



## AVERTISSEMENT

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

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

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

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

## LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

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

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

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



UNIVERSITÉ DE LORRAINE  
Faculté des sciences et technologie de Nancy



UNIVERSITE POLYTECHNIQUE  
DE BUCAREST  
Faculté d'énergétique

## Modélisation en régime dynamique d'une maison basse énergie Etude de cas « Maison Politehnica »



Soutenue le mercredi 3 septembre 2014 par :

Thomas MARCHAL

### *Mémoire de Master 2*

Mention : MEPP – Mécanique, Energie, Procédés et Produits

Spécialité : Mécanique et Energie

Parcours : Ingénierie

rédigé sous la direction de

M. Michel FEIDT et M. Horia NECOULA

**Année universitaire 2013-2014**



## **Remerciements**

J'adresse mes remerciements aux personnes qui m'ont aidé dans la réalisation de ce mémoire.

En premier lieu, je remercie M.Feidt, professeur au LEMTA, sans qui ce stage n'aurait été possible.

Je remercie aussi M.Necoula, Directeur de la faculté d'Energétique de Bucarest, pour m'avoir accueilli au sein de son établissement et pour m'avoir consacré son aide et son temps.

Je souhaiterais également remercier M.Ionescu, professeur à l'université polytechnique de Bucarest, pour ses nombreux conseils, son aide et pour m'avoir aidé à m'intégrer plus facilement au sein de la faculté.

Merci à Mirela Mihai, Alexandra Danu et Bogdan Carutasiu, étudiants PhD à l'UPB, pour m'avoir accueilli au sein de leur équipe et pour m'avoir aidé dans mes travaux avec sympathie et gentillesse.

Je remercie également toutes les personnes que j'ai pu côtoyer en Roumanie et qui m'ont aidé à passer un fabuleux stage à Bucarest.

## Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
$T_8$	Température intérieure globale de la maison passive	[°C]
HR	Humidité relative	[%]
$\delta$	Epaisseur de mur	[mm]
$D_e$	Diamètre extérieur de tuyau	[mm]
$r$	Rugosité du mur	[mm]
$\lambda$	Conductivité thermique	[W/m.K]
$\dot{V}_a$	Débit volumique	[m <sup>3</sup> /h]
$t_{sol}$	Température du sol	[°C]
$t_{a,o}$	Température de l'air à l'entrée du tube	[°C]
$t_{a,i}$	Température de l'air à la sortie du tube	[°C]
$\varepsilon$	Efficacité du tube	[%]
$h$	Coefficient de chaleur convectif	[W/(m <sup>2</sup> .K)]
$Nu_{air}$	Nusselt de l'air	[-]
$R_{cd}$	Résistance de convection entre l'air intérieur et le tube	[(m.K)/W]
$k_s$	Coefficient de transfert de chaleur global	[W/(m <sup>2</sup> .K)]
$\Phi$	Flux délivré par le sol	[W]
$S$	Surface d'échange	[m]
$\Delta t_{ln}$	Différence de température logarithmique	[-]
$cp_{air}$	Chaleur spécifique de l'air	[J/kg.K]
$\dot{m}_{air}$	Débit massique de l'air	[kg/s]
$L$	Longueur du tube	[m]
$\varepsilon_R$	Efficacité thermique	[%]
$T_{in}$	Température de l'eau froide à l'entrée du ballon	[°C]
$T_{out}$	Température de l'ECS finale	[°C]
$T_{sensor (0,1)}$	Température au niveau du premier capteur 10% de la hauteur	[°C]
$T_{sensor (0,5)}$	Température au niveau du capteur à 50% de la hauteur	[°C]
$T_{sensor (0,62)}$	Température au niveau du capteur à 62% de la hauteur	[°C]
$Temp_{pan}$	Température de retour du fluide caloporteur du panneau solaire thermique (Tyfocor® LS)	[°C]
$t_1$	Température extérieure	[°C]
$t_2$	Température en sortie de puits canadien	[°C]
$t_4$	Température en sortie direct de MVHR (sans perte par tuyau)	[°C]
$t_5$	Température en sortie de MVHR (entrée maison passive)	[°C]
$t_6$	Température entrant dans le MVHR (sortie maison passive)	[°C]

# Sommaire

CHAPITRE 1 – UNIVERSITE POLYTECHNIQUE DE BUCAREST .....	6
I.    Structure de l'UPB.....	6
II.   Les campus .....	6
CHAPITRE 2 – ETAT DE L'ART SUR LE DEVELOPPEMENT DES MAISONS PASSIVES .....	7
I.    Etat de l'art dans le monde.....	7
II.   Etat de l'art en Europe .....	10
CHAPITRE 3 – ETUDE DE CAS : LA MAISON PASSIVE DE L'UPB .....	15
I.    Equipements installés .....	15
II.   Puits canadien .....	16
III.  Ventilation .....	19
IV.  Choix de la longueur de tube .....	20
V.    Radiateur thermique.....	22
VI.  Panneau solaire thermique.....	24
VII.  Panneau solaire photovoltaïque.....	25
CHAPITRE 4 – MODELISATION A PARTIR DE TRNSYS .....	27
I.    L'environnement de TRNSYS.....	27
II.   Modélisation des panneaux photovoltaïques.....	29
III.  Modélisation du chauffe-eau solaire .....	32
IV.  Modélisation du puits canadien avec récupérateur de chaleur .....	37
CHAPITRE 5 – MODELISATION A PARTIR DE GOOGLE SKETCHUP (TRNSYS3D) .....	41
I.    Initiation à Google SketchUp.....	41
II.   Modélisation de la géométrie de la maison passive .....	42
III.  Utilisation de TRNBuild pour l'isolation.....	44
IV.  Simulation thermique de la maison passive .....	46
CHAPITRE 6 – COMPARAISON AVEC LES DONNEES EXPERIMENTALES.....	48
I.    Analyse et comparaison des données expérimentales de l'habitation.....	48
II.   puits canadien et MVHR.....	52

## Introduction

Le but de ce stage est de modéliser l'une des deux maisons passives jumelles de l'Université Polytechnique de Bucarest, la maison Est. Les ressources en énergie fossile n'étant pas inépuisables, il faut y trouver une alternative. C'est pourquoi de nos jours, les énergies renouvelables commencent à prendre de l'ampleur et se révèlent être actuellement la solution. Le domaine du bâtiment étant l'un des secteurs d'activités les plus énergivores, pour le cas de la France, il représente un tiers de la consommation d'énergie totale.

De nombreuses alternatives ont été trouvées pour palier à ce problème. La maison passive de l'UPB en est un exemple, en couplant une grande variété d'éléments faisant participer des énergies renouvelables. Elle dispose d'équipements tels que des panneaux solaires thermiques et photovoltaïques, une isolation plus importante et plus étanche qu'une maison "classique", un puits canadien couplé à un système de récupération de chaleur.

Pour modéliser ce bâtiment, nous avons à disposition différents logiciels spécialisés dans le traitement d'éléments en trois dimensions et dans la simulation thermique, tels que Google SketchUp et TRNSYS. L'intérêt principal est de pouvoir comparer les valeurs récupérées par simulation avec celles fournies par les capteurs installés dans le bâtiment. Avec un modèle de maison passive fonctionnel, il est alors possible de modifier différents paramètres ou de l'implanter dans d'autres régions du monde afin de pouvoir observer les variations de performance en fonction de l'installation, des conditions géographiques et climatiques.

Dans un premier temps, nous allons brièvement présenter le cadre dans lequel l'étude a été réalisée, à savoir la faculté d'énergétique de l'université polytechnique de Bucarest. Dans une seconde partie, il sera question de présenter l'état actuel des énergies renouvelables dans le monde et plus précisément en France et en Roumanie. Dans une troisième partie nous montrerons en détail les systèmes installés dans la maison passive de l'UPB. La quatrième partie sera consacrée à la modélisation des systèmes sous TRNSYS. Dans la cinquième partie, nous établirons la simulation dynamique en 3 Dimensions du bâtiment d'étude. Dans le sixième et dernier chapitre, il s'agira de comparer les données obtenues par simulation avec celles récupérées expérimentalement auprès des capteurs installés intelligemment à différents points de l'habitation.

# Chapitre 1 – Université polytechnique de Bucarest

Fondée en 1818 par Gheorghe Lazăr, l'université polytechnique de Bucarest est la plus prestigieuse et la plus ancienne université technique de Roumanie.



Figure 1 : Logo UPB

## I. Structure de l'UPB

L'université polytechnique de Bucarest est composée de 15 facultés dans lesquelles les formations proposées sont articulées autour du système LMD (licence, master, doctorat). Depuis 1990, une ouverture vers l'international est assurée, notamment dans les départements Electricité et Mécanique où les enseignements peuvent être assurés en anglais, en allemand ou en français.

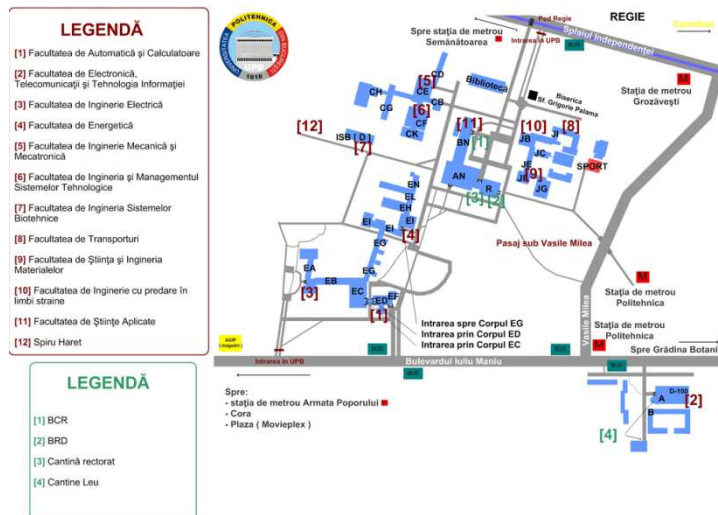


Figure 2 : Plan du campus universitaire politehnica

## II. Les campus

L'université polytechnique de Bucarest dispose de 29 résidences étudiantes avec différents niveaux de confort. Celles-ci sont réparties en deux campus, proches de l'université et peuvent au total accueillir plus de 10 000 étudiants.

Le campus Regie est situé à : Splaiul Independentei, nr.290, Sector 6, Bucuresti, et le campus Leu est situé à : Bulevardul Iuliu Maniu, nr.1-3, Sector 6, Bucuresti. Il y a 27 résidences étudiantes et une cantine à la Regie, le campus Leu quant à lui comporte 2 résidences étudiantes et 2 cantines.



## Chapitre 2 – Etat de l’art sur le développement des énergies renouvelables

L'énergie est de nos jours l'un des principaux centres d'attention de l'homme, étant donné la diminution significative des ressources fossiles, notre regard doit se tourner vers d'autres sources d'énergies, les énergies renouvelables. Celles-ci étant non polluantes et disponibles en énorme quantité, on se doit de les utiliser au maximum. Cependant, toutes ne sont pas disponibles partout. En fonction de la zone géographique où l'on se situe sur terre, certaines seront mieux appropriées que d'autres.

### I. *Etat de l'art dans le monde*

#### 1. La production d'électricité dans le monde

L'énergie renouvelable la plus utilisée dans le monde est l'énergie hydraulique, voir figure 3. Avec 16,2% de la production électrique mondiale, elle constitue la troisième source de production derrière le charbon (41%) et le gaz (21%). Celle-ci produit annuellement 3400 TWh<sup>1</sup> d'électricité et représente 20% des capacités électriques mondiales avec 1007 millions de kW. Le premier producteur d'hydroélectricité est la Chine, avec 21% des parts de production, ensuite vient le Brésil (11,5%), le Canada (10,2%) et les Etats-Unis (8,2%).

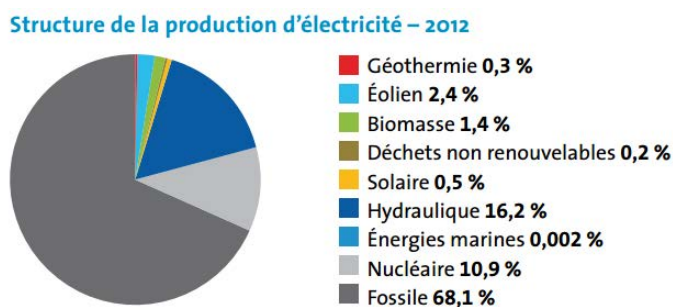


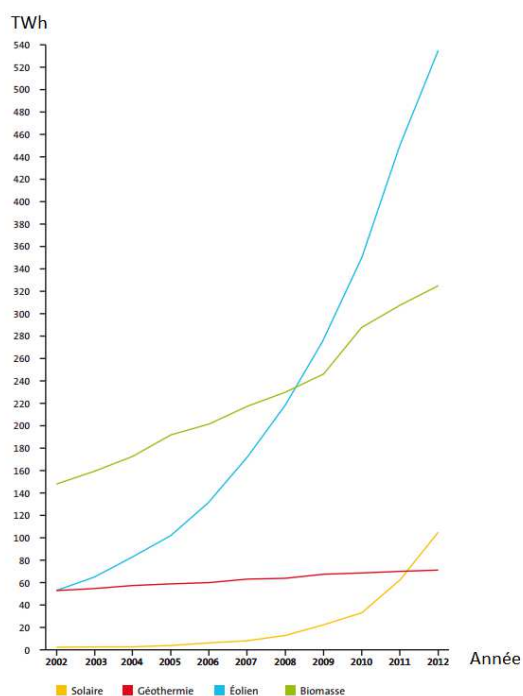
Figure 3: Production mondiale d'électricité

Ces sources d'énergies renouvelables représentent plus de 20% de la production totale d'électricité. Cependant, l'énergie hydraulique étant presque totalement maîtrisée, il faut à présent se concentrer sur les autres SER<sup>2</sup>, à savoir la géothermie, l'éolien, la biomasse et le solaire. Une étude établie par la Fondation de l'énergie dans le monde [1] montre, en figure 4, l'évolution de la production d'électricité d'origine renouvelable hors hydraulique depuis 2002.

---

<sup>1</sup> TéraWatt heure = 10<sup>12</sup> Wh

<sup>2</sup> SER = Source d'Energie Renouvelable



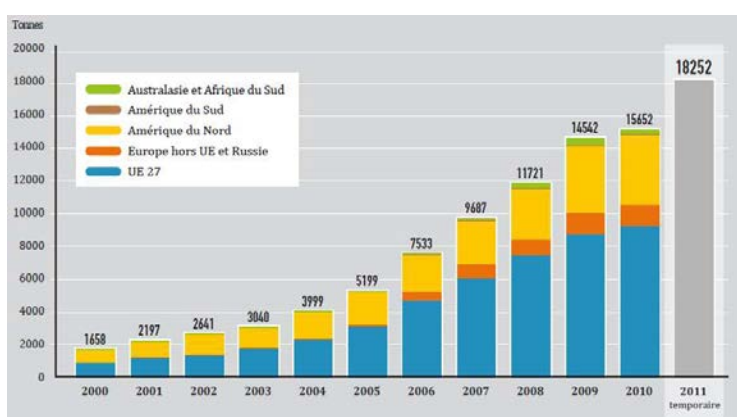
Comme le montre la figure 4, les Energies renouvelables sont de plus en plus sollicitées depuis le début du XXIème siècle. On remarque la forte hausse de l'énergie éolienne qui passe d'une production de 60 à 540 TWh en 10 ans. De plus, l'augmentation la plus importante est celle de l'énergie solaire, d'une production quasi nul en 2002, celle-ci dépasse à présent celle de la géothermie pour atteindre la barre des 100 TWh produit en 2012. Chacune de ces courbes démontre un réel désir d'implantation de ces nouvelles sources d'énergie dans notre mode de vie.

**Figure 4: Production d'électricité mondiale d'origine renouvelable, hors hydraulique**

## 2. Les sources d'énergies renouvelables dans le monde

### a. Biomasse

La biomasse sert essentiellement au chauffage au bois, à la production de biodiesel et d'éthanol. Le leader mondial dans ce secteur en 2011 était les Etats-Unis. Actuellement, près de 35% de la biomasse produite est utilisée pour les procédés énergétiques modernes.



La demande énergétique mondiale de cette ressource est de 53 EJ<sup>3</sup>. En 2011, la production mondiale d'agglomérés de bois représentait une quantité de 18252 tonnes.

**Figure 5 : Production mondiale des agglomérés de bois**

<sup>3</sup> Exajoule = 10<sup>18</sup> Joules

## b. Hydroélectricité

Le leader mondial en 2011 dans ce secteur était la Chine avec près de 220GW<sup>4</sup>, soit 22% de la capacité totale mondiale, s'élevant à près de 1TW. Les 4 autres pays développés dans ce secteur sont le Brésil (8%) les Etats- Unis (8%), le Canada (8%) et la Russie (5%).

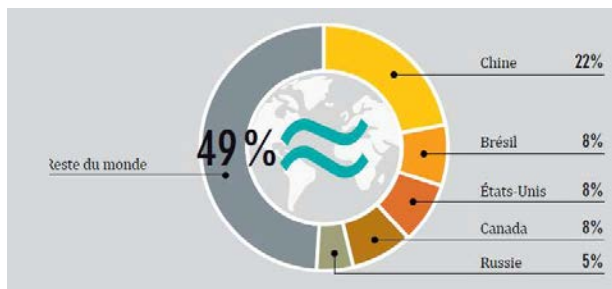


Figure 6 : Capacité hydraulique mondiale totale en 2011

## c. Energie solaire

Le leader mondial en 2010 dans le secteur du solaire à eau chaude était la Chine et celui du photovoltaïque solaire était l'Allemagne.

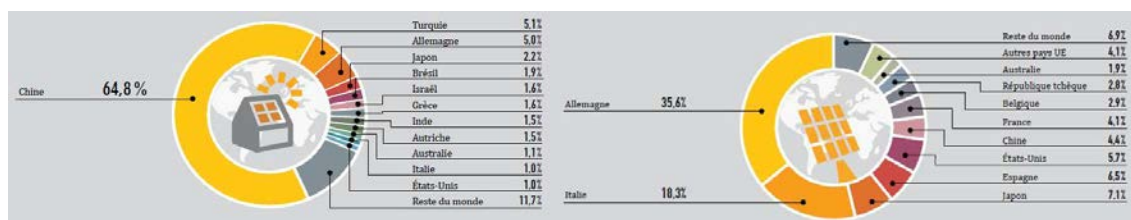


Figure 7 : Capacité mondiale totale du chauffage solaire et du photovoltaïque

On compte mondialement près de 200 millions de foyers utilisant des capteurs solaires à eau chaude. 64,8% de cette capacité est détenue par la Chine en 2010. La capacité du photovoltaïque est détenue à 35,6% par l'Allemagne, suivie à 18,3% par l'Italie. Cette capacité était de 0,6 GW en 1995 et a augmenté jusqu'à 70 GW en 2011.

## d. Energie éolienne

Le leader mondial en 2011 dans ce secteur était la Chine avec une capacité atteignant près de 65 GW sur les 238 GW produits mondialement. De plus, la Chine possède 4 des 10 plus grands fabricants d'éoliennes en 2011. Le numéro 1 mondial étant Vestas, une entreprise Danoise.

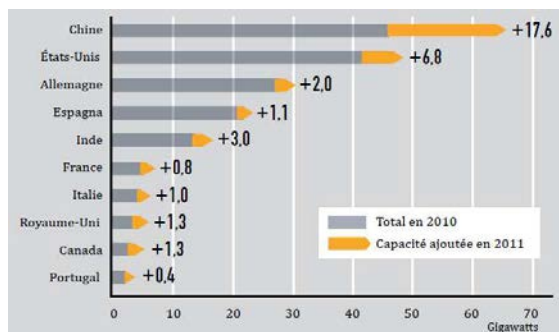


Figure 8 : Capacité de l'énergie éolienne en 2011

<sup>4</sup> GigaWatt = 10<sup>9</sup> Watt

## II. *Etat de l'art en Europe*

Pour présenter le développement des énergies renouvelables en Europe, nous avons choisi 2 pays distincts, la France et la Roumanie. On présentera les différentes énergies implantées et leurs importances au niveau régional.

### 1. Quelques chiffres en Europe

Depuis 2012, l'Union Européenne a réussi à passer sous la barre des 50% d'électricité produite d'origine fossile (48,4%). Ce résultat est très encourageant en comparaison d'autres grandes zones industrialisées telles que l'Amérique du Nord (62,5%) ou l'Asie de l'Est et du Sud Est (79,7%) [2].

