



Faculté de Technologie  
Département de Génie Mécanique

**Mémoire de Master**

*Option : Application des énergies renouvelables dans l'habitat*

Présenté par :

*Mlle* **HELAL Soraya**

**Analyse des besoins de confort thermique par  
conception bioclimatique d'un habitat individuel  
- Cas du climat méditerranéen -**

**Soutenu le .. Juin 2015**

**Promoteur : Dr ABBAD.B**

Unité de Développement des Equipements Solaires

**Co Promoteur : Dr HAMID.A**

**Université Blida1**

**Dédicaces :**

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes chers parents, pour leur endurance et leurs sacrifices sans limites*

*Tous mes proches*

*A mes enseignants surtout a Mme BenZouid et Mme BenMerabet*

*Mes amis, mes camarades de promotion*

*Mes sœurs Sara et Sonya et mon petit frère Salim, en reconnaissance de leur affection  
toujours constante*

*Et a tout ceux qui m'ont aidé dans la réalisation de ce mémoire.*



**Résumé :**

Chaleur en hiver, fraîcheur en été sont des éléments du confort pour l'individu, mais l'utilisation du chauffage et la climatisation coûte cher en énergie, ce qui provoque trop de consommation de cette énergie, qui veut dire trop d'émission de CO<sub>2</sub> ce qui est la principale cause du réchauffement climatique. A cet effet, l'architecture bioclimatique tente de répondre aux exigences du confort des habitants en tirant passivement le meilleur parti des éléments du climat. Par conséquent construire avec le climat permet de réduire considérablement les dépenses en chauffage et en énergie électrique.

La présente recherche s'intéresse au calcul des besoins de confort thermique d'une maison individuelle réalisée sur des concepts bioclimatiques situé a Tipaza (Projet d'architecture bioclimatique 2014). En exploitant les paramètres de l'habitat en faisant un bilan thermique par simulation à l'aide du logiciel PLEIADES+COMFIE, on peut connaître les consommations énergétiques annuelles de la maison et on peut améliorer ce dernier en intégrant et en dimensionnant un système a énergie renouvelable pour compléter les besoins afin d'assurer le confort thermique optimal.

Les résultats montrent qu'un projet bioclimatique avec des systèmes passifs ne suffit pas pour avoir un confort souhaité mais la prise en compte de l'utilisation des énergies renouvelables fait participer le bâtiment à une conception plus performante thermiquement et plus économe énergétiquement.

**Mots Clés :**

Confort thermique - Habitat bioclimatique - Energie renouvelable - Echangeur géothermique air/sol - PLEIADES+COMFIE - GAEA - Gaz a effet de serre



**Abstract :**

Warmth in winter, freshness in summer are elements of comfort for the individual, but the use of heater and cooling energy is expensive, causing too much consumption of this energy, it means too much CO<sub>2</sub> which is the main cause of global warming. For this purpose, bioclimatic architecture attempts to find the demands of comfort of the inhabitants passively making the most of climate elements. Therefore build with the climate can significantly reduce expenses for heating and electricity.

This research focuses on the needs of calculation of thermal comfort of a house made of bioclimatic concepts situated in Tipaza (bioclimatic architecture project 2014). By exploiting the habitat parameters by a heat balance simulation using the PLEIADES + COMFIE software, one can know the annual energy consumption of the house and the latter by integrating and sizing a system power can be improved renewable for complete requirements to ensure optimal thermal comfort.

The results show that a project with bioclimatic passive systems is not enough to have a desired comfort but taking into account the use of renewable energy involves building a more thermally efficient design and energy efficient.

**Keywords :**

Thermal comfort - Habitat bioclimatic - Renewable energy - Geothermal heat exchanger air/ground - PLEIADES+COMFIE - GAEA - Gas greenhouse



## ملخص :

تغيرات الحرارة عبر الفصول بما فيها تعديل الموازين في فصلي الشتاء و الصيف أساس الراحة للفرد، لكن الإستعمال المفرط للتدفئة و التبريد لضمان هذه الراحة جد مكلف من حيث الإستعمال الطاقوي، ما يسبب إزدياد إنبعاث غاز الكربون، الذي هو السبب الرئيسي لما نعرفه اليوم بظاهرة الإحتباس الحراري. على هذا النحو، تسعى الهندسة المعمارية المناخية البيئية إلى تقديم الإيجابيات لمتطلبات راحة الأفراد في مسكنهم، وهذا ببذل قصار جهدها من عناصر المناخ، و بناء على ذلك، التعمير على حساب المناخ يسمح من الحد بطريقة ممتازة للنفقات من حيث التدفئة و التبريد الكهربائي.

هذا البحث يهتم إلى الحسابات التي تدور حول الإحتياجات المتعلقة بالراحة الحرارية لمسكن من النوع الفردي مقره ولاية تيبازة، منجز على مفاهيم مناخية (مشروع مناخي بيئي 2014)، و هذا بإستغلال المعايير الخاصة بالمسكن عبر القيام بميزان الحرارة بواسطة البرنامج PLEIADES+COMFIE، مما أوصلنا إلى التعرف على الإستهلاك الطاقوي السنوي لهذا المسكن الذي أمكننا من تحسين مردوديته بإدخال نظام الطاقات المتجددة لتكميل الحاجات لضمان الراحة الحرارية الأمثل.

النتائج تشير بصفة واضحة أن مشروع مناخي بيئي بأنظمة كامنة غير كافي لتحقيق الراحة الحرارية المرغوب فيها، لكن الأخذ بعين الإعتبار إستعمالات الطاقات المتجددة يساهم في تطوير تصميم البنايات أكثر كفاء من حيث الراحة الحرارية و إقتصاد الطاقة.

## الكلمات المفتاحية :

الراحة الحرارية، منزل مناخي بيئي، الطاقة المتجددة، مبادل حراري أرضي الهواء/أرض، PLEIADES-COMFIE، GAEA، غازات الإحتباس الحراري

Avant-propos.....	
Sommaire.....	
Liste des figures.....	
Liste des tableaux.....	
Nomenclature.....	

## Sommaire :

### **Chapitre introductif**

Introduction générale .....	1
-----------------------------	---

### **Chapitre 1 : Etat de l'art sur l'étude de confort thermique dans la conception bioclimatique**

<b>Introduction</b> .....	3
<b>1) La notion de confort thermique</b> .....	4
<b>2) Les paramètres affectant le confort thermique</b> .....	4
2.1. Paramètres liés à l'ambiance extérieure .....	4
a) La température de l'air .....	4
b) La température des parois .....	5
c) La vitesse de l'air .....	6
d) L'humidité relative .....	6
2.2. Paramètres liés à l'individu .....	6
a) Le métabolisme .....	6
b) L'habillement .....	7
2.3. Paramètres aux gains thermiques internes .....	7
<b>3) Les échanges thermiques du corps humain</b> .....	7
3.1. Convection .....	8
3.2. Rayonnement .....	8
3.3. Conduction .....	8
<b>4) Le diagramme bioclimatique</b> .....	8



<b>5) Différents facteurs agissant sur le confort thermique</b> .....	10
5.1. <i>Les bases de conceptions d'ensemble</i> .....	11
a) <b>L'implantation et orientation (le terrain)</b> .....	11
b) <b>La forme et la compacité</b> .....	12
c) <b>L'organisation intérieure</b> .....	13
d) <b>Les protections solaires</b> .....	14
e) <b>La ventilation naturelle</b> .....	14
5.2. <i>Les bases de conceptions de détail</i> .....	15
a) <b>Performances thermiques des matériaux</b> .....	15
b) <b>Vitrages</b> .....	16
c) <b>L'inertie thermique</b> .....	18
d) <b>L'isolation thermique</b> .....	19
<b>Conclusion</b> .....	20

## Chapitre 2 : Cas d'étude ; Bilan thermique de l'habitat individuel bioclimatique

<b>Introduction</b> .....	21
<b>1) Présentation de la maison</b> .....	22
1.1. <i>Localisation géographique et données climatiques</i> .....	22
1.2. <i>Typologie du logement</i> .....	24
1.3. <i>Surfaces et volumes habitables</i> .....	24
1.4. <i>Structures et matériaux</i> .....	25
a) <b>Menuiseries</b> .....	25
b) <b>Parois verticales</b> .....	26
c) <b>Parois horizontales</b> .....	26
<b>2) Calcul du bilan thermique</b> .....	28
2.1. <i>Relevé des données</i> .....	28
a) <b>Cahier de charge</b> .....	28
b) <b>Condition de base</b> .....	28
2.2. <i>Calcul des charges</i> .....	29



a) Apport de chaleur par transmission a travers les parois .....	29
b) Apport de chaleur par rayonnement a travers les parois .....	29
c) Apport de chaleur par renouvellement d'air .....	30
d) Apport de chaleur par les occupants .....	30
e) Apport de chaleur par l'éclairage .....	30
f) Apport de chaleur par les équipements .....	30
2.3. Simulation par Pleiades+Comfie .....	31
a) Présentation du logiciel .....	31
b) Présentation des résultats .....	33
<b>3) Exemples de bilans de consommations énergétiques dans différents projets d'habitats bioclimatiques .....</b>	<b>36</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>41</b>

### **Chapitre 3 : Dimensionnement et analyse de fonctionnement d'un échangeur air/sol**

<b>Introduction .....</b>	<b>42</b>
<b>1) Généralité sur l'échangeur air/sol .....</b>	<b>43</b>
1.1. Principe de fonctionnement de l'échangeur air/sol .....	43
1.2. Modes de fonctionnement d'un échangeur air/sol .....	43
a) Fonctionnement en hiver .....	43
b) Fonctionnement en été .....	44
c) Fonctionnement au printemps/automne .....	44
1.3. Caractéristiques des principaux composants d'un puits canadien .....	44
a) Prise d'air neuf .....	44
b) Échangeur géothermique .....	45
c) Système d'évacuation des condensats .....	45
d) Ventilateur .....	46
1.4. Les ventilations mécaniques couplées avec échangeur air/sol .....	47
a) La ventilation mécanique contrôlée simple flux .....	47
b) La ventilation mécanique double flux .....	47



---

---

1.5. Emplacement du puits canadien .....	48
1.6. Avantages et inconvénients du puits canadien .....	49
<b>2) Les paramètres de dimensionnement d'un échangeur air/sol .....</b>	<b>49</b>
2.1. Débit d'air .....	49
2.2. Les propriétés thermiques du sol .....	50
a) Conductivité thermique du sol .....	50
b) Capacité calorifique du sol .....	51
2.3. Les propriétés physiques de matériau des tubes .....	51
a) Les propriétés thermiques .....	52
b) La tenue à l'enfouissement .....	52
c) La rugosité intérieure des tubes .....	52
2.4. La géométrie de l'échangeur .....	53
a) Disposition des tubes .....	53
b) La tenue à l'enfouissement .....	54
c) La rugosité intérieure des tubes .....	54
d) Le nombre des tubes .....	55
e) La distance entre canalisations .....	55
f) Pente de la conduite .....	55
g) La profondeur d'enfouissement des tubes .....	56
<b>3) Méthode de dimensionnement d'un échangeur air/sol .....</b>	<b>56</b>
3.1. Méthode de calcul empirique .....	56
a) Vitesse de l'air .....	57
b) Temps de parcours .....	57
c) Longueur du conduit .....	57
d) Flux thermique .....	58
e) Conductivité entre l'air et le tuyau .....	58
3.2. Présentation du logiciel de simulation GAEA .....	59
a) Menu échangeur géothermique (geothermal heat exchanger "EHX") .....	60
b) Menu masse/Terre .....	61
c) Menu valeurs climatiques/Air .....	61



<b>d) Menu Chauffage/Ventilation/Climatisation (HVAC)</b> .....	61
<b>e) Menu coût</b> .....	61
<b>f) Menu évaluation annuelle/an</b> .....	61
<b>g) Menu Rapport</b> .....	62
<b>h) Menu échangeur géothermique optimisée</b> .....	62
3.3. <i>Exemple de calcul et de mise en œuvre d'un puits canadien</i> .....	63
<b>Conclusion</b> .....	64
<b><u>Chapitre 4 : Simulation et interprétation des résultats</u></b>	
<b>Introduction</b> .....	65
<b>1) Dimensionnement de l'échangeur air/sol</b> .....	65
1.1. <i>Dimensionnement de la longueur du conduit du puits canadien</i> .....	65
1.2. <i>Simulation de l'échangeur air/sol avec GAEA</i> .....	67
<b>2) Interprétation des résultats</b> .....	71
2.1. <i>Le système de chauffage</i> .....	71
2.2. <i>L'eau chaude sanitaire</i> .....	71
2.3. <i>La gestion de l'eau</i> .....	71
2.4. <i>La ventilation</i> .....	72
<b>Conclusion générale</b> .....	74
Bibliographies .....	
Annexes.....	



## Liste des figures :

<b>Figure 1</b> : Les pertes thermiques du corps humain dépendent de 6 paramètres physiques .....	4
<b>Figure 2</b> : La température de confort dépend de la température de l'air et de la température des parois .....	5
<b>Figure 3</b> : Températures de confort pour différentes vitesses relatives de l'air et un habillement moyen, d'après FANGER O. ....	6
<b>Figure 4</b> : Gains de chaleur internes .....	6
<b>Figure 5</b> : Diagramme bioclimatique du bâtiment .....	7
<b>Figure 6</b> : L'architecture bioclimatique place l'occupant au centre de ses préoccupations .....	9
<b>Figure 7</b> : Plan de masse Tipaza P.O.S AU2 implantation et orientation de la maison individuelle par rapport au terrain .....	12
<b>Figure 8</b> : Impact de la forme, la taille et proximité sur la compacité (Cf maison : $567,63/782,45=0.72$ .....	12
<b>Figure 9</b> : Plans d'organisations intérieures de la maison .....	13
<b>Figure 10</b> : 3D de la maison bioclimatique .....	14
<b>Figure 11</b> : Plan et coupe schématique explique la ventilation traversante .....	15
<b>Figure 12</b> : Les facteurs énergétiques d'un double vitrage .....	17
<b>Figure 13</b> : Inertie forte, caractérisée par des matériaux lourds à l'intérieur de l'enveloppe isolante .....	18
<b>Figure 14</b> : Typologie des déperditions thermiques .....	19
<b>Figure 15</b> : Coupe d'un plancher intermédiaire et mur extérieure de la maison étudiant .....	19
<b>Figure 16</b> : Localisation de Tipaza (Algérie) et vue aérienne du projet habitat réaliser .....	22
<b>Figure 17</b> : Le diagramme climatique .....	23
<b>Figure 18</b> : La courbe de température .....	23
<b>Figure 19</b> : Modélisation 3D des différentes façades (Sud, Nord, Ouest) .....	24
<b>Figure 20</b> : Composition des différentes parois et menuiseries utilisés .....	27
<b>Figure 21</b> : Plan de la chambre n°2 .....	28
<b>Figure 22</b> : Plans R+1 sous Alcyone .....	31
<b>Figure 23</b> : 3D R+1 sous Alcyone .....	31
<b>Figure 24</b> : Courbes de température ; Année la plus chaude .....	33

<b>Figure 25</b> : Courbes de température ; Année la plus froide .....	34
<b>Figure 26</b> : Etiquette Diagnostic de Performance Énergétique (DPE) en KWh/m <sup>2</sup> /an .....	36
<b>Figure 27</b> : Schéma de principe d'un puits canadien .....	43
<b>Figure 28</b> : Différentes modèles des prises d'air .....	44
<b>Figure 29</b> : Echangeur géothermique .....	45
<b>Figure 30</b> : Système d'évacuation des condensats à siphon .....	45
<b>Figure 31</b> : Système d'évacuation à puits d'infiltration .....	46
<b>Figure 32</b> : Evacuation par infiltration dans le sol .....	46
<b>Figure 33</b> : Echangeur air-sol avec une VMC simple flux .....	47
<b>Figure 34</b> : Echangeur air-sol avec une VMC double flux .....	48
<b>Figure 35</b> : Emplacement du puits .....	48
<b>Figure 36</b> : Conductivité thermique de quelques sols en fonction de la teneur en eau .....	50
<b>Figure 37</b> : L'environnement du logiciel de simulation GAEA .....	60
<b>Figure 38</b> : Disposition du puits canadien .....	63
<b>Figure 39</b> : Paramètres de dimensionnement de l'échangeur air/sol sous GAEA .....	67
<b>Figure 40</b> : La température ambiante et la température de l'air à la sortie de l'échangeur air/sol du début d'année jusqu'au mois d'Aout (calculé par GAEA) .....	68
<b>Figure 41</b> : La températures tout au long du tuyau de l'échangeur pour une chaude journée d'été (calculée par GAEA).....	68
<b>Figure 42</b> : L'échange de chaleur dans l'échangeur tout au long de l'année (calculé par GAEA).....	69
<b>Figure 43</b> : Comparaison des différentes dispositions de tubes du puits canadien (L= 30 m) .....	70
<b>Figure 44</b> : Projet maison individuelle bioclimatique .....	71
<b>Figure 45</b> : Système chauffage ; le poêle à granulés.....	71
<b>Figure 46</b> : Ballon de stockage ECS .....	71
<b>Figure 47</b> : Coupe schématique de fonctionnement du puits canadien du projet .....	72
<b>Figure 48</b> : Echangeur VMC.....	72
<b>Figure 49</b> : Départ VMC double flux .....	72



**Liste des tableaux :**

<b>Tableau 1 :</b> Eléments d'analyse pour localiser un bâtiment bioclimatique .....	11
<b>Tableau 2 :</b> Table climatique de la ville de Tipaza .....	23
<b>Tableau 3 :</b> Surfaces et volumes des pièces de l'habitat a étudier .....	24
<b>Tableau 4 :</b> Les données climatiques de Tipaza réaliser sur Metéonorm .....	32
<b>Tableau 5 :</b> Le bilan de climatisation été de la semaine 18 a 32 .....	33
<b>Tableau 6 :</b> Le bilan de chauffage hiver de la semaine 1 a 12 .....	34
<b>Tableau 7 :</b> Le bilan de chauffage hiver de la semaine 40 a 52 .....	35
<b>Tableau 8 :</b> Les propriétés thermiques des principaux constituants d'un sol .....	51
<b>Tableau 9 :</b> Conductivité thermique et diffusivité de quelques matériaux .....	52
<b>Tableau 10 :</b> Dispositions des tubes, avantages et inconvénients de chaque disposition .....	54
<b>Tableau 11 :</b> Le diamètre à utiliser en fonction du débit d'air extrait .....	57
<b>Tableau 12 :</b> La surface d'échange par m <sup>3</sup> /h d'air extrait .....	58
<b>Tableau 13 :</b> Résultats des calculs de l'exemple sous le logiciel GAEA pour optimiser l'installation .....	63
<b>Tableau 14 :</b> Les Résultats de calcul théorique pour la longueur du tuyau .....	66
<b>Tableau 15 :</b> Résultat de calcul du projet sous le logiciel GAEA.....	69
<b>Tableau 16 :</b> Résultat de calcul du projet avec différents N° de tube sous le logiciel GAEA .....	70



**Nomenclature :**

**Q<sub>é</sub>** : Apport de chaleur par l'éclairage (W)

**Q<sub>équ</sub>** : Apport de chaleur par les équipements (W)

**Q<sub>o</sub>** : Apport de chaleur par les occupants (W)

**Q** : Apport de chaleur par rayonnement à travers les parois (W)

**Q<sub>r</sub>** : Apport de chaleur par renouvellement d'air (W)

**D<sub>p</sub>** : Apport de chaleur par transmission à travers les parois (W)

**Q<sub>FT</sub>** : Bilan frigorifique (W)

**C<sub>s</sub>** : Capacité calorifique du sol (KJ/Kg K)

**P<sub>c</sub>** : Capacité thermique (Wh/m<sup>3</sup>.K)

**α** : Coefficient d'absorption

**C<sub>f</sub>** : Coefficient de forme (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)

**F** : Coefficient de rayonnement solaire

**K<sub>gr</sub>** : Coefficient de transmission "froid" (W/m<sup>2</sup>°C)

**K<sub>g</sub>** : Coefficient de transmission surfacique globale (W/m<sup>2</sup>°C)

**K<sub>vn</sub>** : Coefficient de transmission surfacique du vitrage nu (W/m<sup>2</sup>°C)

**λ** : Conductivité thermique (W/m°C)

**q<sub>v</sub>** : Débit d'air extérieur de renouvellement (m<sup>3</sup>/h)

**ΔT** : Différence de température (°C)

**a** : Diffusivité thermique (m<sup>2</sup>/h)

**b** : Effusivité thermique (W.h<sup>1/2</sup>/m<sup>2</sup>.K)

**TI** : Facteur lumineux

**g** : Facteur solaire

**U** : Facteur thermique

**Φ** : Flux thermique

**H<sub>r</sub>** : Humidité relative (%)

**P** : Masse volumique (Kg/m<sup>3</sup>)

**Pr** : Nombre de Prandtl

**Re** : Nombre de Reynolds



**Rs** : Rayonnement solaire ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

**R** : Résistance thermique d'une paroi ( $\text{m}^2\text{C}/\text{W}$ )

**R<sub>gt</sub>** : Résistance thermique de la paroi global "froid" ( $\text{m}^2\text{C}/\text{W}$ )

**S<sub>échange</sub>** : Surface d'échange ( $\text{m}^2$ )

**e/λ** : Somme des rapports des différentes couches de la paroi ( $\text{m}^2\text{C}/\text{W}$ )

**A** : Surface ( $\text{m}^2$ )

**ACH** : Taux de renouvellement d'air (Vol/h)

**T<sub>a</sub>** : Température ambiante de l'air ( $^{\circ}\text{C}$ )

**T<sub>p</sub>** : Température des parois ( $^{\circ}\text{C}$ )

**w** : Teneur en eau de l'air ( $\text{kg}/\text{kg}$  air sec)



**Bibliographie :**

- [1] **DURAND E., 1986**, Habitat Solaire et Maîtrise de l'Énergie, *Revue Système Solaire* N° 17/18, p.10.
- [2] **ADEME, 2005**, Les Chiffres Clés du Bâtiment: Données et Références. Ademe. (Complexité du confort thermique dans les bâtiments, 6ème congrès Européen de Science des Systèmes Paris.
- [3] **EL HASSARS M.K.**, Guide pour une construction Eco-énergétique en Algérie,
- [4] **NEZZAR S., GOUDRACHE M., 1999**, Etude des performances énergétiques d'une conception bioclimatique en région aride, World Energy Council.
- [5] **HELAL S., DJERAD T.A, DJEMA A., 2014**, Mémoire ingénieur architecture, Quartier urbain bioclimatique à Tipaza, Université Blida1, Institut d'architecture.
- [6] **Source** : <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10250>
- [7] **Source** : <http://www.climamaison.com/lexique/confort-thermique.htm>
- [8] **LIEBARD A., DE HERDE A., 2005**, Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques : Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable, Le moniteur, Bruxelles.
- [9] **MAZARI M., 2012**, Mémoire magistère architecture, Etude et évaluation du confort thermique des bâtiments à caractère public : Cas du département d'architecture de Tamada, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Département d'architecture.
- [10] **Source**: [http://fr.slideshare.net/Saamysaami/confort-thermique-02?qid=2eca8d92-bb8a-45b5-893e-ef524a0d151e&v=default&b=&from\\_search=1](http://fr.slideshare.net/Saamysaami/confort-thermique-02?qid=2eca8d92-bb8a-45b5-893e-ef524a0d151e&v=default&b=&from_search=1)
- [11] **SALOMON T., BEDEL S., 2004**, La maison des [méga] watts, Le guide malin de l'énergie chez soi, Ed. Terre vivante, Mens, p. 25.
- [12] **Anonyme : 2007**, Redéfinir la notion de confort thermique, *guide pratique pour la construction et la rénovation durables de petits bâtiments*, Recommandation pratique css13.
- [13] **FLEMAL J.**, Architecture et Climat, UCL, source : [www.energieplus-lesite.be](http://www.energieplus-lesite.be)
- [14] **Source** : <http://www.batitherm.ch/confort-thermique.html>
- [15] **FERNANDEZ P., LAVIGNE P., 2010**, Changement d'attitude pour concevoir un cadre bâti bioclimatique : une contribution au développement durable, techniques de construction », CTQ 13, éditions du moniteur.
- [16] **IZARD J.L., KACALA O., 2008**, Le diagramme bioclimatique Envirobat-Méditerranée, laboratoire abc, Esna-Marseille.
- [17] **TITTELEIN P., 2008**, Environnements de simulation adaptés à l'étude du comportement énergétique des bâtiments basse consommation », université de Savoie, p 220.
- [18] **WRIGHT D., 2006**, cite in Chabi, M (2008) Op. cit. p.219.

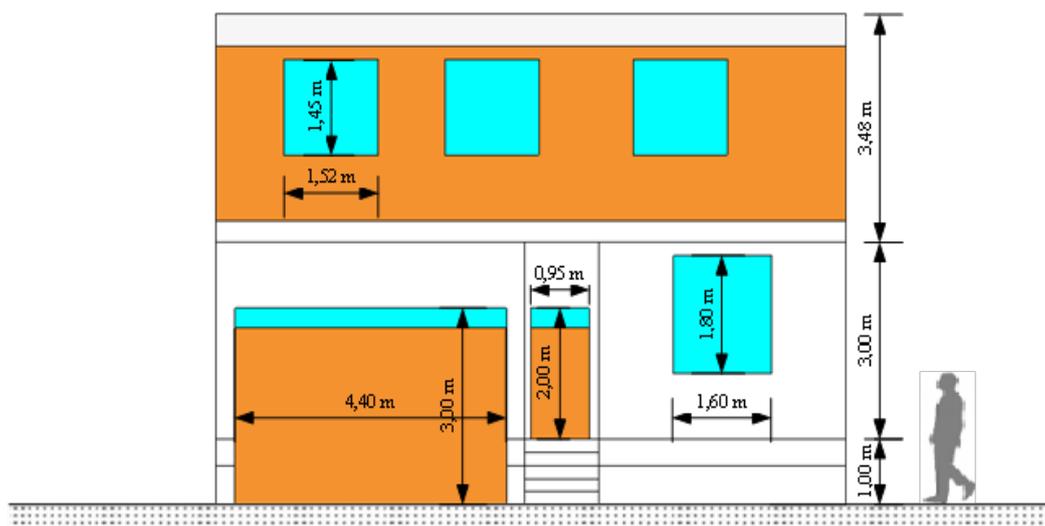
- [19] **GIVONI B., 1978**, L'homme, l'architecture et le climat, Edition du Moniteur, Paris.
- [20] **REITER S., DE HERDE A.**, L'éclairage naturel des bâtiments, Le pouvoir isolant des protections solaires, p.115.
- [21] **Source** : <http://raee.org/climatisationsolaire/fr/maitrise.php>
- [22] **VARONE F., 2009**, Architecte D.F.A.U.N., Projet Versione 01, Conception Bio-Climatique d'une Maison Individuelle avec Patio-Commune des Roches de Condrieu, Dep. 38-Mémoire Formation Longue HQE E.N.S.A.L.
- [23] **IEPF.**, Institut de l'Energie et de l'Environnement de la Francophonie, Efficacité énergétique de la climatisation en région tropicale, Tome 1 : conception des nouveaux bâtiments.
- [24] **Source** : <http://dateandtime.info/fr/citycoordinates.php?id=2476028>
- [25] **D.T.R. C3-2, 1998**, Document Technique Réglementaire, Réglementation thermique des bâtiments d'habitation, Règle de calcul des déperditions calorifiques, CLASSIFICATION THERMIQUE DES COMMUNES D'ALGERIE.
- [26] **Source** : <http://fr.climate-data.org/location/44268/>
- [27] **HELAL S., 2014**, 3D Habitat individuel bioclimatique/Logiciel, Google SketchUp 8.
- [28] **BOUHELAL G., 2012**, Mémoire magistère génie mécanique, L'utilisation de l'énergie solaire pour les besoins de la climatisation, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen.
- [29] **ARPE., 2012**, Association Régionale pour la Promotion de l'Eco-construction, Eco-construction : Bâtissons notre avenir», COMPTE-RENDU ÉTUDE PHASE B -Étude de cas de 6 réalisations.
- [30] **Source** : <http://www.ademe.fr/construction-dun-habitat-bioclimatique-mayenne-53>
- [31] **THIERS S., 2008**, Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive, Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure des mines de paris.
- [32] **TOME L., 2009**, Puits canadiens/provençaux et qualité de l'air intérieur : Analyse des dégradations potentielles, Mémoire de l'Ecole des Hautes Etude en Santé Publique.
- [33] **KARTACHI Y., 2006**, Intégration de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables dans la conception des bâtiments, Projet de fin d'étude, Université de la Rochelle, France.
- [34] **KOFFI J., 2009**, Analyse multicritère des stratégies de ventilation en maisons individuelles, Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, France.
- [35] **MOHAMMED B., ABDERRAHMANE T., 2010**, Dimensionnement et analyse de fonctionnement d'un échangeur air-sol, Mémoire d'Ingénieur, Université Kasdi Merbah, Ouargla.
- [36] **AKCHICHE Z., 2011**, Etude de comportement d'une cheminée solaire en vue de l'isolation thermique, Mémoire de magistère, Université Kasdi Merbah, Ouargla.



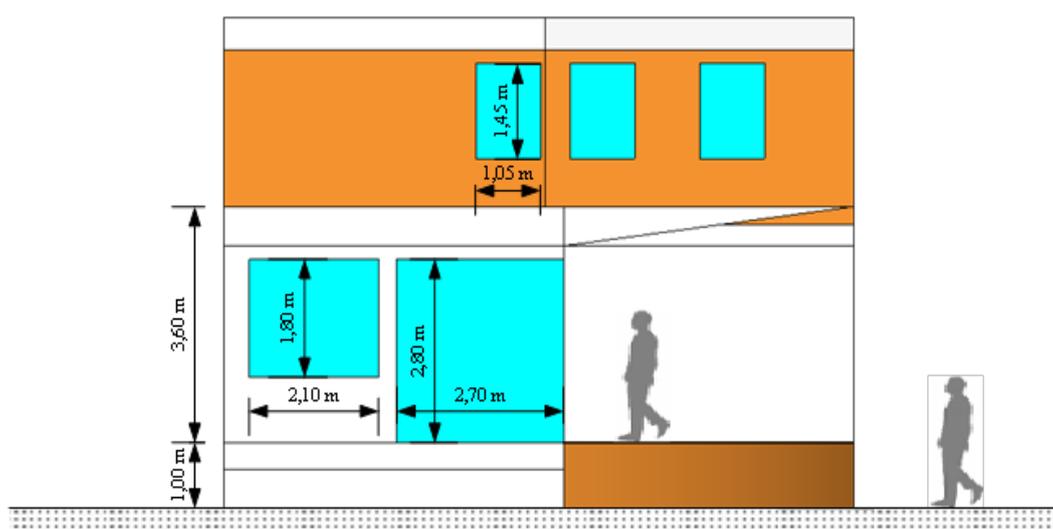
- [37] **THIERS S., 2008**, Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive, Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure des mines de paris, France.
- [38] **HOLLMULLER P., 2002**, Utilisation des échangeurs air-sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments (Mesures in situ) modélisation analytique, simulation numérique et analyse systémique, Thèse de doctorat, université de Genève.
- [39] **POWELL J., 2005**, Puits canadien au provençal, Ecole architecteur de Lyon, France.
- [40] **SALOMON T., MIKOLASEK R., PEUPORTIER B., THIERS S., JAUTARD Y., TROMBE A., 2003**, Dimensionnement du puits climatique, Analyse, modélisation, validation d'un modèle de simulation dynamique pour les puits canadiens ou provençaux, Rapport ADEME, Région Languedoc Roussillon, France.
- [41] **Anonyme, 2008**, Les puits canadiens/provençaux, Guide d'information, Centre Technique des Industries Aérauliques et Thermiques «CETIAT», France.
- [42] **Source** : [http://fr.ekopedia.org/Puits\\_canadien](http://fr.ekopedia.org/Puits_canadien)
- [43] **Source** : <http://www.ecohabitation.com/guide/fiches/puits-canadien-dimensionner>
- [44] **DUPUIS A., 2012**, Le puits canadien : une solution économique et verte pour préchauffer et rafraichir l'air neuf, *Inter-Mécanique du Bâtiment*, vol.27 (24).
- [45] **HOLLMULLER P., 2002**, Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments : mesures in situ, modélisation analytique, simulation numérique et analyse systémique. Thèse de doctorat : Univ. Genève, no. Sc. 3357.
- [46] **Source** : <http://www.puitscanadien.com/pages/28.php>
- [47] **Source**: <http://puits-canadien.autoconstruction.info/outils/logiciel-gaea>
- [48] **BRAESKE T., HEIDT F.D., SCHNIEDERS J., 1996**, Software to assess energy performance and energy savings economy in buildings, *Proceedings EuroSun '96*, Freiburg, DGS-Sonnenenergie Verlags-GmbH, München, pp. 976, 982.
- [49] **BENKERT St., BRAESKE T., HEIDT F.D., 1996**, Presentation of passive solar and low energy architecture in Germany by multimedia software, *Proceedings Euro-Sun '96*, Freiburg, DGSSonnenenergie Verlags-GmbH, München, pp. 964, 969.
- [50] **Source** : <http://nesa1.uni-siegen.de/softlab/download/abschlussbericht.PDF>
- [51] **SAADEDINE M., 2013**, Identification et analyse des principaux facteurs influant le comportement thermique d'un échangeur air/sol enterré, Mémoire magistère en Génie mécanique, Université Mohamed Khider, Biskra.



