

CHAUFFAGE PAR PANNEAU SOLAIRE A AIR

EXPERIENCES SUR UN PANNEAU AUTO CONSTRUIT

Auteur : Joel LASSORT

Joel.lassort chez orange.fr

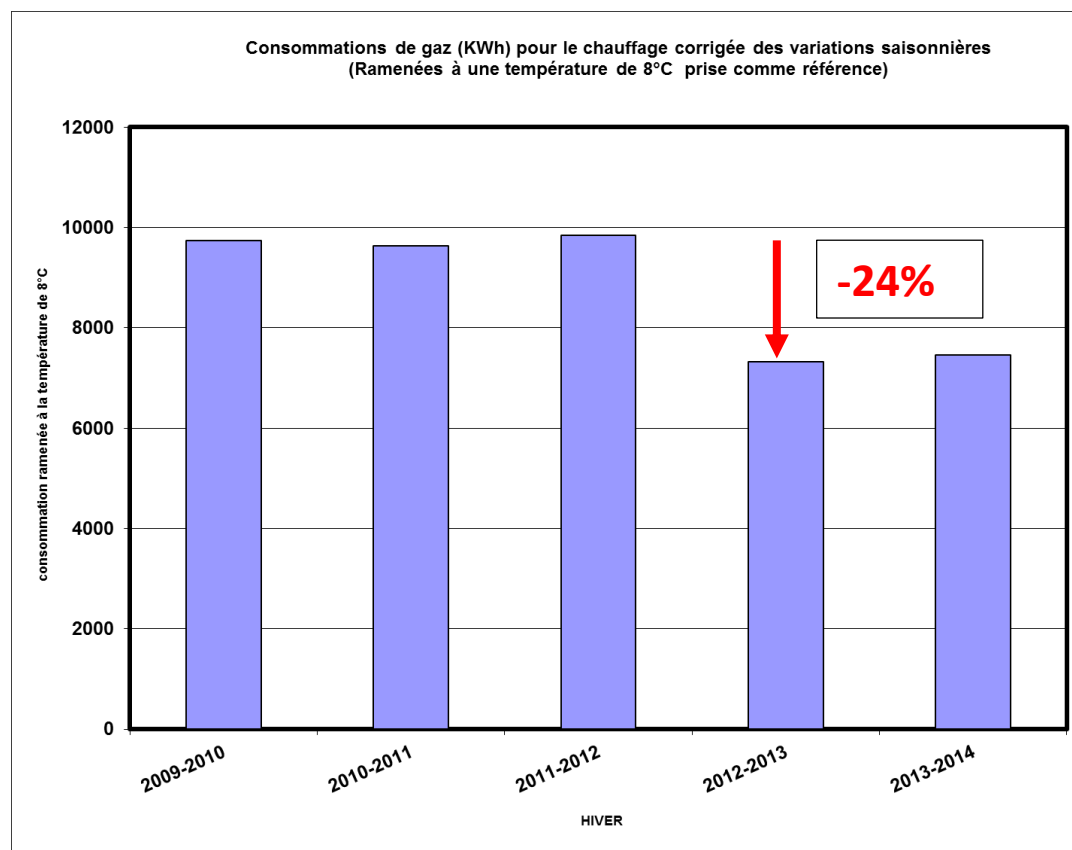
Localisation : Bordeaux 33

Bonjour à tous,

Voilà bientôt 4 ans que je suis à la retraite et, entre autre, j'ai utilisé ce temps pour essayer de réduire ma facture énergétique.

La première chose que j'ai faite est de mieux isoler les combles de ma maison et de changer ma vieille ventilation mécanique hygroréglable par une VMC double flux.

Le résultat sur ma consommation de gaz pour le chauffage est sur le graphique ci-dessous :



Pas mal !!

Mais comment faire pour réduire encore plus ?

Je me suis intéressé d'abord au solaire. Après avoir fait le tour du marché du neuf et de l'occasion et avoir analysé l'orientation de ma maison (qui se situe en ville) je suis arrivé à la conclusion, peut-être à tort, qu'il fallait que je construise moi-même mes panneaux tout en employant la technique la plus simple possible pour en réduire le prix.

Pour la technique j'ai consulté le site de l'APPER (et d'autres sites ...), que je remercie au passage pour la richesse des informations que l'on peut y trouver, où j'ai trouvé deux auto constructeurs de panneaux à air.

La technique employée par Guy ISABEL (voir compte rendu) m'est apparue intéressante et je m'en suis donc inspiré.