Table 1 : Production d'énergie renouvelable par pays et par source

	Production primaire (en milliers de tep)		Part de la production totale, 2010 (en %)				
	2000	2010	Énergie solaire	Biomasse et déchets	Énergie géo-thermique	Énergie hydraulique	Énergie éolienne
UE-27	96 650	166 647	2,2	67,6	3,5	18,9	7,7
Zone euro	65 006	118 679	2,9	64,3	4,8	19,0	9,0
Belgique	534	1 989	3,0	89,8	0,2	1,4	5,6
Bulgarie	780	1 475	0,8	63,6	2,2	29,5	4,0
Rép. tchèque	1 339	2 900	2,1	88,6	0,0	8,3	1,0
Danemark	1 766	3 123	0,5	77,6	0,3	0,1	21,5
Allemagne	9 094	32 746	4,4	78,7	1,6	5,4	9,9
Estonie	512	988	0,0	97,3	0,0	0,2	2,4
Irlande	235	620	1,0	51,8	0,0	8,4	39,0
Grèce	1 403	1 985	9,9	44,7	1,4	32,3	11,7
Espagne	6 928	14 657	7,0	42,2	0,1	24,8	25,9
France	15 874	20 793	0,5	69,1	0,4	25,6	4,1
Italie	9 598	16 328	1,8	37,3	29,2	26,9	4,8
Chypre	44	77	79,2	15,6	1,3	0,0	3,9
Lettonie	1 393	2 101	0,0	85,4	0,0	14,4	0,2
Lituanie	682	1 185	0,0	94,0	0,4	3,9	1,6
Luxembourg	39	92	3,3	81,5	0,0	9,8	5,4
Hongrie	830	1 922	0,3	91,4	5,2	0,8	2,4
Malte	0	0	.	.	.	0,0	0,0
Pays-Bas	1 347	2 896	1,0	86,6	0,3	0,3	11,8
Autriche	6 608	8 600	2,0	57,1	0,4	38,4	2,1
Pologne	3 808	6 849	0,0	94,0	0,2	3,7	2,1
Portugal	3 759	5 438	1,4	55,1	3,5	25,5	14,5
Roumanie	4 040	5 677	0,0	69,6	0,4	29,6	0,5
Slovénie	788	1 041	0,6	59,5	2,7	37,3	0,0
Slovaquie	496	1 398	0,0	67,0	0,6	32,3	0,1
Finlande	7 748	9 030	0,0	87,4	0,0	12,3	0,3
Suède	14 741	17 408	0,1	65,4	0,0	32,8	1,7
Royaume-Uni	2 264	5 327	1,7	76,0	0,0	5,8	16,4
Norvège	13 481	11 554	0,0	11,9	0,0	87,5	0,7
Suisse	4 437	4 968	1,0	31,3	5,2	62,4	0,1
Croatie	879	1 232	0,4	39,9	0,6	58,1	1,0
ARY de Macédoine	322	422	0,0	47,6	2,8	49,5	0,0
Turquie	10 102	11 627	3,7	38,9	16,9	38,3	2,2

Source: Eurostat (codes des données en ligne: ten00081 et ten00082)

Comme le montre la table 1, nous disposons du classement des pays de l'UE, selon leur production en énergie renouvelable. Ce classement est réalisé en dépit de la consommation totale d'énergie produite par pays [3]. Nous pouvons voir qu'en 2010, l'Allemagne était le premier producteur d'ER<sup>5</sup> avec une production totale de 32 746 tep<sup>6</sup>. Le second est la France, ayant produit 20 793 tep. La Roumanie vient en 11ème position avec une production de 5 677 tep. Cependant, ces chiffres ne sont pas représentatifs de l'importance des ER pour le pays. En effet, pour la France, cette production ne représente que 16% de sa production totale d'énergie, source fossile incluse. De la même manière pour la Roumanie, sa production plus faible n'est pas indicative de son développement des énergies renouvelables, car cette quantité représente pour le pays 19% de la production totale d'énergie pour l'année 2010.

Grâce à ce tableau, nous pouvons voir que de nombreux progrès peuvent être réalisés au niveau des secteurs solaires, géothermiques et éoliens. Seuls certains pays sortent du lot comme Chypre qui produit 79,2% de ses ER à partir des ressources solaires. L'Italie produit 29,2% à partir de la géothermie et l'Irlande 39% grâce à la source éolienne.

## **2. En France**

De nos jours, la moitié de l'énergie primaire consommée par la France pour produire de l'électricité est importée, principalement le charbon, le pétrole et le gaz. Le problème étant que ces ressources ne sont pas présentes en quantité illimitée, celles-ci tendent à voir leur prix augmenter. La solution à ce problème est l'utilisation des énergies renouvelables. Elles sont disponibles en quantités abondantes et directement accessibles sur le sol français : le soleil, le vent, l'eau, la biomasse, le sol, ... et assurent un approvisionnement sûr et maîtrisé à long terme. La France est le 2ème plus grand producteur européen d'énergies renouvelables, grâce aux énergies hydroélectrique et éoliennes. Les énergies renouvelables connaissent ainsi une croissance importante, notamment l'hydraulique (+18,7%) faisant passer la part des énergies renouvelables à près d'un cinquième (18,6%) de la production totale française, voir figure 9. La consommation totale d'électricité en 2013 est de 495 térawatt-heure.

---

<sup>5</sup> ER = Energie Renouvelable

<sup>6</sup> tep = tonne équivalent pétrole

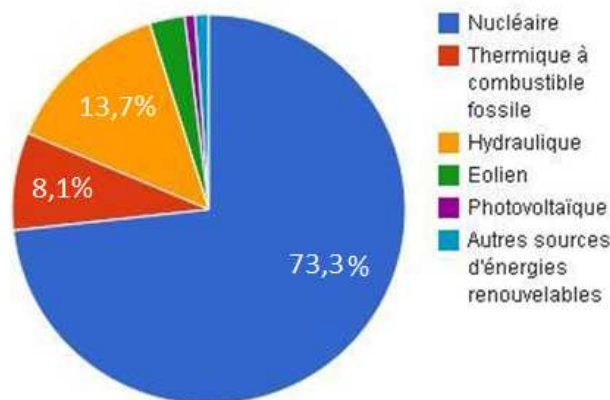


Figure 9 : Les différentes énergies dans la production électrique française

Malgré tous ces efforts pour augmenter l'utilisation des énergies renouvelables, l'énergie nucléaire reste la source d'énergie n°1 en France. Il semblerait que l'énergie solaire soit l'énergie renouvelable la plus appréciée des français. Selon un sondage de l'ADEME, 78% des Français associeraient spontanément les énergies renouvelables à l'énergie solaire, contre 63% d'entre eux qui citeraient l'énergie éolienne. Cependant nombreux sont ceux à refuser l'énergie éolienne (mais cela est en train de changer) et le potentiel hydraulique est déjà largement utilisé.

A l'heure actuelle, en France, la biomasse (c'est-à-dire l'ensemble des sources énergétiques provenant de la matière organique) et l'énergie hydraulique fournissent la quasi-totalité de l'énergie d'origine renouvelable. La France possède le deuxième potentiel éolien d'Europe et le cinquième en matière d'énergie solaire. Ces deux secteurs se développent d'ailleurs de plus en plus depuis 2004-2005. La ressource française en bois est considérable (évaluée à 40 millions de m<sup>3</sup> par an) et le potentiel géothermique est élevé (voir figure 10). Si nous nous donnons les moyens financiers et administratifs de développer les énergies renouvelables, elles peuvent produire 80% de notre énergie d'ici 2050.

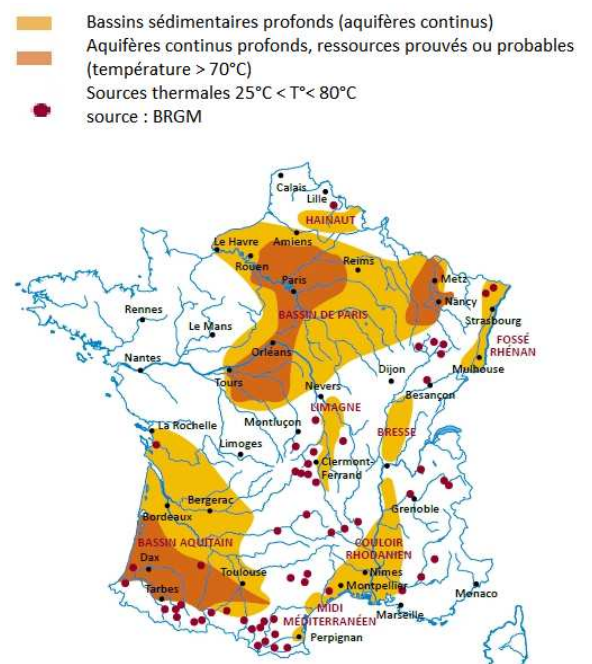
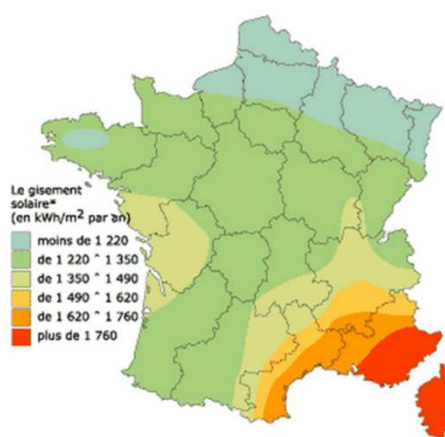


Figure 10 : Gisement géothermique français



Une différence est observable au niveau du rayonnement solaire entre le nord et le



sud de la France (voir figure 11). Pour un générateur photovoltaïque ayant un plan d'inclinaison égal à la latitude du bâtiment, et orienté vers le sud, celui-ci produit en moyenne 30 à 40% d'électricité en plus dans le sud que dans le nord. L'énergie apportée quotidiennement par rayonnement solaire sera d'environ 3kWh/m²/jrs dans le nord et 5kWh/m²/jrs dans le sud.

Figure 11 : Gisement solaire en France

En terme de puissance, le parc photovoltaïque raccordé au réseau de distribution métropolitain était de 3,339GW à la fin du deuxième trimestre 2013.

### 3. En Roumanie

La Roumanie a produit 12MW d'énergie en 2009 grâce à ses sources d'énergie renouvelables [5]. A partir de 2010, sa capacité de production a augmenté pour atteindre 2880MW en fin d'année 2013. Ce développement pris place grâce à de forts investissements réalisés principalement dans le secteur de l'éolien. Cet investissement de près de 4 millions d'euros en 2012 a permis à la Roumanie de se placer au 13eme rang sur une liste de 40 nations fortement attractives dans le secteur des énergies renouvelables.

Table 2 : Attractivité des sources d'énergies renouvelables en Roumanie (RES)

Classement global de la Roumanie	Source d'énergie Renouvelable
10	Attractivité du secteur de l'énergie éolienne
13	Attractivité de l'ensemble des secteurs d'énergies renouvelables
13	Attractivité de l'investissement des énergies renouvelables
24	Attractivité du secteur de l'énergie solaire

La Roumanie possède un potentiel naturel au développement des énergies renouvelables, grâce à sa position géographique et à ses conditions météorologiques :

- Possède de grandes surfaces de champs pour l'implantation de centrales éoliennes et solaires photovoltaïques.
- Le plus grand potentiel éolien du sud-est de l'Europe (14000MW)  
(MinisterulIndustriei, 2007)
- Un potentiel de développement éolien offshore inexploité sur la Mer Noire
- Un potentiel en énergie solaire important avec 210 jours d'ensoleillement par an
- La biomasse est la ressource d'énergie renouvelable la plus abondante.

Table 3 : Distribution régionale du potentiel de RES en Roumanie

Région de Roumanie	Potentiel de RES à développer
Delta du Danube	Solaire
Dobrogea	Solaire/ Eolien
Moldavie	Micro hydraulique/ Eolien/ Biomasse
Montagne des Carpates	Biomasse/ Micro hydraulique
Transylvanie	Micro hydraulique
Plaine de l'ouest	Géothermie
Basses Carpates	Biomasse/ Micro hydraulique
Plaine du sud	Biomasse/ Géothermie/ Solaire

Source: authors, 2013, IWE, based on Romanian documents

Une estimation de l' "European Renewable Electricity Data" voudrait que d'ici 2050, la Roumanie atteigne un potentiel en énergie renouvelable lui permettant de couvrir 73% de sa demande totale en énergie.

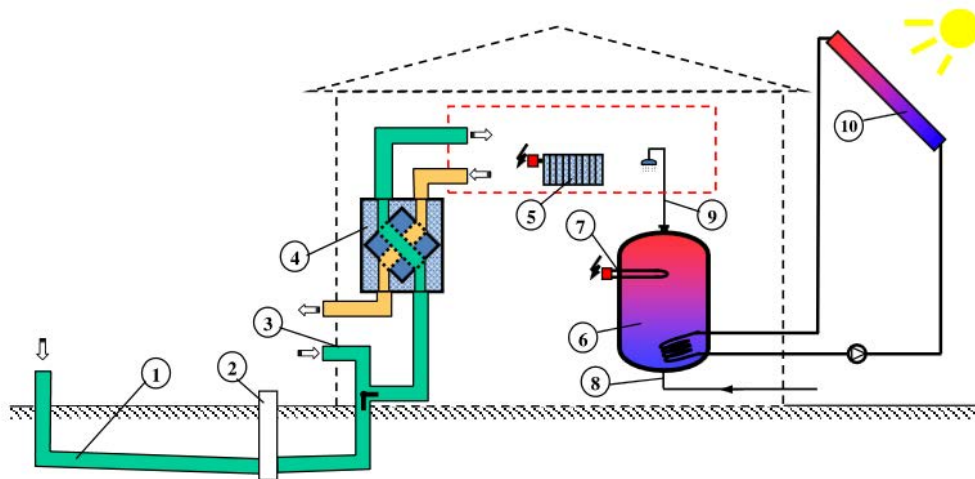


## Chapitre 3 – Etude de cas : la maison passive de l'UPB

### I. Equipements installés

Le système HVAC (chauffage, ventilation et air conditionné) installé dans cette maison passive [6] est constitué de : un échangeur de chaleur sol/ air, une unité de récupération de chaleur, un système de panneau solaire, un réservoir d'eau chaude et un radiateur électrique. Le réservoir connecté au panneau solaire approvisionne l'eau chaude sanitaire. Le chauffage à résistance assure la température désirée en eau chaude durant les périodes de faible ensoleillement et pendant l'hiver.

Figure 12 : Schéma du système HVAC de la maison passive :



- |   |                                      |
|---|--------------------------------------|
| 1) Echangeur de chaleur sol/air (EAHX)  | 6) Réservoir d'eau chaude            |
| 2) Evacuation des condensats            | 7) Chauffage à résistance électrique |
| 3) EAHX by-pass                         | 8) Approvisionnement en eau froide   |
| 4) VMC à récupération de chaleur (MVHR) | 9) Consommation d'ECS                |
| 5) Panneau radiant électrique           | 10) Panneau solaire thermique        |

Dans un bâtiment passif, la charge thermique est significativement réduite en raison de la très bonne isolation de l'enveloppe. Un niveau d'isolation trop élevé minimise le transfert de chaleur à travers les murs et rend la construction très serrée. La ventilation naturelle n'est pas une option pour fournir un air frais et supprimer l'air vicié. L'enveloppe étanche ne permet pas l'infiltration de l'air extérieur. D'autre part, une simple ouverture des fenêtres ne permet pas d'assurer le contrôle du débit d'air. Ainsi, un système de VMC est plus approprié pour une maison passive. Un système de VMC à double flux et à récupération de chaleur a été installé dans ce bâtiment. Ce type de ventilation mécanique ne fournit pas seulement un nouvel air, il récupère également la chaleur de l'air sortant.

## II. Puits canadien

Le sol est un très bon accumulateur thermique, il absorbe la chaleur du soleil à sa surface et admet l'énergie de la pluie par convection. Cette énergie peut être puisée par un circuit de fluide caloporteur à l'aide d'une pompe à chaleur. Outre la chaleur sensible, on récupère aussi du sol de la chaleur latente, par condensation de l'humidité. La vapeur d'eau se condense sur les tubes et sature le sol d'eau. Ainsi, la conduction thermique du sol augmente et cela peut améliorer l'efficacité de l'installation l'année suivant celle de mise en service. Les sols glaiseux sont plus appropriés que les sols caillouteux ou sableux car ils stockent mieux l'eau. Cependant, il faut éviter que la terre ne gèle, car cela pourrait endommager des plantes à racines profondes et provoquer une régénération insuffisante de la terre, ce qui entraînerait une diminution du coefficient de performance de la pompe à chaleur. Il faut donc disposer d'un terrain suffisamment grand.

Un échangeur de chaleur sol/air (EAHX) se compose d'une conduite enterrée dans le sol qui permet le transfert de la chaleur stockée dans le sol vers l'air frais ventilé durant l'hiver. L'EAHX permet aussi le refroidissement de l'air ventilé durant l'été et est efficace en hiver combiné avec un système de ventilation mécanique (VMC), pour un climat continental tempéré caractérisé par une grande différence entre la température du sol et celle de l'air extérieure.

L'équipe de l'Université polytechnique de Bucarest a référencé les paramètres d'entrée utilisés pour l'étude théorique (voir table 4) [5], Un tuyau de polyéthylène haute densité a été choisi en tant que tube thermique, celui-ci a été enterré en dessous du point de congélation du sol. Dans les conditions de l'étude, cette profondeur est de 2m.

Table 4 - Input parameters of the theoretical model

Dimension / property	Symbol	Value	Unit
Pipe characteristics			
Wall tightness	$\delta$	7,8	mm
Pipe diameter (exterior)	$D_e$	200	mm
Wall roughness	$r$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	mm
Thermal conductivity	$\lambda$	0,28	W/(m·K)
Volumetric flow rate	$V_a$	165	m <sup>3</sup> /h
Soil temperature	$t_s$	5	°C
Tube inlet air temperature	$t_{a,i}$	-15	°C

La première hypothèse de calcul a été de considérer la température du sol,  $t_s$ , comme constante durant la période de chauffe. Sa valeur dépend de la profondeur et a été

obtenue par un diagramme spécifique pour chaque zone climatique. Le débit volumique de l'air a été obtenu suivant les besoins en ventilation de la maison, correspondants à 0,5 renouvellements d'air/ heures. La température de l'air en entrée de tube, la même que la température extérieure, est fixée à la température minimum de calcul de -15°C, typique pour le mois avec la température extérieure la plus basse. La valeur de la température de l'air à la sortie du tube,  $t_{a,o}$ , est trouvée en utilisant l'expression de l'efficacité thermique du tube:

$$\varepsilon = \frac{t_{a,o} - t_{a,i}}{t_s - t_{a,i}} \quad (1)$$

Il s'agit d'un paramètre d'entrée très important, il prend en considération les températures de l'air et celle du sol. La première étape de l'algorithme est de régler sa valeur à 0,85 (valeur moyenne recommandée pour la MVHR utilisée dans les maisons passives). Pour évaluer le taux d'échange de chaleur, nous devons premièrement déterminer les propriétés thermo-physiques de l'air dans les tubes, pour une valeur de température moyenne. Le coefficient de transfert de chaleur convectif ( $h$ ) est calculé comme une fonction de la conductivité thermique de l'air ( $\lambda_a$ ), et du diamètre intérieur du tube ( $D_i$ ), selon l'expression suivante :

$$h = \frac{Nu_{air} \cdot \lambda_a}{D_i} \quad [W/(m^2.K)] \quad (2)$$

Où le nombre de Nusselt de l'air ( $Nu_{air}$ ) est calculé comme une fonction des nombres de Reynolds et de Prandtl :

$$Nu_{air} = 0,0214 (Re_a^{0,8} - 100) \cdot Pr_a^{0,4} \quad (3)$$

La vitesse de l'air dans des applications typiques est habituellement comprise entre 1 et 3m/s. Dans ce cas, elle est d'environ 1,72m/s et assure un écoulement turbulent. L'étape suivante, qui doit être suivie pour déterminer le transfert de chaleur entre le sol et l'air, est le calcul des résistances thermiques linéaires  $R_{cd}$  (résistance thermique de conduction du tube) et  $R_{cv}$  (résistance thermique de convection entre l'air intérieur et le tube) :

$$R_{cd} = \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{D_e}{D_i}, \quad R_{cv} = \frac{1}{\pi \cdot D_i \cdot h} \quad [(m.K)/W] \quad (4)$$

Si les valeurs des résistances thermiques sont connues, le coefficient de transfert de chaleur global peut être estimé :

$$k_s = [\pi D_i (R_{cd} + R_{cv})]^{-1} \quad [W/(m^2.K)] \quad (5)$$

Le flux délivré par le sol est le gain de chaleur obtenu par l'air (ou la chaleur perdu durant l'été) :

$$\Phi = k_s \cdot S \cdot \Delta t_{\ln} = c_{p_{\text{air}}} \cdot \dot{m}_{\text{air}} \cdot (t_{a,o} - t_{a,i}) \quad [\text{W}] \quad (6)$$

Où  $\Delta t_{\ln}$  est la différence de température logarithmique entre l'air et le sol,  $c_{p_{\text{air}}}$  est la chaleur spécifique de l'air et  $\dot{m}_{\text{air}}$  est le débit massique de l'air.

