 Calculs économiques

a- Pour le modèle de calcul classique

Coût de l'isolant :

Le coût total de l'isolation est donné par :

$$\text{Cist} = \text{Cum1} \cdot (e_{\text{n1}} \cdot S_1 + e_{\text{n2}} \cdot S_2 + e_{\text{np}} \cdot S_p) + \text{Cum2} \cdot e_{\text{ns}} \cdot S_s$$

$$\text{Cist} = 9 \cdot 10^6 (0,22 \cdot 120 + 0,18 \cdot 120 + 0,22 \cdot 100) + (5 \cdot 10^6 \cdot 0,22 \cdot 100)$$

$$\text{Cist} = 740.000.000 \text{ Fmg ou } 148.000.000 \text{ Ar}$$

$$C_{is_a} = \frac{C_{ist}}{m}$$

Et le coût annuel de l'isolation

$$C_{is_a} = 49.333.333,33 \text{ Fmg/an ou } 9.866.666 \text{ Ar/an}$$

Coût de la déperdition :

Le coût annuel de la déperdition est définie par :

$$C_{d_a} = \frac{\phi_{réel} \cdot \Delta t \cdot S \cdot Ce \cdot 10^{-3}}{COP} \quad \text{où } \Delta t = 24 \times 365 h / an$$

$$C_{d_a} = \frac{\Delta T \cdot Ce \cdot 10^{-3}}{COP} (\phi_{1,réelle} \cdot S_1 + \phi_{2,réelle} \cdot S_2 + \phi_{p,réelle} \cdot S_p + \phi_{s,réelle} \cdot S_s)$$

d'où le coût total de la déperdition :

$$C_{d_a} = 14.434.139,54 \text{ fmg/an ou } 2.886.827,9 \text{ Ar/an}$$

Dépense annuelle totale

$$D_a = C_{is} + C_d$$

$$D_a = 63.767.472,87 \text{ fmg/an ou } 12.753.494 \text{ Ar/an}$$

b- Pour le modèle de calcul proposé

Coût de l'isolant :

L'épaisseur de l'isolant est la même pour les murs et le plafond :

$$C_{ist} = Cum1 \cdot e_{n1} (S_1 + S_2 + S_p) + Cum2 \cdot e_{ns} \cdot S_s$$

$$C_{ist} = 9 \cdot 10^6 \cdot 0,1340 + 5 \cdot 10^6 \cdot 0,14100$$

$$C_{ist} = 376.000.000 \text{ fmg ou } 75.200.000 \text{ Ar}$$

$$\text{Le coût annuelle de l'isolation } C_{is_a} = \frac{C_{ist}}{m} = 25.066.666,67 \text{ fmg ou } 5.013.333 \text{ Ar}$$

Coût de la déperdition

$$C_{d_a} = \frac{\phi_{réel} \cdot \Delta t \cdot S \cdot Ce}{COP}$$

$$\frac{24.365.1650 \cdot 10^{-3}}{2.62} (12,59 \cdot 120 + 10,50 \cdot 120 + 12,59 \cdot 100 + 9,55 \cdot 100)$$

$$C_{d_a} = 27.698.718,78 \text{ fmg/an ou } 5.539.743,75 \text{ Ar/an}$$

Dépenses annuelles

$$D_a = C_{is} + C_d$$

$$D_a = 52.765.385,45 \text{ fmg/an ou } 10.553.077 \text{ Ar/an}$$

IV.6 Interprétation et comparaison des résultats

L'écart entre les dépenses annuelles données par les deux méthodes de calcul est de 11.002.087,42 fmg/an ou 2.200.417 Ar/an. Cette somme peut alors être économisée annuellement durant la durée de vie de l'installation en cas d'utilisation de la courbe des déperditions optimales au lieu de procéder avec les méthodes de calculs classiques.

La méthode de calcul proposée est donc plus rentable du point de vue économique que la méthode de calcul classique. Cependant, elle tend à diminuer les dépenses alloués à l'isolation et augmente ainsi les consommations en matière d'énergie. Ce fait est dû au coût élevé de l'isolation par rapport au coût de l'énergie.

La recherche d'un isolant performant avec un coût moindre peut alors donner deux avantages :

- Diminution de la dépense en matière d'isolation.
- Economie d'énergie et de dépense énergétique.

Nous avons vu précédemment que la balle de riz est un isolant bon marché, seulement elle n'est pas très performante comparée aux autres isolants existant. Avec un coefficient λ de 0,1 W/m.°C l'isolation en balle de riz nécessite une épaisseur très élevée.

Nous proposons alors un produit local qui possède les caractéristiques physico-thermiques requises pour être utilisé comme matériau isolant : « LE KAPOK »

Chapitre V : Caractérisation et utilisation du KAPOK comme isolant thermique.**V.1 Le kapok**

Le kapok est une fibre végétale provenant des fruits de l'arbre appelé Kapokier ou Fromager. Le fromager appelé aussi Ceiba pentandra (ou Bombax) appartient à la famille des Malvacées dont fait partie le Baobab. Il est en abondance dans les pays tropicaux comme le notre.

Des études faites récemment ont donné pour ce matériau un coefficient de la conductivité thermique $\lambda = 0,032 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ {19}.

Conductivité thermique [SI]		Température [°C]			
		25	30	35	40
Masse volumique apparente [SI]	47,46	0,032	0,032	0,032	0,032
	57 ;59	0,033	0,033	0,033	0,033

Tableau 3.4.2 Conductivité expérimentale de l'isolant fabriqué avec du kapok {19}

D'autres références bibliographiques ont publié une valeur de $\lambda = 0,039 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ {17}. Nous avons alors pris cette valeur dans les calculs d'autant plus qu'on va dans le sens de la sécurité.

V.2 Exemple de calcul de chambre froide avec utilisation du Kapok comme isolant.**V.2.1 Paramètres de calculs**

La chambre froide est placée dans les mêmes caractéristiques que celle calculée précédemment.

Données climatiques

$T_e = + 32^\circ\text{C}$

$T_{sol} = + 42^\circ\text{C}$

$(1/h_e) = 0,03 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$ (Parois en contact avec l'air externe)

$HRe = 82 \%$

$T_r = 28,5^\circ\text{C}$

Flux global due à l'ensoleillement: $F_g = 291,6 \text{ W/m}^2$

Condition de conservation

$T_i = - 5^\circ\text{C}$

$HRe = 90 \%$

$(1/h_i) = 0,06 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$ (Ventilation mécanique)

$\gamma = 75 \%$ Coefficient d'occupation du sol

Facteur technico-économique

$COP = 2,62$

$C_e = 1650 \text{ fmg/kWh}$ ou 330 Ar/kWh

Isolation des parois verticales et du plafond en KAPOK

$\lambda = 0,039 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

$Cum(1) = 480.000 \text{ fmg/m}^3 = 96.000 \text{ Ar/m}^3$

$m = 15 \text{ ans}$

Isolation du sol en POLYSTYRENE de QUALITE Q5

$\lambda = 0,037 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

$Cum(2) = 5.000.000 \text{ fmg/m}^3 = 1.000.000 \text{ Ar/m}^3$

$m = 15 \text{ ans}$

Type de construction de la chambre froide : Traditionnelle

Caractéristique de l'isolant (Kapok):

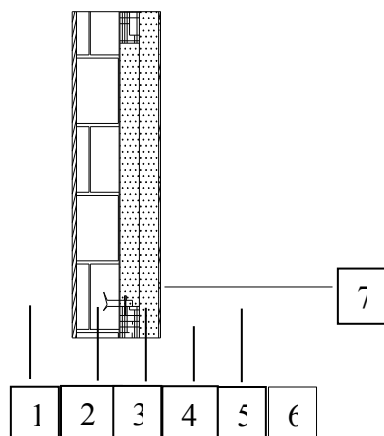
$\lambda = 0,039 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

$\rho = 16 \text{ kg/m}^3$

coût :30.000 fmg/kg ou 6000 Ar/kg soit Cum=480.000 fmg/m³ ou 96.000 Ar/ m³

Structure des parois :

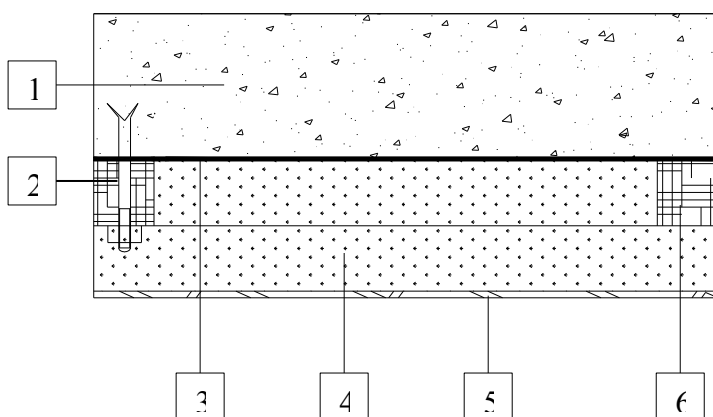
▪ Parois verticales :



- 1 Enduit de revêtement
- 2 Mur support en brique
- 3 Patte de scellement
- 4 Traverse en bois traité
- 5 Isolant en Kapok (2nd couche)
- 6 Bardage intérieur en tôle galvanisé
- 7 Pare vapeur en complexe Aluminium cellulose

Fig.3.4.2: Paroi verticale isolé avec le kapok

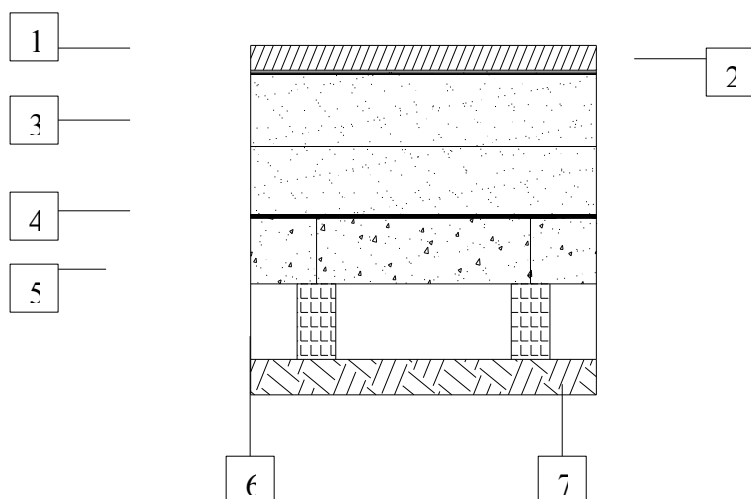
▪ Plafond



- 1 Béton
- 2 Patte de scellement
- 3 Pare vapeur en complexe Aluminium cellulose
- 4 Isolant
- 5 Bardage intérieur en tôle galvanisé
- 6 Solivage en bois traité

Fig.3.4.3:plafond isolé en kapok

▪ Sol



- 1 Chape d'usure
- 2 Papier Kraft
- 3 Isolant en polystyrène (Q5)
- 4 Pare vapeur en bitume fondue
- 5 Béton armé
- 6 Vide sanitaire
- 7 Sol naturel

Fig.3.4.5 Structure de l'isolation du sol

L'isolant en kapok possède les mêmes caractéristiques thermiques que celle en polystyrène, styrofoam,... Le point fort de cet isolant réside surtout dans le fait que le produit de base est un produit en abondance localement.

On aura alors avec le kapok un isolant performant et avec un coût moindre.

L'utilisation de ce matériau comme isolant thermique contribue non seulement à la valorisation des produits locaux mais aussi à l'économie de matières, d'énergies et de devises. De ce fait, par mesure d'économie d'énergie, on peut admettre une déperdition plus réduite que la déperdition optimale donnée avec un isolant de mêmes caractéristiques thermiques.

Pour un isolation en polystyrène, la déperdition optimale est de 9,09 W/m² à 37°C. Par souci d'économie d'énergie, nous admettrons une déperdition de 5W/m².

V.2.2 Calcul d'isolation de chambre froide isolée en kapok.

