

Août 2013

## Chauffage et ECS solaire avec 6 m3 de stockage eau morte.

Compte rendu de réalisation d'installation pour Apper Solaire.

P. FRISTOT (pf26), blog : <http://aurel-positive.over-blog.fr/>



### Sommaire

Contexte / Objectif.....	2
Historique.....	2
Description.....	2
Principes et particularités.....	3
Schéma de fonctionnement.....	4
Version sans stockage :.....	4
Version avec stockage de 6m3.....	6
Cuve enterrée :.....	7
Dans la cuve :.....	10
Finition :.....	12
Pompe à chaleur :.....	13
Régulation :.....	14
Résultats / Bilans.....	15
Stratification :.....	16
Difficultés rencontrées.....	17
Problème de gel.....	17
Cause identifiée.....	17
Fuite cuve.....	18
Coûts indicatifs :.....	19
Conclusion.....	19

## Contexte / Objectif

Passionné d'expérimentations, d'efficacité énergétique et de technique en général, j'ai vraiment pu passer à la pratique lors de la réalisation de ma maison. Cette construction neuve, comprenant une partie logement et des locaux professionnels, tend à concilier un certain respect de l'environnement vu dans son ensemble (matériaux locaux, bilan énergétique positif..) pour un coût proche de celui d'une maison à ossature bois classique (plutôt haut de gamme tout de même).

Le site d'implémentation est un village de la Drôme, à 400m d'altitude, proche de petites montagnes (qui limitent la durée d'ensoleillement, avec un coucher de soleil à 16h au 21/12).

Les précipitations sont abondantes et les brumes matinales également, surtout aux mois de novembre et décembre. L'hiver est généralement plus ensoleillé, bien que celui de 2012/2013 semble avoir été sensiblement moins favorable que la moyenne.

## Historique

La chantier principal a eu lieu en 2010. La maison a été habitée à partir de mi-2011. Le solaire thermique a été installé fin 2011 en mode plancher solaire direct. Mi-2012, un stockage de chaleur de 6m<sup>3</sup> a été ajouté et l'installation complète a fonctionné à partir de novembre 2012.

Nous disposons maintenant du recul d'une saison de chauffe sans stock et d'une saison avec.

## Description

Le bâtiment est conçu pour une dépense énergétique minimale (isolation paille 35cm dans les murs, triple vitrage..) avec cependant un compromis important lié au confort d'été: le choix a été fait d'éviter la climatisation des locaux professionnels en augmentant considérablement l'inertie de la maison. Pour cela, le sol n'est isolé que par des tranchées verticales en périphérie – la dalle reste en contact direct avec le sol naturel, sans isolant.

La maison est bâtie sur un terrain en pente (Sud..) permettant d'enterrer les murs nord du rdc. A la construction, il est apparu des sources d'eau dans les fouilles coté nord, que l'on tente de drainer par les cotés. Mais dans ces conditions, une partie de la chaleur apportée à la dalle du rdc est emportée en sous-sol par l'eau en mouvement. L'idée initiale de stocker à long terme dans le sol sous la maison a du laisser la place à un stockage d'eau chaude de forte capacité.

Le bâtiment est très compact, sur 3 niveaux pour la maison et 2 pour la partie pro, pour un total d'environ 250m<sup>2</sup> habitables et chauffés). La façade Sud est très vitrée (30m<sup>2</sup>), contrairement aux autres.



Les émetteurs de chauffage d'appoint se résument aux planchers chauffants du rez de chaussée, soit une nappe de PER multicouche de diamètre DN16 de 50m de long coté pro (celle que l'on voit sur l'image) et une autre nappe identique coté logement (non encore posée ici).

Le tube a été simplement déroulé et ligaturé sur les ferrailles avant coulée de la dalle.

La partie habitation dispose d'un poêle à bois Jotul au rdc.  
Les appoints (radiants électrique) prévus en SDB n'ont pas été installés car pas nécessaires.

## Principes et particularités

La toiture, inclinée à 20°, a été réservée au photovoltaïque (pour injection réseau et petite alimentation autonome basse tension). Le choix a été fait de monter les capteurs solaires thermiques, 22 m<sup>2</sup> en tout, à la verticale sur les murs Sud (+19° vers l'Ouest). Cela simplifie considérablement leur montage et annule les problématiques de surchauffe d'été, de grêle, d'assurance... La réduction de rendement est faible en plein hiver (les capteurs sont dimensionnés pour assurer près de 100% du chauffage, donc on s'intéresse essentiellement à la période novembre-février), d'autant que l'arrière des capteurs est sur-isolé par le mur en paille de la maison contre lequel il est fixé.



Les panneaux sont fixés par des plats alu épaisseur 3mm qui s'insèrent dans la rainure périphérique des cadres, puis vissés dans la structure bois de la maison.



Le 21 juin, l'ombre de l'avancée de toiture couvre les panneaux les plus hauts. Aucune importance dans le bilan car 100% des besoins sont largement couverts de toute façon à cette époque.



Les tubes PER de liaison entre panneaux et stockage sont noyés dans le granulats de verre cellulaire (Technopor) qui a été répandu dans les tranchées verticales pour isoler la dalle de l'extérieur.

Seul le tube de retour (PER 16) est manchonné en mousse. L'aller (PER 18), (invisible ici), ne l'est pas.

La pente n'étant pas parfaitement régulière, de l'eau peut stagner par endroit dans ces liaisons, mais reste hors gel.

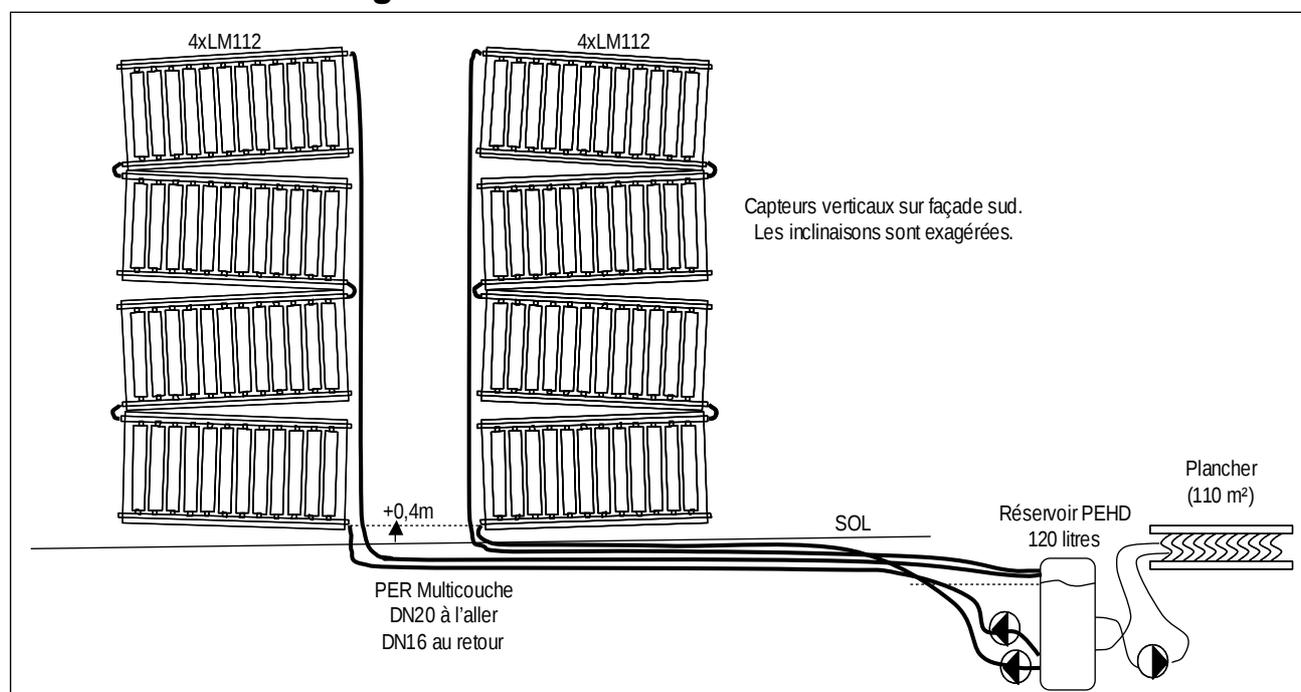
La plomberie a été simplifiée au maximum parce que je suis plus à l'aise avec un fer à souder d'électronique qu'avec un chalumeau, et aussi du fait que ces bricoles en cuivre sont généralement hors de prix et viennent de loin. Au final, j'ai retenu :

- aucun échangeur pour la partie chauffage : la même eau circule dans les capteurs, dans la réserve et dans le plancher.
- absence d'antigel par auto-vidange des capteurs.

