

LABORATOIRE DE COSMO-ÉNERGÉTIQUE



30 route de Lézébel  
29500 ERGUÉ GABERIC  
tél. 02 98 59 57 34  
[http ://delestage.org](http://delestage.org)

Siret 350 357 455 00020  
NAF 743B

Diagnostic cosmo-énergétique  
pour un habitat héliotrophe  
de l'habitation de M. X  
Cas réel en Finistère Sud  
rendu anonyme pour exemple

réalisé par Nicole JACQUIN

12 août 2007

## Résumé

M. X a contacté notre laboratoire pour tenter de résoudre le problème des consommations excessives d'électricité de sa résidence, chauffée par convecteurs électriques plus cheminée avec insert bois, avec piscine de jardin chauffée par pompe à chaleur sol-eau fonctionnant également à l'électricité. S'agissant d'un problème avant tout thermique et non spécifiquement électrique, nous lui avons proposé de réaliser un diagnostic énergétique d'ensemble, selon la démarche de notre diagnostic cosmo-énergétique pour un habitat « héliotrophe » décrite dans la présentation accompagnant le présent rapport.

Mais au cours de ma visite d'examen, le 2 février 2007, j'ai été frappée par le phénomène de soulèvement puis affaissement saisonnier du terrain recouvrant le réseau de source froide de la pompe à chaleur, et par la proximité apparente de ce réseau avec le bassin de la piscine. Cette atypie révélait un dysfonctionnement important qui méritait un examen spécifique, plus approfondi que celui du diagnostic global.

Le présent diagnostic, tout en suivant les différentes phases de notre *diagnostic cosmo-énergétique* :

- 1) définition des besoins,
- 2) inventaire des ressources disponibles pouvant y répondre,
- 3) examen et bilan des moyens existants,
- 4) prescription des remèdes et solutions ;

s'attache plus particulièrement au bilan énergétique solaire/sol afin de replacer ce phénomène atypique dans son contexte et tenter de lui apporter une solution exemplaire en terme de maîtrise de l'énergie.

# Table des matières

## I Diagnostic

<b>Constats et Bilans</b>	<b>5</b>
<b>1 Définition des besoins indépendamment des moyens de les satisfaire.</b>	<b>6</b>
1.1 Eau . . . . .	6
1.1.1 Besoins des personnes . . . . .	6
1.1.2 Lavage . . . . .	7
1.1.3 Procédés . . . . .	7
1.1.4 Jardin . . . . .	8
1.1.5 Besoin total en eau retenu . . . . .	8
1.2 Chaleur . . . . .	8
1.2.1 Chauffage des locaux . . . . .	8
1.2.2 Chauffage de l'eau sanitaire . . . . .	9
1.2.3 Cuisson . . . . .	9
1.2.4 Réfrigération (conservation des aliments) . . . . .	9
1.2.5 Chauffage de la piscine . . . . .	9
1.2.6 Récapitulatif des besoins de chaleur . . . . .	17
1.3 Éclairage . . . . .	17
1.4 Force motrice . . . . .	18
1.5 Information . . . . .	18
<b>2 Ressources disponibles pour satisfaire les besoins.</b>	<b>20</b>
2.1 Eau . . . . .	20
2.1.1 Réseau . . . . .	20
2.1.2 Nappe phréatique . . . . .	20
2.1.3 Pluie . . . . .	20
2.2 Chaleur . . . . .	20
2.3 Éclairage . . . . .	20
2.4 Force motrice . . . . .	20
2.5 Information . . . . .	21

<b>3</b>	<b>Moyens actuellement mis en œuvre pour satisfaire les besoins.</b>	<b>22</b>
3.1	Eau . . . . .	22
3.1.1	Moyens . . . . .	22
3.1.2	Consommations . . . . .	22
3.2	Chaleur . . . . .	22
3.2.1	Chauffage maison . . . . .	22
3.2.1.1	Moyens . . . . .	22
3.2.1.2	Consommations : . . . . .	23
3.2.2	ECS . . . . .	25
3.2.3	Buanderie . . . . .	25
3.2.4	Piscine . . . . .	25
3.2.4.1	Moyens . . . . .	25
3.2.4.2	Consommations . . . . .	29
3.3	Éclairage . . . . .	29
3.4	Force motrice . . . . .	30
3.5	Information . . . . .	30
<b>4</b>	<b>Bilan énergétique et synthèse</b>	<b>31</b>
4.1	Couverture des besoins calculés par les consommations effectives. . . . .	32
<b>II</b>	<b>Étude des Améliorations.</b>	<b>35</b>
<b>5</b>	<b>Améliorations des systèmes existants</b>	<b>36</b>
5.1	Comportement des utilisateurs (gérer) . . . . .	36
5.1.1	Votre abonnement EDF . . . . .	36
5.1.2	Suivi des consommations . . . . .	36
5.2	Programmations (supprimer les temps inutiles) . . . . .	37
5.2.1	Déshumidifieur serre piscine . . . . .	37
5.2.2	Chauffage de la maison . . . . .	37
5.2.3	Chauffage de la piscine . . . . .	37
5.2.4	Délestages électriques . . . . .	38
5.3	Régulations (supprimer les quantités inutiles) . . . . .	39
5.3.1	Éclairage . . . . .	39
5.3.2	Chauffage de la maison . . . . .	39
5.3.3	Chauffage de la piscine . . . . .	41

<b>6</b>	<b>Changements de procédés et/ou d'énergie</b>	<b>43</b>
6.1	Chauffage piscine . . . . .	43
6.2	... et maison . . . . .	43

Première partie

Diagnostic  
Constats et Bilans

# Chapitre 1

## Définition des besoins indépendamment des moyens de les satisfaire.

Il ne s'agit pas ici de formaliser des besoins en consommation des différents vecteurs énergétiques tels que l'électricité, les combustibles, le vent, le Soleil... mais de répertorier les besoins réels en terme de service énergétique rendu et de les quantifier en matière de :

### 1.1 Eau

Un milliard de personnes soit 1 humain sur 6 n'a pas accès à l'eau potable. Et 2,4 milliards ne disposent d'aucun d'assainissement. Mais chez nous, nous utilisons l'eau potable aussi bien pour des usages sanitaires que pour arroser les espaces verts, laver la voirie dont les surfaces ne cessent d'augmenter au détriment des zones humides qui constituent la ressource en eau. Or, avec l'industrialisation cette ressource est de plus en plus menacée par les pollutions, et rendre potable cette eau polluée devient de plus en plus compliqué et de plus en plus coûteux. Il devient de plus en plus nécessaire de l'économiser.

Les usages de l'eau déclarée potable strictement prescrits par les services d'hygiène concernent l'alimentation (boisson, cuisine, vaisselle) et le corps (toilette et linge, ce qui est contestable). Tout le reste, des eaux vannes (principal problème de l'assainissement) aux lavages divers et arrosage de plantes peuvent se faire à l'eau brute, notamment de pluie correctement recueillie et stockée.

Les besoins domestiques en eau potable dépendent avant tout des personnes occupantes, et secondairement d'équipements exceptionnels utilisant l'eau comme agrément.

Fournir de l'eau potable a aussi un coût en énergie. Avec le système industriel actuel, il faut consommer environ **1 kWh** pour délivrer **1 m<sup>3</sup>** au robinet.

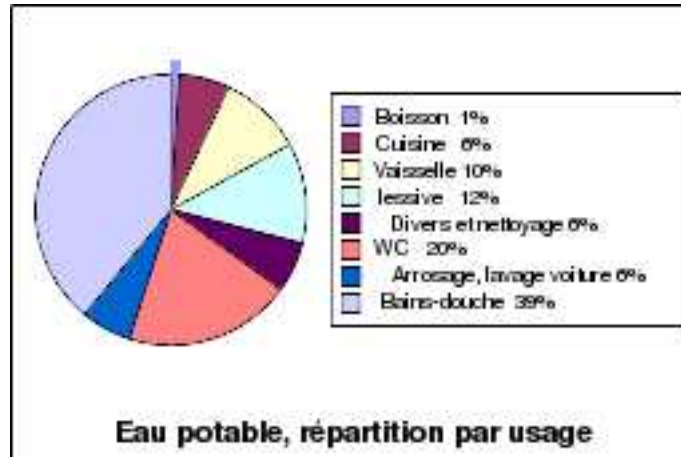
#### 1.1.1 Besoins des personnes

2 adultes permanents + 1 enfant de 3 ans en après-midi et le mercredi.

Réceptions le week-end, jusqu'à 10 (?)



- Les besoins humains de base en eau potable sont de 40 litres par personne et par jour, soit ici environ 100 litres par jour et 35 m<sup>3</sup> par an.
- La consommation moyenne d'eau potable constatée (c'est à dire au delà du besoin réel) par français est de 150 à 200 litres par jour. En première approche, hors toute économie, nous retiendrons la fourchette basse, soit 150 litres par personne,
  - ici, 300 litres par jour qui se répartissent en moyenne statistique comme suit :



Le besoin qualitatif en « potabilité » de l'eau va en diminuant du haut en bas du diagramme.

- Boisson et cuisine : 21 litres par jour.
- La vaisselle : 30 litres par jour réchauffée à 55°C par la production d'ECS ou par lave-vaisselle, eau réglementairement potable.
- Les soins du corps représentent donc environ 120 litres par jour qui, s'ils doivent être de qualité inoffensive ne requièrent strictement pas la qualité dite « potable ». Par contre, la totalité de cette eau doit être réchauffée à 40°C (voir besoins de chaleur ci-dessous).
- Le second poste de consommation c'est les chasses d'eau qui devraient représenter ici 60 litres et qui ne sont en aucun cas un besoin en eau potable<sup>1</sup>. Surtout qu'à cette consommation peut s'ajouter de 80 à plus de 600 litres par jour en cas de fuite.

### 1.1.2 Lavage

- La lessive représente 36 litres par jour (eau froide et/ou chaude selon machine). de même que les quelques 20 litres consacrés aux nettoyages et arrosages divers. Contrairement à un avis récent du Conseil Supérieur d'Hygiène public de France (CSHPF) et que nous jugeons assez irresponsable en regard du problème actuel de l'eau, rien ne justifie pour cet usage la qualité potable dont la continuité n'est par ailleurs pas garantie par le réseau public.

### 1.1.3 Procédés

Il s'agit ici de la piscine qui dans la statistique ci-dessus rentre dans les 6% d'usages divers en extérieur. S'agissant d'un écart par rapport à cette moyenne, le besoin dépassera ici les 18 litres que cela représente. Sur la base de 100 litres par 30 semaines de lavage du filtre, on retiendra 30 m<sup>3</sup> par an de renouvellement d'eau par lavage du filtre. Avec les 5,34 m<sup>3</sup> d'évaporation du bassin calculée en 1.2.5 ci-dessous, la piscine devrait consommer 35 m<sup>3</sup> d'eau par an.

<sup>1</sup>Voire pas un besoin en eau du tout en supprimant les eaux vannes et en passant aux toilettes à litière biomatrisée (TLB), ce qui résout du même coup (et du même coût) la quasi totalité des problèmes d'assainissement. Voir [http://www.eautarcie.com/Eautarcie/Page\\_de\\_garde.htm](http://www.eautarcie.com/Eautarcie/Page_de_garde.htm)

### 1.1.4 Jardin

Pas de besoin d'arrosage identifié ici ?

### 1.1.5 Besoin total en eau retenu

Besoins	litres/jour	m <sup>3</sup> /an	dont m <sup>3</sup> substituable
Cuisine	21	7	
ECS à 55°C	30	10	
ECS à 40°C	120	40	
WC	60	20	20
Lavages	50	15	15
Piscine	163	35	35
<b>Total</b>	<b>444</b>	<b>127</b>	<b>70</b>

## 1.2 Chaleur

### 1.2.1 Chauffage des locaux

Ce besoin est représenté par les déperditions calorifiques de la maison. Vu la grande surface habitée et l'occupation qui en est faite, nous avons divisé la maison en deux zones de programmes différents pour le calcul de ces besoins de chauffage :

- Zone de vie à occupation permanente (au Sud)
- Zone à occupation épisodique (au Nord)

La séparation entre ces zones se situe au niveau du couloir d'accès à la salle de gym (voir plan annexe 1). Les besoins de la première ont été calculés sur un programme de chauffage en continu, soit 5000 équivalent heures par an à température légale de 19 °C [1]. La seconde sur la base d'une inoccupation supérieure à 48 heures consécutives à la température de 8°C [2] durant la semaine, et chauffé à 19°C le week end. Les déperditions calculées sur ces bases sont les suivantes :

(voir plan annexe 1)	zones		
	permanente	épisodique	ensemble
Surface sol (shon)	201,8 m <sup>2</sup>	127,7 m <sup>2</sup>	329,5 m <sup>2</sup>
Volume net (vhon)	524,8 m <sup>3</sup>	332,1 m <sup>3</sup>	856,8 m <sup>3</sup>
Surface chauffée (sh)	180,0 m <sup>2</sup>	113,6 m <sup>2</sup>	293,5 m <sup>2</sup>
Volume habitable (vh)	467,9 m <sup>3</sup>	295,2 m <sup>3</sup>	763,2 m <sup>3</sup>
Surface enveloppe (parois ext.)	561,5 m <sup>2</sup>	357,7 m <sup>2</sup>	919,1 m <sup>2</sup>
Coefficient de forme (1)	1,07	1,08	1,07
Déperdition moyenne (pour 7,3°C) (2)	5,2 kW	4,4 kW	9,6 kW
Déperdition crête (pour -4°C) (3)	9,7 kW	8,2 kW	18,0 kW
Coefficient G (4)	1,0 W.m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>	1,3 W.m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>	1,1 W.m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
heures de chauffage à 19°C / hiver	5000	1500	
Besoin annuel de chauffage (2)	26 133 kWh	6 535 kWh	32 668 kWh

1) Ce coefficient est le rapport de la surface de parois extérieures au volume net qui permet de mesurer la qualité thermique de la forme du bâtiment par rapport à la forme thermique idéale qui est hémisphérique. Pour ce volume net, le coefficient de référence est de 0,7.

2) C'est la puissance de chauffage à fournir pour la température extérieure moyenne de la saison de chauffe (7,3 °C pour la station météo de Lan-Bihoué). C'est cette puissance qui, multipliée par le nombre d'heures de chauffage de la saison, permet de connaître le besoin annuel de consommation de chauffage en kWh.

3) Cette puissance est celle nécessaire pour chauffer à température de confort par les plus grands froids (-4°C référence Lan-Bihoué). Elle indique la puissance de chauffage à installer.

4) Ancien coefficient volumique d'isolation thermique pour réglementer la construction neuve. À la date de construction de la maison (1986), ce coefficient devait être au maximum de 1,2  $W.m^{-3}.°C^{-1}$ . Il a été remplacé par un coefficient  $U_{bat}$  depuis la réglementation thermique 2000.

Les besoins de chauffage sont donc ici de 111 kWh/m<sup>2</sup> d'énergie finale, ce qui est moyen pour une construction de 1986. Mais toujours trop pour les couvrir par du chauffage électrique.

### 1.2.2 Chauffage de l'eau sanitaire

Selon besoins en eau calculés en 1.1.1 ci-dessus :

10 m <sup>3</sup> à 55 °C	334 kWh
40 m <sup>3</sup> à 40 °C	2 007 kWh
Total	2 341 kWh

### 1.2.3 Cuisson

0,4 kWh x 2600 repas = 1040 kWh (thermiques).

### 1.2.4 Réfrigération (conservation des aliments)

Consommation de référence classe A, 220 l froid, 110 l congel : 361 kWh par an.