V.2.2.1 Calculs des épaisseurs de l'isolation

Parois	Isolation	ΔT	Déperdition imposée
Murs : faces NO et NE	kapok	43,123	5 W/m ²
Murs : faces SO et SE	kapok	37	5 W/m ²
Plafond	kapok	43,123	5 W/m ²
Sols	Polystyrène (Q5)	37	9,09 W/m ²

Tableau 3.4.3 ;Données significatives

Caractéristiques des matériaux utilisés :

- Murs : Enduit de revêtement : $e_{end}=0,015$ m
 $\lambda_{end}=1,7$ W/°C

Briques : $e_{br}=0,22$ m
 $\lambda_{br}=0,9$ W/°C

$$\overline{Rm} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{e_{br}}{\lambda_{br}} + \frac{e_{end}}{\lambda_{end}} = 0,3432 [^{\circ}C.m^2/W]$$

- Plafond :

Béton : $e_{bé}=0,1$ m
 $\lambda_{bé}=0,7$ W/m.°C

$$\overline{Rm} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{e_{bé}}{\lambda_{bé}} = 0,215 [^{\circ}C.m^2/W]$$

- Sol

Béton armé : $e_{béa}=0,15$ m
 $\lambda_{béa}=1,2$ W/m.°C

Chape : $e_{ch}=0,05$ m
 $\lambda_{ch}=1,2$ W/m.°C

$$\overline{Rm} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{e_{béa}}{\lambda_{béa}} + \frac{e_{ch}}{\lambda_{ch}} = 0,2566 [^{\circ}C.m^2/W]$$

$$e = \lambda_{is} \left(\frac{\Delta T}{\phi} - \overline{Rm} \right)$$

Soit pour les épaisseurs :

Parois	$Rm [^{\circ}C.m^2/W]$	Epaisseur	Déperdition réelle
Murs : faces NO et NE	0,3432	$e_{k1} = 0,32$ m	$\phi_{k1} = 5$ W/m ²
Murs : faces SO et SE	0,3432	$e_{k2} = 0,27$ m	$\phi_{k2} = 5$ W/m ²
Plafond	0,215	$e_{k3} = 0,32$ m	$\phi_{kp} = 5$ W/m ²
Sols	0,2566	0,141 m ($e_{ns}=0,14$ m)	$\phi_{s.réelle} = 9,15$ W/m ²

Tableau 3.4.4 : Resultats des calculs

V.2.2.2 Calculs des diffusions de vapeur

Le matériau pare vapeur utilisé pour les murs et le plafond, isolés en kapok, est un matériau en feuille composé par un complexe aluminium cellulose : $e=40\mu m$ et $\phi_{mp}=2,3$ µg/m².s (IPVE38)

La diffusion de vapeur à travers la paroi isolante est donnée par :

$$\phi_m = \frac{p_{ve} - p_{vi}}{R_{dis} + R_{dp}} \quad [\mu\text{g}/\text{m}^2.\text{s}]$$

R_{di} et R_{dp} : Résistance à la diffusion de vapeur respectivement de l'isolant et du pare vapeur.

Le kapok est un matériau fibreux. Le tableau 1.3.1 indique que ces matériaux sont surtout marqués par leurs grandes perméabilités à la vapeur ou une résistance à la diffusion négligeable. D'où le flux de vapeur entrant dans la chambre froide est le flux que laisse passer le matériau pare vapeur.

$$\phi_m = 2.3 \mu\text{g}/\text{m}^2.\text{s}$$

V.2.2.3 Durée de vie de l'isolation en kapok pour la chambre froide

Nous avons vu dans la partie II concernant les propriétés et caractéristiques de l'isolant que sa conductivité thermique équivalente varie avec la masse d'eau fixée lors de l'adsorption d'eau (cf. figure 1.3.2).

Dans les calculs d'épaisseur de l'isolant, nous avons fixé la déperdition à $5 \text{ W}/\text{m}^2$. L'objectif étant de réduire les dépenses énergétiques, pour calculer la durée de vie de l'isolation en kapok, nous considérerons comme acceptable une déperdition restant en dessous de la déperdition optimale ($9,09 \text{ W}/\text{m}^2$ pour le polystyrène placé dans les mêmes conditions). La déperdition limite de l'isolation sera fixée à $10 \text{ W}/\text{m}^2$.

Soit initialement $\phi_0 = 5 \text{ W}/\text{m}^2$ avec une conductivité λ_0 de l'isolant et après adsorption d'une masse limite « m_l » d'eau $\phi_l = 10 \text{ W}/\text{m}^2$ et une conductivité thermique $\lambda_{is} = \lambda_l$ de l'isolant.

$$\phi_0 = \frac{\Delta T}{\frac{e_s}{\lambda_0} + Rm} \quad \text{et} \quad \phi_l = \frac{\Delta T}{\frac{e_s}{\lambda_l} + Rm}$$

On sait que

$$\frac{\phi_l}{\phi_0} = \frac{\lambda_l (e_s + Rm \lambda_0)}{\lambda_0 (e_s + Rm \lambda_l)} = \frac{10 [\text{W}/\text{m}^2]}{5 [\text{W}/\text{m}^2]} = 2$$

soit

Les termes $Rm \cdot \lambda_0$ et $Rm \cdot \lambda_l$ sont négligeables devant e_s .

$$\frac{\phi_l}{\phi_0} = \frac{\lambda_l}{\lambda_0} = 2$$

D'où

Le polystyrène et le kapok possèdent environ les mêmes conductivités thermiques et les mêmes masses volumiques. Pour le polystyrène une fixation d'eau relative de 0,45 {4} donne

$$\frac{\lambda_l}{\lambda_0} = 2 \quad \text{nous admettrons cette valeur pour le kapok}$$

$$x_l = \frac{m_l}{m_i} = 0,45$$

x_l est la fixation d'eau relative limite pour que l'isolation atteigne une déperdition de $10 \text{ W}/\text{m}^2$.

m_l : la masse d'eau limite fixée sur la masse m_i d'isolant

Pour la face isolée avec une épaisseur de 0,32 m, la masse de la surface unité est de $m_{ui} = \phi \cdot v = \phi \cdot e \cdot s = 16.0,32.1 = 5,32 \text{ kg}/\text{m}^2$

La masse d'eau admissible par m^2 d'isolation est alors donnée par

$$m_l = x_l \cdot m_{ui} = 0,45 \cdot 5,32 = 2,394 \text{ kg}/\text{m}^2$$

Avec un flux de vapeur de $2,3 \mu\text{g}/\text{m}^2.\text{s} = 19.10^{-5} \text{ kg}/\text{m}^2.\text{jours}$ (pare vapeur complexe aluminium-bitume)

La valeur de l'humidité admissible est atteinte dans t jours telle que

$$t = \frac{m_i}{\phi_m} = \frac{2,394 \text{ kg/m}^2}{19 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{jour}} = 12.600 \text{ jours} = 34,5 \text{ années}$$

V.2.2.4 Calcul de charge admissible pour le sol

La résistance à la compression de l'isolant utilisé pour le sol est de $R_c = 150 \text{ kPa} = 150 \cdot 10^3 \text{ N/m}^2$ (polystyrène de qualité (Q5))

La contrainte de compression est donnée par :

$$\sigma_c = \frac{F}{A} = \frac{\sum_i m_i \cdot g}{A} \quad \text{où } g \text{ est l'attraction de la pesanteur}$$

La force F ne s'applique qu'à la partie chargée du sol. Le coefficient d'occupation du sol $\gamma = 75 \%$. La contrainte de compression devient

$$\sigma_c = \frac{\sum_i m_i \cdot g}{0,75 \cdot A_{\text{sol}}}$$

La charge appliquée à l'isolation du sol occasionnée par l'entreposage des denrées est de

$$\sigma_d = \frac{m_d \cdot g}{0,75 \cdot A_{\text{sol}}}$$

En considérant la charge occasionnée par le revêtement (la chape d'usure) :

$$e_{\text{ch}} = 0,05 \text{ m}$$

$$A_{\text{ch}} = A_{\text{sol}} = 100 \text{ m}^2$$

$$\rho_{\text{ch}} = 2100 \text{ kg/m}^3$$

La charge due au revêtement est alors :

$$\sigma_{\text{ch}} = \frac{(\rho_{\text{ch}} \cdot A_{\text{ch}} \cdot e_{\text{ch}}) \cdot g}{A_{\text{sol}}} \quad [\text{N/m}^2]$$

La charge maximale appliquée à l'isolation par surface unité est donc donnée par :

$$\tau = \sigma_d + \sigma_{\text{ch}} = \frac{m_d \cdot g}{0,75 \cdot A_{\text{sol}}} + \rho_{\text{ch}} \cdot e_{\text{ch}} \cdot g \leq R_c$$

$$m_d < \frac{(R_c - \rho_{\text{ch}} \cdot e_{\text{ch}} \cdot g) \cdot (0,75 \cdot A_{\text{sol}})}{g}$$

$$m_d < 1.140.084 \text{ kg}$$

Pour un coefficient d'occupation du sol de 75%, l'isolation du sol peut supporter un volume de denrée pesant moins de 1.140 tonnes. Pour un coefficient de sécurité de 1,5 la charge maximale admissible est de 760 tonnes.

V.2.3 Calculs économiques

Coût de l'isolation

Coût de l'isolant :

Le coût total de l'isolation est donné par :

$$C_{\text{ist}} = \text{Cum}_k \cdot (e_{k1} \cdot S_1 + e_{k2} \cdot S_2 + e_{kp} \cdot S_p) + \text{Cum}_2 \cdot e_{ns} \cdot S_s$$

$$C_{\text{ist}} = 480.000(0,32 \cdot 120 + 0,27 \cdot 120 + 0,32 \cdot 100) + (5 \cdot 10^6 \cdot 0,14 \cdot 100)$$

$$C_{\text{ist}} = 119.344.000 \text{ Fmg ou } 23.868.800 \text{ Ar}$$

$$C_{\text{is}_a} = \frac{C_{\text{ist}}}{m}$$

Pour une durée de vie de 15 ans le coût annuelle de l'isolation

$$C_{is_a} = 7.956.266,66 \text{ Fmg/an ou } 1.591.253,33 \text{ Ar/an}$$

Coût de la déperdition :

Le coût annuelle de la déperdition est définie par :

$$C_{d_a} = \frac{\varphi_{réel} \cdot \Delta t \cdot S \cdot C_e \cdot 10^{-3}}{COP} \quad \text{où } \Delta t = 24 \times 365 h / \text{an}$$

$$C_{d_a} = \frac{\Delta T \cdot C_e \cdot 10^{-3}}{COP} (\varphi_{k1} \cdot S_1 + \varphi_{k2} \cdot S_2 + \varphi_{kp} \cdot S_p + \varphi_{s,réelle} \cdot S_s)$$

d'où le coût total de la déperdition :

$$C_{d_a} = 14.228.793,89 \text{ fmg/an ou } 2845.758 \text{ Ar/an}$$

Dépense annuelle totale

$$D_a = C_{is} + C_d$$

$$D_a = 22.185.060,56 \text{ fmg/an ou } 4.437.012 \text{ Ar/an}$$

V.3 Comparaison des résultats

Pour pouvoir mieux comparer les résultats, les conditions restent les mêmes tant pour la chambre froide isolée en polyuréthane que pour celle isolée en kapok. La comparaison des résultats peut être faite à l'aide du tableau suivant :

	Chambre froide isolée en polyuréthane	Chambre froide isolée en kapok
Surface totale isolée	440 m ²	440 m ²
Déperdition moyenne	11,41 W/m ²	5,94 W/m ²
Coût total annuel de la déperdition	27.698.718 fmg / an ou 5.539.744 Ar / an	14.228.793,89 fmg / an ou 2.848.758 Ar / an
Dépense annuelle pour l'isolation	25.066.666 fmg / an ou 5.013.333 Ar / an	7.956.266,66 fmg / an ou 1.591.253 Ar / an
Coût total annuel	52.765.385,45 fmg / an ou 10.553.077 Ar / an	22.185.060,56 fmg / an ou 4.437.012 Ar / an

Tableau 3.4.5 : Tableau comparatif des résultats économiques

En comparant ces résultats, on constate qu' en matière de dépense énergétique, l'isolation en kapok a pu faire une économie de 2.693.985 Ar / an (13.469.625 fmg/an). Soit une diminution en consommation d'énergie de la machine frigorifique de **8.163,6 kWh / an.**

Concernant le coût de l'isolation, un gain économique de 3.422.080 Ar (17.110.400 fmg) peut être obtenu avec un isolation en kapok.

L'écart total des coûts occasionnés par les deux types d'isolations s'élève à 91.740.978 Ar / an (458.704.875 fmg / an)

Comme nous l'avons mentionné, l'objectif de l'étude d'isolation se rapporte sur son efficacité et son coût. On peut affirmer alors que ces impératifs généraux sont atteints dans le cas d'utilisation du kapok comme isolant dans le domaine frigorifique.

De plus, nous savons que le coût de l'énergie ne cesse de progresser partout dans le monde. On cherche actuellement par tous les moyens de réduire les dépenses énergétiques. La valorisation et l'exploitation du kapok afin d'être utilisé comme isolant thermique et frigorifique peuvent aboutir à des fins très recherchés à savoir :

- ✓ l'économie d'énergie
- ✓ l'économie de matière
- ✓ l'économie de devise

Chapitre VI : ISOLATION COMPOSITE

Nous avons vu dans les chapitres précédents que pour certains isolants qui ont un coefficient de conductivité thermique élevé, les calculs ont tendance à donner des épaisseurs excessives. Il en est de même pour les valeurs données par les calculs optimaux pour les isolants de bon marché. Une isolation en balle de riz avec un flux de $6 \text{ [W/m}^2\text{]}$ et un écart de température de 47°C (congélation) donne une épaisseur de $0,78 \text{ m}$. A cette épaisseur s'ajoute celle des murs porteur et celle du revêtement. Finalement, on aboutit à une valeur au environ de 1 m pour l'épaisseur totale de la paroi.

L'étude de ce problème faisant partie de notre objectif, nous proposons la solution suivante pour mieux exploiter ces ressources matérielles dont fait partie la balle de riz.

La balle de riz est un isolant de bon marché, les calculs optimaux tendent à diminuer au maximum la déperdition car l'isolant n'est pas cher. Cependant, une épaisseur d'isolant montant à plus de 1m est assez encombrant surtout pour une petite ou moyenne chambre froide. Le problème de la mise en œuvre de l'isolation survient aussi pour une isolation d'épaisseur trop élevée.

On propose alors de concevoir une isolation composée de deux isolants différents pour résoudre ce problème. La couche isolante en balle de riz sera accouplée avec une autre couche d'isolant qui devrait être plus performante que la première du point de vue résistance thermique.