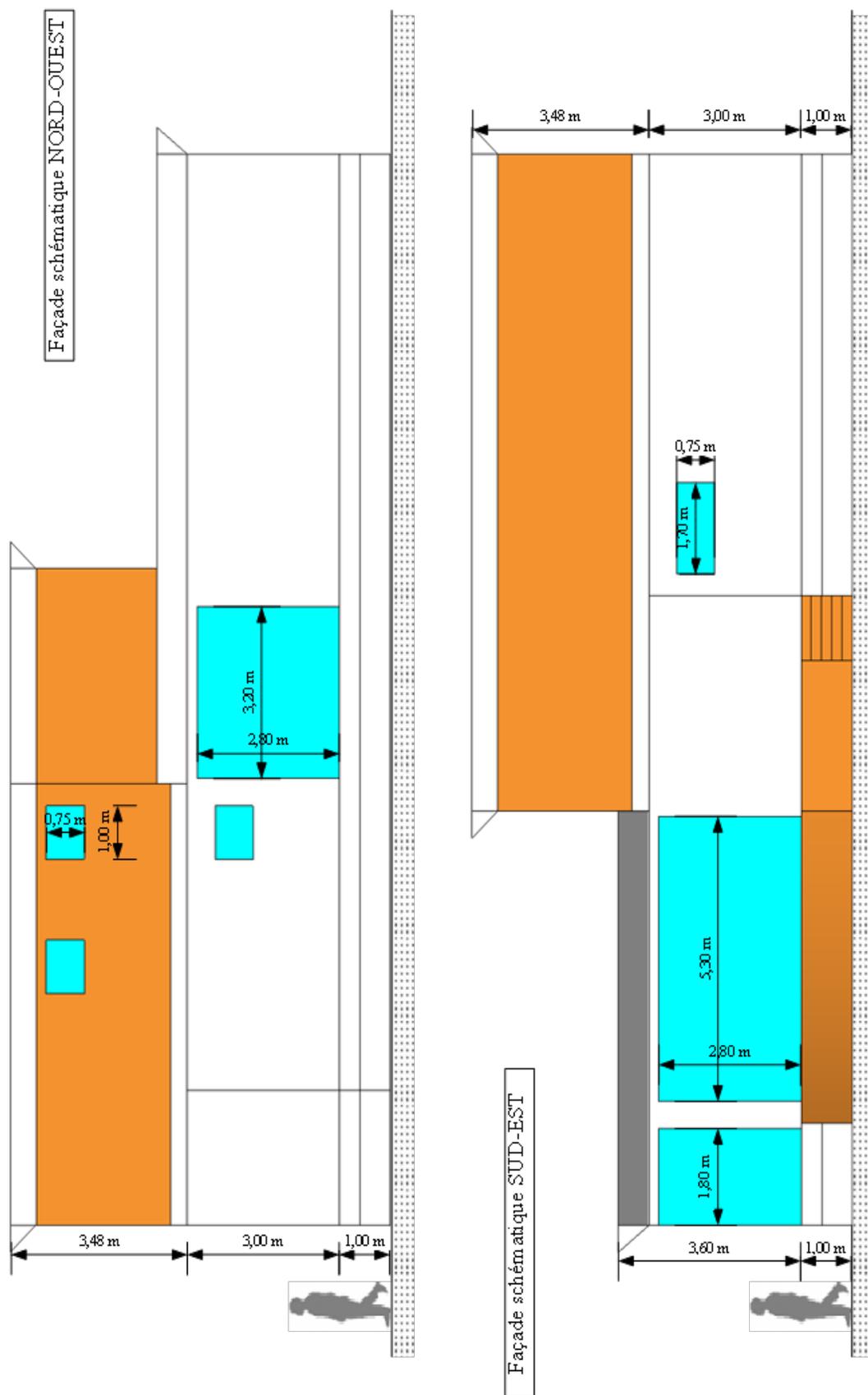
## Annexe 1 : Façades du projet



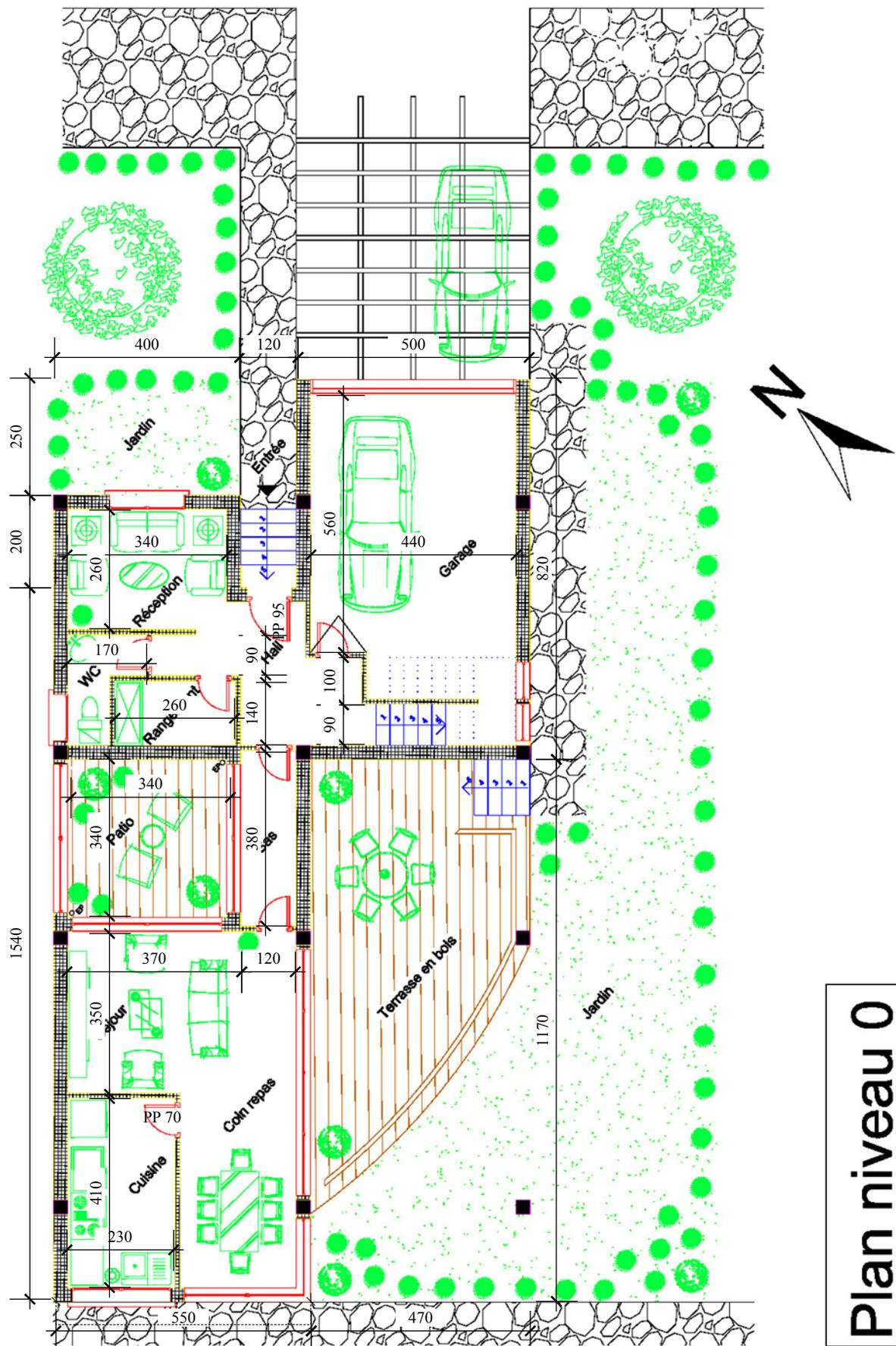
Façade schématique NORD-EST



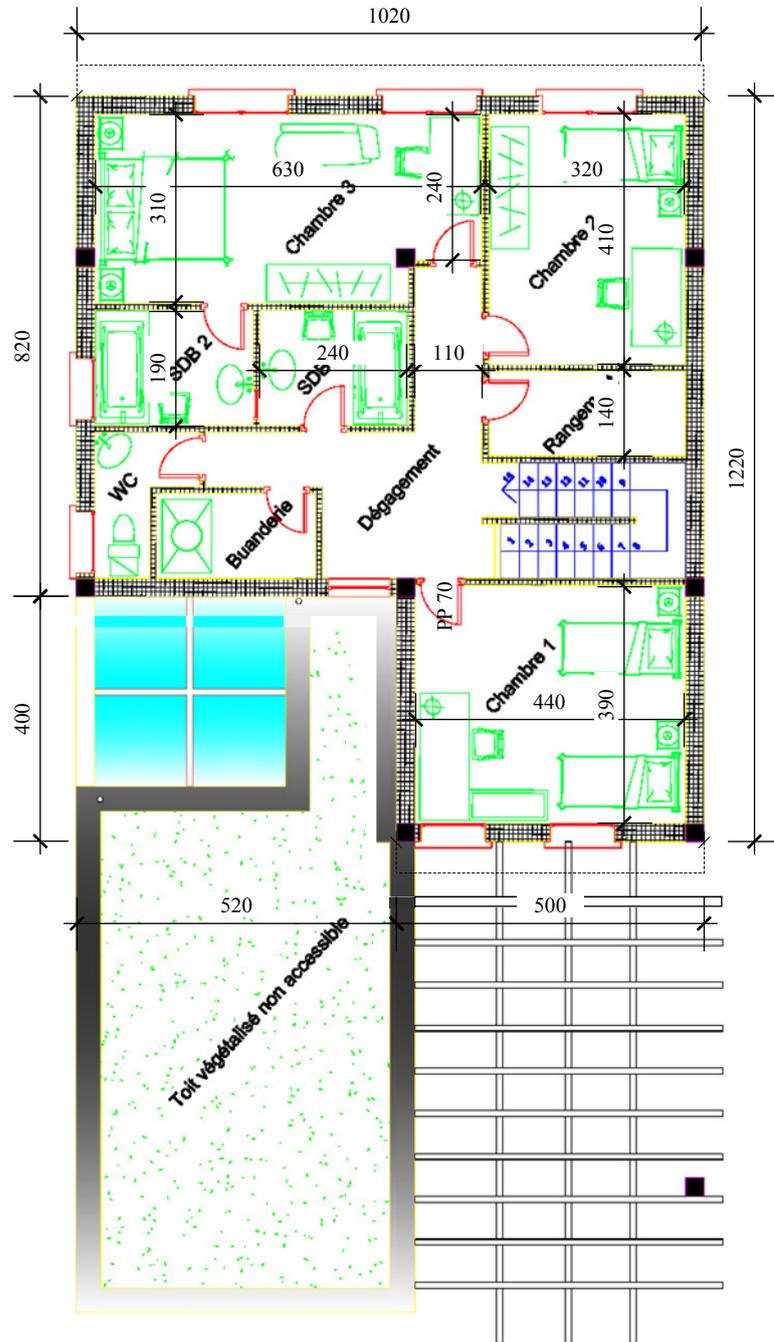
Façade schématique SUD-OUEST



## Annexe 3 : Plans du projet



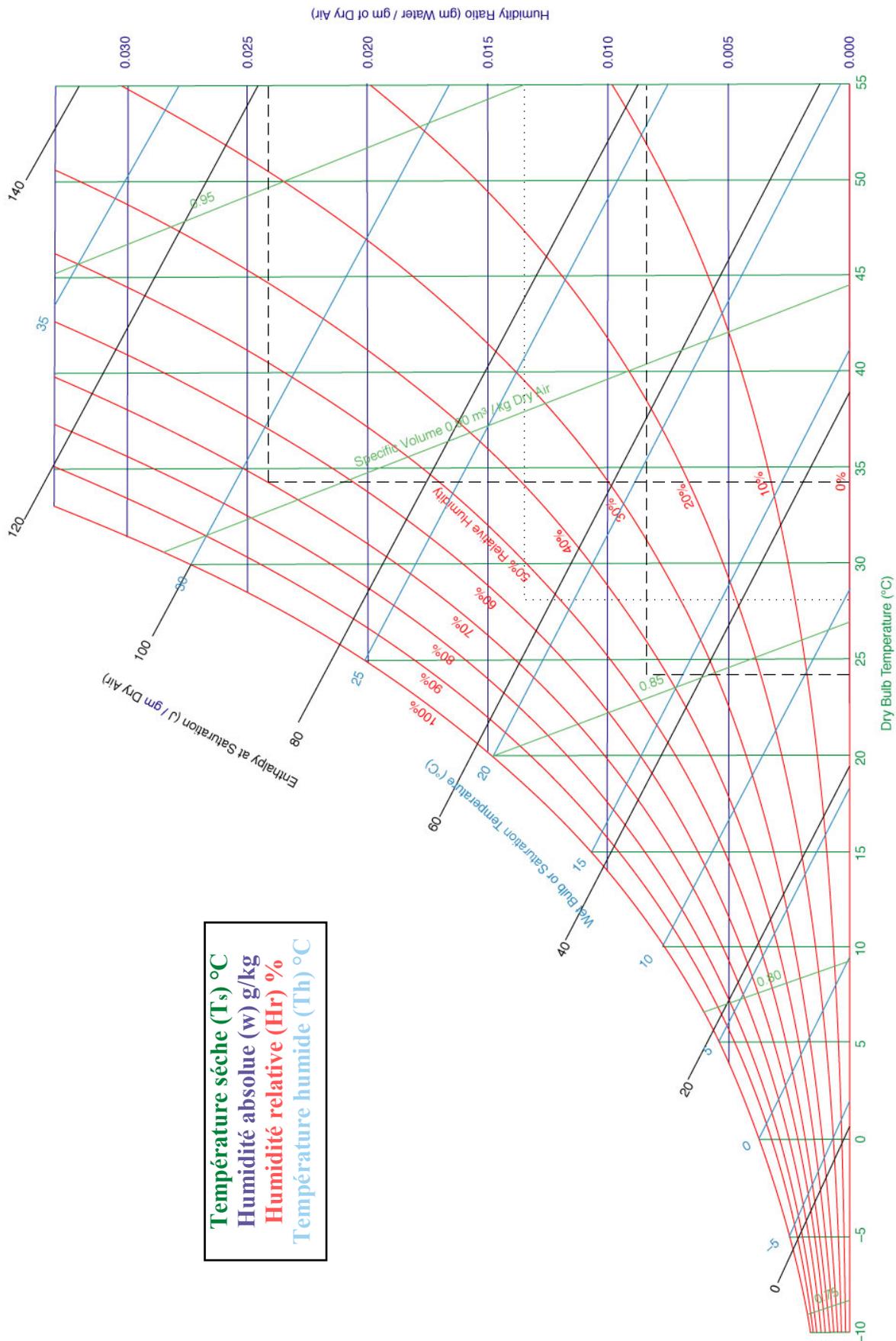
Plan niveau 0



Plan niveau 1



**Annexe 4 :** Diagramme de l'air humide (Diagramme psychrométrique) de Carrier [Source : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Air\\_humide](http://fr.wikipedia.org/wiki/Air_humide)]



**Annexe 5 : DTR C 3-4 Climatisation (Chambre n°2)****Conditions extérieures de base**

Zone climatique	Température sèche $TS_{b,e}$ (°C)	Humidité spécifique $HS_{b,e}$ ( $g_{vap}/kg_{as}$ )	Ecart diurne $E_b$ (°C)	Température moyenne $TS_m$ (°C)	Ecart annuel de température EAT (°C)
A alt < 500 m	34	14,5	9	25,5	31

**Conditions intérieures de base****Gains dus aux occupants**

APPLICATION	Niveau de confort amélioré		Niveau de confort normal			Degré d'activité	Exemple d'application	24(°C)	
	Température sèche (°C)	Humidité relative (%)	Température sèche (°C)	Humidité relative (%)	Accroissement toléré de la température (°C)			Sen	Lat
Séjour de longue durée  Logement, hôtel, bureaux, hôpital, école, etc.	24	45	27	50	2	Assis, travail très léger	Logement, bureau, hôtel, amphithéâtre	71 74	60 72

**La différence de température de référence pour les parois verticales  
Latitude 40°N (DTR C 3-4)**

Zone climatique  (alt en m)	Paroi en contact avec l'extérieur Orientation								Paroi en contact avec un l.n.c
	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO	
A alt < 500	4,66	5,44	5,89	8,22	9,81	10,02	8,75	5,66	4

**La différence de température de référence pour les parois horizontales**

(alt = altitude) Zone climatique	Paroi en contact avec l'extérieur	Paroi en contact avec un local non conditionné
A alt < 500 m	13,39	4

**La différence de température de référence pour les parois vitrées**

Valeurs de $\Delta TS_{réf,PVI}$ (en °C)		
Zone climatique	Paroi en contact avec l'extérieur	Paroi en contact avec un local non conditionné
A alt < 500 m	7	4

### Résistances thermiques d'échanges superficielles (Calorifique)

$\frac{l}{h}$ en $m^2 \cdot ^\circ C/W$	Pari en contact avec :			Pari en contact avec :		
	$1/h_i$	$1/h_e$	$1/h_i + 1/h_e$	$1/h_i$	$1/h_e$	$1/h_i + 1/h_e$
 Latéral (Mur) $\alpha > 60^\circ$	0,11	0,06	0,17	0,11	0,11	0,22
 Ascendant (toiture) $\alpha < 60^\circ$	0,09	0,05	0,14	0,09	0,09	0,18
 Descendant (plancher) $\alpha < 60^\circ$	0,17	0,05	0,22	0,17	0,17	0,34

### Résistances thermiques d'échanges superficielles (Frigorifique)

$\frac{l}{h}$ en $m^2 \cdot ^\circ C/W$	Pari en contact avec :			Pari en contact avec :		
	$1/h_i$	$1/h_e$	$1/h_i + 1/h_e$	$1/h_i$	$1/h_e$	$1/h_i + 1/h_e$
 Latéral (Mur) $\alpha > 60^\circ$	0,10	0,04	0,14	0,10	0,11	0,21
 (toiture) $\alpha < 60^\circ$	0,16	0,04	0,20	0,16	0,17	0,33
 (plancher)	0,08	0,04	0,12	0,08	0,09	0,17

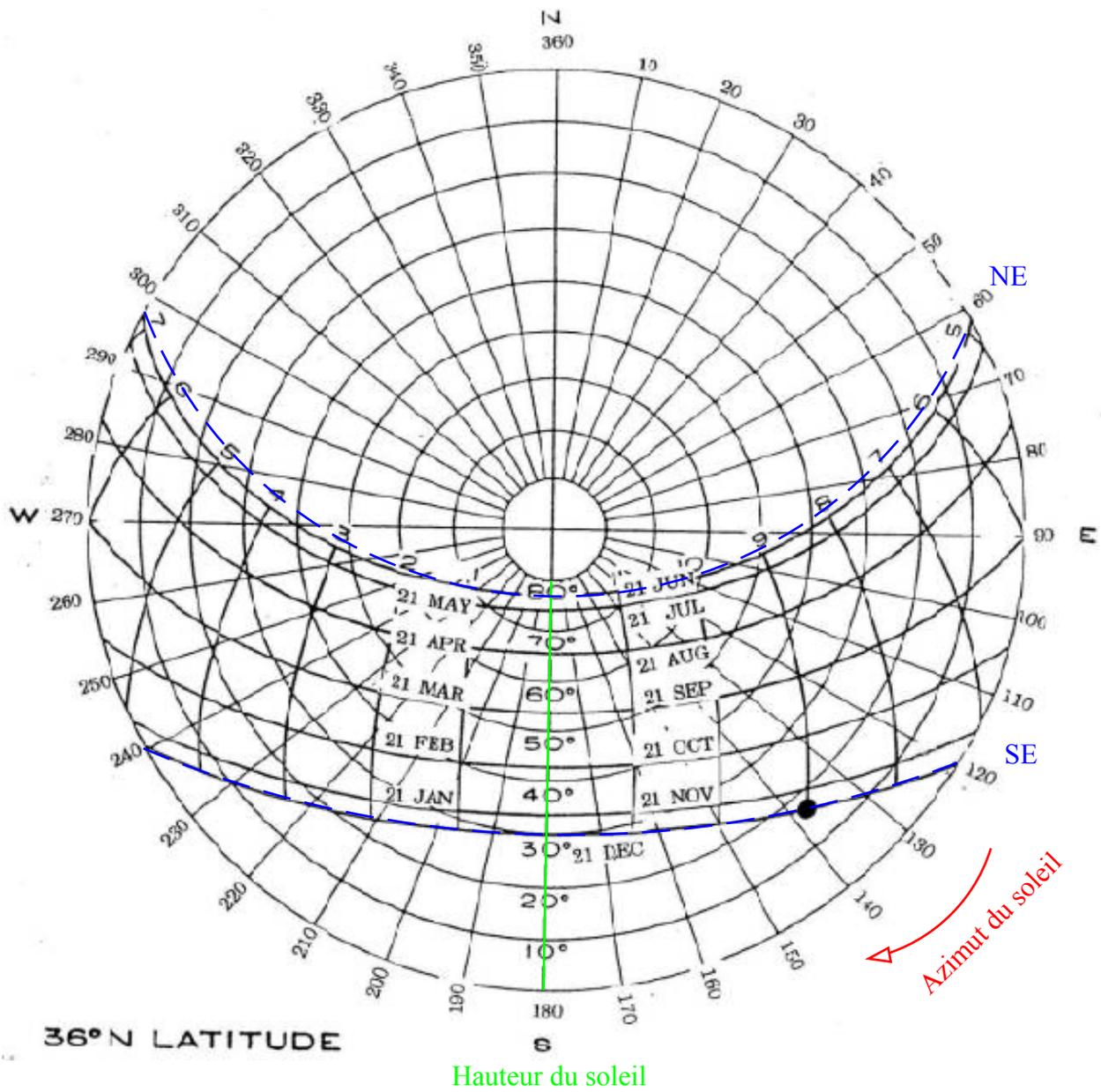
### Gains dus a l'éclairage

Désignation du local ou genre d'activité	Intensité lumineuse recommandée (lux)	Puissance dégagée des lampes ou des tubes ( $W/m^2$ )	
		lampes à incandescence	lampes fluorescentes
Entrepôt, pièces d'habitation, théâtre	120	25	8

### Apports calorifiques dus aux appareils électriques

Appareils	Gains à admettre (en W)		
	Sens.	Lat.	Total
Four électrique	3000	610	3610
Four micro-onde	1400	-	1400
Plaque chauffante ( $W_n = 500 W$ )	500	280	780
Télévision	150	-	150
Réfrigérateur (100 l)	100	-	100
Machine à laver (5 kg)	6000	3000	9000
Grille-pain	1900	760	2510
Friteuse 5 l d'huile	1200	690	1890
Fer à repasser	500	280	780
Aspirateur	200	-	200
Séchoir a cheveux	175/350	75/250	250/600
Cafetière	750	300	1050
Ordinateur	250	0	250
Imprimante a jet d'encre	52	0	52

**Annexe 6 :** Diagramme solaire ; Zone de surchauffe de la ville Tipaza [Source : [www.Marseille.archi.fr](http://www.Marseille.archi.fr)]



## Annexe 7 : AWADUKT THERMO - Système puits canadien PERFORMANCE THERMIQUE ET ECONOMIQUE [Batimatec 2015]



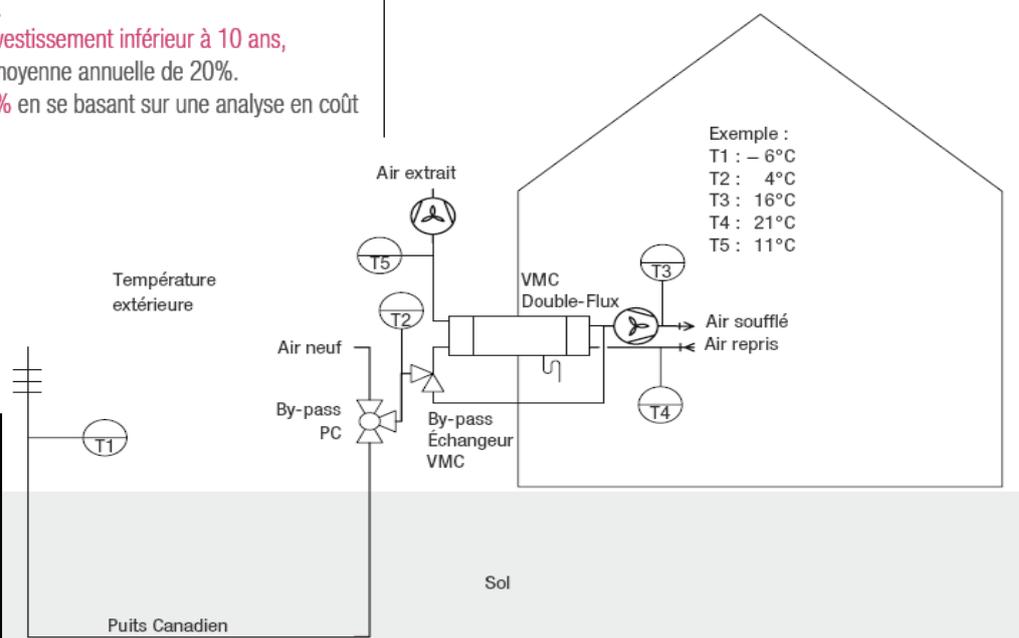
REHAU élabore et produit dans le domaine des techniques des bâtiments, des solutions intégrales et complète en matière de chauffage et de rafraîchissement moderne, d'installation de distribution d'eau, de tuyauteries industrielles et d'installations électriques, ainsi que pour l'utilisation d'énergie renouvelables.



### Les chiffres clés

- Le Puits Canadien permet un **différentiel de température de 10,6°C**.
- Le mode rafraîchissement permet à lui seul une **économie de 785 kg CO<sub>2</sub> équivalent/an**.
- **Un temps de retour sur investissement inférieur à 10 ans**,
- Une économie d'énergie moyenne annuelle de 20%.
- **Un gain financier de 31,7%** en se basant sur une analyse en coût global.

Coupe schématique de principe de fonctionnement du système de ventilation



Exemple de mise en oeuvre du puits canadien

### Caractéristiques du Puits Canadien

Débit volumique d'air	1,400 m <sup>3</sup> /h
Dimensions des tubes du collecteur	DN400
Dimensions des tubes de l'échangeur	DN200
Longueur	36 m
Nombre de branches	5
Profondeur moyenne d'installation	1,5 m
Ecartement entre branches	1,0 m
Matériau des tubes	Polypropylène
Conductivité thermique	0,28 W / (m K)

### Caractéristiques du sol

Conductivité thermique	1.20 W / (m K)
Capacité thermique calorifique	0.90 kJ / (kg K)
Densité	1,800 kg/m <sup>3</sup>

## *Chapitre introductif*



## Introduction générale :

«Tout immeuble de logements, ou maison individuelle, sera optimisé par rapport à son environnement climatique si le maître d'œuvre à tenu compte des vents amenant le froid et la pluie, de l'orientation des pièces en fonction de leurs usages pour un meilleur confort thermique et visuel»<sup>[1]</sup>.

L'intérêt du bien-être de l'homme est un sujet soulevé et approché par de multiples disciplines. Cet intérêt se fonde sur les rapports d'échanges qu'entretient l'homme avec son environnement. Le climat est l'un des facteurs indéniable dans l'étude du confort thermique d'un habitat, cette notion représente l'un des éléments important dans le secteur résidentiel, non seulement pour la qualité des ambiances intérieures, mais aussi pour la quantité d'énergie à fournir par les équipements d'ambiance. Or l'énergie utilisée pour chauffer, ventiler ou climatiser les bâtiments représentent la majorité de l'énergie consommée par ce secteur, et responsable du quart des émissions de CO<sub>2</sub>, principal gaz à effet de serre<sup>[2]</sup>.

En outre, l'utilisation de sources d'énergie *renouvelables*, sont propres, sans danger et inépuisables. Elles sont aussi appelées "énergies solaires" car d'entre elles dépendent du soleil, (Solaire photovoltaïque, thermique), du vent (Energie éolienne), du sol (Géothermie : Puits canadien),... Il est désormais indispensable de développer les énergies renouvelables pour lutter contre l'effet de serre, et pour prévoir le remplacement du pétrole.

A l'échelle planétaire, le secteur du bâtiment est responsable d'environ 30 à 40 % de la consommation annuelle mondiale d'énergie, et de près de 30 % de l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre "GES"<sup>[3]</sup>. L'Algérie a consenti des efforts importants pour offrir une habitation aux différentes couches sociales en construisant plusieurs millions de logements. Elle jouit d'une position relativement enviable en matière énergétique. Le niveau de consommation de ces secteurs résidentiels et tertiaires est de 46 % de l'énergie finale et de 28 % de l'énergie primaire<sup>[4]</sup>. Malheureusement la qualité de l'habitat est pauvre, principalement en termes de confort thermique, et ne répond plus aux préoccupations actuelles en termes de protection de l'environnement et moins encore en termes d'efficacité énergétique.

Un bâtiment est soumis en permanence à des sollicitations extérieures (température, ensoleillement, vent) qui viennent perturber son état thermique. Ce confort constitue une demande reconnue et justifiée dans les bâtiments du fait de son impact sur la qualité des ambiances intérieures, la santé et la productivité de l'occupant. Une conception bioclimatique permet de réduire les besoins énergétiques et de créer un climat de bien être à l'intérieur des logements avec des températures agréables et une humidité contrôlée.

Notre travail de recherche consiste à mettre en relief, l'étude du confort thermique d'un projet architectural, réalisé au cours de l'année précédente d'une maison individuelle conforme à une conception bioclimatique, situé au niveau de la ville de Tipaza[5].

Le but est d'apporter des solutions aux exigences du confort thermique demandé et de réduire les besoins en chauffage et en rafraîchissement en utilisant les énergies renouvelables, et cela par un dimensionnement d'un système attribuer à ce type d'habitat.

Le mémoire est structuré en quatre (4) parties :

*La première*, concerne le corpus théorique, il s'agit d'introduire le thème de notre recherche à travers un état de l'art sur l'étude de confort thermique, ainsi se qui influent sur ce dernier (la conception bioclimatique).

*La deuxième partie* pratique, concerne la présentation du cas étudié (Situation géographique, données climatologiques,...), suivie d'un bilan thermique de la maison. La procédure se fait par une méthode de calcul ainsi par simulation dynamique, et on termine par une analyse de quelques exemples de projets d'habitats bioclimatiques réalisés.

*La troisième partie*, consiste une étude de fonctionnement et de dimensionnement d'un système à énergie renouvelable attribuer à ce type d'habitat ; Dans notre cas on opte pour le puits canadien, qui permet de compléter les besoins énergétique.

*La quatrième partie*, est une simulation du système appliqué, et une interprétation des résultats dont le but est d'évaluer les performances thermiques de l'habitat concernant par des propositions d'améliorations techniques pour un meilleur confort thermique recherché.

## ***Chapitre 1 :***

*État de l'art sur l'étude de confort thermique  
dans la conception bioclimatique*



### **Introduction :**

La recherche du confort a toujours été une préoccupation dans l'habitat des générations précédentes. Un objectif majeur était de créer des lieux qui permettent de profiter des bienfaits du climat tout en se préservant de ses effets contraignants, dans la recherche d'un cadre de vie en accord avec l'environnement. Cette démarche de composer avec le climat a toujours été l'objectif principal de l'architecture bioclimatique.

L'étude du confort thermique constitue l'une des bases principaux dans la conception du bâtiment. Elle met en évidence le comportement thermique d'une habitation à long terme, et ce à partir de la prédiction des températures ambiantes intérieures.

Assurer une sensation de chaleur en hiver et se préserver des fortes chaleurs en été, est depuis longtemps un souci majeur pour les concepteurs. D'ailleurs, un des objectifs de l'architecture réside dans la satisfaction des occupants par le bien être thermique.

Le but est donc de pouvoir continuer à assurer l'abri et le confort de l'utilisateur tout en minimisant la consommation d'énergie pour la climatisation et le chauffage ainsi que l'impact du bâtiment sur l'environnement.

Ce chapitre consiste, la compréhension des différents concepts et notions clés, elle découle d'un état de l'art sur l'étude de confort thermique dans la conception bioclimatique. En premier, nous analysons les informations existantes en matière de confort thermique, en faisant le point sur sa notion, ces différents paramètres et l'un des outils de calcul. Nous nous intéressons ensuite, aux facteurs agissant sur le confort thermique (sa relation à l'architecture bioclimatique), avec son concept, ces différents systèmes et ces principes de bases d'ensembles (implantation, forme, orientation,...) et ces bases en détails (inertie, isolation thermique,...) en prenant compte notre projet d'étude (habitat individuel bioclimatique). Cette analyse permettra la mise en œuvre des phases suivantes du travail de recherche.

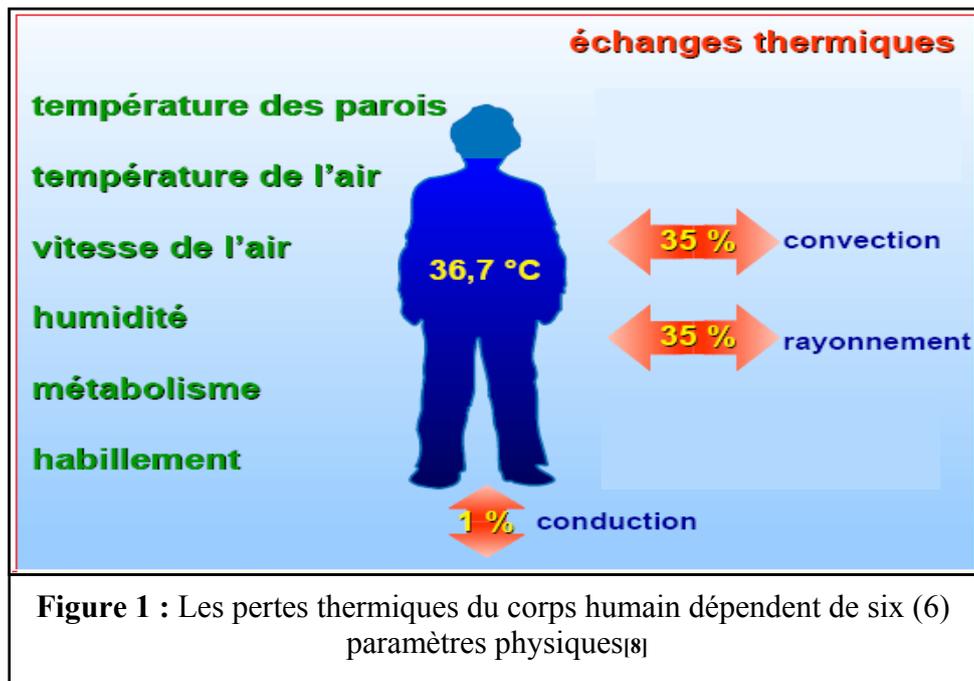
## 1) La notion de confort thermique :

Le confort thermique est défini comme "un état de satisfaction du corps vis-à-vis de l'environnement thermique"<sup>[6]</sup>, c'est-à-dire, qu'il établit des échanges thermiques entre le corps et son environnement.