### 1.2.5 Chauffage de la piscine

**Remarque préliminaire sur l'humidité :** L'essentiel de la gestion d'énergie d'une piscine, avec des variantes selon qu'il s'agit d'une piscine d'intérieur ou d'extérieur, tourne autour de la maîtrise de l'humidité. Ici nous avons une piscine d'extérieur couverte d'un abri amovible léger en polycarbonate. Ce qui n'en fait en aucun cas une piscine d'intérieur qui nécessite de gérer les condensations pour préserver la construction. Il est physiquement exclu d'éviter la condensation sur l'abri en polycarbonate. Cela nécessiterait d'abaisser le point de rosée en mi-saison à 7 °C (voir figure 1.1), soit d'assécher l'air à 6 grammes d'eau par kg d'air sec, ce qui correspond à une humidité relative de 35% une fois cet air chauffé à 22°C.

Une telle siccité de l'air va à son tour accroître l'évaporation du bassin qui consomme de l'énergie. Et c'est un cercle vicieux, ainsi que je l'ai expliqué dans ma note du 2 avril 2007 remise en annexe 2. À l'inverse, la condensation sur le polycarbonate est un déshumidifieur naturel gratuit

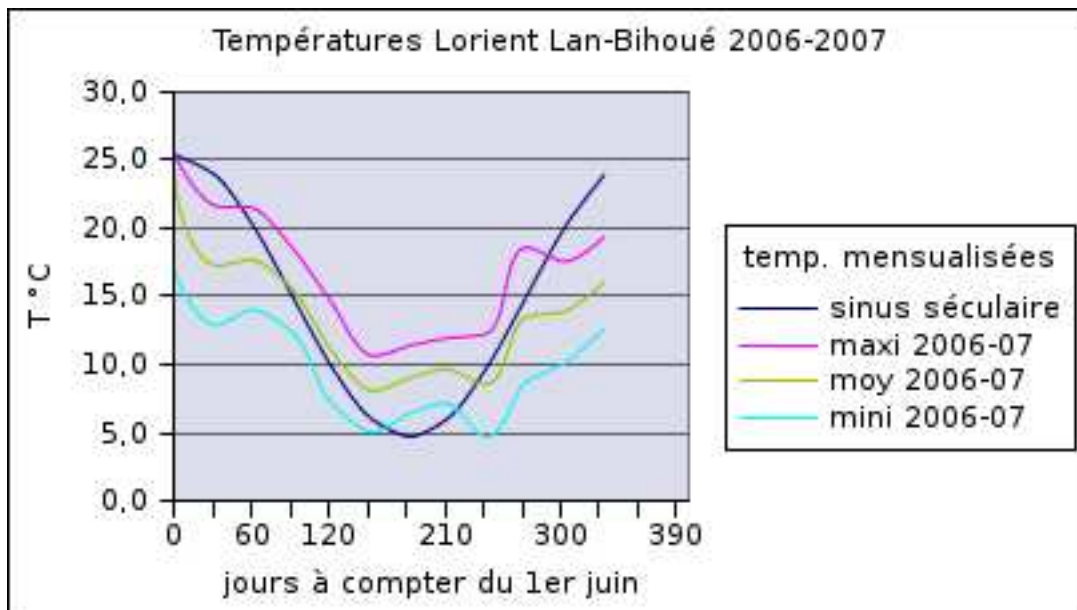


FIG. 1.1 – Températures relevées par la station de Lan-Bihoué du 1er Juillet 2006 au 30 juin 2007. Les mini et maxi journaliers sont moyennés par mois. La ligne bleu est une sinusoïde entre ces mini et maxi moyens annuels pour linéariser la statistique (séculaire).

et récupère, en échauffant la paroi, la chaleur prise sur le bassin par l'évaporation. Les besoins réels de chauffage sont donc calculés à des conditions favorisant une humidité d'air maximum au dessus du bassin, qui est de toute façon régulée par cette condensation salutaire.

L'essentiel de la dépense de chauffage d'une piscine se produit en surface et une part généralement négligée vient des pertes par conduction dans le sol. Mais ici toutes les voies de déperditions méritent une attention particulière compte tenu de la sensibilité au vent pour les pertes en surface, et du bassin posé sur dalle sans isolation en fond de fouille pour les pertes par le sol. Ces pertes sont schématisées par les flèches en rouge sur la figure 1.2.

Elles se divisent en

- déperditions (D sur la fig.1.2) par les parois et fuites d'air de l'abri-serre,
- pertes du bassin par conduction dans le sol (Cs sur la fig.1.2). Cette flèche est à double sens car, nous allons le voir dans les résultats suivants, le sous-sol peut être plus chaud que le bassin et le flux de chaleur est alors inversé (récupération directe de chaleur solaire stockée dans le sol). En effet, en l'absence de perturbations locales, la température du sous-sol varie au cours de l'année autour de la même température moyenne qu'en surface, mais avec une amplitude qui diminue, et un déphasage qui augmente avec la profondeur par rapport à la surface (voir figure 3.2 au chapitre 3.2.4). La température moyenne annuelle du sous sol est donc ici de 13,6°C comme en surface, mais avec des écarts mensuels sensibles, d'où les besoins simulés ci-dessous mois par mois ;
- pertes du bassin de la chaleur latente contenue dans la vapeur d'eau (Ve sur la fig.1.2) emportée par l'air de renouvellement à l'extérieur, diminuée de la partie qui se condense éventuellement sur les vitrages (Vc) et qui contribue au chauffage de ceux-ci.

Les échanges de chaleur entre bassin et air de la serre ne sont pas des pertes mais des transferts de chaleur internes au système, l'élément le plus chaud servant au chauffage du plus froid. Mais leur calcul permet d'établir les températures responsables de ces pertes. Ce sont :

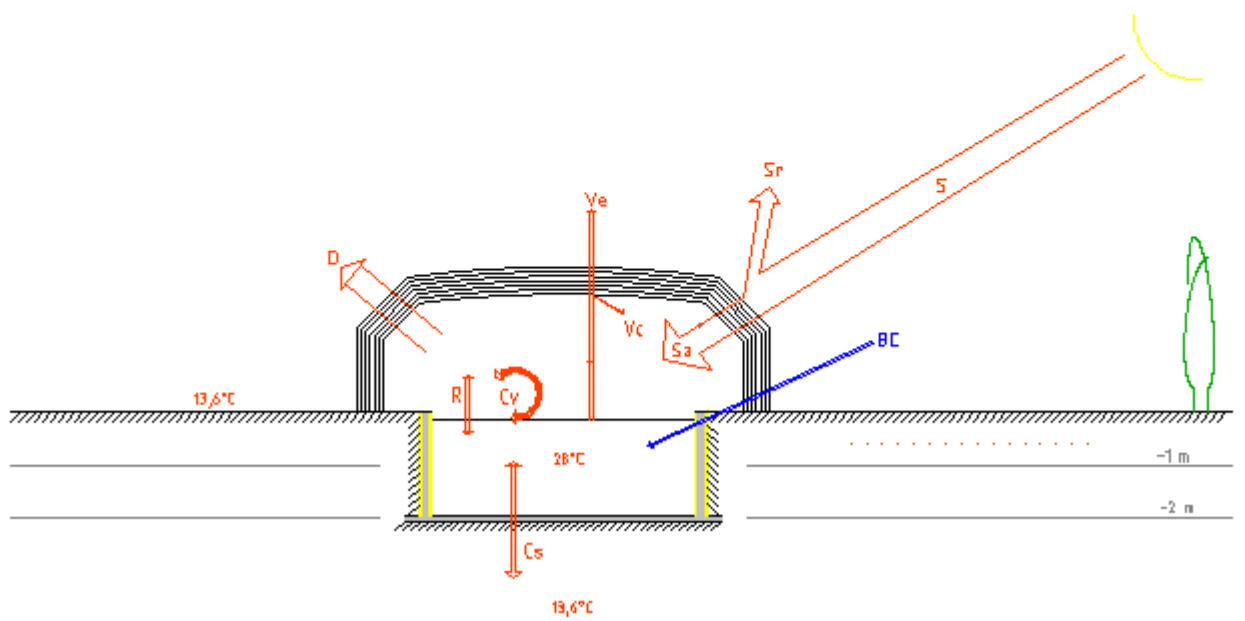


FIG. 1.2 – Différents flux de chaleur du bilan thermique de la piscine

- l'échange entre l'eau et l'air à la surface du bassin par conduction (réduit quand la couverture isolante est en place) et surtout par convection ( $C_v$  sur la fig.1.2) qui peut varier considérablement selon les courants d'air et la différence de température entre l'eau et l'air ;
- l'échange par rayonnement infrarouge ( $R$ ) entre le bassin et la structure, proportionnel à la différence des températures absolues élevées à la puissance quatre de ces deux corps ;
- et dans une bien moindre mesure, la chaleur sensible qu'a la vapeur d'eau qui se mélange à l'air.

Enfin, le flux solaire ( $S$ ) arrivant au sol dont une partie ( $S_r$ ) appelée albédo est réfléchi par la serre vers l'espace, et l'autre partie ( $S_a$ ) se trouvant piégée par effet de serre dans la piscine constitue l'apport solaire de son chauffage naturel. C'est cet apport solaire que ce diagnostic a pour objet d'optimiser au mieux. Nous avons figuré en bleu, sur la figure 1.2, le besoin d'énergie payante ( $B_c$ ) restant nécessaire après cette optimisation.

La caractérisation thermique au laboratoire de l'échantillon de sol prélevé le 30 mai (voir rapport d'essais en annexe.3) d'une part, et notre programme permettant de calculer l'ensoleillement au sol [3] d'autre part, nous ont permis de chiffrer mois par mois ces différents flux, par simulations sur la base des mêmes relevés de températures et humidité d'air (Lan-Bihoué 2006-2007) que ci-dessus.

Nous avons chiffré les besoins selon deux scénarios : le premier avec hivernage normal pour une piscine de plein air, de novembre à mars, afin de déterminer les besoins normaux dans le tableau 1.1 ; le second avec chauffage du bassin toute l'année, selon l'utilisation actuelle pour recoupement avec les consommations constatées, dans le tableau 1.2.

L'utilisation de la simulation est assez simple. La voici en suivant les numéros de ligne des tableaux :

1. on entre les heures d'utilisation de la piscine pour chaque mois, ou zéro si la piscine est à l'arrêt.
2.  $\theta_{bassin}^{\circ C}$  : sur cette ligne, le programme affiche la température du bassin, à la consigne fixée (ici  $28^{\circ}$ ) si la piscine est en fonctionnement. Il considère alors que cette température constante est obtenue grâce à un appoint d'énergie qui résultera du calcul en dernière ligne du tableau. Si la piscine n'est pas en fonctionnement, la température du bassin résulte du calcul des différents flux de chaleur avec son environnement auxquels elle participe.
3.  $\theta_{exter}^{\circ C}$  : c'est la même température moyenne mensuelle qui est représentée à la figure 1.1 et sert ici de base aux calculs.
4.  $\theta_{rose}^{\circ C}$  : idem pour la température de rosée, c'est à dire la température à laquelle l'air sera saturé de l'humidité qu'il contient (condensation, brouillard, pluie...). Cette température représente l'humidité spécifique moyenne, nécessaire au programme pour calculer l'évaporation sur une base réelle (généralement estimée forfaitairement).
5.  $\theta_{sol} - 1m$  : c'est la température dans le sol à une profondeur de 1 mètre. Nous l'avons calculée (résultat figure.3.2) à partir des températures extérieures moyennes mensuelles (ligne 3) et des caractéristiques du sol mesurées (voir annexe 3). Les pertes du bassin par les parois sont calculés selon cette température.
6.  $\theta_{sol} - 2m$  : idem à une profondeur de 2 mètres pour le calcul des échanges par le fond du bassin.

flux fig.1.2, codes unités	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Année
heures util	0	0	0	30	62	75	80	80	60	31	0	0	418
$\theta_{bassin} \text{ } ^\circ\text{C}$	10,74	11,29	11,93	28	28	28	28	28	28	28	14,29	11,20	
$\theta_{exter} \text{ } ^\circ\text{C}$	9,07	9,66	8,56	13,46	13,91	16,05	23,86	17,27	17,66	15,47	10,99	8,07	13,6
$\theta_{rose} \text{ } ^\circ\text{C}$	7,2	7,6	5,9	9,5	11,1	13,6	15,8	13,7	15,4	13,6	8,8	6,2	
$\theta_{sol} - 1m$	7,14	6,71	8,06	10,84	14,47	17,75	20,01	20,48	19,12	16,21	12,69	9,32	13,6
$\theta_{sol} - 2m$	10,3	9,1	9,1	10,2	12,3	14,7	16,9	18,1	18,1	16,9	14,8	12,4	13,6
$\theta_{serre} \text{ } ^\circ\text{C}$	11,46	13,34	14,41	24,92	27,37	31,40	35,56	29,41	27,85	22,04	14,05	10,52	
Sa kWh	2061	3049	5200	8077	10521	12615	11206	9967	7777	3800	2297	1801	78372
Cs kWh	98,0	251,3	336,7	1943	1747	1417	1219	1089	1071	1270	-31,2	-91,1	10324
Ve kWh	11,3	14,1	22,1	348,7	546,9	583,2	562,1	618,3	445,1	312,5	25,5	18,9	3509
Vc kWh	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D kWh	1902	2640	4650	8803	10697	11806	9291	9636	7831	5224	2348	1948	76776
Bilan kWh dissipés	2011	2905	5009	11095	12991	13807	11073	11344	9348	6806	2343	1876	90608
Bilan kWh solaires	49	3049	5200	8077	10521	12615	11206	9967	7777	3800	2297	1801	76360
Bc besoins kWh appoint	0	0	0	3019	2470	1191	0	1377	1571	3007	0	0	12364

TAB. 1.1 – Bilan énergétique de la piscine hivernant de Novembre à Mars.

7.  $\theta_{serre}^{\circ C}$  : température finale de l'air dans la serre résultant des différents échanges avec l'extérieur et le bassin auxquels elle contribue (calculée par itérations).
8. Sa kWh : fraction de l'énergie solaire (S) en kWh qui est « piégée » par effet de serre à l'intérieur de la serre.
9. Cs kWh : chaleur échangée entre le sous-sol et le bassin par les parois et le fond. C'est généralement une perte quand le bassin est chauffé artificiellement. Mais ce peut être un apport du sol au bassin en absence de ce chauffage. Les chiffres sont dans ce cas négatifs.
10. Ve kWh : chaleur de vaporisation de l'eau du bassin emportée à l'extérieur avec l'air si elle n'est pas condensée avant. On l'appelle chaleur latente car elle n'élève pas la température de l'air qui la contient tant qu'elle est sous forme de vapeur, cette chaleur est « restituée » (échauffement de la matière) au point de condensation.
11. Vc kWh : chaleur de condensation restituée quand l'humidité ligne 10 se condense, généralement sur les vitres, avant de quitter la pièce. Ces kWh viennent donc en déduction (apport) des précédents (perte) dans le bilan d'énergie.
12. D kWh : Déperdition totale de la serre à travers les parois et le renouvellement d'air par les fuites suivant l'écart de température de l'air entre la serre et l'extérieur.
13. Bilan kWh dissipés : c'est le total des déperditions  $Cs + Ve - Vc + D$  (voir fig.1.2), c'est à dire la chaleur à fournir pour obtenir les conditions de températures figurant dans les tableaux.
14. Bilan kWh solaires : c'est la chaleur gratuite fournie par le Soleil pour contribuer aux besoins de la ligne 13. Noter que c'est la seule énergie responsable des températures d'eau du bassin et d'air de la serre obtenues dans les colonnes où la ligne 1 est à zéro, c'est à dire en période d'arrêt de la piscine.
15. Bc besoins kWh appoint : besoins en chauffage « artificiel », c'est la différence entre les deux lignes précédentes en période de fonctionnement de la piscine. En période d'arrêt, cette différence est négative, ce qui n'a pas de sens car on ne peut « exploiter » l'excédent d'énergie solaire inutilisée, la valeur est alors simplement mise à zéro.
16. Enfin en dernière ligne (cas du chauffage permanent), la puissance nécessaire à appliquer.