- l'ECS est produite en instantané par un tube cuivre avec ailettes brasées plongé dans la réserve, en série avec un ballon électrique 50 litres d'appoint (il n'y a même pas de bypass pour l'été ou de robinet thermostatique, car le stock ne dépasse pas 65°C)
- des circulateurs performants à vitesse variable pour pouvoir d'abord remplir les capteurs dont le plus haut point est à 5 mètres au dessus du niveau haut de la cuve, et ensuite fonctionner à très faible débit pour augmenter l'écart de température entre entrée et sortie capteurs (pour mieux stratifier la cuve), tout en réduisant fortement la consommation électrique.
- la régulation de température d'eau à destination du plancher est assurée par le déplacement d'un tube dans la cuve où la stratification thermique verticale permet de choisir une eau plus ou moins chaude.
- Une mini-pompe à chaleur (350 Watts électrique et 1 à 1.5kW thermique) a été réalisée pour assurer un petit appoint, notamment dans la partie professionnelle. L'échangeur chaud est placé en série, pour ajouter 4-5 degrés avant envoi de l'eau dans le plancher chauffant. L'échangeur froid récupère les calories sur une boucle PER multicouche enterrée dans la tranchée des eaux usées et sur l'air extrait.
- Les tuyaux de plancher chauffant sont placés en partie basse de la dalle épaisse, soit 25cm sous le sol fini pour la maison et 18cm sous le sol fini dans la partie pro (qui n'a ni chape ni carrelage). Il faut compter environ 6 heures entre l'envoi d'eau chaude et l'augmentation de température dans la pièce. Le pilotage chauffage de la maison nécessite d'anticiper sur la météo de la semaine à venir et le niveau de température du stock... (en pratique, on modifie simplement la consigne de température de départ plancher et la mise en route ou non de la PAC lorsque c'est nécessaire, le choix restant souvent identique pendant plusieurs semaines). Il n'y a aucun asservissement automatique du chauffage sur la température intérieure ou extérieure (qui ne serait pas évident à faire compte tenu de l'inertie de réaction et des apports solaires passifs très importants).

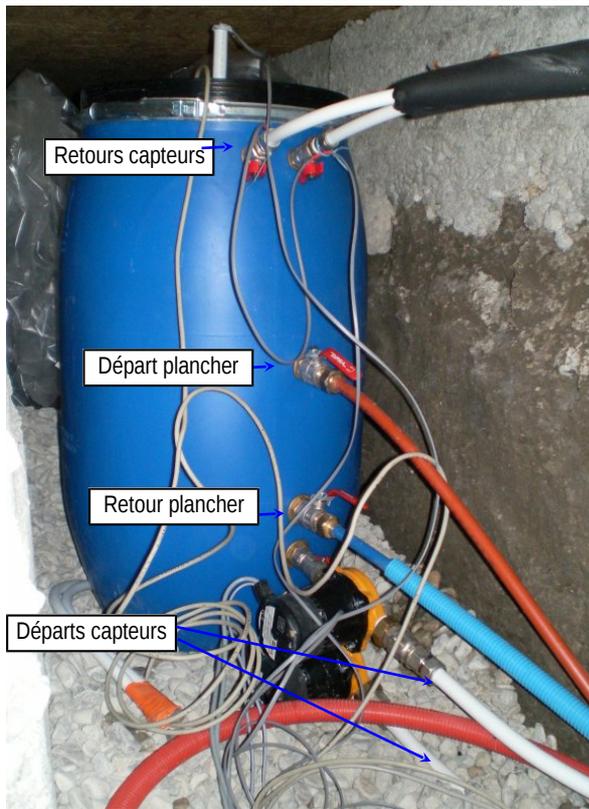
## Schéma de fonctionnement

### Version sans stockage :



Hormis les vannes d'arrêt montées à chaque piquage du réservoir, et un compteur de chaleur sur le départ plancher, on peut dire que c'est tout : ni purge, ni vase d'expansion... Le réservoir PEHD s'ouvre par le haut.

Le retour capteur est en cuivre sur la partie verticale, qui passe en PER avant la partie enterrée.



Le stock version 1: 120 litres, placé dans une tranchée technique sous la dalle.

De bas en haut, on distingue les 2 circulateurs alimentant chacun un champ de capteur, le retour plancher (en bleu), le départ plancher (rouge, avec un circulateur qui n'apparaît pas ici), et enfin les retours capteurs en PER blanc. (les 2 PER blancs à gauche au sol sont des chutes)

Le niveau d'eau du stock est initialement juste en dessous de l'arrivée des tuyaux blancs. Lors du remplissage des capteurs (8 LM112, 3 LM112 restant non alimentés), le niveau diminue mais reste au dessus du tuyau rouge, ce qui est indispensable pour alimenter le plancher chauffant.

Le réservoir n'a pas été isolé (la température dans cette tranchée technique est proche de celle de la maison)



Régulation à même le sol.

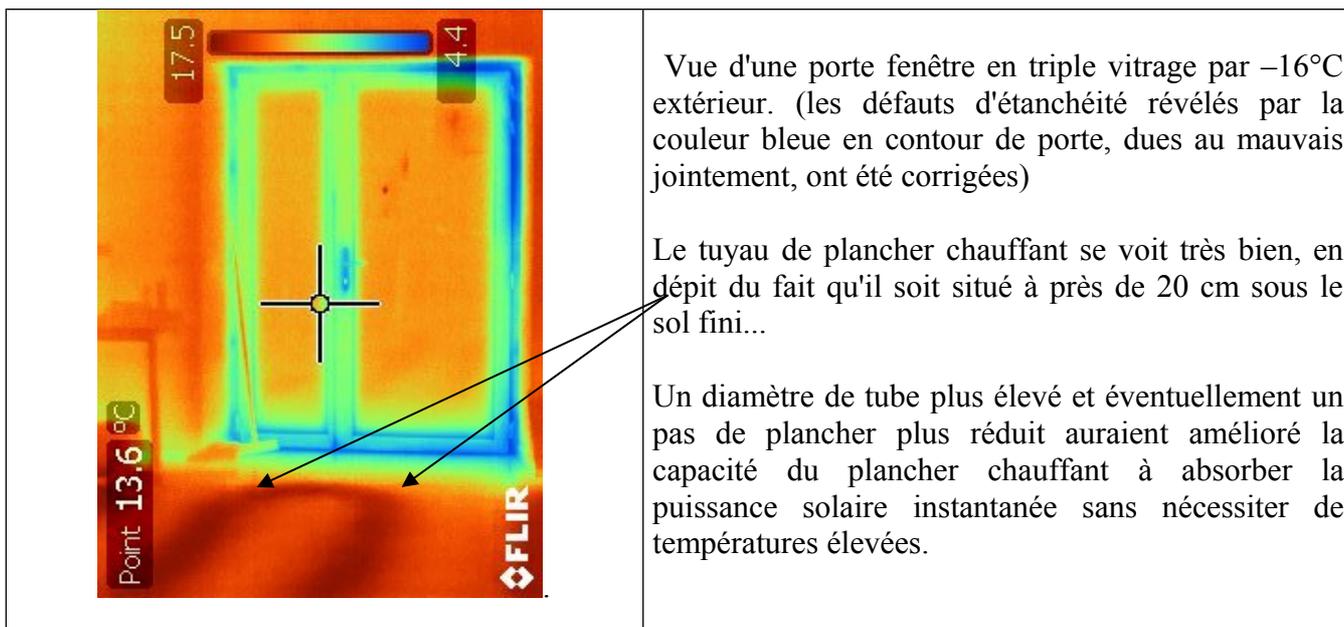
Ca ne craint rien, car tout est basse tension :

- les entrées capteurs en haut.
- les sorties PWM circulateur vers le bas.
- une connexion Ethernet
- une alimentation

On peut consulter, configurer, et même modifier le programme de la régulation à partir d'un PC dans la maison.

Pendant l'hiver 2011-2012, l'installation a fonctionné ainsi, avec un simple algorithme de régulation différentielle indépendante par champs de capteurs et une mise en route du circulateur plancher chauffant dès lors que la température du stock était supérieure à un seuil. Tout ce qui était récupérable était injecté dans le plancher et le sous sol, et l'ouverture des fenêtres n'a même pas été nécessaire tant l'inertie est forte.