La notion de confort thermique est essentielle dans le bilan énergétique dans le sens où c'est le premier critère à obtenir, avec certes la meilleure possible et l'économie d'énergie les plus importantes possibles<sup>[7]</sup>.

## 2) Les paramètres affectant le confort thermique :

La sensation de confort thermique est fonction de plusieurs paramètres, qui sont (figure 1) :



### 2.1. Paramètres liés à l'ambiance extérieure :

#### a) La température de l'air :

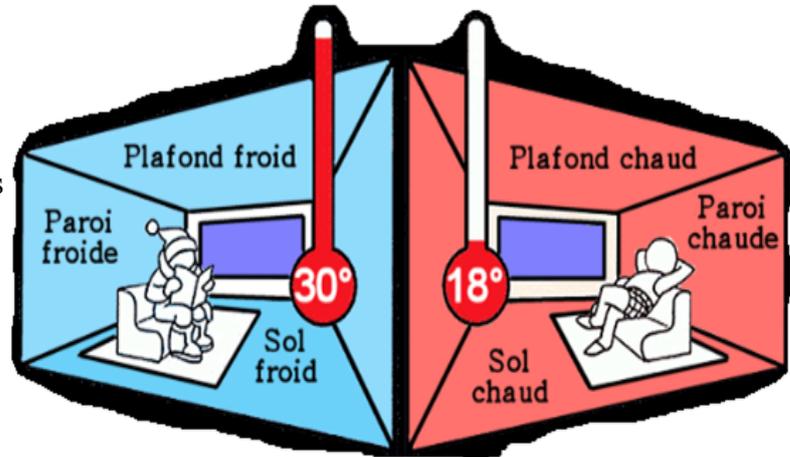
La température de l'air, ou température ambiante ( $T_a$ ), est un paramètre essentiel du confort thermique. Elle intervient dans l'évaluation du bilan thermique de l'individu au niveau des échanges convectifs, conductifs et respiratoires<sup>[9]</sup>.

La température au niveau du sol est plus basse que la température au niveau du plafond. L'air chaud léger s'élève alors que l'air froid dense descend.

La température diminue aux bords des parois, fenêtres et portes en hiver. En été, celle-ci augmente.

La température de l'air ambiant d'une pièce est mesurée au centre et à 1 m du sol.

L'enveloppe de l'habitation doit permettre de conserver la chaleur entre 19 et 26°C, malgré les variations de la température extérieure avec les saisons et les heures de la journée. De ce fait, l'isolation de la maison est importante[10].



### b) La température des parois :

Il s'agit d'une température ( $T_p$ ), avec laquelle le corps échange de la chaleur par rayonnement (une vitre aura une température rayonnante faible en hiver)[10].

Pour une paroi non isolée (à gauche figure 2), la température de surface est basse : 12°C. Pour une température de l'air ambiant de 20°C, la température résultante sera donc de 16°C, soit une température inconfortable : c'est l'effet dit de paroi froide. Le corps perd de la chaleur en direction des sources froides.

Pour une paroi isolée (paroi de droite), la température de surface est égale à 16°C et la température résultante augmente jusqu'à 18°C. La température des parois étant toujours inférieure à celle du corps. Ce dernier continue à perdre de la chaleur mais en moindre quantité, lui permettant d'atteindre un état de confort.

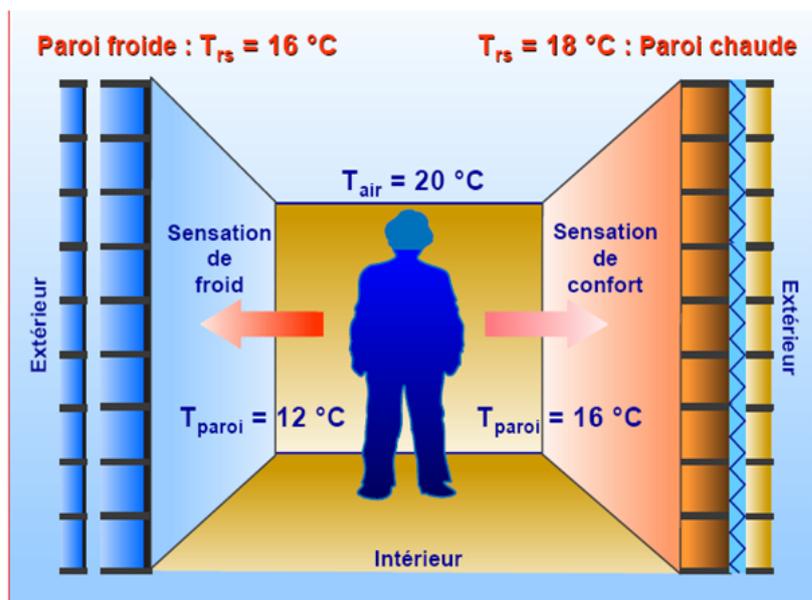
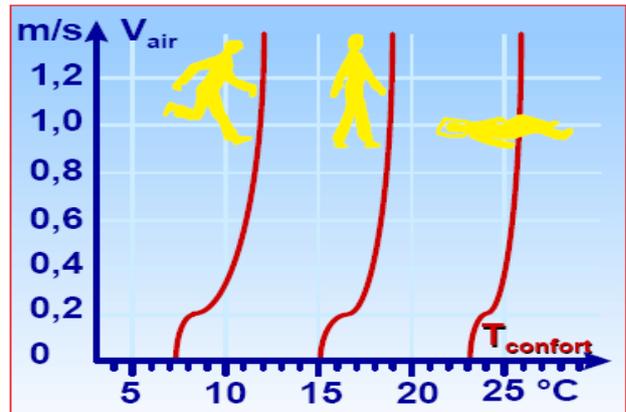


Figure 2 : La température de confort dépend de la température de l'air et de la température des parois[8]

**c) La vitesse de l'air :**

La vitesse de l'air influence les échanges de chaleur par convection et augmente l'évaporation à la surface de la peau. Elle intervient dans la sensation de confort thermique de l'occupant dès qu'elle est supérieure à 0,2 m/s : c'est en effet à partir de cette vitesse qu'un courant d'air peut être ressenti par un individu moyen.

La figure 3 met en relation la vitesse de l'air et la sensation de confort. Les courbes représentent les températures de confort déterminées statistiquement pour différents niveaux d'activité. Les températures de confort varient d'environ 3°C.



**Figure 3 :** Températures de confort pour différentes vitesses relatives de l'air et un habillement moyen, d'après FANGER O.[8]

**d) L'humidité relative :**

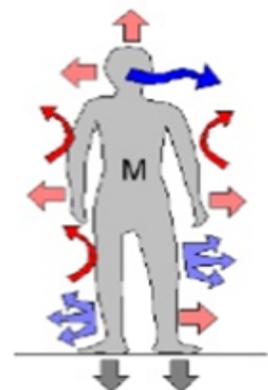
L'humidité relative (Hr) est le rapport exprimé en pourcentage entre la quantité d'eau contenue dans l'air à la température ambiante et la quantité maximale qu'il peut contenir à cette même température[8].

Selon LIEBARD A.[8], entre 30 % et 70 %, l'humidité relative influence peu la sensation de confort thermique[8]. Une humidité trop forte dérègle la thermorégulation de l'organisme car l'évaporation à la surface de la peau ne se fait plus, ce qui augmente la transpiration[11], le corps est la plupart du temps en situation d'inconfort.

**2.2. Paramètres liés à l'individu :**

**a) Le métabolisme :**

C'est la somme des réactions chimiques qui se produisent dans le corps, et libèrent une chaleur interne permettant de maintenir le corps humain à une température autour de 36,7°C. Lorsqu'une personne est en mouvement, un métabolisme de travail correspondant à son activité particulière s'ajoute au métabolisme de base du corps au repos[12].



## b) L'habillement :

Les vêtements permettent de créer un microclimat sous-vestimental, à travers leurs résistances thermiques, en modifiant les échanges de chaleur, entre la peau et l'environnement. Leur rôle essentiel est de maintenir le corps dans des conditions thermiques acceptables, été comme hiver[9].

En plus de ces paramètres, un autre point influant sur le confort thermique, est :

### 2.3. Paramètres liés aux gains thermiques internes :

Avec l'essor de la technologie et des besoins électriques (éclairage, électroménager,...), les apports de chaleur internes ont fortement augmenté. Les appareils électriques transforment en effet quasiment toute l'énergie qu'ils consomment en chaleur. Les postes informatiques sont également de vraies sources de chaleur et les occupants constituent eux aussi une autre source d'apports internes par leur métabolisme. Les apports internes comprennent donc, toute quantité de chaleur générée dans l'espace par des sources internes autres que le système de chauffage[9].

Ces gains de chaleur dépendent du type du bâtiment, du nombre des utilisateurs et de son usage (Figure 4).

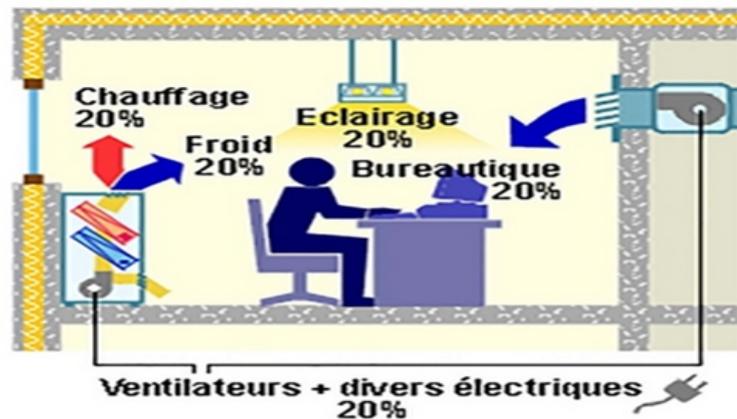


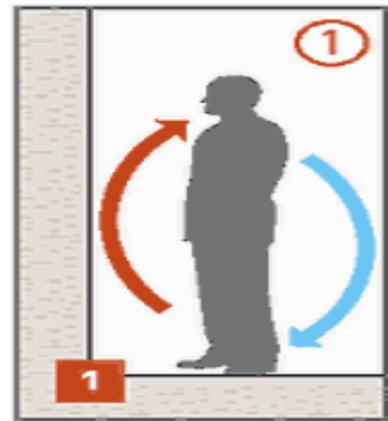
Figure 4 : Gains de chaleur internes[13]

## 3) Les échanges thermiques du corps humain :

La diffusion de chaleur entre l'individu et l'ambiance s'effectue selon divers mécanismes : plus de 50% des pertes de chaleur du corps humain se font par convection avec l'air ambiant (convection et évaporation par la respiration ou à la surface de la peau). Les échanges par rayonnement à la surface de la peau représentent jusqu'à 35% du bilan, alors que les pertes par contact (conduction) sont négligeables (< 1%). Le corps perd également 6% de sa chaleur à réchauffer la nourriture ingérée[14].

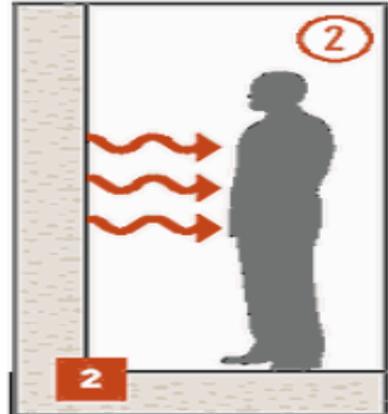
### 3.1. Convection :

La convection est le transfert de chaleur entre la peau et l'air qui l'entoure. Elle dépend de la différence entre la température de l'air et celle de la surface exposée, peau ou vêtement. Si la température de la peau est supérieure à la température de l'air, la peau va se refroidir. Dans le cas contraire, elle va se réchauffer[9].



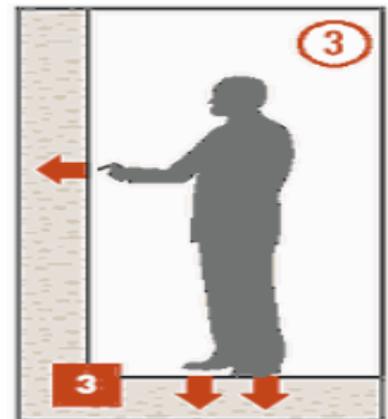
### 3.2. Rayonnement :

L'échange par rayonnement est le mode d'échange de chaleur à distance entre deux (2) corps par ondes électromagnétiques. Il s'agit principalement d'échanges, entre la surface du corps et les surfaces de la pièce. Ainsi des inconforts froids peuvent être perçus par rayonnement à proximité des parois froides (exemple : mur mal isolé, fenêtre simple vitrage)[9].



### 3.3. Conduction :

La conduction concerne l'échange de chaleur par contact direct entre certaines parties du corps et une surface de température différente (le sol, les parois ou le mobilier). Par exemple un matériau effusif plus froid que la peau, par contact « pompe » de la chaleur au corps humain en donnant une sensation de froid[15].



## 4) Le diagramme bioclimatique :

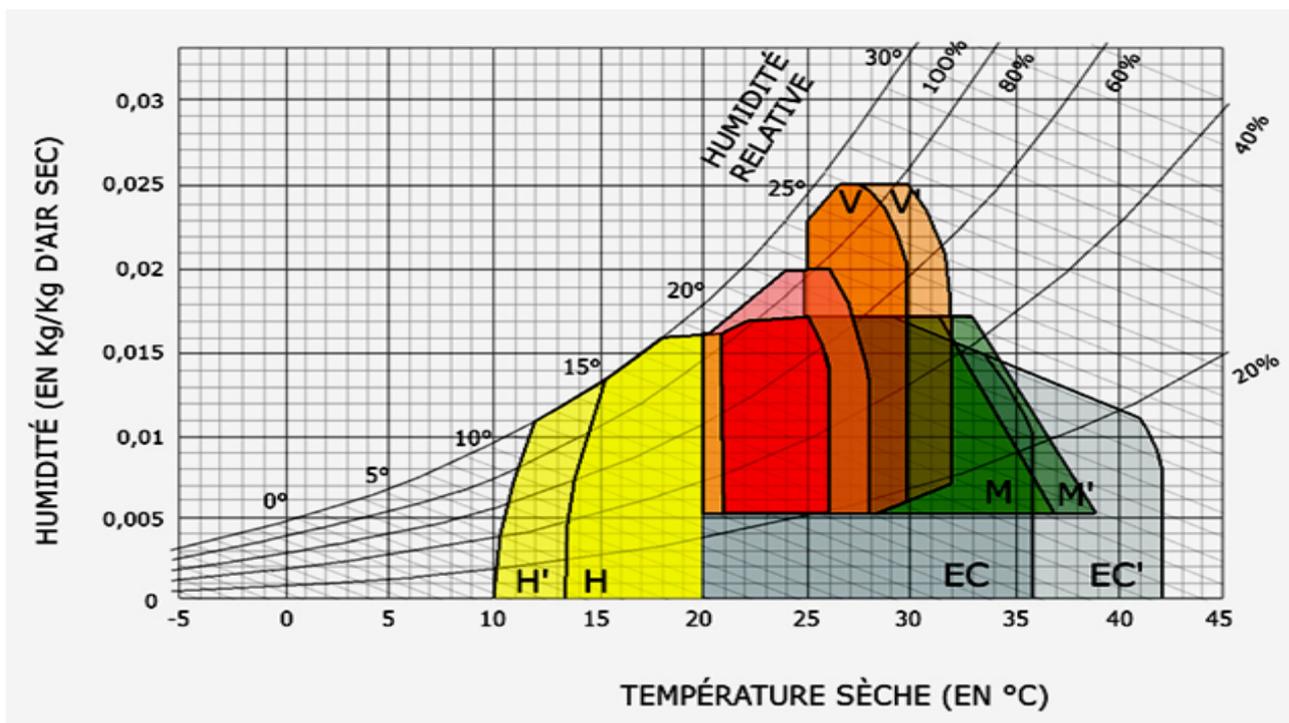
Le diagramme bioclimatique du bâtiment, est un outil d'aide à la décision globale du projet bioclimatique permettant d'établir le degré de nécessité de mise en œuvre de grandes options telles que l'inertie thermique, la ventilation généralisée, le refroidissement évaporatif, puis le chauffage ou la climatisation. Il est construit sur un diagramme psychrométrique (appelé aussi diagramme de l'air humide) (figure 5).

Sur ce diagramme sont représentées[16] :

- La zone de confort hygrothermique tracée pour une activité sédentaire, une vitesse d'air minimale (en général 0.1 m/s) et les tenues vestimentaires moyennes d'hiver et d'été

L'extension de la zone de confort hygrothermique due à la ventilation par augmentation de la vitesse d'air de 0.1 à 1.5 m/s :

- La zone des conditions hygrothermiques compensables par l'inertie thermique associée à la protection solaire et à l'utilisation d'enduits clairs
- La zone des conditions hygrothermiques compensables par l'inertie thermique associée à la protection solaire et à l'utilisation d'enduits clairs que l'on cumule avec une ventilation nocturne
- La zone des conditions hygrothermiques compensables par l'utilisation de systèmes passifs de refroidissement par évaporation
- La zone des conditions hygrothermiques qui nécessitent l'humidification de l'air
- La zone des conditions hygrothermiques compensables par une conception solaire passive du bâtiment



-  -zone du confort thermique
-  - zone d'influence de la ventilation à 0,5m/s (VV')
-  -zone de l'inertie thermique (MM')
-  -zone d'influence du refroidissement évaporatif (EC et EC'),
-  -zone de non-chauffage par la conception solaire passive (H et H')

Figure 5 : Diagramme bioclimatique du bâtiment<sup>[16]</sup>

Le diagramme bioclimatique trouve son utilité dès que les conditions climatiques s'écartent du polygone de confort, la distance qui sépare ces conditions des limites du polygone suggère dans le diagramme bioclimatique les solutions constructives et fonctionnelles qu'il faut adopter pour concevoir un bâtiment adapté : ventilation, inertie thermique, protection solaire, utilisation des systèmes passifs.

Cette méthode graphique permet de bien se rendre compte de quelques techniques que l'on peut utiliser pour améliorer le confort dans le bâtiment. On peut voir par exemple que plus la vitesse de l'air est importante, plus la zone de confort est grande. Une ambiance peut donc être confortable avec une température de 30°C si la vitesse de l'air est de 0.5 m/s, de même, on se rend compte qu'à une température donnée, si l'on baisse l'humidité de l'air, on peut passer d'une zone d'inconfort à une zone de confort. C'est ce qui est utilisé dans les systèmes de climatisation, qui en même temps apportent de la fraîcheur à un local, diminuent son taux d'humidité[17].

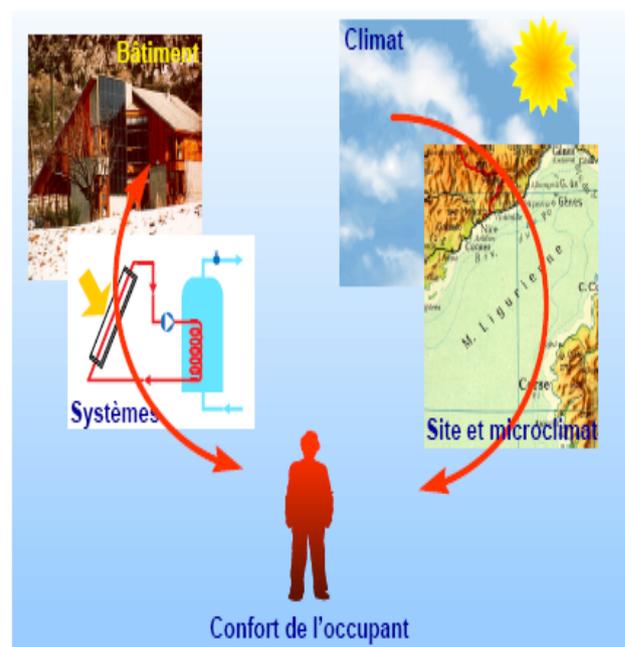
Le diagramme bioclimatique n'est pas un outil de dimensionnement précis du projet, mais il constitue bien un guide pour aider l'architecte à prendre les bonnes décisions en phase esquisse[17].

### 5) Différents facteurs agissant sur le confort thermique

Nos climats n'offrent pas de conditions suffisantes pour assurer le confort thermique toute l'année, il est nécessaire de corriger ses données par le chauffage ou la climatisation des bâtiments. L'objectif à poursuivre est donc d'obtenir la meilleure adéquation entre le climat, le bâtiment et le comportement de l'occupant[8].

Redécouverte au début des années 70, l'architecture bioclimatique recherche une synthèse harmonieuse entre la destination du bâtiment, le confort de l'occupant et le respect de l'environnement. Elle permet de réduire les besoins énergétiques et de créer un climat de bien être dans les pièces avec des températures agréables, une humidité contrôlée et un éclairage naturel abondant.

Dans ce qui ce suit, nous présentons les bases de conception bioclimatique appliqués a un projet habitat individuel situé a Tipaza. Ces principes, sont fondés sur un choix judicieux de la forme du



**Figure 6 :** L'architecture bioclimatique place l'occupant au centre de ses préoccupations[8]

bâti, de son implantation, de la disposition des espaces, des matériaux utilisés et de l'orientation en fonction des particularités du site : climat, vents dominants, ensoleillement, vues,...

**5.1. Les bases de conceptions d'ensemble :**

**a) L'implantation et orientation (le terrain) :**

Le choix d'implantation d'un bâtiment influence directement sur le degré de confort thermique que ce dernier peut procurer à ses occupants, a cause de l'incidence du soleil, des vents dominants sur son enveloppe et de sa situation dans son environnement[9].

La localisation du bâtiment dans son site, selon WRIGHT D.[18], le processus de conception des bâtiments bioclimatiques, consiste en la recherche d'une méthode de création qui intègre tous les éléments importants de l'environnement, du site et du climat que nous résumons dans le tableau 1.

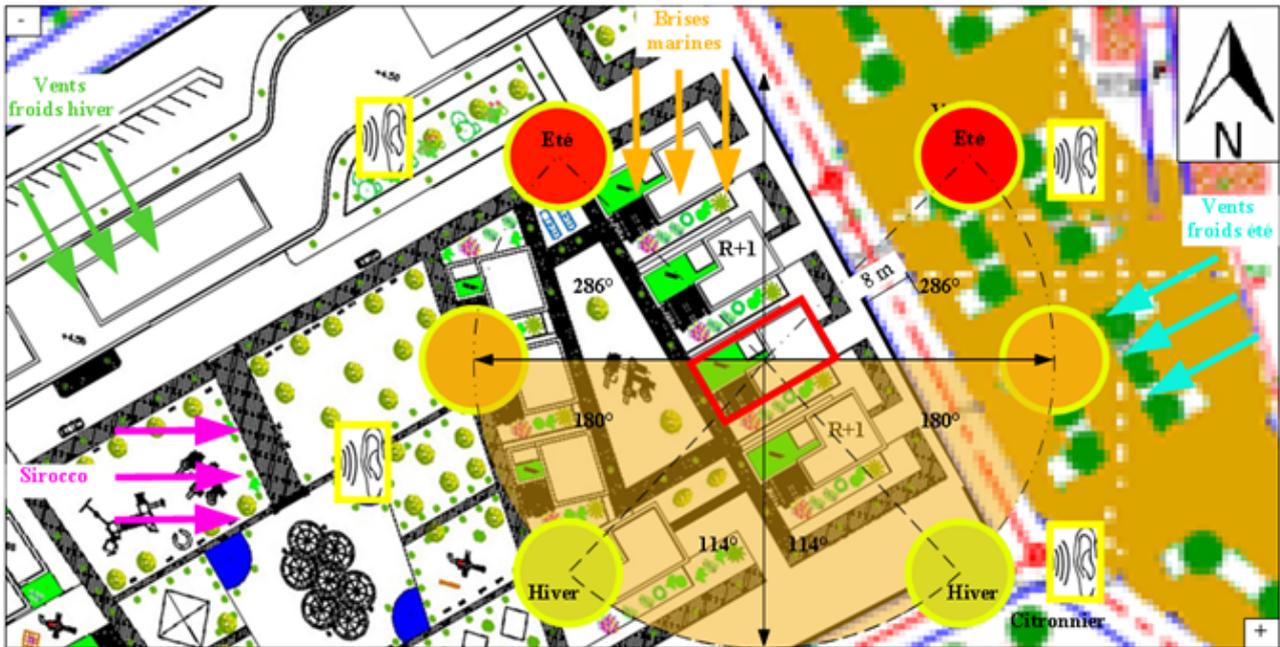
Environnement	Climat	Autres
- Type de région	- L'ensoleillement	- le contexte urbain
- Nature du sol	- Température	- législation
- Végétation	- Type de temps	- Matériaux locaux
- Profil du terrain	- Luminosité	- Eau, gaz, électricité
- Altitude et la latitude	- Précipitations	- Alimentation en eau... ..etc
- Vue	- Humidité	
- Bruit	- vent .....etc	
.....etc		

**Tableau 1 : Eléments d'analyse pour localiser un bâtiment bioclimatique**

Une bonne implantation (figure 7) recherche à bénéficier au maximum :

- \* De protections naturelles au vent et au soleil estival par la topographie du terrain naturel et la végétation existante
- \* De l'ensoleillement hivernal en évitant les masques portés par la végétation, le relief et l'environnement bâti.

Le choix d'une orientation est soumis d'après GIVONI B.[19], à de nombreuses considérations, telles que la vue, dans différentes directions, la position du bâtiment par rapport aux voies, la topographie du site, la position des sources de nuisances, le rayonnement solaire et ses effets d'échauffement, ainsi que la ventilation en rapport avec la direction des vents dominants. Il place le concept de l'orientation au centre des éléments influant sur les ambiances intérieures d'un bâtiment.

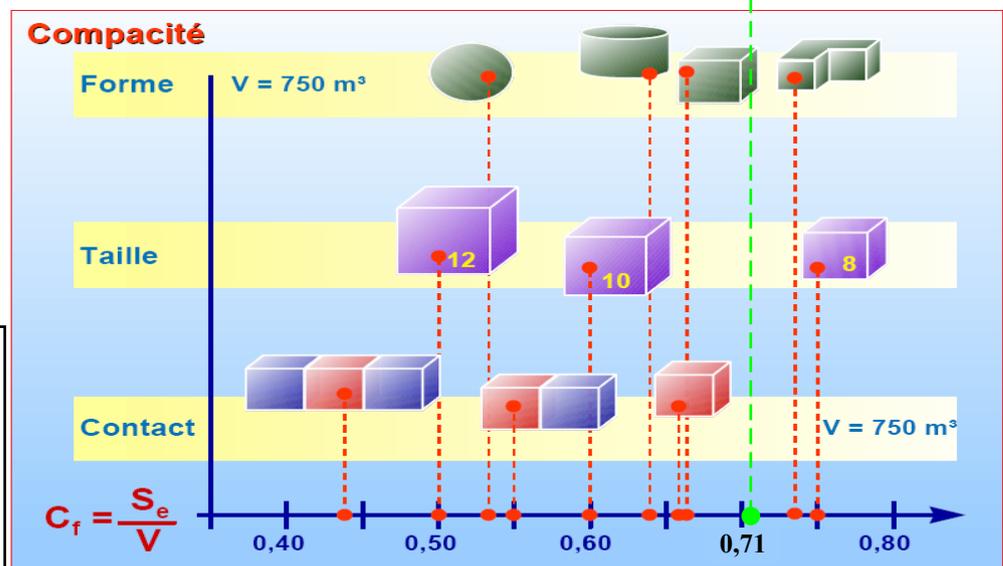
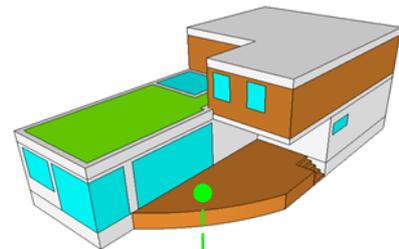


**Figure 7 :** Plan de masse Tipaza P.O.S AU2 implantation et orientation de la maison individuelle par rapport au terrain[Auteur]

**b) La forme et la compacité :**

La compacité d'un bâtiment (coefficient de forme Cf) est défini comme le rapport entre la surface de déperdition de l'enveloppe extérieure et le volume habitable (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>). Il indique le degré d'exposition du bâtiment aux conditions climatiques ambiantes. Plus la surface de déperditions est grande, plus les pertes de chaleur augmentent, le bâtiment est plus économe en énergie quand le coefficient de forme prend des valeurs plus élevées[9].

La figure 8 ci-dessous, propose, à partir d'une analyse purement géométrique, de comparer la variation de la compacité par rapport à la forme, la taille, au mode de contact.



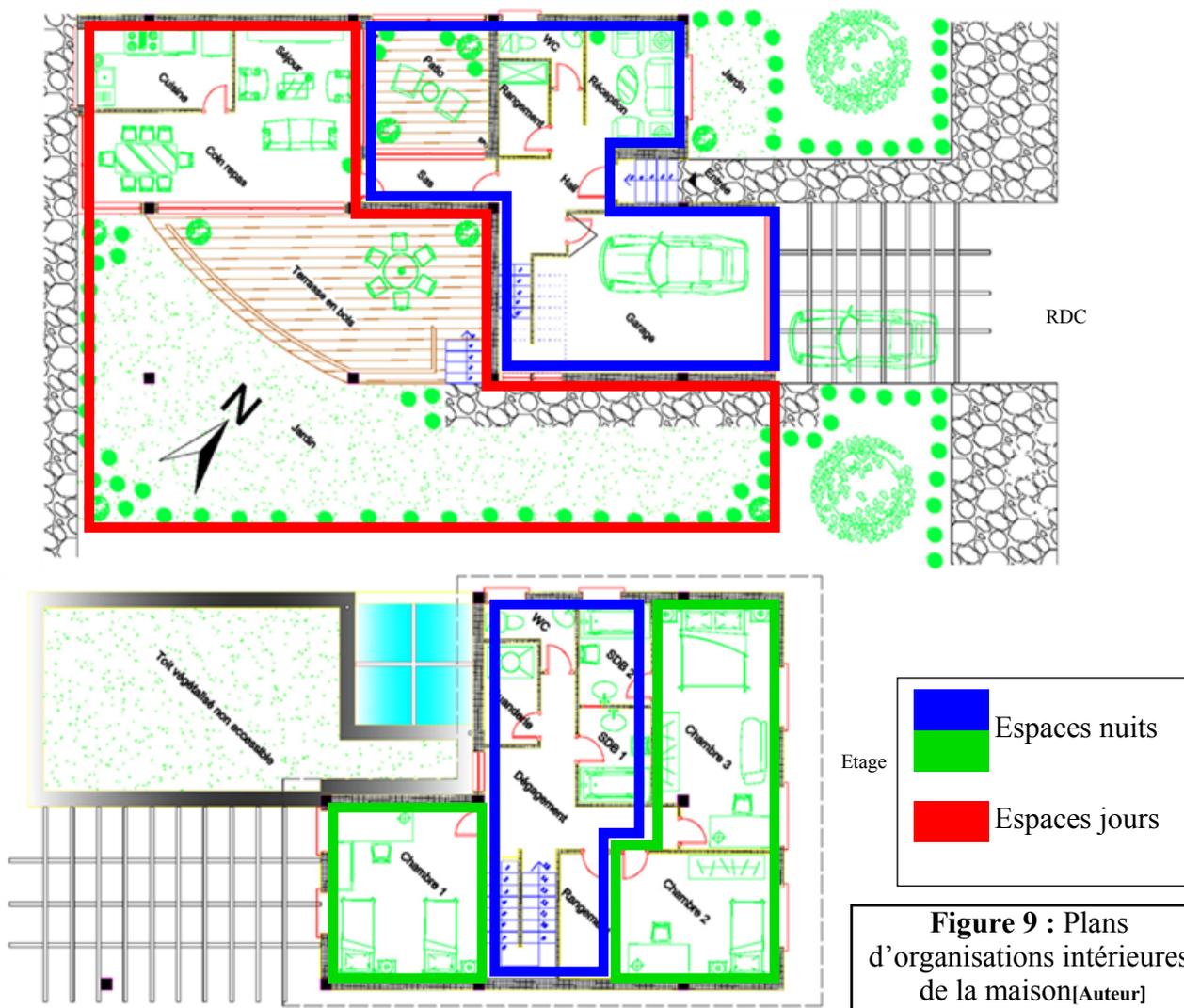
**Figure 8 :** Impact de la forme, la taille et proximité sur la compacité (Cf maison : 0.71 (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)[8+Auteur]

**c) L'organisation intérieure :**

La hiérarchisation des espaces (figure 9) assure la transition entre l'extérieur et l'intérieur. Les espaces intérieurs sont organisés en fonction de l'usage, de manière à ce que l'ambiance thermique corresponde aux activités et aux heures d'utilisation, c'est-à-dire rarement utilisés mais jouant un rôle protecteur vis-à-vis du froid[9].

