



## AVERTISSEMENT

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

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

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

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

## LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

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

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

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

Institut de Formation Sectoriel du Bâtiment  
5, Zone d'activités économiques Krakelshaff  
L-3290 BETTEMBOURG  
Tél : +352 26 59 56



# **Etudes de systèmes énergétiques et optimisation énergétique de bâtiments basse énergie**

U.F.R. Sciences et Technologies  
Département Physique-Chimie  
**Boulevard des Aiguillettes**  
**BP 70239**  
**54506 - VANDOEUVRE-LES-NANCY CEDEX**

Maitre de stage : SIKORA Alexis  
Date de soutenance : 3 septembre 2014

KARMANN Lucas  
Master Mécanique Energétique Procédés et Produits 2013/2014  
Spécialité : Mécanique Fluide Energie.



# Remerciements

J'ai intégré l'Institut de Formation Sectoriel du Bâtiment le 17 mars 2014 pour une durée de 5 mois et 2 semaines.

Je souhaiterais exprimer mes remerciements à Monsieur **Bruno RENDERS** directeur de l'I.F.S.B. pour avoir émis un avis favorable à ma demande d'apprentissage au sein de l'entreprise.

Je voudrais surtout remercier Monsieur **Alexis SIKORA**, maître d'apprentissage qui a accordé beaucoup de son temps dans le cadre des différents projets qui m'ont été confiés et qui m'a permis d'approfondir mes connaissances dans le domaine de l'énergie et du bâtiment. Je remercie tout particulièrement; Monsieur **Marc CASTELLETTO**, Monsieur **Mathieu METZ** et Monsieur **Daniel BOURGEOIS** qui m'ont encadré lors de ce stage et qui m'ont permis eux aussi de progresser sur mes différents projets et d'acquérir plus de compétences.

En dernier lieu j'aimerais remercier les employés, les ingénieurs et les techniciens de la société qui ont facilité mon intégration en m'accordant leur confiance, et en me témoignant leur respect.

# SOMMAIRE

<b>Remerciements</b> .....	<b>1</b>
<b>Sommaire</b> .....	<b>2</b>
<b>Introduction</b> .....	<b>7</b>
<b>I. Présentation de l'entreprise</b> .....	<b>9</b>
1. Historique de l'entreprise .....	9
2. Localisation .....	10
3. Organisation .....	11
4. Les compétences .....	12
<b>II. Les systèmes énergétiques renouvelables</b> .....	<b>13</b>
1. Dimensionnement de l'installation de la PAC .....	13
<b>III. Optimisation énergétique d'un bâtiment</b> .....	<b>19</b>
1. La démarche entreprise .....	19
2. Descriptif du bâtiment IFSB .....	20
2.1 Etude thermique du bâtiment .....	20
2.2 Les installations .....	23
2.3 Règlementation et confort .....	31
3. Les analyses et améliorations .....	36
3.1 Les problèmes du bâtiment .....	36
3.2 Partie électrique .....	37
3.3 Partie chauffage .....	42
<b>IV. Conception et modélisation de maison passive</b> .....	<b>45</b>
1. Conception d'un guide de maintenance .....	45
2. Modélisation des performances énergétiques d'un bâtiment .....	47



<i>2.1 Les indicateurs du logiciel .....</i>	<i>47</i>
<i>2.2 Le fonctionnement général du logiciel .....</i>	<i>47</i>
<b>Conclusion de fin de projet .....</b>	<b>54</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>56</b>
<b>Annexe .....</b>	<b>58</b>

## Nomenclature

$S_i$	Surface interne	$m^2$
$S_e$	Surface externe	$m^2$
$V_{int}$	Volume interne du tube	$m^3$
$Q_v$	Débit volumique	$m^3/s$
$Q_m$	Débit massique	$Kg/s$
$P$	Puissance	$W$
$\Phi$	Flux	$W$
$D_h$	Diamètre hydraulique	$m$
$D_i$	Diamètre interne	$m$
$D_e$	Diamètre externe	$m$
$V$	Vitesse	$m/s$
$\rho$	Masse volumique	$Kg/m^3$
$C_p$	Capacité calorifique	$Kj/Kg.K$
$\lambda$	Conductivité thermique	$W/m.K$
$T_{ext}$	Température extérieure	$K$
$T_{amb}$	Température ambiante intérieur	$K$
$Nu$	Nusselt	
$Re$	Reynolds	
$Pr$	Prandtl	
$Gr$	Gradshof	
$Req$	Résistance équivalente	$W/m^2$
$h_i$	Coefficient de convection interne	$W/m^2.K$

$h_e$	Coefficient de convection externe	$W/m^2.K$
$L$	Longueur	$m$
$V_e$	Volume du vase d'expansion	$L$
$\nu$	Viscosité cinématique	$m^2/s$

## Liste des abréviations

IFSB	Institut Formation Sectoriel du bâtiment
PAC	Pompe à chaleur
ECS	Eau chaude sanitaire
DN	Diamètre nominal
COP	Coefficient de Performance Energétique
HMT	Hauteur Manométrique Totale
ZNC	Zone non chauffée
ACV	Analyse Cycle de Vie
VMC	Ventilation Mécanique Contrôlée

# Introduction

Le monde actuel continue toujours de produire plus, de se développer et voit sa population sans cesse augmenter. Les ressources quant à elles diminuent sans pouvoir se régénérer et sont rapidement exploitées. Le résidentiel et le tertiaire sont à eux seuls responsables de 44% de la consommation énergétique.

Dans un contexte comme celui-ci, il faut pouvoir aujourd'hui concilier activité économique, qualité de vie et d'environnement dans un même ensemble ; autrement dit un concept de développement durable.

Une économie performante est un préalable indispensable à la satisfaction globale des besoins écologiques et sociaux. Mais seule une économie capable de s'adapter aux exigences environnementales pourra survivre à terme. Un développement économique durable apparaît ainsi fondé d'abord sur une amélioration de l'éco-efficacité, c'est à dire de la combinaison optimale des ressources naturelles et environnementales, des personnes, du capital, des technologies et des idées. Il s'agit de produire plus et mieux avec moins : moins de déchets, moins d'énergies, moins de ressources naturelles exploitées. Le but est donc de s'orienter vers une croissance économique responsable.

L'énergie est pourtant indispensable à toute activité de production. Si le coût des consommations varie suivant l'activité de l'entreprise et le type d'énergie utilisé, il présente bien souvent un poste budgétaire qui peut être réduit. Economiser l'énergie dans l'entreprise est aujourd'hui une nécessité économique qui se conjugue avec une nécessité environnementale. La plupart des actions permettant de réduire les consommations d'énergie sont simples à mettre en œuvre et très rapidement rentable. Par ailleurs, les économies d'énergie contribuent au respect des engagements pris à Kyoto par la communauté internationale, pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et ainsi lutter contre le changement climatique.

Mais les entreprises ne sont pas les seules concernées par ces enjeux environnementaux. Les résidences sont également source de consommations énergétique. La Communauté Européenne a voté que d'ici 2020 les logements seront construits et certifiés "0 énergie" c'est à dire que les quantités d'énergies utilisées par ces nouvelles constructions seront très faible. Les énergies renouvelables sont donc indispensables à l'heure actuelle pour pallier à ces problèmes de consommation d'énergies fossile dans nos habitations. Il faut donc pouvoir être en mesure de comprendre les principes de fonctionnement ainsi que de pouvoir optimiser ces systèmes afin que ces derniers soit les plus efficaces possible. Un suivi de consommation et une maintenance adéquate seront essentiels pour le bon fonctionnement de ces nouvelles structures énergétiquement efficaces.



L'Institut de Formation Sectoriel du bâtiment contribue à l'atteinte des objectifs Luxembourgeois en construisant un bâtiment basse énergie de référence en matière de construction durable. C'est dans ce but d'efficacité énergétique que différentes missions m'ont été confiées notamment dans l'optimisation énergétique du bâtiment ainsi que dans la conception de montage de pompe à chaleur et de panneaux solaires thermiques, mais également dans la réalisation de ce qui pourrait être qualifié de guide ou manuel de la maison passive.

# **I. Présentation de l'entreprise.**

## 1. Historique de l'entreprise.

Depuis 2002, l'histoire du projet IFSB aura été jalonnée par une série d'étapes importantes et d'organisation d'évènements prestigieux.

Le projet IFSB remonte en effet à une dizaine d'années lorsque les fédérations sectorielles "le groupement des entrepreneurs du bâtiment publics" et "la fédération des entreprises de construction et de génie civil" décidèrent de mettre en place une dynamique volontaire liée à la formation professionnelle continue.

De 1996 à 2000, elles parviennent à inscrire, en accord avec les partenaires sociaux, cette dynamique dans la convention collective du secteur.

Cette volonté s'est très vite transformée en un objectif précis de création d'un organisme, centre de qualification des ouvriers du secteur. Cette création passait, en outre, par la mise en œuvre d'un volet financier essentiel sous la forme d'une cotisation " Formation sectorielle bâtiment" par ailleurs d'obligation générale. Parallèlement les associations professionnelles envisagèrent le montage d'un projet Fonds Social Européen, destiné à garantir la viabilité économique du démarrage du projet.

En juillet 2002, le directeur du projet posa les bases et les objectifs stratégiques de l'institut de formation Sectoriel du bâtiment SA dans un business plan s'étalant de 2002 à 2010.

Depuis le 11 septembre 2002, l'IFSB S.A. poursuit son expansion.

## 2. Localisation.

L'institut Formation Sectoriel du Bâtiment se situe à Bettembourg (Luxembourg) non loin de la frontière française et de la ville de Luxembourg comme nous le montre le plan ci dessous :

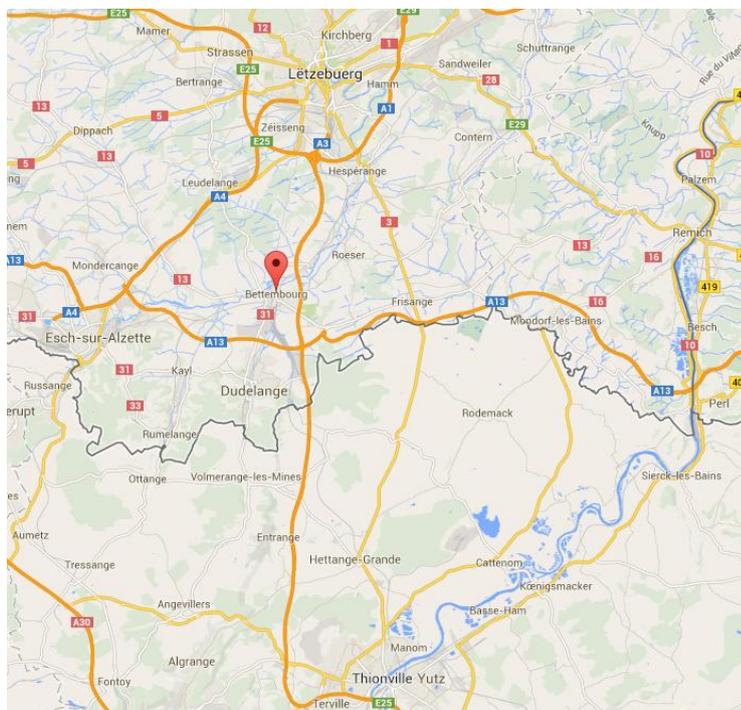


Figure 1 : Situation géographique

Voici la représentation du bâtiment, le Building Training Center :



Figure 2 : Bâtiment principal

Ce bâtiment possède des salles de cours, les bureaux pour les salariés, des ateliers pour les parties pratiques des formations ainsi qu'un restaurant d'entreprise.

## 3. Organisation.

L'organigramme de l'IFSB est à l'évidence le reflet de ses axes de développement, il comporte ainsi trois départements distincts (DS, DCO, DCODUR).

L'équipe IFSB est composée de collaborateurs dotés de compétences techniques pointues et pluridisciplinaires.

L'IFSB s'attache au développement continu de ce capital humain précieux.

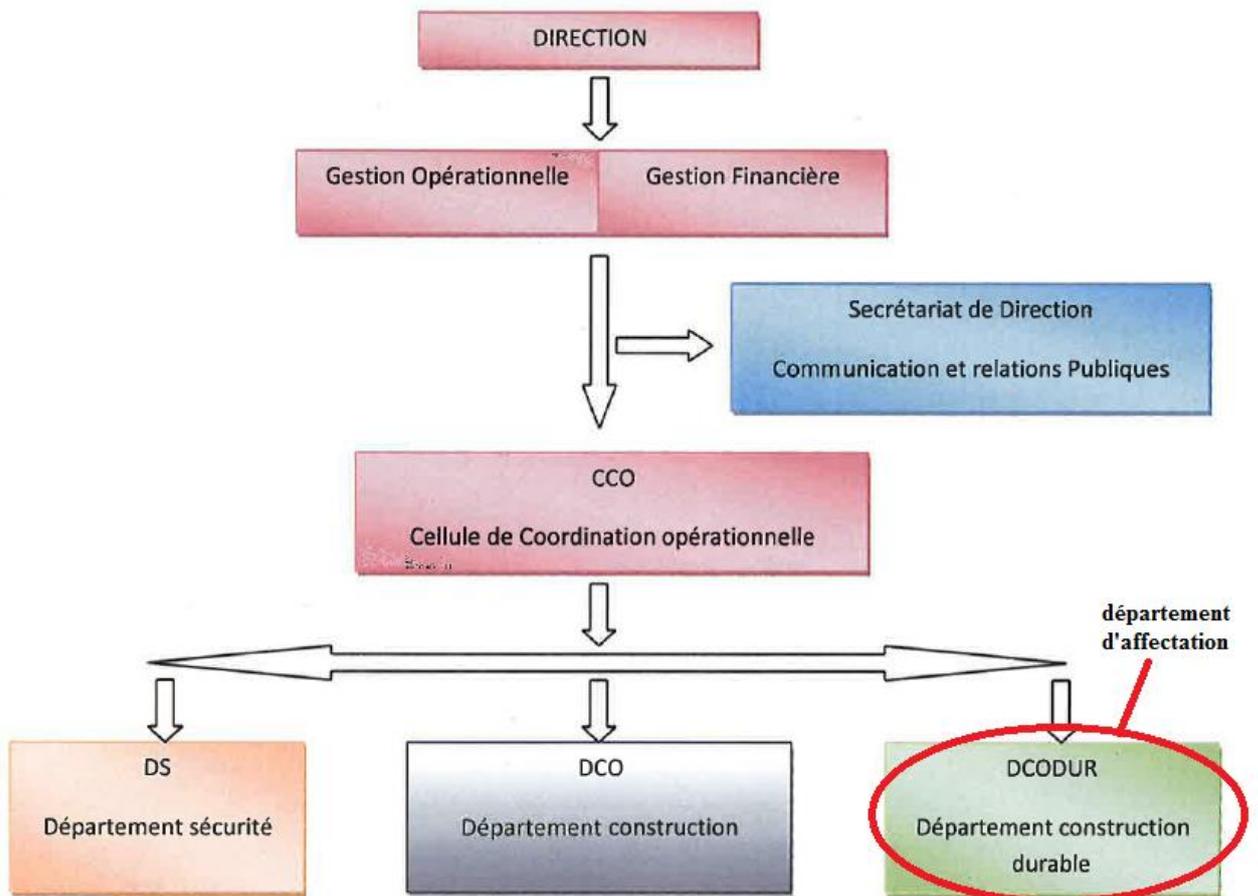


Figure 3 : Organisation de l'I.F.S.B.

#### 4. Les compétences.

##### CONSTRUCTION :

La construction verticale, horizontale ou maîtrise d'engins de chantier, de levage et de manutention, leurs formations intègrent les meilleures techniques, les plus récents équipements et une pédagogie moderne. Ce domaine de compétence couvre les règles de l'art technique des métiers de la construction et constitue le cœur du projet pédagogique IFSB.