Pour cette solution l'isolation en balle de riz permet de réduire l'épaisseur que l'on doit attribuer à l'autre isolant pour aboutir à une limitation acceptable du flux thermique. L'isolation en balle de riz, ayant un prix peu élevé, apporte à l'isolation son avantage de donner une bonne rentabilité économique. L'autre isolant plus performant apportera ses performances techniques. L'accouplement de ces deux types d'isolant peut résoudre deux problèmes.

- En employant singulièrement l'isolant plus performant qui est généralement plus cher, les calculs optimaux donnent des épaisseurs très réduites pour diminuer le coût de l'isolation et par la suite on est confronté à une hausse de la déperdition. Ce fait est évité par le couplage de l'isolant avec un isolant de bon marché en gardant l'épaisseur optimale du premier.
- Cette solution résout aussi le problème de l'encombrement que présente la balle de riz utilisée comme seul élément isolant de l'isolation thermique qui verra son épaisseur diminuée face à l'utilisation en parallèle d'un isolant performant.

Nous avons choisi alors comme isolant, pouvant être accouplé avec l'isolation en balle de riz le KAPOK qui est un matériau d'isolation thermique et donnant des performances très intéressantes. L'isolation en kapok possède aussi l'avantage d'être moins cher que les isolants de mêmes performances tel que le polystyrène.

VI.1 Proposition de méthode de dimensionnement de l'isolation composite.

L'exemple que nous allons prendre est une isolation formée par le couple d'isolant « balle de riz- kapok ». Nous tenons à signaler tout de même que la méthode de calcul reste valable pour tous les calculs d'isolation composite avec d'autres isolants en cas de besoin.

Pour se procéder au calcul nous nous placerons dans les conditions suivantes :

- La déperdition unitaire est fixée à $\phi = \phi_f$
- L'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur est $T_e - T_i = \Delta T$
- La résistance thermique totale de la paroi (résistances surfaciques comprises) est R_m

En supposant l'isolation est entièrement en balle de riz :

$$\varphi = \frac{\Delta T}{\frac{e_{br0}}{\lambda_{br}} + Rm} \text{ et } e_{br0} = \lambda_{br} \cdot \left(\frac{\Delta T}{\varphi} - Rm \right) \quad (\text{III.18})$$

e_{br0} : épaisseur de l'isolation en balle de riz pour une isolation simple.

λ_{br0} : Conductivité thermique de l'isolation en balle de riz.

Isolation entièrement en kapok :

$$\varphi = \frac{\Delta T}{\frac{e_{k0}}{\lambda_k} + Rm} \text{ et } e_{k0} = \lambda_k \cdot \left(\frac{\Delta T}{\varphi} - Rm \right) \quad (\text{III.19})$$

e_{k0} : épaisseur de l'isolation en kapok pour une isolation simple.

λ_{k0} : Conductivité thermique de l'isolation en kapok.

Pour l'isolation composite :

$$\varphi = \frac{\Delta T}{\frac{e_k}{\lambda_k} + \frac{e_{br}}{\lambda_{br}} + Rm} \quad (\text{III.20})$$

Notre objectif étant de réduire e_{br0} à l'aide de e_{k0} (réduction de l'encombrement de l'isolation) ou de réduire e_{k0} à l'aide e_{br0} (réduction du coût de l'isolation) en gardant le flux thermique imposé. L'épaisseur limite acceptable de la paroi sera donnée par « e_l »

De (III.20) on trouve :

$$\begin{aligned} e_k &= \lambda_k \cdot \left[\frac{\Delta T}{\varphi} - \left(\frac{e_{br}}{\lambda_{br}} \right) - Rm \right] \\ e_k &= \lambda_k \cdot \left[\frac{\Delta T}{\varphi} - \left(\frac{e_{br}}{\lambda_{br}} \right) + \underbrace{\left(\frac{e_k}{\lambda_{br}} - \frac{e_k}{\lambda_{br}} \right)}_{\text{Terme nulle}} - Rm \right] \\ e_k &= \lambda_k \cdot \left[\frac{\Delta T}{\varphi} - \left(\frac{e_{br} + e_k}{\lambda_{br}} \right) - Rm + \left(\frac{e_k}{\lambda_{br}} \right) \right] \\ e_k &= \lambda_k \cdot \left[\frac{\Delta T}{\varphi} - \left(\frac{e_{br} + e_k}{\lambda_{br}} \right) - Rm \right] + \left(\frac{\lambda_k}{\lambda_{br}} \right) e_k \\ e_k \cdot \left(1 - \frac{\lambda_k}{\lambda_{br}} \right) &= \lambda_k \cdot \left[\frac{\Delta T}{\varphi} - \left(\frac{e_{br} + e_k}{\lambda_{br}} \right) - Rm \right] \\ e_k \cdot \left(1 - \frac{\lambda_k}{\lambda_{br}} \right) &= \frac{\lambda_k}{\left(1 - \frac{\lambda_k}{\lambda_{br}} \right)} \cdot \left[\frac{\Delta T}{\varphi} - \left(\frac{e_{br} + e_k}{\lambda_{br}} \right) - Rm \right] \\ e_k \cdot \left(\frac{\lambda_k \cdot \lambda_{br}}{\lambda_{br} - \lambda_k} \right) &= \left(\frac{\Delta T}{\varphi} - \left(\frac{e_{br} + e_k}{\lambda_{br}} \right) - Rm \right) \end{aligned}$$

avec $e_k + e_{br} = e_l$

$$e_k \cdot \left(\frac{\lambda_k \cdot \lambda_{br}}{\lambda_{br} - \lambda_k} \right) = \left(\frac{\Delta T}{\varphi} - \left(\frac{e_l}{\lambda_{br}} \right) - Rm \right) \quad (\text{III.21})$$

En fixant la limite de l'épaisseur de l'isolation, on peut obtenir à partir de la formule (III.21) la valeur de e_k . La valeur de e_{br} sera donnée par la relation $e_{br} = e_l - e_k$ (III.22)

La résolution de l'équation (III.21) peut aussi se faire graphiquement en utilisant les courbes de la figure (3.4.6) correspondant au flux imposé. Tous couples de valeur $s(e_k, e_l)$ d' une courbe bien déterminée donne le flux correspondant.

La figure (3.4.6) montre bien que, pour garder le flux imposé, la limite e_l devrait être comprise dans la plage $e_{k0} < e_l < e_{br0}$ pour avoir une épaisseur positive de chacun des isolants.

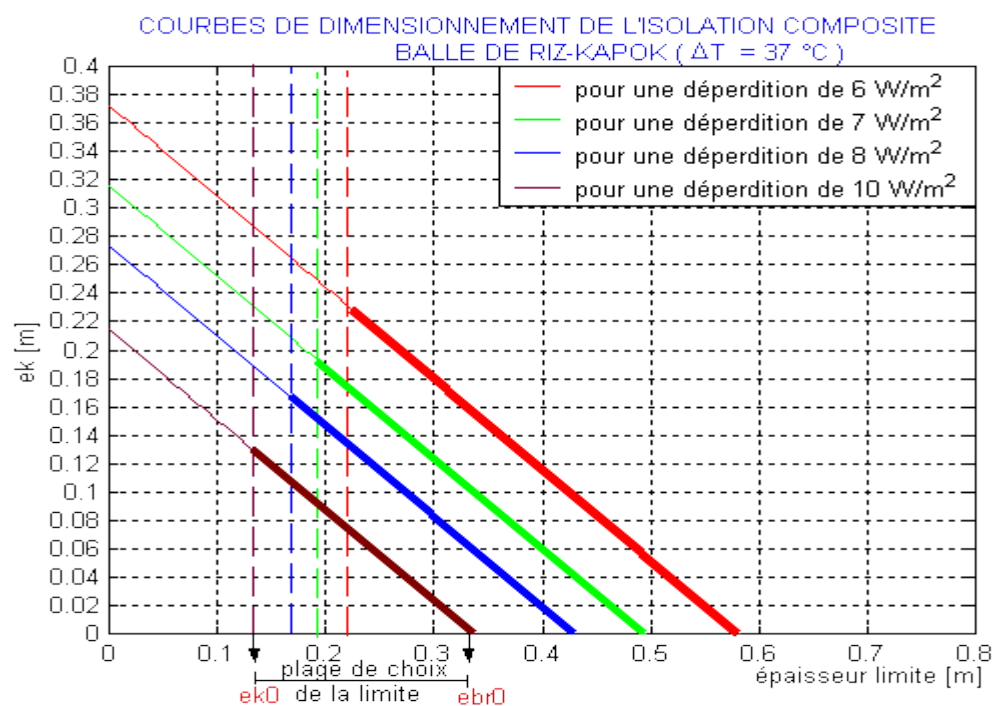


Fig.(3.4.6) : Courbes de dimensionnement de l'isolation composite.

VI.2 RECOMMANDATIONS

La fixation de la limite « e_l » dépend de la nécessité d'emploi de l'isolation composite. Deux possibilités peuvent conduire à l'utilisation d'une telle isolation.

Il existe le cas où on a projeté de faire l'isolation en balle de riz mais pour avoir la déperdition imposé il faut une épaisseur excessive de la couche isolant. Dans ce cas, la nécessité est de réduire l'épaisseur. Il est alors recommandé d'imposer une limite e_l la plus proche possible de e_{k0} afin d'augmenter l'épaisseur de la couche de kapok et automatiquement réduire l'épaisseur totale de l'isolation.

Dans d'autre cas, le projet est d'isoler la chambre avec un isolant performant (ici le kapok) mais le coût de l'isolation est élevé et on a besoin de réduire ce coût. Dans ces cas, la nécessité de l'adoption de l'isolation composite est de réduire le coût. Il est à conseiller de donner à l'isolation une épaisseur plus élevée en balle de riz et imposer donc une limite e_l le plus proche de e_{br0} tout en gardant la déperdition fixée initialement. Le coût total de l'isolation serait forcément réduit.

PARTIE IV

CONCEPTION DU LOGICIEL
FRISOL 1.0

IV.1 Présentation du logiciel

On a conçu techniquement le logiciel « FRISOL » à partir des définitions et spécifications des besoins pour l'isolation convenable de chambre froide.

Les théories ou les formulations théoriques nécessaires seraient codées et mises au point après certaines études pratiques.

FRISOL a été conçu pour faciliter et surtout pour donner des résultats fiables et optimaux au calcul d'isolation. Il offre aux utilisateurs la possibilité d'insérer dans les calculs tous les paramètres nécessaires aux dimensionnements d'une isolation frigorifique.

Ce logiciel incorpore non seulement les recommandations requises pour l'optimisation de l'isolation d'une chambre froide mais il nous donne aussi la possibilité de procéder par d'autres méthodes de calcul afin de pouvoir évaluer directement les différences du point de vue technique et économique.

IV.2 La base de données

La base de données de FRISOL inclut des champs permettant d'acquérir des valeurs directement applicables dans les calculs selon les spécifications. Les éléments contenus dans la base de données (lieux, matériaux de constructions, matériaux isolants, matériaux pare vapeurs, etc. ...) sont liés à des valeurs prédéfinies facilitant les paramétrages des calculs pour l'utilisateur. Les matériaux locaux étudiés et proposés se figureront dans la base de données avec les différentes caractéristiques nécessaires.

Les éléments contenus dans la base de données seront proposés dans des listes consultées au niveau des feuilles correspondantes.

IV.3 Corps du logiciel

Le logiciel a été codé avec VISUAL BASIC 6.0. Il est conçu pour être facile à employer par l'utilisation des interfaces graphiques. FRISOL est compatible avec tous systèmes utilisant Microsoft Windows comme système d'exploitation.

Chaque fenêtre de communication comporte un menu « guide utilisateur ou aide » et d'un menu principal facilitant et rendant plus rapide les opérations.

Tous les paramètres de saisies et différentes informations requis seront affectés à des espaces mémoires après validation afin d'être appliqués dans les calculs.

Les résultats seront affichés dans une feuille reflétant le bilan de calcul avec les observations, remarques et conseils que FRISOL peut fournir à propos des valeurs obtenues.

Toutes les parois de la chambre seront calculées et dimensionnées séparément en fonction des contraintes physiques et thermiques les différenciant.

Les organigrammes de calcul seront consultés aux annexes.

IV.4 Mode d'utilisation et interfaces utilisateurs.

Plus d'une dizaine d'interfaces peut apparaître successivement sur l'écran, selon le type de construction, la méthode de calcul adoptée ou le type d'isolation, incorporant les fenêtres d'informations et celles des résultats de calculs. Toutes fausses manipulations seront signalées par des messages.

Après lancement du logiciel s'apparaît la page d'accueil.



Fig.4.4.1 : Page d'accueil de FRISOL

La page suivante sera attribuée à la définition des données climatiques et des dispositions des différentes parois.