Mais je suis le genre de type qui ne croit que ce qu'il voit et donc avant d'envisager une quelconque installation sur ma maison j'ai décidé de réaliser un panneau prototype pour évaluer la pertinence de l'installation définitive.

CONSTRUCTION DU PANNEAU PROTOTYPE :

J'ai opté pour un coffre en bois (Je travaille régulièrement le bois, j'ai donc les outils).

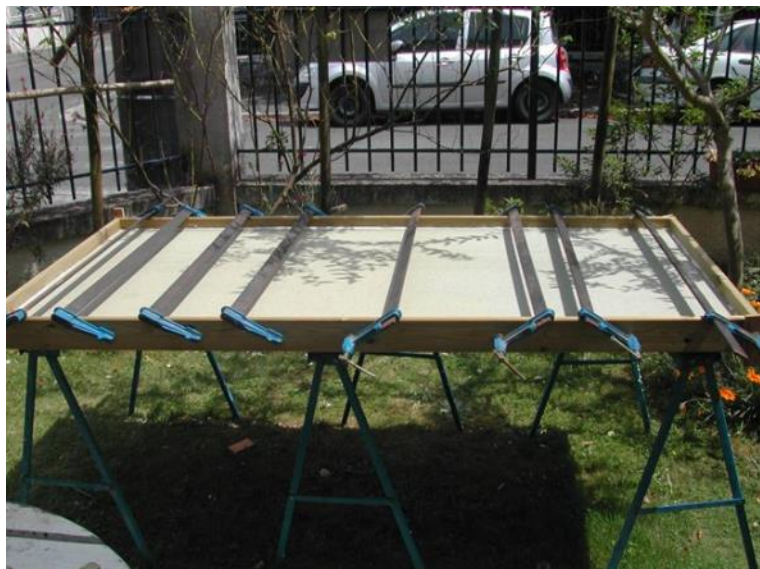
Pour le vitrage je me suis rabattu sur le polycarbonate du fait de son prix : 20€ les 2 m².

Pour l'isolant j'ai choisi le PU pour ses bonnes qualités d'isolation et surtout sa tenue en température : 100°C.

Pour l'absorbeur l'ardoise est le choix le moins cher.

J'ai fait mon panneau pour environ 200 €. Voici quelques photos de sa construction :

Construction du coffre



Coffre fini et isolé



Entrée et sortie d'air percées, collage du film alu



Chicanes pour la circulation de l'air et qui supportent les ardoises



Panneau fini avec les ardoise, le vitrage et un cadre de fermeture en alu



Sur ce panneau prototype j'ai fait une première série d'essai dont le compte rendu est donné dans les pages suivantes.

DESCRIPTIF DE L'INSTALLATION :

Les objectifs du panneau solaire à air prototype qui a été conçu et construit sont :

- Evaluer l'énergie en KWh récupérable et ainsi juger de la pertinence d'investir dans une telle technologie de chauffage pour ma maison.
- Valider les choix des matériaux utilisés
- Valider les technologies employées

Les trajectoires du soleil et l'orientation de ma maison sont données en annexe 1 : Les deux possibilités d'installation des panneaux en découlent.

Principe de fonctionnement :

De l'air « frais » provenant de l'intérieur de la maison est envoyé dans le capteur afin d'être chauffé puis réinjecté dans la maison.

Le mouvement d'air peut se faire soit par convection soit par ventilation forcée.

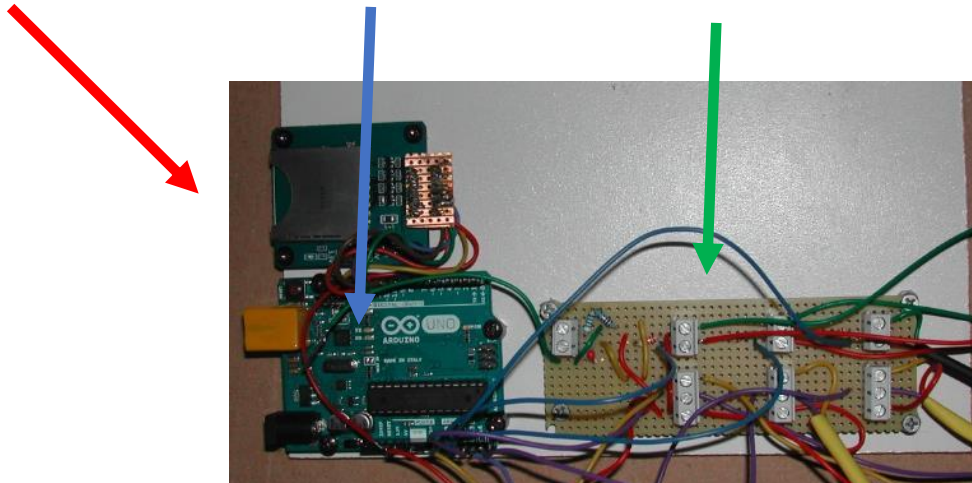
Implantations de mesures :