##### SECURITE :

Sur les chantiers de construction, au même titre que dans le domaine industriel, garantir la sécurité est l'une des priorités essentielle. La réduction des risques professionnels sur les chantiers est non seulement une contrainte règlementaire communautaire et nationale, mais c'est avant tout un principe de base d'un management de qualité et le garant d'une compétitivité durable. Les formations spécifiques correspondantes à ce domaine visent à améliorer et à accompagner cette donnée primordiale.

##### CONSTRUCTION DURABLE :

Le développement durable est aujourd'hui, et à juste titre devenu une priorité incontournable. Afin de respecter cette exigence et d'anticiper les nécessaires évolutions sectorielles, l'IFSB a voulu mettre en place une vraie dynamique de la durabilité. Celle-ci s'articule sur deux pôles complémentaires :

- Une exemplarité infrastructurelle durable
- Une offre de formation adaptée

##### MANAGEMENT :

La qualité du management est le pilier indispensable à la gestion efficace des entreprises, mais aussi au développement des qualifications de chacun. Dans le même ordre d'idée, un accent particulier sera mis sur l'utilisation des outils informatiques et de la simulation virtuelle.

## **II. Les systèmes énergétiques renouvelables**

### 1. Dimensionnement de l'installation de la PAC.

Le dimensionnement d'une installation d'une pompe à chaleur est tout aussi important que le dimensionnement de la pompe à chaleur elle-même. En effet si l'installation de cette dernière est mal dimensionnée, la pompe à chaleur ne pourra pas fonctionner à sa capacité optimale.

Le but de ce projet, est de dimensionner et monter l'installation afin que celle-ci serve d'exemple aux futurs stagiaires en formation sur le montage d'une pompe à chaleur dans les habitats ainsi que dans les bâtiments publics ou collectifs. Seul une partie prise de mesures sera effectuée par les stagiaires sur cette PAC mais ne sera en aucun cas démonter.

#### **Dimensionnement de l'installation.**

Le seul matériel mis à disposition était la pompe à chaleur elle-même, le ballon de mélange ainsi que l'aérotherme. En voici un bref descriptif ci dessous :

PAC Budérus : Puissance Chaud de 8kW, puissance de résistance 10 kW et débit maximum de 1,008m<sup>3</sup>/h.

Ballon casse pression : 200L, pression maximal acceptable 3 bar.

2 Aérothermes : Puissance dégagée 2 kW.

La PAC servira à alimenter deux aérothermes et un plancher chauffant devant être installés dans une pièce d'un logement, l'installation comprendra également une chaudière d'appoint dans le cas où la pompe à chaleur ne fournirait pas la puissance nécessaire.

Afin de dimensionner au mieux l'installation, il a fallu commencer par effectuer un schéma de principe comportant tout les éléments à installer. Pour effectuer ce schéma, il faut connaitre l'emplacement exact de chaque élément. Voici un petit descriptif de l'emplacement de certains éléments essentiels :

- Les pompes du circuit : vont venir se placer sur le réseau retour du fluide. Le fluide étant plus froid au retour que sur le départ, ces dernières ne vont pas se détériorer aussi vite en raison d'une éventuelle élévation de la température. (Même si ces températures ne sont pas un grand danger il faut garder un réflexe de montage cohérent).

-les vases d'expansion : sont constitués d'une enveloppe séparée en son centre par une membrane souple, pour servir d'amortisseur pour le circuit d'eau. La première moitié de ce vase est remplie par l'eau du circuit, et la deuxième moitié par de l'air comprimé de 0,8 à 1,5 bar. Lorsque l'eau se dilate, en chauffant, la partie eau pousse sur la partie air. Cette dernière se comprime et absorbe le surplus de pression.

-les vannes d'isolements : elles sont installées de part et d'autre de chaque élément afin qu'en cas de panne ou de maintenance on puisse isoler l'élément et le remplacer ou le réparer sans devoir purger tout le circuit et donc par ce fait minimiser le temps d'arrêt de l'installation et le temps d'intervention.

-les filtres : afin de protéger les échangeurs en particulier et autres organes sensible du système (Compteur d'énergie)

-vanne de régulation de débit : afin de garantir un débit optimal sur les échangeurs pour garantir un rendement maximum et équilibrer le système hydraulique afin que tous les organes de l'installation puissent être alimentés avec un débit assurant leurs bons fonctionnements.

-purgeur : afin de pouvoir éviter une présence d'air dans le circuit qui perturberait le débit ou le fonctionnement de l'installation.

-thermomètre : afin d'avoir une image directe du bon fonctionnement de l'installation

-vase d'expansion : afin de permettre d'absorber la dilatation de l'eau dans le système et donc de permettre à l'installation de fonctionner à une pression stable suite à une variation de température de l'eau.

Une fois l'emplacement de chaque élément de l'installation connu, on peut donc effectuer un 1er schéma de principe à l'aide du logiciel AUTOCAD par exemple.

Avec ce schéma et le descriptif de la PAC on peut maintenant déterminer le diamètre des tuyaux à monter entre chaque élément.

Il faut donc calculer le débit de fluide qui doit circuler dans la PAC pour obtenir la puissance nominale donnée par le constructeur.

Utilisons la formule suivante :

$$\Phi = Q_m \cdot C_p \cdot \Delta T \rightarrow Q_m = \Phi / (C_p \cdot \Delta T)$$

$Q_m$  étant obtenu en Kg/s, nous allons le convertir afin que celui-ci soit dans une unité plus adéquate pour le dimensionnement de la tuyauterie ; soit en l/h.

Ce qui donne :

$$\boxed{((Q_m \cdot 3600) / \rho) \cdot 1000 = Q_v} \text{ en l/h}$$

$\rho$  étant ici la masse volumique du fluide utilisé dans le circuit.

Maintenant que le débit est déterminé aux différents endroits du schéma hydraulique, il ne reste plus qu'à déterminer le diamètre de conduite le plus adapté à ce débit. Pour ce faire, il faut utiliser un abaque qui donne le diamètre en fonction du débit et de la vitesse du fluide dans la conduite. Il faudra tout de même faire attention à ne pas dépasser la vitesse de **1m/s** dans la conduite sous peine d'avoir des problèmes d'acoustique lors de du passage du fluide dans cette dernière. Plus la vitesse sera faible, moins il y aura de pertes de charges et de problèmes de bruit.

### Dimensionnement d'un vase d'expansion

Le volume total d'un vase d'expansion dépend de la capacité totale en eau de l'installation. En effet, plus il y a d'eau dans l'installation, plus l'augmentation de volume lors de son échauffement est grande. Il faut donc commencer par calculer cette contenance en eau en n'oubliant pas les contenances du ou des générateurs, des corps de chauffe et des tuyauteries aller et retour.

Il est nécessaire de connaître également :

-la température moyenne de l'eau en fonctionnement normal, c'est-à-dire la moyenne entre les températures de départ et de retour.

- la hauteur statique de l'installation (différence entre le point le plus haut et le point le plus bas du circuit).

-La pression maximale admissible  $P_{max}$ .

A partir de la contenance en eau et de la température moyenne du circuit, il est possible de déduire quelle sera l'augmentation de volume dans le vase entre l'installation en marche et à l'arrêt donc le volume utile ou volume d'expansion  $V_e$  du vase. Pour ce faire il faut utiliser un abaque donnant la courbe de dilatation en fonction de la température. (Donné en annexe 2)

Connaissant la hauteur statique de l'installation, il est possible de déduire la pression initiale  $P_{init}$  de l'eau.

## Détail de calcul du vase d'expansion

Pour la partie chaudière :

- Contenance chaudière : 100L
- Contenance tuyaux 1'' :  $ml \times ((\pi \times d^2)/4) \times 1000 = 7 \times ((\pi \times (26 \times 10^{-3})^2)/4) \times 1000 = 3,71 \text{ L}$
- Contenance tuyaux 3/4'' : 1,57 L
- Contenance tuyaux 1/2'' : 1.77 L
- Contenance ballon : 200L

Soit un volume total de 307 litres auquel on rajoute une sécurité de 40 litres. Au final prenons 350 litres.

La température moyenne du circuit est de  $T_m = 60^\circ\text{C}$  et d'après le graphique le coefficient de dilatation est de 1,68%.

La pression du circuit standard est de 1,5 bars pour une différence de hauteur de 2 m du système cela est largement suffisant. La pression maximal est donnée sur la documentation des éléments soit ici 3 bars.

On obtient :

$$V_e = 350 \times 0.0168 = 5.95 \text{ L} + \text{une réserve de } 3 \text{ L} = 8.95 \text{ L}$$

$$\text{Le rendement du vase : } \eta_v = ((P_{\max}+1)-(P_{\text{ini}}+1)) / (P_{\max}+1) = 0.375$$

$$\text{Le volume total du vase : } V_t = V_e / \eta_v = 8.95 / 0.375 = 23,87 \text{ L}$$

Il ne reste plus alors qu'à choisir dans un catalogue un vase d'expansion ayant un volume total supérieur ou égal au volume total calculé et conçu pour cette pression initiale.

## Dimensionnement d'une pompe

Pour déterminer la puissance d'une pompe dans un circuit hydraulique, il est nécessaire de connaître la H.M.T. ainsi que le débit que l'on souhaite obtenir en  $\text{m}^3/\text{h}$ .

Détermination de la hauteur manométrique totale

La HMT est la pression totale que doit fournir une pompe. Elle est exprimée en mètres ou mètres de colonne d'eau, en bars ou en  $\text{kg}/\text{cm}^2$ . La hauteur manométrique totale est calculée suivant l'équation :

$$\text{H.M.T} = P_d C.$$

• PdC : il s'agit des pertes de charges moyennes dans les canalisations qui sont fonction de la section et de la nature de la canalisation (pertes de charges linéaires) mais également fonction du nombre et du type de raccords (coudes, tés, jonctions) présents le long de la canalisation ; on les appelle les pertes de charges singulières.

Le calcul des pertes de charges est le suivant :

$$\Delta P_c = \{(\lambda L/D) + \sum K_g\} \times (v^2 / (9,81.2)) \quad \text{avec : } \lambda = 64/Re \text{ ( si } Re < 2000 \text{ )}$$

$$\lambda = 0,316 \times Re^{-0,25} \text{ (si } 4000 < Re < 10^5 \text{)}$$

$$1/\lambda = -2 \log (\epsilon / (3,71.D)) \text{ ( si } Re > 10^5 \text{)}$$

$\lambda$  étant ici le coefficient de pertes de charges.

Rappelons la formule du Reynolds :  $Re = \frac{v.D}{\nu}$

### Exemple de calcul des pompes du circuit

Les données :

Le circuit a une différence de hauteur de 2 m entre le plus haut et le plus bas des éléments. On souhaite un débit de 1 m<sup>3</sup>/h dans la partie « Ventilateur-convecteur - ballon casse pression ». La pompe sera placée sur l'aller du circuit. Cette partie comprend 14 vannes d'isolements, 5 vannes de régulation, un filtre et une vanne 3 voies. Viennent s'ajouter à cela environ 9 coudes à 90°, 4 coudes 45° et 4 m de tuyaux de diamètre 22mm.

La première étape consiste à calculer toutes les pertes de charges du circuit.

#### Pertes de charges linéaires

$$Re = (0,72 \times 22 \cdot 10^{-3}) / 1,10 \cdot 10^{-6} = 15840$$

$$\lambda = 0,316 \times Re^{-0,25} = 0,028$$

$$H_l = (\lambda \times L) / D_h \times (V^2 / (9,81.2)) = (0,028 \times 4) / 22 \cdot 10^{-3} \times (0,72^2 / (2,9, 81)) = 0,134 \text{ m}$$

#### Pertes de charges singulières :

$$H_s = \sum K_g \times (\rho v^2 / 2) = (8 \times 5 + 1 \times 10 + 2 \times 0,5 + 1 \times 9 + 0,4 \times 4 + 8 \times 14 + 2 \times 1) \times (0,72^2 / (2,9, 81)) = 4,64 \text{ m}$$

$$H.M.T. = 4,774 \text{ m.}$$

## Sélection de la pompe

Sur chaque pompe est indiqué un graphique HMT / Débit ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) sur lequel est représenté la courbe de performance de la pompe. On reporte la HMT calculée précédemment et le débit souhaité. Il est nécessaire que ce point soit situé juste en dessous de la courbe de la pompe choisie. Si en revanche le point se situe au-dessus de la courbe, les performances de la pompe seront trop faibles par rapport aux caractéristiques de l'installation et des besoins.

Après avoir effectué le dimensionnement de tous les éléments, il faut obtenir des offres de prix afin d'obtenir les meilleurs prix possibles.



Figure 4 : début de l'installation de la P.A.C.

# III. Optimisation énergétique du bâtiment.

## 1. La démarche entreprise.

### L'objectif

Le but de mon projet est de pouvoir réaliser des économies de consommations énergétiques mais aussi d'être dans une démarche logique du développement durable dans le domaine du bâtiment. Pour s'inscrire dans cette démarche il faudra que les suggestions faites soient simples, efficaces et à moindre coût.

### La démarche

Afin de réaliser l'optimisation énergétique du bâtiment, j'ai du établir une démarche pour éviter toute confusion. Voici les étapes entreprises pour la réalisation du projet :

- Effectuer un bilan global du site :

Il faut au préalable réaliser une étude de consommation des différentes énergies sur tout le bâtiment: Consommation électrique, chauffage-climatisation, eau. (Graphiques, tableaux Excel, relevés de compteurs,.....)

- Etudier les systèmes les plus "défectueux".

Certains systèmes ou composants du bâtiment vont avoir une part de consommation énergétique plus importante que d'autres. Une étude de ces systèmes est donc prioritaire afin de réduire une plus grande quantité d'énergie.

- Réalisation d'études bibliographiques.

Pour améliorer tous ces systèmes, il faut réaliser une étude "bibliographique" pour voir si certains systèmes sont plus performants aujourd'hui que les installations mise en place. Renseignement chez les fournisseurs ainsi que dans les documents techniques des fabricants.

- Réalisation de bilans et de calculs.

Une fois le travail de recherche terminé, la réalisation de bilans et de calculs est essentielle non seulement d'un point de vue énergétique mais également d'un point de vue économique. En effet si le système ne rapporte pas de bénéfice ni d'efficacité énergétique, il est inutile d'investir dans ce dernier.

D'autres points peuvent être abordés comme notamment l'aspect de confort en faisant une enquête de satisfaction. Mais une 1<sup>ère</sup> optimisation du bâtiment avait déjà été réalisée quelques années plus tôt. Ce qui a permis de gagner un peu de temps sur ces aspects du projet.

## 2. Descriptif du bâtiment IFSB.

### 2.1. Etude Thermique du bâtiment

Simulation thermique dynamique.

L'objectif du maître de l'ouvrage était de concevoir un bâtiment dont la demande en énergie est réduite de manière suffisante (optimisation de l'enveloppe). Les sources d'énergie renouvelables doivent donc apporter une contribution importante et la demande en énergie qui subsiste doit être satisfaite le plus efficacement possible par un système qui permet de minimiser la consommation d'énergie primaire et les émissions de polluants dans l'air.

Le but de la performance énergétique à atteindre est une consommation annuelle d'énergie primaire totale inférieure à 100 kWh/an.m<sup>2</sup>. Ainsi qu'un besoin de chauffage inférieur à 20Kwh/an.m<sup>2</sup>

#### Méthodologie appliquée :

Le développement d'un bon concept énergétique pour un bâtiment implique la recherche d'un équilibre entre isolation renforcée, compacité, gains solaires passifs, inertie et confort thermiques, qualité de l'air intérieur et coût d'investissement. Ceci doit faire l'objet d'une attention spécifique depuis la phase d'avant-projet et nécessite le plus souvent de recourir à des simulations informatiques.

Les bâtiments, objet de cette étude, ont été modélisés et simulés à partir des logiciels de simulation thermique dynamique *Virtual Environment*. Utilisé depuis de nombreuses années dans le monde universitaire, Apache (noyau de calcul de *Virtual Environment*) est largement validé.