2

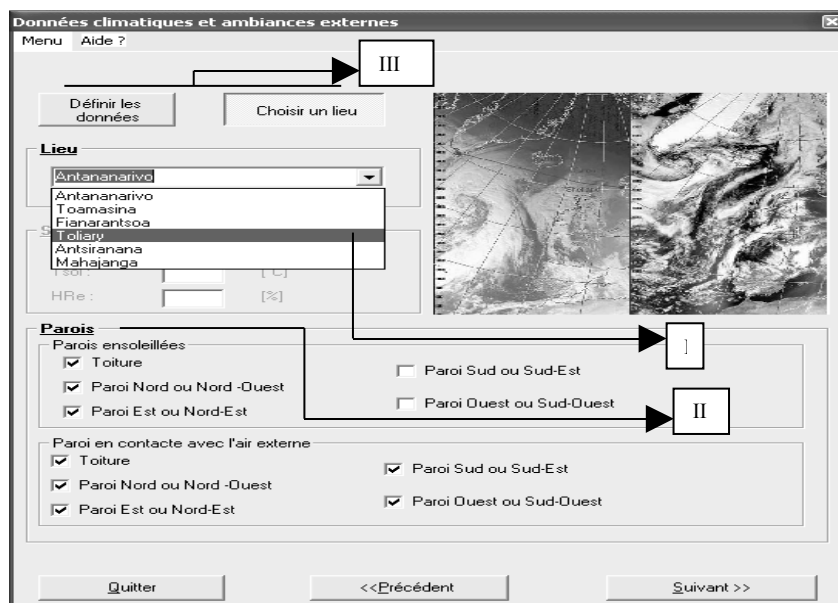


Fig. 4.4.2 : Interface de définition des données climatiques

- I- Choix d'un lieu incorporé dans la base de données comportant les six provinces de Madagascar et les données climatiques respectives
- II- Définition de la disposition de chaque paroi : ensoleillé ou non ensoleillé, en contact avec l'air extérieur ou non.
- III- Bouton optionnel pour le choix de la définition des données climatiques : Utiliser les données existantes ou définir ses données soit même.

La page suivante est faite pour la définition des conditions intérieures de la chambre.

Fig. 4.4.3 : Interface de définition des conditions internes

CHOIX DU TYPE DE CONSTRUCTION ET PARAMETRAGE DE L'ISOLATION

Concernant le choix de type de construction (fig.4.4.4), L'interface recombine le choix du type de construction avec celui des isolants utilisés.

- 1- Bouton optionnel pour le choix du type de construction
- 2- Listes de choix des isolants
- 3- Paramètres à définir si l'isolant utilisé ne figure pas parmi la liste proposée.

λ : Coefficient de conductivité de l'isolant

ϕ : Perméabilité à la vapeur d'eau (mesure normalisée IPVE23)

Rc : Résistance à la compression de l'isolant.

Remarque : Pour la construction modulaire, il n'est pas nécessaire de définir la perméabilité de l'isolant. Dans ce type de construction, le dimensionnement ou le choix de pare vapeur ne s'impose pas.

Touts changement de paramètres doit être validé par la commande « Appliquer » avant de procéder à la page suivante.

CHOIX DU TYPE DE CONSTRUCTION ET PARAMETRAGES DE L'ISOLATION

Menu Aide ?

Construction traditionnelle → 1

Paramètres pour la construction traditionnelle

Choix de l'isolant

Kapok ([0.039 W/m.°C])
 balle de riz ([0.1 W/m.°C])
 Polystyrène expansé Q3 ([0.039 W/m.°C])
 Mousse rigide de Polyuréthane ([0.030 W/m.°C])

φ_i : [] [μg/m².s] → 2

Choix de la pare vapeur

Polyéthylène (300)

Définir

φ : [] [μg/m².s]

Isolation du sol

Polystyrène expansé Q3 ([0.039 W/m.°C])

Définir

λ : [] [W/m.°C]
 φ_i : [] [μg/m².s]
 R_c : [] [kPa]

3

Construction modulaire → 1

Paramètres pour la construction modulaire

Choix de l'isolant

Définir

λ : [] [W/m.°C]

Pare vapeur du sol

Définir

λ : [] [W/m.°C]

Isolation du sol

Définir

λ : [] [W/m.°C]
 φ_i : [] [μg/m².s]
 R_c : [] [kPa]

Quitter Menu <<Précédent Appliquer Suivant>>

Fig. 4.4.4 Interface pour le choix du type de construction et des isolants utilisés

La page suivante détermine le choix des matériaux de construction utilisés et leurs dimensions respectives. La structure de l'isolation du sol est commune pour les deux types de construction tandis que pour l'isolation avec des plaques modulaires la construction en dure est remplacée par des ossatures ne rentrant pas dans les calculs de dimensionnement.

Structure des murs de la construction

Menu Aide ?

Constructions en dures et revêtements

Peroirs verticales

Mur support

Epaisseur : [0.22] [m]

Revêtement des paroirs verticales

Epaisseur : [0.015] [m]

Plafond

Mur porteur

Epaisseur : [0.10] [m]

Revêtement du plafond

carrelage
 enduit de ciment
 toile ondulé galvanisé
 stratifié
 enduit grillagé
 contre plaquet

Structure du sol : Sol sans vide sanitaire

Revêtement du sol

Epaisseur du revêtement : [0.015] [m]

Epaisseur du béton de prédallage : [0.15] [m]

Valider

Quitter Menu <<Précédent Suivant>>

Fig. 4.4.5 : Interface : Choix des matériaux de construction selon le type de construction.

I, II, IV : Choix et saisie des dimensions des matériaux de construction utilisés respectivement pour les murs, plafond et sol.

III- Définition de la structure du sol : avec vide sanitaire ou sans vide sanitaire.

VERIFICATION DES PARAMETRES

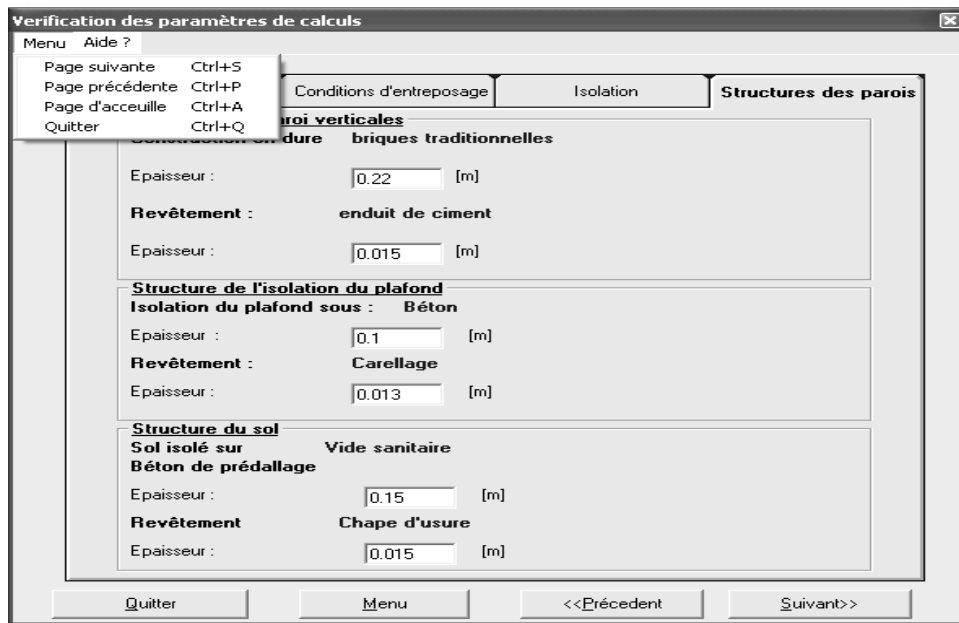


Fig. 4.4.6 : Interface : Vérification des paramètres

La fenêtre des vérifications de paramètres (fig.4.4.6) est insérée pour permettre à l'utilisateur de vérifier les informations saisies, ce sont ces valeurs qui seront utilisées dans les calculs. Ces données seront consultées au niveau des feuilles contenues dans la classe correspondantes.

Toutes les fenêtres sont munies des menus déroulant contenant les commandes qui seront les plus utilisées pour les opérations exécutées avec FRISOL.

CHOIX DE LA METHODE POUR LE CALCUL D'ÉPAISSEUR

Concernant la méthode de calcul, FRISOL propose les trois méthodes de calculs étudiées pour les calculs d'épaisseur de l'isolation. Chacun d'eux requiert des informations supplémentaires qui seront complétées avant de procéder à l'affichage des résultats. Le choix de la méthode devrait être toujours validé après chaque changement.

Le menu « Aide » que comportent tous les interfaces peut fournir des directives sur le mode d'utilisation et les différentes opérations à exécuter pour la page en cours.

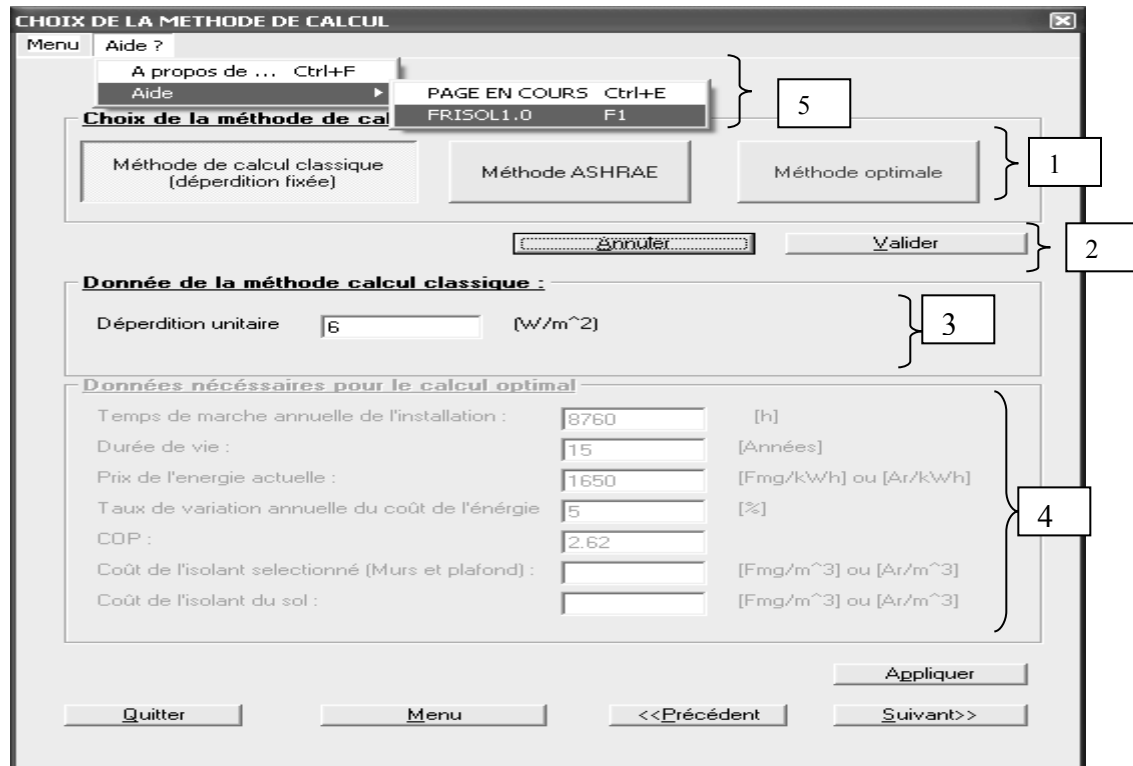


Fig.4.4.7 : Interface : choix de la méthode de calcul

- 1- Bouton optionnel pour le choix de la méthode de calcul adoptée
- 2- Validation ou annulation du choix
- 3- Donnée supplémentaire requise pour l'utilisation des méthodes classiques
- 4- Données supplémentaires requises pour le calcul optimal
- 5- Menu d'aide pour le guide d'utilisation des pages en cours

AFFICHAGE DES RESULTATS

Resultats des calculs

Menu Aide ?

RESULTATS DES CALCULS POUR LA CHAMBRE FROIDE

Type de construction : TRADITIONNELLE

Methode de calcul adoptée : Déperdition fixée

Isolation du sol

Isolant : Polystyrène expansé Q3

Sol avec vide sanitaire

1

Epaisseur de l'isolant : 0.2407275 [m]

Charges appliquées au sol : 1.635 [kPa]

Résistance à la compression de l'isolation du sol : 90 [kPa]

2

Observation

Isolation du sol: compatible

Isolation des parois verticales

Isolant : balle de riz

Disposition de la paroi

Paroi Est ou Nord-Est :	Ensoleillé	et	En contact avec l'air externe
Paroi Nord ou Nord-Ouest :	Ensoleillé	et	En contact avec l'air externe
Paroi Ouest ou Sud-Ouest :	non ensoleillé	et	En contact avec l'air externe
Paroi Sud ou Sud-Est :	non ensoleillé	et	En contact avec l'air externe

Epaisseurs des isolants

Paroi Est ou Nord-Est :	0.70773320261 [m]
Paroi Nord ou Nord-Ouest :	0.70773320261 [m]
Paroi Ouest ou Sud-Ouest :	0.60567320261 [m]
Paroi Sud ou Sud-Est :	0.60567320261 [m]

Flux de vapeur à travers les parois

ΔP_v : 14.3207454555286 [mm de Hg]

Rdis : 8.44561621786492E-04 [m².s.mm de Hg/ μ g]

Rdp : 4.7258064516129 [m².s.mm de Hg/ μ g]

Flux de vapeur : 3.02978692851 [μ g/m².s]

3

flux de vapeur acceptable

4

Isolation du plafond

Isolant : balle de riz

Toiture ensoleillée

Toiture en contact avec l'air externe

Epaisseur de l'isolant : 0.7124028571428 [m]

6

5

Quitter Menu <<Précédent Calculs économiques Isolation Composite

Fig. 4.4.8 : Interface : Affichage des résultats.