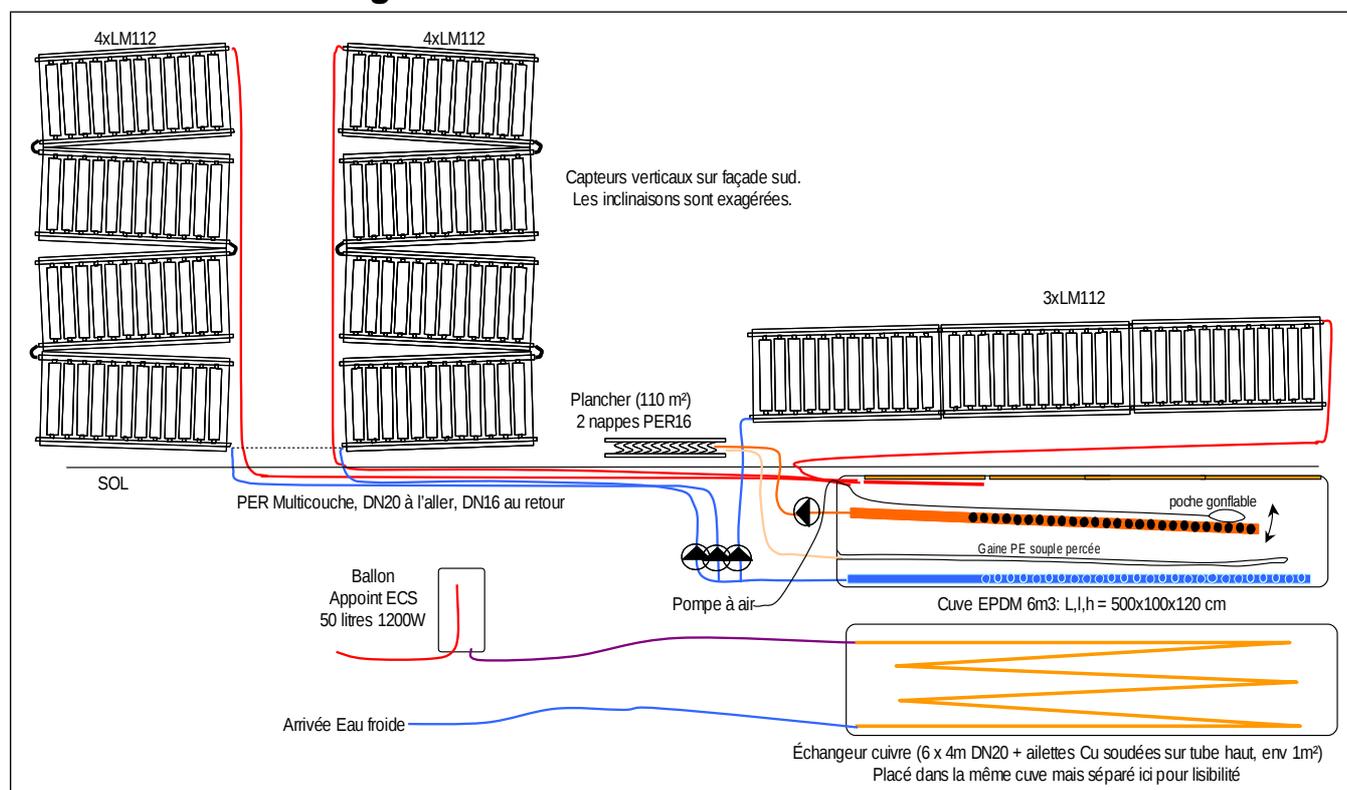
Cependant, la puissance des capteurs en plein soleil n'était pas adaptée au plancher chauffant (seulement 2 nappes de 50m de PER de diamètre 16, avec un débit maxi de 250 litres/h environ en totalité). Ainsi, pour 10kW solaires captés, la température d'eau dans le mini stock venait à monter à plus de 50°C pour que le sol parvienne à absorber cette puissance, limitant donc l'efficacité des capteurs.



Un petit appoint électrique a été nécessaire par grand froid (environ 1000kWh) dans la partie pro et il a fallu environ 300kg de bois (récupération et palettes du chantier) pour l'appoint de la maison. L'ECS était 100% électrique.

Dans les grands froids ( $-10$  à  $-15^{\circ}\text{C}$  pendant 10 jours) nous nous sommes contenté de  $16^{\circ}\text{C}$ , voir moins. Notons que l'absence de courant d'air et de parois froide rend la maison encore confortable bien en dessous de  $18^{\circ}\text{C}$ . L'allumage du poêle et la convection qui s'ensuit diminuent notablement le confort, à moins de profiter du rayonnement direct ou d'attendre une remontée en température de l'air, ce qui prend un peu de temps. Le poêle a tourné durant une vingtaine de soirées dans l'hiver.

### Version avec stockage de 6m<sup>3</sup>



*Les circulateurs doivent être placés le plus bas possible pour bénéficier d'une pression statique amont suffisante.*

## Cuve enterrée :

Je n'avais pas prévu la place pour l'installation d'un ballon de stockage. En plus, pour l'autovidange, il est intéressant que le niveau du stock soit au dessous du plus bas capteur. Comme la maison a des fondations sur plots assez profonds (en raison d'un sol argileux), il est possible de creuser près de la dalle sans danger.



La tranchée a été faite coté sud.

Un mur d'agglo de 20cm a été monté avec chaînages. Car 1,2 mètre de colonne d'eau exerce une pression non négligeable... même si le sol vient équilibrer cette poussée.

Sous la maison, le sol a été retenu, une banche mise en place et un mortier maigre coulé dans l'interstice (coté droit sur l'image).

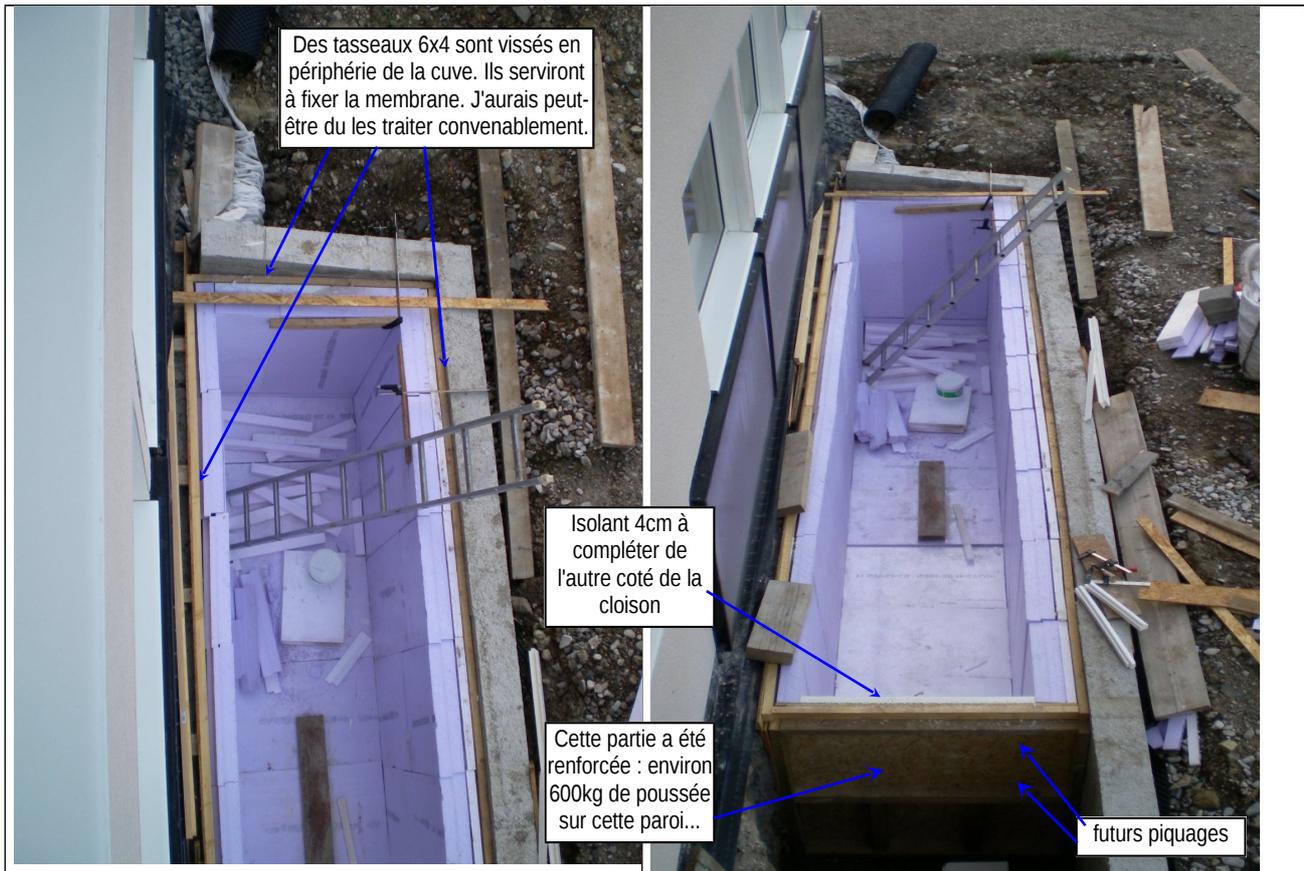
Il aurait mieux valu prévoir tout cela avant de faire la maison, j'y penserai la prochaine fois.

Le champ de capteurs que l'on voit sous les fenêtres correspond aux 3 x LM112 qui n'étaient pas utilisés le premier hiver.



Il est clair que des murs droits, un sol plan et des angles à 90° aideraient beaucoup. Rien de cela ici. Alors cutter, scie, patience et longueur de temps. (quoique l'automne arrivant, il ne fallait pas trop traîner) Le polystyrène est vaguement collé en place. Il sera de toute façon bien plaqué par la pression de l'eau, aucun risque qu'il ne bouge alors.

Il est important que le poids de l'eau (1,2 tonne par m<sup>2</sup> sur le fond) ne cause pas de déplacement notable susceptible de déchirer la membrane d'étanchéité qui sera mise en place.



Enfin la bâche EPDM. 1mm d'épais, c'est lourd. J'ai fait une première tentative de tout mettre en place en pliant sur place. Je n'ai pas réussi.

J'ai tout ressorti et tracé selon les cotes réelles (et toutes différentes) dans l'atelier, plié les angles comme un emballage cadeau, pour remettre le tout en place. J'ai préféré laissé en place la matière excédentaire plutôt que de couper et de souder, ce qui est faisable, mais à mon avis bien plus risqué pour l'amateur.