*Virtual Environment* permet de réaliser une analyse complète et détaillée du comportement thermique du bâtiment. Pour cela, il simule pour un pas de temps donné les transferts thermiques et aérauliques du bâtiment en tenant compte des données climatiques extérieures du site (températures, rayonnement, vitesse du vent...) et des caractéristiques propres du bâtiment (composition des parois, gains internes, chauffage...). De nombreux résultats de températures, de besoins énergétiques ou autres puissances peuvent être édités pour chaque pas de temps. Il est possible d'obtenir des résultats partiels par zone ou globaux pour tout le bâtiment. Dès la création du modèle, des zones thermiques doivent être définies afin de rassembler des locaux pouvant avoir le même comportement thermique (même orientation, même étage, même scénario de chauffage...). Les résultats peuvent alors être analysés en détail pour chacune des zones.

L'Institut de Formation Sectoriel du Bâtiment (I.F.S.B.) se destine donc essentiellement à une fonction pédagogique. Le bâtiment développe une superficie totale de 5250 m<sup>2</sup> et regroupe, sur trois niveaux, les principales zones suivantes :

- des ateliers de formation (890 m<sup>2</sup>)
- des classes et laboratoires (515 m<sup>2</sup>)
- des bureaux (3751 m<sup>2</sup>)
- une cafétéria (250 m<sup>2</sup>)
- un auditoire (320 m<sup>2</sup>)

Le bâtiment a été modélisé en tenant compte de plusieurs zones thermiques, comme illustré par le dessin ci-dessous.

Ces zones ont été choisies suivant leur orientation en regroupant les locaux pouvant avoir le même comportement thermique (températures de consignes, gains internes et type de ventilation).

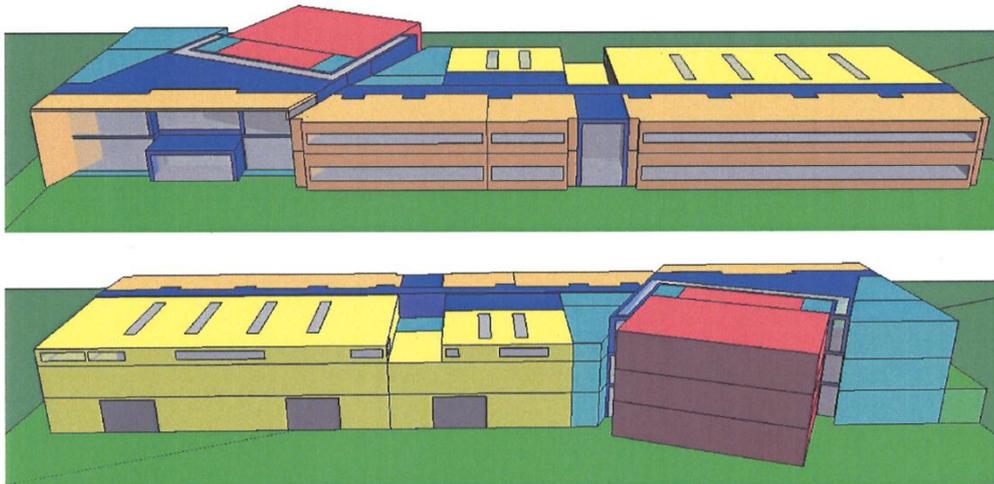


Figure 5 : Représentations 3D du modèle de simulation thermiques dynamiques

Au-dessus : façade nord, en-dessous : façade sud. Une couleur différencie chaque zone : ateliers (jaune), bureaux et classes (rouge), auditoire (rouge), espaces de circulation (bleu foncé), locaux techniques et sanitaires (bleu clair).

## Parois

L'isolation de l'enveloppe du bâtiment ainsi que l'utilisation de vitrages performants constituent la première démarche afin de limiter les besoins énergétiques en hiver. Les compositions des différentes parois déprédatives du bâtiment (planchers, murs, toitures, vitrages...) sont introduites dans le modèle. Ces dernières sont reprises dans le tableau ci-dessous. Ainsi que leurs valeurs caractéristiques d'isolation respectives.

	Description (de l'ext. vers l'int.)	U [W/m <sup>2</sup> .K]
Murs extérieurs	20 cm béton 20 cm isolant (lambda = 0.035 W/m.K)	0.17
Toiture	24 cm isolant (lambda = 0.04 W/m.K) 22 cm béton	0.16
Plancher (sur sol)	14 cm isolant (lambda = 0.04 W/m.K) 20 cm béton	0.23
Plancher intérieur	24 cm béton 10 cm (faux plancher) + finition	-
Parois intérieures	20 cm béton	-
Portes (ateliers)	Portes sectionnelles vitrées	3.1
Fenêtres	Double vitrage (U=1.1 W/m <sup>2</sup> .K - g=0.64) Châssis alu	1.5
Fenêtres (façade nord)	Triple vitrage (U=0.6 W/m <sup>2</sup> .K - g=0.55) Châssis alu	1.1
Verrière	Double vitrage (U=1.1 W/m <sup>2</sup> .K - g=0.64) Châssis métallique	1.7

La période de chauffage s'étale du mois d'octobre au mois de mai. Cette dernière indique également l'importance des gains solaires durant les autres mois et, par conséquent, la nécessité d'étudier le risque de surchauffe dans les divers locaux.

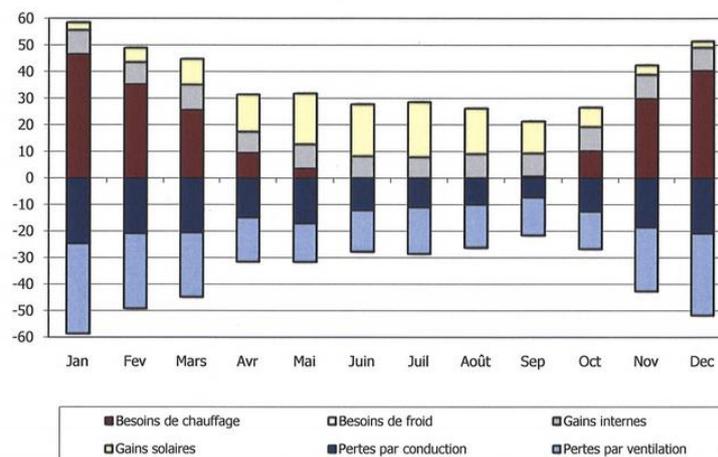


Figure 6 : Bilan énergétique de l'I.F.S.B.

## 2.2. Les installations.

### Panneaux solaires thermiques :

Le bâtiment IFSB possède actuellement 125m<sup>2</sup> de panneaux solaires thermiques.

Les panneaux solaires thermiques transforment la lumière en chaleur, le plus souvent pour des chauffe-eau. Pour cela, les rayons du soleil passent d'abord par une plaque de verre transparente à la lumière. Sous ce verre, un absorbeur noir (plaque de métal recouverte d'une fine couche de chrome) retient 80 à 90% des rayons lumineux et les transforment en chaleur grâce au transfert thermique par rayonnement.

En s'échauffant, l'absorbeur émet des infrarouges. Ces infrarouges sont bloqués entre la plaque de métal et la plaque de verre, c'est le principe de l'effet de serre. Ainsi, l'air entre les deux plaques s'échauffe et améliore le rendement. Par conduction, l'énergie thermique ou chaleur de l'absorbeur est transmise à un circuit d'eau (c'est le liquide caloporteur). Celle-ci s'échauffe et est ensuite acheminée vers un ballon d'eau chaude à l'aide d'une pompe, ou bien par la simple gravité.

Dans l'accumulateur, le liquide caloporteur chaud parcourt un circuit et transfère sa chaleur à l'eau domestique.

L'angle d'incidence joue un rôle majeur pour les rendements du panneau. Il est défini selon l'équation suivante :

$$R = \sin \beta \times 100$$

Avec R le rendement en%

$\beta$  l'angle d'incidence en °

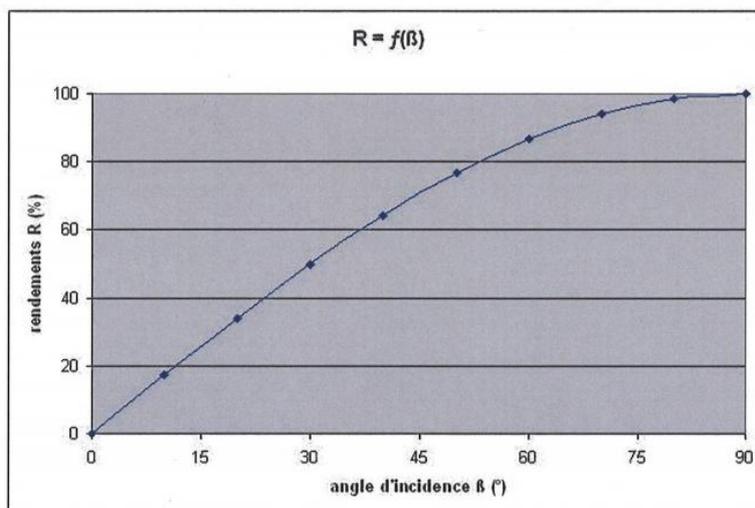
Ainsi, comme on pouvait s'en douter, le rendement est maximal lorsque les rayons arrivent perpendiculairement au panneau.

$$R = \sin \beta \times 100$$

$$R = \sin 90^\circ \times 100$$

$$R = 100 \%$$

Voici donc le graphique représentatif du rendement en fonction de l'angle d'incidence :



L'angle d'incidence est directement lié à l'orientation et à l'angle d'inclinaison du panneau. Globalement, les rayons du soleil viennent donc plus du Sud que des autres directions. A midi, lorsque le soleil est au zénith et donc plein Sud, le rayonnement est le plus intense. La meilleure orientation pour un panneau solaire est donc vers le Sud.

Le Luxembourg se trouve à une latitude 49° Nord, ainsi, l'angle d'inclinaison idéal est 49° Sud, le panneau se retrouvant donc perpendiculaire aux rayons du Soleil. Cependant, selon les saisons, l'inclinaison de la Terre varie. Pour garder une production d'énergie du panneau la plus régulière possible tout au long de l'année, on va garder l'angle de 49° Sud.

On ne choisit cependant pas l'inclinaison de son toit :

- Si le panneau est incliné d'un angle de moins de 49°, la production d'énergie sera importante en été mais faible en hiver.

- Inversement, si le panneau est incliné d'un angle de plus de 49°, la production d'énergie sera importante en hiver mais faible en été.

Récapitulatif :

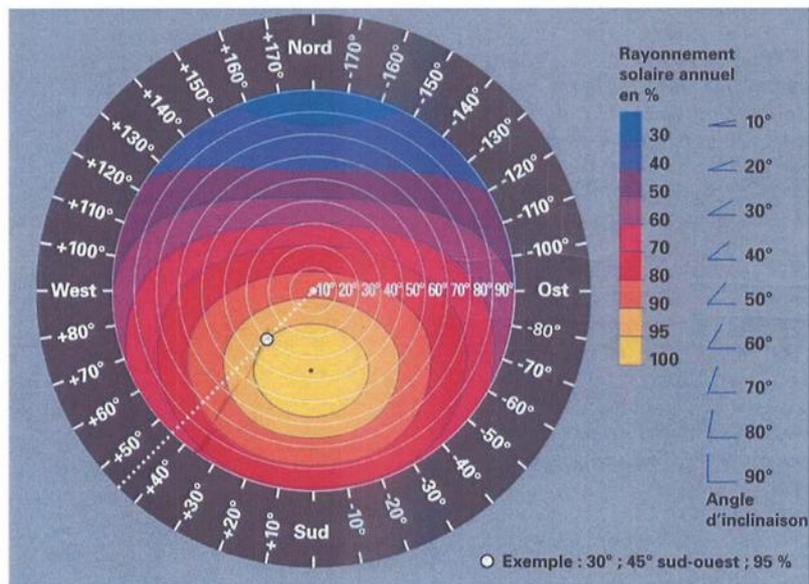


Figure 7 : Influence de l'orientation, de l'inclinaison et de l'ombrage sur l'énergie rayonnée

## Chaudière bois pellet

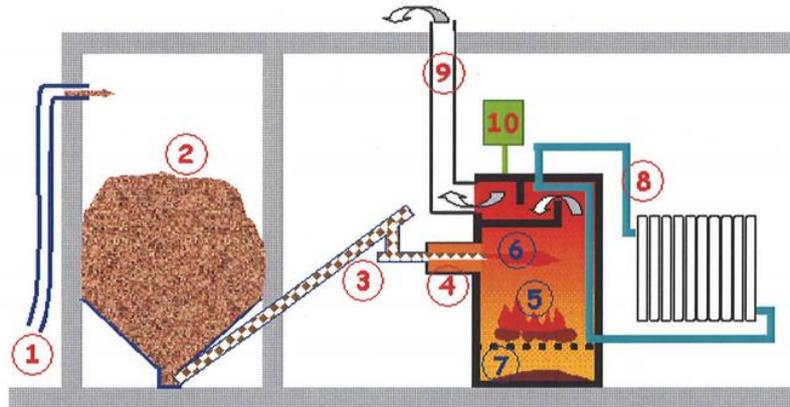
Le granulé de bois est un petit cylindre de sciure de bois très fortement compressée. Sa haute densité énergétique et sa fluidité en font un combustible moderne permettant l'automatisation complète des systèmes de chauffage. Ceci fait actuellement son succès en Europe car le confort d'utilisation est proche de celui du mazout ou du gaz. La matière première est finement broyée puis séchée et comprimée. Le séchage est réalisé avec des chaudières à déchets de bois, garantissant ainsi un bon bilan écologique. En effet, la consommation d'énergies fossiles émet des gaz à effet de serre et provoque le réchauffement global de la planète. Par contre, le bois est neutre car la quantité de CO<sub>2</sub> émise lors de la combustion est complètement absorbée par les arbres de remplacement, dans le cadre du cycle naturel du carbone.

La fourniture du granulé de bois ne demande que 5 à 10% de l'énergie contenue dans le combustible pour collecter le bois, le sécher, le transformer et le transporter.

La technologie des poêles et des chaudières à granulés permet un rendement de 80 à 95 % selon les appareils et les conditions de fonctionnement. En comptabilisant l'énergie consommée à la chaleur produite, y compris les étapes de transport et raffinage, le chauffage au bois émet 40 kg de CO<sub>2</sub> par MWh de chaleur utile alors que les chaufferies au gaz, au fioul et à l'électricité émettent respectivement 222kg, 466kg et 180 kg de CO<sub>2</sub> par MWh. Ainsi, l'utilisation du bois permet de diviser les émissions de CO<sub>2</sub> par 12 par rapport au fioul et par 6 par rapport au gaz.

Les chaudières à granulés sont des compléments naturels à l'utilisation de l'énergie solaire dans le bâtiment. Les chaudières sont équipées d'une trémie intégrée qui alimente le foyer en combustible grâce à une vis sans fin et des ventilateurs amènent l'air de combustion.

Des fabricants proposent des versions eau chaude qui permettent un raccordement sur le réseau de chauffage central.



- 1. Raccord pour la livraison des granulés 2. Silo de stockage
- 3. Vis sans fin d'alimentation 4. Brûleur à granulés 5. Foyer bûches 6. Foyer granulés
- 7. Bac à cendres 8. Circuit eau chaude et chauffage central
- 9. Cheminée 10. Armoire de régulation

**Figure 8 : Schéma de principe d'une chaudière granulée**

La chaudière à granulés est la technologie de chauffage central au bois la plus automatique. Elle nécessite l'installation d'un silo relié au foyer par un système d'alimentation automatique. L'alimentation du silo se fait au moyen d'un camion-citerne équipé d'un compresseur qui propulse le produit jusqu'à plusieurs dizaines de mètres à l'horizontale et plus de 10 mètres en vertical. Cette technique d'approvisionnement permet de placer le silo pratiquement où l'on veut.

L'IFSB possède une chaudière bois de 100Kw qui normalement doit fonctionner à 80%, la chaudière gaz à condensation est utilisée seulement en hiver en appoint à hauteur de 20%.

## Chaudière gaz à condensation

Transformer de la vapeur en liquide s'accompagne d'une récupération de chaleur et donc d'énergie. C'est le principe de base de la condensation en chauffage : récupérer l'énergie contenue dans la vapeur d'eau présente dans les fumées.