Les résultats de calculs sont affichés avec certaines informations utiles pour l'adoption des valeurs. Des observations et remarques sont préconisées pour les valeurs obtenues. Les calculs économiques sont accessibles après acquisition des valeurs économiques demandées par le mode de calcul optimal. Les résultats de chaque mode de calcul seront mémorisés puis appliqués dans les calculs économiques. Les valeurs obtenues seront affichées dans la page correspondante.

Par l'intermédiaire de cette page, une autre alternative proposée par FRISOL est l'isolation composite. Ces programmes ne sont accessibles que si le type de construction adopté est le type traditionnel.

Légende de la figure 4.4.8

- 1- Valeurs obtenues pour les calculs d'isolation du sol.
- 2- Observation pour la compatibilité de l'isolation avec les charges de compression appliquées au sol.
- 3- Valeurs calculées pour les infiltrations de vapeur d'eau à travers les parois.

ΔP_v : Ecart de pression partielle de la vapeur d'eau

Rdis : Résistance à la diffusion de vapeur de l'isolant

Rdp : Résistance à la diffusion de vapeur du matériau pare vapeur.

- 4 - Conclusion pour la valeur du flux massique de la vapeur d'eau.
- 5- Bouton pour l'accès aux calculs d'isolation composite.
- 6- Bouton pour l'accès aux calculs économiques.

CALCUL ECONOMIQUE

METHODE ASHRAE		DEPENSES TOTALES ANNUELLES :	
EPAISSEUR MOYENNE DE L'ISOLATION :	0.6311124 [m]		
DEPERDITION MOYENNE :	6.3296305352382 [W/m ²]	61805	[fmg/m ² ou Ar/m ²]
COÛT DE LA DEPERDITION ANNUELLE :	55073 [fmg/m ² ou Ar/m ²]		
COÛT DE L'ISOLANT :	100978 [fmg/m ² ou Ar/m ²]		

METHODE DE CALCUL CLASSIQUE		DEPENSES TOTALES ANNUELLES :	
EPAISSEUR MOYENNE DE L'ISOLATION :	0.667843133520 [m]		
DEPERDITION MOYENNE :	6 [W/m ²]	59329	[fmg/m ² ou Ar/m ²]
COÛT DE LA DEPERDITION ANNUELLE :	52205 [fmg/m ² ou Ar/m ²]		
COÛT DE L'ISOLANT :	106855 [fmg/m ² ou Ar/m ²]		

CALCUL OPTIMAL		DEPENSES TOTALES ANNUELLES :	
EPAISSEUR MOYENNE DE L'ISOLATION :	1.817984018314 [m]		
DEPERDITION MOYENNE :	2.269652470422 [W/m ²]	39140	[fmg/m ² ou Ar/m ²]
COÛT DE LA DEPERDITION ANNUELLE :	19748 [fmg/m ² ou Ar/m ²]		
COÛT DE L'ISOLANT :	290877 [fmg/m ² ou Ar/m ²]		

Buttons at the bottom: Quitter, Menu, << Précédent

Fig. 4.4.9 : Interface : Calcul économique.

Il est à faire remarquer pour cette page que les coûts affichés seront donnés en « Ar » si tous les coûts saisis dans la page des choix de méthodes sont de tels et respectivement en « fmg » dans le cas inverse.

CALCUL D'ISOLATION COMPOSITE (fig. 4.4.10)

La page de calcul d'isolation composite offre la possibilité de choisir parmi les couples d'isolants existants dans la base de données (1) ou de définir par soi-même les couples d'isolants à utiliser en fournissant leurs caractéristiques thermiques respectives dans (2). Pour garder le flux thermique à la valeur imposée, FRISOL donne une plage de choix pour l'épaisseur totale de la paroi (3) afin de dimensionner l'épaisseur de chaque isolant qui compose l'isolation.

La présence des coûts des isolants (4) est ici facultative mais si ces valeurs sont fournies on peut accéder directement aux résultats de calcul des coûts de l'isolation après dimensionnement.

Fig. 4.4.10 : Interface : Isolation composite

Remarque : Les calculs de l'isolation tiennent compte des paramètres fournis dans les différentes pages d'acquisition de données qu'on a vu au début.

RESULTATS DE CALCUL D'ISOLATION COMPOSITE (fig. 4.4.11)

➤ Paramètres de calcul (1)

Les valeurs affichées sont les paramètres retenus dans les calculs dont les résultats sont en cours d'affichage.

➤ Epaisseur des isolant (2)

Les valeurs des épaisseurs après calculs seront affichées dans (2) pour chaque isolant.

➤ Température de contact (3)

Ces valeurs donnent la température entre deux couches de matériaux différents composant l'isolation. La température de contact 1 indique par exemple la valeur de la température à la face intérieure des murs en briques.

➤ Calculs des coûts (4)

Les coûts affichés sont les coûts par surface unité des isolants en fonction de leur épaisseur respective donnée dans (2).

➤ Figure

La figure apparaît en pressant le bouton figure (ou ALT + F). La figure est formée d'une portion de coupe de l'isolation. Les dimensions de chaque couche sont proportionnelles aux dimensions réelles et à l'encombrement total. La courbe des températures (trait en blanc) est repérée par l'axe vertical (6) donnant les valeurs des températures des différents points de changement d'allure de la courbe et les valeurs extrêmes.

➤ Curseur (7)

Pour procéder de manière continue aux paramétrages des calculs et visualiser instantanément tous les résultats (dimensions, valeurs économiques, courbes des températures), on peut

utiliser le curseur (7) dont la valeur indiquée correspond à la valeur en mm de l'épaisseur totale de la paroi.

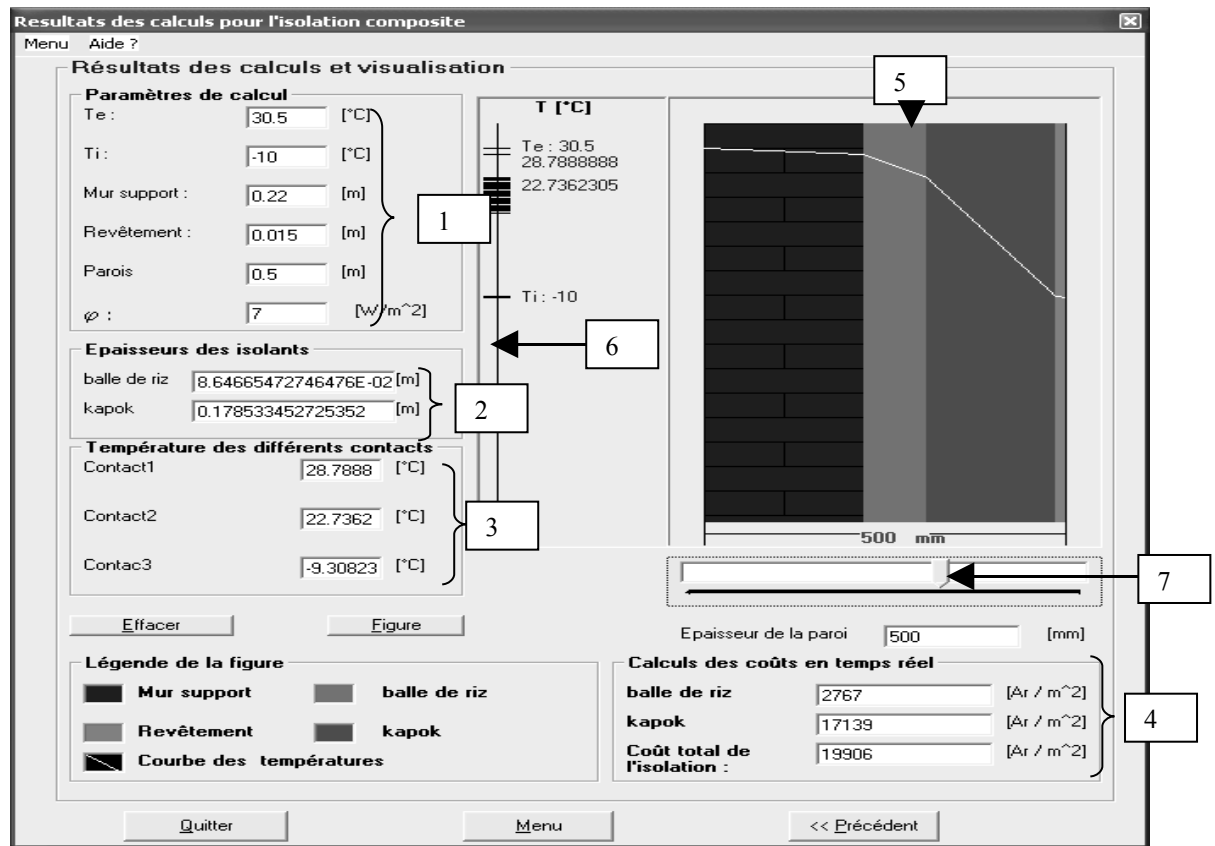


Fig. 4.4.11 : INTERFACE : Résultat de calcul pour l'isolation composite.

Autres possibilités.

En utilisant le curseur (7), on peut arriver à des valeurs de l'épaisseur totale de la paroi annulant l'épaisseur de l'un des isolants. Les valeurs des résultats obtenus dans ce cas sont, dans les conditions imposées, les résultats des calculs si l'isolation est simple.

La page des résultats pour l'isolation composite permet alors de tracer la courbe des températures de toutes les parois de même structure isolée avec n'importe quel isolant.

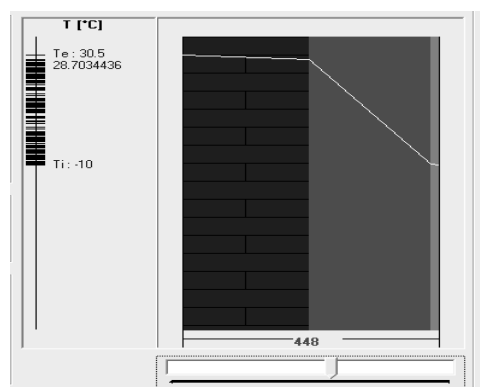


Fig. 4.4.12 : Courbe des températures pour une isolation simple tracée avec la page des résultats de l'isolation composite.

ETUDE D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

La production du froid artificiel

La production de froid représente un enjeu énergétique évident : 10 à 15 % de l'énergie électrique produite dans les pays industrialisés sont consommés pour cet usage. L'utilisation à cette fin des fluides frigorigènes concerne une large diversité de secteurs : bâtiment, transport, industries agro-alimentaire, chimique et mécanique. Les fluides de type CFC (chlorofluorocarbures) et HCFC (hydro chlorofluorocarbures) sont visés par le protocole de Montréal (1987), compte tenu de leur effet destructeur sur la couche d'ozone. Les directives européennes ont imposé un arrêt de production des premiers depuis plusieurs années et imposent une stricte limitation d'utilisation des seconds. Les fluides HFC (hydro fluorocarbures) qui ont remplacé les fluides traditionnels font aussi partie des gaz à effet de serre et sont soumis de ce fait au protocole de Kyoto de 1997.

Précaution à prendre

- Réduire au maximum le nombre de raccord pour diminuer les possibilités de fuite
- Utiliser uniquement des raccords brassés au lieu des raccords à brides, pour réduire au maximum les fuites
- Les composants électrique à étincelle doit être éloigné des zones où il existe des mélanges inflammables
- Récupération et non rejet de fluides dans l'atmosphère, lors des tirages au vide et charge en fluide des installations.
- Capteurs de gaz dans les zones à risque de fuite et zones de travail

L'isolation frigorifique

A l'extérieur pour réduire la libération dans l'atmosphère des gaz CFC et HCFC, l'adoption de nouveaux agents d'expansion (HFC, hydrocarbures, et CO₂) en remplacement des CFC pour la fabrication des mousses isolantes constitue un véritable défi. En ce sens, l'emploi de matériaux isolants « bio », tel que le kapok et la balle de riz, est aussi une opportunité qui mérite d'être étudiée profondément. De plus ces produits font partie des matériaux appelés biodégradables, la promotion de l'utilisation de ces derniers pour les fins indiquées aura sûrement son impact sur la limitation de la fabrication des produits non dégradables.

Environnement socio-économique

Sur ce plan, cet étude peut avoir ses effets positifs sur :

- L'économie de devise

En effet, la promotion d'utilisation des matériaux locaux contribue beaucoup à la limitation des valeurs des biens importés qui coûtent très chères et ne favorisent pas le développement interne.

- L'économie de l'énergie : Plus la peine de dépenser de l'énergie pour la fabrication des mousses synthétiques
- L'exploitation des ressources locales : Une nouvelle opportunité d'exploiter et de valoriser les ressources locales.

CONCLUSION

Au terme de cette étude, nous tenons à rappeler les points suivants :

- L'isolation constitue l'essentielle pour la construction de petites et moyennes chambres froides allant jusqu'à 1000 m³. 25 à 40 % de l'énergie dépensés pour maintenir l'ambiance intérieure d'un enclouement frigorifique sont occasionnés par les déperditions thermiques au niveau des parois isolantes. La conception et la mise en œuvre d'une isolation thermique continue, solide et économique constituent l'enjeu de l'étude.
- La formule des déperditions optimales et les courbes correspondantes sont établies pour donner des directives et faciliter l'optimisation de dimensionnement des parois isolantes. Il en est de même pour les méthodes formulées quant à l'utilisation des autres formules.
- Le problème de l'encombrement pour les isolants de fortes déperditions sera résolu par l'adoption de l'isolation composite en se conformant aux recommandations requises.