Pour mieux comprendre le fonctionnement et évaluer la puissance produite par le capteur solaire j'ai décidé d'implanter sur l'installation des capteurs de température.

Les données sont transmises à une centrale d'acquisition programmable (à microcontrôleur) qui enregistre les mesures, dans un fichier DATA, sur une carte SD, au format csv, afin d'être exploitées facilement par un tableur, en l'occurrence Excel.

Centrale d'acquisition :

Carte SD Carte ARDUINO UNO Circuit avec bornier à vis pour les capteurs



Inventaire des mesures - Types des capteurs :

Configuration du 11 janvier 2015

- **Textamb** : Température **extérieure ambiante** en °C comparable à une température sous abri (Capteur placé sous le capteur solaire, au nord, relativement à l'abri du vent et toujours à l'ombre). Capteur LM335Z.
- **Tairsort** : Température en °C dans la boîte de sortie d'air chaud en **sortie**. Capteur LM335Z.
- **Tentcapt** : Température en °C près de l'**entrée** d'air frais dans le **capteur** sous les ardoises. Capteur LM35DZ.
- **Tsortcapt** : Température en °C près de la **sortie** d'air chaud dans le **capteur** sous les ardoises. Capteur LM35DZ.
- **Tardoises**: Température en °C dans le capteur d'une **ardoise** (voir ci-dessous). Capteur LM35DZ.

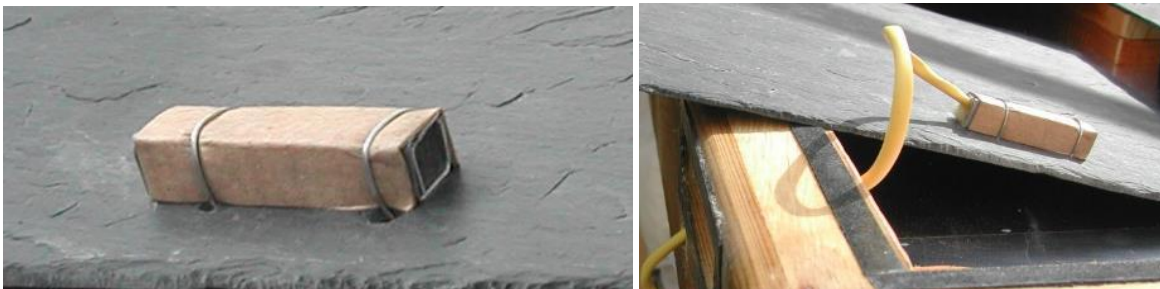
CONFIGURATION DES CAPTEURS :

Les capteurs de température sont implantés dans un « doigt de gant ».

Le doigt de gant est constitué d'un tube de cuivre de 10 ou 12 mm (suivant disponibilité) « écrasé-soudé » à un bout, « bourré de mousse de PU » à l'autre bout, là où passent les fils du capteur. Exemple de **Textamb** :

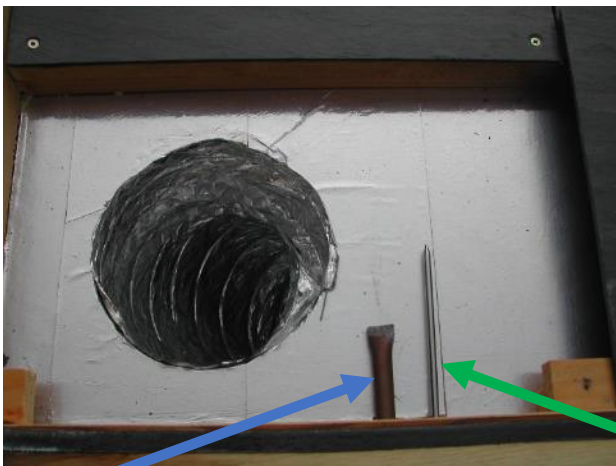


Pour **Tardoises** le doigt de gant est en alu ép. 0.2 mm et une face est en appui sur l'ardoise. Un carton a été ajouté pour isoler les autres faces de l'air circulant autour :



Les lignes de mesures entre les capteurs et la centrale d'acquisition sont réalisées avec du câble de téléphone RJ45, 100MHz, 4 paires, blindé.