L'organisation générale de la maison bioclimatique est répartie sur deux (2) niveaux dont, l'étage comprend uniquement les espaces nuits :

- Au SUD, les pièces de vie consacrées aux activités de jour : séjour, coin repas, cuisine, terrasse en bois, jardin. Pour les pièces, elles doivent posséder de grandes ouvertures vitrées vers le SUD pour mieux capter le rayonnement solaire l'hiver
- A l'EST et au NORD-EST, les chambres profitent du soleil levant.
- A l'OUEST et au SUD-OUEST, elle bénéficie (chambre) du soleil couchant



**Figure 9 :** Plans d'organisations intérieures de la maison[Auteur]

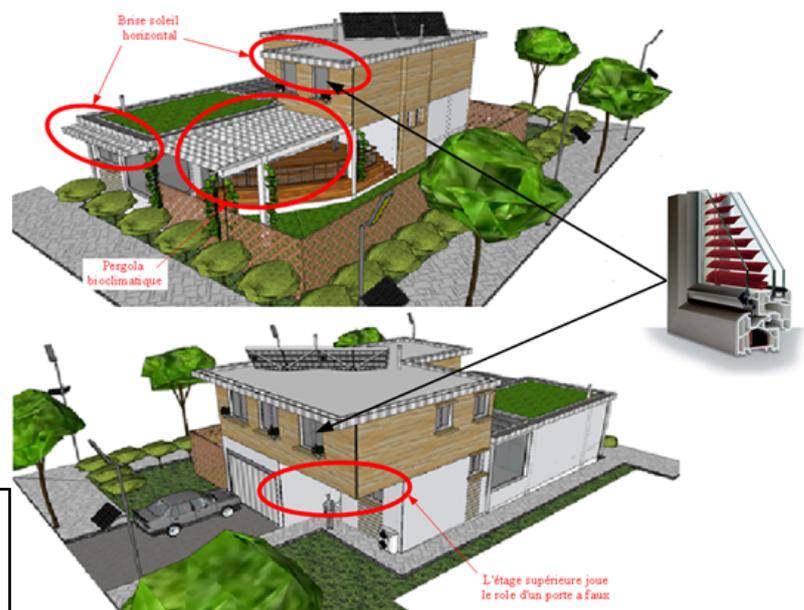
- Au NORD, NORD-OUEST, les espaces de service et de circulation qui n'ont pas besoin de beaucoup de lumière : hall, garage, escalier, WC, salles de bain, buanderie. Ces pièces ne doivent pas posséder de trop grandes ouvertures pour éviter de se refroidir au contact des vents froids du NORD.

### d) Les protections solaires :

Les protections solaires empêchent le rayonnement solaire de pénétrer à travers une ouverture, dans le but de :

- Réduire les surchauffes dues au rayonnement solaire. Si l'on identifie un problème de surchauffe, il faudra préférer un système de protection solaire extérieure, qui bloque le rayonnement avant production de l'effet de serre (brise soleil, pergola,...) (figure 10)
- Améliorer l'isolation en augmentant le pouvoir isolant des fenêtres. Certaines protections intérieures peuvent réduire les déperditions thermiques des fenêtres de 25 % à 40 % [20] (store,...) (voir vitrage)
- Contrôler l'éblouissement : Un ensoleillement excessif peut rendre tout travail impossible. Ce phénomène est aussi important pour des fenêtres orientées au SUD (coin repas, cuisine...) (figure 9) durant la saison chaude que lorsque le soleil est bas sur l'horizon : le matin, pour les fenêtres orientées à l'EST (chambres), le soir, pour les fenêtres orientées à l'OUEST (autre chambre). De même, dans les locaux orientés au NORD (salon de réception) la vision directe d'un ciel trop lumineux peut devenir gênante et nécessiter une protection (porte à faux) (figure 10). La luminosité peut être contrôlée par un système de protection installé indifféremment à l'extérieur ou à l'intérieur.

En d'autre des protections solaires cités, il en existe d'autre telle que : les protections végétales, les balcons, les protections verticales,...

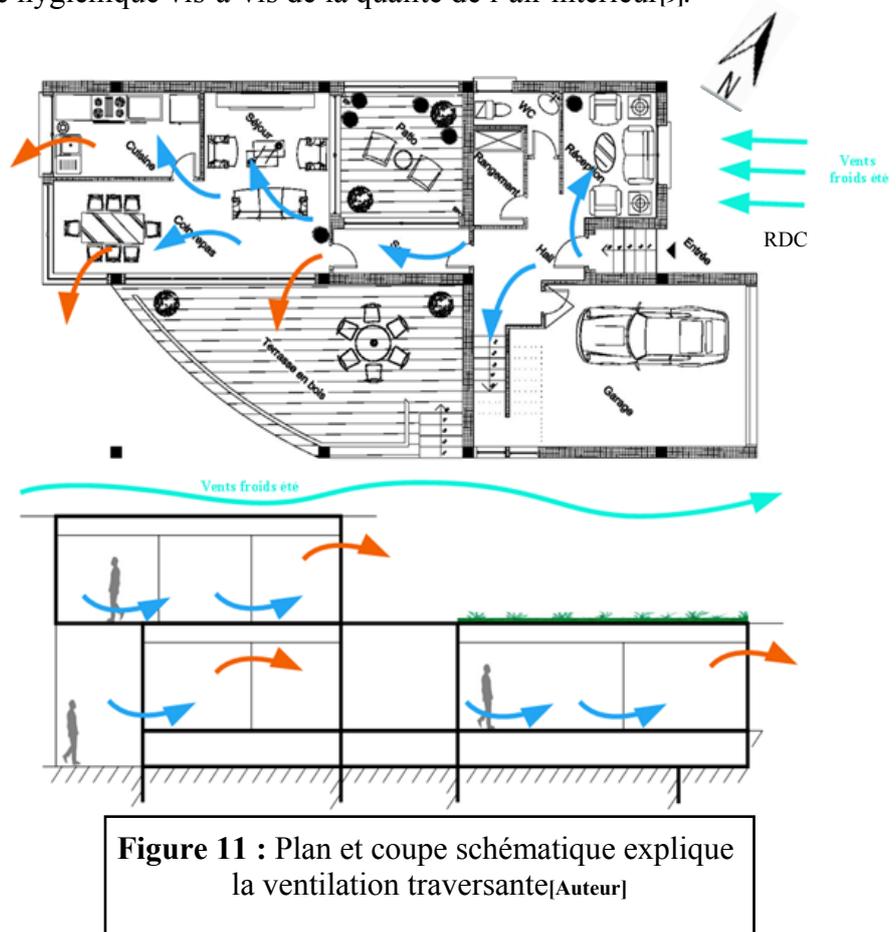


**Figure 10 :** 3D de la maison bioclimatique [Auteur]

**e) La ventilation naturelle :**

La ventilation naturelle est définie comme étant le mouvement d'air qui s'effectue à travers un espace sans l'influence d'appareillage mécanique. Les écoulements d'air naturels reposent sur les effets du vent et les variations de la densité de l'air dus aux différences de températures, elle est considérée comme principe de rafraîchissement passif. La ventilation est intéressante car d'une part, elle peut apporter de la fraîcheur si l'air extérieur est plus froid que l'air intérieur ; d'autre part, elle permet un mouvement d'air qui joue sur le confort thermique car il accroît les échanges thermiques entre le corps et l'air ambiant par convection et par évaporation de la sueur. La ventilation a également un rôle hygiénique vis-à-vis de la qualité de l'air intérieur[9].

La prise en compte de la position des ouvertures par rapport au vent est importante dans la création du déplacement d'air. La ventilation traversante dans un local doit réunir deux (2) conditions : La première est que le local comporte deux ouvertures, et la deuxième est que celles-ci soient sur deux façades opposées du local. La différence de pression entre le côté sous le vent du bâtiment et le côté face au vent va entraîner des écoulements d'air d'une ouverture à l'autre.



**Figure 11 :** Plan et coupe schématique explique la ventilation traversante[Auteur]

**5.2. Les bases de conceptions de détail :**

Pour assurer une bonne qualité thermique d'un environnement intérieur, on peut intervenir sur les performances thermiques des matériaux de l'enveloppe pour assurer l'inertie thermique du bâtiment ainsi que l'isolation thermique de l'enveloppe.

### a) Performances thermiques des matériaux<sup>[9]</sup> :

En conception bioclimatique, les transferts thermiques qui nous intéressent, ceux issus des événements climatiques extérieurs et ceux des apports intérieurs, sont variables dans le temps. Pour bénéficier au mieux de cette rythmicité, la prise en compte des caractéristiques dynamiques des matériaux (la diffusivité et l'effusivité) et les caractéristiques statiques (conductivité et la capacité thermique) sont essentielles.

- *La conductivité thermique ( $\lambda$ )* est la propriété des matériaux à transmettre la chaleur par conduction. Elle est exprimée en (W/m°C). La conductivité thermique propre à chaque matériau permet de quantifier le pouvoir isolant des parois, c'est-à-dire leur aptitude à s'opposer au passage des calories contenues dans l'air. Plus la conductivité thermique d'un matériau est grande, plus ce matériau sera conducteur et plus la conductivité est faible, plus il sera isolant.

- *La capacité thermique ( $\rho C$ )* d'un matériau désigne son aptitude à stocker de la chaleur. Elle est exprimée en (Wh/m<sup>3</sup>.K). Plus la capacité thermique d'un matériau est grande, plus la quantité de chaleur à lui apporter pour élever sa température est importante. Autrement dit, plus grande est sa capacité de stockage des calories avant que sa température ne s'élève.

- *La diffusivité thermique ( $a$ )* d'un matériau exprime son aptitude à transmettre rapidement une variation de température. Elle croît avec la conductivité et décroît avec la capacité thermique, elle s'exprime en (m<sup>2</sup>/h). Plus la diffusivité est faible, plus le front de chaleur mettra du temps à traverser l'épaisseur du matériau : le temps entre le moment où elle atteint l'autre face (déphasage) s'en trouve augmenté.

- *L'effusivité thermique ( $b$ )* décrit la rapidité avec laquelle un matériau absorbe les calories. Elle s'exprime en (W.h<sup>1/2</sup>/m<sup>2</sup>.K). Plus l'effusivité est élevée, plus le matériau absorbe de l'énergie sans se réchauffer notablement. Au contraire, plus elle est faible, plus vite le matériau se réchauffe.

### b) Vitrages<sup>[9]</sup> :

Le rôle des baies vitrées est d'assurer le confort visuel et thermique des occupants et permet de gérer les apports solaires en toute saison. Par conséquent, l'évaluation des aspects positifs et négatifs de la paroi transparente, exige une grande attention à plusieurs éléments : comme le type de vitrage, la position, l'orientation et le type de protection solaire associée...

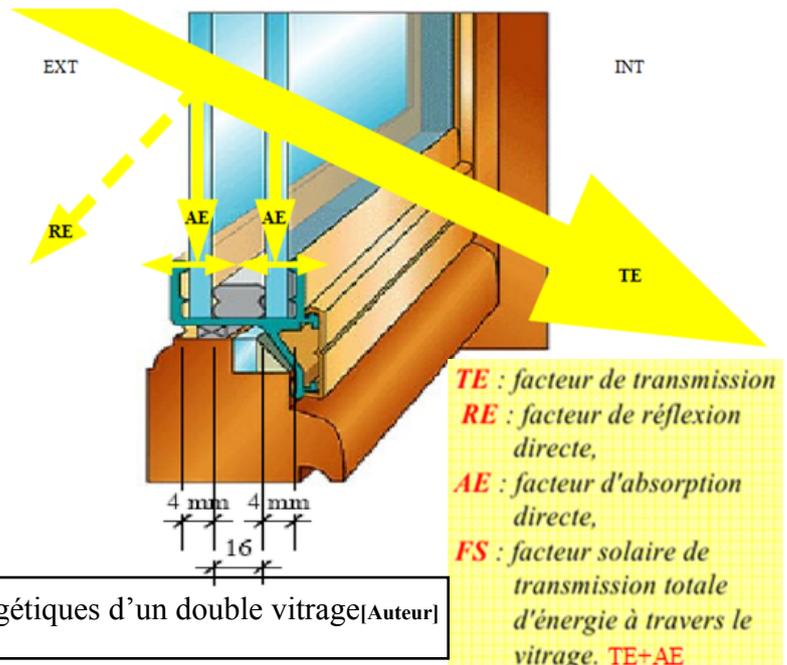
Compte tenu de ses effets sur l'éclairage naturel et son potentiel sur les apports solaires, les vitrages se caractérisent par trois (3) facteurs thermiques :

- *Le facteur solaire (g)* représente le pourcentage d'énergie solaire incidente, transmise au travers d'une paroi vitrée à l'intérieur d'un local ; plus basse sera la quantité, moins il aura d'effet de serre, plus grand sera le confort d'été.

- *Le facteur thermique (U)* exprime la quantité de chaleur traversant 1 m<sup>2</sup> de vitrage par degré de différence entre la température intérieure et extérieure. Plus le coefficient est bas, meilleure est l'isolation thermique du vitrage.

- *Le facteur lumineux (Tl)* quantifie le taux de lumière qui entre dans le bâtiment au travers du vitrage.

Lorsque l'énergie solaire est interceptée par une paroi vitrée, une partie est réfléchiée vers l'extérieur, une partie est transmise à l'intérieur et enfin une partie du rayonnement est absorbée par le vitrage, telle qu'illustrées dans la figure 12.



**Figure 12 :** Les facteurs énergétiques d'un double vitrage [Auteur]

La nature du vitrage a une influence sur la transmission énergétique du rayonnement solaire selon les caractéristiques suivantes :

- 1- *Les vitrages clairs* sont connus pour leur haute capacité à laisser pénétrer la lumière et le rayonnement solaire
- 2- *Les vitrages absorbants* sont teintés et permettent au verre de diminuer la fraction transmise du rayonnement solaire au profit de la fraction absorbée. Ils réduisent sensiblement la lumière et l'énergie transmise.
- 3- *Les vitrages réfléchissants* sont caractérisés par la présence d'une très fine couche métallique réfléchissante et transparente, qui accroît la part du rayonnement solaire réfléchi et diminue donc la fraction transmise. Ils limitent l'éblouissement et les surchauffes en été.

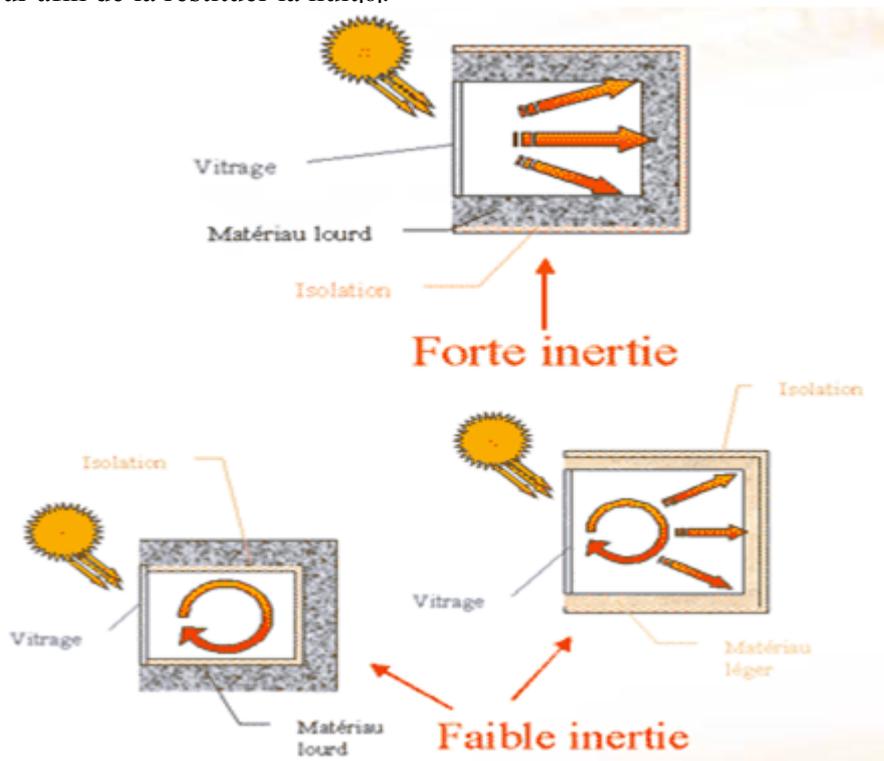
**c) L'inertie thermique :**

L'inertie thermique d'un bâtiment mesure sa capacité à emmagasiner de la chaleur pour une faible élévation de température.

Dans un bâtiment à faible inertie, un apport de chaleur externe ou interne va conduire à une forte élévation de température. Le même apport dans un bâtiment à forte inertie conduira à une élévation de température plus faible (diffusion de la chaleur dans les parois lourdes)[21].

Lorsque les rayons du soleil frappent une paroi opaque, une partie de l'énergie rayonnée est absorbée, le reste est réfléchi. Un flux de chaleur s'établit alors entre la face externe et la face interne de la paroi. La chaleur, qui se transmet par onde de l'extérieur à l'intérieur, se propage avec un certain déphasage et subit un amortissement. Le maximum de température atteint sur la face extérieure n'est pas immédiatement ressenti sur la face intérieure de la paroi[8].

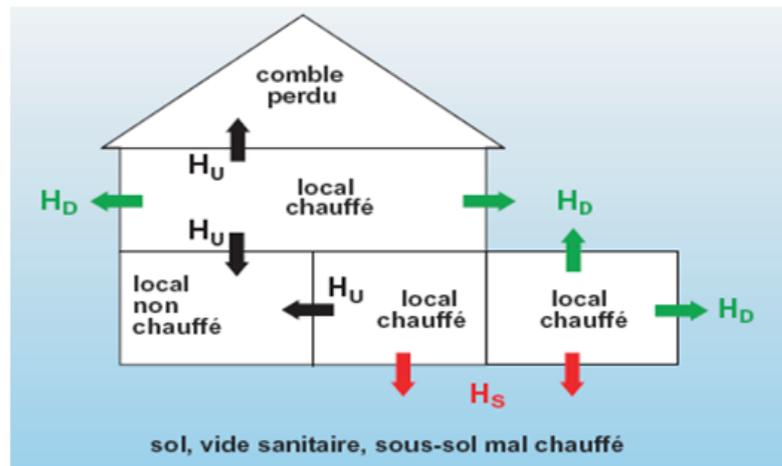
L'inertie thermique est une notion qui recouvre à la fois l'accumulation de chaleur et sa restitution, avec un déphasage dépendant des caractéristiques physiques, dimensionnelles et d'environnement de la paroi de stockage. Une grande inertie thermique permet la récupération de la chaleur du jour afin de la restituer la nuit[8].



**Figure 13 :** Inertie forte, caractérisée par des matériaux lourds à l'intérieur de l'enveloppe isolante[21]

**d) L'isolation thermique :**

L'isolation thermique représente la protection thermique qui protège la maison contre le froid et le chaud. Par l'extérieur et/ou par l'intérieur, elle crée un rempart intérieur/extérieur des flux sortants autrement dits déperditions de chaleur ou appelé déperdition thermique (figure 14).



**Figure 14 :** Typologie des déperditions thermiques[8]

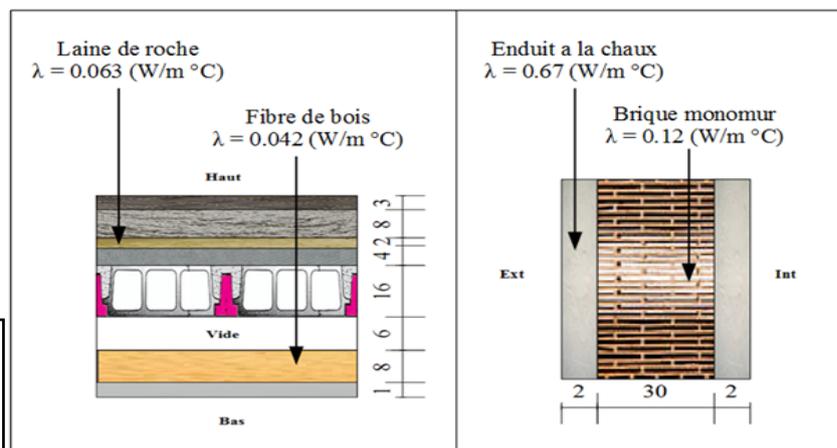
On distingue deux (2) types d'isolations :

- 1- *L'isolation par l'intérieur*, consiste à isoler un bâtiment de l'intérieur en apposant un isolant derrière une cloison maçonnée ou une ossature. C'est le procédé le plus utilisé par les constructeurs à cause de sa facilité de mise en œuvre. Son inconvénient est qu'il annule l'inertie thermique de la paroi isolée et n'évite pas les ponts thermiques sur la maçonnerie
- 2- *L'isolation par l'extérieur*, consiste à installer l'isolant sur la surface extérieure du mur. C'est souvent la solution la plus coûteuse mais aussi la plus performante. Elle constitue la meilleure isolation pour le confort d'été et d'hiver, car elle permet de conserver l'inertie thermique forte des murs intérieurs et supprime les ponts thermiques.

Les isolants sont caractérisés par leurs coefficient de conductivité thermique ( $\lambda$ ) et dont l'unité est le  $W/m^{\circ}C$ . Ce coefficient représente le flux de chaleur (en W) que traverse 1 m de matériau homogène, pour un écart de température de  $1^{\circ}C$  entre les deux (2) côtés de la paroi. Plus  $\lambda$  est petit, plus le matériau est isolant. La résistance thermique d'une paroi (R) est sa capacité à s'opposer au transfert de chaleur.

Plus elle est élevée, moins la maison perd de chaleur et donc plus il y a économie d'énergie (figure 15).

**Figure 15 :** Coupe d'un plancher intermédiaire et mur extérieure de la maison étudiée[Auteur+22]



### **Conclusion :**

Le confort thermique correspond à un état d'équilibre thermique entre le corps humain et son environnement. Il dépend du métabolisme, de l'habillement et de la sensibilité de chaque individu, d'une part, et de la température de l'environnement (air, parois), des mouvements d'air et de l'humidité, d'autre part. Il est possible de définir des conditions de confort thermiques acceptables et de les représenter dans un diagramme de l'air humide (bioclimatique), selon divers paramètres (climat, vitesse de l'air, ...).

Le confort thermique abordé dans ce chapitre, nous apprend qu'avant de concevoir un projet d'habitat, il est impérativement nécessaire de faire une vision globale du lieu et de conception de départ de notre habitation, notamment, le respect des concepts bioclimatiques, qui apparaît comme l'une des solutions pour réduire les consommations énergétiques, et donc les émissions de gaz à effet de serre en profitant au maximum des apports bénéfiques de l'environnement et plus particulièrement du soleil comme source d'énergie inépuisable.

L'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment, qui est le premier des éléments sur lequel le concepteur doit intervenir, pour créer, à l'intérieur de son ouvrage des conditions de confort satisfaisantes, ainsi, l'inertie thermique, qui joue un rôle important dans l'habitat et contribue à l'isolation.

De façon générale, la conception d'un habitat bioclimatique avec des techniques passives est possible, mais le système actif est indispensable pour un résultat optimal. Donc à fin de connaître quelle système appliqué, un bilan thermique est nécessaire pour connaître les déperditions énergétiques frigorifiques et calorifiques que nous aborderons dans le chapitre suivant.

## ***Chapitre 2 :***

*Cas d'étude ; Bilan thermique de l'habitat  
individuel bioclimatique*



## **Introduction :**

L'objectif de ce second chapitre est de mettre en évidence l'analyse des besoins thermiques du projet habitat individuel bioclimatique, situé dans la ville de Tipaza.

La première partie est une présentation globale du site de Tipaza (Localisation géographique et données climatologiques) ainsi les données générales du cas d'étude (Typologie de l'habitat, surfaces et volumes, structures et matériaux utilisés). Dans une seconde partie, nous calculerons les besoins énergétiques de chaque pièces de la maison par un logiciel de simulation ainsi une méthode de calcul détaillée, dans notre cas on étudiera le bilan frigorifique d'une pièce, en suivant ces deux (2) étapes<sup>[23]</sup> :

### *1ère étape : relevé des données*

- Inscrire les informations demandées sur le local (définies dans le cahier de charge)
- Déterminer les conditions de base (DTR C3-4, C3-2 et Airwell) et en déduire d'autres paramètres sur le diagramme de l'air humide (Diagramme psychrométrique) (Annexe 4)
- Déterminer les écarts de température  $\Delta T$  et de teneur en eau  $w$
- Déterminer l'heure à laquelle le calcul du bilan sera effectué
- Déterminer le type de renouvellement d'air et son débit
- Identifier chaque paroi et vitrage du local suivant les orientations
- Déterminer les caractéristiques dimensionnelles des parois et vitrages
- Calculer les surfaces nettes des parois et vitrages
- Calculer les coefficients de transmission  $k_{gf}$
- Rechercher les écarts de température entre les différences surfaces donnant soit à l'extérieur, soit dans un local adjacent.

### *2ème étape : Calcul des charges*

- Apports par transmission à travers les parois opaques et vitrages
- Apports dus au rayonnement solaire sur les murs et vitrages
- Apports de chaleur sensible et latente par les occupants
- Apports de chaleur sensible et latente par les appareils électriques
- Apports de chaleur sensible et latente par les sources diverses
- Apports de chaleur sensible et latente par renouvellement d'air
- Puissance du climatiseur = Charges frigorifique totale

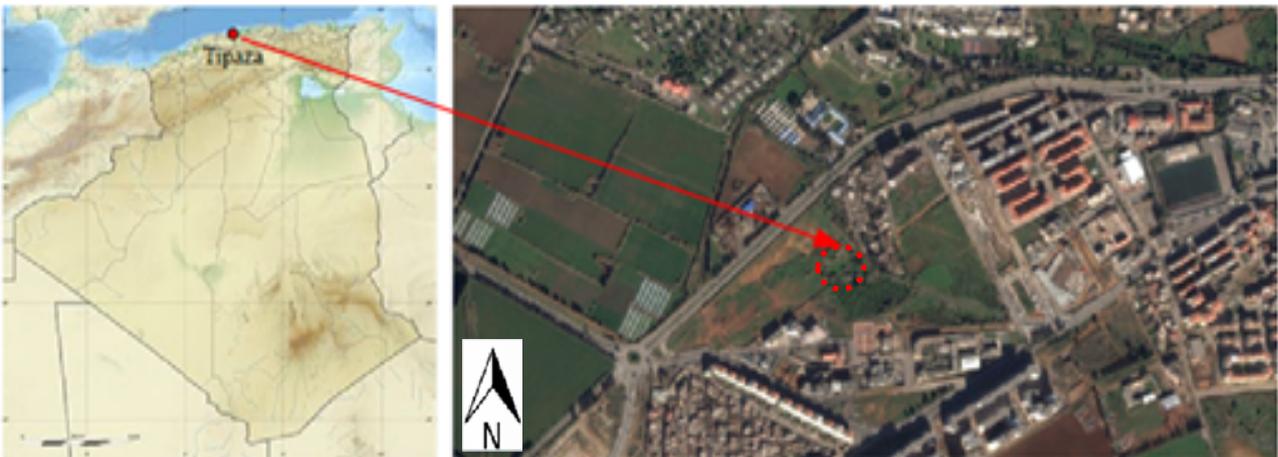
Les méthodes de calcul utilisées dans le présent projet sont plus ou moins précises et sont en particulier celles du DTR C3-4 (Climatisation), DTR C3-2 (calcul des besoins de chauffage ou

de climatisation) ainsi la documentation Airwell (Annexe 5). Nous ferons ensuite une analyse des différents exemples de projets habitats bioclimatiques qui va nous permettre de comparé ce dernier aux résultats du cas d'étude.

## 1) Présentation de la maison :

### 1.1. Localisation géographique et données climatiques :

- Longitude : 2°26'50" Est
- Latitude : 36°35'22" Nord (On prend Lat = 40° d'après le DTR C 3-4)
- Altitude : 32 m (Les coordonnées géographiques de Tipaza)<sup>[24]</sup>



**Figure 16 :** Localisation de Tipaza (Algérie) et vue aérienne du projet habitat réalisé<sup>[Wikipédia - Google earth 2015]</sup>

La maison étudiée est située dans la ville de Tipaza, à l'extension OUEST (P.O.S AU2), par rapport à son centre historique. Cette ville maritime est située à une altitude : 32 m par rapport au niveau de la mer.

Le projet étudié dans cette étude, a lui été basé sur des concepts architecturaux bioclimatiques (Projet architectural, année 2014).

D'après le D.T.R C3-2 « Réglementation thermique des bâtiments d'habitation » (Règle de calcul des déperditions calorifiques), la zone climatique considérée est « A », elle comprend le rivage de la mer et parfois le versant Nord des chaînes côtières<sup>[25]</sup>.

Le climat de Tipaza est chaud et tempéré. En hiver, les pluies sont bien plus importantes à Tipaza qu'elles ne le sont en été. Sur l'année, la température moyenne à Tipaza est de 18.6°C. Les précipitations annuelles moyennes sont de 624 mm<sup>[26]</sup>.

Avec 2 mm, le mois de Juillet est le plus sec. En Décembre, les précipitations sont les plus importantes de l'année avec une moyenne de 112 mm (Figure 17).

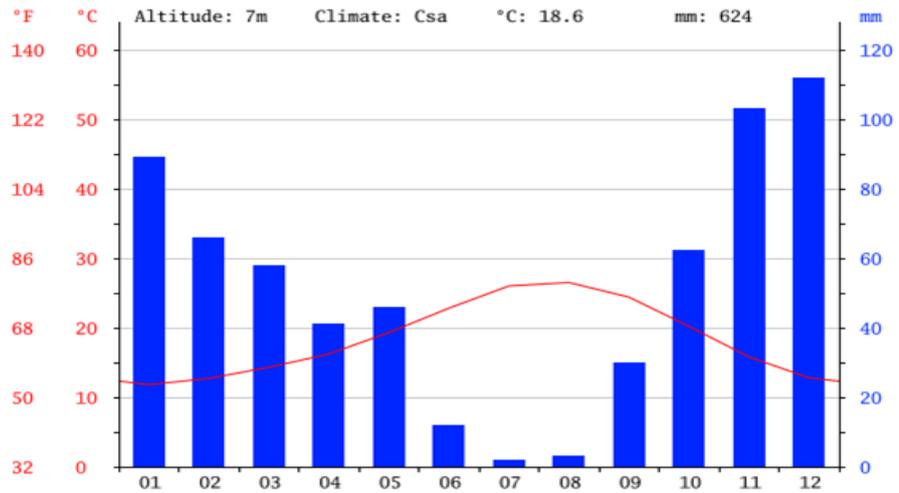


Figure 17 : Le diagramme climatique

26.5°C font du mois d'Aout le plus chaud de l'année. Janvier est le mois le plus froid de l'année. La température moyenne est de 11.8°C à cette période (Figure 18).

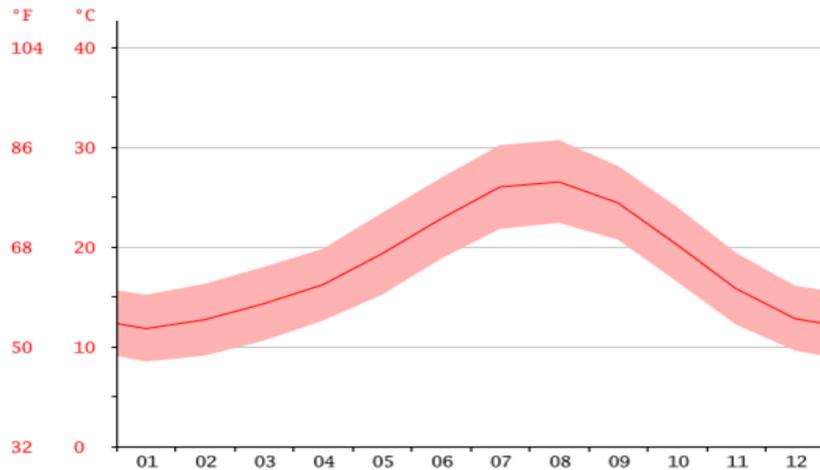


Figure 18 : La courbe de température

Entre le plus sec et le plus humide des mois, l'amplitude des précipitations est de 110 mm. La température moyenne au court de l'année varie de 14.7°C (Tableau 2).

month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
mm	89	66	58	41	46	12	2	3	30	62	103	112
°C	11.8	12.7	14.3	16.2	19.3	22.8	26.0	26.5	24.4	20.2	15.8	12.8
°C (min)	8.5	9.1	10.6	12.6	15.2	18.8	21.8	22.4	20.7	16.5	12.2	9.6
°C (max)	15.2	16.3	18.0	19.8	23.4	26.9	30.2	30.7	28.1	24.0	19.4	16.1
°F	53.2	54.9	57.7	61.2	66.7	73.0	78.8	79.7	75.9	68.4	60.4	55.0
°F (min)	47.3	48.4	51.1	54.7	59.4	65.8	71.2	72.3	69.3	61.7	54.0	49.3
°F (max)	59.4	61.3	64.4	67.6	74.1	80.4	86.4	87.3	82.6	75.2	66.9	61.0

Tableau 2 : Table climatique de la ville de Tipaza

### 1.2. Typologie du logement :

La maison étudiée est une bâtisse établie sur deux (2) niveaux (R+1). Les mesures sont détaillées en annexes 1 et 3.