### Commentaire analytique des tableaux 1.1 et 1.2 :

- Les températures du sous-sol mettent évidence le déphasage dans le temps par rapport à la surface : de 1 à 2 mois à la profondeur de 1 mètre, il est de 2 à 3 mois à 2 mètres. L'amplitude (écart entre les températures extrêmes) décroît avec la profondeur : la variation de  $8,1^{\circ}$  en février à  $23,9^{\circ}$  en juillet en surface n'est plus que de  $9,1^{\circ}$  en février-mars à  $18,1^{\circ}$  en août-septembre à 2 mètres de profondeur (voir fig.3.2).
- Les températures de base, donc celles calculées, partent de moyennes mensuelles et ne tiennent pas compte des extrêmes. Cela signifie
  - que lorsqu'on constate une températures dans la serre de  $14,4^{\circ}$  en mars pour  $8,6^{\circ}$  extérieurs et sans chauffer le bassin, ce ne sont que les températures moyennes du mois ;
  - que la température instantanée a varié autour de cette moyenne temporelle,
    - avec des maximas bien supérieurs mais de courte durée en périodes d'ensoleillement, généralement brèves sous nos cieux (j'ai relevé plus de  $40^{\circ}C$  dans la serre le 30 mai alors que l'air extérieur était à  $14,9^{\circ}$  et le sol en sub-surface au bord du dallage extérieur à  $18,1^{\circ}C$ ),



flux fig.1.2, codes unités	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	Année
heures util	31	28	31	30	62	75	80	80	60	31	30	31	569
$\theta_{bassin} \text{ } ^\circ C$	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	
$\theta_{exter} \text{ } ^\circ C$	9,07	9,66	8,56	13,46	13,91	16,05	23,86	17,27	17,66	15,47	10,99	8,07	13,6
$\theta_{rose} \text{ } ^\circ C$	7,2	7,6	5,9	9,5	11,1	13,6	15,8	13,7	15,4	13,6	8,8	6,2	
$\theta_{sol} - 1m$	7,14	6,71	8,06	10,84	14,47	17,75	20,01	20,48	19,12	16,21	12,69	9,32	13,6
$\theta_{sol} - 2m$	10,3	9,1	9,1	10,2	12,3	14,7	16,9	18,1	18,1	16,9	14,8	12,4	13,6
$\theta_{serre} \text{ } ^\circ C$	15,46	17,13	18,06	24,92	27,37	31,40	35,56	29,41	27,85	22,04	17,18	14,45	
Sa kWh	2061	3049	5200	8077	10521	12615	11206	9967	7777	3800	2297	1801	78372
Cs kWh	2058	1965	2162	1944	1748	1417	1219	1089	1071	1270	1476	1817	19237
Ve kWh	366,1	330,7	383,2	348,7	546,9	583,2	562,1	618,3	445,1	312,5	345,3	374,9	5217
Vc kWh	84,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	109,3	194
D kWh	5077	5355	7545	8803	10697	11806	9291	9636	7831	5224	4757	5068	91091
Bilan kWh dissipés	7417	7651	10090	11095	12991	13807	11073	11344	9348	6806	6578	7151	115350
Bilan kWh solaires	-5356	3049	5200	8077	10521	12615	11206	9967	7777	3800	2297	1910	71064
Bc besoins kWh appoint	12773	4602	4890	3019	2470	1191	0	1377	1571	3007	4281	5240	44420
puissance chauffage correspondante	17	7	7	4	3	2	0	2	2	4	6	7	

TAB. 1.2 – Bilan énergétique de la piscine chauffée toute l'année.

- et des minimas nocturnes plus modérés du fait de l'inertie du sol (bassin et margelle) et de l'effet de serre. Ce que l'on peut constater en comparant les mois de mars et novembre sur le tableau 1.1 : la température moyenne de la serre est la même à 0,4° près pour ces deux mois. Mais cela est dû nettement aux pointes d'ensoleillement en mars quand les températures extérieure et du bassin sont plus basses, alors qu'en novembre la température extérieure est plus douce de 2,5° et celle de la serre est pratiquement à la température du bassin lui même également plus chaud de 2,4 degrés par rapport à mars. C'est l'effet de l'inertie du sol.
- Là où cette médiation par mois qui ne tient pas compte des extrêmes fausse le plus le calcul, c'est sur la récupération de la chaleur latente de vaporisation par condensation sur les vitres (ligne 11 "*Vc kWh*" des tableaux 1.1 et 1.2). Cette condensation se produit en effet quand ces vitres sont les plus froides. Le fait qu'il n'y ait pas condensation à température moyenne (la ligne "*Vc kWh*" TAB.1.1 est à 0 toute l'année) ne reflète pas les condensations qui peuvent se produire aux températures minimales. Mais cette erreur va premièrement dans le sens d'une minimisation de l'énergie récupérée et constitue donc une marge de sécurité. Deuxièmement cet écart est réduit par l'effet de sol que nous venons de montrer et qui « aplanit » les minimas.

Troisièmement, la condensation (récupération d'énergie) est plus sensible quantitativement au terme d'humidité absolue de l'air qui la produit que de la température du corps où elle se produit. Or cette humidité de l'air est élevée par l'évaporation du bassin qui dépense de l'énergie. En d'autres termes ce n'est pas parce qu'une remise à pourcentage égal est plus importante sur une dépense plus élevée qu'on dépensera moins en définitive (cqfd). On peut le vérifier sur les tableaux : il n'y a pas de récupération de kWh sur la condensation en ne chauffant pas le bassin l'hiver (TAB.1.1) alors qu'il en apparaît en janvier et décembre si on chauffe toute l'année (TAB.1.2). Pourtant, pour une même température extérieure ces deux mois, la température intérieure de la serre est beaucoup plus élevée (15,5° contre 10,5 à 11,5°) et la température intérieure de ses parois l'est aussi et donc le point de rosée. C'est que le fait de chauffer le bassin fait passer la dépense d'évaporation (ligne 10 - "*Ve kWh*" des tableaux) de 11,3 kWh (gratuits!) à 366,1 kWh en janvier et de 18,9 kWh (gratuits) à 374,9 kWh en décembre. Soit un « surcoût » de 711 kWh moins 194 kWh récupérés (TAB. 1.2) soit 517 kWh d'énergie payée pour seulement 2 mois d'évaporation.

**Au bilan final, les besoins annuels d'énergie d'appoint de la piscine sont :**

Besoins normaux	12 364 kWh	TAB. 1.1
Besoins régime actuel	44 420 kWh	TAB. 1.2
Différence	32 056 kWh	

Ce constat m'a amenée à faire une troisième simulation pour voir quelles températures d'air et d'eau dans la piscine seraient obtenues sans chauffage artificiel du tout. Le résultat est présenté par le tableau 1.3. Les colonnes donnant les températures de serre et de bassin résultantes sont encadrées par celles des températures les plus influençantes, la température extérieure et celle du sol à -2 mètres.

Les tableaux 1.1 et 1.2 faisaient déjà ressortir une absence de besoin de chauffage en juillet. On voit que sans chauffage la température moyenne obtenue ce mois est en effet de 27,16° pour l'eau et 35,5° pour l'air. On voit également que la température ambiante de la serre dépasse 25° de

TAB. 1.3 – Températures moyennes mensuelles obtenues sans chauffage artificiel

Mois	$\theta_{exter}^{\circ C}$	$\theta_{serre}^{\circ C}$	$\theta_{bassin}^{\circ C}$	$\theta_{sol - 2m}^{\circ C}$
Janvier	9,07	11,5	10,74	10,3
Février	9,66	13,3	11,29	9,1
Mars	8,56	14,4	11,93	9,1
Avril	13,46	22,4	16,88	10,2
Mai	13,91	25,5	19,59	12,3
Juin	16,05	30,4	23,42	14,7
Juillet	23,86	35,5	27,16	16,9
Août	17,27	28,5	23,88	18,1
Septembre	17,66	26,7	22,82	18,1
Octobre	15,47	19,9	18,47	16,9
Novembre	10,99	14,0	14,29	14,8
Décembre	8,07	10,5	11,20	12,4

mai à septembre et permettrait presque une utilisation sans chauffage de la piscine pendant cette période pour peu qu'on accepte une température « spartiate » de bassin de 23°C.

Ceci permet au moins de mesurer le coût de chaque degré de confort supplémentaire qui augmente exponentiellement avec la température.

Ces résultats sont également représentés sous forme graphique à la figure 1.3. On voit nettement que la température d'eau du bassin est influencée par le sol et l'ambiance, la courbe en bleu étant toujours entre celle de l'ambiance en orange et celle du sous-sol en maron, la température du bassin ne devenant supérieure à celle de l'ambiance que lorsque le sous-sol devient plus chaud que celle-ci. Ces trois courbes se croisent en novembre et en janvier.

On remarque par ailleurs que l'aire délimitée par les courbes des température de la serre (orange) et du bassin (bleu) représente l'énergie solaire captée directement par effet de serre. Elle est donc inférieure à la dissipation du sol vers l'atmosphère de fin octobre à mi-janvier.

### 1.2.6 Récapitulatif des besoins de chaleur

Postes	besoin kWh
chauffage maison	32 668
eau chaude sanitaire	2 341
cuisson	1 040
réfrigération	361
chauffage piscine	12 364
<b>Besoin chaleur kWh/an</b>	<b>48 774</b>

## 1.3 Éclairage

Le besoin s'estime sur la base de 120 lux uniformes soit 3 W/m<sup>2</sup> avec les éclairages performants actuels. Soit ici selon l'usage :

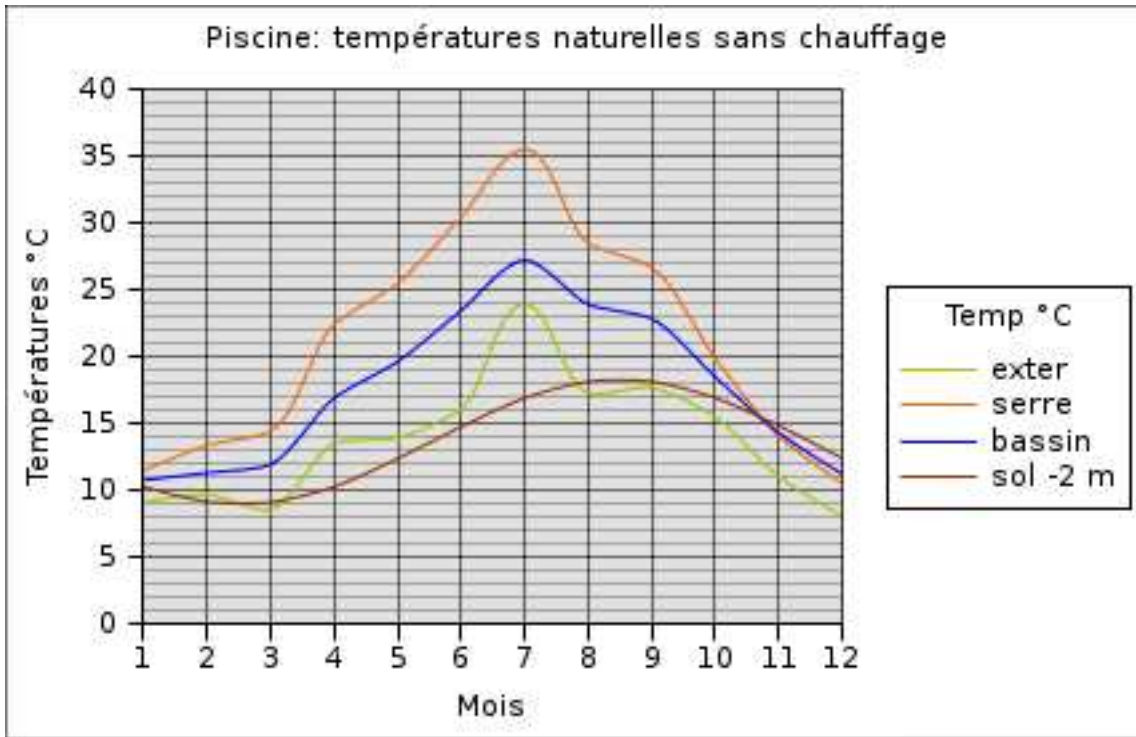


FIG. 1.3 – Températures moyennes mensuelles dans l'eau du bassin et l'air de la serre résultantes de l'utilisation de la seule énergie solaire par le sol et la serre.

zone	surface	durée équiv.	besoin kWh
vie	140 m <sup>2</sup>	800 heures	336
annexes	130 m <sup>2</sup>	400 heures	156
Total	270		492

## 1.4 Force motrice

Il s'agit essentiellement de la pompe de filtration de la piscine qui sert également de transport au chauffage de l'eau. Ce temps de chauffage est supérieur au temps de recyclage imposé par la stricte filtration et détermine donc le besoin de consommation de la pompe. Ce temps est de 420 heures par an (TAB. 1.1) de fonctionnement de la pompe de 1,37 kW, soit **575 kWh** par an.

La circulation du fluide frigorigène de la pompe à chaleur répond à un besoin de chauffage et non strictement de force motrice.

De même la production de froid (réfrigérateurs) peut se faire sans travail mécanique, c'est donc strictement un besoin de chaleur (négative en l'occurrence), voir 1.2.4.

Les transports ne sont pas pris en compte dans le présent diagnostic.

## 1.5 Information

**Télévision, consoles etc** « 1 h de TV par jour apporte 167 calories à la ration quotidienne... »

*Selon une étude américaine publiée dans « Science » d'avril 2002, le petit écran rend agressif au delà d'une heure par jour.*

*« Les jeunes américains passent dès l'âge de 8 ans jusqu'à 6 heures par jour devant la télévision... »*

*Selon les données Médiamétrie de 2001, la TV était allumée dans chaque foyer Français pendant 5 heures et demie par jour, week end inclus.*

Ne disposant pas personnellement d'appareil de TV, j'ai toujours du mal avec ce genre d'information quand je cherche à estimer le « besoin normal » quotidien de cet anesthésiant énergiphage. Quand peut-on trouver le temps de vivre, manger, dormir, travailler, jardiner, s'émerveiller... en étant plus de 5 heures par jour sous perfusion ? Est-ce vraiment un besoin ?

Une recherche considérant la multiplication des multimédias, notamment à travers l'Internet, d'une part et le remplacement des écrans cathodiques par les écrans plats, beaucoup moins « sales », d'autre part ; m'ont amenée à la conclusion que le besoin global de tous ces médias devait se ramener à une moyenne de 2 heures par jour équivalentes à l'allumage d'un appareil à écran cathodique. Soit :

**105 W x 2h x 335 jours = 70 kWh**

## Chapitre 2

# Ressources disponibles pour satisfaire les besoins.

### 2.1 Eau

#### 2.1.1 Réseau

Syndicat d'alimentation en eau potable Beausoleil les Eaux

#### 2.1.2 Nappe phréatique

Non envisagé ici

#### 2.1.3 Pluie

320 m<sup>2</sup> de toitures x environ 1 m = 320 m<sup>3</sup>/an.

### 2.2 Chaleur

- Bois de chauffage local vendu à la corde
- insolation au sol : 945,4 kWh/m<sup>2</sup> [3]
- Vent : Non étudié.