Au final, je suis plutôt confiant sur la durée de vie de l'EPDM. L'absence de corrosion me plaît beaucoup. La température utile du stock est faible par rapport à la capacité de l'EPDM (les isolants polystyrène sont plus proches de leur limites).

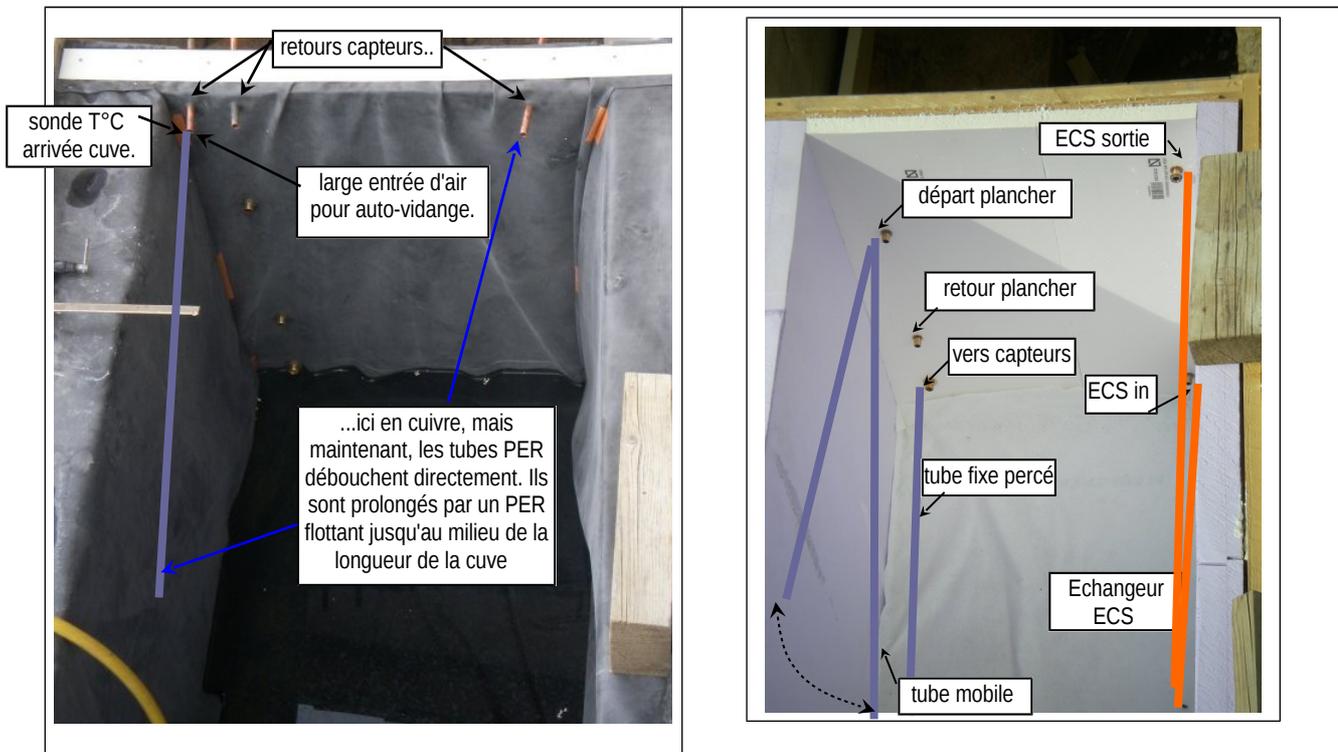
J'espère seulement que les tasseaux vissés en périphérie de la cuve ne seront pas trop confrontés à l'humidité à long terme.



Il est important que la partie supérieure soit de niveau. J'ai utilisé un tuyau transparent rempli d'eau pour faire un repérage précis sur toute la périphérie. Le but est de pouvoir remplir le stock au maximum, c'est à dire juste en dessous des tuyaux d'arrivées capteurs. Compte tenu de la surface de la cuve, le niveau est à peine modifié ( $< 1\text{cm}$ ) lors du remplissage de tous les capteurs.

Le niveau est susceptible de varier selon la température de l'eau stockée, du fait de sa dilatation, et probablement de celle des isolants – je n'ai pas encore bien quantifié le phénomène mais ayant rempli la cuve au maxi à froid, j'ai déjà constaté une hausse de niveau rendant impossible l'autovidange une fois le stock plus chaud. Des fuites (les arrivées capteurs dans la cuve ne sont pas parfaitement étanches) ont ensuite ramené le niveau à sa valeur maximale acceptable.

Au final, les plaques de polystyrène extrudé de 20mm d'épais qui flottent à la surface de l'eau arrivent aux environs du bord haut de la cuve.



Les piquages immergés sont réalisés en pinçant l'EPDM entre deux écrous laiton plats, vissés autour d'un tige filetée creuse DN 1/2" ou 3/4" selon les piquages. Les tubes de retour capteur ne sont pas immergés et ils traversent simplement la paroi EPDM.

Le piquage de départ vers capteurs est réalisé en fond de cuve (3/4"). Il apparaît que sa section est insuffisante pour alimenter les 3 zones de capteurs : lors du remplissage d'un groupe, circulateur en vitesse maximum, l'aspiration interfère avec les autres circulateurs et peut désamorcer un groupe de capteurs. La régulation a été modifiée pour interdire le remplissage simultané de plusieurs groupes de capteurs et augmenter les débits minimum lors du remplissage d'un groupe de capteurs quel qu'il soit.

La bâche EPDM (version bon marché, pour faire une marre dans le jardin) comporte des lais soudés les uns aux autres (donc des surépaisseurs).

J'ai eu de la chance, une bande de soudure est tombée pile poile à l'endroit où je devais percer mes trous pour les piquages du bas. Ainsi, c'est bien plus solide du fait de la double épaisseur.

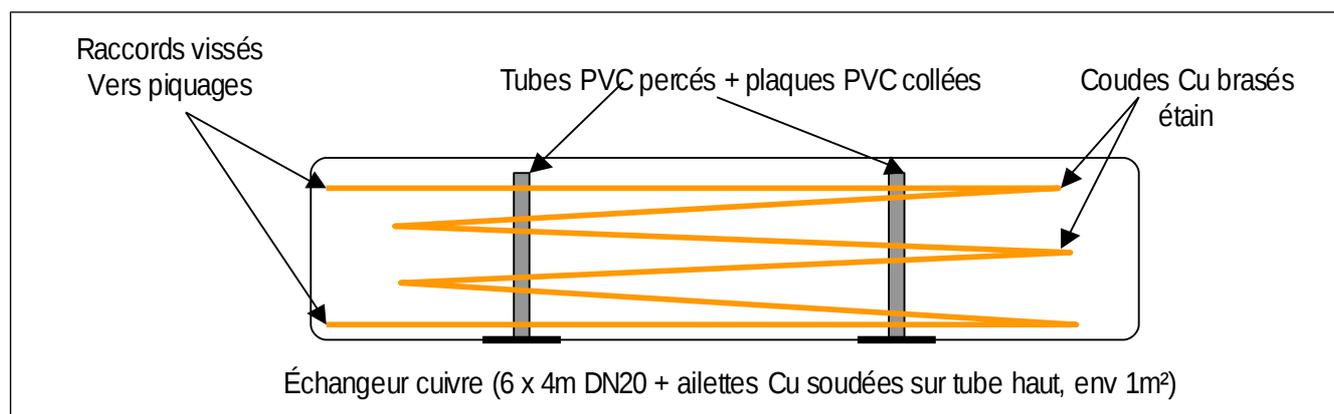
La cuve a été remplie progressivement avec de l'eau de pluie. D'abord une vingtaine de centimètres, afin de garder la possibilité de déplacer l'EPDM pour éviter des plis et zones sous tensions dans les angles (l'EPDM supporte plus de 100% de déformation, mais je préfère le bichonner pour qu'il dure autant que possible). Enfin, l'EPDM a été fixé en haut de la cuve, sur la périphérie, à l'aide de plats alu blanc (récupération) et un joint mousse a été collé sur la partie horizontale pour qu'il y ait une certaine étanchéité avec la membrane du couvercle.

Au final, les dimensions utiles (Lxlxh) de la cuve sont de 5x1x1.2m, soit 6m<sup>3</sup>. Dans la petite partie enterrée prolongeant la cuve, j'ai fixé au mur les pompes de départ capteur et plancher ainsi que la petite pompe à chaleur. Cette partie communique avec la tranchée technique sous la dalle de la maison, permettant ainsi d'intervenir par l'intérieur.

Cependant, l'endroit est bas de plafond et trop exigü pour y intervenir avec plaisir. D'autant qu'une évacuation d'eau pluviale mal conçue entraîne des infiltrations dans cette zone lors des grandes pluies. Il a fallu creuser un puisard et mettre une petite pompe pour amorcer si besoin le débit dans un tube d'évacuation qui rejette l'eau plus loin en contrebas.