Sud

### 1.3. Surfaces et volumes habitables :

$$S_{\text{totale}} = 132,59 + 103,64 = 236,23 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{total}} = (64,35 \times 3,6) + (68,24 \times 3) + 360,66 = 797,04 \text{ m}^3$$

$$S_{\text{végétalisée}} = 42,65 \text{ m}^2$$

$$S_{\text{vitrées}} = 68,07 \text{ m}^2$$

$$S_{\text{Enveloppe extérieure}} = 568,23 \text{ m}^2$$

Hauteurs sous plafonds :

$$* \text{ RDC} = 2,85 \text{ m}$$

$$* \text{ Etage} = 2,50 \text{ m}$$



Ouest



Nord

**Figure 19** : Modélisation 3D des différentes façades (Sud, Nord, Ouest)[27]

Les surfaces ainsi que les volumes de chaque espace, sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Espaces RDC	Surface m <sup>2</sup>	Volume m <sup>3</sup>	Espaces étage	Surface m <sup>2</sup>	Volume m <sup>3</sup>
Hall	9.18	26,16	Dégagement	11.94	29,85
Réception	8.84	25,19	Rangement	4.48	11,2
WC	2.88	8,20	WC	2.88	7,2
Rangement	3.64	10,37	Buanderie	3.64	9,1
Patio	11.56	34,68	SDB 1	4.9	12,25
Sas	4.56	13	Chambre 1	17.27	43,18
Séjour + Coin repas	27.8	79,23	Chambre 2	13.12	32,8
Cuisine	9.43	26,87	Chambre 3	18.69	46,73
Garage	29.27	82,54	SDB 2	4.9	12,25

**Tableau 3** : Surfaces et volumes des pièces de l'habitat à étudier

**1.4. Structures et matériaux :**

Le choix des matériaux de construction bioclimatique est une étape délicate. Ils déterminent l'atmosphère de l'habitat. Une maison saine est un lieu bien isolé mais qui respire. L'enveloppe de la construction fait office de frontière entre l'intérieur et l'extérieur.

Certaines solutions issues d'une approche bioclimatique essentiels du départ :

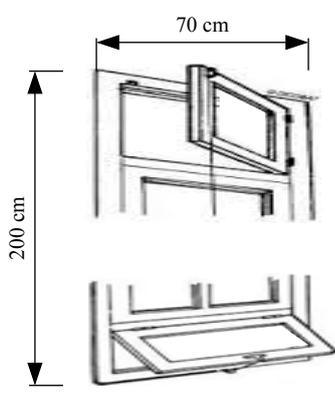
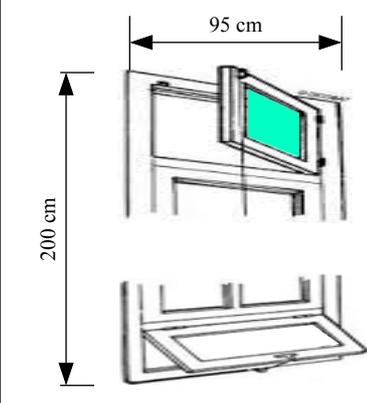
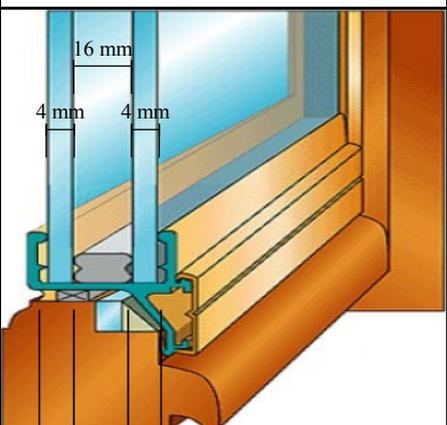
- L'utilisation de la brique monomur à isolation répartie (Fonction à la fois porteuse et isolante, inertie thermique élevée, durée de vie du matériau meilleure étanchéité à l'air grâce à l'utilisation de l'enduit à la chaux extérieur et/ou intérieur)
- Le toit sur RDC, avec une végétation de type semi-extensif (C'est une plantation de faible épaisseur  $\leq 15$  cm)
- La ventilation naturelle diurne et nocturne en été (Fenêtres, portes et portes-fenêtres avec imposte ouvrante supérieure et inférieure)
- Les fenêtres à double vitrage peu émissif (Laisse échapper au dehors que 4 % de la chaleur qu'il reçoit, un avantage évident en hiver. A l'inverse, en été il peut empêcher le rayonnement des objets extérieurs, et donc la chaleur, de pénétrer dans la maison)
- L'isolation renforcée pour favoriser les économies d'énergie en hiver comme en été (Couches d'isolant à ajouter ; La fibre de bois ou le polystyrène expansé , à l'extérieur, sous bardage bois et, à l'intérieur, sous toiture, sur faux-plafond et sous dalle)

Une particulière attention sera attribuée à l'utilisation d'autres matériaux sains :

- Le plâtre pour le revêtement intérieur (Cloisons intérieures,dalle)
- La terre cuite (Sols)

Les informations rédigées sont données dans l'annexe 2 et le tableau ci-dessous :

**a) Menuiseries :**

Porte bois intérieure opaque	Porte bois extérieure 30% vitrage	Double vitrage 4/16/4 en bois
		
$K_g = 2 \text{ W/m}^2\text{°C}$	$K_g = 4 \text{ W/m}^2\text{°C}$	$K_{vn}$ Verticale= $2,9 \text{ W/m}^2\text{°C}$ $K_{vn}$ Horizontale= $3,1 \text{ W/m}^2\text{°C}$

## 2) Calcul du bilan thermique :

### 2.1. Relevé des données :

On se propose de déterminer la puissance de climatisation d'une chambre située au 1<sup>er</sup> niveau d'une maison individuelle (R+1).

#### a) Cahier de charge :

Les caractéristiques citées précédemment (1.4. Structures et matériaux) de la chambre n°2 sont :

- Murs extérieurs 38 cm avec bardage en bois et enduit intérieur à la chaux, peinture blanche à l'intérieure
- Cloisons de 10 cm avec plaque de fermacell, peinture blanche des deux côtés
- Plancher intermédiaire à corps creux avec faux plafonds, 48 cm d'épaisseur avec un parquet marron au dessus
- Toiture terrasse de 65 cm avec faux plafonds, couleur blanche, la protection réservée à la terrasse inaccessible est constituée par une couche de granulats roulés
- Hauteur sous-plafond 2m50
- Portes en bois de 70×200 cm<sup>2</sup> avec encadrement en bois
- Fenêtre à double vitrage encadrement en bois de 1,45×1,52 m<sup>2</sup> avec protection solaire horizontale de L=50 cm, store intérieure en toile à moitié baissés de couleur crème
- Eclairage fluorescent
- La chambre est occupée par une personne.

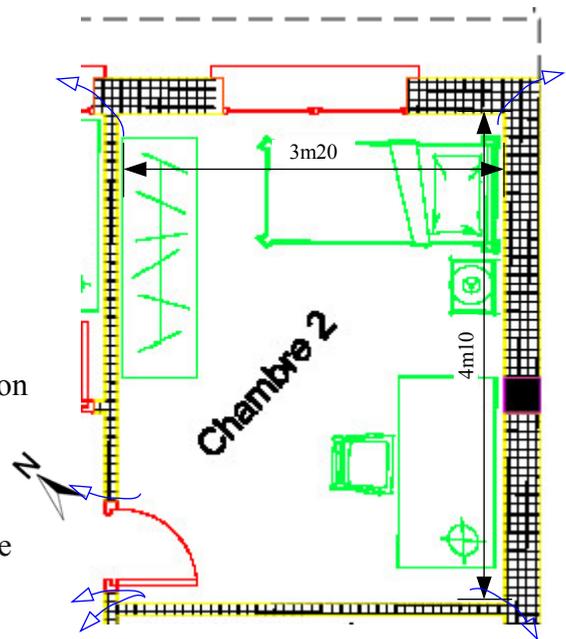


Figure 21 : Plan de la chambre n°2

#### b) Condition de base :

Heure de calcul : Les parois NORD-EST et SUD-EST sont ensoleillées. Les apports de chaleurs sont maximaux d'après la documentation AIRWELL (Annexe 5) à 07h00 sur la paroi NORD-EST et à 09h00 sur la paroi SUD-EST, les données de bases d'après le DTR C 3-4 sont :

Température extérieure : 34°C	Humidité relative =70%	w=0,024 kg/kg air sec
Température intérieure : 24 °C	Humidité relative =45%	w=0,0085 kg/kg air sec

Afin de déterminer la puissance de chauffage et celle de la climatisation totale du projet, nous procédant par la méthode de calcul par simulation thermique dynamique du logiciel ; PLEIADES + COMFIE, qui va nous permettre d'accélérer considérablement la saisie du projet.

### 2.3. Simulation par PLEIADES+COMFIE :

#### a) Présentation du logiciel :

L'ensemble logiciel PLEIADES + COMFIE permet la conception de projets bioclimatiques en régime dynamique, l'analyse des performances et des ambiances, la formation et l'enseignement sur le comportement thermique de l'habitat.

Il est particulièrement adapté à la conception solaire bioclimatique et l'étude de bâtiments où la qualité thermique et environnementale des ambiances doit être particulièrement prise en compte. L'environnement PLEIADES a été conçu et développé par Gefosat puis IZUBA énergie depuis début 2001 avec le soutien de l'ADEME.

Il est composé de plusieurs modules :

- Comfie est le noyau de calcul
- Pleiades est l'interface de saisie des bibliothèques, de gestion du bâtiment, de calcul et d'analyse de résultats [Version 2.3]
- Alcyone est l'interface de saisie et d'affichage du bâtiment en 3D [Version 1.0]
- Méteonorm est l'interface de saisie des données climatiques, ou station météo existante (Tableau 4)[28-Version 5.1]

Pour la simulation, nous avons défini différentes zones thermiques en fonction de leur occupation, de leur localisation et de leur orientation. Chaque zone thermique représente un volume dans lequel l'air est supposé à température uniforme. Une visualisation du zonage du bâtiment central est donnée en figure 22 et 23.

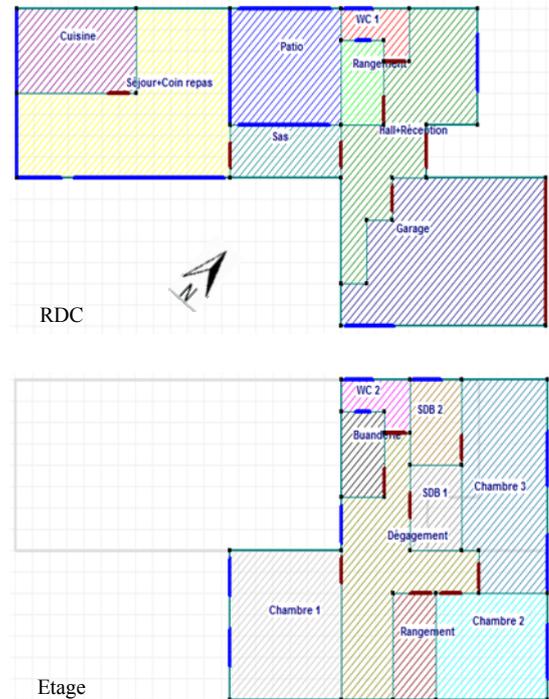


Figure 22 : Plans R+1 sous Alcyone

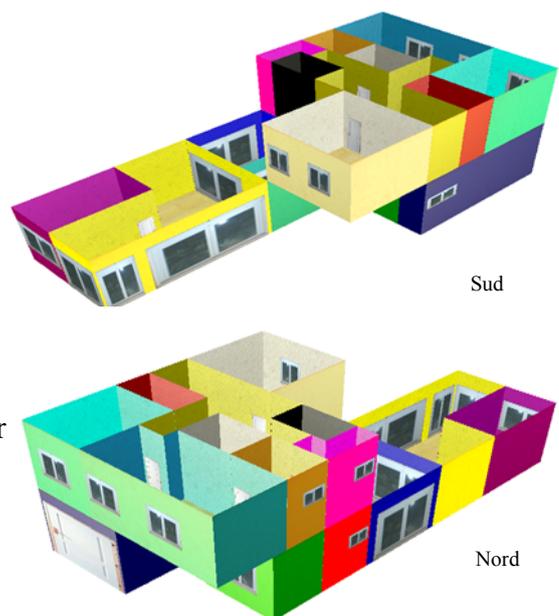
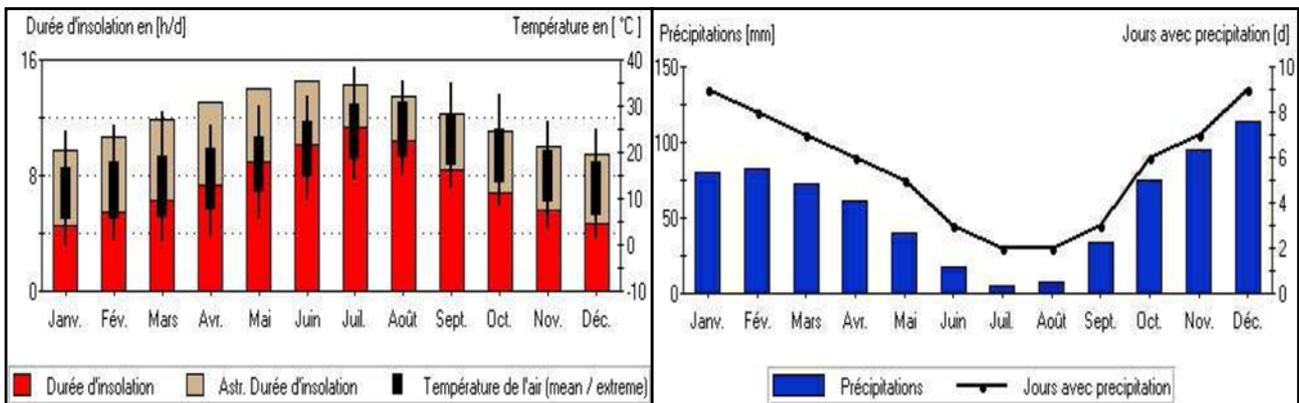


Figure 23 : 3D R+1 sous Alcyone

Mois	Ta	Ta min	Ta dmin	Ta dmax	Ta max	RH
Janv.	11,2	-0,6	5,5	16,9	24,4	75
Fév.	11,9	0,9	5,4	18,0	25,9	75
Mars	12,8	0,5	6,0	19,1	28,6	76
Avr.	14,7	1,8	7,5	20,7	25,9	75
Mai	17,7	5,4	11,4	23,3	29,8	76
Juin	21,3	9,7	14,5	26,6	32,1	71
Juil.	24,6	13,7	18,1	30,6	38,3	68
Août	25,2	14,8	18,8	30,7	35,5	69
Sept.	23,2	11,9	16,9	28,4	35,2	71
Oct.	19,4	8,4	13,4	25,2	32,5	72
Nov.	15,2	3,2	9,3	20,4	26,7	74
Déc.	12,1	1,2	6,2	17,9	25,0	76
Année	17,4					73

Mois	H_Gh	SDm	SDd	SD astr.	RR	RD	FF	DD
Janv.	65	142	4,6	9,8	80	9	2,4	248
Fév.	85	154	5,5	10,7	82	8	2,2	270
Mars	127	195	6,3	11,8	73	7	2,1	270
Avr.	161	221	7,4	13,0	61	6	2,7	270
Mai	196	278	9,0	14,0	40	5	2,7	270
Juin	204	303	10,1	14,5	17	3	3,0	68
Juil.	227	350	11,3	14,3	5	2	2,8	68
Août	193	324	10,5	13,4	7	2	2,6	68
Sept.	153	254	8,5	12,3	34	3	2,7	68
Oct.	107	213	6,9	11,1	75	6	2,0	270
Nov.	71	168	5,6	10,0	95	7	2,5	270
Déc.	65	143	4,6	9,5	114	9	2,3	270
Année	1651	2745	7,4		683	67	2,5	291



Légende:

- Ta: Temp. de l'air
- Ta min: 10 a. minimum (approx.)
- Ta dmin: Moyenne minimum journ. Ta
- SD: Durée d'insolation
- RD: Jours avec précipitation
- SD astr.: Durée d'insolation, astronomique
- H\_Gh: Irradiation du rayonnement global horizontal
- RH: Humidité relative
- Ta max: 10 a. maximum (approx.)
- Ta dmax: Moyenne maximum journ. Ta
- RR: Précipitations
- FF: Vitesse du vent
- DD: Direction du vent

Température en [°C]  
 Vitesse du vent en [m/s]  
 Durée d'insolation en [h/jour]  
 Rayonnement en [kWh/m²]  
 Ta: Seulement 3 station(s) pour l'interpolation

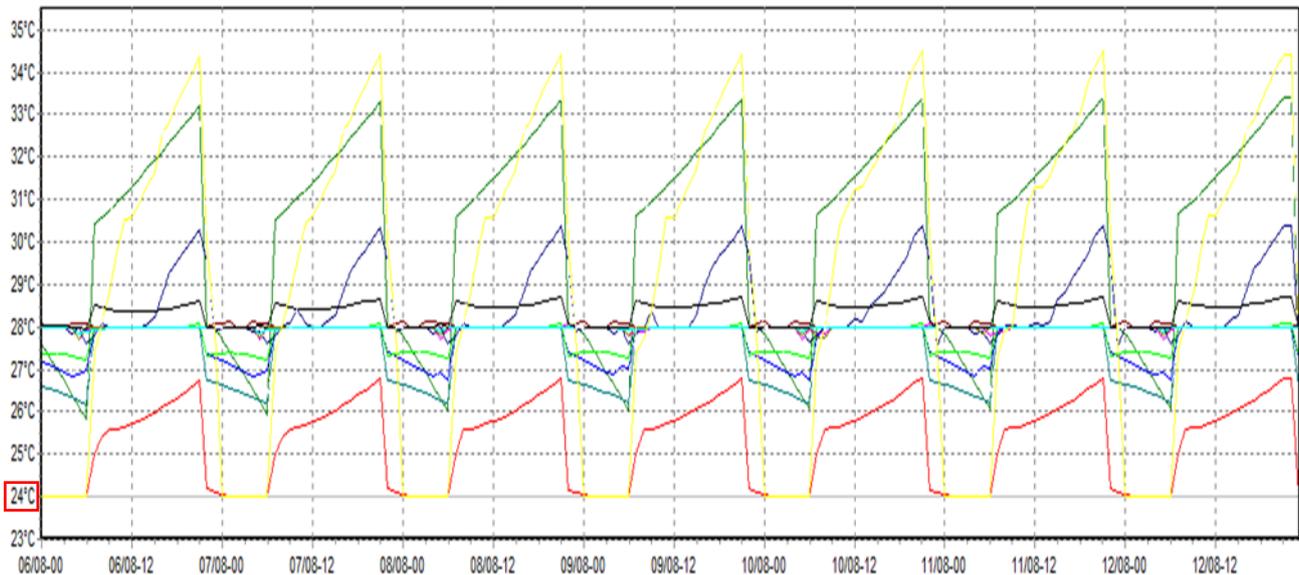
**Tableau 4 : Les données climatiques de Tipaza réalisées sur Metéonorm [Version 5.1 05/05/2015]**

**b) Présentation des résultats :**

Zones	Besoins Clim.	Puiss. Clim.	T° Moyenne
Hall+Réception	1628 kWh	1625 W	21.89 °C
Garage	2169 kWh	2858 W	25.24 °C
Dégagement	115 kWh	279 W	24.29 °C
Chambre 3	1952 kWh	1667 W	22.16 °C
SDB 1	6 kWh	35 W	23.90 °C
SDB 2	70 kWh	133 W	24.39 °C
Sas	38 kWh	632 W	24.86 °C
Rangement	0 kWh	-0 W	24.38 °C
WC 1	110 kWh	194 W	25.02 °C
Rangement	33 kWh	57 W	24.29 °C
Chambre 2	1462 kWh	1108 W	22.09 °C
Chambre 1	1945 kWh	1573 W	22.22 °C
Buanderie	89 kWh	101 W	24.21 °C
WC 2	170 kWh	221 W	24.73 °C
Séjour+Coin repas	4125 kWh	2799 W	23.55 °C
Patio	1192 kWh	1390 W	25.49 °C
Cuisine	610 kWh	946 W	25.99 °C
Total	15713 kWh	15616 W	

**Tableau 5 : Le bilan de climatisation été de la semaine 18 a 32**

- Projet / F4 Bio été / Hall+Réception
- Projet / F4 Bio été / Garage
- Projet / F4 Bio été / Dégagement
- Projet / F4 Bio été / Chambre 3
- Projet / F4 Bio été / SDB 1
- Projet / F4 Bio été / SDB 2
- Projet / F4 Bio été / Sas
- Projet / F4 Bio été / Rangement
- Projet / F4 Bio été / WC 1
- Projet / F4 Bio été / Rangement
- Projet / F4 Bio été / Chambre 2
- Projet / F4 Bio été / Chambre 1
- Projet / F4 Bio été / Buanderie
- Projet / F4 Bio été / WC 2
- Projet / F4 Bio été / Séjour+Coin repas
- Projet / F4 Bio été / Patio

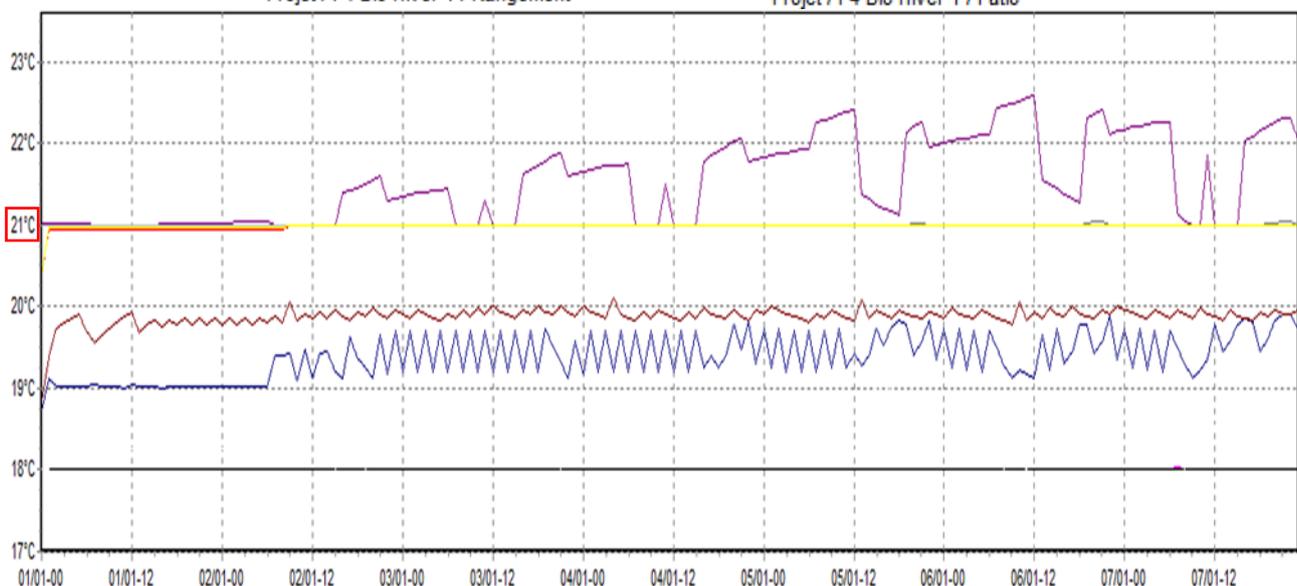


**Figure 24 : Courbes de température ; Année la plus chaude**

Zones	Besoins Ch.	Puiss. Chauff.	T* Moyenne
Hall+Réception	903 kWh	1220 W	21.15 °C
Garage	726 kWh	1246 W	19.06 °C
Dégagement	34 kWh	129 W	19.70 °C
Chambre 3	122 kWh	587 W	23.01 °C
SDB 1	1 kWh	14 W	19.79 °C
SDB 2	19 kWh	59 W	19.57 °C
Sas	172 kWh	620 W	20.32 °C
Rangement	0 kWh	0 W	20.27 °C
WC 1	29 kWh	79 W	18.86 °C
Rangement	11 kWh	38 W	19.84 °C
Chambre 2	13 kWh	317 W	24.60 °C
Chambre 1	120 kWh	590 W	23.25 °C
Buanderie	28 kWh	71 W	18.89 °C
WC 2	67 kWh	112 W	18.81 °C
Séjour+Coin repas	1195 kWh	2011 W	21.50 °C
Patio	69 kWh	574 W	19.71 °C
Cuisine	210 kWh	380 W	18.79 °C
Total	3721 kWh	8045 W	

**Tableau 6 : Le bilan de chauffage hiver de la semaine 1 a 12**

- Projet / F4 Bio Hiver 1 / Hall+Réception
- Projet / F4 Bio Hiver 1 / Garage
- Projet / F4 Bio Hiver 1 / Dégagement
- Projet / F4 Bio Hiver 1 / Chambre 3
- Projet / F4 Bio Hiver 1 / SDB 1
- Projet / F4 Bio Hiver 1 / SDB 2
- Projet / F4 Bio Hiver 1 / Sas
- Projet / F4 Bio Hiver 1 / Rangement
- Projet / F4 Bio Hiver 1 / WC 1
- Projet / F4 Bio Hiver 1 / Rangement
- Projet / F4 Bio Hiver 1 / Chambre 2
- Projet / F4 Bio Hiver 1 / Chambre 1
- Projet / F4 Bio Hiver 1 / Buanderie
- Projet / F4 Bio Hiver 1 / WC 2
- Projet / F4 Bio Hiver 1 / Séjour+Coin repas
- Projet / F4 Bio Hiver 1 / Patio



**Figure 25 : Courbes de température ; Année la plus froide**

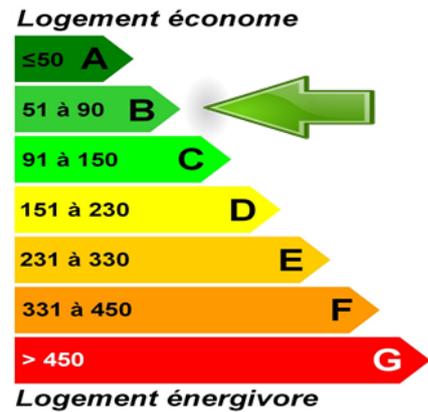
Zones	Besoins Ch.	Puiss. Chauff.	T° Moyenne
Hall+Réception	8 kWh	1188 W	20.40 °C
Garage	8 kWh	1180 W	18.00 °C
Dégagement	1 kWh	118 W	18.00 °C
Chambre 3	2 kWh	242 W	21.00 °C
SDB 1	0 kWh	12 W	18.00 °C
SDB 2	0 kWh	54 W	18.00 °C
Sas	2 kWh	496 W	18.72 °C
Rangement	0 kWh	0 W	18.86 °C
WC 1	1 kWh	76 W	18.00 °C
Rangement	0 kWh	38 W	18.00 °C
Chambre 2	0 kWh	0 W	21.08 °C
Chambre 1	2 kWh	243 W	21.00 °C
Buanderie	1 kWh	67 W	18.00 °C
WC 2	1 kWh	106 W	18.00 °C
Séjour+Coin repas	11 kWh	1643 W	20.39 °C
Patio	1 kWh	545 W	18.00 °C
Cuisine	3 kWh	359 W	18.00 °C
Total	41 kWh	6369 W	

**Tableau 7 : Le bilan de chauffage hiver de la semaine 40 a 52**

Il est important de préciser que les résultats suivant ne sont pas à prendre au pied de la lettre car ils dépendent de nombreuses hypothèses qui n'ont pas toutes été vérifiées. Le bilan de climatisation de la chambre n°2 calculé = 0,73 kW, comparé a celle calculé sous le logiciel de simulation PLEIADES+COMFIE = 1,10 kW, a savoir, aucun système de climatisation ou de chauffage n'a été appliqué dans ce type d'habitat. En effet, le but de ce chapitre était de réaliser un bilan thermique afin de connaître ces besoins en énergie qui nous permettra dans le second chapitre, de prédimensionner un système a énergie renouvelable qui complétra les besoins énergétiques de la maison.

Le bilan thermique totale pour une surface habitable de 236,23 m<sup>2</sup> et d'un volume de 797,04 m<sup>3</sup>, est égale à 15,61 kW pour la puissance de climatisation fixé a une température de confort a 24°C, et 6,36 et 8,04 kW de puissance de chauffage pour une température de confort de 21°C en période froides de l'année. En été, la maison étudier consomme beaucoup plus d'énergie comparant en hiver. Afin d'améliorer ce dernier c'est-a-dire, diminuer les besoins en climatisation, un système de rafraîchissement passif sera proposé pour compléter les besoins énergétique.

La maison étudiée a une consommation énergétique de 15713 kWh durant l'été et de 3762 kWh durant l'hiver une totale de 19475 kWh, soit 82,44 kWh/m<sup>2</sup>/an. Selon l'étiquette bioclimatique, la maison est classée au niveau B dans le cadre d'un calcul réglementaire. Notre but est pouvoir atteindre une maison parfaitement économe et pour cela nous allons par la suite pré-définir un système, il s'agit, en fait, du système de ventilation le plus simple qui soit utilisé pour la circulation de l'air, un système de climatisation très économe en énergie avec une consommation électrique réduite.

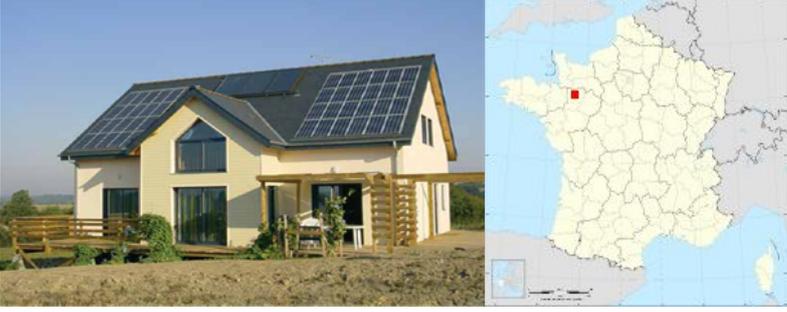
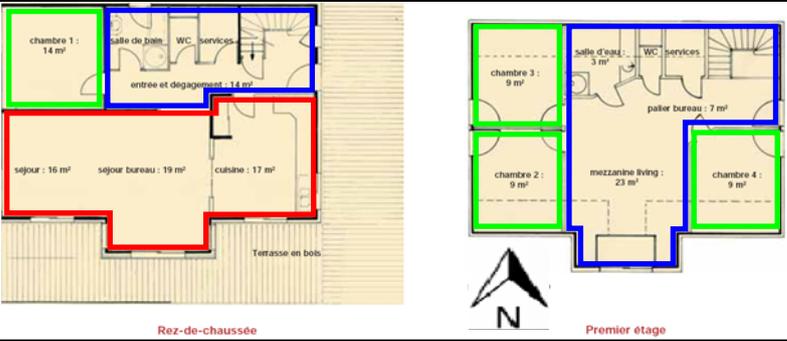


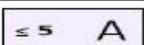
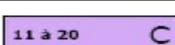
**Figure 26 :** Etiquette Diagnostic de Performance Énergétique (DPE) en KWh/m<sup>2</sup>/an

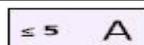
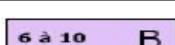
### 3) Exemples de bilans de consommations énergétiques dans différents projets d'habitats bioclimatiques :

Les constructions étudiées sont situées exclusivement en Normandie et en Mayenne (NORD-OUEST de la France) et sont conformes, pour tout ou partie, à la définition de l'éco-construction : Bâtiment conçu de manière globale visant à minimiser ses impacts sur l'environnement à chaque étape de sa vie. Ces constructions visent également l'amélioration du confort de vie et la santé des habitants. Les critères d'analyse se font au regard des critères du développement durable. Elles ont été choisies dans un souci de représentativité des constructions recensées : année de réalisation, type de projet, type d'intervenants, techniques et matériaux mis en œuvre, localisation. Chaque réalisation a fait l'objet d'une visite initiale approfondie permettant de recueillir les informations disponibles sur la construction et son fonctionnement[29]. Les maisons retenues sont :

- Réhabilitation d'une maison en Mayenne
- Une maison ossature bois remplissage ouate de cellulose
- Deux (02) maisons ossature bois remplissage paille
- Une maison mixte brique monomur/ossature bois
- Deux (02) rénovations maisons pan de bois remplissage torchis doublage chaux/chanvre.