L'informatisation de ces méthodes de calculs, permettant ainsi l'accès facile et rapide aux résultats, a pu donner naissance à FRISOL 1.0. Ce logiciel est conçu pour être utilisable au niveau professionnel à cause de ses résultats de calculs, ses directives de mises en œuvre de l'isolation, ses conseils et remarques à propos des valeurs obtenues. Aussi, il a ses cotés didactiques quant à l'étude des phénomènes de transfert thermique au niveau des matériaux solides.

Ainsi l'ouvrage peut servir de référence pour des études similaires.

BIBLIOGRAPHIE

- 1- P.J RAPIN-Installation frigorifique, Tome 1, Edition pyc, 1982,
- 2- P.J RAPIN , P.JACQUARD -Installation frigorifique, Tome 2, Edition pyc, 1992,
- 3- G.BALLOT et DUMINIL- Isolation frigorifique, Edition pyc, 445 p
- 4- P.RAPIN- FORMULAIRE DU FROID 9^{ème} édition , édition DUNOD, Paris, 1985
- 5- Jean François SACADURA-Initiation aux transferts thermiques, Technique et documentation Lavoisier, 1982
- 6- Claude Rougerons-Isolation acoustique et thermique dans le batiment, Edition Eyrolles, Paris editeur, 1977, 305 p
- 7- J.BERNIER-Itinéraire des frigoristes , édition pyc, 203 p
- 8- JG.CONAN-Refrigeration Industrielle, édition eyrolles, 1988, 360 p
- 9- HJ.BREYDERT- Calculs des chambres froides, édition pyc, Paris, 1998, 117 p
- 10- Gervais Dieudonné-Froid industriel, Antananarivo, 1997, 150 p
- 11- KREITH –Transmission de la chaleur, Edition Masson, Paris,1967
- 12- M.Kirstein -Microsoft VISUAL BASIC 6, Collection PC Poche,2003, 510 p
- 13- RANAIVOSON ANDRIAMBALA Hariniaina-Cours technologie du froid année scolaire 2003-2004
- 14- RAKOTOVAO José Denis-Cours Transfert thermique année scolaire 2002-2003
- 15- RANARIJAONA Jean Désiré- Cours Thermodynamique année scolaire 1999-2000
- 16- ANDRIAFIANDRY Zafibiby-Conception de chambre froide, Antananarivo, 2000, 103 p
- 17- RASOLOMAHARO Hery Manantsoa-Etude du comportement thermique des isolants d'origine végétale. Application à l'isolation d'une chambre froide, Antananarivo, 2003, 57 p
- 18- RAKOTO ANDRIAMBALONARIVO Rémi Christian-Optimisation de l'isolation pour la construction d'une chambre froide traditionnelle. Conception d'un véhicule isotherme, Antananarivo, 2000, 90 p
- 19- Site Web WWW.gp3a.auf.org/actes-Yaound%20E9ngayah.ht
- 20- R.GASQUET - Isolations thermique industrielle, Edition DUNOD, Paris, 1966, 146 p
- 21- JE.PAROT. end AUDREY D. Stucks – Thermal Conductivity of solids, Edition PION LIMITED, London, 1975, 157p

ANNEXE I

Rayonnement solaire

- Coefficient d'absorption

$\alpha = 0,5$ pour les surfaces de teinte très claire

$\alpha = 0,7$ pour les surfaces de teinte claire

$\alpha = 0,9$ pour les surfaces sombres

- Elévation de la température des faces ensoleillées

L'élévation de la température est donnée par la formule :

$$\theta = \frac{\alpha}{h_e} \times F_g \quad [^{\circ}\text{C}]$$

α : coefficient d'absorption de la paroi ensoleillée

h_e : coefficient d'échange convectif $[\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}]$

F_g : Flux globale $[\text{W}/\text{m}^2]$

$$F_g = F \cdot \cos(i) \cdot (e^{-k})^M + F_d$$

$\cos(i)$: Cosinus de l'angle d'incidence pour la surface considérée suivant la latitude, l'orientation et l'heure

(e^{-k}) : Coefficient de transparence pour un climat bien déterminé

M : Facteur de correction suivant l'hauteur du soleil

F_d : Flux diffus en $[\text{W}/\text{m}^2]$

F : Flux direct

Température de l'épiderme de la paroi ensoleillée

$$T_{pe} = T_e + \theta$$

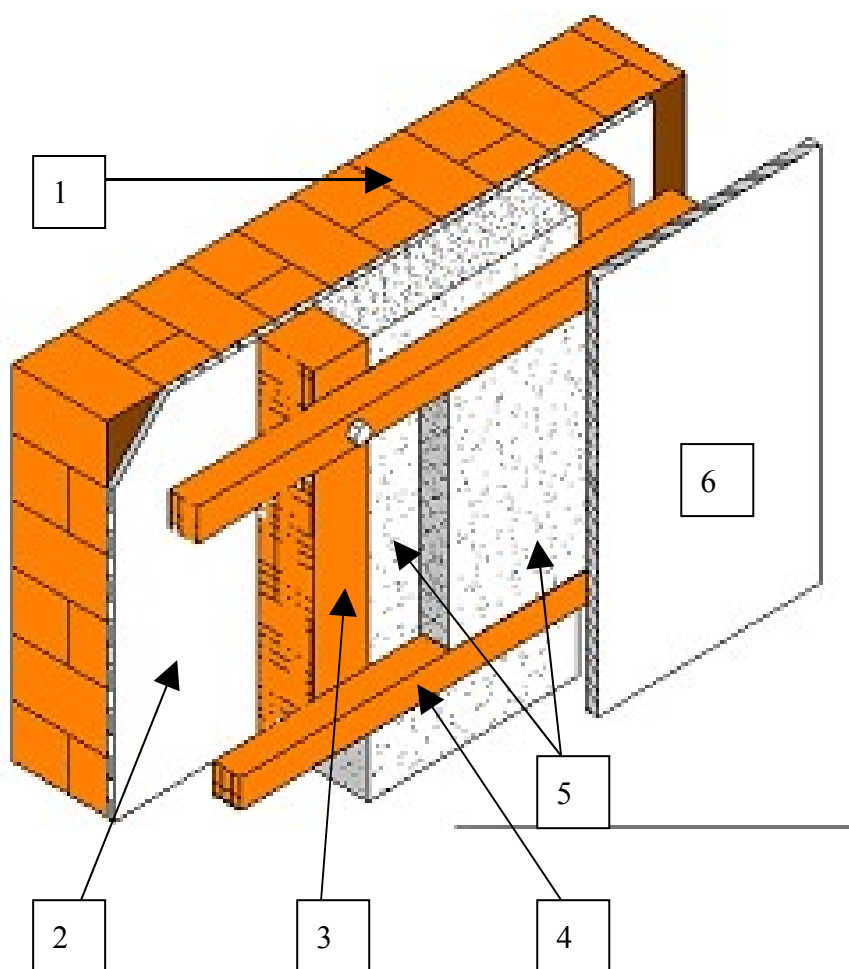
où T_e : température de l'ambiance

Emissivité de différentes corps

Corps noir	1	Peiture à l'huile	0,91	Givre	0,965
Brique	0,92	Sable claire	0,90	Neige	0,985
Bois	0,89	Gazon	0,89	Peau humain	0,995
Verre	0,91	Fourure	0,98	Cuivre poli	0,04
Laine	0,96	Carton	0,99	Aluminium	0,03
caoutchou	0,98	Eau, glace	0,95		

ANNEXE II

PRINCIPES PROPOSES POUR LA MISE EN ŒUVRE DE L'ISOLATION EN KAPOK



- 1- Mur support en briques
- 2- Ecran pare vapeur
- 3- Montant en bois traité
- 4- Traverse en bois traité
- 5- Couches isolantes en kapok
- 6- Revêtement

ANNEXE III**DONNEES CLIMATIQUES ET METEOROLOGIQUE DES
PROVINCES DE MADAGASCAR****Température maximale [°C]**

ANTANANARIVO	28,4
TOAMASINA	30,5
FIANARANTSOA	27
MAHAJANGA	42
TOLIARY	34,8
ANTSIRANANA	28,4

Température du sol [°C]

ANTANANARIVO	37,6
TOAMASINA	39
FIANARANTSOA	38
MAHAJANGA	33
TOLIARY	41,4
ANTSIRANANA	37,6

Hygrometrie [%]

ANTANANARIVO	83
TOAMASINA	86
FIANARANTSOA	86
MAHAJANGA	82
TOLIARY	80
ANTSIRANANA	83

**CONDUCTIVITES THERMIQUES DES PLAQUES ISOLANTES PREFABRIQUES
[W/m.°C]**

Polystyrène extrudé STYRODUR	0,029
Polystyrène expansé Q3	0,039
Mousse de Polyuréthane	0,030
Fibre de verre	0,031
Laine de verre	0,036
Laine de roche	0,055
Liège expansée pur	0,043

ANNEXES IV

CONDUCTIVITES THERMIQUES DES MATERIAUX DE CONSTRUCTIONS [W/m.°C]

Briques traditionnelles	0,9
Briques creuses	0,8
Béton	0,7
Enduit de ciment	1,7
Tôles ondulées galvanisées	230
Stratifiés	3,5
Enduit grillagés	1,7
Contre plaqués	0,15
Carellage	3,5
Chape	1,2
Pavetage	1,2

FICHE TECHNIQUE DES MATERIAUX ISOLANTS

(Date) -----

Fiche technique N°

Concernant le (nom commercial, le type, N° de référence du produit)

Isolant (1)	Fabricant ou distributeur
Nature de la matrice (2)	

Identification

- Présentation (3)
- Couleur
- Temps normal de stabilisation en usine
- Format (+ Tolérance dimensionnelle) (4)
- Epaisseur (+ Tolérance dimensionnelle)

Précaution de stockage :

Caractéristiques :

- **Masse volumique :**
- **Conductivité thermique :** (+ éventuelle courbes d'évolution en fonction de la température)
- **Chaleur massique :**
- **Dilatation linéique :**
- **Perméabilité à la vapeur d'eau**
- **Résistance à la compression** (+ éventuel tableau de déformation en fonction des contraintes)
- **Température limite d'emploi** (5)
- **Réaction au feu :**

Emballage :

Renseignements complémentaires

- Nature clinique
- Résistance aux microorganismes
- Résistance aux insectes et rongeurs
- Perméabilité au O₂ et CO₂
- Tenue aux agents chimiques
- Autres résistances mécaniques

(1) : Famille de l'isolant : minéral, végétal, synthétique, ...

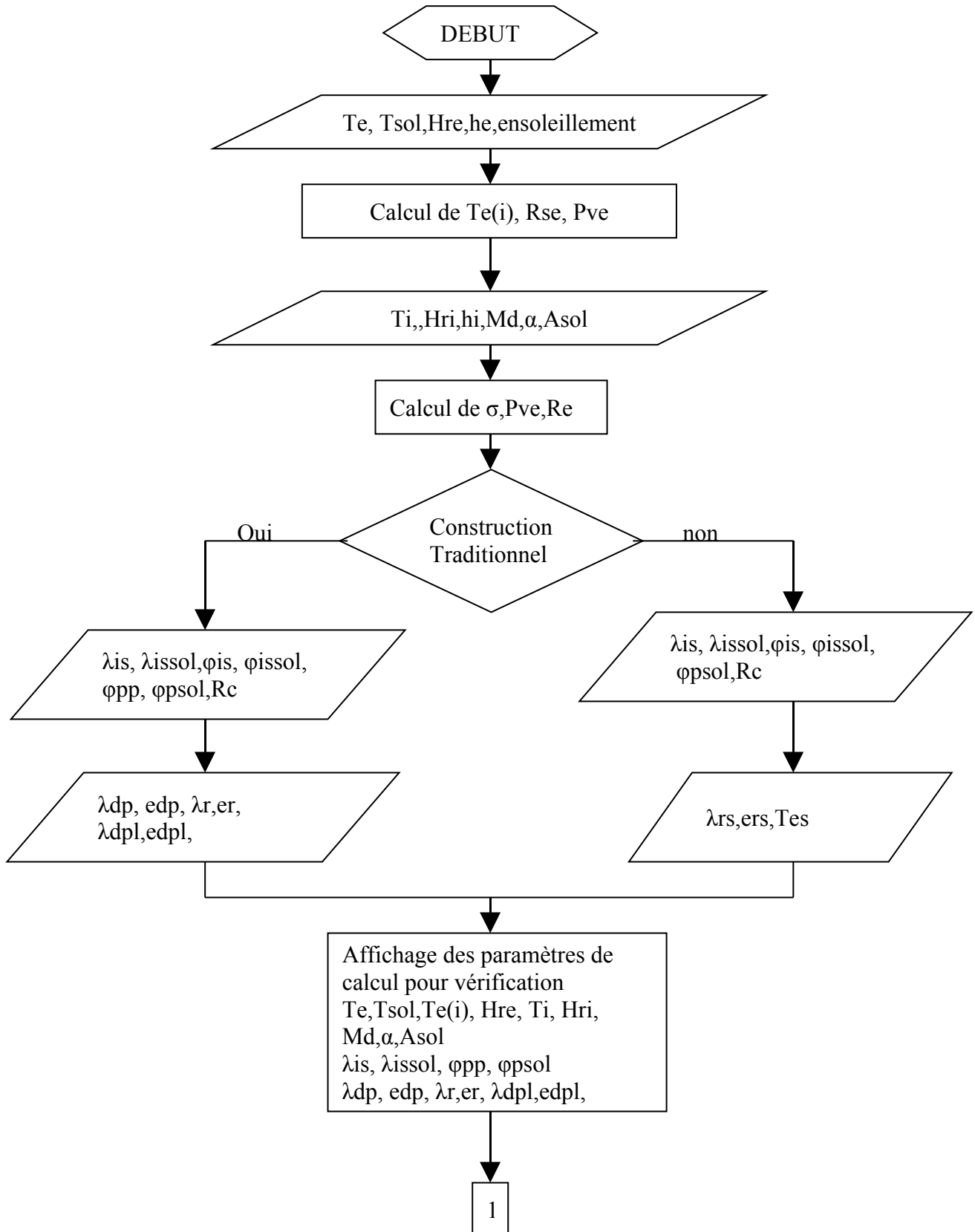
(2) : Nature de la matrice : liège expansé pur, polystyrène, ...