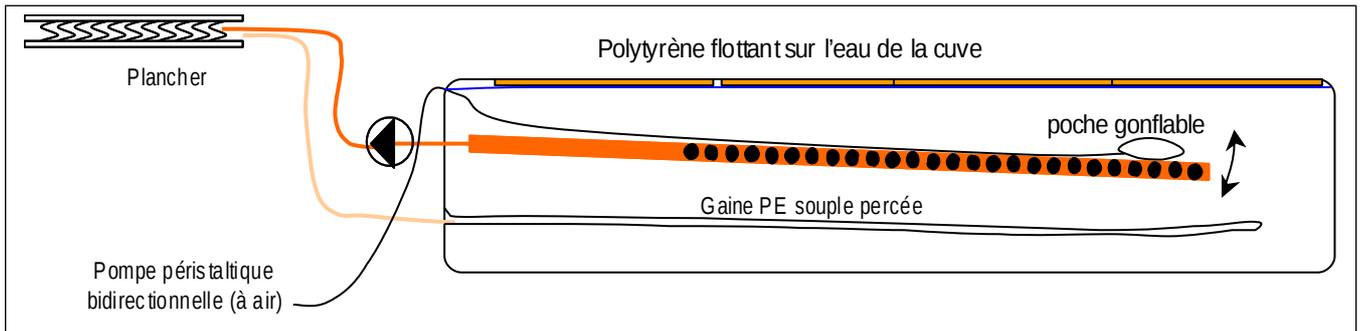
### **Dans la cuve :**

L'échangeur ECS a été fait avec 6 tubes de 4 m de DN20 cuivre :



L'ensemble est simplement posé dans le fond de la cuve, plutôt coté Sud pour se raccorder facilement aux piquages. L'eau froide arrive en bas, et ressort plus chaude en haut avant de rejoindre le ballon d'appoint.

Le reste de la cuve est occupé par les arrivées et départs capteurs et plancher :



*L'échangeur chaud de la PAC, placé entre le circulateur et le plancher, n'a pas été représenté ici.*

La régulation de la température d'eau amenée au plancher utilise une poche (perfusion de récupération) gonflée et dégonflée par une pompe péristaltique alimentée en 12V (l'inversion de polarité inverse le sens de rotation du moteur et de la circulation d'air). Le tube percé pour le départ plancher est en PVC et tend donc à couler (densité 1.4). En gonflant la poche, il remonte, permettant de puiser de l'eau plus chaude du fait de la stratification thermique. Inversement, si le départ, mesuré avant le circulateur, est trop chaud, la pompe dégonfle la poche et le tube descend. Quand le tube de départ est proche du tube de retour, le fonctionnement ressemble à celui d'un mitigeur.



On distingue ici la poche plastique et le tube (PVC diam 4mm), de même que la pompe initialement utilisée (abandonnée car interdisant le dégonflage). Le tube va être mis en place dans la cuve, sous l'isolant et le polyane vert (remplacé depuis par un PVC)

Le tube rigide PVC de 3m est percé régulièrement pour l'aspiration d'eau et monté de façon souple (tube silicone) coté piquage. Il n'y a aucun guide vertical ou autre mécanique.

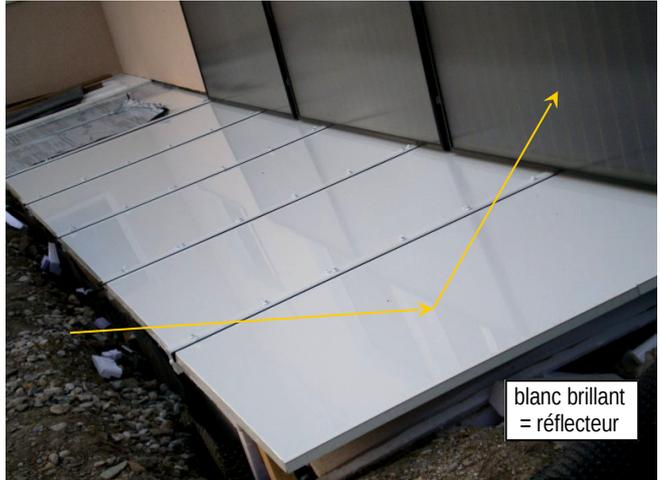
L'espace de travail entre haut de cuve et couverture rigide (panneaux sandwich) rend le travail peu commode.

Néanmoins, le système est instable, car la pression exercée par l'eau sur la poche tend à diminuer lorsqu'elle monte, accentuant la montée. Je pensais m'en tirer électroniquement, mais il faudrait un temps de réaction faible et une pompe toujours en marche. J'ai finalement ajouté une petite chaîne métallique (cuivre) au bout du tube mobile. Cette chaîne stabilise le système car la montée entraîne des maillons supplémentaires, nécessitant une poussée d'Archimède plus importante sur la poche, donc plus d'air. Pour ceux qui aiment les expériences de physique amusante avec les bras dans l'eau tiède...

Par ailleurs, j'ai utilisé une gaine polyéthylène (densité légèrement inférieure à 1) percée régulièrement et reliée au retour plancher dans l'espoir qu'ainsi, elle se positionnerait au niveau de la strate dont la température égale celle de retour plancher (notamment pour éviter que cette eau ne se mélange avec le bas du stock dans le cas où celui-ci est très froid). Cela ne semble pas marcher, la gaine flotte trop, et j'ai dû la lester avec quelques morceaux de cuivre. Je pense qu'elle reste au fond maintenant, sans certitude car je n'ai pas mis de caméra sous-marine dans la cuve (ce qui serait coûteux en raison des températures élevées et des soucis d'étanchéité des câbles d'alimentation).



La pompe péristaltique et le manomètre qui indique la pression dans la poche, correspondant à la profondeur à laquelle se trouve le tube (120mbar = 1,2 m d'eau, au fond de la cuve – ici 40mbar, donc au 2/3 de la hauteur). Une petite carte électronique indépendante commande le moteur et communique avec la régulation principale sur le bus 1 Wire des capteurs de température.



blanc brillant = réflecteur

Sur le niveau d'eau de la cuve, j'ai placé des plaques de polystyrène extrudé de 20mm d'épais qui flottent et assurent un premier niveau d'isolation. Elles aident aussi au maintien en place d'une membrane PVC de 0.75mm d'épais, plaquée sur les joints périphériques par des plaques d'OSB posées sur toute la surface de la cuve. Ces plaques de 9mm d'épais sont rigidifiées par des tasseaux bois. Au dessus, une isolation en multicouche réflecteur (15 couches) a été utilisée (2 épaisseurs) – cela correspond, selon l'expérience que j'en ai, à environ 20cm de laine de verre (et un peu mieux quand les températures sont élevées).

**Finition :**

La couverture est un système de couverture véranda (sandwich polystyrène + alu) peu écologique mais efficace, assurant en outre un rôle de réflecteur solaire pour un groupe de capteurs.



*Pliage des extrémités de panneau sandwich pour réalisation goutte d'eau*

## Pompe à chaleur :

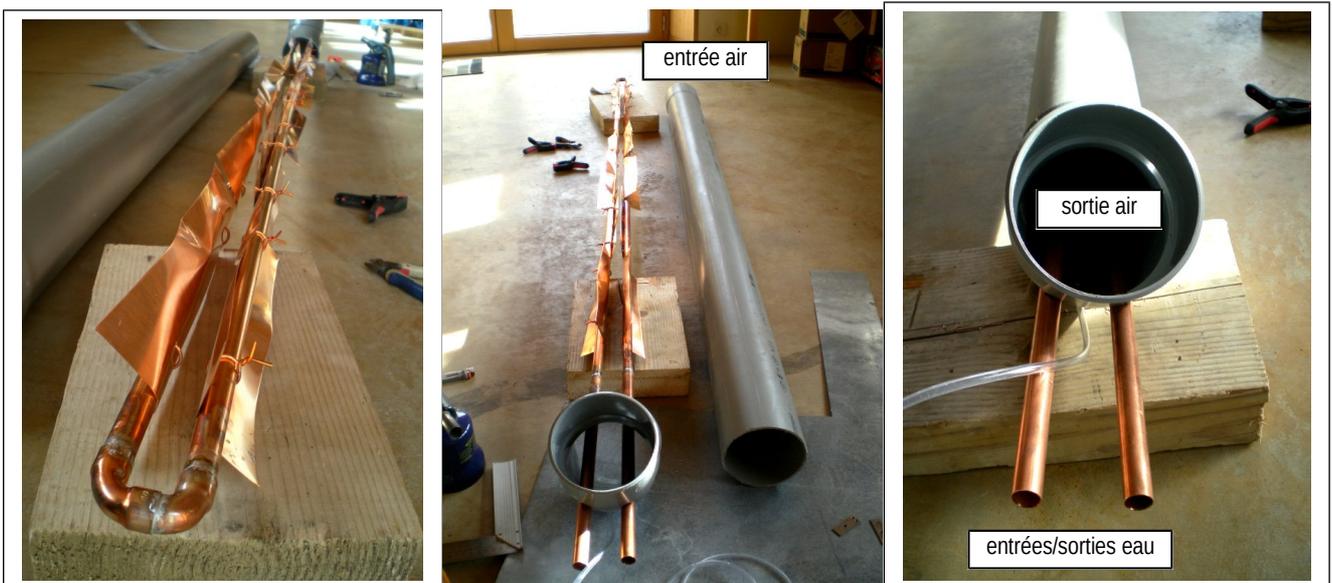
A la construction, j'ai enterré un tube PER multicouche DN16 de 100 mètres aller-retour dans la tranchée d'évacuation des eaux usées, à environ 2 m de profond. Je souhaitais faire une PAC à détente directe de butane (R600a) dans ce tube, mais cela pose des soucis d'étanchéité et de risque d'explosion. J'ai finalement opté pour une PAC eau-eau avec deux échangeurs, malheureusement moins performante. Et les pertes de charges du PER 16 sur 100 mètres limitent fortement le débit d'eau envisageable (en pratique 250 l/heure), et donc la puissance récupérable (environ 1,2kW pour 4°C d'écart entre entrée et sortie).