<p><b>Habitat bioclimatique en</b></p> <p><b>Mayenne :</b></p> <p><b>confort domestique et la lutte contre l'effet de serre<sup>[30]</sup></b></p>	
<p><b>Situation</b></p>	<p>Département Mayenne, région Pays de la Loire</p>
<p><b>Climat</b> = chaud et tempéré  <b>Altitude</b> = 82-159 m  <b>Latitude</b> = 48,30  <b>Longitude</b> = -0,62</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Température en été = 17,6 °C (Juillet)</li> <li>- Température en hiver = 4,0 °C (Janvier)</li> <li>- Précipitations = 80 mm (Novembre)</li> <li>- Précipitations = 47 mm (Juillet)</li> </ul>
<p><b>Maitre d'ouvrage</b></p>	<p>Monsieur et Madame Aubert</p>
<p><b>Année d'étude thermique</b></p>	<p>2004</p>
<p><b>Réglementation Thermique</b></p>	<p>2000</p>
<p><b>Surface habitable</b> = 170 m<sup>2</sup></p>	
<p><b>N° Niveaux</b> = 2</p>	
<p><b>Systèmes standards</b></p>	<p>Chauffage électrique à convecteurs</p>
<p><b>Consommation électrique standard</b></p>	<p>22700 kwh, émission CO<sub>2</sub> = 3,1 tonne</p>
<p><b>Systèmes bioclimatiques</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pompe à chaleur Air/Eau (plancher BT+ventilo-convecteurs)</li> <li>- Chauffe eau solaire (capteur =6 m<sup>2</sup>)</li> <li>- Panneaux photovoltaïques = 36 m<sup>2</sup></li> <li>- Ventilation Mécanique Contrôlée simple flux</li> </ul>
<p><b>Matériaux</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mur = Panneaux fibre de bois massif structuraux (95 mm) + Isolation extérieure en panneaux de fibres de bois (80 mm) + Bardage en bois</li> <li>- Dalle = Panneaux de bois massif + Isolant en panneaux de fibres de bois (90 mm) + Chape RDC en gypse (60 mm)</li> <li>- Toit = Pente (40°) + charpente en épicéa des Vosges + lambris (22 mm) + isolant en fibre de bois</li> <li>- Menuiseries = aluminium + volets roulants + double vitrage a Argon + basse émissivité</li> </ul>
<p><b>Consommation globale</b></p>	<p>2696 kwh, émission CO<sub>2</sub> = 0,472 tonne</p>
<p><b>Résultats</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Confort d'été satisfaisant sans utilisation de la climatisation (ext = 34 °C/ int = 25 C°)</li> <li>- Réduction de 31 % des besoins en chauffage (48 kwh/m<sup>2</sup> contre 70 kwh/m<sup>2</sup>)</li> <li>- Chauffe eau solaire économie 60%</li> </ul>

 Basse Normandie[29]				
Année de Construction ou rénovation		Construction, 2007	Rénovation, 2009	Construction 2006
Type de matériaux utilisés		Ossature bois remplissage paille et laine de chanvre	Torchis-pan de bois enduits chaux chanvre	Brique monomur ossature bois laine de chanvre
Origine locale des matériaux		++	+	-
Surface considérée dans l'étude		144 m <sup>2</sup>	76 m <sup>2</sup>	124 m <sup>2</sup>
occupation		Permanente 4	Temporaire (gîte)	Permanente 2
Équipements		panneaux solaire puits canadien Récupération eau de pluie phyto-épuration filerie blindée	Panneaux solaires phyto-épuration	Panneaux solaires récupération d'eau de pluie interrupteurs de champs électriques
Mode de chauffage		Poêle de masse bois bûche	Poêle de masse bois bûche	Chaudière gaz de ville
Inertie		+	++	++
Résistance parois	Murs	3,11 et 5,78	1,37	3,09 et 3,82
	Sol	0,19	1,18	0,11
	Plafond	5,87	4,37	4,54
Consommation énergie primaire calculée	chauffage	41 kWh/an/m <sup>2</sup>	51 kWh/an/m <sup>2</sup>	73 kWh/an/m <sup>2</sup>
	Usage réglementation	68 kWh/an/m <sup>2</sup>	103 kWh/an/m <sup>2</sup>	90 kWh/an/m <sup>2</sup>
	Étiquette			
Consommation énergie primaire réelle tous usages		134 kWh/an/m <sup>2</sup>	144 kWh/an/m <sup>2</sup>	188 kWh/an/m <sup>2</sup>
Consommation réelle ou estimée/habitant		33,5 kWh/an/m <sup>2</sup> /hab 4824 kWh/an/hab	Non applicable	94 kWh/an/m <sup>2</sup> /hab 11656
Émissions d'équivalent	totales	218 kg	175 kg	2472 kg
	Par m <sup>2</sup> /an	1,5	2,3	20
CO <sub>2</sub>	Étiquette			
	Consommation d'eau de la ville par habitant m <sup>3</sup> /an/hab	20	Non applicable	22
Stockage CO <sub>2</sub> des matériaux utilisés		23,2 T	1,9 T	-13,8 T émission de CO <sub>2</sub>
Stockage équivalent CO <sub>2</sub> par m <sup>2</sup> en kg		161	25	-111
Nombre d'années de chauffage compensées par les matériaux au regard des émissions de CO <sub>2</sub>		106 ans	11 ans	-
Fourchette Hygrométrie du bâtiment		39-56 % HR	37-65 % HR	35-55 % HR
Radon		<b>163 +/- 13 Bq/m<sup>3</sup></b>	<b>34 +/- 6 Bq/m<sup>3</sup></b>	<b>189 +/- 13Bq/m<sup>3</sup></b>
Champs électriques		De 2 à 5	De 3 à 50	De 3 à 14
Champs magnétiques		De 2 à 22	De 9 à 157	De 9 à 37

 Basse Normandie[29]				
Année de Construction ou rénovation		Construction 2009	Construction 2006	Rénovation 2008
Type de matériaux utilisés		Ossature bois ouate de cellulose	Ossature bois remplissage paille	Torchis-pan de bois enduits chaux chanvre
Origine locale des matériaux		-	++	++
Surface considérée dans l'étude		190 m <sup>2</sup>	113 m <sup>2</sup>	187 m <sup>2</sup>
occupation		Permanente 3	Permanente 4	Permanente 4
Équipements		Panneaux solaires puits canadien VMC double flux filerie blindée	Panneaux solaire puits canadien (ventilation naturelle) récupération eau de pluie toilettes sèches filerie blindée	
Mode de chauffage		Poêle à granulés de bois	Poêle à bois bûche	Pompe à chaleur air/eau
Inertie		-	+	++
Résistance parois	Murs	6,02	7,2	1,39
	Sol	7,66	1,18	1,13
	Plafond	11,55	5,23	1,15
Consommation énergie primaire calculée	chauffage	18 kWh/an/m <sup>2</sup>	21 kWh/an/m <sup>2</sup>	129,3 kWh/an/m <sup>2</sup>
	Usage réglementation	38,7 kWh/an/m <sup>2</sup>	56 kWh/an/m <sup>2</sup>	171 kWh/an/m <sup>2</sup>
	Étiquette			
Consommation énergie primaire réelle tous usages		58 kWh/an/m <sup>2</sup>	94 kWh/an/m <sup>2</sup>	263 kWh/an/m <sup>2</sup>
Consommation réelle ou estimée/habitant		19,3 kWh/an/m <sup>2</sup> /hab 3654 kWh/an/hab	23,5 kWh/an/m <sup>2</sup> /hab 2655 kWh/an/hab	66 kWh/an/m <sup>2</sup> /hab 12295 kWh/an/hab
Émissions d'équivalent	totales	206 kg	143 kg	1475 kg
	Par m <sup>2</sup> /an	1,1	1,3	7,9
CO <sub>2</sub>	Étiquette			
	Consommation d'eau de la ville par habitant m <sup>3</sup> /an/hab	18	12,5	50
Stockage CO <sub>2</sub> des matériaux utilisés		8,2 T	11,5 T	9,4 T
Stockage équivalent CO <sub>2</sub> par m <sup>2</sup> en kg		43	101	50
Nombre d'années de chauffage compensées par les matériaux au regard des émissions de CO <sub>2</sub>		40 ans	80 ans	6 ans
Fourchette Hygrométrie du bâtiment		38-60 % HR	37-52 % HR	34-55 % HR
Radon		97 +/- 14 Bq/m <sup>3</sup>	75 +/- 8 Bq/m <sup>3</sup>	349 +/- 17 Bq/m <sup>3</sup>
Champs électriques		De 3 à 6	De 3 à 7	De 5 à 16
Champs magnétiques		De 6 à 12	De 10 à 91	De 10 à 22

Cette étude permet de qualifier les bâtiments écologiques et permet d'aller au-delà des simples critères énergétiques généralement pris en compte. Une maison est un système qui doit être adapté au mode de vie de ses habitants, leur permettre d'avoir une vie saine tout en impactant le moins possible l'environnement.

Il est difficile d'avoir des critères comparables d'une maison à l'autre. Néanmoins les résultats de cette étude permettent de dégager un certain nombre d'items importants permettant de qualifier un bâtiment et son fonctionnement. Certains de ces critères pourraient être utilisés dans le cadre d'une définition locale d'un « bâtiment durable ».

L'ensemble des maisons seraient classées de A à D dans le cadre d'un calcul réglementaire, la maison témoin neuve est classée C ou E suivant le type d'énergie choisi.

En ce qui concerne les émissions de CO<sub>2</sub> liées au chauffage, 4 maisons sont classées A. Cela est dû à l'utilisation d'un chauffage au bois. Les maisons neuves témoins neuves sont classées C ou D suivant le type d'énergie choisi.

Le bilan carbone des matériaux utilisés pour la construction et la rénovation nous montre l'intérêt de l'utilisation de matériaux d'origine organique le plus souvent utilisés dans les constructions écologiques. Seule la maison dont une partie est réalisée en briques monomur aura contribué à émettre du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Les autres types de construction peuvent être considérés comme des puits de carbone<sup>[29]</sup>.

### **Conclusion :**

L'outil de simulation thermique dynamique permet d'évaluer les besoins énergétiques et le niveau de confort thermique des bâtiments de manière plus détaillée que les méthodes simplifiées basées sur des bilans mensuels, permettant de présélectionner les équipements et donc de chiffrer une installation de climatisation et de chauffage.

Cette étude nous a montré, l'importance des différents critères sur le cas d'étude, surtout dans les choix et les décisions qui ont un fort impact sur la qualité thermique du bâtiment, d'une part.

D'autre part, la relation entre les différents éléments constructifs, et les paramètres du confort thermique. Bien que la pertinence des différents scénarios, nous a aidés à mieux comprendre ces relations et déterminer par la suite les effets de ces modèles.

L'utilisation des données consignées dans ce chapitre pour effectuer un bilan thermique est recommandée car cela nous permet d'une part d'économiser sur l'investissement dans le choix et l'achat du matériel et d'autre part, d'adapter la puissance à installer à nos besoins réels ; ce qui diminuera aussi les dépenses en électricité, réduire les émissions de CO<sub>2</sub> et en final, avoir un confort thermique optimal souhaité.

## ***Chapitre 3 :***

*Dimensionnement et analyse de  
fonctionnement d'un échangeur air/sol*



## **Introduction :**

L'optimisation de l'habitat a basse consommation c'est l'utilisation des énergies renouvelables (solaire passif, capteurs thermiques, panneaux solaire..) mais également l'emploi de matériaux écologiques (Chapitre 2). Les énergies renouvelables utilisent des flux d'énergies d'origine naturelle (soleil, vent, eau, croissance végétale, géothermie...). Dans notre cas le, choix du système dépend des besoins énergétiques et du coût de l'installation. De ce fait, l'emploi d'un système dit passif telle que l'échangeur air/sol appelé aussi puits canadien, apporte une ventilation naturelle. Ce système écologique et économique utilise l'inertie du sol pour rafraîchir ou préchauffer le logement. Mais son efficacité dépend de la qualité de sa conception.

L'énergie géothermique est l'une des énergies alternatives les plus propres, les plus accessibles et les moins chères du monde entier. Elle intervient dans des multiples domaines : la pisciculture, le chauffage des serres, la balnéothérapie et la production de l'électricité, elle offre aussi une véritable rentabilité à la collectivité vis à vis le confort thermique.

La climatisation par la géothermie, peut offre un apport considérable à la climatisation conventionnelle au terme de réduction de la consommation énergétique. Parmi les systèmes de climatisation par géothermie, l'échangeur air/sol est une technique basée sur l'inertie thermique du sol, pour chauffer ou refroidir l'air utilisé dans la ventilation des bâtiments.

L'échangeur air/sol est conçue de maintenir un climat confortable à l'intérieur d'un habitat. Cet objectif est réalisé à travers l'identification des paramètres influant sur le comportement thermique de l'échangeur et à distinguer les plus prépondérants d'entre eux.

La réalisation d'un système échangeur air/sol est conditionnée principalement par cinq (5) paramètres à savoir : le débit d'air, les propriétés thermiques de sol, les propriétés physiques de matériau des tubes, la profondeur d'enfouissement des tubes et la géométrie de l'échangeur.

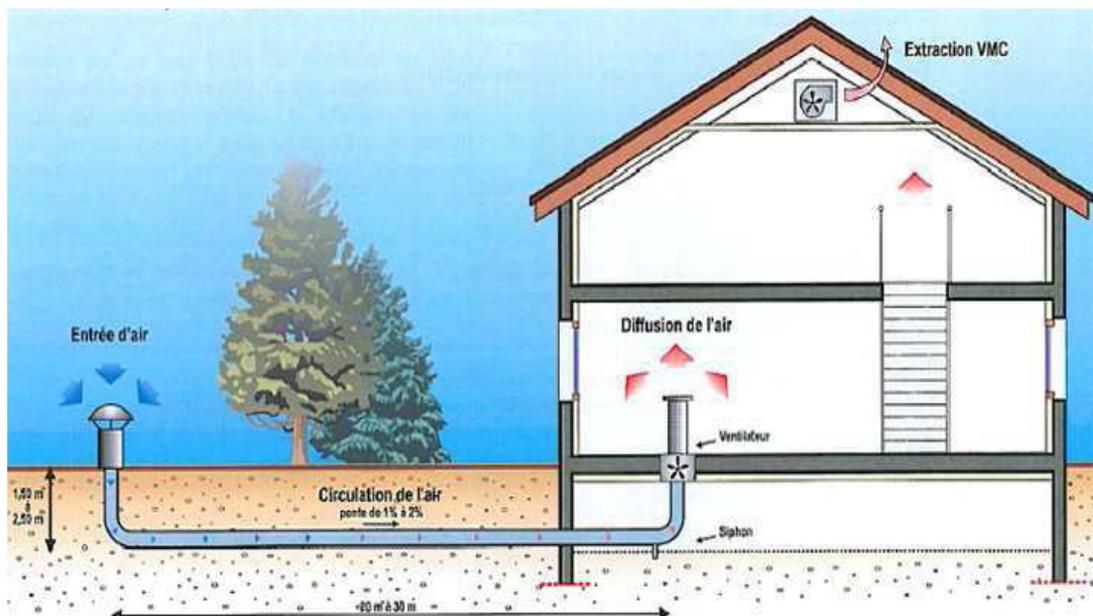
Dans ce chapitre nous présenterons aussi pour l'échangeur air/sol un modèle à calcul empirique et un autre par simulation sous le logiciel de GAEA, consacré à la présentation de ce dernier, puis on ajoute un exemple de calcul et de mise en œuvre d'un puits canadien.

## 1) Généralité sur l'échangeur air/sol :

### 1.1. Principe de fonctionnement de l'échangeur air/sol :

L'échangeur air/sol qui s'appelle aussi puits canadien/provençal est un système dit : géothermique, qui utilise l'énergie présente dans le sol à proximité de sa surface pour chauffer ou refroidir l'air neuf de ventilation des bâtiments.

En fonction des conditions atmosphériques, du jour et de la saison, l'air extérieur subit de fortes variations de température. À l'opposé, le sol, à quelques mètres sous sa surface, présente une température peu variable en raison de sa grande inertie thermique. L'échangeur air/sol tire partie de cette grande inertie en mettant en contact thermique l'air extérieur avec le sol grâce à des tubes enterrés à quelques mètres de profondeur sous le sol, à proximité ou directement sous le bâtiment à ventiler. L'air provenant de l'extérieur, mu par un ventilateur, parcourt les tubes avant d'être insufflé dans le bâtiment<sup>[31]</sup>.



**Figure 27** : Schéma de principe d'un puits canadien

### 1.2. Modes de fonctionnement d'un échangeur air/sol :

Trois modes de fonctionnement de l'échangeur air/sol, qui sont appropriés à chaque saison :

#### a) Fonctionnement en hiver :

En hiver, la température extérieure est inférieure à la température de sol, l'air est réchauffé en traversant l'échangeur géothermique. Grâce à la chaleur du sous-sol cet air chaud permet de réaliser des économies d'énergie.

**b) Fonctionnement en été :**

En été, la température du sous-sol est basse. L'air extérieur est rafraîchi en traversant l'échangeur géothermique puis diffusé dans l'habitation, entraînant une réduction de la température ambiante pour un meilleur confort.

**c) Fonctionnement au printemps/automne :**

Pendant les intersaisons, la température extérieure subit des variations importantes (journées ensoleillées - nuits froides), mais la température du sous-sol reste stable (fraîche au printemps - encore chaude en automne). Par une chaude journée de printemps, il n'est pas souhaitable d'amener de l'air neuf par l'intermédiaire de l'échangeur géothermique, cet air, serait plus frais que l'air extérieur. Par contre, le préchauffage de l'air par l'échangeur géothermique pendant les nuits fraîches du printemps est souhaitable. L'exemple inverse (journées fraîches, nuits chaudes) est valable pour les journées d'automne.

**1.3. Caractéristiques des principaux composants d'un puits canadien :**

L'échangeur air/sol se compose en quatre principaux éléments à savoir :

**a) Prise d'air neuf :**

Tous les puits canadiens possèdent une prise d'air neuf. Elle peut être en colonne extérieure circulaire ou cubique et placée en façade de bâtiment ou à distance lorsque le terrain le permet. Ses dimensions sont généralement les mêmes que celles des conduits auxquels elle est reliée de manière à ne pas occasionner de variations de vitesse et de pertes de charge. Elle peut être omnidirectionnelle ou unidirectionnelle en fonction des éventuelles sources de pollution environnantes. Elle est souvent pourvue d'un chapeau et d'ailettes empêchant l'eau de pluie de pénétrer dans le puits. La prise d'air est généralement placée légèrement en hauteur de manière à ne pas capter trop de poussières. Elle est fixée dans le sol par socle béton.

La matière de la prise d'air peut être : l'acier inoxydable, l'acier galvanisé, le béton, le polyéthylène.



**Figure 28 :** Différents modèles des prises d'air

### b) Échangeur géothermique :

Il est constitué d'un ou plusieurs tubes assurant un triple rôle : canaliser le flux d'air, permettre les échanges thermiques entre l'air et le sol et assurer la tenue mécanique de l'ouvrage. Leurs principales caractéristiques sont leurs dimensions (diamètre, longueur) et leur matériau.

Plusieurs méthodes sont alors utilisées pour assurer les raccords : vissage, emboîtement, collage... avec parfois des joints en caoutchouc.

L'échangeur est généralement enterré entre 4 et 6 m pour le tertiaire et entre 1 et 2 m pour le résidentiel individuel. Il est assez éloigné de la dalle des bâtiments pour éviter toute fuite de chaleur de celle-ci vers le puits. Une pente régulière de 2 à 3% est mise en place afin d'évacuer les éventuels condensats<sup>[32]</sup>.



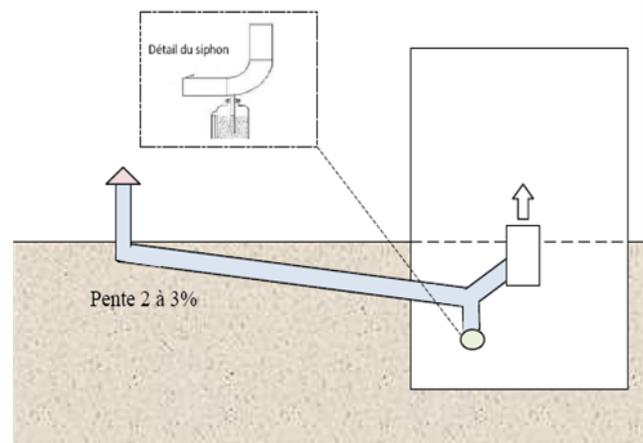
**Figure 29** : Echangeur géothermique

### c) Système d'évacuation des condensats :

Le fait que de l'air chaud et humide provenant de l'extérieur se refroidisse au contact des parois froides du puits canadien peut engendrer un phénomène de condensation dans les conduits. Dans ce cas, un système doit permettre d'extraire ces condensats.

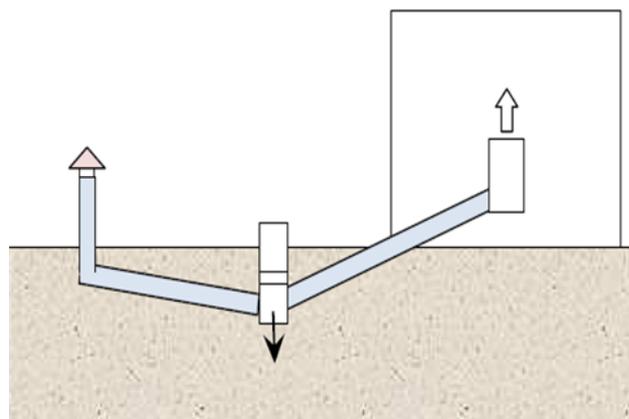
Pour ce faire, il existe trois (3) possibilités :

- Dans le cas où le bâtiment possède un sous-sol, alors le point bas de l'échangeur thermique peut être situé à ce niveau. Les condensats sont alors récupérés grâce à la pente des conduits de 2 à 3% et à un siphon. Le siphon est dans raccordée au réseau d'écoulement des eaux usées ou des eaux pluviales lorsque celui dernier existe.

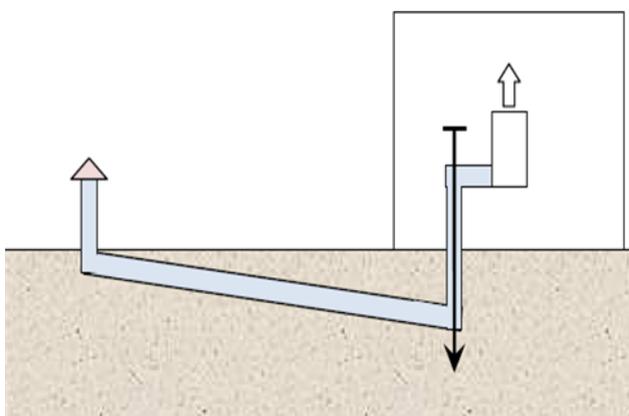


**Figure 30** : Système d'évacuation des condensats à siphon

- Si le sol est perméable et que la topographie le permet, un puits d'infiltration peut être placé au niveau du point bas de l'installation (vers le bâtiment ou vers la prise d'air). Il faut au préalable s'assurer de l'absence de nappe, source ou écoulements souterrains
- Si la nature du sol ne permet pas l'infiltration ou si il y a un risque de remontée d'eau (nappe libre superficielle par exemple) dans le puits, alors l'installation d'une fosse en point bas de l'installation équipée d'une pompe peut être envisagée. La pompe est dans ce cas raccordée au réseau d'écoulement des eaux usées ou des eaux pluviales lorsqu'ils existent. Dans le cas contraire, il faut prévoir une zone d'épandage.



**Figure 31** : Système d'évacuation à puits d'infiltration



**Figure 32** : Evacuation par infiltration dans le sol

#### d) Ventilateur :

Pour garantir l'apport en air neuf du bâtiment, le système du puits canadien nécessite un couplage avec une ventilation mécanique capable de vaincre les pertes de charge engendrées par le passage dans l'échangeur. Le ventilateur doit être dimensionné de manière à assurer les débits réglementaires.

Le ventilateur peut être équipé d'un régulateur. Un thermostat placé à l'extérieur va favoriser le passage de l'air par le puits canadien ou par le by-pass en fonction de la température extérieure (gains en température faible en mi-saison par exemple donc passage par le by-pass).

Deux (2) configurations sont ici aussi envisageables : le ventilateur placé en entrée ou en sortie de puits. Dans le premier cas, le conduit est en surpression et le bruit du ventilateur plus éloigné des occupants. Cette configuration semble plus intéressante d'un point de vue sanitaire (atténuation du bruit et lutte contre l'intrusion de pollution provenant du sol) même s'elle est rarement mise en œuvre dans ce but. Elle est peu utilisée car elle nécessite généralement l'emploi de deux ventilateurs.

Dans le second cas, le conduit et en dépression et le ventilateur peut être le même que celui de la VMC (ventilateur mécanique contrôlée) double flux. C'est cette configuration qui est la plus utilisée car elle ne nécessite l'emploi que d'un ventilateur[32].

#### 1.4. Les ventilations mécaniques couplées avec échangeur air/sol :

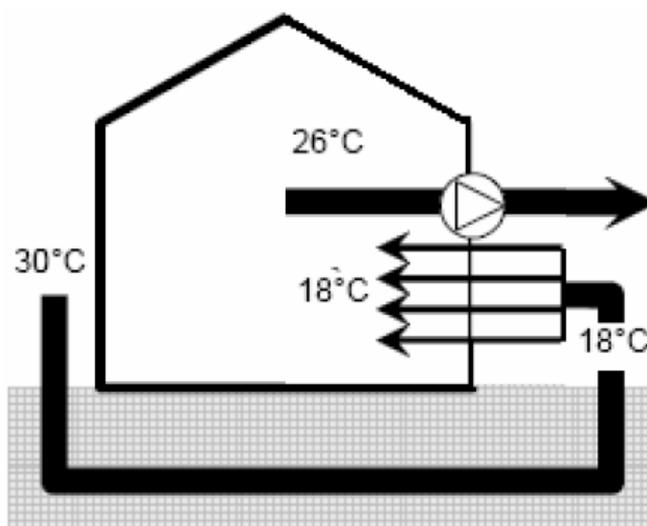
Le dimensionnement d'un puits canadien ne peut se faire sans une approche globale à la ventilation de la maison. Le but de la ventilation au sein d'un bâtiment est d'évacuer l'air vicié en le renouvelant par de l'air neuf. Contrairement à la ventilation naturelle, la VMC (Ventilation Mécanique Contrôlée) est un dispositif motorisé d'évacuation ou d'insufflation d'air frais.

Il existe deux (2) principaux types de ventilation mécanique couplée avec échangeur air-sol.

##### a) La ventilation mécanique contrôlée simple flux :

Il s'agit du système le plus simple, en général utilisé dans l'habitat individuel. Les entrées d'air sont placées dans les pièces à vivre (salon, chambres...) tandis que les bouches d'extraction se trouvent au niveau des pièces humides. Seule l'extraction de l'air est motorisée.

L'air est ainsi aspiré depuis les pièces sèches vers les pièces humides avant d'être extrait. Il faut prendre garde à ce que l'air puisse circuler même à portes fermées.



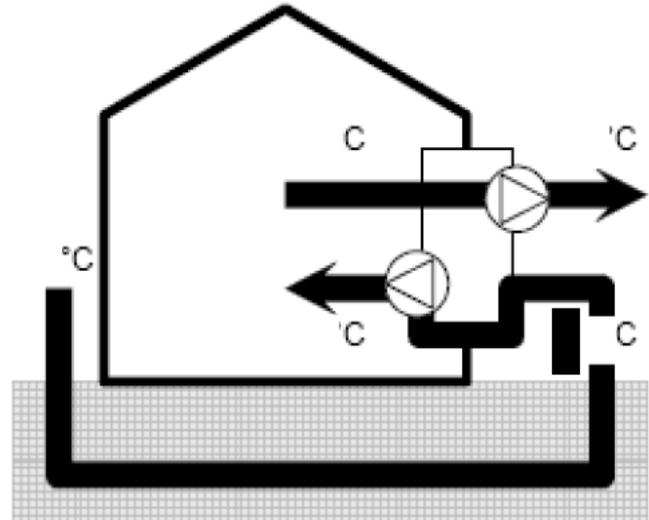
**Figure 33 :** Echangeur air-sol avec une VMC simple flux[33]

##### b) La ventilation mécanique contrôlée double flux :

La ventilation mécanique contrôlée double flux combine les systèmes d'insufflation et d'extraction mécaniques. Elle est composée de deux ventilateurs indépendants avec deux réseaux de conduits séparés, l'un pour insuffler de l'air neuf dans les pièces principales et l'autre pour extraire l'air vicié dans les pièces de service[34].

Schéma de principe du puits canadien combiné avec une ventilation mécanique contrôlée à récupération de chaleur double flux.

Ce dispositif permet une meilleure maîtrise des débits d'air neuf insufflés dans les pièces principales, ainsi que des risques de courants d'air froid par la possibilité de préchauffage de l'air neuf. La VMC double flux peut en effet intégrer un récupérateur de chaleur sur l'air extrait en vue du préchauffage de l'air neuf insufflé. Son utilisation est par conséquent répandue dans les pays froids. Il présente également l'avantage de permettre le filtrage de l'air neuf avant sa distribution dans les pièces.



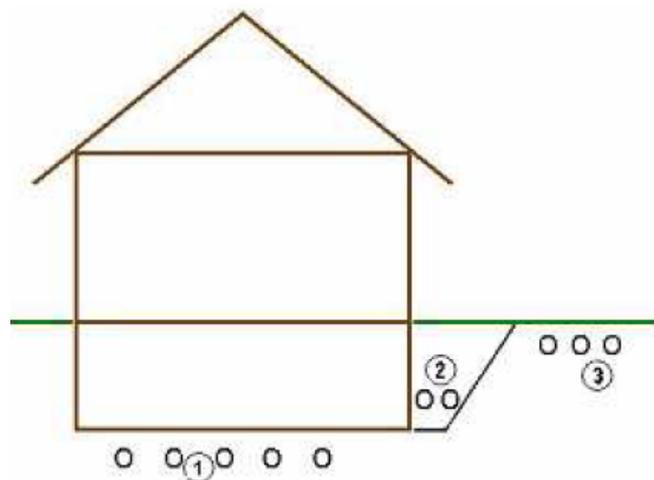
**Figure 34 :** Echangeur air/sol avec une VMC double flux<sup>[33]</sup>

### 1.5. Emplacement du puits canadien :

Trois manières d'installation de l'échangeur air-sol sont possibles :

- Sous le bâtiment
- Dans les fouilles du bâtiment
- Dans le terrain

Techniquement, ces variantes sont équivalentes, la différence se situe au niveau des coûts de terrassement, la deuxième variante étant la plus intéressante financièrement, aucun terrassement supplémentaire n'étant à réaliser. Lors de la mise en place des tuyaux, il faut éviter au maximum les coudes et angles créant des pertes de charge. De plus un écart entre les tuyaux parallèles d'au moins 0,8 m doit être conservé<sup>[35]</sup>.



**Figure 35 :** Emplacement du puits

### ***1.6. Avantages et inconvénients du puits canadien :***

#### *Les avantages :*

- 1- Ressource énergétique renouvelable préservant l'environnement (Pas de déchet, émissions gazeuses très réduites)
- 2- Consommation énergétique très faible
- 3- Coût du matériel faible
- 4- La maintenance restreinte
- 5- Pas de rejets de CO<sub>2</sub>, pas de liquides frigorigènes, pas de phénomène allergogène ou virales.

#### *Les inconvénients :*

- 1- Inutile à la mi-saison
- 2- Technique de pose relativement délicate
- 3- Coût de terrassement important
- 4- Consommation supplémentaire : il est à souligner qu'en parallèle des possibilités d'économie d'énergie, la consommation électrique des auxiliaires (ventilateur de circulation d'air, by-pass automatisé, pompe de relevage de l'eau condensée, etc.) peut s'avérer importante
- 5- Entretien du circuit ; Il faut prévoir un entretien régulier de la conduite pour garantir une qualité hygiénique de celui-ci. Des accès à la conduite sont à prévoir pour nettoyer le système et éviter la prolifération des bactéries consécutive à la condensation (estivale)
- 6- Coût ; Pour éviter des coûts excessifs au déblai des terres, l'installation doit se faire pendant les travaux de terrassement.

## **2) Les paramètres de dimensionnement d'un échangeur air/sol :**

### ***2.1. Débit d'air :***

La première étape de dimensionnement de l'échangeur air/sol ne peut être que la détermination du débit d'air entrant dans les tubes, qui doit assurer l'ensemble des besoins de renouvellement d'air des pièces ou des zones à ventiler. Ce paramètre intervient simultanément sur l'échange convectif entre l'air et la canalisation et sur la puissance thermique apportée au bâtiment. Il est utile ici de définir le taux de renouvellement d'air (ACH), qui indique le nombre de fois en une heure où la totalité du volume d'air d'un espace est renouvelé. Ce dernier est exprimé par le rapport de débit volumique  $q_v$  et le volume de la pièce considéré.

Cet indice donné par la formule suivante<sup>[36]</sup> : 
$$ACH = \frac{Q_v \cdot 3600}{\text{le volume total de la pièce}} \quad [\text{Vol/h}]$$

Le choix de régime de ventilation varie selon le mode de fonctionnement :

- Régime de ventilation réduit en préchauffage
- Régime de ventilation plus élevé en rafraîchissement.

### 2.2. Les propriétés thermiques du sol :

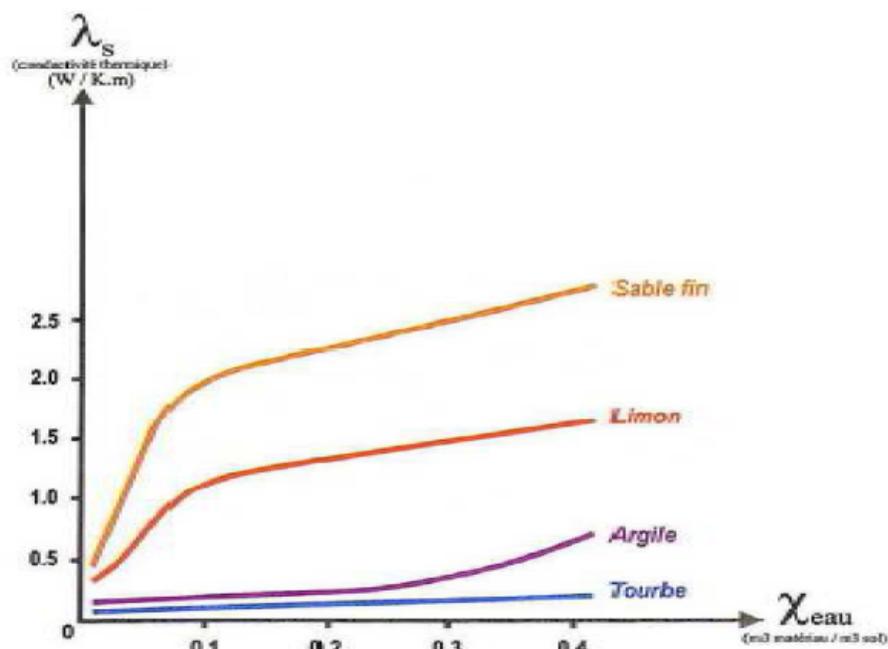
La nature de sol est un des principaux éléments à prendre en compte lors de la conception d'un échangeur air/sol. La capacité calorifique et la conductivité du sol ont une influence importante sur l'efficacité du système. Elles dépendent de la composition du sol mais aussi de son taux d'humidité et des migrations d'eau en son sein<sup>[37]</sup>.