A partir de l'équation (6), la surface de transfert de chaleur (S) est obtenue et on peut en déduire la longueur de tube :

$$L = \frac{S}{\pi D_i} \quad [\text{m}] \quad (7)$$

Dans la seconde partie de l'étude, l'efficacité thermique du tube varie entre 0,5 et 0,99. Alors que la température du sol et de l'air en entrée d'EAHX sont maintenues constantes, la température de l'air en sortie de l'échangeur change selon l'efficacité thermique du tube. La longueur du tuyau varie de 11,5m à 76m avec l'augmentation de l'efficacité thermique (voir figure 13). Comme il était prévu, un échangeur de chaleur sol/air est plus efficace si la longueur du tube est grande. La température de l'air en sortie d'EAHX croît avec l'augmentation de la longueur de tuyau (voir figure 14).

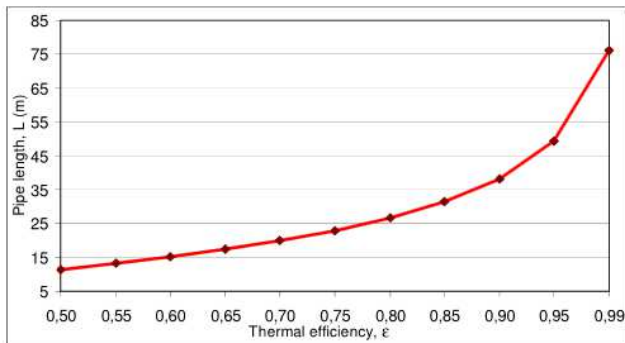


Figure 13 : Influence de l'efficacité thermique sur la longueur du tube

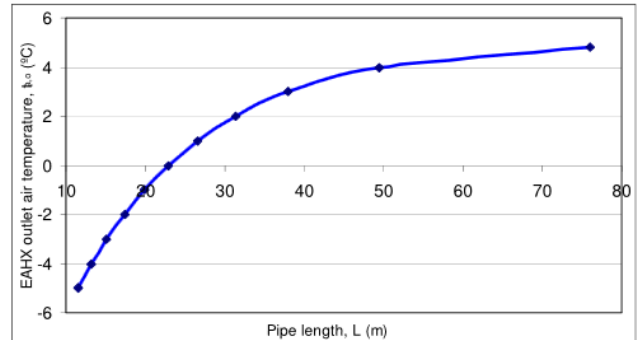


Figure 14 : Influence de la longueur du tube sur la température de l'air en sortie d'EAHX

La température de l'air frais préchauffé provenant de la sortie du tube est augmentée par une unité de ventilation mécanique contrôlée à double flux et à récupération de chaleur (MVHR). L'air vicié sortant de la maison ( $t_{a,e}$ ) est à 20°C et contient une quantité importante de chaleur qui peut être transférée vers l'air frais dans l'unité MVHR.

### III. Ventilation

De nombreuses enquêtes ont montré que beaucoup de problèmes ORL (oto-rhino-laryngologie) sont dus à l'environnement intérieur de locaux habités. Dans les années 1980 ont été construits les premiers bâtiments isolés suivants des réglementations thermiques. En conséquence, le nombre d'entrées d'air parasites a régressé.

En contrepartie, il y a eu une augmentation du taux de polluant à l'intérieur des locaux (ex : peinture, vernis, produit d'entretien, ...). C'est pourquoi il a fallu remédier à ce problème en imposant une ventilation des parties habitées. La MVHR (Mechanical ventilation heat recovery unit) ou VMC (Ventilation mécanique contrôlée) à récupération de chaleur permet l'extraction de l'air des pièces « humides » (voir figure 15). En disposant et dimensionnant judicieusement les entrées, l'air neuf est admis et l'extraction produite permet une mise en dépression des pièces principales (salle de séjour, chambre).

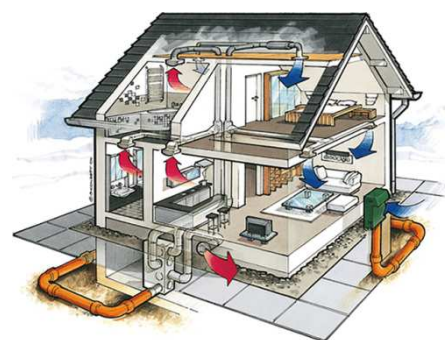


Figure 15 : Ventilation de l'habitat

Ce système fonctionne avec deux ventilateurs. Le premier permet d'extraire l'air vicié des pièces de service. Le second sert à amener l'air neuf dans les pièces principales. L'avantage de ce système est de pouvoir croiser les deux flux d'air dans un échangeur et ainsi récupérer une partie de la chaleur de l'air extrait pour préchauffer l'air neuf (voir figure 16). De plus, l'air entrant est plus facilement filtrable, il y aura donc moins de polluants dans le logement.

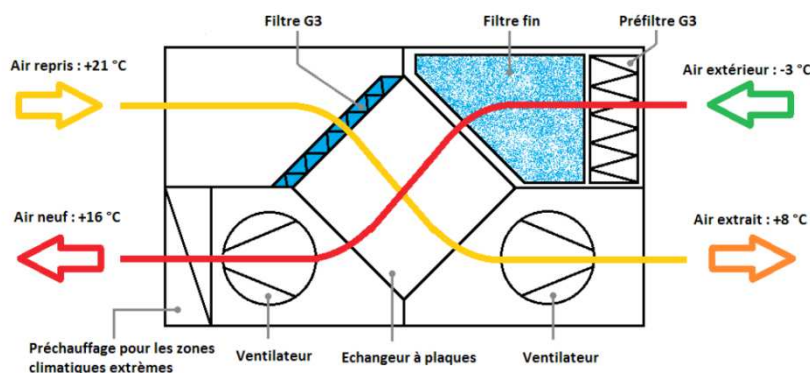


Figure 16 : Schéma de principe de la VMC double flux

Ici, la maison adopte une solution basée sur la récupération de chaleur, pour réduire les pertes thermiques par ventilation. Le système de VMC préchauffe l'air froid ventilé. L'échangeur de chaleur à plaque à récupération de chaleur permet d'économiser jusqu'à 91% de l'énergie thermique de l'air évacué. Avant d'être introduit dans la maison, l'air est chauffé par un échangeur de chaleur, à la température désirée. L'air de ventilation est chauffé avec de l'eau chaude provenant du réservoir de stockage.

#### Avantages d'une MVHR :

- Maîtrise des débits insufflés et extraits
- Confort thermique (traitement thermique de l'air insufflé)
- Isolement acoustique par rapport à l'extérieur
- Filtration de l'air neuf
- Possibilité de rafraichir l'air neuf (batterie froide)
- Possibilité de préchauffer l'air neuf (batterie chaude)
- Modulation des débits possibles
- Economies d'énergie
- Système favorable vis-à-vis de la référence RT 2000 car répercussions limitées des débits de renouvellement d'air sur le dimensionnement du chauffage

#### Inconvénients d'une MVHR :

- Encombrement des réseaux
- Investissement initial plus important
- Entretien du réseau d'insufflation et de l'échangeur
- Bruit éventuel sur l'insufflation
- L'habitation doit être étanche à l'air

### ***IV. Choix de la longueur de tube***

La température en sortie de l'unité MVHR dépend de l'efficacité thermique. Selon les informations délivrées par le constructeur de l'unité de récupération de chaleur, l'efficacité thermique est de 91%.

Soit l'équation de l'efficacité thermique :

$$\varepsilon_R = \frac{t_R - t_{a,0}}{t_{a,e} - t_{a,0}} \quad (8)$$

Grâce à cette équation, connaissant toutes les autres températures, nous pouvons connaître la température de l'air à la sortie de l'unité de récupération de chaleur  $t_R$ . Il n'y a pas seulement la température de sortie de l'EAHX qui dépend de la longueur de tube, mais aussi la température de sortie de l'unité MVHR. La température atteint des valeurs plus élevées parce que le transfert de chaleur depuis le sol augmente avec cette longueur de tube. La figure 17 montre la variation de la température de l'air en sortie d'unité MVHR selon la longueur du tube.

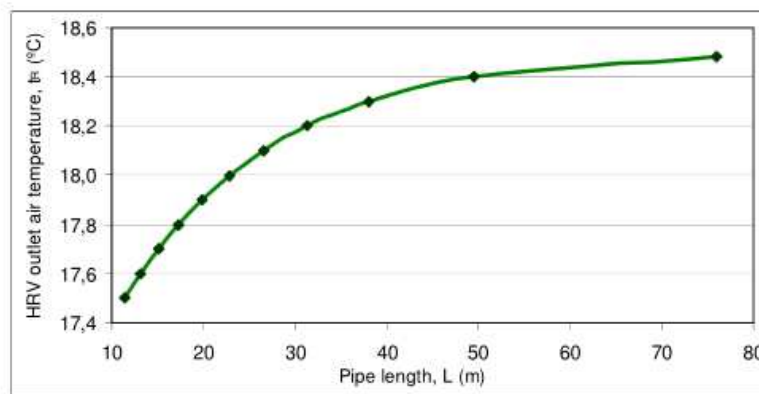


Figure 17 : Influence de la longueur de tube sur la température de sortie du MVHR

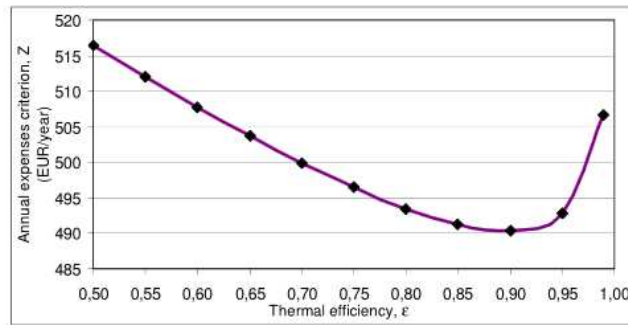
Pour répondre aux conditions de confort intérieur, l'air frais est ensuite chauffé par une résistance électrique. Afin de trouver la longueur de tube optimal, le critère des dépenses annuelles suivant est utilisée :

$$Z = c \cdot I + C \quad [\text{€/an}] \quad (9)$$

- avec :
- c : Coefficient d'efficacité économique
  - I : Coût d'investissement
  - C : Coût d'exploitation annuel

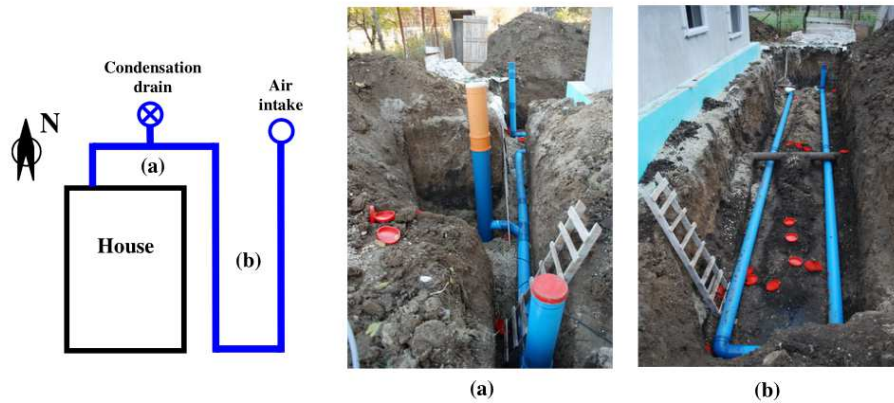
L'investissement se réfère au coût de forage et au coût d'acquisition de l'échangeur de chaleur sol/air. Le coût d'exploitation prend en compte la puissance consommée par l'air ventilé, la ventilation mécanique à récupération de chaleur et les résistances électriques.

Le point où l'échangeur opère de façon optimale est celui correspondant à la valeur la plus faible des dépenses annuelles. Comme présenté dans la figure 18, cette valeur est atteinte pour une efficacité thermique de tube d'environ 90%. A ce point, la longueur optimale de tube correspond à 38m.



**Figure 18 : Variation des dépenses annuelles en fonction de l'efficacité thermique du tube**

En considérant le calcul de la longueur du tube et de la surface de terre disponible, la configuration du tube de l'EAHX de la maison passive de l'université "Politehnica" de Bucarest est présentée dans la figure 19.



**Figure 19: Configuration du tube de l'EAHX de la maison "Politehnica"**

Pour bénéficier de la régénération de chaleur du sol fournie par le soleil, le côté principal du tube est enterré côté est du bâtiment, dans une zone sans ombre, voir figure 18 (b). La figure 16 (a) présente le côté court de l'échangeur de chaleur, avec la connexion à la maison au premier plan et l'évacuation des condensats au centre de la photo.

## ***V. Radiateur thermique***

Nous allons à présent expliquer le fonctionnement d'un radiateur thermique, technologie qui a été installée dans la maison basse-énergie en tant que chauffage d'appoint, nous montrerons ses avantages et inconvénients.

Le radiateur infrarouge appartient à la famille des radiateurs électriques. Il génère un rayonnement à ondes infrarouges (comparable à celui émis par le soleil) dont la chaleur uniforme entraîne un sentiment de bien-être et de confort dès 18°C. Celui-ci permet de



s'affranchir des courants d'air chauds et humides et de la sensation désagréable d'étouffer. Il produit une chaleur douce sur la peau, malgré une température ambiante relativement fraîche.

Comme son nom l'indique, le radiateur infrarouge produit de la chaleur grâce au rayonnement électromagnétique infrarouge et offre la particularité de chauffer non pas l'air mais directement l'ensemble des éléments de l'habitat : les murs, le plafond, le sol, les objets et ses résidants. Quelque soit son type, il existe en tant que radiateur fixe et en tant que chauffage d'appoint. C'est un bon moyen de lutte contre l'humidité et la prolifération de poussières allergènes puisqu'il chauffe les murs sans brasser l'air. On distingue deux types de radiateur infrarouge :

- Le radiateur à infrarouges courts (appelé également radiateur halogène) est composé d'une lampe infrarouge halogène et permet de ressentir la chaleur directement sur la peau. Il est idéal pour chauffer en extérieur. Il est utilisé pour chauffer un espace ouvert (terrasse, véranda, balcon...)

- Le radiateur à infrarouges longs est composé d'une trame carbone situé au cœur de sa structure : ainsi il peut prendre n'importe quelle forme et s'adapter parfaitement à l'intérieur de l'habitat. Avec ses cinq mètres de portée, il est efficace et fiable dès lors qu'il s'agit de chauffer une pièce haute de plafond.

Le radiateur à infrarouges longs ( $60 \text{ W/m}^2$ ) se révèle moins consommateur en électricité qu'un radiateur classique ( $100 \text{ W/m}^2$ ), et plus économique puisque les pertes d'énergie avec ce type de radiateur sont minimales : la quasi totalité de l'électricité consommée est transformée en chaleur.

#### Inconvénients :

Bien que la lampe du radiateur à infrarouges courts s'accompagne d'une Excellente longévité, il n'en reste pas moins très consommateur d'électricité (1500 à 4000 Wh contre 300 à 1400 Wh pour la technologie à ondes longues) et limité à un périmètre assez restreint. À noter également qu'il ne convient pas aux habitats comptant de nombreuses petites pièces puisque la chaleur ne traverse pas les murs. Le radiateur à infrarouges longs, quant à lui, n'est pas adapté aux surfaces carrelées, transparentes et réfléchissantes, c'est pourquoi ce type de radiateur infrarouge est déconseillé dans les salles de bain avec carrelage ou les espaces en grande partie vitrés. Enfin, il existe un cas particulier, le cas où le radiateur infrarouge est installé dans les saunas : il peut en effet se

révéler dangereux en cas de trop forte proximité et d'exposition prolongée (malaises, maux de tête, irritation des yeux, coups de chaleur).

## **VI. *Panneau solaire thermique***

Afin de chauffer l'eau chaude sanitaire, il a été choisi d'installer un système d'échangeur de chaleur sol/air (puits canadien) couplé à une production par énergie solaire qui approvisionnera la maison en ECS principalement l'été. L'énergie produite par l'EAHX et par les panneaux solaires est stockée dans un réservoir d'eau chaude, équipé avec un chauffage à résistance électrique qui couvre les besoins de chauffe durant les périodes de haute consommation.

Ces panneaux convertissent l'énergie solaire en chaleur grâce à un système de tubes contenant un liquide caloporteur mélangé avec un antigel. Ce liquide est chauffé par les rayons du soleil et passe ensuite dans un échangeur de chaleur afin de chauffer un ballon d'eau chaude pour le stockage. L'orientation des capteurs plein sud est idéale mais n'est pas impérative : une orientation sud-ouest ou sud-est est également possible sans grande pénalisation du gain solaire. Une orientation nord, nord-est ou nord-ouest est, par contre, à proscrire (sauf dans le cas d'une maison située dans l'hémisphère sud). Les panneaux ont une inclinaison par rapport à l'horizontale comprise entre 10° et 40. Pour éviter la surproduction en été et favoriser la mi-saison, il faut adapter un angle d'inclinaison proche de la latitude du lieu. On estime la durée de vie d'un système solaire thermique à 25 ans environ, mais cette durée peut varier en fonction des conditions et du lieu d'installation, ainsi que des facteurs climatiques parfois néfastes.

Les capteurs ou systèmes solaires doivent être certifiés (CSTB ou Solar Keymark) ou toute autre certification équivalente dans un État membre de l'Union Européenne dès lors que cette certification repose sur les normes NT EN 12975 ou NF 12976.

2 à 7 m<sup>2</sup> de capteurs pour un chauffe-eau solaire individuel permettent de couvrir 60% des besoins en eau chaude sanitaire pour une famille, donc de réduire de moitié la facture d'énergie nécessaire à la production de cette eau. Un système solaire combiné permet d'assurer 40 à 80% des besoins en eau chaude sanitaire et 20 à 60 % des besoins en chauffage pour une famille.

## ***VII. Panneau solaire photovoltaïque***

Utilisés depuis les années 60 dans le secteur spatial, les panneaux solaires photovoltaïques sont composés de cellules photovoltaïques et de semi-conducteurs qui permettent de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Une seule cellule ne peut produire qu'une très faible puissance électrique de l'ordre de 1 à 3 Watt, avec une tension de moins d'un volt. Les panneaux disponibles sur le marché sont la plupart du temps des assemblages de 36 cellules et produisent une puissance d'environ 80 Watt.

La cellule photovoltaïque est fabriquée à partir de deux couches de Silicium (matériau semi-conducteur):

- une couche dopée avec du Bore qui possède moins d'électrons que le Silicium, cette zone est donc dopée positivement (zone P).
- une couche dopée avec du Phosphore qui possède plus d'électrons que le Silicium, cette zone est donc dopée négativement (zone N).

Lorsqu'un photon de lumière arrive, son énergie crée une rupture entre un atome de silicium et un électron, modifiant les charges électriques. C'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque. Les atomes, chargés positivement, vont alors dans la zone P et les électrons, chargés négativement, dans la zone N. Une différence de potentiel électrique, c'est-à-dire une tension électrique, est ainsi créée.

Ces panneaux peuvent facilement être installés sur les toitures, les façades ou dans le jardin et il est courant qu'ils soient reliés au réseau public. En cas de non-production (la nuit), l'électricité est soutirée du réseau alors qu'en cas de surplus, l'électricité peut y être injectée. Les panneaux photovoltaïques sont devenus totalement écologiques car l'énergie produite est largement supérieure à celle qui a été nécessaire à la production de ces mêmes panneaux.

On estime approximativement à 3000kwh par kWc<sup>7</sup> l'énergie totale nécessaire à la fabrication et à la pose d'un panneau solaire photovoltaïque. On exprime la puissance de production photovoltaïque en Kilowatts-crête (kWc). Cette unité représente la puissance de production d'électricité pour un ensoleillement donné lorsque le panneau est utilisé dans des conditions optimales (orientation idéale, éclairement énergétique de 1000 W/m<sup>2</sup>, température des panneaux de 25°C,...). En France, l'ensoleillement permet au capteur

---

<sup>7</sup> kWc = kilowatt crête

d'apporter environ 1000 kWh par kWc. Cela signifie qu'il faut 3 ans pour restituer l'énergie "grise". Sachant qu'un panneau a une durée de vie d'au moins 20 ans, il devrait restituer au moins 7 fois l'énergie nécessaire à sa fabrication.