Avant d'être évacuées par la cheminée, les fumées très chaudes, produites par la combustion du gaz, traversent un échangeur-condenseur dans lequel circule l'eau de la vapeur d'eau contenue dans les fumées se condense sur l'échangeur qui récupère sa chaleur dite latente. Les fumées sont alors évacuées à environ 70°C au lieu de 200°C avec une chaudière traditionnelle. Elles réchauffent alors l'eau du circuit de chauffage et s'ajoutent à la chaleur de la combustion. L'eau résultant de la condensation (les condensats) est évacuée, quant à elle, vers l'égout.

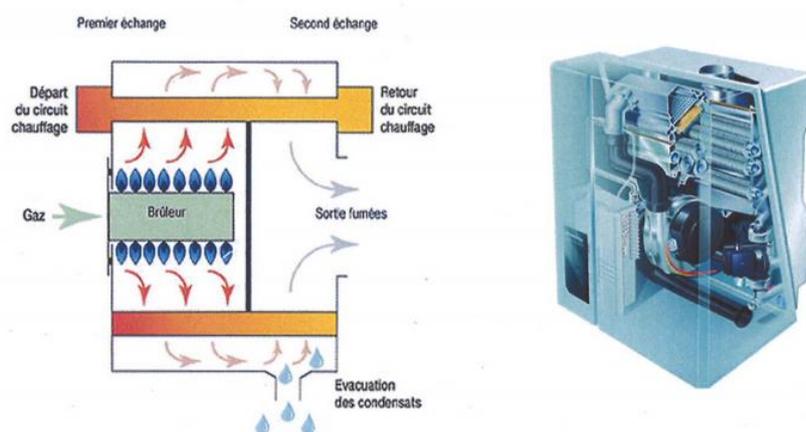


Figure 9 : Schéma de principe chaudière gaz

La récupération de la chaleur latente contenue dans la vapeur d'eau des fumées et restituée au circuit de chauffage permet d'atteindre un rendement supérieur à 100 %.

Les chaudières à condensation donnent ainsi la possibilité de réduire votre consommation de :

- . 15 à 20 % par rapport à une chaudière standard récente
- . 30 à 40 % par rapport à un modèle de plus de 15 ans

En France, elle devient, petit à petit, la chaudière de référence en termes d'économies d'énergie puisqu'elle est vouée à être le standard de la réglementation thermique RT 2012. La chaudière à condensation est déjà un standard de référence dans des pays comme le Royaume-Uni, les Pays-Bas et l'Allemagne.

Pour bénéficier pleinement des rendements de 100%, le régime de température du chauffage doit être bas. On commence à condenser avec des retours inférieurs à 55°C. Ce qui est le cas pour la production d'eau chaude sanitaire. De fait, ces chaudières sont idéalement associées à un plancher chauffant et à des radiateurs en mode chaleur douce.

De plus, elles peuvent être idéalement associées à un système de chauffage solaire. La chaudière à condensation doit sa dénomination au fait que, pour produire la chaleur, elle utilise non seulement le pouvoir calorifique inférieur (PCI d'un combustible mais également son pouvoir calorifique supérieur (PCS).

### La Pompe à chaleur avec capteur à air statique.

La PAC est un dispositif thermodynamique qui permet de transférer la chaleur d'un environnement froid (et donc de le refroidir encore) vers un milieu plus chaud (et donc de le réchauffer), alors que la chaleur se diffuse naturellement du plus chaud vers le plus froid jusqu'à l'égalité des températures.

Le COP de toute pompe à chaleur augmente avec la température de la source froide et diminue avec celle de la source chaude ; il peut atteindre 5 à 7 en été pour de l'eau de piscine (air à 25°C pour de l'eau à 28°C).

Les pompes à chaleur existent depuis longtemps et peuvent alimenter divers types de diffuseurs de chauffage : plancher chauffant rafraichissant, split et multisplits, chauffage central à eau, système centralisé à air ou ventilo-convecteur.

On classe les pompes à chaleur selon la source de captage des calories ambiantes.

Un chauffage d'appoint est généralement prévu au moment de l'installation pour fournir un complément à ces dispositifs.

#### Principe

On aspire l'air extérieur d'un côté de la maison, puis on le rejette après avoir prélevé une partie des calories. Ces calories sont alors concentrées et échangées vers le circuit de chauffage. Il est nécessaire de prévoir un trou d'aspiration de l'air extérieur et un d'expulsion

Il faut absolument séparer les deux orifices d'admission et d'échappement d'air pour éviter que les deux flux ne se court-circuitent.



Figure 10 : Schéma de principe P.A.C. capteur à air statique

Les pompes réversibles sont capables de faire l'inverse: en mode rafraîchissement, elles récupèrent les calories de l'intérieur pour les diffuser à l'extérieur. Le fluide traverse l'unité intérieure et récupère la chaleur de la pièce. Grâce à cet apport d'énergie, il passe de l'état liquide à l'état gazeux puis largue ses calories à travers l'unité extérieure en retrouvant sa forme liquide. Un ventilateur les disperse alors dans l'air ambiant.

Deux technologies existent :

Les systèmes à détente directe ou mono-circuit où le fluide frigorigène passe directement dans le sol chauffant ou dans les convecteurs. Le circuit de captage joue le rôle d'évaporateur et celui de chauffage assure la condensation.

Les systèmes à fluides intermédiaires, quant à eux, utilisent des circuits séparés pour le captage, la pompe à chaleur et le chauffage. Un peu plus coûteux, mais plus performants, notamment pour le rafraîchissement, ils utilisent moins de fluide frigorigène.

### Le puits Canadien

Un échangeur de type Air/Sol est un système appelé "puits canadien" ou "puits provençal", qui consiste à utiliser comme entrée pour la maison, de l'air que l'on a fait circuler dans un tuyau enterré à une certaine profondeur.

La température du sous-sol est moins variable que celle de l'air extérieur, cela permet d'avoir une entrée d'air plus tempérée. En hiver, l'air est réchauffé et en été il est rafraîchi.

Ce système est utilisé traditionnellement en Amérique du nord (et non pas au Canada comme son nom le laisse croire) pour maintenir hors gel les maisons sans chauffage pendant l'hiver.

Profondeur	T° moyenne hiver	T°sol/T°prof	T° moyenne été	T° sol/T° prof.
sol	2,7°C		16,3°C	
2 m	7,2°C	168%	12,1°C	25%
4 m	9°C	238%	9,8°C	39%
6 m	9,8°C	268%	9,3°C	42%
8 m	9,7°C	265%	9,1°C	44%
10 m	9,7°C	265%	9,3°C	42%

On peut faire deux remarques sur ce tableau:

On obtient un gain positif en hiver (on gagne des calories) et une réduction en été (on perd des calories) c'est exactement le mode de fonctionnement du dispositif. Le gain est le plus prononcé à 4m, au-delà il devient inférieur à 5%. De plus, pour des raisons évidentes de coût, il est nécessaire de placer le tuyau entre 2m et 4m. Considérons que la température de la terre est stable à 10°C.

En hiver:

L'air froid extérieur va circuler dans un milieu plus chaud, donc va se réchauffer. S'il fait 5°C l'air va tendre vers 10°C.

En été:

L'air chaud extérieur va circuler dans un milieu plus froid, donc il va se refroidir. S'il fait 30°C l'air va tendre vers 10°C. Dans ce cas, il peut y avoir de la condensation.

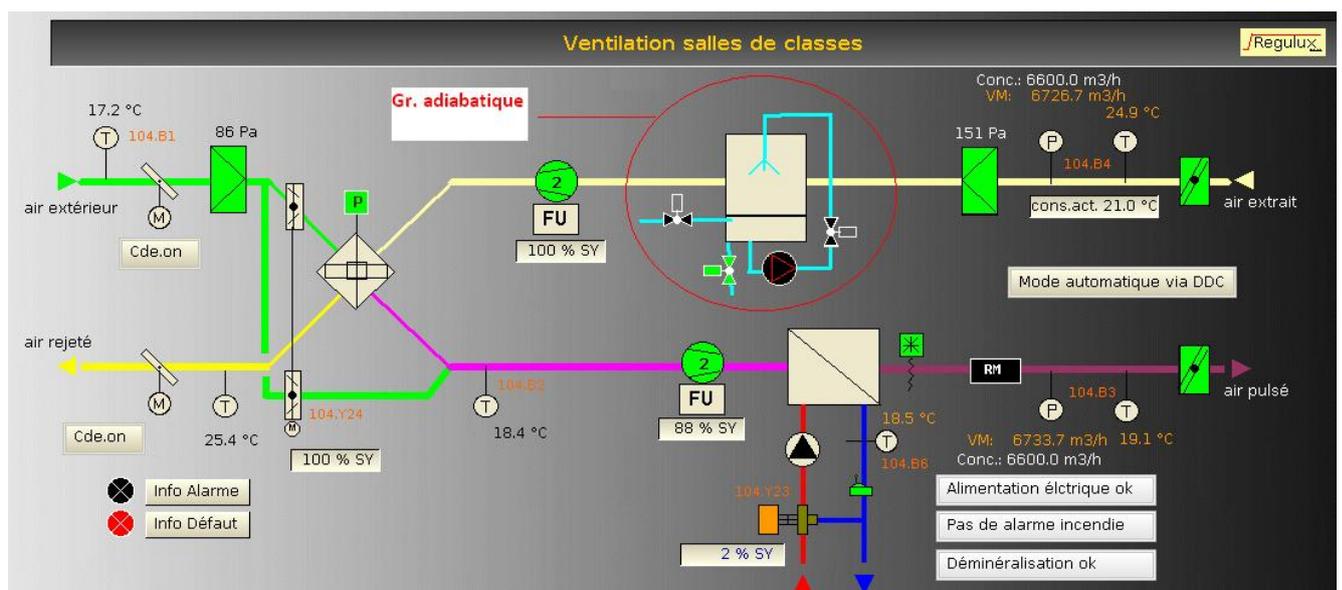
### Les groupes de ventilations :

Les groupes de ventilations servent à renouveler l'air des pièces. Différents groupes de ventilation sont installés dans le bâtiment et sont placés aux endroits les plus favorables suivant les pièces qu'ils ont à ventiler.

Il existe en tout 6 groupes de ventilations :

- Ventilation auditorium
- Ventilation Restaurant
- Ventilation locaux sanitaires
- Ventilation Classes
- Ventilation Cuisine
- Ventilation administration et bureaux

Tous les groupes de ventilation ne fonctionnent pas de la même façon. Certains groupes fonctionnent avec un refroidissement dit « adiabatique », d'autres possèdent le système de refroidissement via le puits canadien. Un groupe adiabatique est placé sur le retour de ventilation. Il permet de refroidir l'air à l'aide d'une tour de refroidissement avec comme fluide de l'eau.



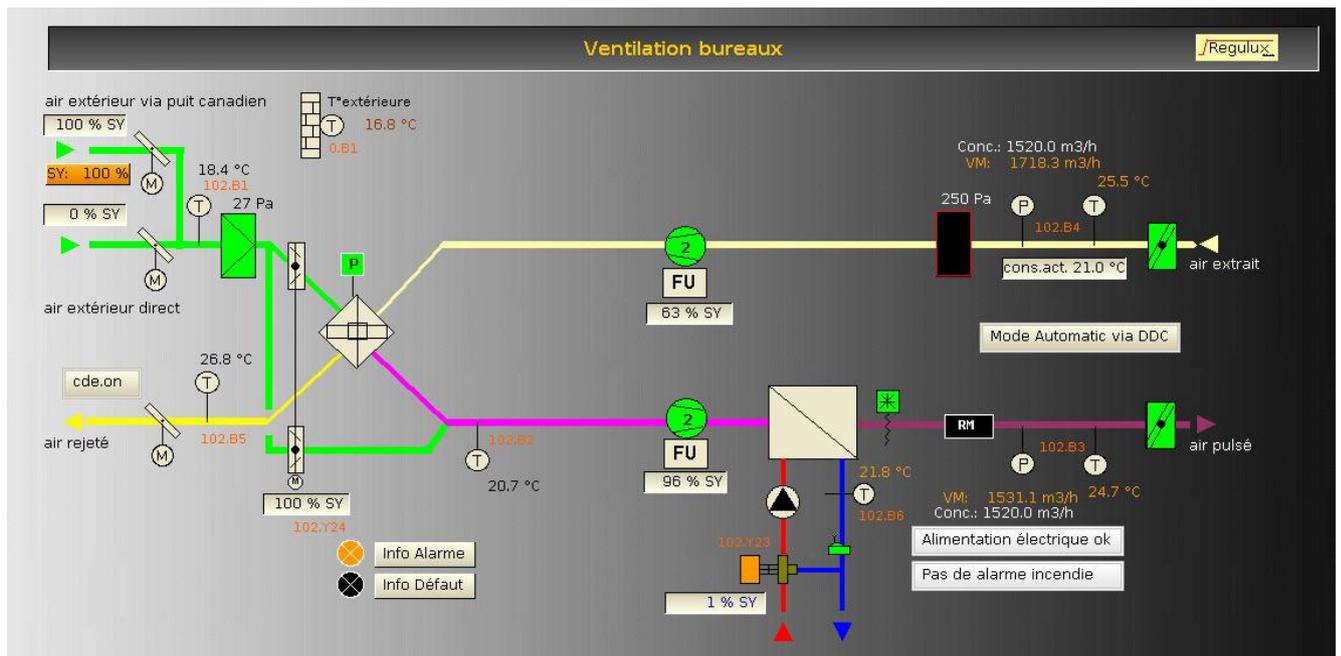


Figure 11 : Vue graphique de différentes ventilations

### 2.3. Règlements et confort.

Lorsque l'on optimise un bâtiment, certaines normes sont néanmoins à respecter notamment pour le confort des salariés afin d'avoir de bonnes conditions de travail.

Le confort des personnes varie en fonction de trois paramètres : le CO<sub>2</sub>, la température et le taux d'humidité.

#### Le CO<sub>2</sub> :

Si le taux de ventilation d'une salle de réunion est insuffisant, l'air y est rapidement vicié par de multiples agents. En effet, la fumée de cigarette, le gaz carbonique (CO<sub>2</sub> produit par les occupants, les micro-organismes et matières odorantes dont ils sont porteurs,...) maintiennent chaque personne dans une ambiance de plus en plus malsaine : la respiration est moins active, une fatigue prématurée apparaît. Le risque de contamination augmente, ...

L'homme au repos ne consomme qu'environ 0,5 m<sup>3</sup> d'air par heure pour respirer. Selon le type d'activité, ce taux peut atteindre 5 m<sup>3</sup>/h, alors que pour rencontrer le niveau de qualité requis, le taux de ventilation d'un local doit être au minimum de 22 m<sup>3</sup>/h par personne.

Les diverses substances de contamination et de pollution sont les germes pathogènes, les particules radioactives, les poussières, les molécules organiques, les matières odorantes, le gaz carbonique et la fumée de tabac. Certaines de ces substances peuvent être détectées immédiatement, d'autres ne sont pas décelables par les sens, même lorsque leur concentration dépasse la limite admissible.

### Germes pathogènes :

Le rassemblement d'un grand nombre de personnes dans un même local, réunies à une faible distance les unes des autres, augmente la possibilité d'une contamination par la densité de dispersion des facteurs de maladie. Il s'agit de micro-organismes comme les bactéries.

### Gaz carbonique :

En respirant, chaque individu produit de gaz carbonique CO<sub>2</sub>. L'homme au repos rejette dans le local environ 2 l/h de gaz carbonique pour 500 litres/h d'air expiré.

A proprement parler, le gaz carbonique n'est pas dangereux pour la santé tant que sa teneur dans l'air ne dépasse pas 5 000... 6 000 ppm (à l'augmentation de CO<sub>2</sub> expiré correspond une diminution de la teneur en oxygène (O<sub>2</sub>) de l'air mais ceci n'a aucune conséquence sur le niveau d'oxygène nécessaire aux besoins respiratoires). Le CO<sub>2</sub> est avant tout considéré comme un traceur des polluants humains. En effet, si on sent que l'air d'un local où il règne une teneur en CO<sub>2</sub> de 1500 ppm n'est pas "frais", cela est dû aux autres effluents humains dont l'émission est parallèle à l'émission de CO<sub>2</sub>.