Les capteurs **Tentcapt** et **Tsortcapt** sont implantés comme montré sur la photo ci-dessous :

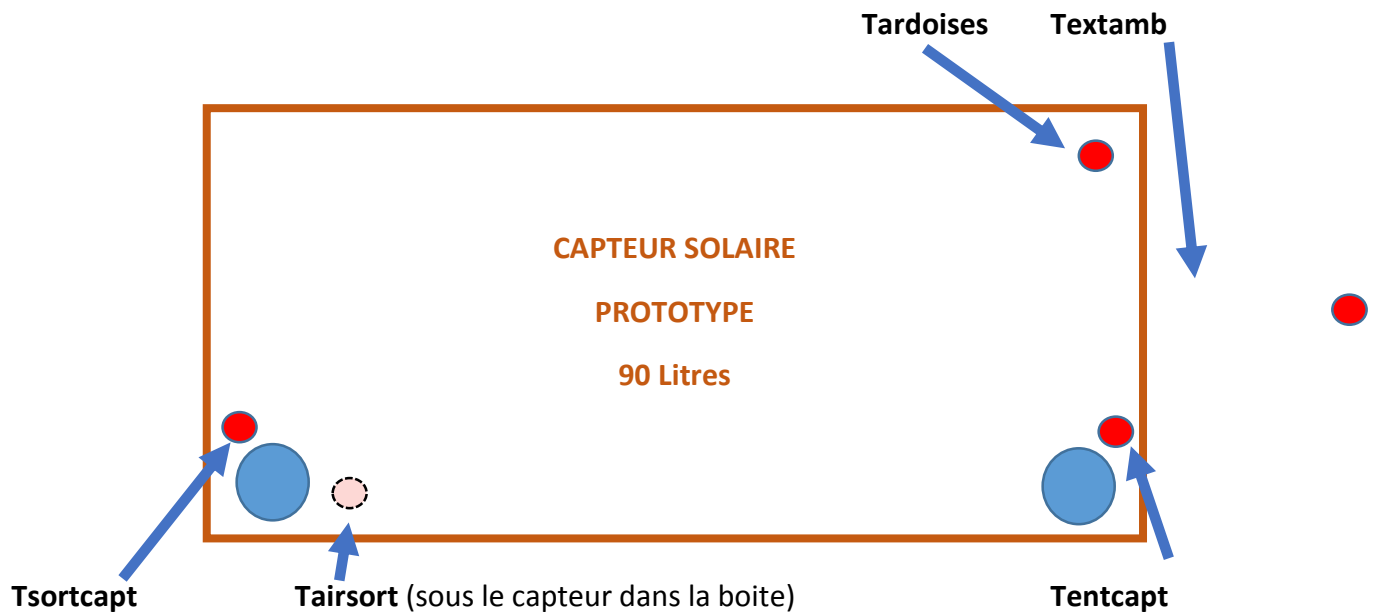


Capteur **Tentcapt** dans son doigt de gant Thermomètre de cuisine pour l'étalonnage

Ils sont donc soit près de l'entrée soit près de la sortie et dans l'espace entre les ardoises et le fond du capteur.

SCHEMA DE L'INSTALLATION ET DES MESURES :

CAPTEUR VU DE FACE



A l'origine **Tairsort** n'existait pas. Ce capteur était implanté dans ma véranda au bout d'une gaine de ventilation sensée amener l'air chaud : Son appellation était **Tsortgaine**

ENSOLEILLEMENT DU CAPTEUR :

Pour des questions pratiques le capteur prototype est au sol dans le jardin.

Mon projet définitif, s'il est rentable, est d'implanter les capteurs le plus haut possible, CAD sur mon toit ou sur les murs de l'étage, pour avoir un ensoleillement évidemment beaucoup plus long et le plus possible sans ombre.

J'habite en ville et dans ma rue il y a des « obstacles » qui provoquent des ombres portées sur le capteur au sol. Ces ombres sont d'autant plus importantes que le soleil est bas, off course...