Un compresseur rotatif, une bouteille de liquide (R134a), deux échangeurs surdimensionnés et les sécurités habituelles (basse pression coté froid et haute pression coté chaud) ont été assemblés par un frigoriste. J'ai complété avec une commande directe du compresseur par la régulation. Le primaire d'un relais statique (en 3.3Volts) est monté en série avec les sécurités de pression de la PAC (qui interrompent le circuit en cas de problème). Ainsi, la régulation peut, en mesurant la tension de sa patte de sortie qui commande le relais statique, déterminer si les sécurités sont actives ou non (la tension de la sortie diminue sensiblement lorsque le relais statique consomme quelques milliampères, si la sécurité est activée, la tension de sortie remonte significativement).

Au préalable, la régulation assure que le circulateur plancher et le circulateur circuit froid fonctionnent. Il y a également des temporisations à respecter pour ne pas endommager le compresseur. Mais la PAC n'est au final contrôlée qu'avec 2 pattes de sortie (une pour le compresseur, une pour le circulateur circuit froid) et une entrée de contrôle de température du circuit froid.

La bonne nouvelle a été de constater que la température du circuit froid dans le sous-sol se maintenant longtemps au dessus de 10-12°C. Avec à la clé un COP de 5 pour une sortie à 35°C (hors consommation des circulateurs). Mais au cœur de l'hiver, la température du circuit froid a baissé progressivement. J'ai donc ajouté un récupérateur de chaleur sur l'air extrait pour augmenter la température du circuit froid et améliorer l'efficacité (et éviter tout risque de gel dans l'échangeur, car le circuit froid est sans antigel).

L'air extrait passe dans la tranchée technique, tout près de la cuve de stockage et de la PAC. Un simple tube PVC a été équipé d'un échangeur en tube cuivre DN20 + ailettes soudées. Il faut récupérer et évacuer les condensats, par le tube souple que l'on voit à droite. Le tube PVC est en pente.



## Régulation :

Une carte Olimex PIC-P67J60 a été utilisée et programmée par mes soins. L'interface utilisateur se fait via le réseau Ethernet : il suffit de saisir l'adresse IP de la carte dans le navigateur de n'importe quel PC (éventuellement en Wifi si on veut se promener) pour accéder aux menus de visualisation des températures et de choix des paramètres de fonctionnement. Cette connexion permet aussi d'accéder à la régulation à distance par Internet, d'envoyer automatiquement les mesures enregistrées par différents capteurs sur un serveur d'archivage...

Régulation Solaire - v1.04 - 21/08/2013 14:52:08  
Température extérieure (Sud) : 55.91°C  
Ensoleillement (plan vertical) : 630W/m²  
Niveau: 15.04mm - Pression C2: -1

Température dans Capteur 1 : 64.0°C  
Température dans Capteur 2 : 94.6°C  
Température dans Capteur 3 : 67.5°C  
Température Départ Capteurs : 0°C  
Température Départ Plancher : 61.9°C - Consigne: 31.0°C  
Température Retour Plancher : 27.3°C

Température arrivée cuve du Capteur 1 : 66.3°C - Consigne: 66.1°C  
Température arrivée cuve du Capteur 2 : -1.1°C - Consigne: 62.5°C  
Température arrivée cuve du Capteur 3 : 65.7°C - Consigne: 65.5°C

Etat Capteur 1: Marche - Débit 24%  
Etat Capteur 2: Attente Démarrage - Débit 0%  
Etat Capteur 3: Marche - Débit 20%  
Etat Plancher: Arrêt - Débit 70%  
Etat PAC: Arrêt - Tension Commande 7

	Coté Est (°C)	Coté Ouest (°C)
Temp Haut Cuve (1200mm)	-2.98	62.38
Temp +1100mm:	62.38	62.31
Temp +1000mm:	-2.98	61.98
Temp +800mm:	-2.98	-2.98
Temp +600mm:	-2.98	61.98
Temp +400mm:	-2.98	61.44
Temp +200mm:	-2.98	60.64
Temp Bas Cuve:	58.84	58.84

Configuration Modes  
Configuration Températures  
Configuration Débits et Durées  
Configuration Autre

**Configuration de la Régulation - Choix Températures**

Température démarrage Capteur 1: 18.0   
Température démarrage Capteur 2: 18.0   
Température démarrage Capteur 3: 18.0   
Température démarrage Plancher: 16.0

Delta T démarrage capteurs: 4.0   
Delta T pour calcul consigne température de sortie capteurs: 15

Température Max Capteur: 99.0   
Consigne départ plancher: 31.0   
Température Max Plancher: 60.0

**Configuration de la Régulation - Modes de fonctionnement**

Mode Capteur1:  Automatique  OFF  ON   
Mode Capteur2:  Automatique  OFF  ON   
Mode Capteur3:  Automatique  OFF  ON   
Mode Plancher:  Automatique  OFF  ON   
Mode PAC:  Automatique  OFF  ON

Démarrage à: 4 : 3   
Arrêt à: 19 : 0

*Principaux menus de la régulation*

L'électronique ajoutée à la carte est très simple car les sorties digitales (0-3,3V) pilotent directement les entrées PWM des circulateurs que j'utilise (HALM HEP-PWM). Les sondes de température sont des thermistances (CTN) de précision montées en pont diviseur de tension (une résistance de rappel vers le +3,3V, la CTN vers le 0V, un petit condensateur de filtrage, et on mesure la tension résultante qui varient avec la température). La non linéarité de ce montage est corrigée par logiciel.

Dans la cuve, j'ai immergé 2 guirlandes de 8 capteurs DS18B20 pour mesurer la température chaque 20cm et vérifier la stratification. Ces capteurs limitent le nombre de fils car il suffit de l'alimentation et d'une patte d'entrée/sortie pour communiquer individuellement avec chaque capteur, repéré par un numéro unique d'identification.

La régulation pilote aussi le moteur 12 volts de la pompe péristaltique à air pour gonfler la poche permettant de faire monter et descendre le tube de piquage de l'eau du stockage vers le plancher. Chaque minute, la température de départ vers le plancher est mesurée. Si elle est trop basse, la pompe tourne dans un sens pendant 2-3 secondes. Si elle est trop haute, la pompe tourne de la même façon dans l'autre sens. Cette régulation primaire donne satisfaction.

La stratification de la cuve est favorisée par l'apport d'un retour solaire dans la partie haute de la cuve à une température proche de celle déjà existante. C'est pourquoi il est nécessaire de contrôler le débit dans les capteurs et de le ralentir si la température de sortie capteur est trop basse. Sinon, on refroidit les couches supérieures du stock. En plein hiver, il est essentiel de conserver des strates à un niveau de température suffisant pour assurer le chauffage, en l'occurrence d'au moins 30°C, mais de préférence un peu plus, pour anticiper sur la décroissance naturelle d'environ 0.5 à 1°C par jour lors des périodes sans soleil.

L'algorithme utilisé compare la température d'arrivée solaire dans la cuve à une consigne, élaborée à partir de la mesure de température des strates hautes de la cuve :

$$T^{\circ}\text{consigne solaire} = T^{\circ}\text{haut cuve} + (\text{DeltaT} \times \text{PWM circulateur})$$

-DeltaT est un paramètre utilisateur modifiable, de l'ordre de 8-15°C

-PWM circulateur est la vitesse circulateur alimentant ce groupe de capteurs, en pourcent du maxi.

La consigne est ensuite utilisée pour déterminer la vitesse du circulateur : périodiquement (chaque minute ou un peu plus lorsque le débit s'accroît), la température d'arrivée est comparée à la consigne et la vitesse est ajustée en conséquence. Il convient d'éviter de procéder à des ajustements trop brusques sans quoi la régulation est instable. Cependant, une réaction trop lente est préjudiciable lorsqu'il y a des passages nuageux qui se succèdent rapidement.

La formule de calcul de la consigne stabilise la régulation : par fort ensoleillement, le circulateur tourne un peu plus vite et la consigne demandée augmente, ce qui vise à limiter la hausse de débit capteurs. Inversement, par temps couvert, le débit est minimum et on se contente d'une eau à température proche de celle du haut de la cuve. L'arrêt complet de la circulation est déterminé par un écart minimal de température entre l'arrivée capteur et le bas de la cuve. Cela peut conduire à refroidir légèrement les strates hautes de la cuve, c'est pourquoi je réfléchis encore à des alternatives. L'idéal serait de pouvoir alors injecter l'eau des capteurs solaires juste à la bonne hauteur dans la cuve.

## Résultats / Bilans

L'hiver 2011/2012, 3462 kWh solaires ont été injectés dans le plancher. Il a fallu environ 1750 kWh d'appoint de chauffage (élec + bois), soit 66% de couverture solaire (sans compter le solaire passif).