### Taux à respecter

On distingue déjà l'air vicié d'un local de l'air extérieur "frais" quand la teneur en CO<sub>2</sub> s'élève à 0,15% en volume (ou 1 500 ppm). La limite maximale de la PEB est de 1000 ppm. Cette valeur sert de base pour définir les taux de ventilation des locaux.

Il existe une relation entre le débit d'air frais et le pourcentage prévisible de personnes insatisfaites (PPD) par la qualité de l'air ambiant. Le graphe ci-après donne ce pourcentage en fonction du volume d'air de ventilation en m<sup>3</sup>/h et par occupant.

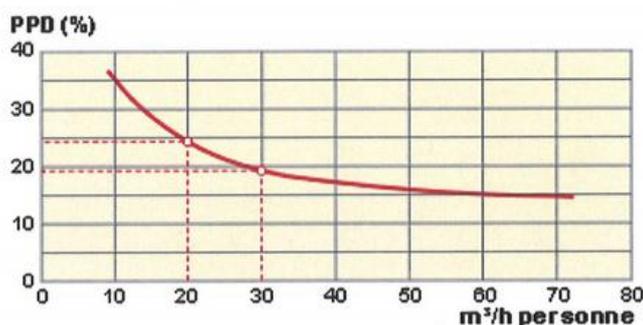


Figure 12 : diagramme PPD

Une concentration de CO<sub>2</sub> maximale de 0,15 % (ou 1500 ppm) en volume correspond à un renouvellement d'air de 20 m<sup>3</sup>/h/personne, soit un pourcentage prévisible d'insatisfaits de près de 25%. Les normes internationales suggèrent de n'admettre que 20% maximum de personnes insatisfaites, ce qui correspond à un renouvellement d'air de 30 m<sup>3</sup>/h par personne.

Norme européenne (pour les locaux sans fumeur)	EN	13779
<b>Catégorie de qualité d'air</b>	<b>Débit d'air neuf</b>	
Excellente qualité	36 [m <sup>3</sup> /h.pers]	
Qualité standard	25 [m <sup>3</sup> /h.pers]	
Faible qualité mais acceptable	15 [m <sup>3</sup> /h.pers]	

Figure 13 : Tableau des débits d'air

### La température :

Dans les conditions habituelles, l'homme assure le maintien de sa température corporelle autour de 36,7°C. Cette température est en permanence supérieure à la température d'ambiance, aussi un équilibre doit-il être trouvé afin d'assurer le bien-être de l'individu.

Confort = équilibre entre l'homme et l'ambiance

La figure ci-dessous considère le sentiment de confort thermique exprimé par les sujets eux-mêmes. Il s'agit de pourcentages prévisibles d'insatisfaits (PPD), exprimés sur l'axe vertical, pour des personnes au repos en position assise, ou pour des personnes effectuant un travail léger (: travail de bureau).

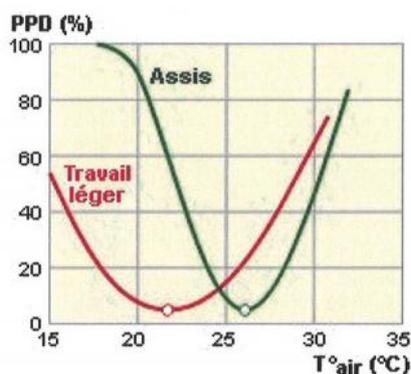


Figure 14 : Diagramme PPD en fonction de la température

### L'humidité:

L'humidité a relativement peu d'impact sur la sensation de confort d'un individu dans un bâtiment. Ainsi, un individu peut difficilement ressentir s'il fait 40% ou 60 % d'humidité relative dans son bureau.

L'inconfort n'apparaît que dans des situations extrêmes soit une humidité relative inférieure à 30% soit une humidité relative supérieure à 70 %.

De faibles niveaux d'humidité (en dessous de 30 %) donnent lieu à certains problèmes :

Augmentation de l'électricité statique (petites décharges lors du contact avec des objets métalliques),

A noter que la présence de décharges électrostatiques n'est pas forcément imputable à la sécheresse de l'air (un tapis non traité à l'antistatique peut également provoquer ce type de problème), mais l'air sec (peu conducteur) remplace ce phénomène. Gêne et irritation accrue à la fumée de tabac (du fait d'un abaissement du seuil de la perception des odeurs). Augmentation de la concentration en poussières dans l'air (diminution de la taille des particules) et donc de leur vitesse de sédimentation et dès lors du nombre de bactéries aéroportées, ce qui serait susceptible d'induire une augmentation de la fréquence de maladies respiratoires en hiver lorsque l'humidité de l'air est faible.

Les gains énergétiques entraînés par une diminution drastique de l'humidification de l'air doivent être comparés aux pertes entraînés par un absentéisme accru...

De hauts niveaux d'humidité (au-delà 70 % HR) donnent lieu à une croissance microbienne importante et à des condensations sur les surfaces froides :

C'est ce qu'indique le diagramme ci-dessous, précisant la plage de taux d'humidité ambiante optimale d'un point de vue hygiénique (d'après Scofield et Sterling) (Doc.Dri-Steem/Pacare).

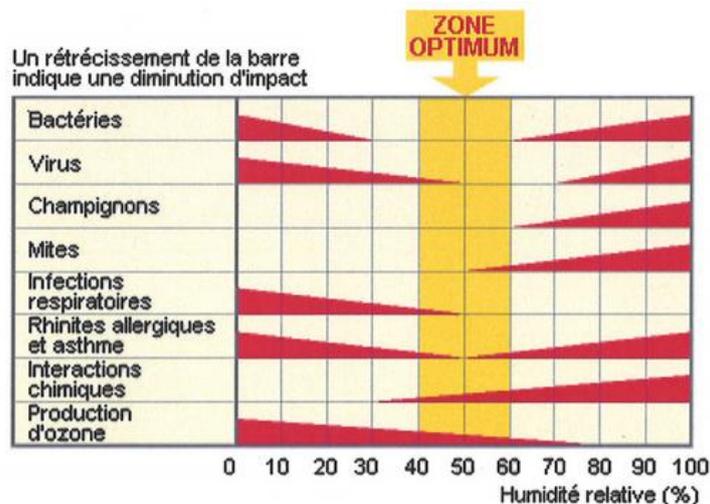


Figure 15 : Graphique du confort en fonction de l'humidité relative

Pour un confort optimal et pour une température de l'air aux environs de 22°C, on peut dès lors recommander que l'humidité relative soit gardée entre 40 et 65%.

Plus précisément, on peut définir une plage de confort hygrothermique dans le diagramme suivant (extrait de l'article de R. Fauconnier L'action de l'humidité de l'air sur la santé dans les bâtiments tertiaires parut dans la revue Chauffage Ventilation Conditionnement).

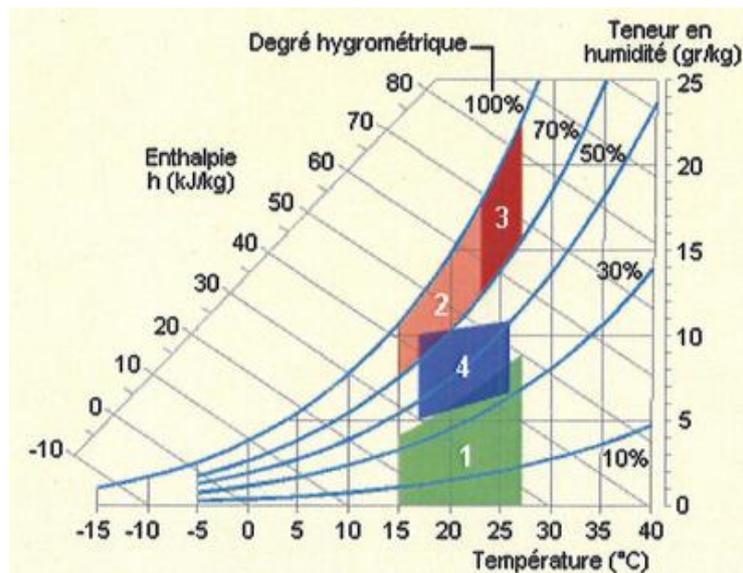


Figure 16 : Graphique confort optimal

1. Zone à éviter vis-à-vis des problèmes de sécheresse. 2. et 3 : Zones à éviter vis-à-vis des développements de bactéries et de microchampignons. 3. Zone à éviter vis-à-vis des développements d'acariens. 4. Polygone de confort hygrothermique.

La vitesse de l'air (et plus précisément la vitesse relative de l'air par rapport à l'individu) est un paramètre à prendre en considération, car elle influence les échanges de chaleur par convection et augmente l'évaporation à la surface de la peau.

A l'intérieur des bâtiments, on considère généralement que l'impact sur le confort des occupants est négligeable tant que la vitesse de l'air ne dépasse pas 0,2 m/s.

A titre de comparaison: se promener à la vitesse de 1 km/h produit sur le corps un déplacement de l'air de 0,3 m/s. Le mouvement de l'air abaisse la température du corps, facteur recherché en été, mais pouvant être gênant en hiver (courants d'air).

Vitesses résiduelles	Réactions	Situation
0 à 0,08 m/s	Plaintes quant à la stagnation de l'air.	Aucune.
0,13 m/s	Situation idéale.	Installation de grand confort.
0,13 à 0,25 m/s	Situation agréable, mais à la limite du confort pour les personnes assises en permanence.	Installation de confort.
0,33 m/s	Inconfortable, les papiers légers bougent sur les bureaux.	Grandes surfaces et magasins.
0,38 m/s	Limite supérieure pour les personnes se déplaçant lentement.	Grandes surfaces et magasins.
0,38 à 0,5 m/s	Sensation de déplacement d'air important.	Installations industrielles et usines où l'ouvrier est en mouvement.

Figure 17 : Confort en fonction de la vitesse de l'air

### 3. Les analyses et améliorations.

#### 3.1 Les problèmes du bâtiment.

La suite du projet portait sur une analyse de consommation énergétique du bâtiment. Pour cela, il a fallu obtenir les fichiers concernant les factures détaillées d'électricité et de chauffage. La part la plus importante en termes de coût sera privilégiée pour l'optimisation. La question principale à se poser est de savoir comment l'énergie est utilisée dans le bâtiment, car dans certains cas la consommation ne pourra probablement pas être améliorée.

#### Comment est utilisée l'électricité?

Elle est notamment utilisée, pour les appareils multimédia tels que les vidéoprojecteurs, les ordinateurs, etc..... L'électricité est aussi consommée pour la partie éclairage du bâtiment et également pour tous les appareils concernant la formation à la construction (de la perceuse jusqu'à l'engin de chantier!)

#### Comment est réparti le chauffage?

Le chauffage utilise essentiellement 2 types d'énergies, le gaz et les granulés à bois comme déjà cité dans la partie précédente. La production d'eau chaude est utilisée en grande partie pour l'eau sanitaire, mais également pour les circuits radiateurs, batteries chaudes pour la ventilation ainsi que pour les panneaux rayonnant du hall de formation. Une petite partie est dédiée au plancher chauffant.

#### Les problèmes rencontrés.

Après un bilan des différentes installations présentes sur le site, plusieurs anomalies ont été détectées très rapidement.

La température : en effet celle-ci s'avère être beaucoup trop importante dans les salles de cours, ainsi que dans les bureaux, température qui ne correspond pas du tout à la température de confort d'une salle de travail soit 21°C. Dès que la température extérieure est supérieure à 22°C, la température dans les bureaux peut atteindre rapidement 24°C et même plus.

Les débits des ventilations : Les groupes de ventilation tournent à des débits supérieurs à la consigne donnée. Chaque groupe a été dimensionné pour un certains nombres de pièces à ventiler la valeur de consigne est donc donnée pour le nombre total de pièces.

L'électricité : Une grande partie de l'énergie consommée provient des installations électriques mises à disposition pour le personnel (ordinateur, téléphone, photocopieur etc.....), ainsi que les systèmes énergétiques mal utilisés (groupe de ventilation)

La régulation : Certains systèmes de chauffage comme les chaudières ou les batteries de chauffage ne fonctionnent pas comme elles devraient fonctionner. La chaudière gaz par exemple fonctionne à la place de la chaudière pellets pour le chauffage de l'eau sanitaire en été alors que celle-ci ne devrait qu'intervenir en appoint pendant la période hivernale.

### 3.2 Partie électrique.

#### L'éclairage

Une installation d'éclairage bien ajustée peut contribuer à la rentabilité de l'entreprise à travers des gains économiques, des gains sociaux et des gains environnementaux.

La première étape de cette optimisation a été de réduire le temps d'éclairage des luminaires munis de détecteur. Chaque détecteur a un temps de programmation d'éclairage. La réduction de cette durée sur les points stratégiques peut s'avérer être une réduction de consommation électrique.

Prenons l'exemple d'un couloir et des sanitaires, le temps d'éclairage actuel est de 10 minutes pour des luminaires consommant 64 W chacun. Après une étude statistique de passage on constate que l'éclairage est trop longtemps allumé.

En les réduisant à 10 secondes pour le couloir et à 5 minutes aux sanitaires, on gagne non seulement sur la réduction de consommation mais également sur la durée de vie du luminaire.

Voici un calcul détaillé de la démarche entreprise :

Luminaire à une puissance de consommation de 64W pour 10 minutes de temps d'éclairage.

On effectue le calcul suivant :

$$64 \times 10 \times 60 = 38400 \text{ J}$$

Le prix du Kwh au Luxembourg est d'environ 0,12 euros

$$\text{Comme } 1\text{Kwh} = 3600000 \text{ J}$$

Le luminaire va donc coûter pour 10 minutes ;  $(38400 \times 0,12) / 3600000 = 0,00127$  euros/luminaire/passage

Pour une fréquence de passage de 10/jour on obtient à l'année 4,5 euros/luminaire.

Soit 144 euros pour tous les luminaires.

Avec une réduction du temps à 5 minutes aux sanitaires on obtient la moitié 0,22 euros/luminaire. Dans le couloir on obtient 0,00769 euros pour un temps d'éclairage de 10 secondes.

Un local sanitaire comprend 3 parties (WC hommes, dames, handicapés) et un couloir.

Nous obtenons :

-1,76 euros/an/passage pour l'ensemble en considérant 1 lampe par pièce pour 10 min d'allumage.

-0,667 euros/an/passage en réduisant les temps.

Le résultat final pour toutes les lampes nous donne une réduction de coût de 67 euros juste sur les sanitaires et couloir. En cumulant toutes les réductions de temps d'éclairage, on arriverait à réduire la facture de 200 euros sans compter la durée de vie des lampes qu'il faudrait également prendre en compte.

Mais cette partie peut encore être améliorée en changeant le type de luminaire. Actuellement les néons mis en place sont des néons fluorescents dans la plupart des pièces. Des tubes au radium consommant 35W environ avec un flux lumineux de 3650 lm max dimmable.

En changeant ces tubes par des L.E.D. pour un même flux lumineux, la consommation sera encore plus faible.

Exemple : Tube fluo compact bureaux = 35W de consommation

Tube L.E.D. à même puissance lumineuse = 24W

Temps de fonctionnement moyen/jour 4h.

Réduction de consommation de 40 euros/an pour les bureaux.

### Systemes énergétiques

Les systèmes énergétiques et notamment les groupes de ventilations fonctionnent quasiment tous sur les mêmes horaires. Une 1<sup>er</sup> optimisation avait permis de réguler les groupes en fonctionnement jour c'est-à-dire à pleine puissance lors de l'occupation du bâtiment et une régulation nuit qui permet aux groupes de fonctionner à moyen régime. Mais lors de l'occupation du bâtiment tous les groupes démarrent au même moment. Au Luxembourg, les entreprises sont facturées sur les pics de consommations, ce qui est le cas ici. Il a donc fallu modifier tous les horaires afin d'éviter ces pics de surconsommations.