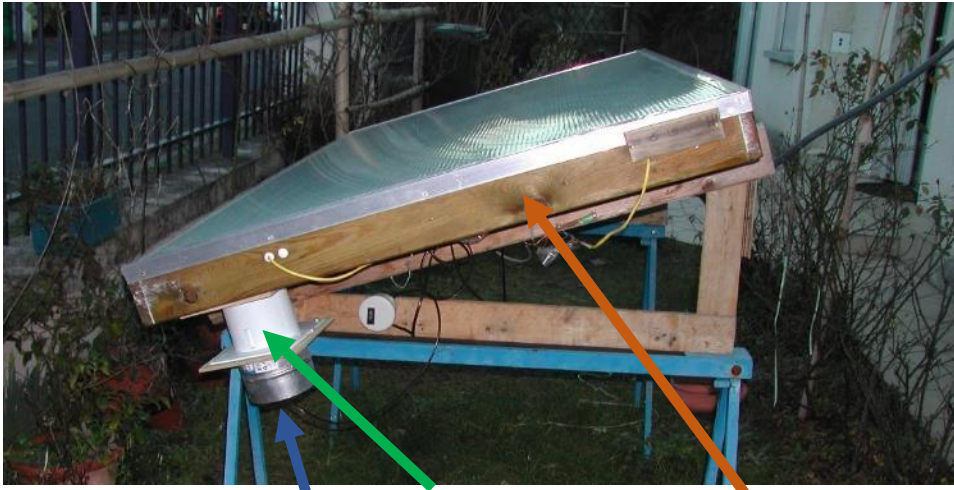
Il y a également des bambous qui soutiennent des rosiers et des plantes grimpantes. Ces bambous provoquent également des ombres sur le capteur. Ces ombres des bambous peuvent représenter jusqu'à 20% de la surface du capteur.

La perte de puissance due à ces ombres est donc également au maxi de 20% (voir calcul de puissance en annexe 2).

Première installation :

Le panneau est installé, pour expérimentation, dans le jardin orienté côté rue comme la façade côté rue de ma maison et avec la même pente que le toit → **Hypothèse : Installation côté rue sur le toit.**

La photo ci-dessous montre cette installation :



Entrée d'air froid

ventilateur

panneau solaire



Sortie d'air chaud

ESSAIS DU 21/01/2015

ESSAIS SANS VENTILATION FORCEE

Mesures :

1000 points de mesure sur 8 heures

Départ à 9H30 (9.5 en décimal), arrêt à 17H30 (17.5).

Les températures sont en °C.

Les gaines vers la véranda étaient en place : Pas de **Tairsort** mais **Tsortgaine**



Tsorgaine

Temps :

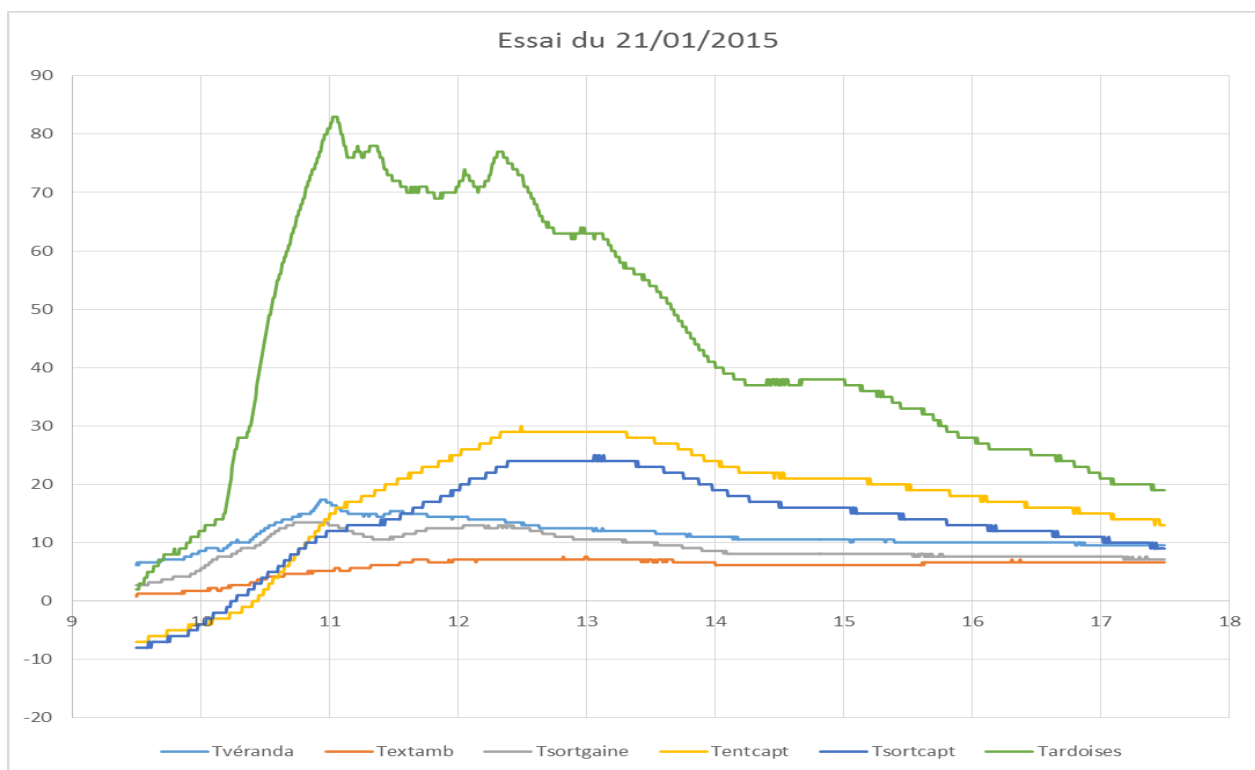
Le soleil a été présent toute la matinée. Les premiers nuages sont arrivés à 11H et à 12H30 on n'a presque plus vu le soleil. Le ciel est resté couvert toute l'AM avec parfois de la pluie fine. Les courbes obtenues sont données page suivante