### 2.3 Éclairage

Nocturne uniquement : réseau électrique GRD-EDF. Abonnement 30 kVA double tarif EDF.

### 2.4 Force motrice

Idem

## 2.5 Information

Idem

**N.B.** Nous n'avons pas recensé les ressources éolienne ni photovoltaïque ici pour nous attacher au problème de la piscine.

## Chapitre 3

# Moyens actuellement mis en œuvre pour satisfaire les besoins.

### 3.1 Eau

#### 3.1.1 Moyens

- Branchement et comptage commun avec l'entreprise de (bureaux, ateliers, véhicules)
- 2 salles de bains (+ douche piscine prise sur buanderie).
- 1 buanderie, voir équipements en chaleur 3.2.3 Buanderie.
- 1 piscine de jardin. Bassin 10 x 5 m 69 m<sup>3</sup>, fond béton, murs béton + 2x 4 cm polystyrène. Abri polycarbonate, voir plan en annexe 4.

#### 3.1.2 Consommations

du 8/11/2005 au 2/11/2006 elle a été de **1149 m<sup>3</sup> pour 1355 €**, soit 1,18 €/m<sup>3</sup>. Ce prix est largement en dessous du prix moyen du m<sup>3</sup>.

La consommation est élevée mais en absence de sous-comptages, il est impossible de faire la part des consommations de la maison et de l'entreprise.

### 3.2 Chaleur

#### 3.2.1 Chauffage maison

##### 3.2.1.1 Moyens

Insert bois dans cheminée centrale sur séjour et salle à manger (voir plan annexe 1). Puissance estimée 12 à 14 kW.

**Radiateurs électriques marque Atlantic**



localisation	puissance	régul	remarque
cuisine			convecteur tj éteint
séjour	2000 W	stop	radiant
séjour	1000 W	stop	radiant
salle d'eau	2500 W		radiant
Chambre	1000 W	éco	radiant
dressing	1000W	stop	radiant
Bureau	750 W	éco	radiant
chambre enfant	750 W	éco	radiant
salle de gym	750 W	éco2	radiant
couloir	1000W	eco4	radiant
2 <sup>me</sup> salle d'eau	2500W		
2 <sup>me</sup> chambre	1500 W	stop	radiant
bar	1000 W	stop	radiant
billard	2000 W	stop	Acova Fassane h 2m
Total	17 kW		

Régulation centrale (depuis 1 an $\frac{1}{2}$ ) Delta Dore GP4 Driver 120 CPL.

Zone 1 délestage 6-9h ; 11-14h ; 18-22h

Zone 2 relance 19-22h

**Total chauffage** : 30 kW, dont 17 électrique

### 3.2.1.2 Consommations :

**Bois** : environ 1 corde (que nous prendrons à 3 stères) par hiver. Sauf hiver 2006-2007 : 3 cordes.

**Électricité** : La présence d'un sous-compteur pour la maison permet de la prendre en compte.

Il alimente bien sûr les autres usages électriques de la maison ci-dessous, mais le chauffage étant le principal, nous le mettons ici, d'autant que toute consommation électrique dans la maison est un apport de chaleur et devrait être prise en compte par une bonne régulation. Malheureusement les sous-compteurs ont été relevés seulement en juillet et septembre 2003 et lors de nos visites du 2 février et du 30 mai 2007. les factures EDF relevées vont quant à elles de décembre 2003 à décembre 2006, avec quelques incohérences (à votre avantage) en décembre 2003 et juin 2004 entre les consommation facturées et celles ressortant des index compteurs indiqués sur les factures. Le fait que le gestionnaire de réseau (GRD) ne distingue pas explicitement index relevé et index estimé n'aide pas à s'y retrouver.

## Répartition consommations électriques

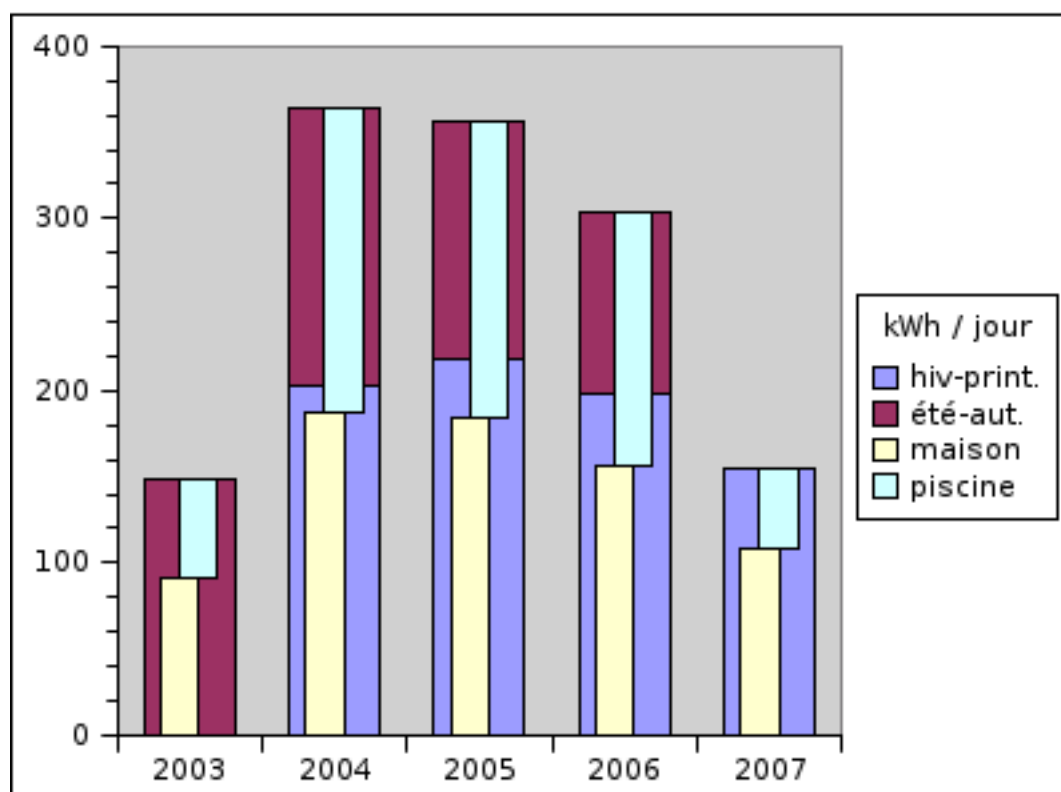


FIG. 3.1 – Ventilation des consommations électriques entre maison et piscine et par saison selon les différents relevés compteur.

Date	nb jours	Consommations					
		totale kWh	kWh jour	Maison		Piscine	
				kWh	%	kWh	%
11/09/03	69	10298	149	6303	61%	3995	39%
18/06/04	182	37029	204				
21/12/04	186	29790	160				
22/06/05	183	39904	218				
21/12/05	182	25226	139				
20/06/06	181	35839	198				
20/12/06	183	19464	106				
02/02/07	1240	224994	181	116285	52%	108709	48%
30/05/07	117	18140	155	12754	70%	5386	30%

En ramenant ces consommations à la journée, on peut comparer des périodes climatiquement similaires mais de longueur différentes des différents relevés des compteurs EDF et divisionnaires, ce qui est figuré sur l'histogramme figure 3.1.

La répartition des consommations entre la maison et la piscine était de 60/40 à l'été 2003 et est passée à 70/30 au printemps 2007, donc deux saisons différentes. Pendant la longue période sans relève des sous-compteurs de 2003 à 2007, cette répartition a été pratiquement de 50/50 toutes saisons confondues. Ce qui montre un comportement irrégulier en fonction des différents aléas (en plus du doute sur le comptage ci-dessus).

Par contre, et l'on constate une baisse de consommation électrique tant sur le second semestre

2006 (relevé EDF) qu'au premier semestre 2007 (relevé divisionnaires) qui comparée à la part piscine qui tombe à 30% pourrait s'expliquer par la période d'arrêt de celle-ci à cause des problèmes (à voir selon durée effective de celui-ci). Mais on a consommé 3 cordes de bois au lieu d'une les années précédentes. Chaleur supplémentaire qu'une bonne régulation aurait dû prendre en compte.

1 corde de bois, soit environ 5000 kWh PCI donne environ 3000 kWh utiles. On estimera en première approche les consommations de chaleur utile (hors gaz cuisine) comme suit :

saison	kWh élec	kWh bois	kWh utiles
2003-2004	64395	3000	67400
2004-2005	68956	3000	72000
2005-2006	61473	3000	64500
2006-2007	47680	9000	56680

### 3.2.2 ECS

- Salle d'eau CE Thermor 200 litres 2200 W
- Garage CE Atlantic 150 litres 1800 W (neuf 1,5 an).
- Buanderie Atlantic 100 litres 1200 W

**Total ECS :** 5,2 kW, tout électrique. Consommations voir 3.2.1.2.

### 3.2.3 Buanderie

1 sèche-linge Whirpool 6 kg 2500W

lave-linge Electrolux arthur martin 2300W (+ ballon ECS voir 3.2.2).

**Total buanderie :** 4,8 kW électriques. Consommations voir 3.2.1.2.

### 3.2.4 Piscine

#### 3.2.4.1 Moyens

- couverture automatique du bassin par tapis de lattes PVC flottantes ( $U$  estimé :  $3,4 W.m^2.K^{-1}$ ).
- déshumidifieur 230V 12 A dans la serre sur hygostat d'ambiance consigne 60-70% (quelle utilité? voir 1.2.5)
- compresseur PAC : 3100 W pour 11 kW fourni à  $-5 +40^{\circ}C$ .

Bassin chauffé par pompe à chaleur « ÉCO THERMIE SOFATH ».

Ce système est dérivé de la pompe à chaleur solaire/eau en vogue dans les années 1980 suivant l'idée d'utiliser le sol comme capteur solaire et sa capacité d'accumulateur thermique pour « lisser » ainsi les variations saisonnières. En effet la température du sol fluctue annuellement autour d'une valeur moyenne, avec une amplitude maximum en surface et qui diminue avec la profondeur pour se stabiliser à cette valeur moyenne à une profondeur d'environ 12 mètres.

La figure 3.2 montre pour chaque mois le gradient de température moyenne dans le sol depuis la surface jusqu'à une profondeur de 10 m. Ces températures sont calculées ici sur une linéarisation

des relevés météo locaux (sinusoïde entre les mini et maxi moyens mensuels, courbe en bleu sur la figure 1.1). En effet, la température en surface et dans le sol varie toujours sur un an selon une sinusoïde autour de la même température moyenne et avec une amplitude s'amortissant avec la profondeur jusqu'à se stabiliser à cette température moyenne constante à une profondeur qui varie un peu avec les caractéristiques thermiques du sol.

Mais cette moyenne est constante, elle sert d'ailleurs aux géophysiciens à suivre les évolutions réchauffement-glaciation successives de la Planète. Cette température moyenne est actuellement de 15°C pour l'ensemble de la Planète. Il se trouve ici que la sinusoïde de la figure 1.1 évolue entre le mini moyen mensuel de 4,7°C (mars 2007) et le maxi de 25,4°C (juillet 2006) autour d'une moyenne de 15°C également. Alors que la température moyenne journalière pour la même période a été de 13°,61. Nous avons donc simplement décalé de 15 à 13,61°C cette moyenne en conservant la même amplitude de 20,7°C pour calculer la diffusion dans le sol des températures mensuelles ainsi « sécularisées » sur la base de la diffusivité thermique du sol de votre jardin mesurée au laboratoire (voir rapport de mesure annexe 3). Ainsi, on voit sur le diagramme :

- que pour une variation de la température du sol en surface entre 3,26°C en janvier à 23,96°C en juillet,
- à –50cm, profondeur des capteurs de la pompe à chaleur, cette amplitude est encore de 5,3 à 21,9°C, c'est à dire de 16,6°C avec un déphasage pratiquement nul (aucune des courbes de températures mensuelles ne se croisent entre la surface et cette profondeur) ;
- alors qu'à –4 mètres, cet écart n'est plus que de 4,2°C mais surtout le maximum de 15,7° a lieu en octobre, et le minimum de 11,5° en avril, soit un déphasage de 3 mois par rapport à la surface.

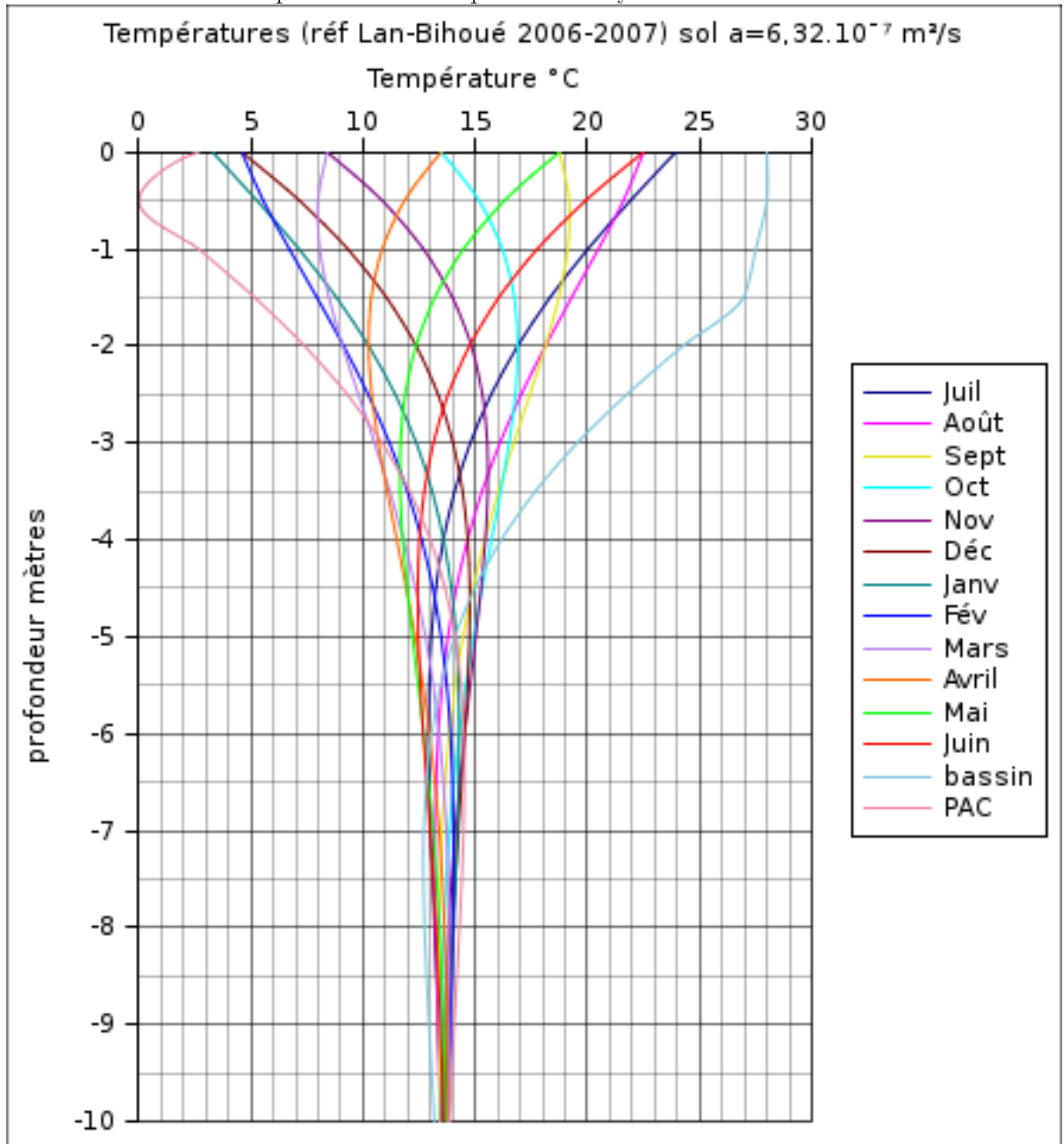
Cette dernière caractéristique peut être intéressante pour le chauffage d'une habitation (par le sol) où le besoin maximum est opposé dans le temps à l'ensoleillement sur des périodes relativement courtes, à condition de capter les calories à bonne profondeur. Cet intérêt semble beaucoup moins évident lorsqu'il s'agit de chauffer une piscine de jardin dont le besoin coïncide avec les périodes de meilleur ensoleillement et pour lesquels le chauffage solaire direct est plus indiqué, d'autant que l'inertie du bassin est plus efficace que le sol pour amortir les alternances jour/nuit.