Une autre solution peut également être apportée sur certains groupes de ventilation. Notamment pour le groupe des salles de cours, en effet celui-ci fonctionne sans interruption pendant la journée malgré une absence complète de personnes dans les salles.

En ajoutant des volets d'ouverture et de fermeture à l'entrée de la ventilation cela permettrait de faire tourner les ventilateurs qu'en fonction du nombre de salles occupées.

Une salle de formation à un volume de 390 m<sup>3</sup> pouvant accueillir en général 16 personnes. Il faut apporter un débit d'air de :

$$30 \times 16 \times 2 = 960 \text{ m}^3/\text{h}$$

30 : débit d'air/pers/h  
16 : le nombre de personne  
2 : taux de brassage pour le chauffage

Il y a en tout 7 salles de formation.

La ventilation tourne à 100% pour les 7 salles. Celle-ci étant toutes identiques, on peut dire qu'une salle utilise 14,3% de la consommation totale du groupe de ventilation.

Le groupe consomme un total de 2560 W à la pulsion et 2320 W à l'extraction.

Voici la représentation graphique du dispositif à mettre en place :

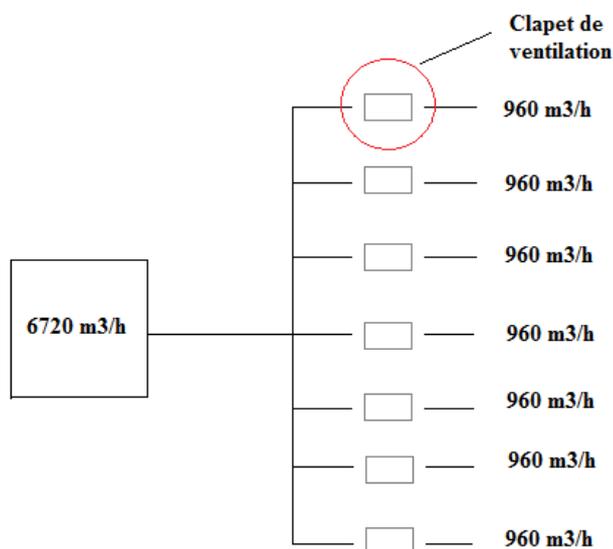
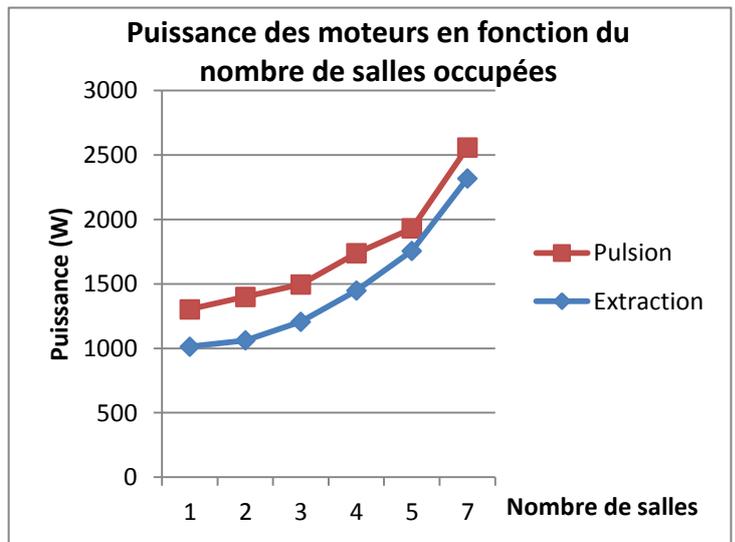


Figure 12 : Schéma du nouveau système de régulation pour la ventilation des salles de classe

Avec ce dispositif la consommation énergétique ne pourrait que baisser pour un achat d'environ 150 euros par clapet. Ce système serait vite rentabilisé. Nous avons simulé ces clapets en utilisant les variateurs installés sur les moteurs des ventilateurs. Les mesures ont été prises pour les différents débits d'air souhaité. Voici ce que l'on obtient :

Nb de salle	Ventilation	Val mesurée (A)	Pélec (W)	débit (m3/h)
1	Puls	2,7	1303,27	1034
	Extra	2,1	1013,65	888
2	Puls	2,9	1399,81	1789
	Extra	2,2	1061,92	1745
3	Puls	3,1	1496,35	2636
	Extra	2,5	1206,73	2593
4	Puls	3,6	1737,69	3700
	Extra	3	1448,08	2564
5	Puls	4	1930,77	4400
	Extra	3,64	1757,00	4224
7	Puls	5,3	2558,27	6700
	Extra	4,8	2316,92	6400



La consommation d'une salle de cours sera alors de 2316 W pour un coût de 230 euros/an en prenant en moyenne 8h de cours/jour pour 15 jours d'utilisation/mois avec 11 mois d'occupation.

Pour 7 salles on obtiendrait 772 euros/an pour 4874W de consommation. Actuellement la ventilation tourne 12h/jour avec 22 jours/mois pour les 7 salles de cours. La puissance est toujours la même mais cette fois le coût est de 1700 euros/an. Soit une différence de 928 euros/an.

Concernant le groupe sanitaire, des économies importantes peuvent être faites. En effet le débit de ventilation a été calculé pour un fonctionnement simultané de tous les WC. Hors ceux-ci ne sont jamais utilisés tous en même temps. Nous avons décidé, d'abaisser de moitié les puissances des moteurs de reprise et de pulsion des ventilateurs du groupe. Nous obtenons les résultats suivants :

Moteur pulsion		Moteur reprise	
Ampère	Puissance (W)	Ampère	Puissance (W)
1,6	689	1,8	775
1,1	473	1,1	473

De plus en diminuant le débit, le bruit de la bouche de pulsion est moins important (amélioration du confort acoustique).

### Les appareils multimédias.

Sur le même principe que les lampes, les appareils multimédias même en veille consomment toujours une infime quantité d'électricité. Dans un 1<sup>er</sup> temps il faut donc effectué un inventaire complet de tous les appareils du bâtiment mise à disposition pour le personnel. La seconde partie consiste à faire une étude bibliographique des appareils afin de connaître la consommation exacte en fonctionnement ainsi qu'en veille. Une fois la bibliographie faite, une étude d'utilisation est nécessaire pour connaître les horaires de fonctionnement en veille et en « marche » afin de calculer les temps superflu de mise sous tension des appareils. Par exemple les téléphones fonctionnent 24h/24h, alors que ces derniers ne sont d'aucune utilité de 18h à 8h (horaires où normalement le personnel ne travaille pas). Un tableau sera donné en annexe 7 pour évaluer la consommation de chaque appareil et leur coût sur les plages horaires inutiles.

Les économies électriques réalisées sont les suivantes :

type d'équipement	Economies réalisées (euros/an)
Eclairage	240
Multimédia	545,05
Ventilation sanitaire	275,28
Ventilation classe	928
Total	1988,33

Les résultats obtenus dans le tableau ci-dessus sont des valeurs très moyenne et ne pas en aucun cas être sûr. Cela est du notamment aux différentes hypothèses émises comme le nombre de passage/ jour pour les luminaires ou encore le nombre d'heures de fonctionnement pour la ventilation des salles de classe.

### 3.3 Partie chauffage

Lors de la première optimisation du bâtiment les courbes de chauffe sur les radiateurs, le chauffage au sol, les batteries chaudes des groupes de ventilations ont déjà été ajustées. Mais le principal problème au niveau du chauffage reste la température trop importante dans les pièces en général ainsi qu'une mauvaise régulation de la chaufferie.

Après mes premières recherches, j'ai constaté sur les vues graphiques du logiciel de gestion (qui permet en temps réel de connaître la température en quelques points des installations), que les températures dans les groupes de ventilations paraissaient trop élevées ; sans passer par l'échangeur via un by-pass la température de pulsion augmente alors que celle-ci ne le devrait pas (environ un  $\Delta T$  de 2 sur la pulsion et un  $\Delta T$  de 1.6 sur l'extraction pour une température extérieur de 19.3°C). Après plusieurs observations de la température en sortie d'échangeur du côté pulsion en fonction de la température extérieur, j'ai constaté que celle ci est toujours élevée et constante.

J'ai donc décidé de couper le groupe de ventilation des bureaux afin d'observer le montage de l'échangeur dans le circuit. En observant l'échangeur j'ai constaté un problème d'étanchéité au niveau des clapets et au niveau de la surface de l'échangeur. En effet celui ci n'est pas ajusté au caisson de ventilation ce qui fait que l'air chaud de l'extraction passe sur le côté de l'échangeur et vient se mélanger à l'air neuf. L'air entrant plus chaud, la température ne pourra donc qu'augmenter en sortie et l'air sera donc pulsé à des températures supérieures à celle désirée.

Pour résoudre ce problème, il faut étanchéifier le caisson à l'air et changer les clapets. Comme une extension du bâtiment est prévue certains de ces groupes seront changés entièrement. Aucune modification n'est donc prévue pour le moment sur les groupes.

Afin de garantir un confort optimal dans les bureaux, la température de l'air pulsée ne devrait pas dépasser les 20°C en été. Ce groupe utilise le système du puits canadien qui en été arrive à obtenir en moyenne une température de 18°C. En faisant l'analyse du bâtiment, on constate que les conduites amenant l'air ne sont pas isolées. La démarche ici, a été de calculer les pertes de chaleur dans les conduites, pour savoir si une isolation serait utile.

Voici le calcul détaillé pour les pertes de chaleur :

Hypothèses : la température du couloir est supposée constante à 27°C.

Calcul de la résistance équivalente

$$Req = 1/ (hi.Si) + 1/ (he.Se) + \ln(De/Di)/(2.L.\lambda.\pi) \text{ avec } Si = \pi.Di.L$$

$$Se = \pi.De.L$$

A l'intérieur de la conduite, la convection est forcée car il y a un débit.

- $h_i = (Nu \cdot \lambda) / D_i$  avec  $Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{(1/3)}$  (écoulement dans un tube)  
 $Re = (v \cdot D) / \nu$

Pour le coté extérieur de la conduite, il n'y a pas de débit la convection est donc naturelle.

- $h_e = (Nu \cdot \lambda) / D_e$  avec  $Nu = C \cdot (Re \cdot Pr)^n$  (C et n en fonction du Gr et Pr)  
 $Gr = (g \cdot D^3 \cdot \beta \cdot \Delta T) / \nu^2$

La résistance étant calculé on peut maintenant obtenir le flux thermique échangé.

$$\Phi = \Delta T / R_{eq}$$

A partir de là on écrit la relation suivante

$$\Phi = Q_m \cdot C_p \cdot \Delta T \rightarrow T_s = \Phi / (Q_m \cdot C_p) + T_e$$

Remarque : les propriétés thermiques des différents fluides sont prises à la température de film.

Avec cette démarche, j'ai réalisé un tableau Excel sur les pertes en conduites. L'exemple donné ici est le tableau récapitulatif des pertes au niveau des conduites de bureaux :

<b>Conduite Bureau</b>	<b>T° sortie échangeur puits canadien 18,5°C</b>	<b>T° couloir gaine 27°C</b>
------------------------	--	----------------------------------

	<b>débit m3/h</b>	<b>longueur m</b>	<b>diamètre m</b>	<b>T° entrée bur.</b>
<b>tronçon 1</b>	1020	18	250	19,6
<b>tronçon 2</b>	620	5	200	19,9
<b>tronçon 3</b>	540	3,4	200	20,1
<b>tronçon 4</b>	420	5,5	160	20,43
<b>tronçon 5</b>	340	3,5	160	20,7
<b>tronçon 6</b>	220	4,5	125	21,2
<b>tronçon 7</b>	140	3	125	21,6
<b>tronçon 8</b>	140	5	100	22,2

On remarque que sans isolation, la température augmente avec la longueur de la conduite jusqu'à 3,7 °C. Pour vérifier les calculs, j'ai réalisé des mesures de température de l'air dans la pulsion des bureaux. Les calculs semblent cohérents avec la réalité. Une isolation est nécessaire sur tout le réseau. Si l'isolation est posée, cela permettra en hiver de conserver la chaleur de l'air et donc de réduire la consommation des radiateurs et donc par conséquent réduire l'utilisation des chaudières. A l'inverse en été on pourra conserver l'air frais dans les conduites.

### La régulation des chaudières.

Un des principaux soucis sur les chaudières est l'allumage alterné des 2 chaudières alors que lors de la saison d'été, seule la chaudière bois devrait fonctionner.

La programmation des chaudières est donc à changer. Pour cela, on doit donner un ordre de priorité à chaque installation. Dans le cadre d'un bâtiment basse consommation, la première énergie à utiliser est le renouvelable (les panneaux solaires). Comme mentionné ci-dessus, les panneaux peuvent délivrer une quantité d'énergie suffisante pour alimenter les ballons tampons. Ces ballons servent à alimenter l'ECS et le chauffage sol. Dans le cas où les panneaux ne suffiraient plus à subvenir aux besoins, la chaudière pellets devrait prendre le relais. Pour la saison hivernale, la chaudière gaz devrait venir en appoint des installations solaires et chaudière pellets, afin de garantir une température suffisante.

Une consigne aux ballons doit être appliquée afin de savoir quand les différents systèmes doivent fonctionner. Pour cela, nous allons appliquer une température de consigne de 65°C maximum aux ballons. Ces 65°C sont nécessaires afin d'éviter un développement de bactéries pour l'eau chaude sanitaire (la légionnelle), une température de 40°C sera suffisante pour le chauffage sol.

Une autre étude concernant la partie chauffage aurait été de calculer l'inertie thermique des matériaux du bâtiment. En effet grâce à ce principe, l'énergie thermique peut être "stockée" dans les matériaux. La quantité d'énergie une fois absorbée à son maximum est ensuite dégagée dans les pièces, les murs peuvent être considérés alors comme des "radiateurs" ou des "climatisations". Si l'on connaît par exemple le temps d'absorption et de diffusion du flux par le mur, le puits canadien pourrait refroidir les murs un maximum la nuit quand l'air est frais et pendant la journée, le puits ne fonctionnerait que à 50% de sa capacité car les murs permettrait de refroidir les pièces avec l'énergie quelle a pu stocker pendant la nuit. La même chose pourrait se produire en hiver pour chauffer les murs avec les radiateurs et le puits canadien. Cela permettrait de ne pas utiliser les systèmes de chauffage et de climatisations systématiquement et donc pouvoir faire des économies d'énergies. Mais ce type d'études prennent énormément de temps et malheureusement le délai consacré à cette partie est bien trop court.

## **IV. Conception et modélisation de maison passive.**

Dans le contexte actuel du développement durable et de l'éco-conception, il est important que les bâtiments futurs consomment très peu d'énergie et soit écologiques tant au point de vue construction que dans la durée de vie. L'enjeu des 2 projets qui vont être détaillés ci-dessous est de pouvoir guider des personnes dans leur choix de construction dans l'objectif de pouvoir respecter les critères énergétiques et écologiques lors de la construction ou de la maintenance du bâtiment. Rappelons que d'ici 2020, les maisons construites sur le sol Européen devront être dites " maisons 0 énergie". C'est à dire un bâtiment dont la consommation énergétique au m<sup>2</sup> est très basse, voire entièrement compensée par les apports solaires ou par les calories émises par les apports internes (matériel électrique et habitants).

### 1. Conception d'un guide de maintenance.

Le but de ce projet, est de réaliser un guide maintenance de la maison afin que l'habitant de cette dernière soit en mesure de pouvoir à tout instant intervenir sur des éventuels problèmes dans le but de toujours garder une performance énergétique stable au sein de l'habitat.

La difficulté à la réalisation du guide est de pouvoir le rédiger le plus simplement possible afin de viser le plus grand nombre de personnes et être en même temps très pointu sur l'aspect technique de chaque élément.

La 1<sup>ère</sup> étape consiste à regrouper tous les éléments pouvant constituer les maisons passives avec bien sûr la maintenance à effectuer sur chacun d'eux.