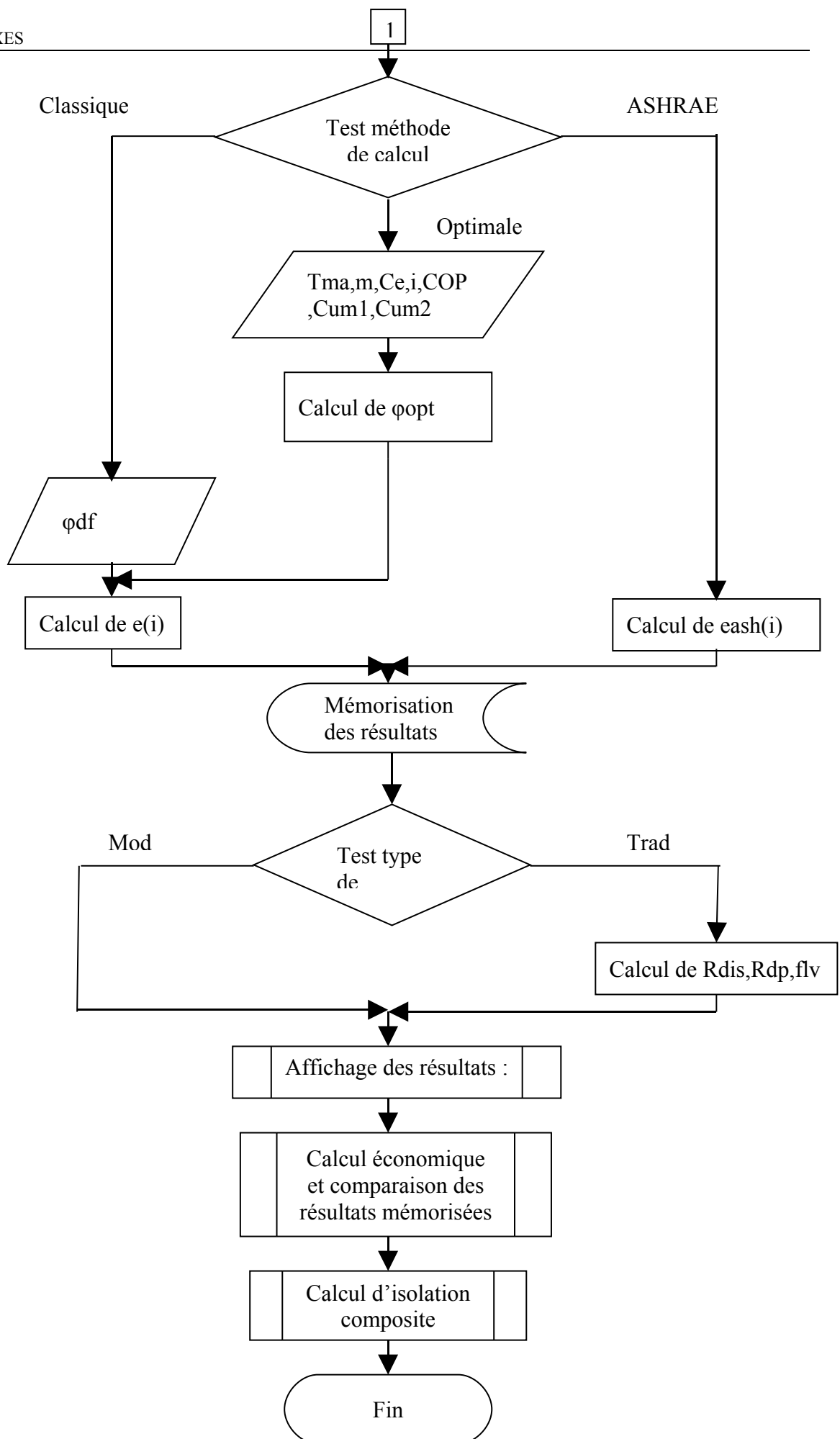
(3) : Panneaux, coquille,...

(4) : Longueur, Largeur, ϕ si en coquilles,...

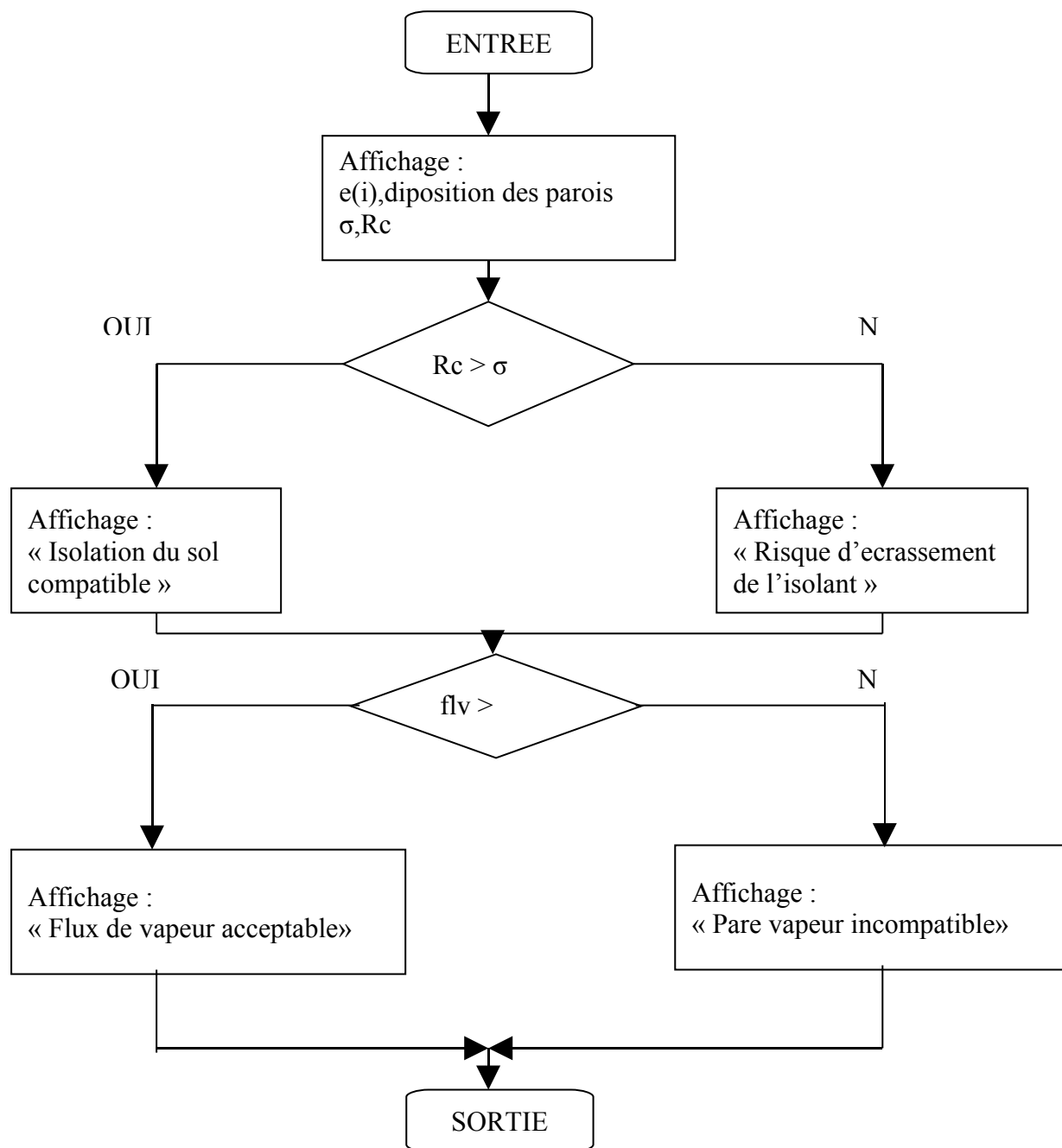
(5) : Plage de température d'utilisation (quelques fois seulement la température haute est précisée)