Outre les aspects écologiques, le photovoltaïque présente de nombreux avantages:

- l'énergie solaire photovoltaïque peut être utilisée en complément d'autres sources d'énergie.
- En France, l'intégralité ou le surplus d'électricité peut être revendu au distributeur (EDF ou une régie locale) pour un contrat garanti sur 20 ans. Le tarif de rachat par EDF de l'électricité photovoltaïque, pour une installation intégrée au bâti et pour une puissance inférieure à 9 kWc, en 2008 était de 57,2 c€/kWh en France métropolitaine pour tous les producteurs (permet de rentabiliser l'investissement sur une période comprise entre 8 et 20 ans selon son prix d'achat et l'ensoleillement de la région). Alors qu'aujourd'hui le tarif est de 29,1 c€/kWh pour une même installation (intégrée au bâti et avec une puissance inférieure à 9kWc).

## Chapitre 4 – Modélisation à partir de TRNSYS

TRNSYS est un logiciel de simulation dynamique développé par le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) permettant de simuler le comportement d'un système complexe. Il a été le précurseur de nombreux autres logiciels de simulation, utilisant son solveur générique et/ou certains de ses modèles (Energyplus, Energy 10, CASSIS, ...).

### I. L'environnement de TRNSYS

Contrairement à la grande majorité des autres logiciels de simulation, TRNSYS n'est pas axé que sur l'évaluation de la performance des systèmes d'énergie thermique et électrique. Il peut aussi être utilisé pour effectuer la modélisation d'autres types de systèmes dynamiques, tels que les flux de trafic ou les processus biologiques.

#### 1. Origine et concept

TRNSYS a été développé par le CSTB en 1975 dans le cadre d'une collaboration internationale. Ce logiciel est actuellement la référence du point de vue de la simulation dynamique de systèmes et de bâtiments. De nombreuses bibliothèques sont disponibles et peuvent être connectées afin de pouvoir réaliser des études pluridisciplinaires techniques et économiques. On peut y retrouver de nombreux composants tels que l'énergie solaire, hydraulique, analyse et optimisation tarifaire, cogénération, pompe à chaleur, régulation, thermique du bâtiment, comportement des usagers, ...

Trnsys studio sera utilisé pour faire le lien entre TRNSYS et le schéma de principe du projet à modéliser (Voir figure 20). Sa tâche principale sera de résoudre l'ensemble des équations dans les conditions de sollicitations, comme principalement la dimension temporelle (instants initial/ final et pas de temps de calcul).

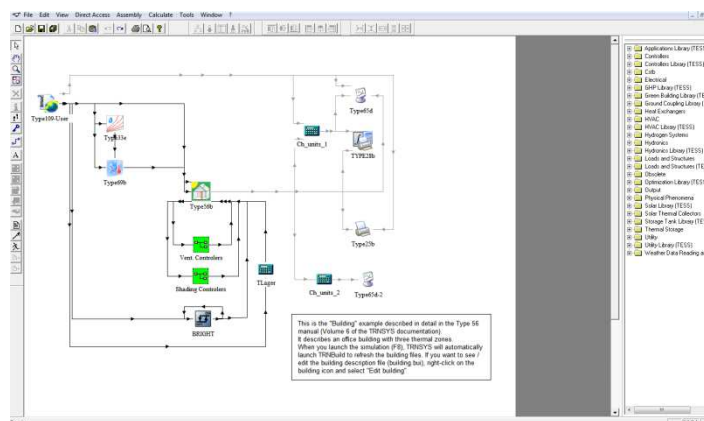


Figure 20 : Schéma de fonctionnement de TRNSYS

## **2. Les outils de TRNSYS**

De nombreux logiciels ont été perfectionnés de telle sorte à ce qu'ils puissent être couplés à TRNSYS et ainsi disposer de fonctionnalités ou de données complémentaires.

- Meteonorm permet de disposer de données climatiques fiables avec plus de 8000 stations localisées dans le monde, dont plus de 100 en France, mais également dans d'autres pays pour un pas horaire et sur une année (valeurs moyennes ou extrêmes).

- SIMCAD, un logiciel de CAO permettant la saisie de structure de bâtiment et de matériaux utilisés pour la construction. Tout en évoluant dans un environnement CAO, il permet de créer des objets en apportant ses attributs propres (épaisseur, matériaux utilisés,...). Le projet terminé, il peut être exporté sous forme de fichier de description de bâtiment qui peut être lu par TRNSYS, tout en créant parallèlement des tables de mètres sous forme de tableau Excel, informant sur les données des objets (surfaces, volumes, matériaux, ...).

- EES (Engineering Equation Solver) est un logiciel permettant de résoudre des équations à l'aide de différents modules. Il peut être utilisé en complément de TRNSYS afin de résoudre de nombreux sous problèmes grâce à son solveur. Il est utilisé principalement dans les disciplines suivantes : thermodynamique, mécanique des fluides, transfert de chaleur et chimie. Nombreuses données concernant ces disciplines y sont intégrées.

## **3. Applications**

TRNSYS ne se contente pas d'étudier le comportement thermique du bâtiment, il permet également de résoudre de nombreux systèmes d'équations, réalise des simulations dynamiques et permet la possibilité de créer de nouveaux modèles et de les intégrer à la bibliothèque existante. Nombreux avantages y sont associés : résolution multizone, couplage de systèmes, possibilité d'utiliser des ressources externes comme Excel pour y associer des programmes réalisés sous VBA, EES ou encore Matlab. De multiples données peuvent également être prises en compte, comme par exemple la consommation d'ECS, le temps d'occupation des résidents, la consommation d'énergie électrique EDF et de gaz GDF et de leurs tarifs associés.

#### 4. Bibliothèque TESS

La plupart des modules utilisés, afin de simuler les différents systèmes de la maison passive, proviennent de la bibliothèque TESS (Thermal Energy System Specialists). C'est une bibliothèque additionnelle spécialisée dans la programmation et la consigne d'applications quotidiennes, hebdomadaires ou mensuelles. Pour par exemple normaliser l'occupation des résidents, la lumière, ou le thermostat.

#### *II. Modélisation des panneaux photovoltaïques*

Les panneaux solaires photovoltaïques sont installés sur le toit de la maison passive comme montré sur la figure 21. Ils sont présents au nombre de 13, incliné à 15° vers le sud. Leur référence constructeur est "SCHOTT POLY 225".



Figure 21 : Installation des panneaux solaires sur la maison passive

#### 4. Quelques données

Afin de modéliser ces panneaux solaires sur TRNSYS, il a fallu renseigner multiples informations sur ces panneaux :

Type de module	SCHOTT POLY 225
Puissance nominal [Wc]	$\geq 225$
Tension à la puissance nominale [V]	29,8
Intensité à la puissance nominale [A]	7,55
Surface (cumulée des panneaux) [m <sup>2</sup> ]	21,749
Efficacité du module [%]	13,4

Table 5 : Données nécessaires à la modélisation

D'autres données sont nécessaires, telles que l'inclinaison par rapport au soleil ou la variation météorologique. Mais celles-ci sont directement renseignées à partir de modules intégrés à la bibliothèque, comme Meteonorm qui simule les données météorologiques (temps, température, inclinaison du soleil au fur et à mesure de la journée, humidité de l'air, ...). Un onduleur est également intégré pour alterner le courant continu qui est récupéré des panneaux photovoltaïques

## **5. Modélisation et simulation**

Après avoir récupéré les données nécessaires à la modélisation, il est primordial de choisir les bons composants parmi les différentes bibliothèques disponibles. Comme nous pouvons le voir sur la figure 22, sous TRNSYS ce système est composé de 4 éléments : Meteonorm (type 15-6), panneaux photovoltaïques (type 562e), onduleur (type 48a) et printer (type 65d).

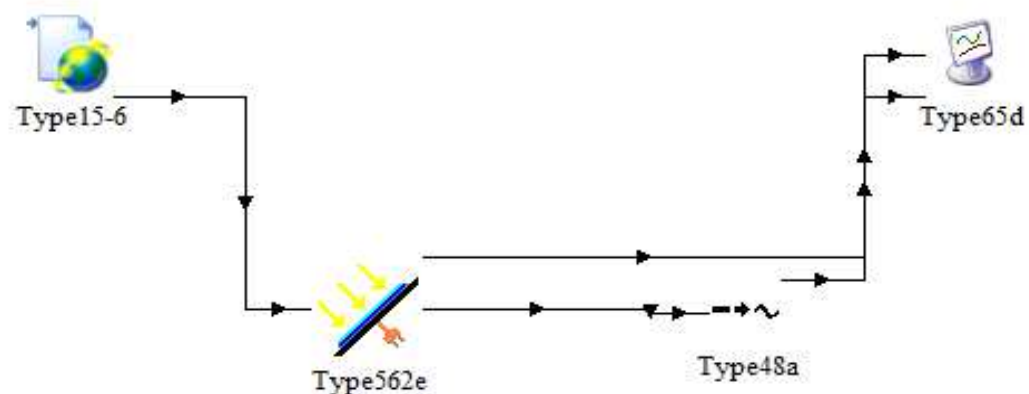


Figure 22 : Modélisation sous le logiciel TRNSYS

Description des différents éléments constitutifs de ce système :

- Meteonorm (type 15-6) : Comme expliqué précédemment, ce module permet d'intégrer les données météorologiques retenues sur une année (ici, à Bucarest) et permet d'évaluer les fluctuations d'énergie récupérée dû aux variations nuageuses et saisonnières.



- Panneaux photovoltaïques (type 562e) : Élément principal du système, nous permettant de récupérer l'énergie solaire sous forme électrique non joignable au réseau sous sa forme actuelle (courant continu).

- Onduleur (type 48a) : Permet d'onduler le courant continu restitué par les panneaux photovoltaïques afin d'obtenir un courant alternatif et permet ainsi sa connexion au réseau électrique.

- Printer (type 65d) : Cet élément permet de sortir sous forme de courbe ou de tableau Excel les différents résultats de la simulation.

## 6. Résultats

Suite à cette simulation, nous choisissons de modéliser le système pour une année complète afin de valider les résultats de couplage des modules.

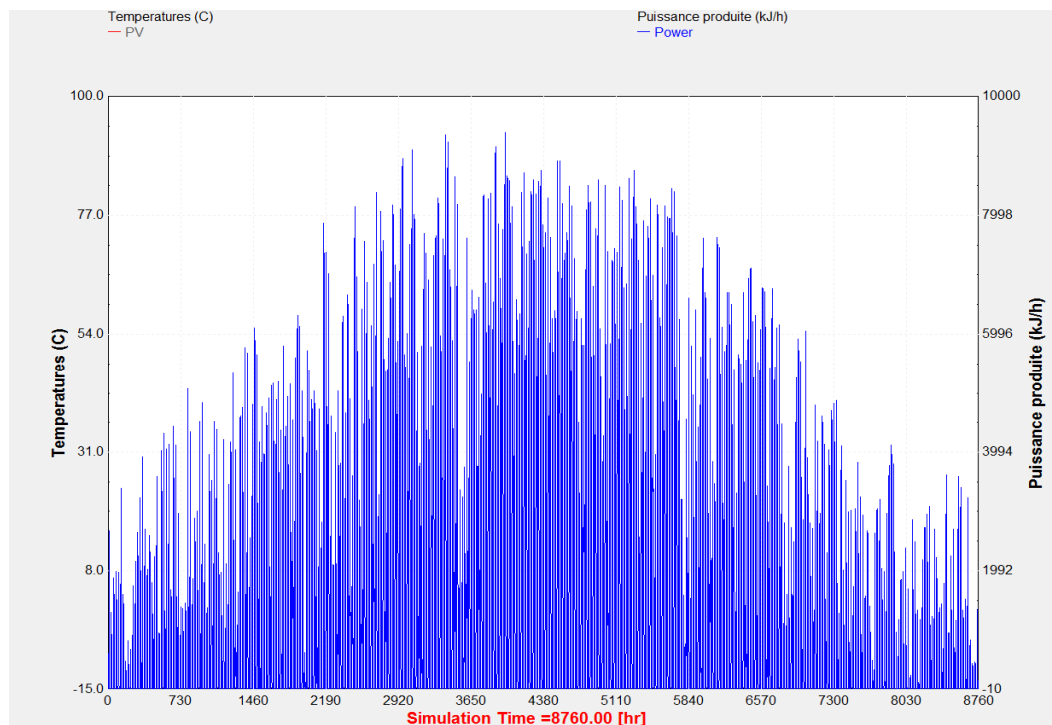


Figure 23 : Puissance produite par les panneaux photovoltaïques au cours d'une année

La puissance récupérée par ces panneaux varie entre 1850 kJ/h (0.514 kW) pour les jours les moins ensoleillés en hiver et 9200 kJ/h (2.56 kW) pour les jours les plus ensoleillés en été. Du point de vue de la simulation, les valeurs qui en résultent sont

valables, cependant, il n'est pas possible des les comparer aux valeurs expérimentales réelles, car actuellement les données liées à la puissance obtenue par les 13 panneaux solaires photovoltaïques n'ont pu êtres récupérées.

### III. Modélisation du chauffe-eau solaire

L'ensemble des éléments constitutifs du système de chauffage solaire est présenté dans la figure 24. Le capteur solaire est installé sur le toit de la maison passive, à côté des panneaux photovoltaïques (voir photo 21). Quant au ballon de stockage, lui est disposé dans le local technique au rez-de-chaussée.

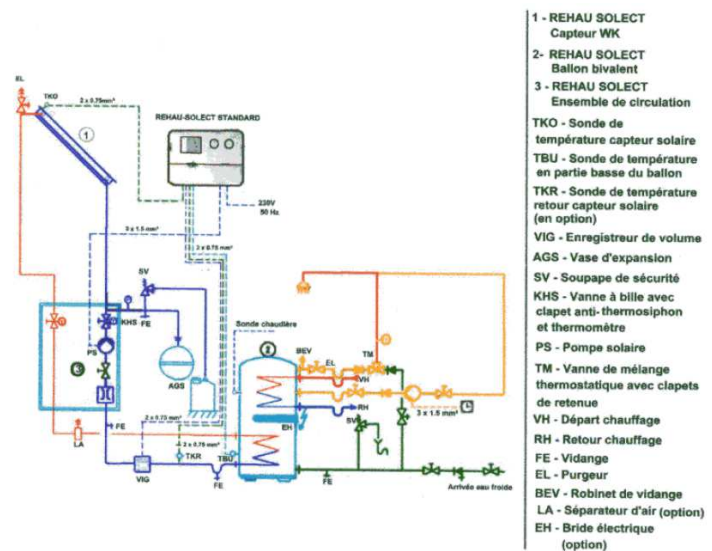


Figure 24 : Schéma hydraulique d'une installation solaire standard avec ballon sanitaire bivalent

#### 1. Quelques données

Nous allons inscrire ici les différentes données qui ont été nécessaires à la réalisation de la modélisation du chauffe eau solaire. La table 6 montre certaines informations constructeur sur le ballon de stockage.

Modèle	REHAU - SOLECT WK2 - 300E
Capacité de stockage [L]	300
Pression maximale de service Eau chaude sanitaire [bar]	10
Encombrement : hauteur x diamètre [m]	1450 x 660

Table 6 : Données correspondantes au ballon de stockage

Un appoint électrique est également placé afin de subvenir aux besoins énergétiques nécessaires, dans le cas où il ne serait pas possible de produire suffisamment d'eau chaude par le capteur solaire seul.

On dispose également de la table 7, présentant quelques données sur la superficie et la contenance du capteur solaire.

Modèle	Capteur solaire WK
Superficie d'absorbeur [m <sup>2</sup> ]	2.15
Contenance en eau du collecteur [L]	2,0
Pression de service [bar]	9

Table 7 : Données correspondantes au capteur solaire

## 2. Modélisation et simulation

Nous allons à présent présenter les différents éléments constitutifs de cette modélisation de chauffe-eau solaire. Certains modules présents ici ne sont que secondaires et ne seront pas expliqués en détail. Il est tout de même possible d'avoir toutes les informations nécessaires à la compréhension de ces modules en se dirigeant vers la rubrique "TRNSYS Help" du logiciel où chacun sera décrit sous forme de document pdf. Le schéma du chauffe-eau solaire sous TRNSYS est représenté par la figure 25.

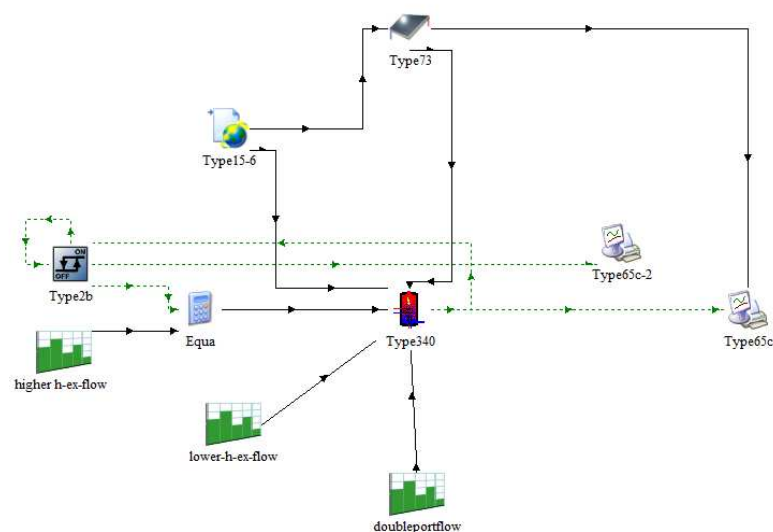


Figure 25 : Schéma de modélisation sous TRNSYS du chauffe eau solaire

Comme pour les panneaux photovoltaïques, il nous est indispensable de commencer par placer le type 15-6 Meteonorm, afin de se placer dans les conditions les plus réelles possible, car avec cela nous pouvons choisir de ne simuler que le mois de mai. Ce sont ces données qui impacteront directement sur le type 73. Ce type 73 modélise les performances thermiques d'un collecteur à plaque plane (collecteur solaire présent sur la photo 20). Ce collecteur est ensuite lié au type 340, "Multiport store model" [7] qui modélise un réservoir de stockage à fluide stratifié, composé de 4 échangeurs de chaleurs maximum. Il simule également un chauffage auxiliaire électrique interne et un maximum de deux fois dix connections direct, pour la charge et la décharge.

Un ensemble d'éléments ont été également connectés au ballon de stockage. Ceux-ci représentent les variations de consommation d'eau au cours de la journée. Ainsi nous pouvons analyser différentes informations vis-à-vis de la consommation d'eau chaude sanitaire pour une famille de 4 personnes, pour une présence hebdomadaire normale (travail en journée et repos le weekend). Nous avons ensuite lié le type 340 et le type 73 au printer (type 65c) afin de récupérer les informations de simulation.

### 3. Résultats

Dans l'étude qui suit, nous nous sommes placés au mois de mai, car les valeurs de températures expérimentales n'ont pu être récupérées que pour ce mois là. On se placera donc entre 2880h et 3624h, qui correspondent aux valeurs horaires entre le 1er et le 31 mai. Trois débits différents auront été simulés, afin de vérifier à quelle valeur de celui-ci faut-il que le système fonctionne, pour maintenir la température de l'eau chaude sanitaire à celle de consigne.

Différentes températures ont été retenues lors de cette simulation :

- $T_{in}$  : Température de l'eau froide à l'entrée du ballon
- $T_{out}$  : Température de l'ECS finale
- $T_{sensor (0,1)}$  : Température au niveau du premier capteur 10% de la hauteur
- $T_{sensor (0,5)}$  : Température au niveau du capteur à 50% de la hauteur
- $T_{sensor (0,62)}$  : Température au niveau du capteur 62% de la hauteur
- $Temp_{pan}$  : Température de retour du fluide caloporteur du panneau solaire thermique (Tyfocor® LS)

Nous présentons ici le schéma du MULTIPORT store model (Type 340), celui-ci est donc un ballon de stockage stratifié, ou l'on peut choisir d'y intégrer plusieurs échangeurs de chaleurs et jusqu' à deux chauffages auxiliaires électriques internes. Un capteur peut être placé à chaque stratification afin de suivre l'évolution de la température dans le ballon de stockage, jusqu'à sa sortie en haut su ballon.