Le coût de l'appoint chauffage est inférieur à 1 Euro/m<sup>2</sup>/an (l'électricité est achetée renouvelable chez Enercoop et le bois utilisé était un déchet)

Pour l'ECS, 100% électrique soit environ 1000kWh ou 150Euros.

L'hiver 2012/2013, 4900 kWh injectés dans le plancher dont 800 apportés par la pompe à chaleur. Appoint bois d'environ 250kg et encore près de 800kWh électrique pour un déshumidificateur utilisé pour assainir la tranchée technique sous la maison et la cave - défaut lié au problème d'évacuation des eaux de pluie.

Soit encore 65% de couverture, avec un hiver peu favorable au solaire.

ECS : préchauffage à 25-30°C l'hiver puis 100% solaire à partir de fin Mai. Environ 300kWh d'appoint annuel.

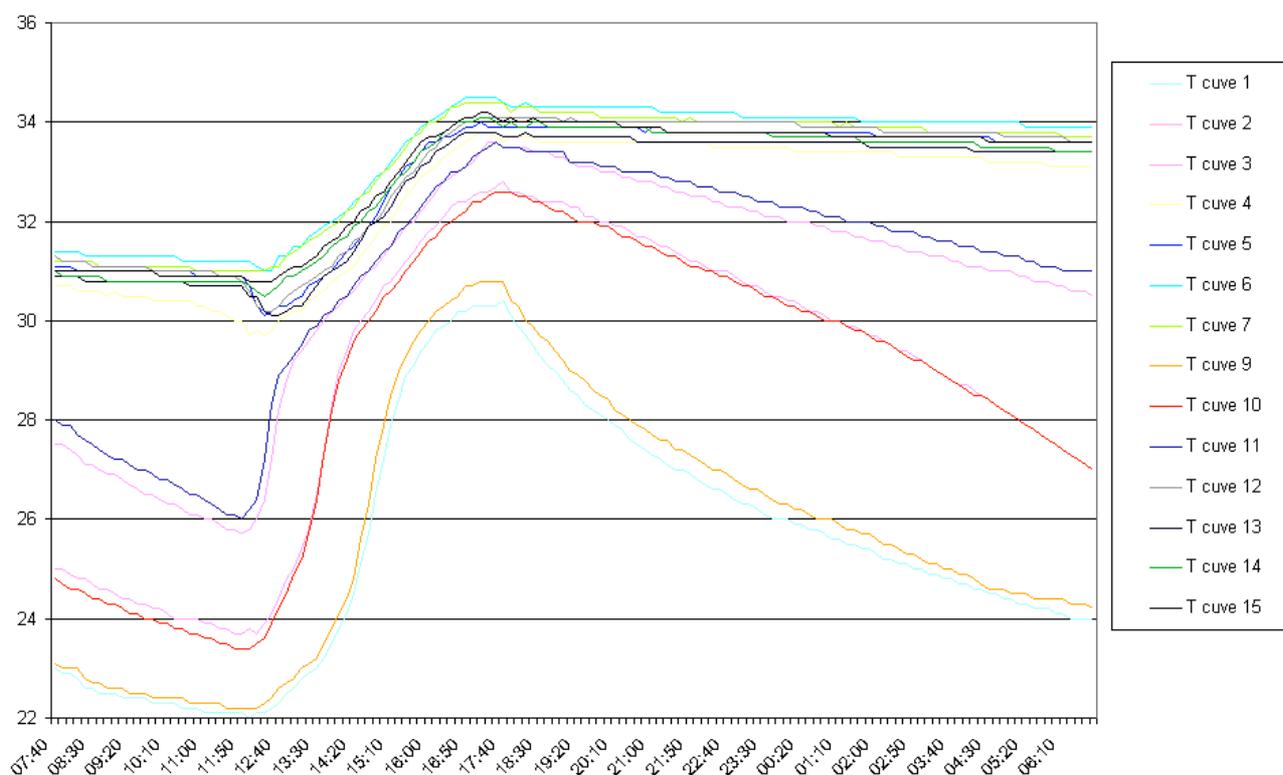
Globalement, ces résultats doivent être relativisés du fait que l'on se contente de températures d'ambiance peu élevées. Mais plusieurs facteurs affectent le bilan :

- impossibilité de pré-charger en température le sous-sol de la maison en fin d'été du fait que l'installation n'était pas opérationnelle à temps.
- météo peu favorable en 2012-2013
- isolation périphérique encore imparfaite (les bords de dalle chauffante sujets à pertes notables, surtout en 2011-2012)

Coté financier, l'énorme avantage du projet est qu'il évite le coût d'un chauffage central classique. L'investissement en matière réalisé reste modéré. Mais s'il fallait compter le temps de développement et de mise en œuvre, le bilan serait un peu triste...

### **Stratification :**

Les 2 guirlandes verticales de capteurs de température placées dans la cuve montrent que la stratification est effective et qu'elle peut demeurer plusieurs jours.



Bien que les sondes soient éloignées de plus de 2 mètres (coté Est et Ouest) les températures mesurées au même niveau dans la cuve sont très proches (les courbes de 2 capteurs du même niveau donnent des valeurs similaires) Dans le graphique ci dessus, on constate que seules les couches basses se refroidissent : le plancher est alimenté, mais prélève de l'eau à environ 30°C sans perturber les couches supérieures. Avec un débit d'environ 100 à 200 litres/heure, le plancher peut tourner plusieurs jours avant de passer en revue le stock de 6000 litres, ne serait-ce qu'une fois. Inversement, chaque groupe de capteur est soumis à un débit variant généralement entre 100 et 600 litres/heure, et durant une journée ensoleillée d'hiver, près de la totalité du stock passe une fois à travers un groupe de capteurs.

Ces débits sont très sensiblement inférieurs à ce qui se pratique habituellement en solaire thermique, conduisant à des écarts de température plus élevés et des consommations de circulateur très réduites.

# Difficultés rencontrées

## Problème de gel

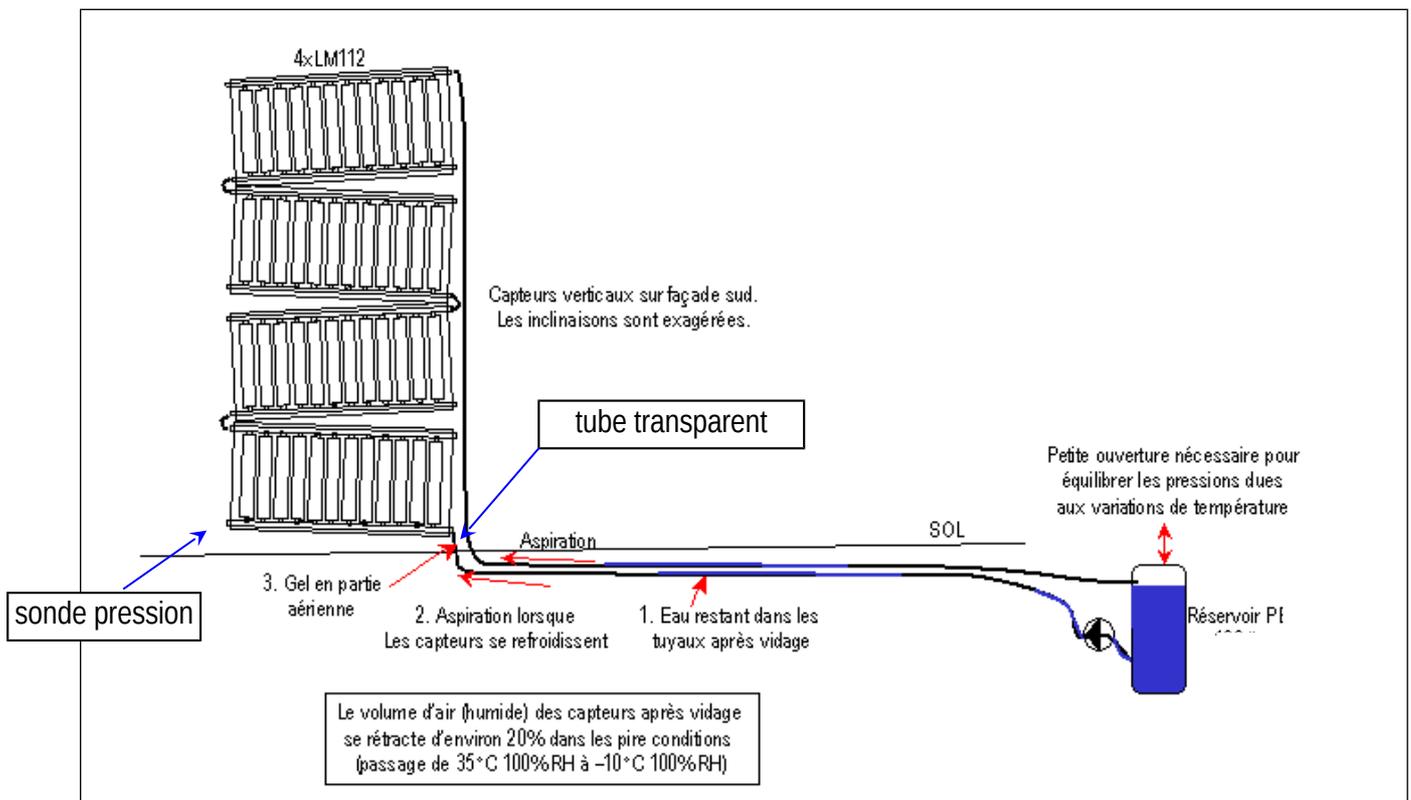
Lors des grands froids, de l'eau a gelé dans les canalisations PER en amont des capteurs. Sans dégât la première année. Mais la seconde, le gel a atteint le collecteur bas du capteur coté Ouest, avec fuite à l'arrière du tube collecteur et nécessité de réparation urgente (en grand froid).