Ces deux (2) propriétés thermiques du sol sont expliquées ci-dessous :

#### a) Conductivité thermique du sol :

La conductivité thermique d'un sol dépend non seulement de sa composition mais également de la disposition et de la forme de ses particules constitutives et sa teneur en eau. Le sol sera d'autant plus conducteur de chaleur qu'il sera humide (Figure 36). La conductivité thermique d'un sol peut donc varier dans le temps, notamment en fonction des évolutions de sa teneur en eau dues aux variations climatiques et au changement de saison<sup>[38]</sup>.

La figure ci-dessous montre la conductivité thermique de différents types de sols en fonction de leur teneur en eau :



**Figure 36** : Conductivité thermique de quelques sols en fonction de la teneur en eau<sup>[39]</sup>

**b) Capacité calorifique du sol :**

La capacité thermique du sol correspond à la moyenne des capacités calorifiques de ses différents constituants : minéraux, matières organiques, air et eau. Elle s'exprime par la formule suivante<sup>[38]</sup> :

$$C_s = \sum_i \chi_i \rho_i C_i$$

Où :  $C_s$  est la capacité calorifique.

$\chi_i$ ,  $\rho_i$ ,  $C_i$ , représentent respectivement la teneur du matériau ( $m^3$  de matériau/ $m^3$  de sol), la masse volumique et la capacité calorifique d'un des constituants.

Comme l'eau possède une capacité supérieure à celle des autres constituants du sol (Tableau 8), un sol humide stockera mieux la chaleur qu'un sol sec. Cet effet est mis à profit pour augmenter temporairement la performance des échangeurs thermiques air-sol en humidifiant le sol par arrosage.

Le tableau suivant montre les propriétés thermiques des principaux constituants d'un sol :

	Masse volumique	Capacité calorifique	Conductivité thermique
<b>Matière</b>	<b><math>\rho</math> [Kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>C [KJ/Kg k]</b>	<b><math>\lambda</math> [W/m k]</b>
Minéraux (moyenne)	2650	0.80	2.90
Sable et Gravier	1700 à 2200	0.91 à 1.18	2.00
Argile et limon	1200 à 1800	1.67 à 2.50	1.50
Matière organique	1300	1.90	1.25
<b>Eau</b>	<b>1000</b>	<b>4.20</b>	<b>0.585</b>
Glace	920	2.10	2.20
Air	1.250	1.00	0.023

**Tableau 8 :** Les propriétés thermiques des principaux constituants d'un sol

Le résultat qu'on peut extraire du précédent : il est préférable de choisir un sol argilo-sableux humide pour l'installation d'un système puits canadien, celle-ci donne une quantité d'énergie récupérable optimale.

**2.3. Les propriétés physiques de matériau des tubes :**

Le matériau des tubes est plus important car il impacte directement sur les échanges thermiques sol/puits. Le choix du matériau varie en fonction des contraintes mécaniques, des dimensions et des performances thermiques recherchées.

**a) Les propriétés thermiques :**

L'utilisation de parois compactes à conductivité thermique élevée doit être favorisée car elle permet d'augmenter les échanges et ainsi de réduire la longueur du puits.

La faible épaisseur des canalisations rendant ses propriétés thermiques peu influentes sur le comportement général du puits. Pourtant ces propriétés peuvent avoir un impact sur le comportement dynamique de l'échangeur, et il est nécessaire les prendre en compte.

	Diffusivité $10^{-4}$ [m <sup>2</sup> /s]	Conductivité [W/m K]
Cuivre	1.1	380
Aluminium	0.94	230
Fer	0.16	72
Acier inoxydable	0.04	15
Béton	0.005	1.75

**Tableau 9** : Conductivité thermique et diffusivité de quelques matériaux

**b) La tenue à l'enfouissement :**

Les matériaux utilisés doivent avoir une bonne tenue à l'enfouissement (une classe de rigidité minimale de 8 kN/m<sup>2</sup> est conseillée).

**c) La rugosité intérieure des tubes :**

La rugosité intérieure des tubes favorise le transfert thermique par convection en créant de la turbulence, cependant elle favorise aussi les pertes de charges hydrauliques le long de chaque tube.

Des pertes de charge élevées sont indésirables car elles entraînent un surdimensionnement des systèmes de ventilation et des pertes énergétiques supplémentaires. De plus, les irrégularités de l'intérieur des tubes favorisent la stagnation d'eau condensée, ce qui peut dégrader à terme la qualité de l'air ventilé (développement de micro-organismes). L'intérieur des tubes doit donc être le plus lisse possible. Ainsi, une légère pente de l'ensemble des tubes permet l'évacuation de l'eau condensée sans intervention extérieure.

Les tubes des puits canadiens actuellement en fonctionnement sont généralement en PVC, en polyéthylène ou en polypropylène souple ou rigide.

- **PVC** : Le moins cher, pas très écologique. Il peut éventuellement dégager des vapeurs nocives dues au mode de fabrication. Pas d'étude connue à ce jour dans le cadre du puits canadien.

- **Polyéthylène (PE)** : Le plus écologique, mais assez cher.

Le choix peut être encore entre :

- **Tuyau annelé de protection de câbles électriques (TPC)** : Très bon marché pour des petits diamètres. Annelé à l'extérieur, mais lisse à l'intérieur. Ils peuvent être posés en parallèles. Attention toutefois : ce type de tuyau n'est pas prévu à l'origine pour être enterré à forte profondeur, ce qui peut nuire à leur tenue dans le temps.
- **Tuyaux de béton** : Utilisé pour des diamètres supérieurs à 300 mm. L'échange thermique est plus important (la conductivité du béton est plus élevée que celle des tuyaux en plastique, relativement isolants). Mais les raccords sont difficiles à étanchéifier et la mise en œuvre est relativement complexe. En outre le radon du sol s'il y en a peut donc s'infiltrer dans le tuyau, et aller contaminer ensuite la maison.

#### ***2.4. La géométrie de l'échangeur :***

Visant à atteindre les performances recherchées d'un échangeur air-sol, le choix d'une géométrie adéquate reste une étape indispensable dans son dimensionnement. Ce choix est un compromis entre les possibilités offertes par le terrain et les pertes de charge.

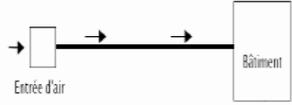
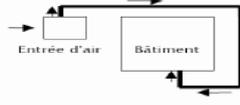
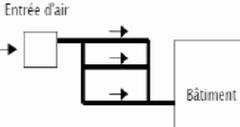
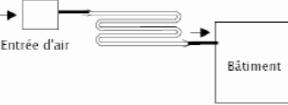
L'étude de la géométrie implique le passage par les six grandeurs principales :

##### **a) Disposition des tubes :**

Afin de minimiser les pertes de charge au sein du conduit et de faciliter son entretien, il est conseillé de limiter le nombre de coudes : moins il y aura de coudes, moins grandes seront les pertes de charge ; et de ce fait la puissance du ventilateur sera également réduite. La pose du tuyau s'effectuera en fonction de la configuration du terrain.

Quatre dispositions sont les plus utilisées : droite, en boucle, en boucle de Tichelmann ou en méandres.

Le tableau 10 est un récapitulatif des quatre (4) dispositions :

Types	Avantages	Inconvénients	Configuration
Tubes en droite (monotube)	Perte de charge réduite. Montage et maintenance facile.	Dépense un terrain spacieux	 Entrée d'air → Bâtiment
Tubes en boucle (circulaire)	Considération la possibilité quand la place manque autour de la maison	Influence thermique de bâtiment sur l'efficacité de système.	 Entrée d'air → Bâtiment <i>Tube en boucle</i>
Tubes en boucle de Tichelmann	Surface d'échange importante	Perte de charge considérable	 Entrée d'air → Bâtiment
Tubes en méandres	La plus importante surface d'échange	Perte de charge considérable	 Entrée d'air → Bâtiment <i>Tube en méandre</i>

**Tableau 10** : Dispositions des tubes, avantages et inconvénients de chaque disposition

**b) La longueur des canalisations :**

La longueur des tubes détermine la surface d'échange et le temps de séjour de l'air dans les tubes. Il existe donc une longueur optimale de l'échangeur liée à la longueur caractéristique d'échange thermique.

En effet, la bibliographie montre que pour les faibles débits, la température minimale est atteinte assez rapidement, et qu'à partir d'une certaine longueur, l'échangeur ne tempère plus l'air : il a atteint sa limite d'efficacité. Par contre, plus le débit augmente et plus cette longueur limite augmente. La longueur totale du conduit est calculée en fonction du débit d'air souhaité, de la nature du sol, de la zone géographique (température extérieure tout au long de l'année) et du type d'installation choisie.

Elle est habituellement de l'ordre de 30 à 50 m afin de limiter les pertes de charge.

**c) Le diamètre des canalisations :**

Une augmentation du diamètre des tubes entraîne une augmentation de la surface d'échange, mais n'augmente pas nécessairement l'échange thermique. Au delà d'une certaine valeur optimale, dépendant de la vitesse d'écoulement de l'air, le coefficient d'échange convectif chute. Ceci est dû au fait que l'accroissement de cette vitesse d'écoulement réduit l'épaisseur de la couche limite thermique, où va être échangée la chaleur. L'air circulant au cœur de la canalisation ne va plus être en contact avec le tube et sa température sera peu influencée par la température du sol[40].

Pour optimiser les transferts thermiques sol/air, la vitesse de l'air au sein du puits doit être comprise entre 1 et 3 m/s. En fonction des débits d'air requis, le diamètre du conduit du puits est alors calculé pour respecter les conditions de vitesse d'air. Cet optimum est indépendant de la longueur de la canalisation. On obtiendra donc une relation directe entre débit d'air et diamètre optimal<sup>[41]</sup>.

En pratique, pour les installations domestiques, le diamètre utilisé se situe entre 16 et 20 cm, mais il peut être bien supérieur sur des installations de grande taille.

### **d) Le nombre des tubes :**

Le nombre et le diamètre des tubes définissent la section totale de tubes par laquelle va circuler l'air. Ils influent à la fois sur la vitesse d'écoulement de l'air et sur la surface de contact entre l'air et le sol. Ces paramètres sont ajustés en fonction du débit nominal de ventilation.

Le nombre de tubes est conditionné par l'espace disponible pour l'installation de l'échangeur.

### **e) La distance entre canalisations :**

Les fonctions de stockage et d'amortisseur thermique du sol sont assurées par le volume de sol situé tout autour de chaque canalisation. C'est le cas d'une configuration en boucle de Tichelmann ou en Méandres où il est nécessaire d'assurer une certaine distance entre les tubes.

L'épaisseur de sol concernée est proportionnelle à la profondeur de pénétration du signal thermique. Ainsi, si la distance entre deux tubes est inférieure à la profondeur de pénétration, la température de la portion de sol située entre ces tubes est influencée simultanément par ces deux tubes, ce qui réduit localement la capacité de stockage du sol.

En effet, il semble important d'assurer une distance minimale afin de limiter l'interaction entre deux tubes adjacents et d'optimiser ainsi l'exploitation de l'inertie du sol. Il est préférable qu'il soit supérieur à 3 fois le diamètre des tubes afin de garantir un bon échange thermique de chaque tube avec le sol<sup>[41]</sup>.

### **f) Pente de la conduite :**

Elle doit être comprise entre 1 et 3% pour favoriser l'évacuation des condensats qui peuvent se former dans le conduit lorsque l'air extérieur chaud est en contact avec les parois plus froides du puits.

**g) La profondeur d'enfouissement des tubes :**

Pour un échangeur air-sol, le sol joue le rôle de tampon thermique entre l'extérieur et la canalisation enterrée. C'est lui qui isole cette dernière de l'influence des conditions atmosphériques. La profondeur d'enfouissement est donc un paramètre important qui va jouer sur la qualité de cette isolation : une profondeur plus grande améliore l'isolation de la canalisation et le déphasage. Au delà d'une dizaine de mètres sous la surface du sol, la température du sol ne varie plus sous l'effet de l'évolution de la température extérieure. Seule la température moyenne évolue en fonction de la profondeur sous l'effet de la puissance géothermique provenant du manteau terrestre.

Il existe alors plusieurs manières d'aborder la question de la profondeur en fonction de l'usage attendu du puits canadien :

- Dans le cas d'un puits qui chercherait à utiliser le déphasage journalier, une profondeur de 40 cm serait suffisante.
- Pour un déphasage saisonnier, la profondeur minimale d'enfouissement requise serait de 2 m. Au delà, l'efficacité du puits augmente encore, mais des contraintes réglementaires et économiques ne permettent généralement pas d'installer le puits à de telles profondeurs<sup>[40]</sup>.

**3) Méthode de dimensionnement d'un échangeur air/sol :**

Le calcul d'un puits canadien est fonction de plusieurs paramètres<sup>[42]</sup> :

- Le volume de la maison
- Le débit nécessaire en hiver et en été
- Le choix de la ventilation de la maison (VMC, aération naturelle, ...)
- L'architecture (bioclimatique, matériaux, isolation, serre, ...)
- La nature du sol (sablonneux, argileux, nappe phréatique, ...)
- La place disponible pour l'enfouissement du tuyau
- La localisation géographique
- Le budget

**3.1. Méthode de calcul empirique<sup>[43]</sup> :**

Le puits canadien ou ÉAG (échangeur à air géothermique) ne bénéficie pas encore de règles de dimensionnement bien précises. Des études ont cependant énoncé quelques recommandations ou « règles du pouce ».

**a) Vitesse de l'air<sup>[43]</sup> :**

De la vitesse de l'air dans l'échangeur d'air géothermique va dépendre la qualité de l'échange de chaleur. La fourchette de vitesse recommandée par la corporation des maîtres mécaniciens en tuyauterie du Québec<sup>[44]</sup> est comprise entre 1,5 et 3,5 m/s pour un bon compromis entre l'échange thermique et les pertes de charge (effort à fournir par le ventilateur), qui sont à éviter.

Le tableau suivant donne le diamètre à utiliser en fonction du débit d'air extrait, le diamètre minimal correspondant à une vitesse de 1,5 m/s et le diamètre maximal à une vitesse de 3,5 m/s :

Débit d'air extrait	Diamètre recommandé (mm)		
	<i>l/s</i>	Diamètre minimal	Diamètre maximal
<i>m<sup>3</sup>/h</i>			
100	28	100	150
125	35	150	150
150	42	150	200
200	56	150	200
250	69	200	250
300	83	200	250

**Tableau 11** : Le diamètre à utiliser en fonction du débit d'air extrait

**b) Temps de parcours<sup>[43]</sup> :**

Pour un échange optimal, la durée minimale de parcours dans l'ÉAG par l'air doit être de 20 secondes, l'échange maximal se faisant les 30 premières secondes. Cette contrainte permet de déterminer une longueur minimale en utilisant le tableau précédent.

Par exemple : si vous avez choisi le diamètre minimum de 150 mm pour un débit de 200 m<sup>3</sup>/h, ce qui correspond comme dit précédemment à une vitesse de 1,5 m/s, alors il vous faudra une longueur minimale de  $1,5 \times 20 = 30$  m.

**c) Longueur du conduit :**

Une étude<sup>[45]</sup> a permis de déterminer une règle du pouce quant à la surface d'échange nécessaire selon que l'on veut privilégier le préchauffage ou le rafraîchissement. Tel que mentionné précédemment, le principe du puits canadien est d'utiliser l'inertie du sol pour amortir les montées ou descentes en température.

En mode préchauffage, on recherche un amortissement annuel ou saisonnier, c'est-à-dire que l'on cherche à capter la chaleur de la saison chaude captée par le sol mais pour l'utiliser en

hiver. En mode rafraîchissement (que nous déconseillons vivement sous nos latitudes), on recherche un amortissement journalier, c'est-à-dire capter la fraîcheur de la nuit précédente qui est toujours dans le sol. Le tableau suivant donne le nombre de m<sup>2</sup> de surface d'échange par m<sup>3</sup>/h d'air extrait.

Par exemple si j'ai besoin d'un débit d'air extrait de 200 m<sup>3</sup>/h et que je souhaite privilégier le préchauffage en hiver, il me faut une surface d'échange de  $200/7 \approx 29 \text{ m}^2$

Vitesse de l'air (m/s)	Ratio : m <sup>2</sup> par m <sup>3</sup> /h	
	Amortissement journalier	Amortissement annuel
1	1/10	1/5
2	1/15	1/7
4	1/20	1/10

**Tableau 12** : La surface d'échange par m<sup>3</sup>/h d'air extrait

De la surface d'échange on peut ensuite déduire la longueur de tube nécessaire (pour les amateurs de mathématiques) :

$$S_{\text{échange}} = \pi D \cdot L, \text{ donc } L = \frac{S_{\text{échange}}}{\pi D}$$

**d) Flux thermique<sup>[46]</sup> :**

Le flux thermique à travers la paroi du tuyau est proportionnel à la différence de température entre la surface externe (terre) et interne (air) et à l'inverse de la résistance thermique de la paroi, soit la formule :

$$\varphi = \frac{(T_e - T_i)}{R}$$

où la résistance thermique de la paroi est :

$$R = \frac{1}{2\pi} \times \left[ \frac{1}{r_1 h_1} + \frac{1}{r_2 h_2} + \frac{1}{\lambda} \times \ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right) \right]$$

- r1** = rayon interne
- r2** = rayon externe
- h1** = convection entre tuyau/air
- h2** = convection entre tuyau/terre
- λ** = conduction du tuyau

**e) Conductivité entre l'air et le tuyau<sup>[46]</sup> :**

$$C_{p_{\text{air}/\text{tuyau}}} = \frac{C_{p_{\text{airhumide}}}}{\text{Diamètre}} \times 0.023 \times \text{Re}^{0.8} \times \text{Pr}^{0.4}$$

**Re** = nombre de Reynolds  $Re = \frac{v_s D}{\nu}$   
**Pr** = nombre de Prandtl  $Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda}$

On prendra en compte la conductivité de l'air en fonction de l'hydrométrie avec cette formule :

$$C_{p_{\text{airhumide}}} = C_{p_{\text{air}}} \times e^{(0.021195 \times \text{Hydro}\%)}$$

D'autres constantes sont à prendre en considération :

- Masse de la vapeur d'eau (0,59 Kg/m<sup>3</sup>)
- Masse volumique de l'air (1,25 Kg/m<sup>3</sup>)
- Conductivité thermique de l'air (0,0262 W/m/K)
- Conductivité thermique de l'eau (0,556 W/m/K)
- Viscosité de l'air (0,000018 Kg/m.s)
- Conductivité de la terre (1,3 W/m/K)

En plus de la formule précédente, une autre permet de calculer la longueur du tuyau :

$$L = \frac{Q \times C_p \times (T_s - T_e)}{\pi \times \varphi \times d}$$

**L** = longueur du tuyau  
**Q** = débit de l'air (m<sup>3</sup>/s)  
**T<sub>s</sub>** = t° de sortie de l'air  
**T<sub>e</sub>** = t° d'entrée de l'air  
**C<sub>p</sub>** = conductivité de l'air  
**D** = diamètre tuyau  
**Phi** = flux thermique

### 3.2. Présentation du logiciel de simulation GAEA :

GAEA (Graphische Auslegung von Erdwärme Austauschern) est un logiciel qui a été développé par le département de la physique et de l'énergie solaire appliquée aux bâtiments de l'université de Siegen en Allemagne. Il permet de simuler les effets d'un puits canadien en fonction de la définition des conduits du puits (longueur, nombre de ligne ...), de la ventilation (pas de différenciation de VMC simple ou double flux) et du coût énergétique<sup>[47]</sup>. C'est un outil de calcul facilement utilisable pour faire correspondre les échangeurs de chaleur et des bâtiments de la terre. Cela peut bien fonctionner comme un outil autonome, mais est également prévu de faire partie de simulations de construction détaillées pour évaluer le potentiel d'échangeurs de chaleur de la terre au sein de l'ensemble du système de chauffage et de ventilation des maisons.

GAEA repose sur une interface d'utilisateur graphique. Toutes les valeurs d'entrée sont pré-réglés à des valeurs par défaut et peut être modifié au moyen de barres de défilement. Quand une entrée est éditée le résultat de ce changement est immédiatement visible dans les chiffres de la production présentés. Par la présente une compréhension rapide de nombreuses questions peut être obtenue<sup>[48-49]</sup>.

Certains sujets d'enquête peuvent être :

- Comment faire des échangeurs de chaleur air/sol (Puits canadien) affectant la demande d'énergie d'un bâtiment ?
- Quelle est la longueur optimale et la section des conduits d'air pour un débit donné ?

- Quelle est la profondeur optimale et la distance de plusieurs tuyaux pour l'aménagement d'un échangeur de chaleur air/sol ?
- Quels nouvel effort est nécessaire pour conditionner l'air préchauffé ou pré-refroidi selon les normes de confort requis l'intérieur des bâtiments ?

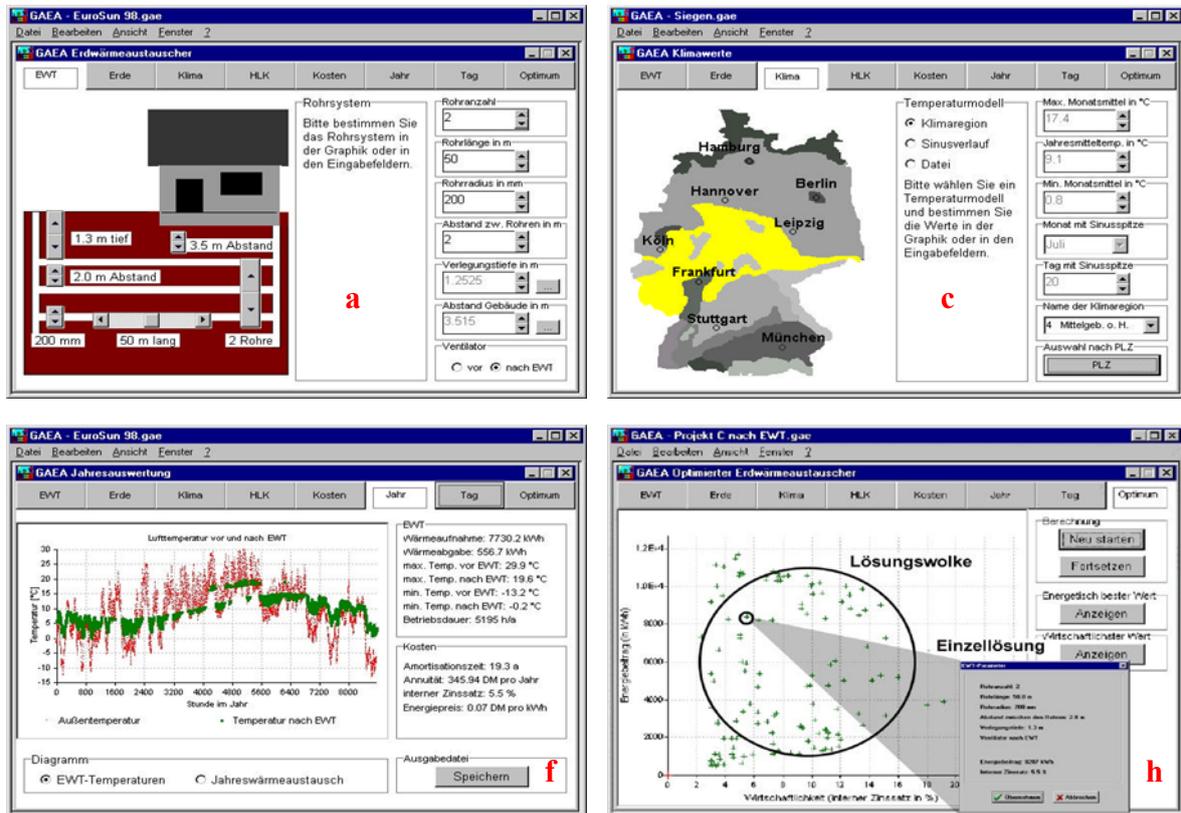


Figure 37 : L'environnement du logiciel de simulation GAEA<sub>150j</sub>

**a) Menu échangeur géothermique (geothermal heat exchanger "EHX") :**

La première étape dans le calcul d'EHX existante ou planifiée est la description du système. Avec le logiciel GAEA, toutes les données pertinentes peuvent être entrées facilement. Le menu dans lequel les valeurs suivantes sont définies :

- Nombre de tubes parallèles
- La longueur du tube (m)
- Rayon de Tube (mm)
- Distance entre les tubes (où plus d'un tube) (m)
- Profondeur de l'installation en sous-sol (m)
- Distance entre les tuyaux de bâtiments voisins (m)
- Position du ventilateur (avant ou après le système de tuyauterie)

### **b) Menu masse/Terre :**

Dans la deuxième étape, le sol qui entoure l'échangeur géothermique est défini. Cependant, les propriétés du sol ne sont pas connues avec précision, en particulier dans un stade précoce de la planification. Ils sont également soumis à des variations saisonnières, changer à une courte distance et sera affectée par l'opération de l'échangeur géothermique. Au lieu de modéliser ce comportement complexe et difficile à prédire en logiciel GAEA, le menu "masse / terre" sélectionne une liste de type de sol au choix.

### **c) Menu valeurs climatiques/Air :**

Le chauffage et le refroidissement des bâtiments et ainsi le fonctionnement d'un EHX dépendent de l'environnement dans des conditions in situ. Donc, la troisième étape d'un sélectionne une situation climatique représentant pour le calcul. La meilleure façon est de cliquer sur une courbe sinusoïdale de la température sont choisis comme modèle climatique.

### **d) Menu Chauffage/Ventilation/Climatisation (Heating/Ventilation/Air Conditioning) :**

La quatrième étape dans le travail avec le GAEA pour calculer l'EHX est une indication des besoins de chauffage, de ventilation et de climatisation. L'exigence de l'air frais peut être réglée sur la base du volume du bâtiment et le taux de renouvellement d'air nécessaire pour la ventilation artificielle ou débit volumique ou pris à partir d'un fichier en fonction de données simulées ou mesurées. Le GAEA calcule ensuite le comportement de l'écoulement dans le système de tuyauterie (coefficient vitesse moyenne, nombre de Reynolds, la chute de pression et de transfert de chaleur) et l'exigence de l'énergie électrique d'un ventilateur pour le transport aérien par l'EHX.

### **e) Menu coût :**

La cinquième étape est l'évaluation économique de l'EHX sont les coûts, par exemple, pour les tubes et la pose de tuyaux et les conditions économiques, à savoir l'inflation et les coûts énergétiques spécifiée. Les économies d'énergie qui peuvent être réalisées avec un EHX, sur le plan économique est en concurrence avec d'autres mesures d'économie d'énergie. GAEA calcule le taux de rendement interne et la période de récupération, fournissant ainsi les données économiques, qui sont nécessaires pour une comparaison des mesures d'économie d'énergie.

### **f) Menu évaluation annuelle/an :**

Le GAEA calcule les systèmes d'EHX dans deux (2) échelles de temps. Pour une année difficile, l'évaluation visant à déterminer les valeurs suivantes dans le menu "évaluation annuelle" et la sortie graphique :

- Chauffage et refroidissement contribution (annuelles et horaires)
- Températures avant et après l'EHX (annuelle valeurs horaires et les maxima et minima)
- Heures du système d'exploitation
- La période de récupération et taux interne
- Coût en énergie de l'énergie économisée

La graphique peut être zoomée continue de représenter un laps de temps entre 24 heures et toute l'année. Les valeurs numérique peuvent être pour un traitement ultérieur, par exemple, elles sont émis dans des tableurs ou des simulations.

### **g) Menu Rapport :**

Pour une analyse détaillée des opérations d'une journée spécifique (la deuxième échelle de temps), les températures et les flux de chaleur le long de l'EHX peuvent être calculés par le GAEA et passent par exemple, la validation des résultats de mesure. Les horaires peuvent être examinées de près pour 100 segments du comportement de l'EHX.

### **h) Menu échangeur géothermique optimisée :**

Pour l'optimisation technique et économique des systèmes, l'EHX avec le GAEA peuvent effectuer des variations de paramètres avec peu d'effort en raison du modèle de calcul analytique rapide. En particulier, le processus de planification précoce soutien le GAEA avec une méthode de calcul automatique. Toutes les solutions pratiques pour une situation de conception donnée avec leurs conditions aux limites (sol, climat, chauffage/ventilation/climatisation et le coûts) devraient être appliquées à l'égard de leur contribution annuelle d'énergie et le taux interne de retour sur capitaux employés.

3.3. Exemple de calcul et de mise en œuvre d'un puits canadien[51] :

Il s'agit d'une construction en brique rouge. L'isolation est de 25 cm pour les murs et de 40 cm de béton pour la dalle. Un soin particulier a été apporté à l'étanchéité de l'ensemble pour éviter les pertes d'énergies. De ce fait, le choix s'est porté sur une ventilation double flux pour assurer un échange d'air et d'humidité réguliers et permanents de l'ensemble de la maison en récupérant l'énergie refoulée par la ventilation. Le volume de la maison est de 800 m<sup>3</sup> environ et l'air sera renouvelé toutes les 3 à 4 heures, soit 240 m<sup>3</sup>/h de besoin d'apport d'air de l'extérieur.

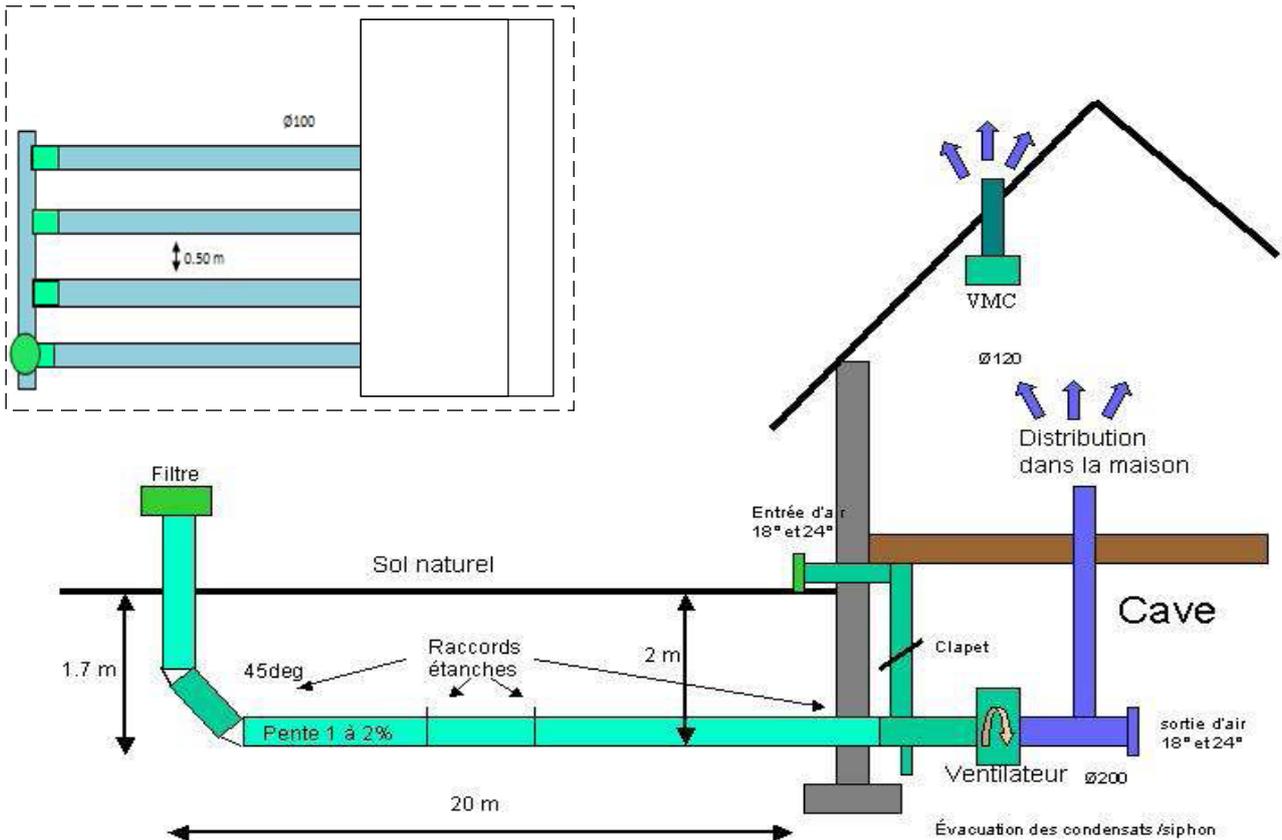


Figure 38 : Disposition du puits canadien

Débit(m <sup>3</sup> /h)	Perte de charge (Pa)	Puissance de ventilateur (Watt)	Heures de fonctionnement (h/an)	Température de l'air en sortie pour une Température de l'air en entrée (32°C)
240	75,80	8,42	4607	17,9
320	93,13	13,80	4648	19,2
400	114,27	21,16	4683	20,3
560	167,38	43,40	4754	22,0
800	272,50	100,93	4930	24,0

Tableau 13 : Résultats des calculs de l'exemple sous le logiciel GAEA pour optimiser l'installation

Le tableau 13 permet de vérifier que pour un tuyau de 20 m de long avec un diamètre de 100 mm et pour un débit de 240 m<sup>3</sup>/h, la perte de charge est de seulement 75,8 Pa. La puissance du ventilateur est d'autant plus élevée que le débit est important, on passe de 8,42 watts à 100 watts avec un débit seulement 3 fois supérieur.