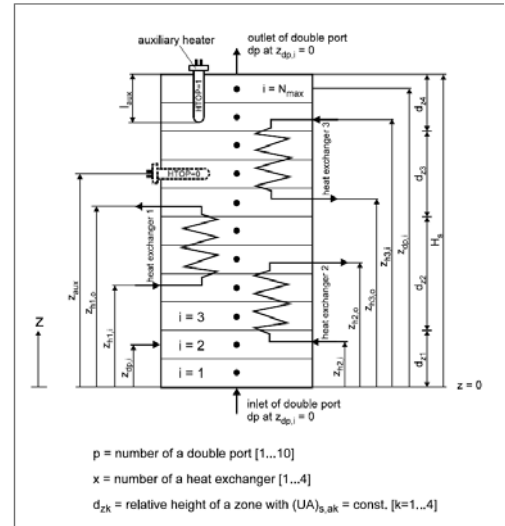


Figure 26 : Schéma du "MULTIPORT store

Dans les 3 études, nous choisissons de ne pas prendre en compte le chauffage auxiliaire, car d'un point de vue expérimental, les données ont montré que ce type de chauffe était dispensable du fait de l'augmentation du temps d'ensoleillement journalier au mois de mai.



Figure 27 : Courbe de fonctionnement à 5kg/h

Dans la deuxième simulation, on choisit d'établir un débit à 30kg/h, afin de voir s'il est possible d'augmenter le débit du fluide caloporteur, afin de pouvoir chauffer une plus grande quantité d'eau journalière.

La première analyse est réalisée pour un débit de caloporteur de 5kg/h, on remarque ici que la consigne est respectée et que globalement, on obtient une température d'ECS ( $T_{out}$ ) oscillant entre 55 et 63°C pendant les heures d'utilisations.

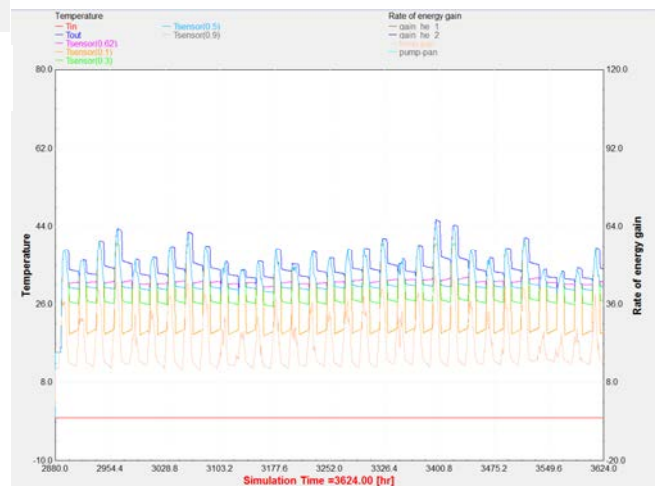


Figure 28 : Courbe de fonctionnement à 30kg/h

Or, nous pouvons déjà remarquer que les valeurs de températures en sortie de ballon sont nettement inférieures aux valeurs de consignes (60°C). Celles-ci n'atteignent que la valeur maximale de 45°C. Par cette simulation, nous pouvons donc remarquer qu'il ne sera pas possible de faire fonctionner le fluide caloporteur à cette vitesse sans recourir à un chauffage auxiliaire.

Une troisième simulation est réalisée pour une valeur de débit intermédiaire aux précédentes, à savoir 20kg/h. Tout comme la deuxième simulation, la température d'ECS est nettement insuffisante pour subvenir aux besoins mensuels, hormis pour le 22 mai, où l'on aperçoit un pic à 60°C

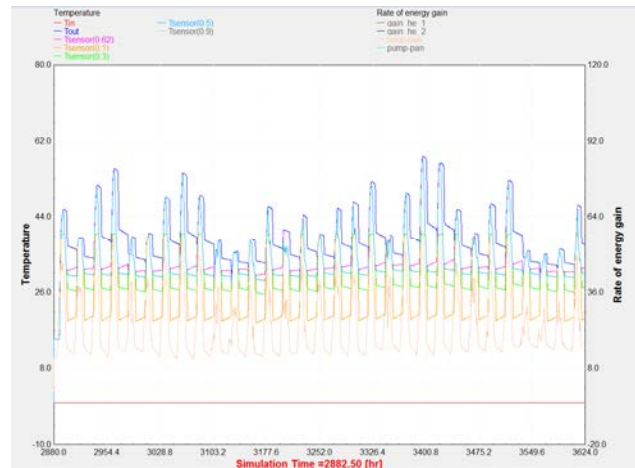


Figure 29 : Courbe de fonctionnement à 20kg/h

Nous pouvons alors conclure sur ces résultats. La température de consigne en sortie du ballon de stockage est respectée pour un débit de fluide caloporteur Tyfocor® LS proche de 5kg/h. L'augmentation de ce débit à plus de 10kg/h au mois de mai ne permettrait plus de couvrir la totalité de l'énergie de chauffe de l'eau chaude sanitaire et dans ce cas, un chauffage auxiliaire serait indispensable.

De plus Il n'est pas possible de descendre en dessous de ce débit car, en ce cas, la température du fluide caloporteur dans les panneaux dépasserait la température limite de sécurité, à savoir 125°C. On choisira alors de garder ce débit dans un intervalle compris entre  $4 \text{ kg/h} < \dot{V}_c < 8 \text{ kg/h}$

#### IV. Modélisation du puits canadien avec récupérateur de chaleur

Nous allons présenter la modélisation du puits canadien couplé au système de récupération de chaleur sous TRNSYS. Dans un premier temps nous avons placé en figure 30, le schéma représentant les différentes températures pouvant être obtenues expérimentalement dans la maison passive, par capteurs. Il nous sera alors possible de comparer les valeurs de simulation aux valeurs récupérées, pour le mois de mai.

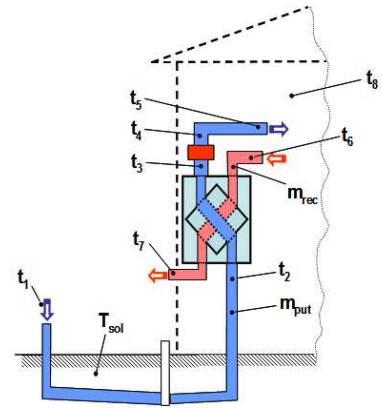


Figure 30 : Schéma des températures relevées dans la maison passive de l'UPB

##### 1. Quelques données

Nous avons inscrit sous forme de tableau, les données qui ont été nécessaires afin de réaliser cette modélisation. Ce tableau a été placé en Annexe 1. Cette liste est non exhaustive et certaines données complémentaires ont été apportées par le logiciel grâce à certains modules comme Meteonorm. Ce puits a été creusé à 2m de profondeur pour une longueur de tube de 38m. On retrouvera dans cet Annexe 1 différentes valeurs telles que les propriétés des matériaux et du sol, leur taille, coefficient de convection, chaleur spécifique...

##### 2. Modélisation et simulation

La figure 30 représente le schéma de modélisation du système couplé puits canadien/ récupérateur de chaleur. Le but ici est de vérifier l'exactitude du modèle en comparaison des valeurs réelles. Pour cela, on simulera l'air vicié de la maison par un ventilateur débitant la même quantité d'air que la maison, pour une température et une humidité relative équivalente, à savoir,  $T_8 = 25^\circ\text{C}$  et  $HR = 50\%$ . Ce ventilateur est représenté par le type 112b et débite de l'air à  $\dot{q}_{v_{air}} = 127 \text{ m}^3/\text{h}$ . Comme pour les autres simulations, on place au préalable le type 15-6 afin de se placer dans les conditions les plus proches de la réalité. Le type 556 est choisi pour représenter le puits canadien. Il représente un tube enterré dans la terre horizontal. Ce modèle compte sur les variations saisonnières de la température du sol et du remblai de la tranchée contenant le sol. La convection du

fluide, le mur du tuyau et le matériau de remblai sont tous représentés comme des résistances nettes. Les nœuds intérieurs du sol, qui sont en contact avec le remblai, sont aussi modélisés sans capacitance. Le reste des nœuds dans le sol sont modélisés comme des condensateurs connectés par des résistances les directions radial et circonférentielle.

Le modèle simulant le système de récupération de chaleur est le type 667b. Il utilise une approche "efficacité constante et capacitance minimum" pour modéliser un dispositif de récupération de chaleur air/air, dans lequel deux débits d'air passent l'un proche de l'autre afin d'en échanger l'énergie. Ce dispositif peut permettre l'échange d'humidité entre les deux flux, cependant cette fonctionnalité ne sera pas utilisée dans notre cas. Dans notre cas, il est simplement question d'échanger l'air provenant du puits canadien avec l'air vicié de la maison passive, afin de bénéficier d'un effet de chauffage en hiver et de climatisation en été. On relie enfin tous ces éléments au type 65d afin de récupérer les différentes données de simulation.

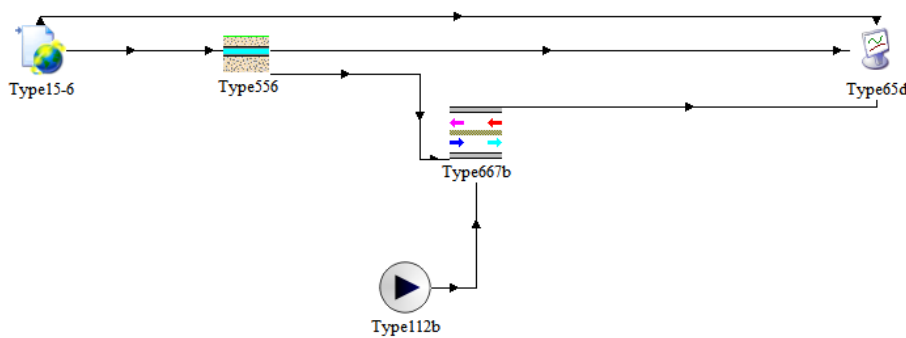


Figure 31 : Schéma de modélisation sous TRNSYS du couple puits canadien/ MVHR

### 3. Résultats

L'analyse de ce système se fera sur deux cas, l'un pour une année complète afin d'avoir une vue globale de l'efficacité de ce système durant chacune des saisons, et la seconde se basant sur le mois de mai, afin de pouvoir comparer la simulation aux valeurs récupérées expérimentalement par les capteurs installés dans la maison passive.



- T\_ext = t<sub>1</sub>
- T\_sortie\_home = t<sub>6</sub>
- T\_sol = T<sub>sol</sub>
- T\_entree\_home = t<sub>5</sub>
- T\_sortie\_PC = t<sub>2</sub>

En hiver, la température à 2m de profondeur étant supérieure à celle de l'air ambiant, la courbe verte tend à se rapprocher de la courbe violette, mais reste en dessous. A l'inverse, en été, la température extérieure étant plus élevée que celle en profondeur de terre, la courbe verte passera au dessus de la courbe violette. Nous pouvons cependant observer une légère variation lors du début de simulation (courbe verte supérieure à la violette), ceci s'explique par le temps que la simulation met à converger vers la bonne solution.

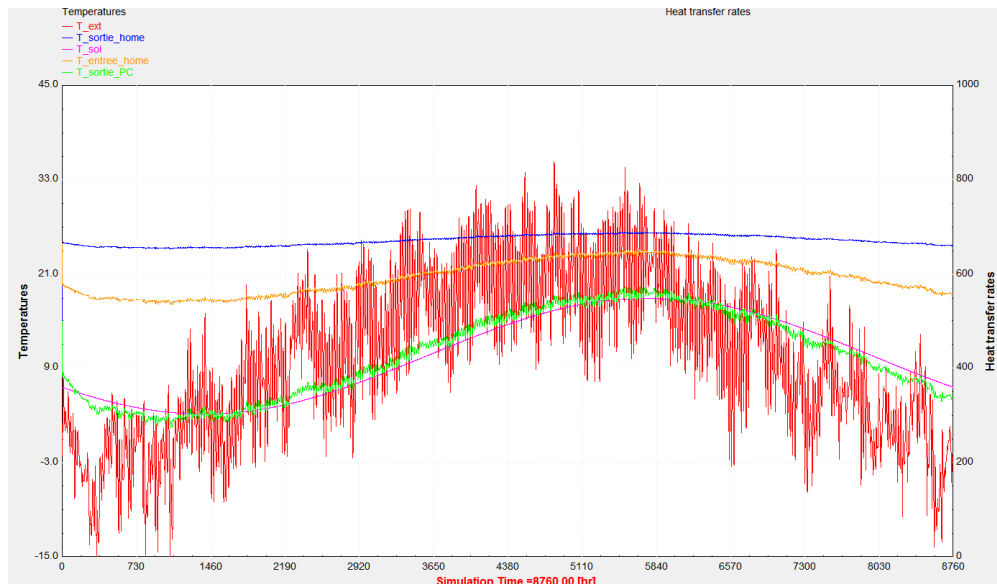


Figure 32 : Températures aux différents points du système pour 1 an

Comparées aux températures extérieures  $t_1$  (rouge), celles des courbes représentatives de  $t_2$  (vert) et  $T_{sol}$  (violet) ne varient que peu. La température minimum étant de  $T_{sol} = t_2 = 3,2^\circ\text{C}$  à 1400h de la simulation, soit le 27 février, au même moment,  $t_1 = -2^\circ\text{C}$  la nuit et  $8^\circ\text{C}$  en journée. Le maximum à 2m de profondeur est de  $T_{sol} = t_2 = 18^\circ\text{C}$  à 5760h de simulation, soit le 28 août et de  $t_1 = 28^\circ\text{C}$  en journée et  $19,5^\circ\text{C}$  de nuit. Par cette analyse, il semblerait que ce dispositif ne soit pas indispensable en hiver du fait du peu d'écart avec la température extérieure, cependant, l'efficacité de ce dispositif semble importante en été, où la température à 2m de profondeur est inférieure à celle en extérieure de nuit.

Après avoir échangé sa chaleur avec le sol, l'air va ensuite circuler dans le récupérateur de chaleur afin d'effectuer un échange supplémentaire, avec l'air vicié de la maison. On a représenté le flux entrant dans la maison après échange par la courbe  $T_{entree\_home}$  (orange) et le flux sortant de la maison par la courbe  $T_{sortie\_home}$  (bleue). L'air provenant du puits canadien varie peu, allant de  $17^\circ\text{C}$  en février et  $24^\circ\text{C}$  en août. Celle sortant de la maison est quasi-constante est ne varie qu'entre  $24,4^\circ\text{C}$  et  $26,4^\circ\text{C}$ .

On choisit à présent de comparer la simulation effectuée sur TRNSYS avec les valeurs récupérées par les capteurs installés dans la maison passive. Il s'agit ici de voir la différence en sortie de puits canadien, juste avant d'entrer dans le système de récupération de chaleur.

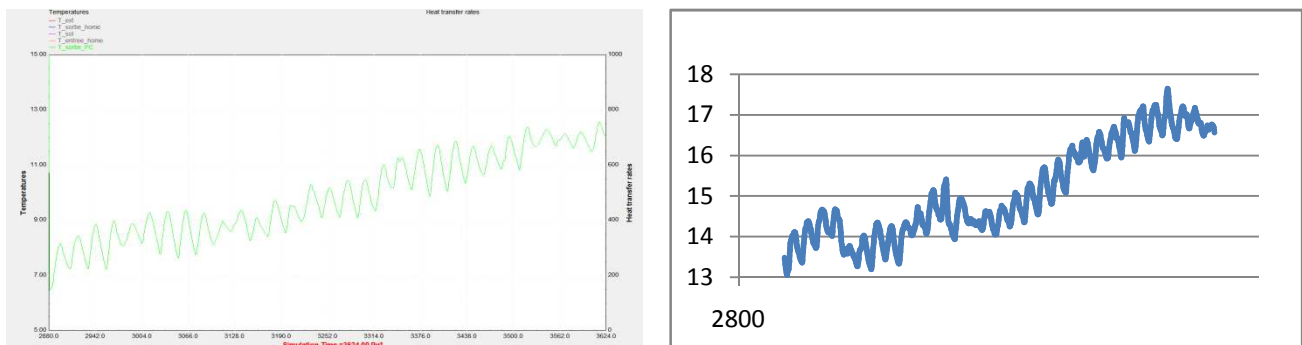


Figure 33 : Comparaison au mois de mai des températures de sortie du puits canadien

Nous pouvons observer une forme identique des deux courbes présentées sur la figure 33, cependant, la plage de température montre une légère différence. La simulation de TRNSYS a des valeurs comprises entre  $6,5^\circ\text{C}$  et  $12,5^\circ\text{C}$ , alors que les valeurs expérimentales montrent une variation de  $13^\circ\text{C}$  à  $17,5^\circ\text{C}$  pour la même période de

fonctionnement. Ce qui peut causer cette variation est sans doute la différence dans les données récupérées par le logiciel et expérimentalement. En effet, après vérification des données météorologiques de Bucarest, on a pu constater que les températures des mois de janvier, février et mars étaient supérieures aux normales de saison, ce qui expliquerait l'échauffement anormalement élevé du sol au mois de mai 2014.

## **Chapitre 5 – Modélisation à partir de Google SketchUp (Trnsys3d)**

Dans cette partie, nous allons traiter du travail effectué à partir d'un add-on de TRNSYS couplé à Google SketchUp, à savoir Trnsys3d. C'est ce logiciel que nous avons choisi d'utiliser afin de représenter la maison passive de l'université polytechnique de Bucarest.

### ***I. Initiation à Google SketchUp***

Ce logiciel nous permet d'effectuer une modélisation en 3 dimensions de la maison passive, tout en permettant une analyse thermique complète grâce à Trnsys3d. Nous l'avons réalisé grâce à des plans dessinés sous autocad.

#### **1. Principe du logiciel**

Google SketchUp est un logiciel de traitement d'image en 3 dimensions. Il permet de concevoir, visualiser et de modifier des images en 3D. Son emploi est destiné à de nombreux domaines : architecture, construction, ingénierie, planification urbaine, conception de jeux, cinématographie et autres. Ce logiciel permet avant tout de créer des modèles avec des comportements et des attribues personnalisés.

#### **2. Add-on Trnsys3d**

Trnsys3d est un add-on gratuit pour Google SketchUp. C'est un nouveau modèle détaillant le rayonnement du multizone building de TRNSYS 17, requérant des informations sur les surfaces 3D géométriques. Il a été développé afin de simplifier les apports d'informations géométriques et la visualisation des résultats. Il permet de:

- Créer et éditer les zones et surfaces Trnsys 3D
- Définir et modifier les constructions par défaut
- Egaler les conditions limites des surfaces interzones
- Voir les principaux résultats de simulation de TRNSYS 17 en 3D

Un fichier TRNSYS peut être importé vers TRNSYS 17 (Studio et TRNBuild) pour ajouter des données non géométriques et lancer la simulation. Les modifications peuvent être exportées dans le fichier Trnsys3d.

## ***II. Modélisation de la géométrie de la maison passive***

La modélisation de la maison passive se divise en plusieurs étapes, dans un premier temps, il s'agit de créer la structure, en créant chacune des pièces de la maison. Créer portes et fenêtres, puis lier les surfaces afin d'établir une connexion thermique entre les pièces adjacentes.

### **1. Construction des zones**

La construction doit se faire pièce par pièce. Il est impératif de créer une nouvelle zone de construction à chaque fois. La géométrie ainsi que la structure sont réalisées indépendamment pour chacune d'elles. Cependant chaque zone doit être adjacente à la précédente en fonction de son emplacement dans la maison.

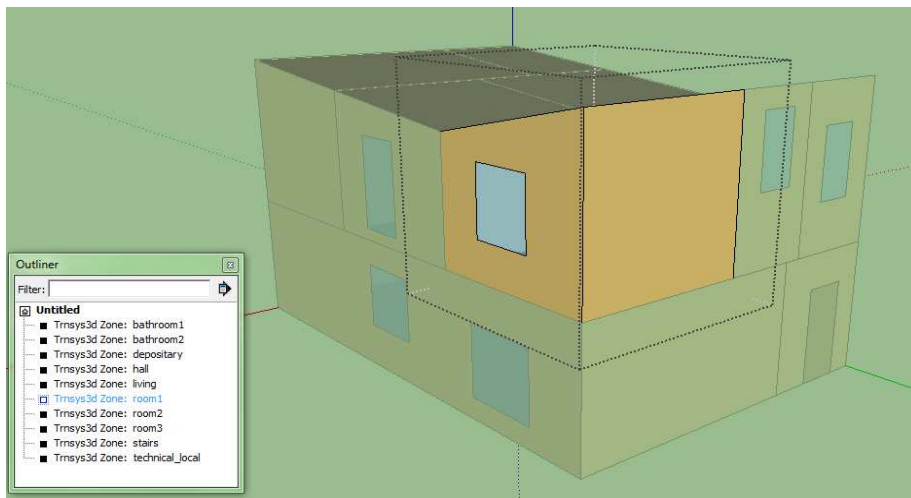


Figure 34 : Schéma de construction des zones de la maison passive sous Google SketchUp

Comme montré dans la figure 34, dix zones distinctes ont été réalisées afin de représenter le plus fidèlement possible le bâtiment. Il est possible de voir ces pièces en détail dans l'annexe 4 qui représente les plans du rez-de-chaussée et de l'étage de la maison passive. Après avoir créé les 10 zones, il faut ajouter les fenêtres et les portes en prenant garde à les ajouter à chacune des différentes zones de construction, par exemple, pour une

porte donnant du hall à une chambre, il faut que celle-ci soit visible dans la zone de construction du hall, mais également celle de la chambre.