Principales observations :

L'ardoise est montée à 80°C.

Dans le capteur on est monté jusqu'à 30°C alors qu'il faisait 7°C à l'extérieur.

Ventiler pour extraire les calories des ardoises.



Remarque : Au début de l'enregistrement on constate que la température externe **Textamb** et de l'ordre de 2°C et que dans le capteur **Tentcapt** et **Tsortcapt** sont très inférieures à 0°C. J'ai fait d'autres essais et j'ai constaté que la nuit, par temps clair, sans nuage on obtient effectivement un effet froid de -10°C par rapport à la température ambiante. Dès qu'il y a des nuages ces trois températures sont comparables.

ESSAIS DU 25/01/2015

ESSAIS AVEC VENTILATION FORCEE

Enregistrement 1000 points de mesure sur 8 heures.

La ventilation est assurée par un ventilateur de PC, 12V de marque VELLEMAN.

RESULTATS : Les courbes obtenues sont page suivante. L'axe des abscisses est en heure.

COMMENTAIRES :

Grand soleil le matin, arrivée des nuages à 14H00, éclaircies ensuite.

Mise en marche du ventilateur de PC à 10H30 : on voit le point d'inflexion (faible) sur la montée de **Tardoises**.

Les ardoises dépassent 90°C au soleil. On voit bien passer les nuages à 14H ...

La ventilation provoque une nette élévation de **Tsortcapt** jusqu'à 58°C vers 14H00. Le delta T entre **Tentcapt** et **Tsortcapt** atteint 40°C à ce moment-là : on extrait des calories dans le capteur qui s'accumulent vers la sortie.

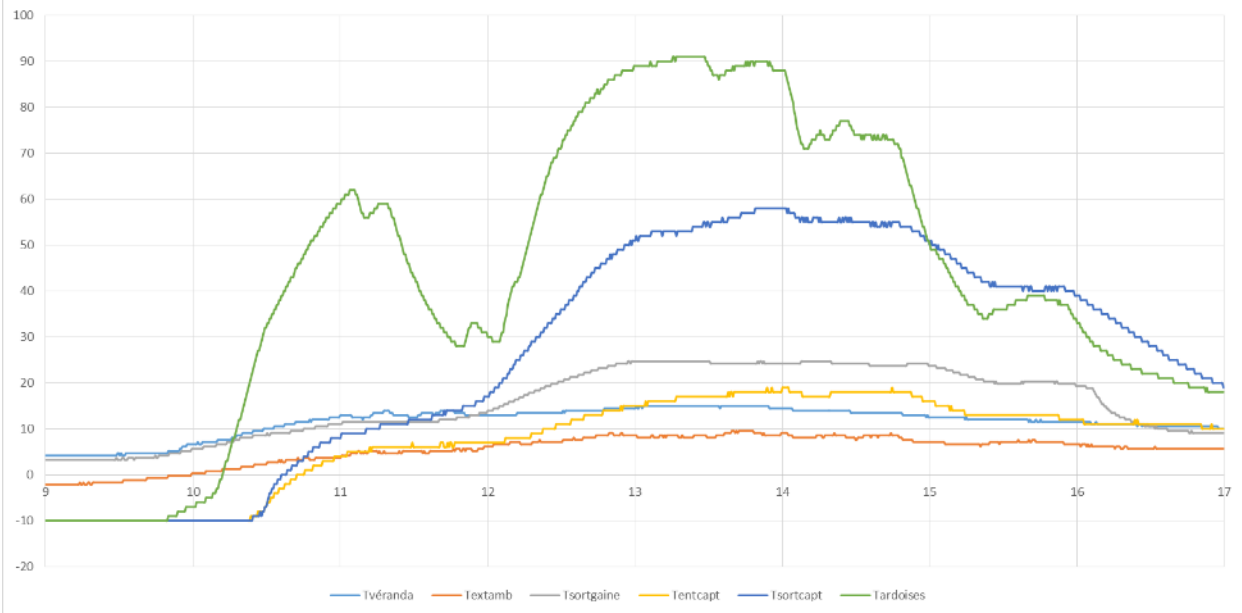
Cet air chaud semble bloqué dans le capteur puisque **Tsortgaine** n'atteint que 24°C à la même heure.