Placer le captage à une si faible profondeur fait donc perdre l'instantanéité du rayonnement direct qui devrait être recherché en l'occurrence, sans pour autant tirer profit de l'inertie du sol à cause de cette trop faible profondeur. Ce qui est aggravé ici par le fait que la pelouse sous laquelle est enterré réseau de capteurs, coincée entre une haie et la piscine, se trouve à l'ombre une grande partie de la journée (voir plan annexe 4). Cette exigüité a d'ailleurs conduit à n'espacer les tubes de l'évaporateur que de 30 cm alors que la règle de l'art prescrit un minimum de 40 cm, ce qui conduit à une surface de sol trop faible par rapport à la puissance de soutirage installée.

Nous notons à ce sujet que le constructeur de ce système affirme dans sa publicité « *Il y a un trésor dans votre jardin : l'énergie du soleil, celle des eaux de pluie et du vent accumulées par la terre.* »

**C'est faux !** Ni la pluie ni le vent n'apportent d'énergie dans le sol, la seule énergie apportée au sol est l'énergie solaire pour 168 W/m<sup>2</sup> (235 W/m<sup>2</sup> rentrent dans l'atmosphère qui en absorbe 67 W/m<sup>2</sup> qui ne parviennent pas au sol) qui se retrouveront au final rayonnés vers l'espace pour un bilan global nul d'où résulte la température moyenne du globe de 15°C vue ci-dessus. Comme une

FIG. 3.2 – Répartition des températures moyennes mensuelles dans le sol



rivière qui coule, le flux solaire ne se stocke pas, on peut capter son énergie au passage mais pas la retenir sous peine de faire monter le niveau de la rivière ou la température<sup>1</sup>, tout en asséchant ou en refroidissant en aval. La pluie et le vent ne font donc que modifier localement les échanges thermiques entre le sol et l'atmosphère, mais encore une fois ce bilan global est nul : les entrées et les sorties s'annulent autour de cette température moyenne de 15°C.

L'énergie apportée au sol par la pluie à un moment donné lui a été retirée un moment d'avant en un autre lieu (évapotranspiration). C'est donc un transfert de chaleur de sol à sol qu'elle effectue refroidissant le lieu d'où elle s'est évaporée pour échauffer (ou refroidir selon le moment) celui où il pleut, créant des écarts de température dans l'espace et dans le temps, mais toujours autour de la même température moyenne terrestre de 15°C (du moins tant que le bilan radiatif de la Terre n'est pas perturbé par une modification de l'effet de serre par exemple). Le vent contribue à sa manière au même processus.

De même, prendre de la chaleur dans le jardin pour chauffer la maison avec une pompe à chaleur (en consommant de l'énergie nucléaire au passage), c'est reproduire thermiquement exactement le même processus que le cycle de la pluie mais à une échelle beaucoup plus petite. C'est à dire qu'il faudra à un moment donné restituer cette chaleur au sol, en respectant un cycle de régénération. Car on ne peut pas retirer du sol plus que les 168 W/m<sup>2</sup> qu'il reçoit en moyenne – c'est à dire beaucoup l'été et pratiquement rien en hiver . C'est pourquoi ni la puissance instantanée qu'on retire d'un m<sup>2</sup> de sol, ni le temps pendant lequel on « soutire » cette puissance **ne sont illimités**.

**Cette limite est infranchissable.** C'est pour avoir essayé de la franchir que le réseau de capteurs a pris en glace, ce qui a bloqué le système et fait gonfler la terre.

L'installateur est-il responsable ? peut-être pas s'il a cru de bonne foi en l'aporie du constructeur, dans la même publicité, selon laquelle « *La terre de votre jardin est un réservoir d'énergie illimité et inépuisable.* ». Mais ce qui est sûr, c'est que **cette publicité est doublement mensongère :**

- Non, cette réserve d'énergie n'est pas illimitée.
- Non, cette réserve d'énergie n'est pas inépuisable.

Nous venons de donner sa limite et vous avez expérimenté les effets de son épuisement par la révolte de la terre de votre jardin. L'énergie solaire elle même n'est pas illimitée. Elle est inépuisable à la seule condition de respecter la limite de son flux de 168 W par m<sup>2</sup> de planète Terre, constamment et aussi longtemps que l'espèce humaine ne se sabordera pas à sa surface.

Il reste que si la pluie, le vent, l'évapotranspiration sont des perturbations locales et momentanées des profils de température dans le sol et qui s'annulent dans la durée, la présence de la piscine chauffée constamment à 28°C et de la nappe de capteurs de la PAC constitue des perturbations locales qui, elles, sont permanentes.

Cette perturbation a donc été reportée figure 3.2, 28°C de 0 à -2m pour le bassin. On voit que la courbe (cyan droite) rejoint les autres, c'est à dire que la perturbation locale, à la verticale du bassin, s'annule à une profondeur de 4,25m en octobre jusqu'à 6,50m en mai-juin. À gauche du diagramme fig.3.2, la courbe PAC en rose représente la perturbation du réseau de capteurs à la verticale de celui-ci. Partant de 0°C à -50cm, elle produit une température de 2,7°C en surface pour une température extérieure moyenne de 13,6°C. En profondeur, elle refroidit le sol jusqu'à -2,70m en mars et à -6m en novembre-décembre.

---

<sup>1</sup>La désertification est une conséquence directe de la perturbation de l'échange thermique Soleil-Terre, notamment par les déforestations et autres détournements de flux à grande échelle.

Sur le tableau 1.2 de calcul des déperditions du chauffage du bassin toute l'année, on voit que la puissance à fournir par la PAC en Janvier est de 17 kW, alors qu'elle est donnée pour 11 kW pour des tubes à -5°C, donc pris en glace depuis longtemps. La puissance nécessaire continue d'augmenter avec le refroidissement du sol (20 kW à 0°C). La PAC tourne et ne pompe plus rien, le bassin refroidit...

Il faut noter enfin que la mode actuelle est de désigner ce système de chauffage sous le terme de « pompe à chaleur (PAC) géothermale », quand ce n'est pas simplement « géothermie », ce qui est abusif. En effet à faible profondeur (jusqu'à plusieurs centaines de mètres dans notre région) l'énergie stockée dans le sol provient entièrement du rayonnement solaire comme nous venons de le voir. La chaleur (fossile!) venant des profondeurs de la Terre n'y contribue que pour un dix millième de l'énergie solaire et est négligeable dans le bilan radiatif terrestre (ce qui repousse d'autant l'échéance de l'apocalypse). Nous préférons employer le terme de « PAC pédo-solaire » qui est plus exact pour désigner cette technique.

### 3.2.4.2 Consommations

Voir 3.2.1.2.

## 3.3 Éclairage

Localisation	m <sup>2</sup>	type	puis.W	#	$\frac{W}{m^2}$
cuisine	↓	halogène	50	2	↓
id plan travail	9,8	fluo	20	1	12,2
salle à manger	↓	halogène	50	8	↓
salle à manger	30	incand	100	1	16,7
séjour	↓	halogène	50	10	↓
séjour	47	incand	60	2	13,2
wc	2,5	halogène	50	1	20
dégagement	5,1	halogène	50	2	19,6
salle d'eau	11,3	halogène	50	7	31
chambre	25	halogène	50	5	10
dressing	17	halogène	50	5	14,7
bureau	10	halogène	50	3	15
chambre enfant	10,2	halogène	50	2	9,8
dégagement	6,2	halogène	50	2	16,1
salle gym	11,6	halogène	50	2	8,6
salle d'eau	↓	halogène	20	3	↓
salle d'eau	6,8	fluocompact	20	4	20,5
chambre amis	25	halogène	50	4	8
bar	9,7	halogène	50	2	10,3
billard	↓	halogène	50	6	↓
billard	39,3	fluo	36	6	13,1
Total	267		3646 W		13,7

**Extérieur :**

- 3 projecteurs halogènes x 300 W = 900 W
- 2 candélabres x 3 ballons x 100 W = 600 W

**3.4 Force motrice**

- pompe de filtration piscine 1,37 kW en marche permanente!
- sdb extension extracteur individuel commandé avec éclairage
- Réfrigérateur congélateur Wirpool armoire 2 portes

Voir consommation électrique en 3.2.1.2.

**3.5 Information**

- 4 combis TV Philips (salle à manger, bar, salle gym, chambre amis)
- Gde chambre 105W panoramique + décodeur + magnétoscope
- séjour 90 W + ampli antenne et Canal Satellite





## Chapitre 4

# Bilan énergétique et synthèse

### 4.1 Couverture des besoins calculés par les consommations effectives.

		eau	bois	élec.Mais.	élec.Pisc.		
Entrées totales		1 149 m <sup>3</sup>	9 000 kWh	26 224 kWh	21 000 kWh		
indice renouvelable		0,8	1	0,01	0,01	Taux Couvertu	
Besoins identifiés		Entrées réparties				global	renouv
Poste	quantité	eau	bois	élec.maison	élec.piscine		
eau piscine	35 m <sup>3</sup>	35 m <sup>3</sup>					
eau maison	92 m <sup>3</sup>	92 m <sup>3</sup>				NS	
chauffage maison	32 668 kWh		9 000 kWh	22 281 kWh		96%	28%
chauffage ECS	2 341 kWh			2 545 kWh		109%	1%
cuisson	1 040 kWh			260 kWh			
froid	361 kWh			361 kWh			
chauffage piscine	12 364 kWh				12 364 kWh	100%	1%
éclairage	492 kWh			492 kWh			
pompe piscine	575 kWh				8 636 kWh	1500%	15%
information	70 kWh			70 kWh			
buanderie	215 kWh			215 kWh			
Total	50 126 kWh	127 m <sup>3</sup>	9 000 kWh	26 224 kWh	21 000 kWh	112%	19%
excédent de consommation		1 022 m <sup>3</sup>	0	0	0		

Il s'agit maintenant de mettre en balance les besoins définis au chapitre 1 avec les consommations constatées au chapitre 3 après les avoir convertis en énergie utile, c'est à dire dans la même grandeur exprimée par les besoins.

Seule l'eau n'est pas exprimée en énergie mais en volume. Les besoins théoriques de la maison ne représentent que 11% des consommations communes avec l'entreprise. La répartition n'est pas connue.

En répartissant les consommations d'électricité entre la maison et la piscine selon les ratios de comptage constatés en 3.2.1.2, et en ventilant celles-ci vers les différents besoins, avec prise en compte des rendements et pertes diverses :

- Tous les kWh consommés par les chauffe-eau ne chauffent pas l'eau, une partie est perdue (d'où le taux de couverture de 109% pour le chauffage de l'ECS).
- Mais ces pertes sont en hiver un apport de chauffage qui doit être pris en compte par une régulation correcte de celui-ci. Il en est de même des autres usages de l'électricité à l'intérieur de l'enveloppe chauffée qui sont donc déduits de la part affectée au chauffage, d'où le taux de couverture global pour le chauffage de 96%<sup>1</sup>.
- La part cuisson prise sur l'électricité ne concerne que le four, puisque la cuisine est au gaz et que nous n'avons pas pris en compte celui-ci. C'est pourquoi nous n'indiquons pas de TC pour ce poste qui contribue aussi au chauffage et n'est pas pris dans les apports ici (par contre nous avons pris toute l'électricité, y compris d'été, ce qui compense).
- La part d'électricité affectée à la pompe de la piscine relève simplement du constat que celle-ci fonctionne en permanence. Un fonctionnement permanent, soit 8760 h par an aboutirait à une consommation de 12 000 kWh par an, supérieur aux consommations réelles. Mais cette pompe a de fait été arrêtée d'une part et elle ne consomme sans doute pas constamment sa puissance nominale de 1,37 kW. Les 8600 kWh des consommations, restant après autres répartitions, que nous lui avons affectés nous semblent cohérents et « couvrent » quand même 1500% du besoin réel de 575 kWh calculé pour ce poste.

**C'est ici la principale anomalie qui désigne bien le fonctionnement de la piscine comme premier responsable de surconsommation.**

- Le bilan se boucle donc en prenant les besoins piscine avec hivernage (12364 kWh utiles) alors qu'ils sont de 44420kWh en chauffant toute l'année qui est théoriquement la situation ici.
  - Mais ce sont des kWh utiles (besoins) alors qu'en entrée nous avons des kWh électriques (consommations). Ce qui donnerait un coefficient de performance (CoP) de la PAC de  $\frac{44420}{12364} = 3,59$  ce qui est supérieur au CoP théorique de 3,55 donné par le constructeur

---

<sup>1</sup>Note sur les taux de couverture (TC) : Cette notion peut sembler étrange et bien inutile à un économiste pour qui un bilan doit toujours être équilibré et donc ce taux toujours égal à 100% puisqu'il s'agit ici de mettre en balance des entrées et des sorties d'énergie qui, si le but est atteint, doivent s'équilibrer. Mais il y a deux différences fondamentales entre l'énergie et la monnaie qui tiennent à ce que l'une est (durement mais justement) physique et l'autre (molement mais arbitrairement) symbolique. Ce qui mériterait un long développement philosophique qui n'est pas l'objet ici. Mais cette différence fait que, à l'inverse de l'argent, premièrement l'énergie est abondante et disponible et, à l'unique condition de respecter le principe de conservation (1er principe thermodynamique), elle peut être gratuite; et deuxièmement au lieu de « fructifier » elle se dégrade en travaillant (2e principe thermodynamique). Ces deux différences font que le taux de couverture d'un besoin énergétique par un apport externe d'énergie peut être inférieur ou supérieur à 100% et que ce ratio devient l'outil fondamental de toute gestion énergétique raisonnée. Sachant qu'il y a toujours de l'énergie « gratuite », l'écart entre un TC inférieur et 100% représente l'utilisation de cet apport gratuit (solaire, énergie provenant de l'activité interne...). À l'inverse tout ce qui dépasse 100% est un gaspillage. Un bon TC doit donc toujours être inférieur à 100%.

pour +40/-5°C (la source froide ne peut fonctionner en milieu humide à température négative!). Mais la PAC a été arrêtée justement à cause des problèmes de glace et le besoin réel a été inférieur à 44420 kWh. Il faudrait préciser cette période d'arrêt pour affiner ce résultat.

- Une autre possibilité est que la répartition moyenne de l'électricité retenue ici à 55,5% maison, 44,5% piscine ne soit trop favorable à la piscine pour la saison considérée. Les différents relevés des sous-compteurs montrent en effet des écarts sensibles dans cette répartition. Dans ce cas, l'enjeu d'économie des améliorations sur la maison sera plus important.

Plutôt que faire des comparaisons en kWh par m<sup>2</sup> et par an avec des indices officiels qui sont exprimés en énergie primaire avec une définition élastique de celle-ci et des équivalences disparates<sup>2</sup>, ce qui n'aurait pas grande signification; nous avons introduit dans notre diagnostic cosmoénergétique (voir présentation jointe) un second taux de couverture exprimé toujours en énergie finale, mais qui ne prend en compte que la seule énergie renouvelable (la seule durable) utilisée pour couvrir les besoins.