## 2. Conditions limites interzones

Après avoir établi la structure complète du bâtiment, la tâche suivante est de lier chacune des zones de constructions entre elles, afin de modéliser le transfert de chaleur au sein de la maison. Pour cela, il faut valider le type de surface, le type de construction et la zone concernée. Comme le montre en exemple la figure 35, en reliant la "room1" à la "room2", le type de liaison est "Wall", le type de construction est "ADJ\_WALL" car c'est un mur adjacent aux deux parois et la condition extérieure s'applique à la "room2". Cette manipulation doit être appliquée pour toutes les surfaces et pour toutes les zones. De la même manière, lorsqu'une porte ou une fenêtre sont intégrés à une surface, il faudra également les prendre en compte dans l'outil "BuildingSurfaceDetailed".

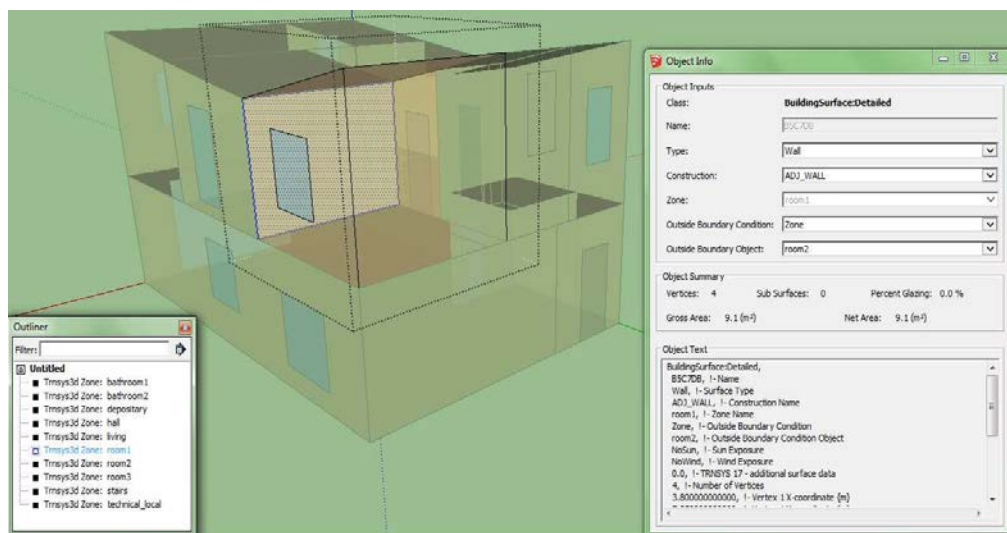


Figure 35 : Schéma représentatif des liaisons inter-zones

Cette étape terminée, l'ossature sera réalisée, il sera alors possible d'ajouter les conditions limites du système telles que les propriétés des matériaux, la ventilation, le système de chauffage, la climatisation, la lumière ou encore la présence d'occupants. Dans le cas expérimental, la surface ouest de l'habitation est accolée à une maison jumelle, parfaitement symétrique au niveau des plans. Cette maison est prise en compte en supposant les parois extérieures ouest adiabatique avec une chaleur constante émise depuis l'extérieur de 25°C.

### III. Utilisation de TRNBuild pour l'isolation

Après avoir réalisé la structure et ajouté les conditions limites inter-zones, nous devons à présent insérer les données d'isolation des murs, sols et plafonds grâce à la fonctionnalité TRNBuild. C'est également avec ceci que nous pouvons ajouter des conditions de fonctionnement à la maison passive.

#### 1. Principe de TRNbuild

Du fait de la complexité de la construction en multizone, les paramètres ne sont pas définies dans le fichier d'entré TRNSYS. Les informations requises sont alors contenues dans un fichier appelé "building file" (\*.BUI). TRNBuild a été développé afin de faciliter la création de fichier BUI, permettant ainsi de décrire plus aisément chaque zone thermique. Les avantages apportés par ce logiciel sont ces modélisations physiques et mathématiques. Il permet le calcul automatique des coefficients de transferts de chaleur convective dépendant des températures de surface, il dispose d'un système de modélisation du rayonnement par les fenêtres et équilibre automatiquement l'énergie solaire et thermique, ainsi que l'humidité.

#### 2. Propriétés des matériaux

Chaque matériau utilisé dans la construction a ses propriétés propres. L'utilité de TRNBuild est de pouvoir créer sa propre base de données. Il nous est alors possible d'ajouter les matériaux utilisés dans la bibliothèque de TRNSYS.

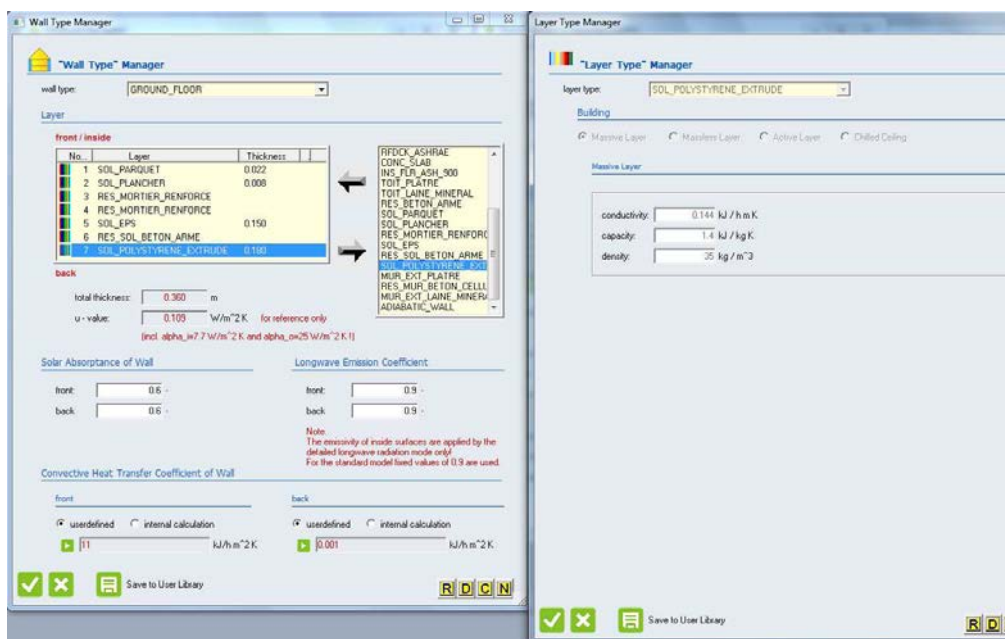


Figure 36 : Fenêtre de création du "Layer Type" Manager

Chacun des matériaux sera accompagné d'informations complémentaires telle que son type de couche (massive, sans masse, active, ...). Dans le cas d'une couche massive, il sera nécessaire d'y intégrer la conductivité thermique, la chaleur spécifique, la densité du matériau. Dans le cas d'une couche sans masse, seules la résistance thermique et l'épaisseur seront renseignées. On présente en figure 36 le cas couche de polystyrène extrudée présente au sol. Celle-ci présente les propriétés suivantes :

- conductivité thermique = 0,144 kJ/h.m.K
- chaleur spécifique = 1,4 kJ/kg.K
- densité = 35kg/m<sup>3</sup>

Les propriétés de chacun des matériaux utilisés sont visibles dans l'Annexe 2.

### 3. Composition murale

Après avoir alimenté la base de données en matériaux de construction, l'objectif est de créer les différents murs qui sont utilisés pour bâtir la maison. Pour cela, il suffit de choisir les constituants de ces surfaces en indiquant l'épaisseur du matériau.

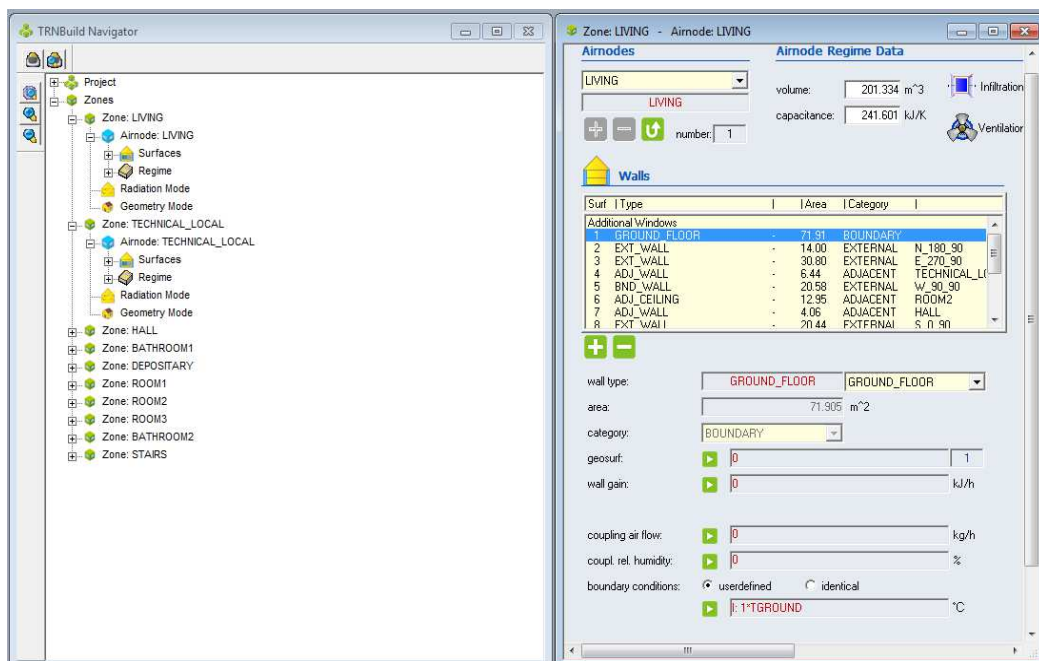


Figure 37 : Fenêtre d'informations des surfaces "Airnode"



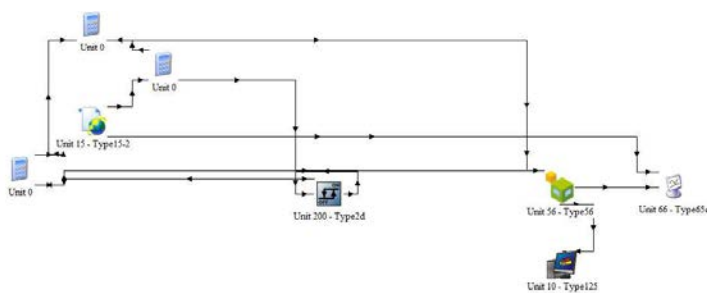
Par exemple, en se référant au plan en Annexe 4, et à l'exemple fourni par la figure 37, on peut voir que la pièce "LIVING", représentant la salle de séjour, est composée de plusieurs surfaces : un "GROUND FLOOR", trois "EXT WALL", un "BND WALL", deux "ADJ WALL", six "ADJ CEILING". Chacune d'elles représentent une connexion et ainsi un échange thermique avec une pièce adjacente ou une limite extérieur.

C'est également avec TRNBuild qu'il faut prendre en compte les surfaces et les propriétés des fenêtres de la maison passive. Pour cela, il faut aller dans le "Window Manager" et effectuer les mêmes manipulations que pour les matériaux de construction, à savoir ajouter leurs propriétés à la base de données, et les associer à leurs surfaces correspondantes.

#### IV. Simulation thermique de la maison passive

##### 1. Simulation de la maison sous TRNSYS 17

Dans un premier temps, après avoir réalisé la structure et ajouté les propriétés des différents composants, une première modélisation de la maison passive est possible. Celle -



ci est réalisée schématiquement à l'aide du logiciel TRNSYS, comme vu dans la figure 38. C'est à cet instant qu'il est possible de modifier la totalité des données implantés dans le système.

Figure 38 : Schéma de la maison passive sous TRNSYS

En liant le type 125 au type 56 (maison passive), il est possible de récupérer différentes informations sur le bâtiment, tels que la puissance consommée, l'humidité, la température, et autres. Ici nous choisissons de voir la température dans chaque pièce, voir figure 39. La ventilation est intentionnellement coupée afin de voir l'effet de l'isolation seul. Comme nous pouvons le voir, il y a une certaine disparité entre les différentes

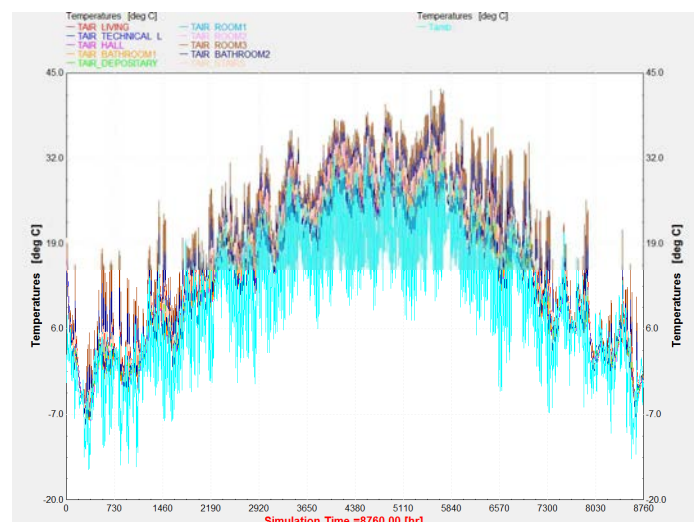


Figure 39 : Courbes de températures des pièces



parties du bâtiment. Ceci s'explique par leur emplacement géographique, les pièces ayant une façade orientée vers l'extérieur auront tendance à être plus fraîches en hiver. De la même manière, les pièces ayant un mur adjacent à la maison jumelle verront leur température plus élevée du fait de la puissance constante envoyée par celle-ci, comme par exemple la pièce "BATHROOM2". Cette pièce dispose de la température la plus élevée, suivie de la "ROOM3", ce qui est logique, du fait de leur emplacement adjacent et de leur surface vitrée orientée sud.

## 2. Simulation 3D sous Trnsys3d

Le fichier ainsi créé sous TRNSYS et TRNBuild peut être à présent ouvert dans Google SketchUp, via le plug-in Trnsys3d. Grâce à cela, il est possible de visualiser la construction en 3 dimensions, voir figure 40. Cependant, dans cette application, il nous est impossible de modifier les données, pour cela, il est nécessaire de modifier le fichier sur le logiciel TRNSYS.

Cet outil a pour but principal de nous montrer l'évolution de la température des différentes zones au cours du temps et en 3 dimensions. Cette observation peut être réalisée sur une année complète, avec un pas de temps de 10 minutes.

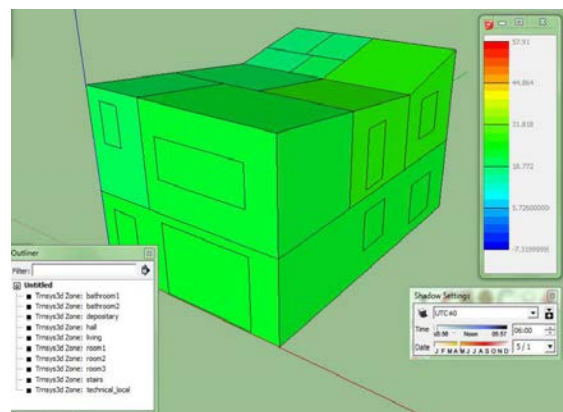


Figure 40 : Evolution des températures en 3D

Chaque zone affiche sa propre température et prend en compte les échanges thermiques avec les pièces adjacentes. Le logiciel permet également de prendre en compte la présence d'obstacles proches tels que des arbres ou habitations voisines, les radiations solaires avec inclinaison de celui-ci, le cycle jour/ nuit. Il est également possible d'ajouter un système d'ombrage et tout cela avec prise en compte des points cardinaux.

On a choisit d'ajouter par la suite une ventilation dans le "Ventilator Manager" afin de simuler au mieux les effets du puits canadien couplé au système de récupération de chaleur, au sein de la maison passive. Celui-ci est représenté par un débit d'air de  $127\text{m}^3/\text{h}$  pour une température de  $25^\circ\text{C}$ .

## Chapitre 6 – Comparaison avec les données expérimentales

Nous allons à présent confronter les résultats obtenus par simulation thermique sous TRNSYS avec les valeurs expérimentales récupérées via les capteurs installés dans la maison passive de l'université polytechnique de Bucarest.

### *I. Analyse et comparaison des données expérimentales de l'habitation*

#### **1. Variation de la température extérieure**

Dans un premier temps il est nécessaire d'analyser la principale source d'erreur de la simulation, à savoir, la base de données météorologique. En effet, même si la simulation s'avère parfaitement correct, les différences se feront sur ce point du fait de la différence d'origine des ressources de calcul. Dans le cas de TRNSYS, nous avons utilisé le module Meteonorm, qui établit une moyenne des températures sur les années passées, alors que les capteurs de la maison passive ont simplement relevé celles de l'année en cours. Nous avons récupéré les températures extérieures pour toute la durée du mois de mai et pour un pas de temps égal à 1h. Dans le cas où ce mois de mai n'a pas été anormal, malgré quelques valeurs en dessous des normales de saisons, les différences de températures devraient être relativement similaires.

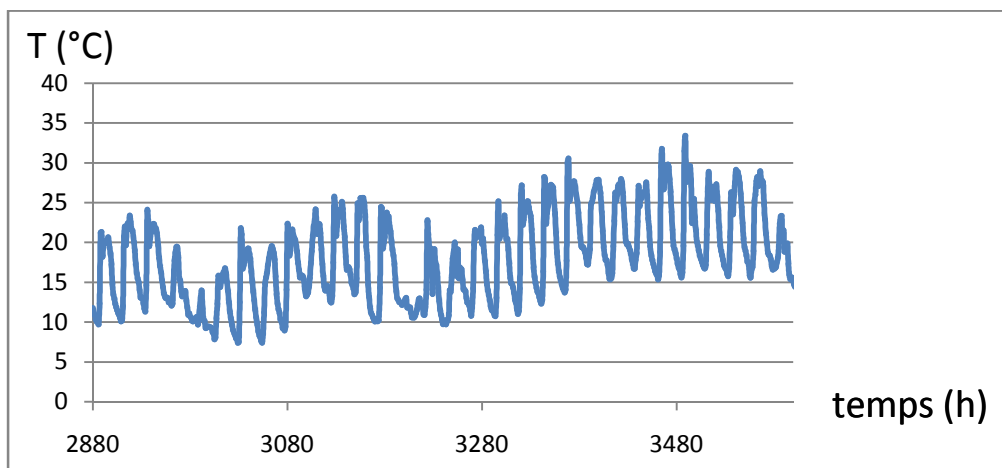


Figure 41 : Evolution des températures extérieures réelles de mai 2014

De manière générale, on observe une température en hausse constante, mise à part quelques jours dispersés où celle-ci admet une baisse de quelques degrés. Cela signifie qu'au point de vue qualitatif, la simulation réalisée sous TRNSYS, figure 41, est fidèle à la réalité, figure 42. Du point de vue quantitatif, des différences sont observables entre les

deux graphes, la moyenne est supérieure dans le cas des mesures réelles, avec un minimum à 7°C et un maximum à 34°C. Pour les données de TRNSYS, le minimum est de 3°C et le maximum de 29°C. Si la simulation s'avère juste, nous devrions observer lors de l'analyse des différentes pièces de la maison, une différence de température de l'ordre de 4 à 5°C sur les valeurs retenues.



Figure 42 : Evolution des températures extérieures modélisées de mai 2014

## 2. Températures des différentes pièces

Comme pour le capteur de température extérieure, il n'a pas été possible de récupérer les données numériques pour une année entière. C'est pourquoi les températures relevées auprès des capteurs internes ont été prises également durant le mois de mai 2014. Avec un pas de temps de 1h, nous avons pu relever ces données pour 5 pièces distinctes :

- salle de bain orientée sud
- salle de séjour
- chambre orientée nord
- bureau
- chambre orientée sud

Toutes ces données sont placées sous forme de courbe dans l'Annexe 3. Il est alors possible de les comparer à la figure 43, qui représente l'évolution des températures de chaque pièce réalisées avec le logiciel TRNSYS.