Il y a donc transfert de chaleur mais c'est faible. L'énergie est dans le panneau : les ardoises sont chaudes.

L'hypothèse qui me paraît la plus plausible est que le flux d'air n'est pas assez important pour transférer rapidement les calories dans l'air de sortie.

Il faut trouver un ventilateur plus puissant pour augmenter le débit d'air et ainsi le débit de calories...

Essai du 25/01/2015



PUISSANCE :

Les températures sont enregistrées, il manque le débit volumique pour faire le calcul.

Pour se faire j'ai chronométré le gonflage de sacs poubelle à la sortie dans la véranda :



Pour cet essai de gonflage on arrive aux résultats suivants :

Débit volumique = 7 477 L/h soit 2.0 L/s ou 7.5 m3/h

IMPORTANT : Toutes les mesures de débit ont été faites lorsque le capteur ne chauffait pas et donc la température d'entrée et la température de sortie sont à la température ambiante.

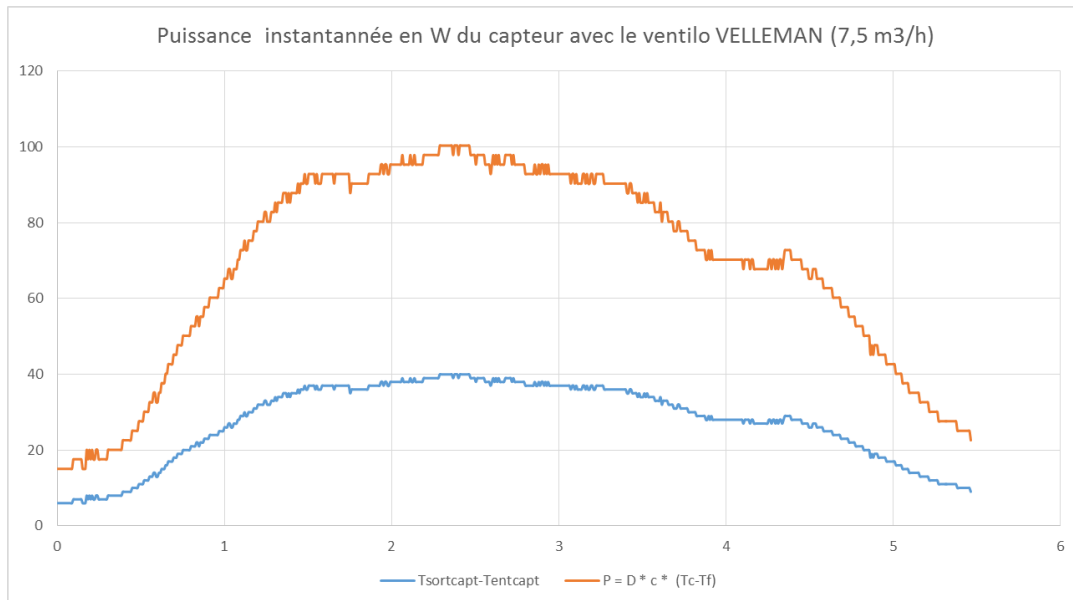
La courbe de puissance obtenue est page suivante.