**Le taux de couverture des besoins par l'énergie renouvelable est ici de 19%** grâce au bois sans lequel il ne serait que de 1% (part renouvelable de l'électricité finale). Il sert au calcul de notre « indice gaspi », groupement en énergie finale<sup>3</sup> qui intègre la grandeur des besoins dans le jugement global du gaspillage d'énergie.

$$\text{Cet indice s'établit ici ainsi : } Ig = \frac{\text{ConsoFossile} \times \text{besoins}}{\text{ConsoSolaire}} = \frac{46752 \times 50126}{9472} = 247\,412 \text{ kWh}$$

N.B. Cet indice gaspi exprime en kWh l'énergie vraiment primaire (à l'échelle de la Planète) consommée, bien mieux qu'une élucubration en tep. Avec une consommation d'énergie 100% renouvelable (c'est à dire d'origine solaire), qui est le but d'une économie cosmo-énergétique, cet indice sera nul quel que soient les besoins, même si le taux de couverture est inférieur à 1. Cela signifie simplement que l'économie cosmo-énergétique ne peut satisfaire les besoins injustifiés, elle constitue ainsi une régulation naturelle de l'impact énergétique de l'Homme sur la nature.

**Conclusion** Avec des besoins importants et du presque tout électrique, la durabilité souffre ici d'un lourd handicap au départ. Heureusement, l'augmentation de l'usage du bois a permis d'éviter la catastrophe. Les voies d'amélioration dans ce sens vont donc porter prioritairement sur le chauffage au bois pour la maison et une meilleure utilisation du rayonnement solaire instantané pour la piscine.

---

<sup>2</sup>fluctuant selon les caprices du marché mondial alors qu'un kWh vaut invariablement trois millions six cent mille joules, et les vaudra toujours après effondrement du dernier marché monétaire. Il en faut simplement une plus grande quantité à l'entrée d'un processus de transformation qu'à la sortie. Quand à la tonne d'équivalent pétrole (tep), depuis la session du 14 février 2002 du Conseil d'Orientation de l'Observatoire de l'énergie, elle n'a plus qu'une signification financière (voir [http://www.industrie.gouv.fr/cgi-bin/industrie/frame23e.pl?bandeau=/energie/politiqu/be\\_polit.htm&gauche=/energie/politiqu/me\\_polit.htm&droite=/energie/politiqu/textes/nouv-meth-bilan.htm](http://www.industrie.gouv.fr/cgi-bin/industrie/frame23e.pl?bandeau=/energie/politiqu/be_polit.htm&gauche=/energie/politiqu/me_polit.htm&droite=/energie/politiqu/textes/nouv-meth-bilan.htm)). Mais elle n'a pas plus de signification Énergétique que l'Euro.

<sup>3</sup>Qui tient donc compte des rendements d'utilisation de l'énergie fossile qui est en numérateur du ratio.

Deuxième partie

Étude des Améliorations.

## Chapitre 5

# Améliorations des systèmes existants

### 5.1 Comportement des utilisateurs (gérer)

#### 5.1.1 Votre abonnement EDF

La puissance souscrite est de 30 kVA pour environ 40 kW d'équipements installés. A priori cette puissance serait bien adaptée (du point de vue du fournisseur). Mais ces équipements sont en grande partie délestables. La puissance devrait pouvoir être baissée sous-réserve d'installer un délesteur (voir 5.2 Programmations ci-après). L'enjeu d'une baisse de puissance de 30 à 24 kVA est de 300 € par an.

En 2006 vous avez consommé 55 303 kWh ce qui a utilisé cette puissance souscrite en moyenne à 21,4%.

Vous avez payé 6 054,73 €, soit 10,95 centimes du kWh. Ce coût aurait dû être de 5 791,92 € (tarif régulé au 15/08/2006). Cet écart peut être dû au jeu des reports de solde entre factures intermédiaires (de décembre 2005 sur février 2006 en l'occurrence), à vérifier.

La part heures creuses de la consommation ci-dessus est de 20 539 kWh. La même consommation en simple tarif aurait coûté 6 258,90 €. Le double tarif est bien justifié.

À la même puissance avec le même profil de consommations, le passage à l'électricité d'origine 100% renouvelable (Enercoop) engendrerait un surcoût de 1 941 € par an. Ceci traduit l'incompatibilité du chauffage électrique avec les énergies renouvelables.

#### 5.1.2 Suivi des consommations

On a vu la difficulté pour établir le bilan à répartir les consommations entre la piscine et la maison, et partant à pouvoir localiser une anomalie, en l'absence de relève des compteurs divisionnaires. Il est donc impératif de relever les deux compteurs électriques (maison et piscine) chaque mois à date fixe, par exemple le 15 pour se caler sur la saison de chauffe (15 octobre 15 avril) ou mieux le 20 pour se caler à la fois sur la saison et les relèves du GRD EDF.

De même pour l'eau, la pose d'un sous-compteur au moins pour la maison s'impose. L'idéal serait d'en mettre un spécifique pour la piscine (indispensable pour contrôler le lavage du filtre et l'appoint d'eau). Nous avons fait l'impasse sur ce (gros) poste de consommation à défaut de comptage séparé. Relever ces compteurs en même temps que les compteurs électriques permettrait des recoupements intéressants.

## 5.2 Programmations (supprimer les temps inutiles)

### 5.2.1 Déshumidifieur serre piscine

J'ai montré en 1.2.5 l'inutilité, voire la nuisance, à faire consommer de l'énergie par cet appareil qui était d'ailleurs arrêté lors de mes deux visites. Le démonter éliminera tout risque de mise en route intempestive et il sera sans doute plus utile ailleurs.

### 5.2.2 Chauffage de la maison

Le programme actuel de l'horloge de programmation de la zone "épisode" (voir plan annexe 1) que nous avons relevé (cf.3.2.1.1) relance tous les jours la température de confort de 19 à 22h alors qu'au même moment la zone "permanente" est délestée. Or il ne semble pas que cette zone soit systématiquement occupée tous les soirs mais plutôt en fin de semaine, les besoins sont calculés (cf.1.2.1) sur la base d'une occupation le week-end (1500 heures/hiver au lieu de 5000) et un maintien à la température légale [2] de 8°C en inoccupation, et d'assurer le plus possible ce maintien par « l'excédent » de la cheminée plutôt que par l'électricité.

Cela sera permis par l'aménagement proposé ci-après § 5.3.2. Il suffira alors de supprimer le programme d'horloge de cette zone dont les radiateurs seront en permanence à la consigne de 8°C, n'étant sollicités que si le lieu descend en dessous de cette température. Le passage à température de consigne des radiateurs se fera manuellement à la demande pour les périodes d'utilisation, ou sur horloge hebdomadaire si ces périodes sont régulières.

L'enjeu de cette simple mesure est de l'ordre de  $0,33 \times 8^\circ \times 3500h = 9\,200kWh$  et 1000 € par an s'agissant d'électricité. De quoi envisager de poser une porte<sup>1</sup> pour séparer efficacement ces deux zones dans le cadre de la réalisation de la solution 5.3.2 proposée ci-dessous qui permettra une meilleure répartition de la chaleur dans la zone permanente.

### 5.2.3 Chauffage de la piscine

Le calcul des déperditions fait au § 1.2.5 fait apparaître une différence de 32 MWh sur les besoins de chauffage du bassin selon que l'on chauffe celui-ci à 28°C toute l'année ou que l'on opte pour un hivernage de novembre à mars inclus. Les puissances nécessaires pour un chauffage toute l'année (tableau 1.2) montrent de toute façon l'impossibilité de chauffer la piscine à 28° en janvier avec la pompe à chaleur : la puissance nécessaire est de 17 kW, la PAC n'en peut fournir que 11 avec un évaporateur à -5°C ! avec un sol gelé à proximité du bassin il faudrait 20 kW. À ce stade la PAC est hors jeu depuis longtemps, dès que la puissance appelée a approché sa puissance nominale quand la serre ne capte plus assez de rayonnement solaire (prise en glace de l'évaporateur).

On pourrait s'étonner que le bassin réclame un chauffage de 17 kW en janvier avec une température moyenne de 9,1°C alors qu'il se contente de 7 kW le reste de l'année, même en décembre alors que la température moyenne n'est que de 8,1°. C'est que la température du bassin est beaucoup plus sensible au rayonnement solaire capté par la serre qui est au dessus de lui qu'à la température de l'air extérieur qui n'influe que sur les déperditions de la serre. Ainsi ces apports

---

<sup>1</sup>Là où Mme X a déjà fait des essais avec un rideau, ce qui n'est pas aussi efficace qu'une porte, mais c'est bien là qu'il faut la poser.

solaires sont de 5240 kWh en décembre alors qu'ils sont négatifs (i.e. déperdition) de -5356 kWh en janvier (voir tableau 1.2).

Cela ne signifie bien sûr pas que le rayonnement solaire est négatif en janvier, on voit sur le tableau 1.1 que, si on ne chauffe pas le bassin, ce rayonnement capté par la serre est de 49 kWh et la température du bassin s'établit naturellement à 10,7° pour un air extérieur à 9,1°. Mais dès qu'on va chauffer l'eau qui échauffe la serre, la déperdition de celle-ci va très vite devenir supérieure<sup>2</sup> aux 49 kWh du soleil.

**Cela montre une fois de plus que la PAC ne peut pas chauffer la piscine l'hiver.** Son rôle est de suppléer aux apports solaires en dehors de juillet où ils sont suffisants, pas de les remplacer en hiver quand ils sont trop faibles. Cela montre aussi une fois de plus que chauffer la serre en ces moments les plus froids serait encore plus dispendieux que chauffer le bassin.

Donc programmer ici consistera à mettre la piscine en normalité par hivernage de novembre à mars inclu au moins. Ceci permettra :

- d'arrêter la pompe à chaleur bien sûr, gain compresseur estimé à  $3\text{ kW} \times 2300\text{ h} = 6900\text{ kWh}$  (755 €) et régénération du sol,
- de réduire le temps de filtration à 3 heures par jour en cette période pour un gain de consommation de la pompe de  $1,3\text{ kW} \times 3150\text{ h} = 4095\text{ kWh}$  (448 €).

Pendant la période de chauffe, d'avril à octobre, on constate le besoin de chauffage suivant en kW, d'où rapporté à la puissance de 11kW, le taux d'utilisation et les heures de marche de la PAC qui en découlent :

	avri	mai	juin	juil	août	sept	oct
kW	4,2	3,3	1,7	0	1,9	2,2	4,0
taux util	38%	30%	15%	0	17%	20%	36%
heures	275	223	111	0	129	144	271

Le besoin de recyclage étant fonction de la température (et du traitement). Si on peut maintenir la température légèrement en dessous de 28° sans la dépasser (pour une économie supplémentaire de chauffage et sans trop de produits de traitement), 9h de recyclage par jour devraient suffire. Ce qui correspond aux temps de chauffage d'avril et octobre du tableau.

La solution de programmation en période de chauffe consistera alors à programmer la pompe à chaleur et celle de recyclage en même temps, pendant les heures creuses de préférence<sup>3</sup>. On a en effet, sauf pendant l'hivernage, jamais intérêt à faire tourner le recyclage plus que nécessaire à cause des déperditions.

## 5.2.4 Délestages électriques

Le chauffe-eau de la buanderie semble alimenter celle-ci et la douche de l'annexe piscine. On pourrait profiter de la reprogrammation ci-dessus de la PAC en heures creuses pour couper le ballon sur appel de la PAC. Le gain de simultanéité serait de la puissance du chauffe-eau soit 1200 W.

<sup>2</sup>de  $5356 - 49 = 5307\text{ kWh}$  exactement pour 28° de température d'eau

<sup>3</sup>Vu l'utilisation faible de la piscine cela ne devrait pas poser de problème qu'elle ne coïncide pas avec le temps de filtration. Si l'utilisation était plus forte, il serait toujours possible de relancer le recyclage dans la journée.



Après modification du chauffage présenté au § 5.3.2 ci-dessous qui va réduire l'appel des convecteurs électriques, il sera facile de délester les deux autres chauffe-eau (2 salles de bains) et de gagner encore 4 kW de puissance simultanée. On pourra alors, après vérification éventuelle de la puissance appelée en pointe, demander à réduire la puissance de l'abonnement à 24 kVA comme évoqué § 5.1.1.

## 5.3 Régulations (supprimer les quantités inutiles)

### 5.3.1 Éclairage

Remplacer les lampes d'ambiance à incandescence (salle à manger, salon) par des lampes fluo-compact à basse consommation (22W remplace une 100W) sera simple et immédiat ici. La durée de vie de ces lampes est 5 fois celle des lampes actuelles, plus chères à l'achat elles sont beaucoup moins chères à l'usage.

Pour aller plus loin, il est possible de remplacer les dichroïdes halogènes de plafonniers par des lampes à led (diodes électroluminescentes), à l'exception de ceux qui sont sur variateurs. Ces lampes ont une consommation de 15 fois inférieure aux halogènes à éclairage égal et leur durée de vie est d'au moins 50000 heures (voire 100 000 heures ? là on manque de recul). Le problème est que les plafonniers ici sont équipés de lampes de 50 W chacune et que ces lampes à led disponibles actuellement remplacent des lampes de 20-25 W. C'est à dire que pour avoir le même éclairage qu'avec les 50W actuels, il faudrait remplacer une halogène par deux lampes à led, sans changer les transfos puisque ceux-ci sont prévus pour 50W et ces lampes ne consomment que 1 watt ! Une solution est aussi de considérer que l'éclairage actuel est surpuissant et que des équivalentes 25W conviendraient.

Je vous conseille de faire un essai, en remplaçant les lampes halogène au fur et à mesure qu'elles grillent et voir ce que ça donne, car les led ne grilleront pas de si tôt ! Si votre électricien n'a pas encore de telles lampes, voici une adresse où vous les trouverez <http://www.energie douce.com/boutique/> ainsi que diverses nouveautés en économie d'énergie (publicité gratuite).

### 5.3.2 Chauffage de la maison

**Rappel :** Les déperditions calculées en 1.2.1 dégagent un besoin en crête (pour une température extérieure de  $-4^{\circ}$ ) de 18 kW, dont 9,7 pour la zone permanente et 8,2 pour la zone occasionnelle ; et un besoin moyen (pour une température de  $7,3^{\circ}$ ) de 9,6 kW, dont 5,2 kW pour la zone permanente et 4,4 kW pour la zone occasionnelle.

Les 17 kW de radiateurs électriques installés devraient donc pouvoir subvenir à eux seuls au chauffage en permanence et reléguer la cheminée au rôle d'accessoire d'agrément. C'est sans doute ce qu'ont prévu les promoteurs d'un tel système. Mais même avec une programmation et une régulation réglée au plus juste et parfaitement maîtrisée<sup>4</sup>, le chauffage engloutira alors 32,67 MWh d'électricité et 3 577 € par an malgré un kWh de cette énergie vendu en heures creuses en dessous de son coût réel de production.

---

<sup>4</sup>je ne sais si ça existe car en 27 ans d'investigations en économies d'énergie, je n'en ai jamais rencontré.

Car au delà de son coût malgré des artifices tarifaires pour tenter de l'imposer<sup>5</sup>, l'électricité est l'énergie la moins indiquée pour faire exclusivement de la chaleur, donc pour le chauffage. Elle est même absolument contre-indiquée du point de vue de ce que la mode actuelle appelle « développement durable » pour escamoter cette contre-indication.