Globalement le résultat semble correspondre, la forme prise par chacune des courbes est similaire à son homologue réalisée de manière expérimentale. Certaines admettent des températures plus élevées du fait de leur exposition plus importante au soleil: salle de séjour, chambre et salle de bain orientées sud. De la même manière la salle de séjour présente de plus faibles températures durant la nuit, cela s'explique par sa surface plus importante en contact avec l'extérieur.

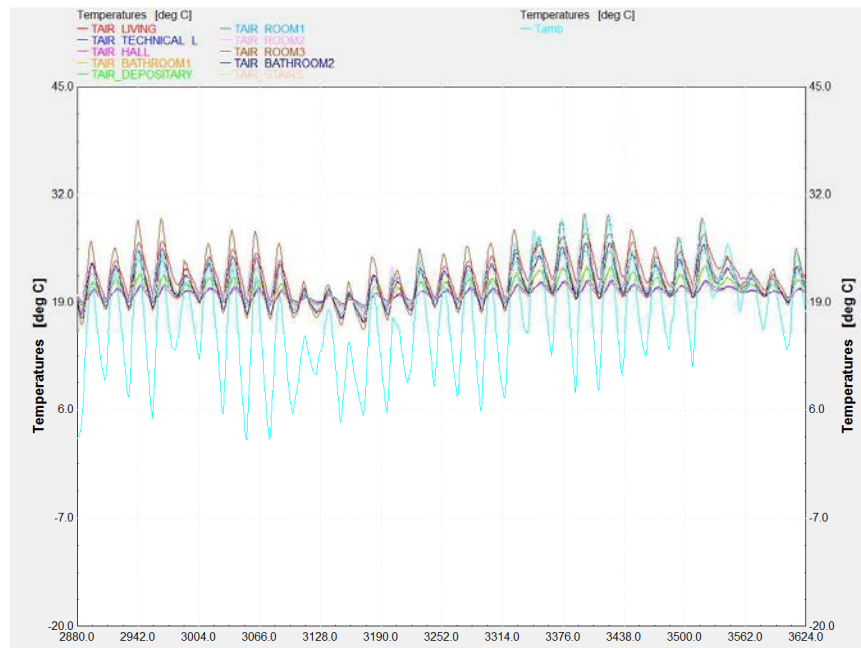


Figure 43 : Evolution des températures dans la maison  
au cours du mois de mai

Tout comme l'indiquaient les courbes de températures extérieures, les valeurs réelles étant plus élevées que la simulation, on remarque une hausse importante en milieu de mois, qui est plus difficile à observer sur TRNSYS. Les valeurs retenues pour le 1er mai réel sont comprises entre 20°C (salle de bain sud) et 24°C (salle de séjour), alors que sur TRNSYS elles comprises entre 16°C (chambre sud) et 20°C (le local technique). Du point de vue des valeurs, cela est parfaitement cohérent, du fait de la différence de 4°C retenue entre la simulation et la réalité de l'air extérieur.

### **3. Exemple de comparaison : la chambre orientée sud**

A défaut de présenter chacune des pièces de la maison par raison de similitude dans le résonnement. Nous choisissons de présenter la chambre orientée sud, élément susceptible de présenter le plus d'interaction avec l'extérieur du fait de ses façades côté sud, côté est et de son plafond.

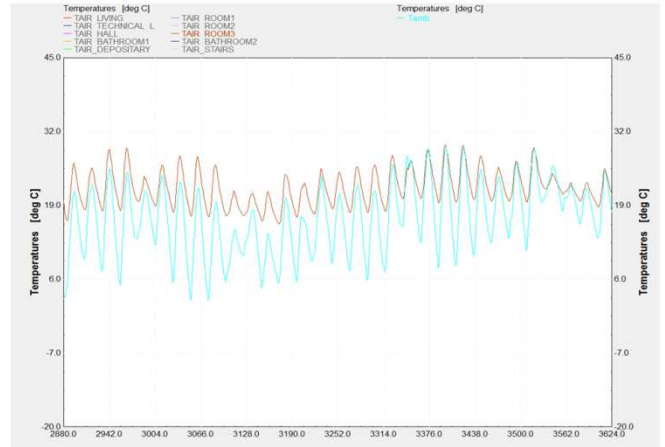
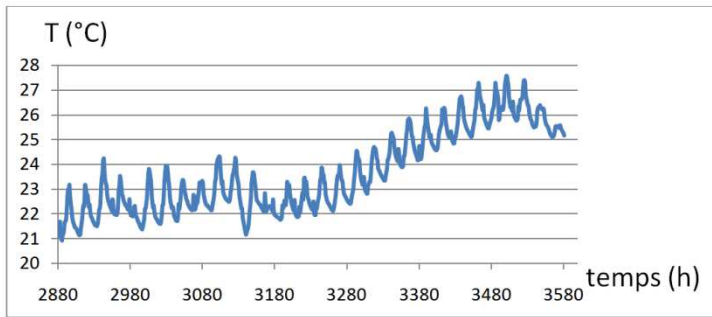


Figure 44 : Evolution des températures dans la chambre  
sud au cours du mois de mai

Voici la figure 44, représentant l'évolution de la température réelle et simulée de la chambre orientée sud durant le mois de mai. Une différence est visible au niveau de la forme de ces courbes. L'évolution réelle est divisible en deux parties, la première moitié du mois montre une certaine constance dans ses valeurs, alors qu'en deuxième partie, on observe une nette évolution des températures, avec des pics journaliers passant de 24°C à 27,5°C. Contrairement à la courbe simulée où l'on constate des valeurs toujours variables des pics journaliers variant de 22°C à 27°C, soit une plage de températures légèrement inférieures aux valeurs réelles. Cet écart de température se veut plus important pour les autres pièces de la maison, où la simulation se verra attribuer des pics de température journaliers compris entre 20 et 25°C alors que la réalité montrera plutôt des valeurs comprises entre 22,5°C et 28,5°C.

Nous pouvons en conclure que la simulation est fidèle avec la réalité, afin de valider cette conclusion, il serait judicieux de pouvoir implanter les données météorologiques spécifiques au mois de mai 2014 à Bucarest, afin de vérifier l'erreur de calcul pour les mêmes informations initiales.

## II. puits canadien et MVHR

### 1. Résultats obtenues

Dans cette partie, nous allons comparer les résultats réels et par simulation, du puits canadien couplé au système de récupération de chaleur. Pour cela nous établirons les différences entre la figure 45, représentant les valeurs réelles, et la figure 45, montrant les résultats de simulation.

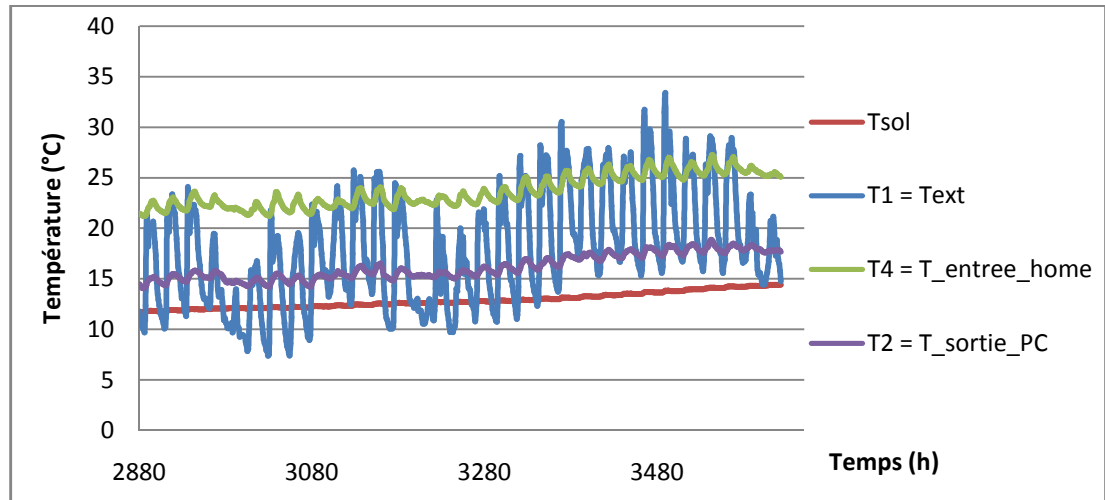


Figure 45 : Températures réelles du couple puits canadien/MVHR

Les quatre courbes de températures ont été récupérées de nouveau pour le mois de mai 2014. Elles représentent les valeurs de température dans l'air extérieure, dans le sol à 2 mètres de profondeur, dans le tube en sortie de puits canadien et en sortie de MVHR.

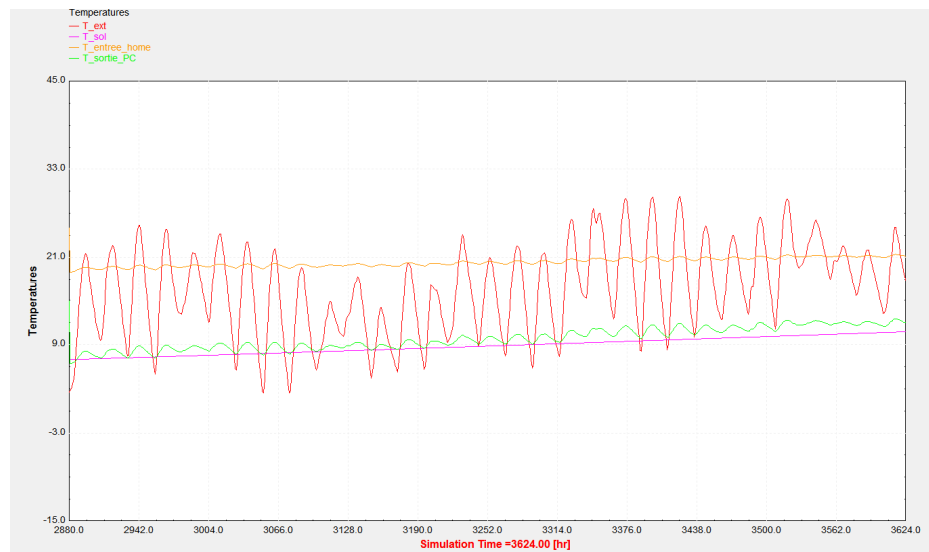


Figure 46 : Températures simulées du couple puits canadien/MVHR

## 2. Analyse et conclusion

Afin de mieux comprendre les différences entre les deux situations, il faut tout d'abord recadrer le contexte d'étude en comparant les résultats des deux bases de données météorologiques, à savoir les courbes représentatives de  $T_{ext}$ . Dans la figure 45, les valeurs de nuit oscillent entre 7 et 17°C alors que pour la simulation de la figure 46, elles varient de 2,5°C à 18°C. Ceci est dû à la comparaison entre une moyenne de températures établie pour plusieurs années avec les valeurs retenues pour le mois de mai 2014.

En second point ce qui va interférer dans le résultat final sera la température du sol. Car celle-ci varie en fonction du rayonnement solaire au cours du temps. Les mois de janvier, février et mars ayant été plus chaud que la moyenne, une augmentation plus importante de la température du sol est alors visible. La simulation nous montre une variation de 7 à 11°C alors que le relevé réel montre une variation de 11 à 14,5°C. Cette suite de variations des données d'études perturbe la comparaison des deux cas, car la situation réelle montrera une température plus importante en sortie de puits.

C'est ce que nous pouvons observer par la courbe  $T_{sortie\_PC}$ , qui suit la variation du sol. Dans le cas réel, nous avons des températures variant de 14 à 18°C et de dans la simulation 8 à 12°C. Cette différence de plus de 3 degrés est maintenue tout le long des différents systèmes thermiques. De la même manière, en sortie de MVHR, la courbe  $T_{entrée\_home}$  varie de 20 à 21°C en simulation et de 22 à 26°C au niveau expérimental.

Le résultat final était prévisible, cela démontre que la simulation est correct, cependant, tout comme la simulation de la maison passive, il serait judicieux de pouvoir intégrer la base de données météo de l'année 2014 dans la bibliothèque TRNSYS afin pouvoir faire correspondre au mieux ces deux situations et permettre ainsi la validation du modèle utilisé.

## Conclusion

Le but de ce stage a été de valider un modèle de maison passive afin qu'il corresponde à une construction déjà existante. Dans un premier temps, nous nous sommes intéressé à l'implantation qu'ont les énergies renouvelables dans le monde, en analysant leur production à l'échelle internationale et en se focalisant sur les sources majeures présentes en France et en Roumanie au niveau régional.

Par la suite, il a fallu présenter le modèle réel de l'étude, l'une des deux maisons passives de la faculté d'énergétique de l'université polytechnique de Bucarest, la maison Est. Nous avons cherché à expliquer le fonctionnement de chacun des systèmes thermique la composant, afin d'établir plus aisément les analyses sur la partie simulation. Pour la modélisation, nous avons eu à disposition divers logiciels, de modélisation 3D tel que Google SketchUp et de simulation thermique dynamique, TRNSYS. Il a fallu représenter chacun des éléments du bâtiment à partir des données constructeur, (panneaux solaire photovoltaïque, thermique, puits canadien,...) pour obtenir une modélisation fidèle à la réalité. Nous avons également modélisé la maison en 3D afin de percevoir les variations thermiques qu'elle subit annuellement. Toutes ses simulations ont été par la suite comparées aux données réelles récupérées expérimentalement.

L'étude réalisée pour ce stage m'a permis d'améliorer mes compétences dans le domaine de la simulation thermique grâce à l'utilisation d'un logiciel grandement utilisé dans les secteurs industriels ainsi que de la recherche, TRNSYS. J'ai pu également découvrir certaines fonctionnalités d'un logiciel similaire, EnergyPlus. J'ai également pu appréhender la lecture de plan de construction sur logiciel CAO tel que Autocad et réaliser une simulation complète en 3 dimensions de la maison passive sur le logiciel Google SketchUp.

Les résultats obtenus sont en accord avec les résultats attendus. Mise à part quelques degrés d'écarts entre les différents modèles, la forme est identique et les erreurs relevées sont principalement dues aux bases de données météo qui ne sont pas exactement les mêmes. En intégrant des données identiques, il serait intéressant de relever à nouveau les résultats de simulation pour les confronter aux valeurs réelles et ainsi évaluer la perfection du modèle créé durant ce stage.

De nombreuses perspectives existent pour continuer cette étude. Dans un premier temps, il serait très intéressant d'intégrer les données météorologiques de janvier à mai



2014 afin de comparer plus efficacement les résultats obtenus. D'un point de vue numérique, il serait intéressant de comparer ces résultats à ceux d'un autre logiciel de simulation thermique, comme EnergyPlus. Il serait également possible de modifier certains systèmes thermiques tel que le couple puits canadien/ MVHR, afin de le substituer par une pompe à chaleur géothermique (système installé dans la maison jumelle). On pourrait également y intégrer d'autres types d'énergies renouvelables, tels qu'une éolienne ou une chaudière à biomasse. Modifier la géographie de la simulation et observer ce modèle de maison passive dans des conditions différentes, par exemple dans des zones plus ensoleillées ou plus froides.

## Bibliographie

- [1] Observ'ER, Fondation Energies pour le Monde, quinzième inventaire, *La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde*, Collection chiffres et statistiques, Edition 2013
- [2] Ren 21, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, *Renewables 2014 Global Status Report*, 2014 , 214 pages
- [3] E. ANNUNZIATA, M. FREY, F. RIZZI, ENERGY, *Towards nearly zero-energy buildings: The state-of-art of national regulations in Europe*, 2012, Istituto di Management, Italy
- [4] NIELSEN Steffen, MOLLER Bernd, ENERGY, *Excess heat production of future net zero energy building within district areas in Denmark*, 2012, Aalborg University, Denmark
- [5] CAMPEANU Virginia, PENCEA Sarmiza, Conference Economic Scientific Research, ESPERA, 2013, *Renewable energy sources in Romania*, Institute for World Economy, Romania
- [6] C. IONESCU, CIEM, *HVAC solutions for the passive houses from university politehnica of Bucarest*, 2011
- [7] HARALD Drück, *MULTIPOINT Store - Model, for TRNSYS*, Version 1.99F, March 2006, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW), Universität Stuttgart