Voici ci-dessous quelques éléments avec quelques détails d'entretien :

- Puits provençal :
  - changement de filtre
  - nettoyage du réseau
- Panneaux solaires : - Inspection des câbles

- Nettoyage des panneaux
- Ventilation :
  - Nettoyage de l'échangeur
  - Vérification des entrées d'air neuf et pièces de tirage et dépression
- Pompe à chaleur :
  - Nettoyage de bornes extérieures
  - Vérification des bouches d'insufflations intérieures

La prochaine étape fût la mise en page de ces éléments de façon simple et explicite.

L'idée m'est donc venue de faire une seule page par élément avec le moins de texte possible. La solution retenue a été la création d'un tableau regroupant les différents entretiens à effectuer sur l'installation avec la fréquence de maintenance, et la personne chargé de l'action, certains contrôles devant être réalisés par des personnes agréées afin de garantir la certification de la maison.

Une fiche type sera donnée en annexe 8.

Mais une " fiche élément " ne rend pas à elle seule la simplicité d'utilisation du guide, il faut également un sommaire compréhensible et un accès rapide aux pages. Ma décision prise ici a été de réaliser un schéma d'une maison en y numérotant tous les différents composants du guide. Chaque page correspondant à un numéro de l'élément de la maison, il suffira de s'y reporter très rapidement au moyen du numéro indiqué en haut de la page.

## 2. Modélisation des performances énergétiques d'un bâtiment.

L'objectif de ce projet concernant l'habitat est cette fois ci de mettre en avant les performances énergétiques du bâtiment que l'on souhaite construire. Le client aura comme outil à sa disposition un logiciel qui sera mis en ligne. Ce logiciel ne concernera que l'habitation pour les particuliers autrement dit uniquement les maisons.

### 2.1 Les indicateurs du logiciel.

Afin que l'utilisateur obtienne une « note » de performances énergétiques de sa maison, il faut que celle-ci soit comparée à un bâtiment de référence c'est-à-dire à une maison standard de 170m<sup>2</sup> (Luxembourg) avec les éléments d'une maison aux bonnes performances énergétiques.

La maison de l'utilisateur du logiciel est évaluée sur 6 grandes catégories :

- Le besoin en chauffage
- Les performances des systèmes techniques
- Le confort et la santé
- Le bilan Carbone ACV
- Les émissions de CO<sub>2</sub> liées l'énergie primaire
- Eau

Mon travail a essentiellement porté sur les calculs et les vérifications dans les domaines du chauffage, des performances techniques, du bilan carbone ainsi que les émissions de CO<sub>2</sub>.

### 2.2 Le fonctionnement général du logiciel.

Le logiciel n'a pas été créé directement dans la société, une entreprise de développeur et de programmeur c'est chargé de la partie "design" du programme. Notre travail a été réalisé sur le logiciel Excel avec tous les programmes de calcul afin que les informaticiens aient juste besoin d'intégrer ces fichiers dans leur programme.

Voici ci-dessous les étapes principales qui vont nous permettre de connaître la performance énergétique du bâtiment.

Le type de maison :

Avant de pouvoir évaluer les pertes thermiques et les installations à mettre en place, il faut au préalable connaître la « forme » et la structure de la maison :

- Année de construction
- Combien de façade (maison isolée = 4 façades, maison mitoyenne = 3 ou 2 façades)
- Type de toiture (toiture pente à 40° ou une ZNC donc aucune inclinaison)
- Maison avec sous-sol ou en terre-plein avec ou sans étage.

Les dimensions des façades varient en fonction de ces paramètres, par contre les fenêtres et les portes gardent les mêmes dimensions et restent toujours orientés de la même façon.

## Le besoin en chauffage :

Afin d'obtenir ce 1<sup>er</sup> critère, un calcul de déperdition est obligatoire sur toute la maison. Une fois toutes les déperditions obtenues, on vient y soustraire tous les apports naturels qui permettent de réchauffer le logement.

## Les différentes déperditions par transmission :

Les calculs sont effectués par structure avec leur composition ;

- Toiture plafond : choisir composition structure + composition isolant

$U_{\text{toiture}} = (12\% \text{ du } U_{\text{structure}} + 88\% \text{ du } U_{\text{isolant}})$  avec  $U_{\text{isolant}} = 1/R_{\text{isolant}}$

$U_{\text{structure}} = 1/R_{\text{structure}}$

La résistance R isolant et structure sont obtenues en fonction des matériaux choisis pour la composition de la toiture.

On obtient au final :

$$H(T)_{\text{toiture}} = U_{\text{toiture}} \times \text{Stoiture} \times \text{coeff de correction de la température} + \text{Coefficient de pont thermique linéaire}$$

- Façades : choisir composition structure + composition isolant

$U_{\text{façades}} = 1/R_{\text{façades}}$

La résistance R façade est obtenue en fonction des matériaux choisis pour la composition des façades.

On obtient au final :

$$\mathbf{H(T) \text{ façades} = U_{\text{façades}} \times S_{\text{façades}} \times \text{coeff de correction de la température} + \text{Coefficient de pont thermique linéaire}}$$

➔ dalle : choisir composition structure + composition isolant

$$U_{\text{dalle}} = 1/R_{\text{dalle}}$$

La résistance R dalle est obtenue en fonction des matériaux choisis pour la composition de la dalle.

On obtient au final :

$$\mathbf{H(T) \text{ dalle} = U_{\text{dalle}} \times S_{\text{dalle}} \times \text{coeff de correction de la température} + \text{Coefficient de pont thermique linéaire}}$$

➔ murs du sous-sol (si il y a un sous sol) : choisir composition structure + composition isolant

$$U_{\text{sous-sol}} = 1/R_{\text{sous sol}}$$

La résistance R sous sol est obtenue en fonction des matériaux choisis pour la composition du sous sol.

On obtient au final :

$$\mathbf{H(T) \text{ sous-sol} = U_{\text{sous sol}} \times S_{\text{sous-sol}} \times \text{coeff de correction de la température} + \text{Coefficient de pont thermique linéaire}}$$

➔ Les fenêtres : choisir composition du châssis + le type de vitrage

$$U_{\text{fenêtre}} = (U_{\text{vitre}} \times S_{\text{vitre}} + U_{\text{chassis}} \times S_{\text{chassis}} + \text{coefficient de pont linéaire} \times \text{périmètre vitre}) / S_{\text{totale fenêtre}}$$

La résistance R isolant et structure sont obtenues en fonction des matériaux choisis pour la composition du sous sol.

On obtient au final :

$$\mathbf{H(T) \text{ fenêtre} = \Sigma (U_{\text{fenêtre}} \times S_{\text{fenêtre}} \times \text{nb de fenêtre identique})}$$

$$H(T) \text{ totale} = H(T) \text{ toiture} + H(T) \text{ façade} + H(T) \text{ Dalle} + H(T) \text{ fenêtre} + H(T) \text{ murs sous sols}$$

### Les déperditions par ventilation :

$H(V) = C_p \times V_n \times n$  avec  $V_n$  : volume total de l'habitat

$C_p$  : capacité thermique

$n$  : taux de renouvellement d'air obtenu en fonction de l'année de l'habitat.

### La déperdition de chaleur annuelle par ventilation et par transmission :

$$\Phi = (HT + HV) \times G_t \times f(ze)$$

avec

$G_t$ : degrés heure

$f(ze)$  : coefficient suivant l'ancienneté de l'habitat

### Les gains

Maintenant que nous obtenons les déperditions, on peut calculer les gains thermiques solaires (apporter par le soleil) ainsi que les gains internes de la maison (lampes, personnes, appareils, ...)

Les gains solaires sont calculés en fonction de l'ensoleillement sur les façades et les fenêtres des 4 cotés.

Pour le Nord par exemple  $G_{\text{nord}} = S_{\text{totnord}} \times \text{gains d'ensoleillement nord} \times \text{facteurs de fenêtres}$

Pour les gains internes, certains coefficients sont à appliquer directement sur la surface du logement car il est impossible de prendre en compte tous les éléments à installer dans la maison.

### Besoin annuel en chaleur de chauffage

On obtient donc la fin de la 1ère partie ici en faisant simplement la différence des pertes - les gains totaux de chaleur.

$$Q(h) = \Phi - Q_{\text{gains}}$$

## Les performances des systèmes techniques :

Les calculs suivants vont permettre de connaître l'énergie nécessaire aux besoins de chauffage, à la production d'eau chaude sanitaire, à l'électricité utilisé par les systèmes énergétiques (pompes, compresseurs,...) et enfin à l'électricité utilisé par le système de ventilation.

Pour les besoins en chauffage, le calcul a effectué est le suivant

$$P = Q(h)/S_{\text{habitat}} \times \text{facteur de conversion du système} \times \text{facteur préconiser par la loi.}$$

Les calculs effectués pour la préparation d'eau chaude sanitaire sont réalisés de la même manière que précédemment.

L'énergie des systèmes énergétiques est calculée à l'aide de facteur, car comme pour les gains internes, il est impossible de savoir combien de système et quelle puissance seront installés dans chaque maison. Cette donnée sera donc constante quelque soit le type de système utilisé.

$$P_{\text{sys}} = 3,70 \times 1,4 = 5,18 \text{ KWh/m}^2 \cdot \text{a}$$

L'énergie de ventilation est obtenue en prenant le volume total de la pièce multiplié là encore par des facteurs.

$$P = V_{\text{tot}} \times \text{facteur de dépense} \times \text{facteur par la loi}$$

## Emission de CO<sub>2</sub> :

Pour calculer le facteur d'émission de CO<sub>2</sub>, nous avons pris en compte la puissance à installer en fonction du système choisi et également un coefficient de CO<sub>2</sub> suivant le type de combustible utilisé (fioul, gaz, électricité, bois).

Soit :

$$Q(\text{CO}_2) = P_{\text{tot}} \times \text{facteur CO}_2 \text{ du système.}$$

## A.C.V. du bâtiment

Cette partie traite notamment de l'énergie grise utilisée par composant de la maison. L'énergie grise est la quantité d'énergie nécessaire au cycle de vie d'un matériau ou d'un produit : la production, l'extraction, la transformation, la fabrication, le transport, la mise en œuvre, l'utilisation, l'entretien puis pour finir le recyclage. Chacune de ces étapes nécessite de l'énergie, qu'elle soit humaine, électrique, thermique. En cumulant l'ensemble des énergies consommées sur l'ensemble du cycle de vie, on peut évaluer la mesure du besoin énergétique d'un matériau ou d'un produit. Un long travail de recherche m'a permis de trouver une grande partie de l'énergie grise des matériaux utilisés. La valeur est donnée en KWh/m<sup>2</sup>. Il suffit de multiplier cette donnée par l'épaisseur afin d'obtenir la valeur en KWh/m<sup>3</sup>.

### Exemple concret :

Pour illustré le descriptif ci dessus nous allons simuler une maison standard au Luxembourg afin de déterminer les différents indicateurs et pouvoir connaitre la performance énergétique de mon bâtiment.

Les caractéristiques de la maison sont les suivants :

- ➔ Maison construite de 2008 à nos jours de 170 m<sup>2</sup> en plein pied avec combles non aménagés (plafond de 100m<sup>2</sup>)
- ➔ Maison composée de 4 façades (64m<sup>2</sup> chacune) avec, 2 fenêtres à l'Est, 3 fenêtres et 1 porte au Nord, 5 fenêtres à l'Ouest et 4 fenêtres au Sud (toutes les fenêtres ont un châssis PVC avec triple vitrage).
- ➔ La source d'énergie sera du gaz avec chaudière à condensation une VMC double flux sera installée. L'ECS sera couplée au système de chauffage.

Avec ces choix effectués par l'utilisateur, on obtient les résultats énergétiques suivants :

<b>besoins spécifiques en chaleur de chauffage</b>		37,70kWh/m <sup>2</sup> a
<b>Avec chaudière à condensation</b>	<b>énergie finale pour le chauffage</b>	47,3 kWh/m <sup>2</sup> a
	<b>énergie finale pour l'ECS</b>	25,76 kWh/m <sup>2</sup> a
	<b>Indice d'énergie utile pour l'ECS</b>	22,4 kWh/m <sup>2</sup> a
<b>besoins spécifiques d'énergie pour les équipements auxiliaires (installations techniques + ventilation)</b>		6,85 kWh/m <sup>2</sup> a
<b>Indice du besoin total en énergie primaire Q(p)</b>		100,05 kWh/m <sup>2</sup> a
<b>Besoin spécifique en énergie primaire pour couvrir les besoins en chaleur de chauffage</b>		52,98 kWh/m <sup>2</sup> a
<b>Besoin spécifique en énergie primaire nécessaire pour la production d'eau chaude sanitaire</b>		28,85 kWh/m <sup>2</sup> a
<b>Besoin spécifique en énergie primaire nécessaire pour couvrir les besoins en énergie auxiliaires</b>		18,22 kWh/m <sup>2</sup> a
<b>Composantes de Q(CO<sub>2</sub>)</b>		22,43kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> a
<b>Emissions spécifiques de CO<sub>2</sub> dues au chauffage</b>		11,64 kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> a
<b>Emission spécifiques de CO<sub>2</sub> dues à la préparation d'eau chaude sanitaire</b>		6,34kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> a

Les résultats obtenus semblent cohérents avec les modèles étudiés dans la réalité. Les erreurs de résultats sont notamment dues à certains paramètres qui ne peuvent pas changer comme l'épaisseur des murs, seule l'épaisseur de l'isolant peut être modifiée pour les façades par exemple. Ces résultats seront convertis et donneront une note (A, B, ....) suivant les échelles de performances énergétiques de l'habitat.

Concernant l'ACV du bâtiment, il est pour le moment impossible de donner un résultat, car nous sommes en train d'étudier les composants de référence à installer dans la maison (type de carrelage, type de moquette pour les chambres du 1er étage,...).

Ce logiciel une fois terminé, sera mis à disposition en ligne via un site internet et pourra être utilisé par n'importe quel propriétaire ou futur propriétaire d'une maison.

## Conclusion de fin de stage.

Les différents projets ont été menés avec succès. Ceci dit, certains de ces travaux ne peuvent aboutir à des résultats finaux pour la fin de mon stage.

La réalisation de l'étude hydraulique est arrivée à son terme. Les commandes ont été passées et j'ai pu suivre et organiser le montage de mon installation. La P.A.C. fonctionne comme on le souhaitait en optimisant un maximum les performances énergétiques de l'installation. Le flux de chaleur des aérothermes est toujours maximum pour une consommation électrique faible suivant le COP du groupe froid.

Les études menées pour l'optimisation du bâtiment semblent être tout à fait réalisable. Après plusieurs réunions, mes idées ont été retenues et certains de ces projets vont commencer à voir le jour. Malgré tout, une optimisation ne peut se faire sur 2 mois. Il faudrait pouvoir étudier le bâtiment complet sur une année entière afin de déterminer comment celui-ci fonctionne sur toutes les saisons. De plus, une extension du bâtiment est prévue, certains des groupes de ventilations vont être modifiés, d'autres complètement enlevés, le réseau de chauffage des chaudières sera aussi revu. La réalisation d'une nouvelle étude des systèmes sera obligatoire une fois l'extension construite.

La conception du guide de maintenance en est également à ces débuts, beaucoup de recherches ont été effectuées mais certains éléments restent à développer. Il faudra également mettre en forme les pages pour que le guide soit simple une fois la version papier entre les mains (forme du livret).

Pour le logiciel, la feuille de calcul que j'ai effectuée est utilisée chez les développeurs du logiciel. Nous arrivons à un résultat de 6% d'erreurs en comparant nos données à ceux obtenues par le logiciel *Lesosai* qui est une référence dans le domaine des performances énergétiques. Cela est dû notamment à la simplification de certains calculs et aux facteurs utilisés qui sont généralement les mêmes alors que ces derniers devraient changer en fonction de certains résultats. Il restera quelques petites modifications à apporter qui pourront être corrigé directement sur le programme du logiciel.