En effet, pour fabriquer 1 kWh qui sera délivré dans la pièce par le radiateur électrique, il faut sortir 1,1 kWh de la centrale qui le fabrique (environ 10% de pertes en lignes, transformateurs etc.). Cette centrale rejette 2 kWh de chaleur dans l'environnement (pollution thermique) pour en sortir un seul d'électricité. Pour fabriquer ces 3,3 kWh thermiques nécessaires à votre radiateur électrique pour qu'il vous en délivre un seul, cette centrale doit fabriquer de la vapeur, soit en brûlant des cochonneries non renouvelables dont les stocks s'épuisent et qui envoient fumées toxiques et gaz à effet de serre dans l'atmosphère, soit en cassant des noyaux d'uranium (dont les stocks s'épuisent également) qui produisent des déchets radioactifs très dangereux pendant une éternité et dont nous confions la gestion aux générations futures. C'est finalement de 3,6 kWh (cycle gaz combiné) à 110 kWh (nucléaire) d'énergie primaire qu'il faudra fournir à la centrale pour que votre radiateur en bout de chaîne vous donne 1 kWh « bien propre » !

Il faut donc se souvenir que l'électricité est une énergie noble, précieuse, qu'il faut réserver aux usages spécifiquement électriques et performants. La dissiper en chaleur (forme dégradée de l'énergie) par effet Joule dans une résistance est un crime contre les générations futures.

À l'opposé, l'insert bois<sup>6</sup> peut assurer la totalité du chauffage hors périodes très froides, c'est à dire la majorité du temps. Madame X l'a montré en brûlant 3 cordes de bois l'hiver passé au lieu d'une seule auparavant, ce qui a fait baisser la consommation d'électricité (fig.3.1). Mais la limite du procédé s'est vite manifestée par une surchauffe locale et la difficulté de faire bénéficier une zone plus large de toute la puissance du foyer pour la substituer à l'électricité.

L'idée est d'inverser le processus : de passer du chauffage à l'électricité avec appoint bois au chauffage au bois avec appoint électrique beaucoup plus adapté pour cela avec ses thermostats électroniques. le problème est que les quelque 12 à 14 kW de puissance bois sont concentrés en un seul point alors que les 17 kW de chauffage électrique sont répartis sur toute la surface. Le foyer central avec ses deux faces vitrées rayonne d'une façon satisfaisante dans la salle à manger et le séjour mais cette chaleur a du mal à gagner les chambres et le bureau.

Fermer par une porte la zone non chauffée en permanence comme indiqué § 5.2.2 améliorera les choses mais ce n'est pas suffisant pour pouvoir utiliser toute la puissance de l'insert sans surchauffer la zone autour de celui-ci. La récupération d'air chaud de son avaloir et autour du foyer débouche juste au dessus dans les pièces déjà chauffées par rayonnement et contribue à cette surchauffe alors que cette chaleur serait plus utile du côté des chambres.

La solution consisterait donc à prélever cet air dans la hotte par une ventilation forcée et de la canaliser par une gaine dans le faux plafond qui déboucherait dans le couloir au niveau de la chambre d'enfant, avant la porte de séparation des deux zones proposée ci-dessus, ou bien dans le bureau, ou les deux (à voir). Le ventilateur serait commandé par un simple thermostat à tension de vapeur en contact avec l'avaloir de l'insert. L'espace entre plafond et bac acier n'est pas important mais ce parcours emprunte les points hauts des pentes de toit. J'ai d'autre part remarqué

---

<sup>5</sup>Et en France on y parvient, alors que le chauffage électrique est partout ailleurs banni, à travers une tarification à coût réel de l'électricité comme en Italie, des taxes sur le chauffage électrique comme en Suisse ou son interdiction pure et simple dans des pays scandinaves.

<sup>6</sup>énergie renouvelable car solaire stockée par photosynthèse. De plus bois n'ajoute pas de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère tant qu'on ne l'exploite pas plus vite qu'il ne repousse.

que les bacs acier étaient corrodés au niveau de la cuisine et qu'il serait possible de profiter d'une réfection pour créer cette gaine qui devra avoir la section la plus grande possible pour permettre un bon brassage pour une meilleure homogénéité et avec une vitesse d'air raisonnable ( $<1$  m/s).

Cette solution, ou une variante sur le même principe, permettrait d'exploiter au mieux l'insert pour un confort thermique plus homogène et une économie supplémentaire d'électricité. La ventilation forcée du récupérateur de chaleur de l'insert permettrait en outre d'améliorer son rendement.

### 5.3.3 Chauffage de la piscine

On voit sur les tableaux 1.1 et 1.2 que la PAC n'est pas ou très peu sollicitée en juillet et une simulation des températures de la serre et du bassin sans chauffage du tout montre que c'est "baignable" de juin à septembre avec une température de serre confortable (fig. 1.3).

Après reprogrammation § 5.2.3, on pourra soulager la PAC en période de chauffe en optimisant le chauffage solaire par la serre qui on l'a vu constitue de fait le chauffage principal de la piscine (76 MWh contre 12 pour la PAC cf. tableau 1.1). La couverture actuelle du bassin n'est pas bien adaptée pour cela :

- mauvaise étanchéité à la vapeur d'eau, ne couvre pas toute la surface,
- est opaque aux rayons solaires et ne transmet leur chaleur que par absorption-conduction... à travers un isolant, fût-il médiocre isoalnt quend même ( $U \approx 3,4 W.m^{-2}.K^{-1}$ )

Pour pallier ces deux inconvénients, il faudrait rendre la couverture transparente et étanche tout en restant isolante. Il existe des isolants transparents inspirés de la technique du poil des ours polaires<sup>7</sup> à structure alvéolaire ou microtubulaire, mais ce matériau est encore difficile à trouver et pas encore apparemment adoptée par les fabricants de piscines pour remplacer ces horribles lattes de PVC.

Un produit qui s'en rapproche, qui est souple et étanche à la vapeur d'eau est simplement le bulle-serres en polyéthylène utilisé par les jardiniers. Il existe bien des couvertures de piscines à bulles légères, dites couvertures solaires, mais elles sont toutes bleu (ce qui arrête l'essentiel du rayonnement calorifique) et l'appellation solaire semble plus désigner la protection du plastic contre les UV mais qui prive du même coup l'eau du bassin et de la chaleur et des UV bénéfiques pour lui qui permettent de diminuer la dose de désinfectant.

Il vaut donc mieux adopter un produit peu cher mais efficace et le renouveler tous les un ou deux ans qu'un produit plus durable mais qui ne sert qu'à faire joli. Donc, en attendant une évolution favorable des isolants-transparents adaptés aux piscines, on prendra une pièce de Bulleserre (orthographe à vérifier) en polyéthylène clair et de bonne épaisseur, d'une dimension qui dépasse d'au moins 1m celles du bassin de manière à l'appliquer tout autour sur les margelles pour une meilleure étanchéité possible.

**En période d'hivernage :** la couverture actuelle opaque sera déroulée et le bulleserre posé dessus pour parfaire l'isolation thermique et l'étanchéité à la vapeur d'eau. Il s'agit en effet d'isoler simplement le bassin, chauffer l'eau pendant cette période obligerait à un temps de filtration-recyclage quotidien plus long.

---

<sup>7</sup>qui laisse passer la lumière en retenant la chaleur.

**En période d'utilisation :**

- De nuit, comme en période d'hivernage, il s'agit d'isoler le bassin et éviter son rayonnement vers un ciel clair.
- De jour,
  - En période de baignade les deux couvertures sont bien sûr enlevées. Un enrouleur pour la couverture souple pourra prendre la place libérée par le déshumidifieur.
  - En dehors des périodes de bain, la couverture souple transparente sera posée seule directement en contact avec l'eau et fonctionnera alors en capteur solaire. (utile surtout d'avril à juin et en septembre-octobre).

## Chapitre 6

# Changements de procédés et/ou d'énergie

Au chapitre 5, nous avons exploré des pistes pour améliorer les installations telles qu'elles sont actuellement et trouvé suffisamment d'enjeu d'économie pour tenter de les mettre en œuvre avant d'envisager de tout remettre en question. Je me bornerai donc ici à quelques orientations.

### 6.1 Chauffage piscine

Une solution alternative au chauffage de la piscine, pour soulager la pompe à chaleur et économiser encore de l'électricité, ou pour la remplacer quand elle rendra l'âme, serait d'installer une moquette solaire<sup>1</sup> sur le toit du local piscine et du hangar attenant. Elle serait prise en dérivation sur le circuit bassin (en bipasse avec la PAC) sans nécessiter de pompe supplémentaire, simplement un vanne thermostatique pour que l'eau n'y circule que lorsqu'elle est plus chaude que celle du bassin.

Si on voulait absolument continuer à chauffer le bassin à 28° du 1er janvier au 31 décembre, ce que vous l'aurez compris je déconseille formellement, l'installation d'un chauffage supplémentaire s'imposerait alors effectivement. Mais on sort là de la démarche d'économie, objet de la présente mission, pour se lancer dans la fuite en avant de dépenses insatiables, ce qui est très « tendance » actuellement il est vrai !

Mais ce n'est **en aucun cas** la serre qu'il faut chauffer alors, mais l'eau sous sa couverture isolante.

Cela peut se faire par une chaudière, soit au bois, soit au gaz (propane ici à moins que du biogaz ou gaz naturel n'arrive) avec dans ce cas une chaudière basse température très haute performance genre Pulsatoire de Auer (publicité gratuite).

### 6.2 ... et maison

Dans les deux cas, cette chaudière sera commune avec la maison qui en profitera pour abandonner son calamiteux chauffage électrique. Cela implique donc de lourds travaux et une étude préliminaire.

Sous toutes réserves  
Nicole JACQUIN

---

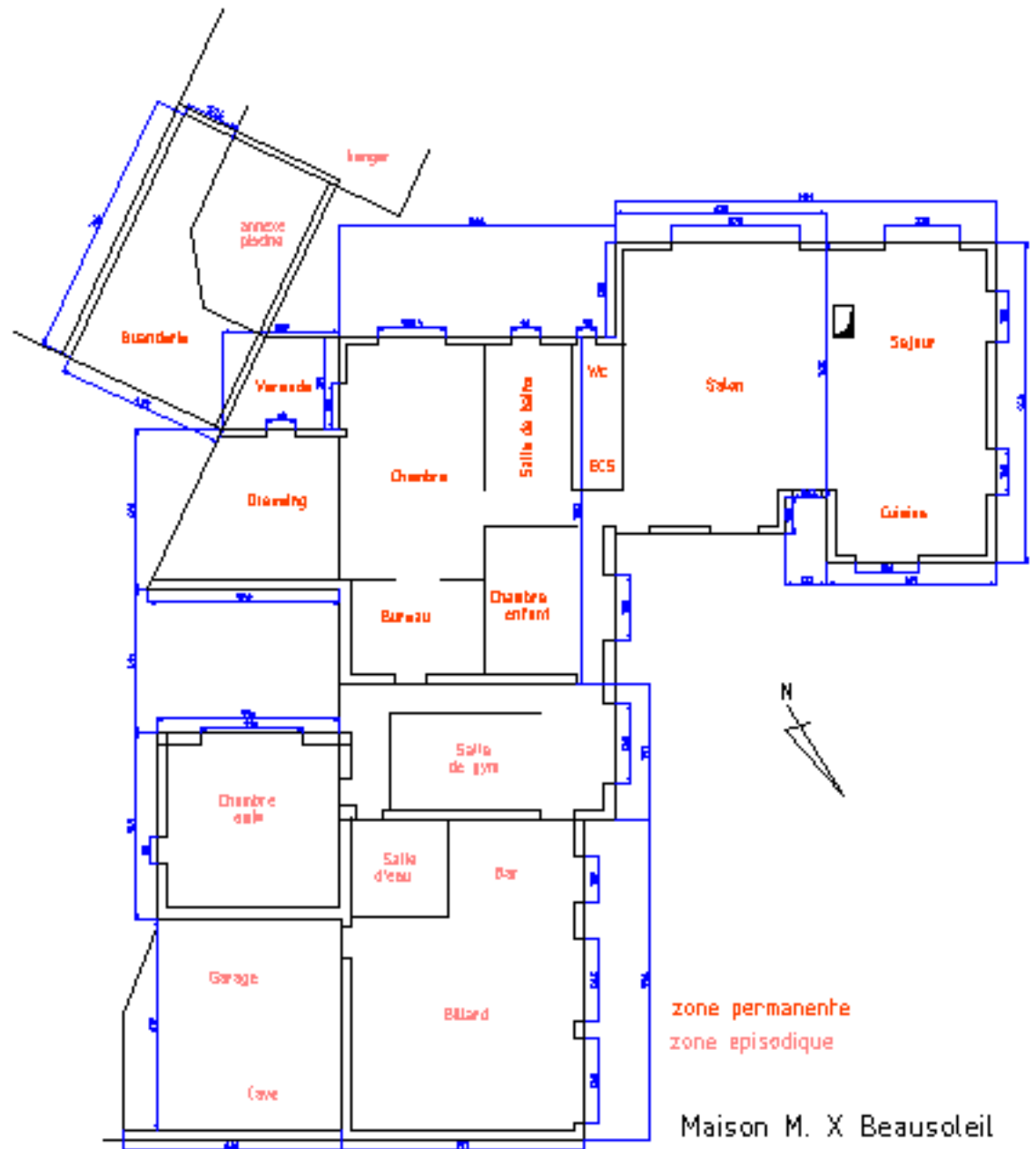
<sup>1</sup>Sorte de tapis de tubes élastomère noirs dans lesquels circule directement l'eau du bassin.

# Bibliographie

- [1] Code de la Construction et de l'Habitation, article R.131-20
- [2] Code de la Construction et de l'Habitation, article R.131-21
- [3] Le programme ExpoSol du laboratoire de cosmoénergétique est mis à disposition sur notre site Internet à l'adresse <http://cosmoenergie.infini.fr/labo/expoSolCli.php>

# Annexes

FIG. 6.1 – Plan masse maison



Annexe 1





┌ Délestage 30 route de Lézébel 29500 ERGUE GABERIC ┐

Mme et M. X  
rue Tabaga  
29999 Beausoleil les Eaux

V./REF.

V./COURRIER DU  
27 mars 2007

N./REF.  
DG-0722

DATE  
2 avril 2007

**Objet: Diagnostic énergétique de votre maison et piscine.**

Madame, Monsieur,

J'ai bien reçu les éléments de l'installateur du chauffage de votre piscine et vous en remercie. Au vu de ces éléments et de ceux que j'ai relevés le 2 février, voici ce que j'en retire pour l'instant:

La pompe à chaleur Sofath qui vous a été installée est une SP11 qui, d'après la fiche que vous m'avez remise absorbe 3,1 kW (et non KW/h qui n'est pas une grandeur physique) de puissance électrique pour délivrer 11 kW de puissance thermique (COP = 3,55 purtant théorique). Ce dimensionnement est prévu par le constructeur, toujours selon cette fiche, pour chauffer un volume piscine jusqu'à 62 m<sup>3</sup>, j'estime la vôtre à 60 m<sup>3</sup> (à préciser selon profondeur mini) qui utiliserait donc au maximum la puissance installée. Mais cette puissance maxi est donnée pour des températures de -5°C à la source froide (enterrée) et +40°C à la source chaude (réchauffeur piscine).

Il est donc évident que si cette puissance est appelée un temps assez long, la « sonde » enterrée va « prendre en glace » en un temps d'autant plus court que la diffusivité thermique de la terre est importante. Une fois pris en glace le phénomène va s'accroître rapidement jusqu'à un volume de sol gelé au point de provoquer un bombement en surface. En effet à 0°C, la diffusivité thermique de la glace est près de dix fois celle de l'eau alors que sa chaleur massique est deux fois moindre, deux paramètres allant dans le sens du gonflement du sol qui ne disparaît qu'au dégel.