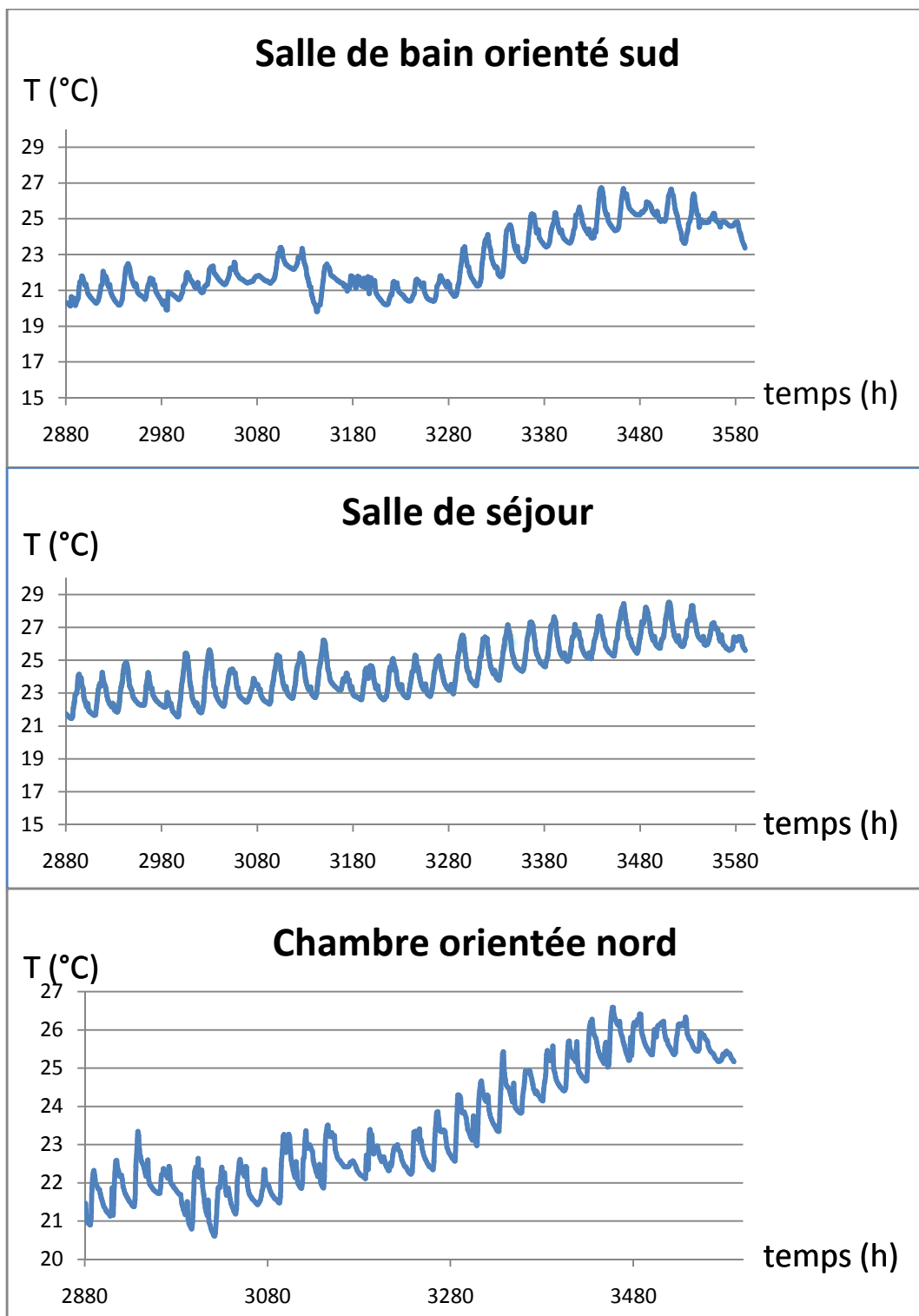
## **Table des annexes**

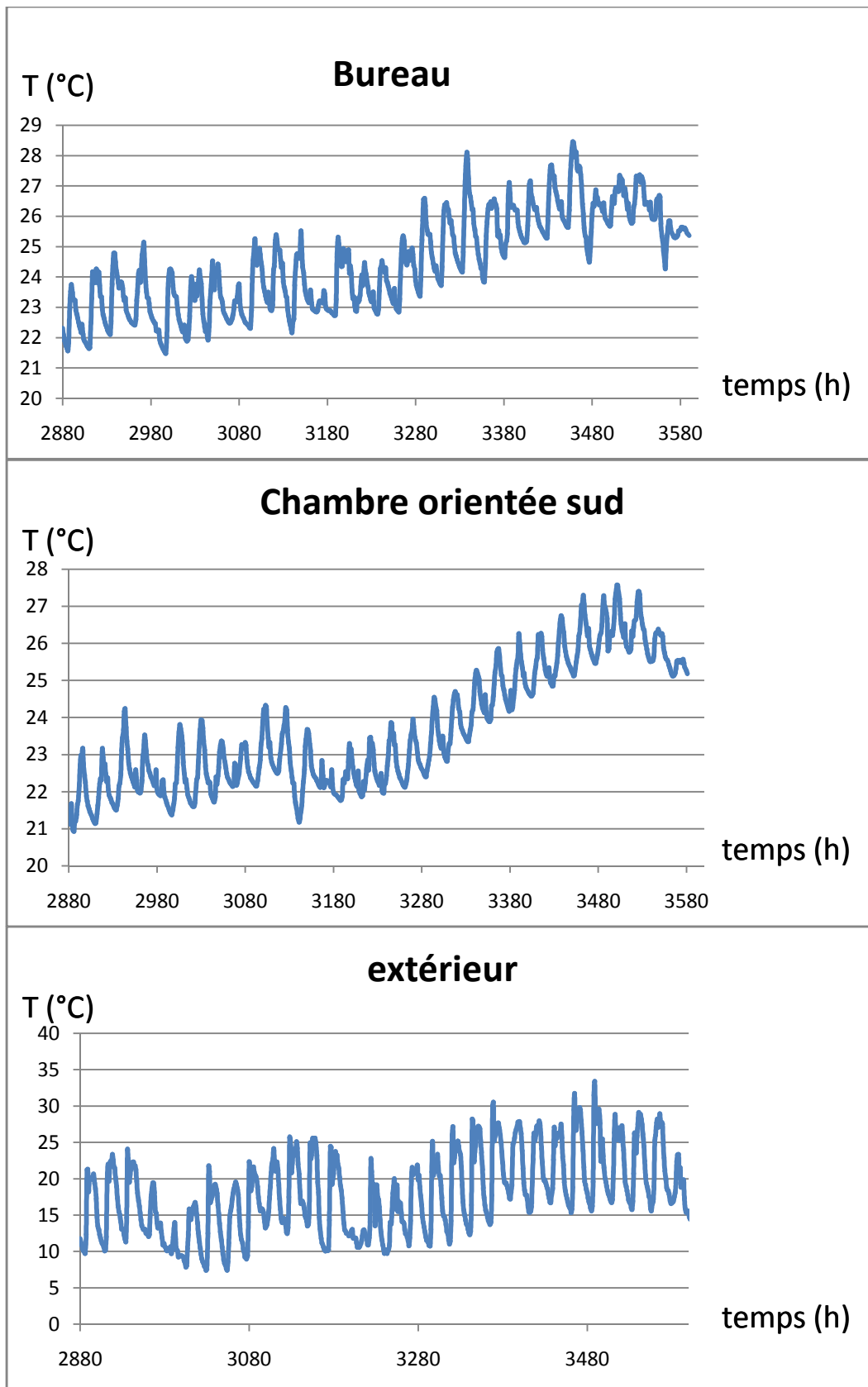
Annexe 1 : Tableau de données sur le puits canadien.....	58
Annexe 2 : Propriétés des matériaux de construction de la maison passive.....	59
Annexe 3 : Variation de température de différentes pièces au cours du mois de mai.....	61
Annexe 4 : Plans du rez-de-chaussée et de l'étage de la maison passive.....	62

## Annexe 1 : Tableau de données sur le puits canadien

Élément/ Type	Puits canadien/ Type 556
Longueur de tuyau enterré [m]	38
Profondeur du tuyau enterré [m]	2
Rayon intérieur du tuyau [mm]	184,4
Rayon extérieur du tuyau [mm]	200
Rayon du matériau de remblai [m]	0,5
Rayon du champ lointain [m]	1,5
Distance radial du nœud-1 [m]	0
Distance radial du nœud-2 [m]	0,0254
Distance radial du nœud-3 [m]	0,058
Distance radial du nœud-4 [m]	0,2
Densité du tuyau [kg/m <sup>3</sup> ]	946
Densité du remblai [kg/m <sup>3</sup> ]	1800
Densité du sol [kg/m <sup>3</sup> ]	1800
Densité du fluide [kg/m <sup>3</sup> ]	1,22
Chaleur spécifique du tuyau [kJ/kg.K]	1,545
Chaleur spécifique du remblai [kJ/kg.K]	1,34
Chaleur spécifique du sol [kJ/kg.K]	1,34
Chaleur spécifique du fluide [kJ/kg.K]	1
Conductivité thermique du tuyau [W/m.K]	0,28
Conductivité thermique du remblai [W/m.K]	1,7
Conductivité thermique du sol [W/m.K]	1,7
Coefficient de convection entre le fluide et le tuyau lors du fonctionnement [W/m <sup>2</sup> .K]	8
Coefficient de convection entre le fluide et le tuyau au repos [W/m <sup>2</sup> .K]	4
Température moyenne en surface [°C]	10,6
Amplitude de la température de surface [°C]	12
Débit en entrée du puits canadien [kg/h]	201,3

Annexe 2 : Variation de température de différentes pièces  
au cours du mois de mai





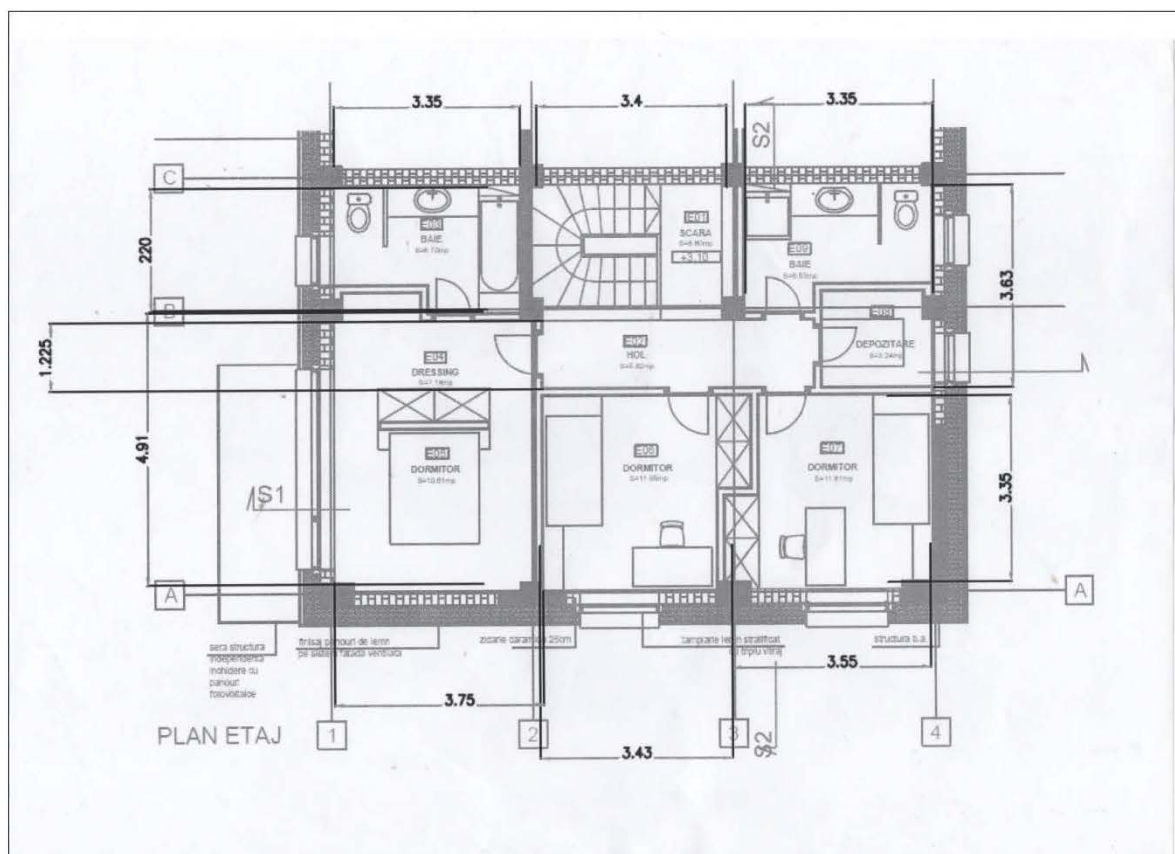
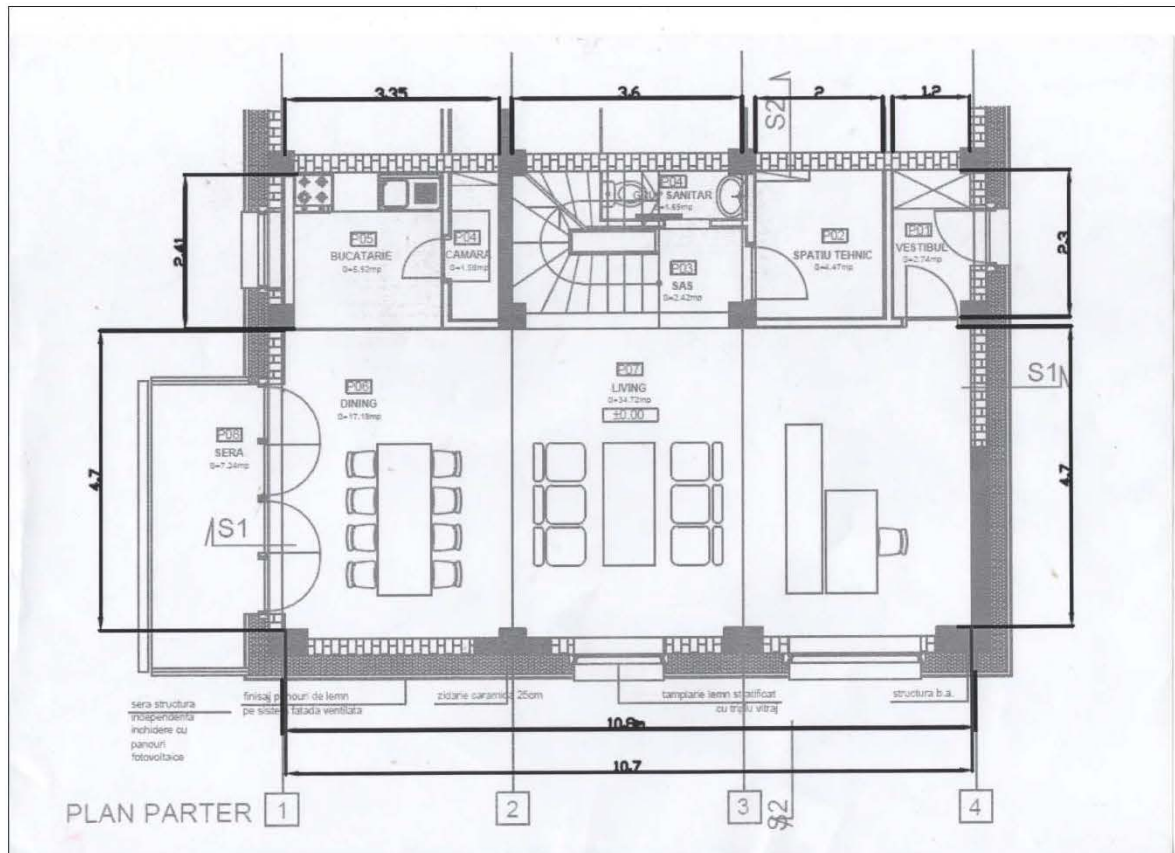
### Annexe 3 : Propriétés des matériaux de construction de la maison passive

Name	Material									
	P.Ext: tencuiala	P.Ext: beton celular Yton	P.Ext: vata minerala	P.Ext: izolatie	Acp: tencuiala	Acp: beton armat	Acp: vata minerala	Acp: izolatie	Pd: Parchet	Pd: placa OSB
Roughness	MediumSmooth	MediumRough	MediumSmooth	MediumRough	VerySmooth	MediumRough	MediumSmooth	MediumRough	Smooth	MediumRough
Thickness [m]	0.022	0.25	0.1	0.3	0.022	0.13	0.1	0.3	0.022	0.008
Conductivity [W/m.K]	0.8	0.27	0.04	0.061	0.8	1.74	0.04	0.061	0.2	0.13
Density [kg/m3]	1600	2300	140	500	2400	2300	140	500	890	680
Specific Heat [J/kg.K]	1000	1000	800	800	840	1000	800	800	2100	1700
Thermal Absorptance	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Solar Absorptance	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Visible Absorptance	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7

Name	Material									
	Pd: mortar armatura siacur	Pd: EPS	Pd: beton armat	Pd: polistiren extrudat	Pd: mortar armatura siacur	P.com: tencuiala	P.com: caramida	P.com: tencuiala2	Tavan	Tavan: iz.fonica
Roughness	MediumRough	MediumSmooth	MediumRough	MediumRough	MediumRough	VerySmooth	MediumRough	VerySmooth	VerySmooth	Rough
Thickness [m]	MediumRough	MediumSmooth	MediumRough	MediumRough	MediumRough	VerySmooth	MediumRough	VerySmooth	VerySmooth	Rough
Conductivity [W/m.K]	0.05	0.15	0.12	0.18	0.05	0.022	0.25	0.022	0.17	0.03
Density [kg/m3]	1.1	0.04	1.74	0.04	1.1	0.8	0.8	0.8	0.16	0.04
Specific Heat [J/kg.K]	2200	18	2300	35	2200	1600	700	1600	500	45
Thermal Absorptance	700	1000	1000	1400	700	1000	800	1000	840	840
Solar Absorptance	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Visible Absorptance	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7

Legende					
P.Ext	mur exterior	beton armat	beton armé	polistiren extrudat	polystyrene extrudé
tencuiala	plâtre	Pd	sol	P.com	mur commun
beton celular Yton	béton cellulaire Yton	Parchet	parquet	caramida	brique
vata minerala	laine minérale	placa OSB	planche OSB	Tavan	plafond
izolatie	isolation	mortar armatura siacur	mortar reinforced simple	iz.fonica	isolation phonique
Acp	toit	EPS	polystyrene expensé		

## Annexe 4 : Plans du rez-de-chaussée et de l'étage de la maison passive





## **Index des tables**

Table 1 : Production d'énergie renouvelable par pays et par source.....	10
Table 2 : Attractivité des sources d'énergies renouvelables en Roumanie (RES).....	13
Table 3 : Distribution régionale du potentiel de RES en Roumanie.....	14
Table 4: Input parameters of the theoretical model.....	16
Table 5 : Données nécessaires à la modélisation.....	29
Table 6 : Données correspondantes au ballon de stockage.....	32
Table 7 : Données correspondantes au capteur solaire.....	33

## Table des figures

Figure 1 : Logo UPB.....	6
Figure 2 : Plan du campus universitaire politehnica.....	6
Figure 3 : Production mondiale d'électricité.....	7
Figure 4 : Production d'électricité mondiale d'origine renouvelable, hors hydraulique.....	8
Figure 5 : Production mondiale des agglomérés de bois.....	8
Figure 6 : Capacité hydraulique mondiale totale en 2011.....	9
Figure 7 : Capacité mondiale totale du chauffage solaire et du photovoltaïque.....	9
Figure 8 : Capacité de l'énergie en 2011.....	9
Figure 9 : Les différentes énergies dans la production électrique française.....	12
Figure 10: Gisement géothermique français.....	12
Figure 11: Gisement solaire français.....	13
Figure 12: Schéma du système HVAC de la maison passive.....	15
Figure 13: Influence de l'efficacité thermique sur la longueur du tube.....	18
Figure 14: Influence de la longueur du tube sur la température de l'air en sortie d'EAHX.....	18
Figure 15: Ventilation de l'habitat.....	19
Figure 16: Schéma de principe de la VMC double flux.....	19
Figure 17: Influence de la longueur de tube sur la température de sortie du MHHR.....	21
Figure 18: variation des dépenses annuelles en fonction de l'efficacité thermique du tube.....	22
Figure 19: Configuration du tube de l'EAHX de la maison "Politehnica".....	22
Figure 20: Schéma de fonctionnement de TRNSYS.....	27
Figure 21: Installation des panneaux solaires sur la maison passive.....	29
Figure 22: Modélisation sous le logiciel TRNSYS.....	30
Figure 23: Puissance produite par les panneaux photovoltaïques au cours d'une année.....	31
Figure 24: Schéma hydraulique d'une installation solaire standard avec ballon sanitaire bivalent.....	32
Figure 25: Schéma de modélisation sous TRNSYS du chauffe eau solaire.....	33
Figure 26: Schéma du MULTIPORT store. ....	35
Figure 27: Courbe de fonctionnement à 5kg/h.....	35
Figure 28: Courbe de fonctionnement à 30 kg/h.....	35
Figure 29: Courbe de fonctionnement à 20 kg/h.....	36
Figure 30: Schéma des températures relevées dans la maison passive de l'UPB.....	37
Figure 31: Schéma de modélisation sous TRNSYS du couple puits canadien/ MVHR.....	38
Figure 32: Températures aux différents points du système pour 1 an.....	39
Figure 33: Comparaison au mois de mai des températures de sortie du puits canadien.....	40
Figure 34: Schéma de construction des zones de la maison passive sous Google SketchUp.....	42
Figure 35: Schéma représentatif des liaisons interzones.....	43
Figure 36: Fenêtre de création du "Layer Type" Manager.....	44
Figure 37: Fenêtre d'information des surfaces 'Airmode'.....	45
Figure 38: Schéma de la maison passive sous TRNSYS.....	46
Figure 39: Courbes de températures des pièces.....	46
Figure 40: Evolution des températures en 3D.....	47
Figure 41: Evolution des températures extérieures réelles de mai 2014.....	48
Figure 42: Evolution des températures extérieures modélisées de mai 2014.....	49
Figure 43: Evolution des températures dans la maison au cours du mois de mai.....	50
Figure 44: Evolution des températures dans la chambre sud au cours du mois de mai.....	51
Figure 45: Températures réelles du couple puits canadien/ MVHR.....	52
Figure 45: Températures réelles du couple puits canadien/ MVHR.....	52
Figure 46: Températures simulées du couple puits canadien/ MVHR.....	52

## **RÉSUMÉ**

L'objectif de ce stage a été de modéliser une maison expérimentale, dite "passive", construite à la faculté d'énergétique de l'université polytechnique de Bucarest. Celle-ci a pour caractéristique principale d'être plus indépendante énergétiquement qu'une maison "classique". En effet, elle dispose d'éléments comme un panneau solaire thermique, qui produit de l'eau chaude par énergie solaire, ou encore un puits canadien qui fait office de chauffage en hiver et de climatisation en été, en échangeant les calories de l'air entrant dans la maison avec la terre à 2m de profondeur.

Grâce à TRNSYS, un logiciel de simulation dynamique thermique et à Google SketchUp, un logiciel de modélisation en 3 dimensions, nous avons cherché à représenter le plus fidèlement possible cette maison passive, en y modélisant les différents flux thermiques présents et en simulant les températures de chacune des pièces de l'habitation au cours de l'année. Nous avons également modélisé les différents équipements thermiques qui lui sont rattachés : puits canadien, MVHR, panneaux solaire thermique/photovoltaïques, ballon de stockage. Des comparaisons ont pu être effectuées entre les résultats récupérés par simulation et ceux obtenus expérimentalement grâce aux capteurs installés dans la maison passive.

**MOTS CLÉS :** Energie renouvelable, maison passive, puits canadien, TRNSYS, panneau solaire, système de récupération de chaleur,...

## **DYNAMICS SYSTEM MODELING OF A LOW-ENERGY HOUSE IN ROMANIA**

### **SUMMARY**

The aim of this internship was to model an experimental house, said "passive", built at the energetic faculty of the polytechnic university of Bucharest. This one is mainly more independent than other "classical" houses. In fact, it has different elements like a thermal solar panel, which products hot water by solar energy, or a Canadian well which permits to heat during the winter or refresh during the summer, in exchanging calories of the home inlet air with the ground at 2m deep.

Thanks to TRNSYS, a thermal dynamic simulation software and to Google SketchUp, a 3D modeling software, we have found to represent the more faithfully as possible this house, in modeling different thermal flows, and in simulating temperature of each rooms during the year. We have also modeled different thermal equipments which are attached to it: Canadian well, MVHR, thermal and photovoltaic solar panels, storage tank. Comparisons have been made between simulation experimental results thanks to sensors which are installed in the passive house.