L'accès direct au capteur, en façade de la maison, se révèle être un sérieux atout lorsqu'il faut procéder à telle réparation: la vitre a été déposée, le collecteur brasé directement en place, sans démontage (mais avec difficulté pour atteindre l'arrière du tube). Puis la vitre remise en place.

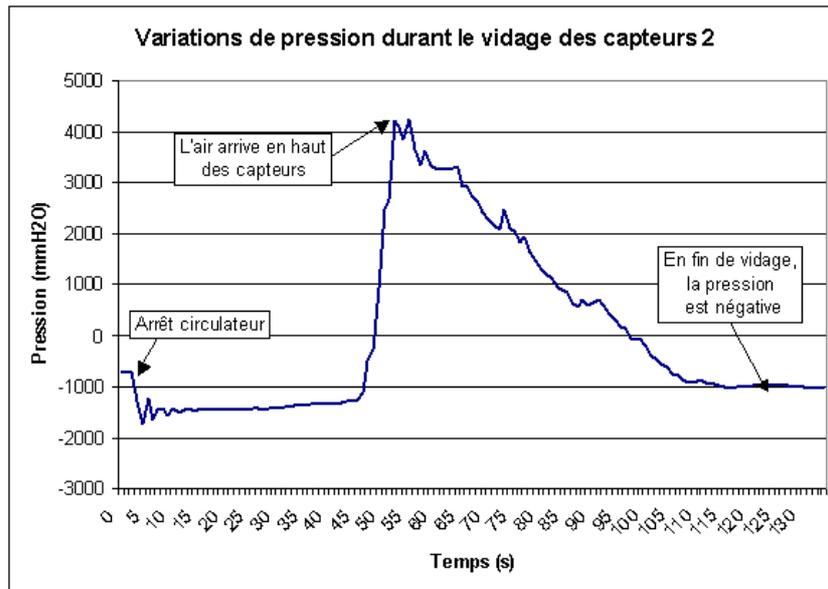
L'isolant du capteur était imbibé d'eau accumulé durant la fuite. Il a fallu plus de 4 mois pour l'évaporer. J'ai longtemps cru que la fuite était mal réparée, mais il semble que le fonctionnement à basse température l'hiver (c'est le premier panneau de la série, il est donc proche de la température du bas du stock), et les petites ouïes d'aération, ne permettent pas d'évacuer beaucoup de vapeur d'eau. La présence de condensation interne dans ce capteur a peut-être légèrement affecté le rendement d'ensemble sur la seconde saison de chauffe.

## Cause identifiée

Il apparaît que la pente des canalisations départ et retour capteur ne permet pas une vidange parfaite en cas de belle journée ensoleillée suivie d'une nuit très froide : en effet, dans ces conditions, l'air tiède et humide en fin de vidage se refroidit et condense au coucher du soleil, et se contracte : La pression interne des capteurs diminue pour aspirer l'eau mal évacuée dans les canalisations aller et retour panneaux.



Une sonde de pression (reliée à la régulation) a été ajoutée au bout du premier collecteur, puis un tube transparent pour visualiser les phases de vidage.

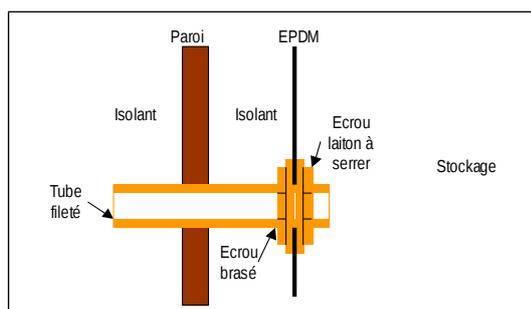


Je pensais qu'à l'arrêt du circulateur, l'eau du circuit repartait en sens inverse, en un ensemble cohérent. Il n'en est rien : le tuyau de retour capteur se vide d'abord progressivement. Puis des bulles remontent dans la canalisation verticale. Lorsqu'elles atteignent le sommet des capteurs, la dépression qui retenait l'évacuation chute brutalement et l'eau s'écoule alors rapidement des capteurs en sens inverse de la circulation normale. Mais la colonne verticale reste encombrée d'eau, avec un intense courant de bulle montantes. Une fois les capteurs vides, le courant de bulle s'arrête, et l'eau restant dans la colonne rejoint la partie presque horizontale des tuyaux entre capteurs et cuve. Les capteurs restent en légère dépression (environ -1m de colonne d'eau, c'est à dire que l'eau est proche du collecteur inférieur du panneau le plus bas). Avec la contraction progressive de l'air humide des panneaux, l'eau peut remonter ensuite bien au delà.

Le problème a été contourné par l'ajout d'une fonction de post-vidage à la régulation : après le premier vidage, la régulation recommence à remplir le circuit pendant quelques secondes, puis arrête définitivement. Ce processus purge la section horizontale de retour capteur et donne généralement satisfaction. Cependant, compte tenu du risque de casse, j'ai contrôlé manuellement les valeurs de pression et parfois ouvert le circuit où est connecté le capteur de pression pour assurer le vidage total lors de grands froids. Il me reste à trouver une solution à long terme. Ce sera probablement une mini-électrovanne placée à l'endroit du capteur de pression, et qui s'ouvre momentanément en cas de fort gel. Peut-être qu'une simple fuite calibrée suffirait également en rétablissant progressivement l'équilibre de pression.

Je pense que la maîtrise du risque de gel est un élément crucial de cette configuration simplifiée où l'eau du stock important circule à la fois dans les capteurs et dans le plancher. Il y a encore matière à réflexion à ce sujet.

## Fuite cuve



Détail d'un piquage

Une fois remplie, j'ai constaté que la cuve perdait. Une fuite s'est produite au niveau d'un piquage, heureusement pas situé en bas de cuve. Avant le serrage des écrous laiton, il faut veiller à découper proprement l'EPDM, sinon, il peut se coincer dans le pas de vis et empêcher le serrage pour pincer la membrane. L'écrou inaccessible (derrière l'EPDM) est brasé au tube pour l'étanchéité du filetage et permettre le serrage du second écrou.

## Coûts indicatifs :

<i>Prix TTC</i>			
11 LM Tinox (22m <sup>2</sup> )	5 000 €		
Alu support et vis	50 €		
Tranchée	400 €		
Maçonnerie	1 250 €		
Bois	50 €		
EDPM	360 €		
Circulateurs	400 €		
Polystyrène extrudé	800 €		
Isolant mince	200 €		
Plomberie	600 €		
Electronique	100 €		
Pompe péristaltique	40 €		
Autre	500 €		
PAC	2 200 €		
	<hr/>		
	11 950 €		

Je n'ai pas compté mes heures, mais l'ordre de grandeur est très élevé, peut-être 1000. La maçonnerie et la fabrication de la PAC ont été sous-traitées.

J'ai pu bénéficier de certains prix professionnels ou négociés ou encore achetés au plus bas prix.

## Conclusion

L'utilisation d'un système de chauffage solaire actif semble peu attractif pour les maison très bien isolées avec de forts apports passifs : La production n'est importante qu'aux moments où les besoins sont très faibles. Seul un moyen de stockage peut améliorer l'efficacité du système et permettre d'atteindre un taux de couverture des besoins supérieur à 50%.

Avec une dalle isolée en périphérie seulement, le stockage dans le sol parait possible, mais difficile à maîtriser, et des pertes d'énergie importants peuvent résulter de mouvements d'eau souterraine. Une grosse cuve de stockage d'eau morte permet de mieux gérer les apports et les soutirages de chaleur.

Dans le cas présent, une autonomie de près d'une semaine est atteinte par temps froid et sans soleil. Cela ne suffit pas encore à garder un bon confort en 100% solaire, surtout avec une météo très défavorable comme l'hiver 2012/2013. Mais l'appoint de chauffage est en définitive très faible (moins de 10kWh/an/m<sup>2</sup>), et ainsi, la production photovoltaïque de la toiture représente 3 à 4 fois la consommation totale d'énergie du bâtiment, activité professionnelle incluse. (hors transport..)

J'espère que ces lignes encourageront certains à tenter l'aventure, et que des systèmes simples et efficaces, à fort stockage, pourront se développer pour assurer la grande majorité des besoins énergétiques des bâtiments.

Je tiens à remercier les personnes ayant contribué au site d'Apper Solaire, qui est d'un grand soutien, moral et technique, lorsque la dureté des lois physiques s'acharne et que la solitude et le découragement guettent le plus entêté des convaincus.