### **Conclusion :**

L'ambiance thermique dans les bâtiments est un facteur important pour le confort des occupants. L'exploitation de l'énergie géothermique à travers l'installation d'un système échangeur air/sol peut être un moyen efficace confié à assurer ce confort, et capable de réduire la consommation énergétique sans impact environnemental.

La conception d'un puits canadien est capitale pour obtenir le niveau de performance souhaité. Dans ce chapitre, nous avons étudié les différents paramètres de conception intervenants dans la performance des puits.

L'étude de ce chapitre nous a permis de tirer les conseils suivants :

- Le choix de régime de ventilation varie selon le mode de fonctionnement et le volume de pièce à ventilé
- Un sol argilo-sableux humide est le plus adéquate pour optimiser le rendement
- Le tuyau sera de préférence lisse à l'intérieur pour diminuer les pertes de charge. Pour l'extérieur, privilégier les tuyaux annelés pour augmenter l'échange thermique entre le sol et le tuyau. Le choix peut être en PVC
- Le choix de la configuration et les dimensions de l'échangeur est un compromis entre l'échange thermique et la consommation électrique.

Une autre manière du choix exacte du système qui est la méthode de dimensionnement illustré dans ce chapitre par (empirique et simulation GAEA), ce qui va nous permettre au dernier chapitre de dimensionner le puits canadien par rapport au cas d'étude en prenant compte des contraintes et des résultats calculés dans le chapitre 2.

## ***Chapitre 4 :***

*Simulation et interprétation des résultats*



## Introduction :

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer notre modèle d'échangeur air/sol. Cette évaluation est présentée sous une validation du modèle réalisée à partir d'une analyse d'influence des différents paramètres (Longueur du puits, diamètre de la conduite, débit d'air et profondeur du puits).

L'utilisation d'un échangeur air/sol comme le puits canadien va permettre de réduire les consommations d'énergie. En été, il apporte un confort par un rafraîchissement naturel. Il a une consommation électrique dérisoire et récupère 10 fois plus d'énergie qu'il n'en consomme. Les économies en kWh sont dépendantes des débits de ventilation. Il est très courant de surestimer les gains de températures en doublant des débits de ventilation.

Pour le plan climat, il vise à réduire les gaz à effet de serre et réduit les factures de chauffage et climatisation.

La simulation se fait à l'aide d'un logiciel appelé GAEA (Graphische Auslegung von Erdwärme Austauschern) qui veut dire : Interprétation graphique des échangeurs géothermiques.

## 1) Dimensionnement de l'échangeur air/sol :

### 1.1. Dimensionnement de la longueur du conduit du puits canadien :

Le calcul est effectué sur une feuille Excel téléchargeable<sup>[46]</sup>. Les données entrées sont effectuées au chapitre 2 et 3 et en suivant la méthode de calcul rédigée en CH3.3 sont entrées dans les cases grises ci-dessous, le résultat est le suivant :

1) La Maison			
RDC	132,59 m <sup>2</sup>	Hauteur	2,85 m
1er étage	103,64 m <sup>2</sup>	Hauteur	2,5 m
Soit un volume de		636,9815000000 m <sup>3</sup>	

2) Renouvellement de l'air			
Renouveler un volume d'air toutes les	<input type="text" value="1"/>	heure(s)	soit 0,177 m <sup>3</sup> /s
Diamètre extérieur de la gaine	<input type="text" value="0,100"/>	m	soit 0,092 m de diamètre intérieur
Épaisseur de la gaine	<input type="text" value="0,004"/>	m	Soit rayon EXT 0,050 m et rayon Int 0,046 m
Section de la gaine	0,0066 m <sup>2</sup>		
Vitesse de l'air dans la gaine	26,617 m/s		

3) Paramètres pris en compte			
Température d'entrée	<input type="text" value="26,5"/>	°c	
Température de sortie	<input type="text" value="21"/>	°c	
Température moyenne du sol	<input type="text" value="18,6"/>	°c	soit 5,5 °c d'écart demandé ou maximum
Conductivité du tuyau (PE)	<input type="text" value="0,28"/>	W/M/K	
Capacité Calorifique Massif de l'air	<input type="text" value="1000"/>	J/Kg/K	
Hydrométrie moyenne	<input type="text" value="70"/>	%	

Constantes		
masse de la vapeur d'eau sous 1013mbar	<input type="text" value="0,59"/>	Kg/m <sup>3</sup>
Masse volumique de l'air sous 1013 mbar	<input type="text" value="1,25"/>	Kg/m <sup>3</sup>
conductivité thermique de l'air	<input type="text" value="0,0262"/>	W/m/K
conductivité thermique de l'eau	<input type="text" value="0,556"/>	W/m/K
Viscosité de l'air	<input type="text" value="0,000018"/>	Kg/m.s
Conductivité de la terre à 10% d'eau	<input type="text" value="1,5"/>	W/m/K
Nombre de Reynolds (Re)	170052,9293865	
Nombre de Prandtl (Pr)	0,155822513585	
Calcul de la conductivité en fonction de l'hydrométrie		
Conductivité de l'air à 70%	0,115516041846 W/m/K	
Calcul des conductivités entre éléments		
Conductivité air/tuyau	209,9431380876 W/m/K	
Conductivité terre/tuyau	2508,063173987 w/m/k	
Calcul de la résistivité total		
Résistivité total	0,065144258482	
Calcul du Flux		
Pouvoir d'échange du Flux dans le tuyau	121,269 w/m <sup>3</sup>	
<b>Longueur théorique du tuyau:</b>	<b>35,25 m</b>	

**Tableau 14** : Les Résultats de calcul théorique pour la longueur du tuyau

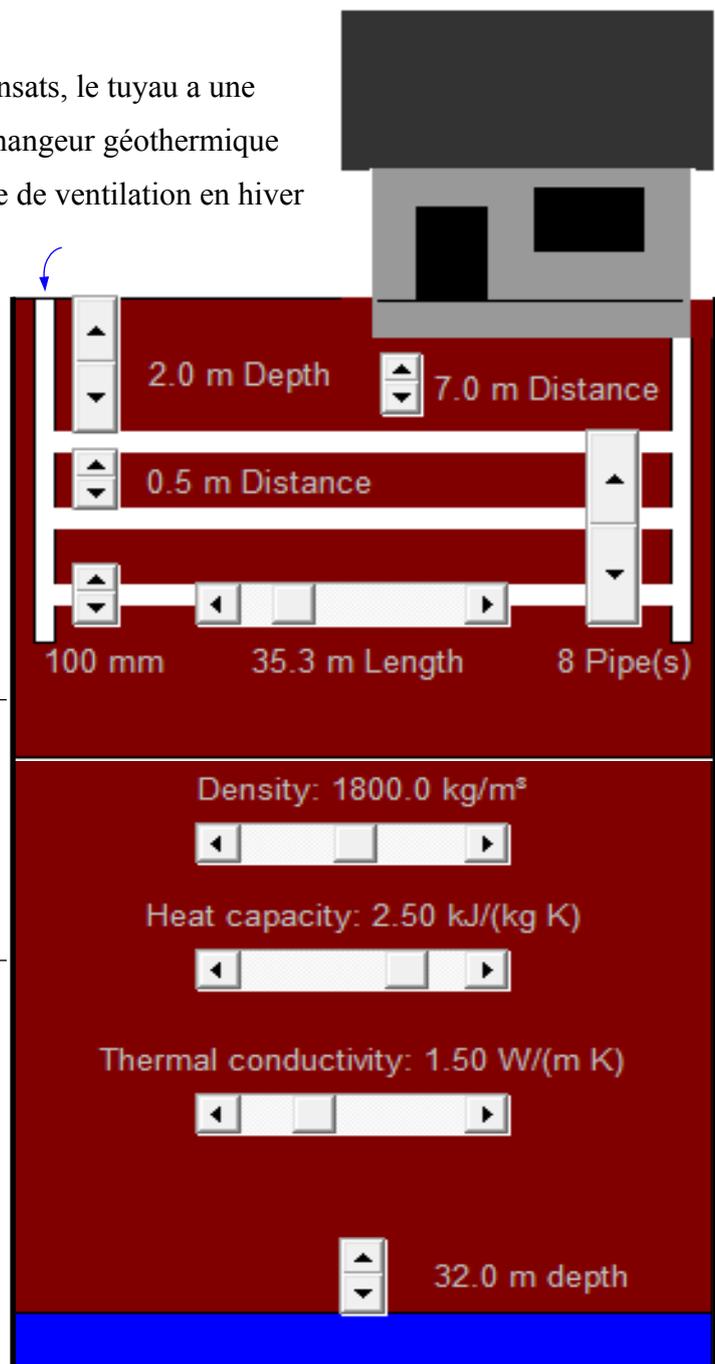
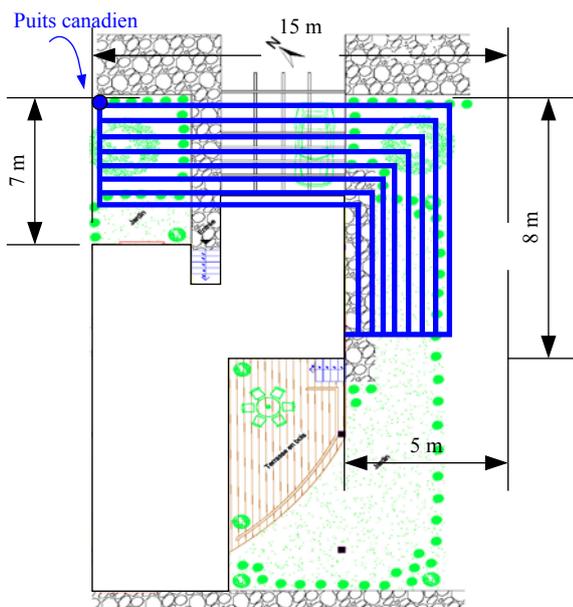
La longueur théorique du tuyau pour un volume de 797 m<sup>3</sup> renouvelé toutes les 1 heures, soit un débit d'air de 797 m<sup>3</sup>/h, d'un diamètre de 100 mm = 35,25 m. Ce résultat va nous permettre de dimensionner par la suite l'échangeur air/sol afin de déterminer sa température de sortie (Température de confort) et sa puissance de ventilation.

### 1.2. Simulation de l'échangeur air/sol avec GAEA :

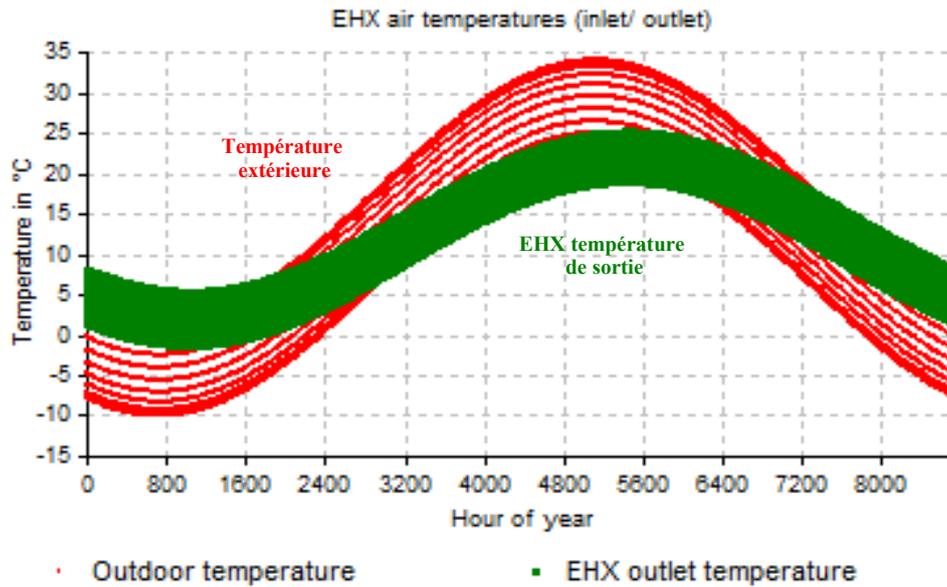
Le système d'échangeur air/sol, permet le chauffage en hiver et la climatisation en été. Le tuyau se prolonge à la longueur de 35,25 m, son diamètre est de 100 mm pour un volume de 797 m<sup>3</sup> et l'air sera renouvelé (On prend de 1 à 5 heures). Il est incorporé dans le sol avec une profondeur comprise de 2 m.

Pour permettre le drainage des condensats, le tuyau a une pente de 3% de l'entrée d'air à la sortie. L'échangeur géothermique air/sol est utilisé pour abaisser la température de ventilation en hiver comme en été.

Plusieurs calculs sont effectués au sein du logiciel GAEA. Les données sont entrées et schématisées en plan et en élévation expliquées ci-dessous :



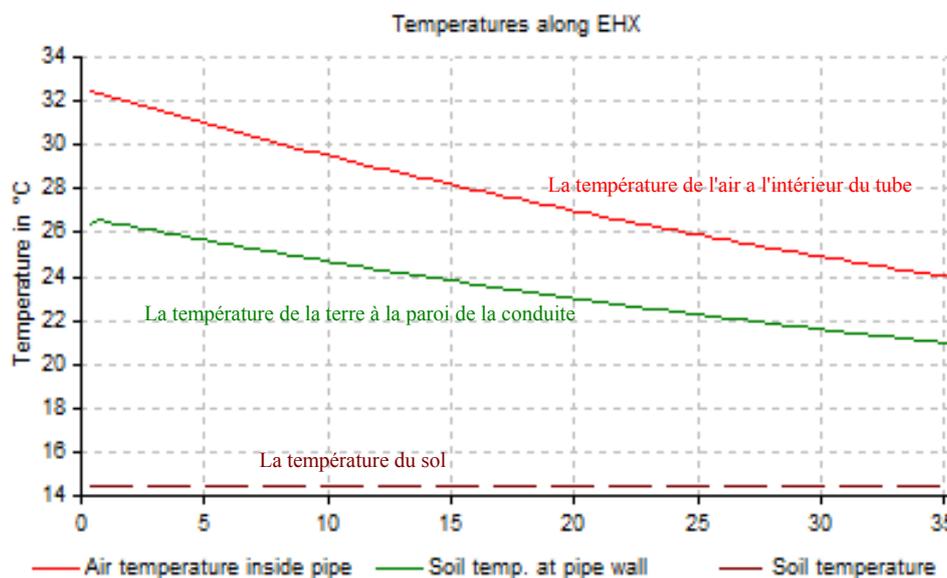
**Figure 39 :** Paramètres de dimensionnement de l'échangeur air/sol sous GAEA



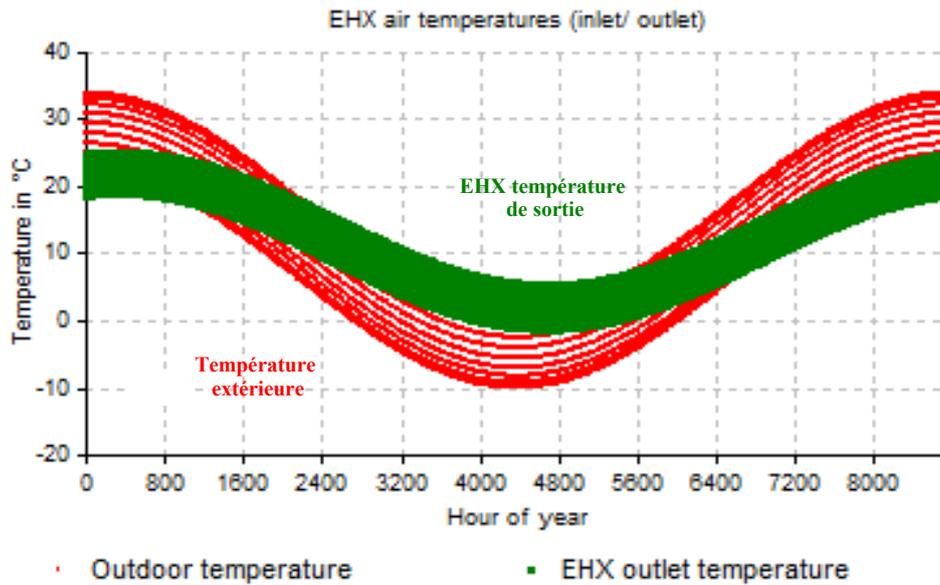
**Figure 40 :** La température ambiante et la température de l'air à la sortie de l'échangeur air/sol du début d'année jusqu'au mois d'Aout (calculé par GAEA)

La figure 40 montre pour un débit d'air de 797 m<sup>3</sup> par heure, la relation entre la température ambiante et la température de sortie de l'échangeur au début du mois de Janvier jusqu'au mois le plus chaud de l'année (Aout). On remarque que, plus il y'a de forte/basse température ambiante, celle qui passe par le puits candien diminue de 9 °C environ. Dans notre cas, pour des fortes chaleur d'été, la température de l'échangeur = 25,5 °C.

La figure 41 donne les températures locales le long du tuyau pour une chaude journée d'été tel que calculé par GAEA. Le programme est également capable de spécifier la somme de l'échange total de chaleur dans le système tout au long de l'année (Figure 42).



**Figure 41 :** La températures tout au long du tuyau de l'échangeur pour une chaude journée d'été (calculée par GAEA)



**Figure 42** : L'échange de chaleur dans l'échangeur tout au long de l'année (calculé par GAEEA)

La simulation sous GAEEA prédit un gain de chaleur en hiver et un effet de refroidissement en été d'environ 5572,5 kWh dans chaque cas.

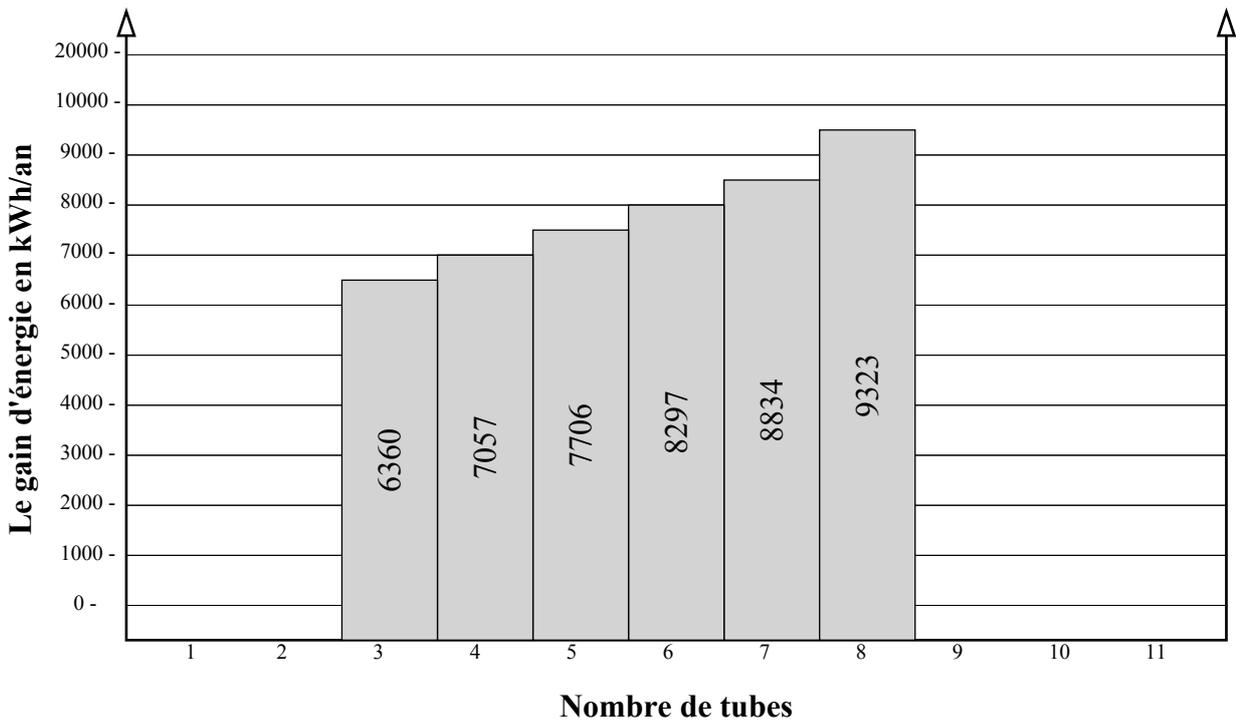
Pour la maison étudiée, les gains d'énergie calculé sont a 10511 kWh/an, ici le ventilateur produit une puissance 79,25 W pour un renouvellement d'air tout les heures. L'économie d'énergie est de 44,49 kWh/m<sup>2</sup>/an.

Le tableau ci-dessous montre les différents débits d'air utilisés ainsi la température de sortie calculée pour la même longueur et nombres de tubes donnés (L = 35,25 m, N° = 8) :

Number of pipes: 8
Pipe length: 35.3 m
Pipe diameter: 100 mm
Costs for pipes: 7.00 € / m
Distance between pipes: 0.5 m
Depth of pipes: 2.0 m
Fan before EHX
Energy gains: 10511 kWh/a
Internal interest rate: 8.2 %

Temps (h)	Débit (m <sup>3</sup> /h)	Perte de charge (Pa)	Puissance de ventilateur (Watt)	Température de l'air en sortie pour une température de l'air en entrée (32,2 °C)	Heures de fonctionnement (h/an)
5	159,4	104,57	9,26	17,9	8760
4	199,25	106,7	11,82	18,5	8760
3	265,67	111,27	16,42	19,4	8760
2	398,5	123,10	27,25	20,9	8760
1	797	178,99	79,25	24	8760

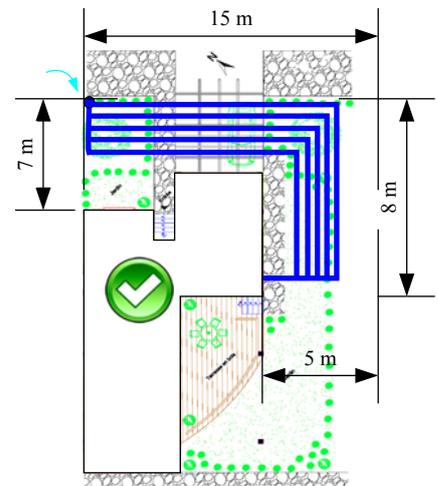
**Tableau 15** : Résultat de calcul du projet sous le logiciel GAEEA



**Figure 43 :** Comparaison des différentes dispositions de tubes du puits canadien (L= 30 m)

Le tableau ci-dessous montre les différentes températures de confort thermique par rapport aux nombres de tubes. Ici la température de confort idéal varie entre 21,3 et 24°C pour des temps de renouvellement d'air.

Du point de vue économique et confort thermique, notre choix porte sur 5 tubes de longueur d'environ 35 m pour un débit d'air de 398,5 m<sup>3</sup>/h avec une puissance seulement de 27,25 W. Les gains d'énergie sont a 32,62 kWh/m<sup>2</sup>/an.

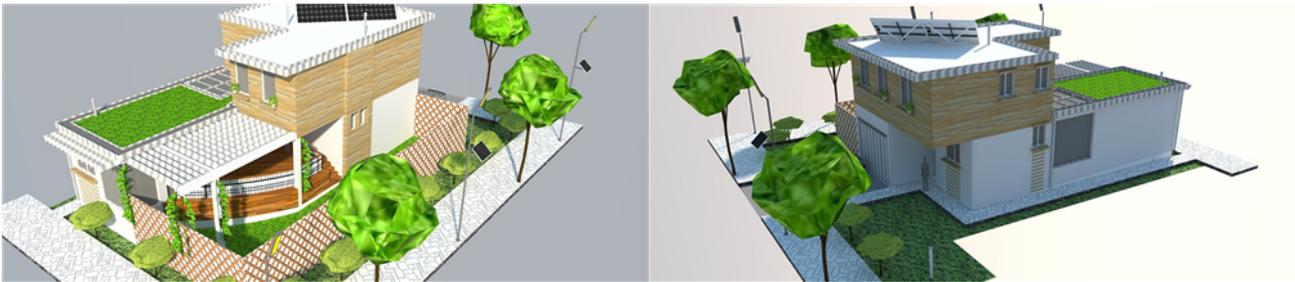


Nombre de tube	Temps (h)	Débit (m <sup>3</sup> /h)	Perte de charge (Pa)	Puissance de ventilateur (Watt)	Température de l'air en sortie pour une température de l'air en entrée (32,2 °C)
8	1	797	178,99	79,25	24
7	2	398,5	123,10	27,25	21,3
6	2	398,5	123,10	27,25	21,7
5	2	398,5	123,10	27,25	22,2
4	2	398,5	123,10	27,25	22,7
3	2	398,5	123,10	27,25	23,5
	3	265,67	111,27	16,42	21,5

**Tableau 16 :** Résultat de calcul du projet avec différents N° de tube sous le logiciel GAEA

## 2) Interprétation des résultats :

Nous allons mettre en terme un complément de propositions techniques toujours en utilisant les énergies renouvelables pour le projet étudié (Maison individuelle bioclimatique) par d'autres types de systèmes appliqués, qui va nous permettre de compléter les besoins en Chauffage et Eau Chaude Sanitaire.



**Figure 44 :** Projet maison individuelle bioclimatique (Auteur)

### 2.1. Le système de chauffage :

Comme nous l'avons vu dans l'étude thermique au chapitre 2, les besoins en chauffage de cette maison sont très faibles = 3721 KWh, soit 15,75 KWh/m<sup>2</sup>. La période de chauffe s'est étendu du 15<sup>ème</sup> mois d'octobre à la fin mars. Ils sont assurés uniquement par un poêle à granulés d'une puissance de 8 kW. Le poêle à granulés est équipé d'un thermostat.



**Figure 45 :** Système chauffage ; le poêle à granulés [29]

### 2.2. L'eau chaude sanitaire :

L'eau chaude sanitaire est produite des capteurs solaires thermiques pour une surface totale de 19,23 m<sup>2</sup>, reliés à un ballon de stockage de 1538,4 litres. Le système est auto vidangeable en cas de gel. Le complément est fourni par une résistance électrique.



**Figure 46 :** Ballon de stockage ECS [29]

### 2.3. La gestion de l'eau :

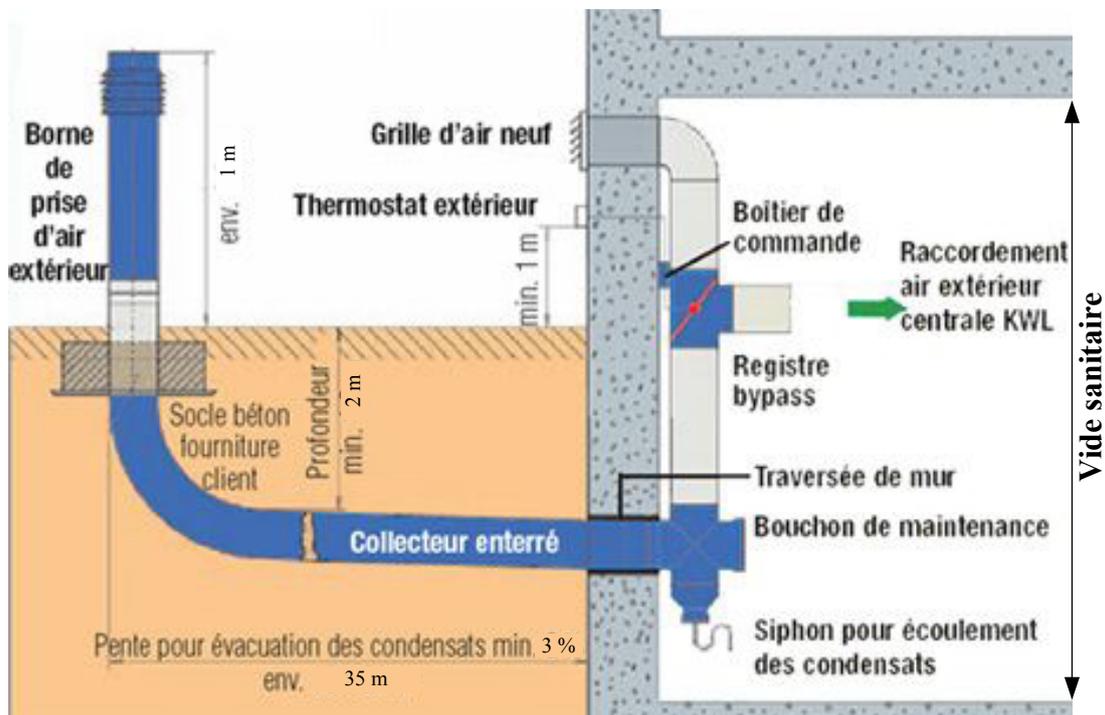
La maison est équipée d'un système de récupération d'eau de pluie sous la terrasse en bois. L'eau est stockée dans des cuves en béton pour un volume total de 25,5 m<sup>3</sup>. Cette eau alimente les toilettes et la machine à laver.

### 2.4. La ventilation :

La ventilation est assurée par une VMC double flux couplée à un puits canadien.

L'échangeur de chaleur de la VMC a un rendement de 65%.

Le collecteur du puits canadien a une longueur de 35,25 m et un diamètre de 100 mm. Il est enterré à une profondeur de 2 m de profondeur. Un by-pass permet, en fonction des besoins et des températures, de choisir l'arrivée d'air en prise directe ou en sortie de puits. Les bouches d'extraction réparties dans les pièces de vie permettent de distribuer la chaleur.



**Figure 47 :** Coupe schématique de fonctionnement du puits canadien du projet [29-source Hélios]



**Figure 48 :** Echangeur VMC [29]



**Figure 49 :** Départ VMC double flux [29]

L'efficacité du puits canadien prend compte de différents paramètres qui sont :

- La longueur du puits doit être comprise entre 30 et 50 mètres. En dessous de 30 mètres, le puits canadien ne permet pas d'obtenir une température de sortie proche de celle du sol car le rendement de l'échange est moyen. En revanche au delà de 50 mètres le rendement n'augmente plus de manière significative.
- Le diamètre de la conduite et le débit d'air sont liés par la vitesse de l'air parcourant le puits. Celle-ci ne doit pas dépasser les 3 mètres par seconde afin de ne pas induire des pertes de charges trop importantes dans le puits. La qualité de l'échange varie peu en fonction du diamètre. Afin d'obtenir un débit significatif, ce dernier doit être compris entre 20 et 25 centimètres par rapport aux nombrex de tubex. Plus le débit est important, plus la longueur du puits devra être importante.
- La température de sortie est directement liée à la température du sol. Son amplitude diminue fortement avec la profondeur. Le puits doit donc être enterré assez profondément de manière à profiter au mieux de l'inertie du sol.
- Le type de sol n'influe pas de manière importante sur la température de sortie dans le cas d'un puits unique à condition que le débit ne soit pas trop élevé. Si par contre plusieurs puits sont placés à proximité il faut les espacer suffisamment pour que le sol puisse se régénérer.

Le niveau des besoins énergétiques (Chauffage/Climatisation) du cas d'étude est à 82,44 kWh/m<sup>2</sup>/an pour une surface de 236,23 m<sup>2</sup>. L'application du système à énergie renouvelable (Le puits canadien) a permis de faire des économies en énergies, ce qui classe la maison bioclimatique au niveau A des performances énergétiques (49,82 kWh/m<sup>2</sup>/an). En effet, l'objectif principal du sujet de recherche était de compléter les besoins énergétiques afin d'atteindre un niveau de confort thermique été comme en hiver et réduire les émissions de gaz à effet de serre, ce qui le cas.

## Conclusion générale :

Plusieurs considérants doivent nous inciter à privilégier de plus en plus les énergies renouvelables pour pouvoir préserver les énergies fossiles utilisées à plusieurs usages. A bien des égards, les énergies renouvelables peuvent être une alternative crédible pour répondre aux besoins d'énergie de la planète.

Construire avec le climat c'est relier du mieux possible notre intérieur avec le milieu extérieur pour y puiser une part plus importante de notre confort et puis économiser de l'énergie. De ce fait, le confort thermique constitue actuellement un enjeu majeur dans le secteur du bâtiment. Son étude a d'abord été abordée par l'approche de l'équilibre thermique. Celle-ci relie la sensation thermique à quatre (4) paramètres physiques et à deux (2) paramètres personnels : d'une part, la température ambiante et rayonnante, l'humidité relative et le mouvement de l'air, et d'autre part, l'activité ainsi que l'habillement de l'occupant. Suite à cette approche, le bilan thermique de la maison a mis en relation les déperditions thermiques ainsi que la puissance en chauffage et en climatisation nécessaire afin de pouvoir compléter les besoins énergétiques pour prévoir le bon confort thermique (Simulation sous PLEIADES+COMFIE).

L'objectif visé à travers ce travail de recherche, est d'analyser les besoins du confort thermique relatif à notre cas d'étude (Habitat individuel bioclimatique), en appliquant les énergies renouvelables. Dans ce cas, le problème qui se pose est celui du confort d'été. Les résultats du présent travail montrent que la consommation annuelle est deux (2) fois plus qu'en hiver. Pour ce la, nous avons proposé un système de rafraîchissement (Il peut être aussi utilisé en hiver) ; Une source d'énergie géothermique. Le dimensionnement se fait par une simulation numérique sous GAEA (Graphische Auslegung von Erdwärme Austauschern) pour la conception du modèle (Echangeur air/sol) convenable aux conditions climatiques de la région de Tipaza, dans la quelle le travail est s'orienté vers l'analyse et la prévision de l'influence des différents paramètres de dimensionnement sur la performance de notre système.

L'intérêt majeur de notre travail réside dans le fait que le système appliqué est capable de diminuer la température des locaux avec une faible consommation en électricité. Egalement, son utilisation justifie non seulement au point de vue confort thermique, environnemental, mais également au point de vue économique.