Pour ma part, ce stage m'aura permis de découvrir la fonction de cadre et d'ingénieur dans le domaine de l'énergétique. Cette expérience m'a permis de faire un croisement entre le domaine théorique de l'enseignement et la réalité du terrain. J'ai pu, suivant la nature du travail, adapter les connaissances et les méthodes acquises pendant les années universitaires pour réussir à résoudre des problèmes. Ce stage m'aura permis également d'approfondir mes connaissances dans le domaine de l'énergétique et plus particulièrement lié au bâtiment, notamment sur les systèmes énergétiques utilisés dans les bâtiments, ainsi que tous les matériaux de construction (performances thermiques, A.C.V., type de matériaux suivant le type de bâtiment,.....). Concernant la gestion de mes projets j'ai pu, organiser et animer des réunions, établir des plannings, ce qui m'a permis d'accroître mon autonomie dans le travail.

## Bibliographie

ADEME. *Entreprises : optimisez vos consommations énergétiques*. ADEME Editions, Angers, 2003, 83 pages.

Chambre des Métiers. *Performance énergétique des bâtiments*. [Document électronique] Luxembourg: 2014, [www.cdm.lu/download/3991/performance-energetique-des-batiments.pdf](http://www.cdm.lu/download/3991/performance-energetique-des-batiments.pdf)

Architecture et climat. *Energie+* [en ligne]. Disponible sur <http://www.energieplus-lesite.be/>

Infoclimat. *Infoclimat* [en ligne]. Disponible sur :  
<http://www.infoclimat.fr/climatologie/annee/2013/luxembourg/valeurs/06590.html>

MEMORIAL. *Performance énergétique des bâtiments d'habitation*, recueil de législation, Luxembourg, 2007, A-N° 221

## **Résumé du rapport :**

La population de la planète ne cesse d'augmenter et des logements doivent être construits pour abriter tous ces gens. Mais avec une telle population, les ressources en énergies fossiles ainsi que les ressources naturelles diminuent fortement. Il faut donc pouvoir allier les moyens de construction avec les ressources. C'est dans ce contexte que l'Institut Formation Sectoriel du Bâtiment (IFSB) relève le défi de concevoir et de développer des outils, des systèmes et des cours afin que les entreprises de construction soient le plus adaptées au concept de la maison basse énergie.

Dans le cadre de ce stage, différents projets mis en œuvre :

Un dimensionnement d'installation d'une pompe à chaleur dans un bâtiment pour permettre aux futurs installateurs de comprendre comment ce type de système se monte dans un habitat.

Une optimisation énergétique du bâtiment principal de l'IFSB afin que celui-ci soit un exemple de bâtiment à basse consommation.

Enfin une étude et réalisation d'un guide et logiciel de prise de décision sur les maisons dans le but d'aider les futurs acquéreurs à choisir les bons matériaux pour rénover ou construire des maisons dites passives et écologiques.

## **Executive Summary: Energy systems and energy optimization of low energy buildings.**

The population of the planet increases at a fast pace and the construction sector must face the challenge of a higher demand for buildings. But with such a population growth, the resources in fossil fuels as well as natural resources strongly decrease. It is thus necessary to properly combine construction techniques with limited resources. In this context I.F.S.B. meets the challenge to conceive and develop professional training, tools and systems for construction companies, allowing them to adapt to low energy houses/buildings.

Within the framework of this internship, various projects were implemented:

A heat pump installation in a building, allowing the future installers to understand how this type of system has to be implemented in a housing environment.

An energy optimization of the company's main building so it can become an example of energy saving building.

A study and a realization of a guide and software of decision-making on houses with the aim of helping future buyers to choose the good materials to renovate or build passive energy and ecological houses.

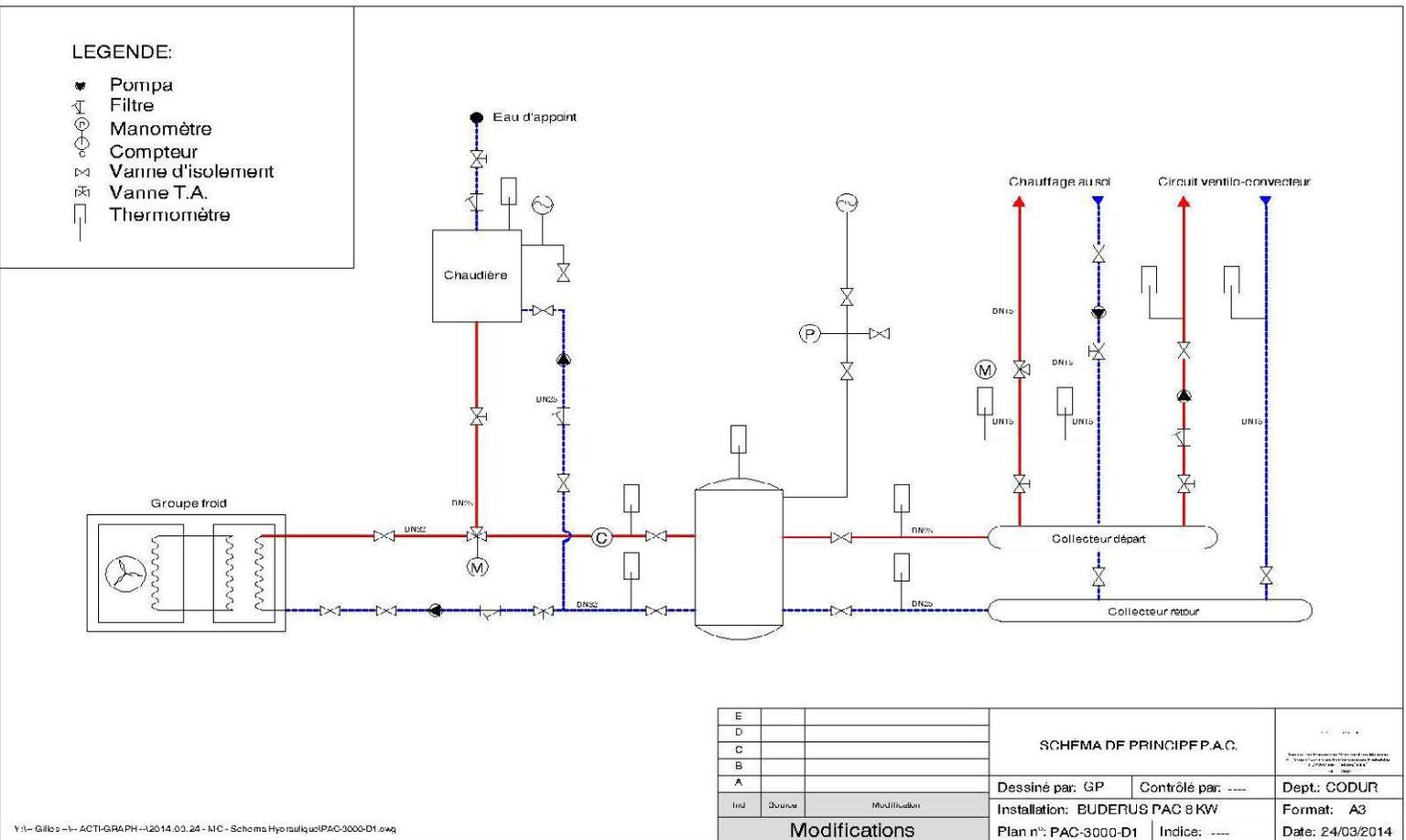
*Mots clés: Optimisation, maison passive, pompe à chaleur, bâtiment, efficacité énergétique*

*Keywords: Optimization, passive house, heat pump, building, energy efficiency*

# Annexes

# Annexe 1

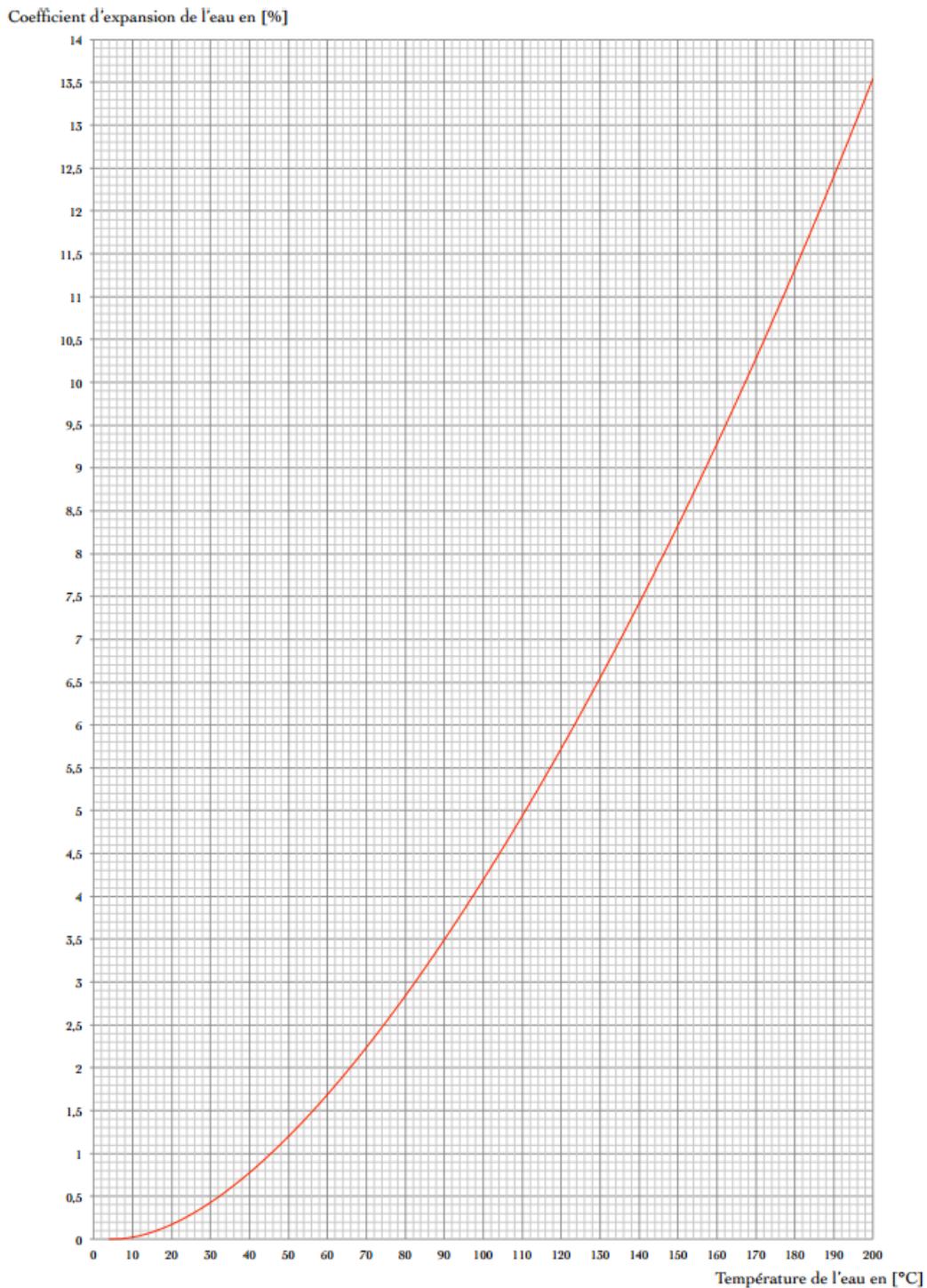
## Schéma hydraulique de la P.A.C.





## Annexe 2

# Courbe d'expansion de l'eau en fonction de la température



## Annexe 3

# Panneaux Solaires Thermiques



Système gravitaire permettant de protéger le liquide caloporteur en cas de surchauffe celui-ci redescend automatiquement dans le ballon, mais aussi corriger les erreurs de surdimensionnement. Ce système pourrait se passer d'eau glycolée.



## Annexe 4

### Chaudière Bois



Vis sans fin



Récupérateur de cendre

## Annexe 5

### Chaudière Gaz

Sert d'appoint à la chaudière bois en hiver ou en cas de panne.



## Annexe 6

### Puits Canadien



Prise d'air hauteur 3m

Pré filtre

# Annexe 7

## Début du tableau sur les consommations électriques de chaque appareil

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1													
2		<b>Calcul cout électrique</b>											
3													
4		consommation (W)	24										
5		temps d'utilisation (h)	4		consommation totale (J)	345600							
6		temps d'utilisation (s)	14400										
7													
8					prix du Kwh (euro)	0,12							
9		cout/jour	0,01152										
10		cout/mois	0,3456										
11		cout/an	4,1472										
12													
13													
14		<b>Appareil</b>	<b>consommation W</b>	<b>nb</b>	<b>cout total/an</b>		<b>lampe</b>	<b>consommation (W)</b>	<b>nb de luminaire</b>	<b>nb de passage/jour</b>	<b>cout/j</b>	<b>cout total/an</b>	
15		telephone Alaya	7	35	148,176		preluce	64	32	10	0,4096	122,88	
16		point d'acces wifi	15	5	20,736						0,2048	61,44	
17		ecran PC veille	1	35	145,152								
18		photocopieur	97	2	117,3312		tube fluo bur.	35	24		0,4032	120,96	
19		ordinateur fixe éteint	2	15	25,92		tube LED bur.	24	24		0,27648	82,944	
20		Terra mobile 730	1	35	21,168								
21		ordinateur fixe veille	15	15	194,4								
22													
23					salle info	20h							
24					éclairage sanitaire	10 min							
25					ecran en veille	14h							
26					telephone	14h							
27					point d'acces wifi	14h							
28					photocopieur	14h							

## Annexe 8

# Fiche entretien d'un système d'une maison

### Pompe à chaleur (PAC)

**Description :** Une pompe à chaleur est un dispositif permettant de transférer la chaleur du milieu le plus froid vers le milieu le plus chaud. C'est le principe du frigo. Certaines pompes à chaleur travaillent sur la chaleur de l'air, d'autres avec la chaleur de l'eau ou du sol. Certains modèles sont réversibles, capable de transférer de la chaleur de la maison vers le sol.

Entretien	Comment ?	Période	Par qui ?
<ul style="list-style-type: none"> <li>un contrôle du compresseur de votre pompe à chaleur ;</li> <li>un contrôle de la performance de votre installation ;</li> <li>une vérification de l'étanchéité du circuit frigorifique ;</li> <li>un service de dépannage en cas de panne.</li> </ul>		1 à 2 fois/an	L'installateur
<ul style="list-style-type: none"> <li>Nettoyer la borne extérieure</li> </ul>	Eliminer tous les obstacles susceptibles de gêner la circulation	1 fois/3 mois	Le particulier
<ul style="list-style-type: none"> <li>Nettoyer les bouches d'insufflations intérieures</li> </ul>	Dépoussiérer et nettoyer à l'eau savonneuse		Le particulier



### Inspection obligatoire de la pompe à chaleur

Le décret du 31/03/2010 relatif à l'inspection des systèmes de climatisation et des pompes à chaleur réversibles impose une inspection des pompes à chaleur et des climatiseurs (pompe à chaleur air-air) d'une puissance frigorifique supérieure à 12 kW :

- Elle doit être demandée par le propriétaire ou le syndicat de propriété de l'immeuble.
- L'inspection doit avoir lieu au minimum 1 fois tous les 5 ans.
- Pour les nouveaux équipements, l'inspection doit être effectuée dans l'année civile qui suit l'installation.
- Dans un souci d'objectivité, la personne effectuant l'inspection ne doit avoir aucun lien avec le propriétaire, l'entreprise d'installation de la PAC ou l'entreprise chargée de l'entretien.
- Un rapport sera délivré 1 mois au plus tard après l'inspection au commanditaire.

Pour être aux normes, vous devrez effectuer une première inspection dans un laps de temps de :

- 2 ans pour les PAC d'une puissance frigorifique supérieure à 100 kW ;
- 3 ans pour les pompes à chaleur d'une puissance frigorifique supérieure à 12 kW

# Annexe 9

## Représentation graphique du fichier Excel des performances énergétiques





### 3/5 Quel est votre revêtement de sol ?

**Panneaux de liège**

Quelle en est l'épaisseur ?

- 5 à 10 cm
- 10 à 15 cm
- 15 à 20 cm
- 20 à 25 cm
- 25 à 30 cm



#### Indicateur écologique