Cela résulte d'un sous-dimensionnement, soit de la PAC elle même en fonction des besoins de chauffage mal maîtrisés, soit du réseau de sol en fonction de la nature de celui-ci qui détermine ses caractéristiques thermiques, soit des deux combinés. Par ailleurs il me semble pour le moins curieux d'extrapoler des consommations à partir des puissances des appareils en posant l'hypothèse qu'ils fonctionnent tous à 100% en hiver et à 33% l'été! Les besoins n'ont-ils pas été calculés avant de dimensionner l'installation?

D'autre part, affirmer que chauffer l'air abaisserait son point de rosée contredit les lois de la physique. Le point de rosée est lié au rapport de mélange ou teneur de l'air en vapeur d'eau, soit pour un air à 28°C et 65% d'humidité relative, il est bien de 20,9°C et correspond à une teneur de 15 g de vapeur d'eau par kg d'air sec. Chauffer cet air, par exemple à 30°C, ne lui enlèvera pas d'eau, sa teneur sera toujours de 15 g/kg et son point de rosée à 20,9 °C. Seule la condensation de cette eau (sur les vitres ou dans le déshumidificateur) peut faire baisser cette teneur, donc le point de rosée. Par

Tel.: 02 98 59 57 34  
Courriel: nicole@delestage.org  
Web: www.delestage.org

Banque: LA POSTE  
Code 20041  
Compte 0576747W034

contre à 30°C l'humidité relative ne sera plus de 65% mais de 58%. L'air sera donc beaucoup plus avide d'eau et augmentera immanquablement l'évaporation, ce qui produira un triple effet négatif:

L'évaporation supplémentaire du bassin causée par ce chauffage va 1) absorber des calories supplémentaires (2/3 de la chaleur de vaporisation est prise à l'eau et 1/3 à l'air) et augmenter sensiblement le besoin de chauffage du bassin au lieu de le diminuer, 2) augmenter la teneur en eau de l'air et donc le point de rosée, la condensation et donc la consommation du déshumidificateur; et 3) augmenter l'évaporation sur la peau mouillée des personnes créant une sensation de froid plus importante que le gain de 2°C en température sèche.

On voit donc que chauffer l'air au dessus du bassin pour tenter de « soulager » le chauffage de l'eau est non seulement illusoire, mais ne ferait qu'aggraver les problèmes au lieu de les résoudre.

Les besoins hygrothermiques doivent avant toute chose être calculés pour pouvoir y répondre au mieux. C'est pourquoi, et pour pouvoir poursuivre mon analyse, je vous remercie de bien vouloir me communiquer les éléments suivants:

Réseau de tubes enterrés: profondeur et espacement des tubes ainsi que leur longueur totale.

Quelle perméabilité du fond de fouille? présence de source?

Nature du remblai (sable, argile, terre végétale...)?

Organes de commande/régulation: sur l'eau du bassin? si oui, quelle température de consigne?

Quelle programmation du chauffage et filtration bassin (horloge ou manuel)?

Existe-t-il un thermostat antigel du réseau enterré?

Déshumidificateur: fonctionne-t-il sur hygostat d'ambiance? si oui sur quel % est-t-il réglé?

Bassin: nature et épaisseur du cuvelage, et de son isolation (fond et côtés).

Serre sur bassin: j'ai relevé que les parois verticales sont en simple vitrage et le toit genre Twinlux, à me confirmer. Quelle est l'épaisseur de celui-ci? Pouvez-vous également me préciser les hauteurs sous toit sur les côtés et au faitage.

Utilisation de la piscine en hiver: nombre d'heures par jour et par semaine et nombre moyen de personnes?

Ces éléments me permettront de calculer les besoins et de définir les moyens les plus appropriés pour y répondre.

Veillez agréer, Madame et Monsieur, mes sincères salutations.

Nicole Jacquin

## Annexe 3

LABORATOIRE DE COSMOÉNERGÉTIQUE 30 ROUTE DE LÉZÉBEL 29500 ERGUÉ GABÉRIC



TÉL. 02 98 59 57 34 NAF 741B

### Rapport d'Essais N°2007071

## Détermination des coefficients de conductivité et de diffusivité thermiques d'un échantillon de terre.

### Contexte et but

Il s'agit de terre de jardin, prélevée à une profondeur de 0,50 m dans l'entourage des canalisations collectrices de source froide d'une pompe à chaleur *pédo-solaire*. La connaissance la plus précise possible de la conductivité, de la capacité massique et de la diffusivité thermiques, est primordiale pour évaluer les performances d'un système utilisant une telle source.

D'autre part ces caractéristiques thermophysiques sont susceptibles de s'écarter sensiblement de celles des matériaux de construction à base de terre déjà caractérisés, un minimum calibrés et compactés, et auxquelles on ne peut se référer. Il est donc nécessaire de les mesurer sur un échantillon représentatif des conditions réelles. La difficulté provient alors de la structure granulaire du matériau et de sa grande variabilité hétérogène (teneurs en gaz et en eau essentiellement) qui interdisent les méthodes de mesure conventionnelles pour des matériaux homogènes, comme la *méthode flash*.

### Conditionnement de l'échantillon

L'échantillon a été prélevé et conservé dans un bocal étanche de 324 ml de manière à conserver son humidité et sa compacité d'origine. Les mesures thermiques ont été effectuées en géométrie sphérique (2 demi-coquilles d'aluminium fin de résistance et inertie négligeables) avec source centrale de chauffage pour annuler toute perte latérale du flux de chaleur ; avec mesure des températures :

- de surface interne (source  $r=13$  mm à  $\theta_0$ ) par thermocouple type K,
- de surface externe (puits  $R=43$  mm à  $\theta_1$ ) par sonde infra-rouge sans contact.

Pesée avant essai : 473 g net pour 324 ml, soit une masse volumique  $\rho$  de **1460 kg/m<sup>3</sup>**

Après tous les essais, une nouvelle pesée a confirmé la stabilité hydrique (malgré un chauffage à cœur jusqu'à 100°C) de l'échantillon qui a alors été déconditionné et placé en étuve à 80 °C pendant 6 heures pour le déshydrater.

Pesée après essais : 374 g net de matière sèche. Soit 99 g d'eau et un taux d'humidité en poids de **20,9%**.

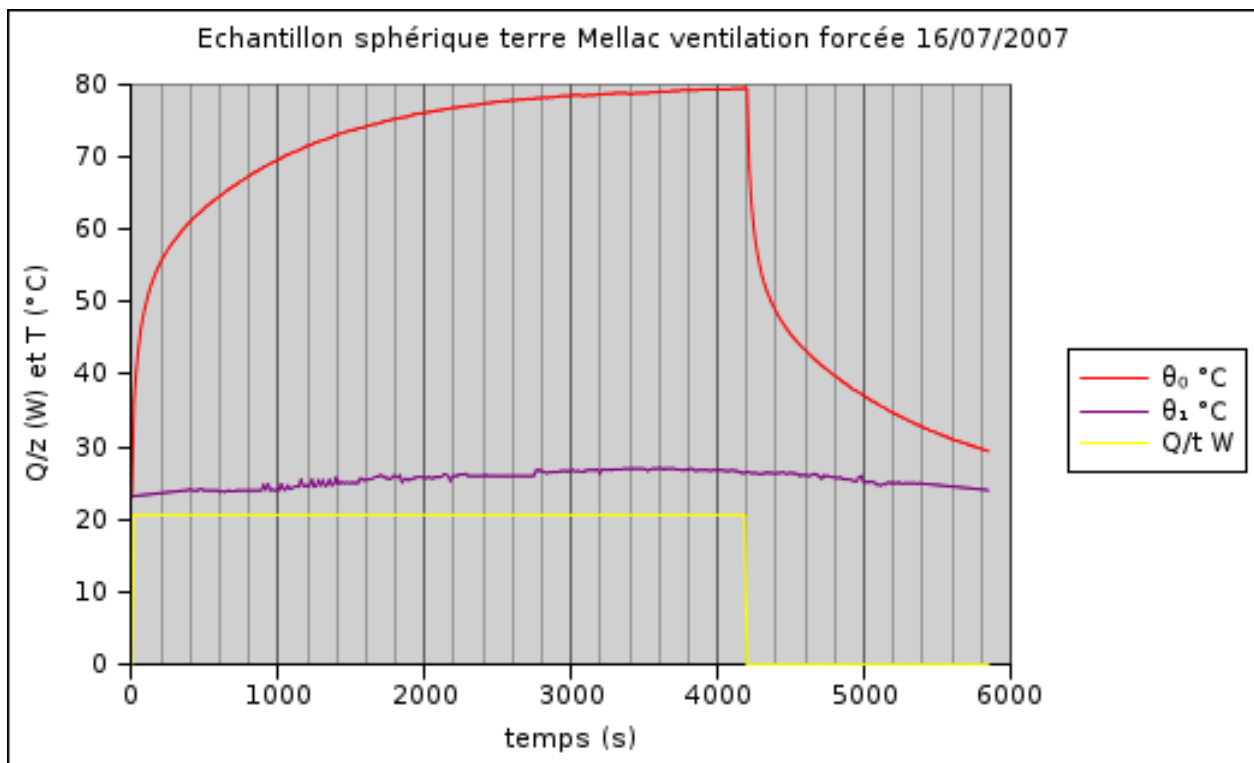


Fig. 1

## Mesure de la conductivité thermique $\lambda$

Ne connaissant pas la chaleur massique  $c_p$  (capacité thermique), on ne peut déduire la conductivité de la diffusivité  $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}$ . Elle a donc été mesurée à partir du flux et des températures en régime stationnaire. Pour cela l'échantillon a été placé en enceinte ventilée régulée à la température ambiante et la source de chauffage interne à flux constant  $\frac{Q}{t} = 20,63 W$ .

La figure 1 montre le profil de températures obtenu en fonction du temps. Le régime stationnaire  $\frac{d\theta}{dt} = 0$  est établi juste avant coupure de  $\frac{Q}{t}$  à  $t = 4185 s$ . À ce régime, la totalité du flux émis au centre de la sphère est dissipé à la surface de celle-ci à  $\theta_1 = 26,4^\circ C$  pour  $\theta_0 = 79,7^\circ C$ . Le coefficient de conductivité thermique est alors  $\lambda = \frac{\frac{Q}{t}(\frac{1}{r} - \frac{1}{R})}{4\pi(\theta_0 - \theta_1)} = 1,65 W.m^{-1}.K^{-1}$ .

**Conductivité thermique :  $\lambda = 1,65$  watt par mètre et par degré.**

## Mesure de la diffusivité thermique $\alpha$

Malgré la grande variété des méthodes de détermination de la diffusivité thermique, celles-ci sont toutes basées – essentiellement par approximations – sur les solutions éprouvées des équations linéaires de conduction dans les cas élémentaires de transfert de chaleur. Quand à l'équilibre on établit le chauffage au cœur de la sphère, le flux  $\dot{Q}$  se dissipe à travers l'échantillon en une part  $\dot{Q}'$  absorbée par sa masse et qui élève sa température, et en une part  $\dot{Q}''$  de conduction à travers cette masse qui est dissipée à l'extérieur proportionnellement à la conductivité et au gradient de

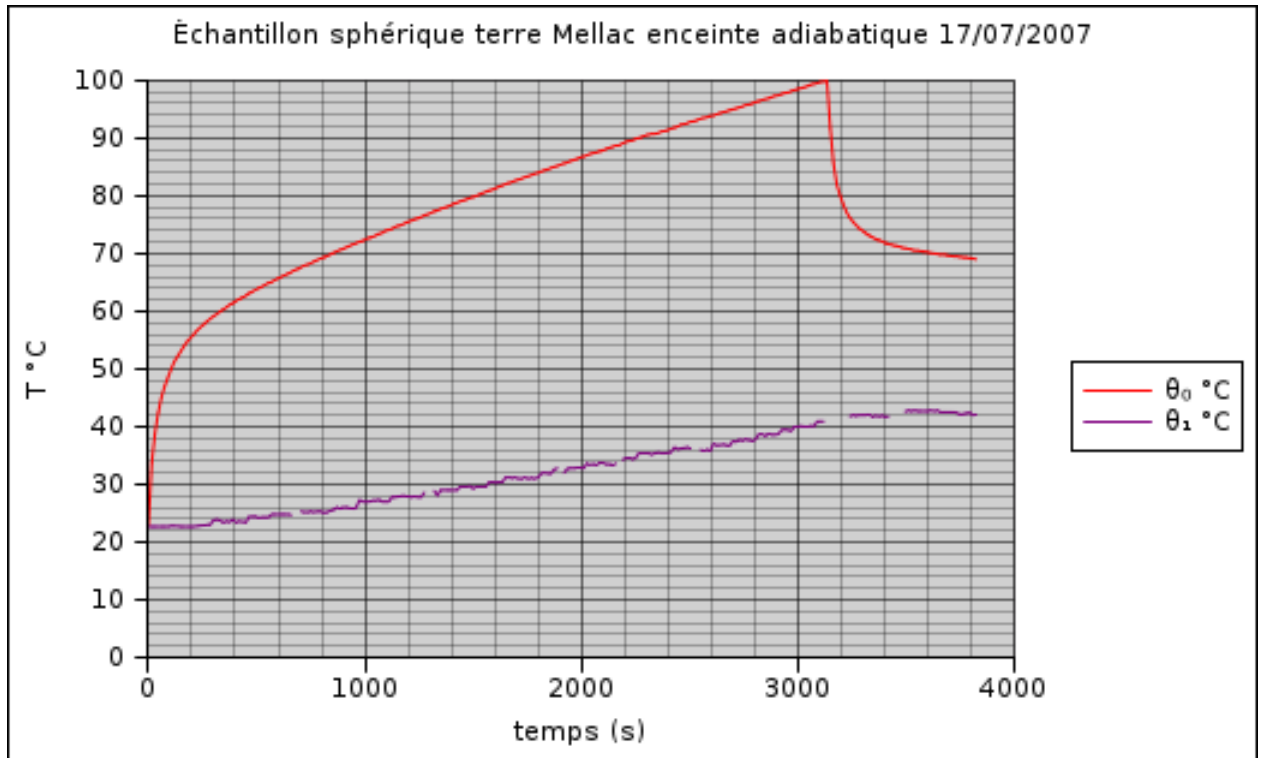


Fig. 2

température. En 5.3.3 nous avons favorisé ce terme  $\dot{Q}''$  en ventilant l'échantillon pour mesurer cette conductivité en régime stationnaire. Maintenant nous réduisons  $\dot{Q}''$  autant que possible en plaçant l'échantillon dans une enceinte isolée (adiabatique) pour mesurer la diffusivité thermique qui est liée à  $\dot{Q}'$ , donc en régime transitoire.

La figure 2 montre le profil des températures  $\theta_0$  et  $\theta_1$  obtenu dans ces nouvelles conditions dont le sens de variation est *monotone* à chauffage constant. Mais après une période initiale ( $>2000$  secondes), l'accroissement de ces température devient linéaire ( $\frac{d\theta}{dt} = Cte$ ), le terme exponentiel de l'équation de Fourier tend vers zéro, et la diffusivité  $\alpha$  peut se déduire du seul terme linéaire  $\frac{\frac{d\theta_1}{dt} R^2}{4(\theta_0 - \theta_1)}$  entre les limites  $1995 < t < 3135 s$  :

**Diffusivité thermique :  $\alpha = 6,32 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ par seconde}$**

Chaleur massique :  $c_p = \frac{\lambda}{\rho\alpha} = 1788 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

*Nicole Jacquin 20 juillet 2007*

# Annexe 4