ORGANIGRAMME

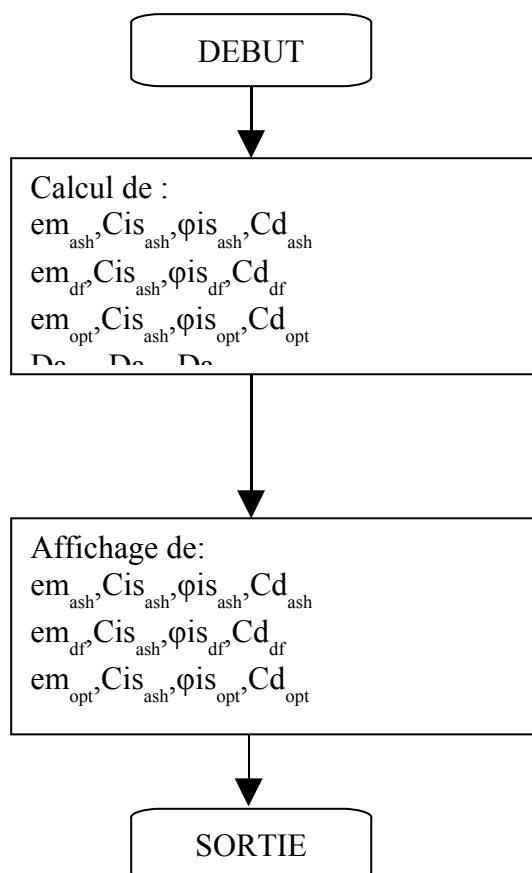




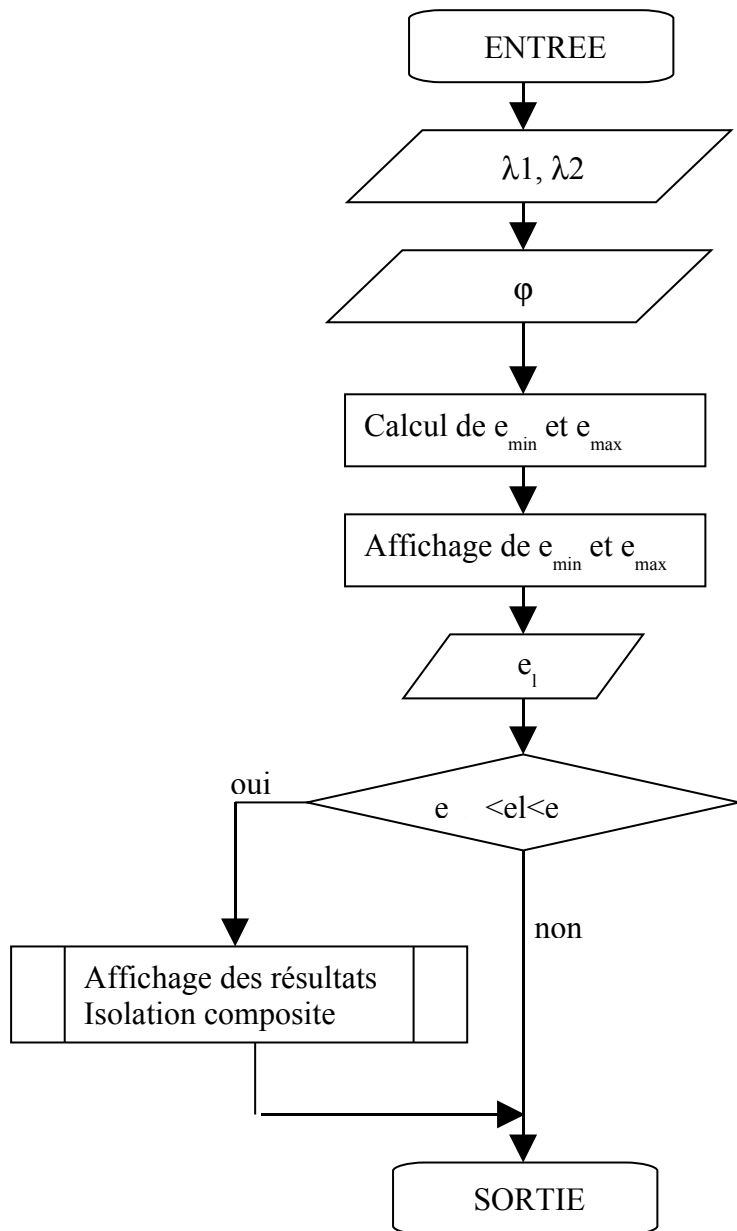
ORGANIGRAMME D’AFFICHAGE DE RESULTATS



ORGANIGRAMME DE CALCUL ECONOMIQUE



ORGANIGRAMME DE CALCULS D'ISOLATION COMPOSITE



ORGANIGRAMME POUR L’AFFICHAGE DES RESULTATS DE L’ISOLATION COMPOSITE

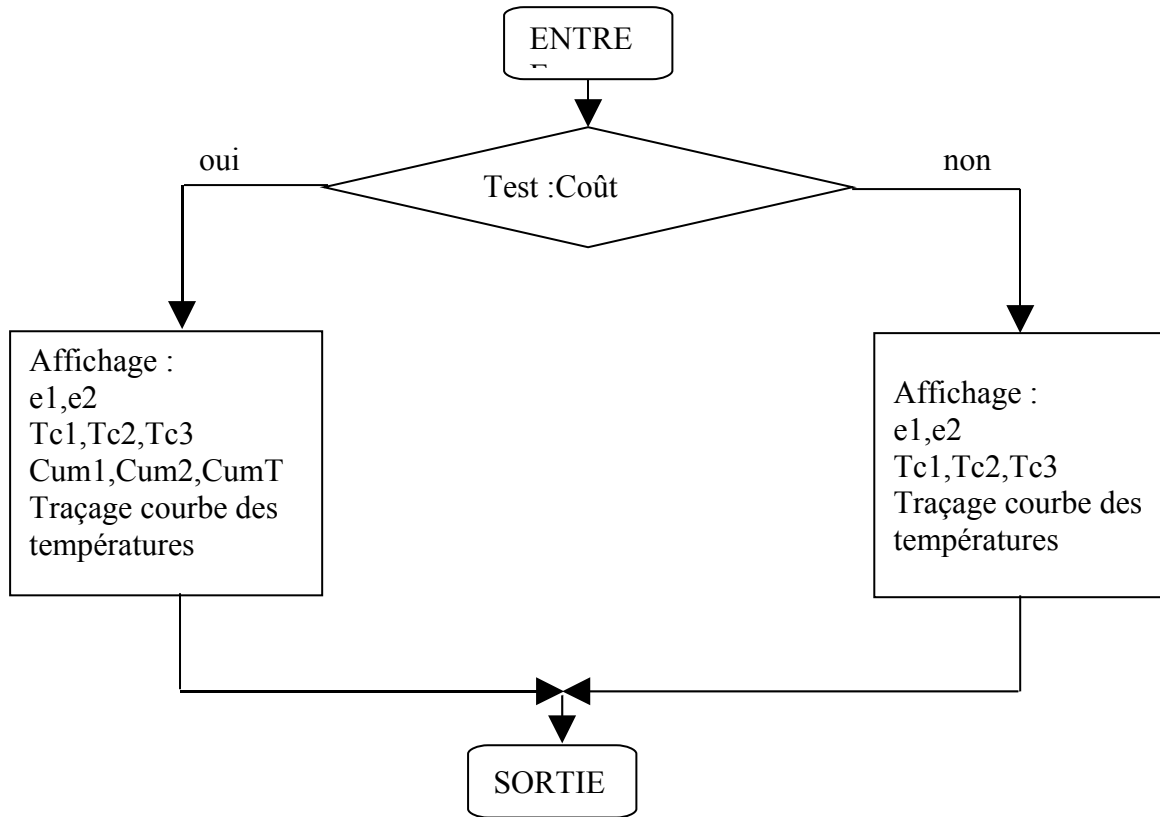


TABLE DES MATIERES

PARTIE I : BASES THEORIQUES

CHAPITRE I : LA PRODUCTION DU FROID -----	2
I.1 Généralité -----	2
I.2 La production du froid par compression d'un fluide pur-----	2
I.2.1 Description de la machine à compression -----	2
I.2.2 Principes -----	2
I.2.3 Cycle frigorifique et diagramme enthalpique -----	3
I.2.4 Régulation -----	4
CHAPITRE II : TRANSFERT THERMIQUE -----	5
II.1 Le flux radiatif -----	5
II.1.1 Définition -----	5
II.1.2 Lois de STEPHAN BOLTZMANN -----	5
II.1.3 Facteur de forme -----	5
II.1.4 Coefficient d'échange radiatif -----	5
II.2 Le flux convectif -----	6
II.2.1 Définition -----	6
II.2.2 Loi de NEWTON -----	6
II.2.3 Coefficient d'échange convectif -----	6
II.3 Le flux conductif -----	8
II.3.1 Définition -----	8
II.3.2 Lois de FOURIER -----	8
II.3.3 Equation générale de la conduction -----	8
II.3.4 Conduction unidirectionnelle dans une paroi homogène à face parallèle et en régime permanent-----	9
II.3.5 Conduction combinée -----	10

PARTIE II : PRINCIPE D'ISOLATIONS DE CHAMBRES FROIDES

CHAPITRE I : MATERIAUX D'ISOLATIONS FRIGORIFIQUES-----	12
I.1 : Les isolants thermiques -----	12
I.1.1 Définition -----	12
I.1.2 Classification et propriétés -----	12
I.1.2.1. Classification des isolants -----	12
I.1.2.2. Propriétés des matériaux isolants -----	13
I.2 : Matériaux pare vapeur et d'étanchéité -----	21
I.2.1 Mécanisme de migration de la vapeur d'eau -----	21
I.2.2 Classification et propriétés -----	22
I.2.2.1 Classification -----	23
I.2.2.2 Propriétés et caractéristiques -----	23
CHAPITRE II : ISOLATION SELON LE TYPE DE CONSTRUCTION -----	25
II.1 Le système d'isolation traditionnel -----	25
II.1.1 Isolation du sol -----	25
II.1.2 Isolation des parois verticales -----	25
II.1.3 Isolation des plafonds -----	26

II.2 le système sandwich ou isolation intégrée -----	26
II.2.1 Avantages -----	27
II.2.2 Inconvénients -----	27
II.2.3 Isolants -----	27
II.2.4 Revêtements -----	27
II.3 le système d'isolation métallique -----	28
II.3.1 Construction -----	28
II.3.2 Isolants -----	28

CHAPITRE III : PROBLEMES ACTUELS DE L'ISOLATION-----	29
III 1. Problème au niveau des murs et plafonds -----	29
III 1.1 la continuité de l'isolation thermique -----	29
III. 1.1.a – les ponts thermiques -----	29
III. 1.1.b – joints et discontinuités -----	30
III 1.2 Continuité de l'étanchéité à la vapeur d'eau -----	30
III 1.3 Les déformations -----	30
III 1.3.a – les retraits -----	30
III. 1.3.b – Différences de pression -----	30
III 1.4 L'insolation -----	31
III.2 Problème au niveau du sol -----	32
III.2.1 congélation du sol -----	32
III 2.2 Solutions -----	32
III.3 Problèmes au niveau de la menuiserie isolante -----	33
III.3.1 Effet bilame -----	33
III.4 Problème économique -----	33
III.5 Conclusion -----	33

PARTIE III : OPTIMISATION DE CALCULS D'ISOLATION DE CHAMBRES FROIDES

CHAPITRE I : PARAMETRE DE CALCULS DES ISOLATIONS -----	34
I.1 Les données climatiques -----	34
I.1.1 Température extérieure -----	34
I.1.2 La Température du sol -----	34
I.1.3 La vitesse moyenne du vent -----	34
I.1.4 L'humidité relative -----	34
I.1.5 La température de condensation -----	34
I.1.6 L'ensoleillement -----	34
I.2 Conditions de conservation des denrées dans une chambre froide ou conditions internes-----	34
I.2.1 La température intérieure -----	34
I.2.2 L'humidité relative intérieur -----	35
I.3 Facteurs technico-économiques -----	35
I.3.1 L'isolant -----	35
I.3.1.1 La conductivité thermique de l'isolant -----	35
I.3.1.2 Le coût de l'isolant -----	35
II.1 La formule des déperditions fixées -----	36
II.2 La formule de $(\Delta T/2)$ -----	36
II.3 La formule ASHRAE -----	37
II.4 L'épaisseur anti-condensation -----	37

II.5 Remarque -----	38
CHAPITRE III : OPTIMISATION DES CALCULS D'ISOLATIONS-----	39
III.1 Facteurs d'optimisation -----	39

III.1.1 Epaisseur de l'isolant -----	39
III.1.2 La diffusion de vapeur d'eau et calcul de flux massique -----	39
III.1.2.1 Calcul de la diffusion de vapeur -----	39
III.1.2.2 Obtention de l'humidité relative de l'air -----	40
III.1.2.3 Température du bulbe sec -----	42
III.1.2.4 Température du bulbe humide -----	42
III.1.2.5 Température de rosée -----	42
III.1.2.6 Résistance à la diffusion de vapeur -----	42
III.1.3 Calcul de la déperdition -----	43
III.1.4 Coût de la déperdition -----	43
III.1.5 Coût de l'isolation -----	43
III.2 PROPOSITION DE METHODE POUR L'OPTIMISATION DES CALCULS D'EPAISSEURS -----	44
III.2.1. Coût de la déperdition -----	44
III.2.2 Le coût de l'isolation -----	44
III.2.3 Calcul de l'épaisseur optimale -----	44
III.3 ETUDES COMPARATIFS DES CALCULS D'ISOLATION -----	45
III.3.1 choix des isolants -----	45
III.3.2 Caractéristiques technique des matériaux -----	45
III.3.3 Calculs d'isolations avec les différentes formules existante-----	46
III.3.4 Interprétation des résultats -----	53
III.3.5 Conclusion -----	53
III.4 EXPLOITATION DES METHODES DE CALCULS SELON LES CONDITIONS D'UTILISATIONS. -----	53
III.4.1 Choix de méthode de calculs -----	54

III.4.2 Déperdition optimale pour l'isolation frigorifique à Madagascar-----	55
III.4.3 Exploitation de la formule ASHRAE pour les constructions à Madagascar-----	59
III.4.4 Conclusions -----	61
CHAPITRE IV : EXEMPLE D'APPLICATION DE CALCUL POUR UNE CHAMBRE FROIDE A MADAGASCAR -----	62
IV.1 Paramètres de calculs -----	62
IV.2 Description de la chambre froide -----	62
IV.3 Modèle de calcul classique -----	63
IV.4 Modèle de calcul proposé -----	64
IV.5 Calculs économiques -----	64
IV.6 Interprétation et comparaison des résultats -----	65
CHAPITRE V : CARACTERISATION ET UTILISATION DU KAPOK COMME ISOLANT THERMIQUE -----	67
V.1 Le kapok -----	67

V.2 Exemple de calcul de chambre froide avec utilisation du Kapok comme isolant -----	67
V.2.1 Paramètres de calculs -----	67
V.2.2 Calcul d'isolation de chambre froide isolé en kapok. -----	69
V.2.2.1 Calculs des épaisseurs de l'isolation -----	69
V.2.2.2 Calculs des diffusions de vapeur -----	70

V.2.2.3 Durée de vie de l'isolation en kapok pour la chambre froide -----	70
V.2.2.4 Calcul de charge admissible pour le sol -----	71
V.2.3 Calculs économique -----	71
V.3 Comparaison des résultats -----	72
 CHAPITRE VI : ISOLATION COMPOSITE -----	74

VI.1 Proposition de méthode de dimensionnement de l'isolation composite -----	74
VI.2 Recommandation -----	76
 PARTIE IV : CONCEPTION DU LOGICIEL FRISOL 1.0	
IV.1 Présentation du logiciel -----	77
IV.2 La base de données -----	77
IV.3 Corps du logiciel -----	77
IV.4 Mode d'utilisation et interfaces utilisateurs -----	77
 ETUDE D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL -----	87

Auteur : NAMBININTSOA Alain Heriniaina
Lot AMP 102 AMBOHITRIMANJAKA- AMPANOMAHITSY
ANTANANARIVO
TEL : 033 12 705 93

TITRE :

METHODES OPTIMALES DE CALCUL ET INFORMATISATION DE L'ISOLATION DES CHAMBRES FROIDES

Nombre de pages : 88
Nombre de figures : 55
Nombre de tableaux : 22
Nombre de pages en annexe : 11

RESUME

Le présent mémoire guide sur les principes d'optimisation de l'isolation thermique appliqués dans le domaine frigorifique et les notions y afférant. Les principaux objectifs étaient de concevoir et dimensionner, pour tous domaines d'applications frigorifiques, une isolation fiable tout en considérant :

- l'économie de l'énergie
- l'économie de matière
- l'économie de devise

L'évaluation des paramètres influençant sur le dimensionnement permet d'affecter ces grandeurs dans les bases de données des calculs optimisés. Aussi, l'ouvrage contient la valorisation de certains matériaux locaux et leurs applications dans le domaine frigorifique. Afin de nous faciliter l'exploitation des résultats de calculs, le logiciel « FRISOL 1.0 » a été conçu pour contenir les directives de calcul et de mises en œuvre de l'isolation selon les paramètres fournis.

RAPPORTEUR : Mr RANAIVOSON ANDRIAMBALA Hariniaina
Maître de conférences

Mot clés : Froid, évaporateur, compresseur, condenseur, détendeur, isolation thermique, isolation frigorifique, régulation, déperdition, optimisation, balle de riz, kapok, calcul économique, conception de logiciel, FRISOL1.0, fluides frigorigènes, environnement.