Elle est obtenue avec la formule suivante : **$P = Qv \times Cv \times (Tc - Tf)$**

Avec :

$Tf = T_{extamb}$

$Tc = T_{sortcapt}$



(*) **Tsortcapt** est sans doute différente de la température de l'air qui sort du capteur car cette mesure est dans le capteur entre le fond du capteur solaire et les ardoises ...

Il faut que j'aille chercher cette température d'air chaud pour avoir un calcul crédible.

Pas de surprise : La puissance est faible même si ce n'est pas le bon calcul.

ESSAI du 19/02 :

Enregistrement 1000 points de mesure sur 8 heures.

Tsortgaine a été remplacé par **Tairsort**.

Vue du capteur de température **Tairsort** dans son doigt de gant dans la boîte en bois où sort l'air chaud :



Les gaines vers la véranda ont été enlevées : L'air injecté dans le capteur est l'air extérieur ambiant.

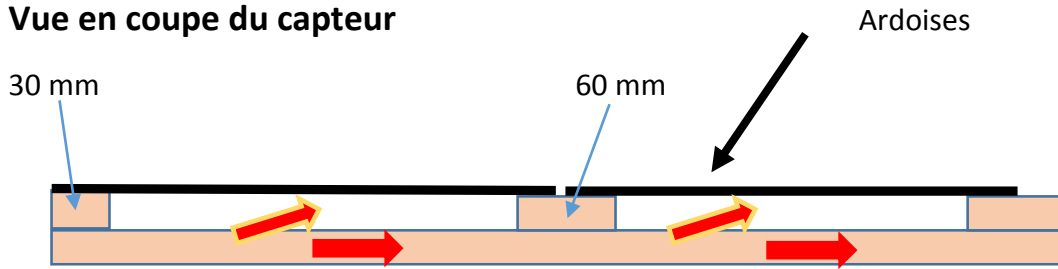
RESULTATS : Les courbes obtenues des températures et de puissance sont page suivante. L'axe des abscisses est en heure.

COMMENTAIRES :

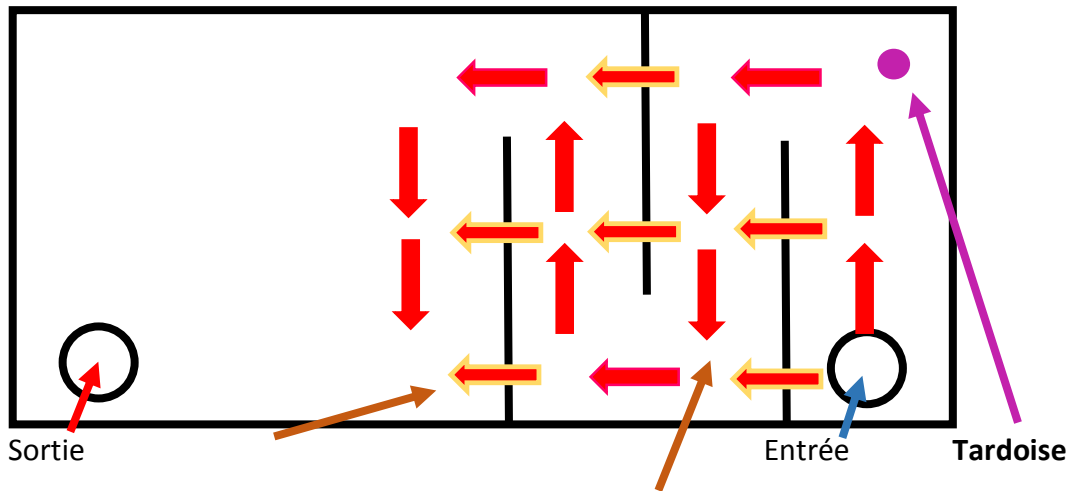
Journée très ensoleillée sans nébulosité.


Dans le panneau j'ai découpé le tasseau du dessus afin que l'air puisse circuler longitudinalement dans le panneau au plus près des ardoises.


Vue en coupe du capteur



Vue de dessus du capteur



Courant d'air suivant les chicanes : 

Courant d'air longi sous l'ardoise : 

De ce fait il y a forcément de grosses turbulences au croisement des flux d'air perpendiculaires (favorable aux échanges), du moins c'est ce que je crois...

De plus pour booster le débit j'ai installé un ventilo de maison CELCIA (premier prix) diamètre 120 mm, 190m³/h, 20W.

Dans ces conditions j'ai obtenu un débit en sortie de 17 litres/s.

Il a fallu que je change mon moyen de mesure : La capacité de 135 litres se gonfle en 10 secondes, c'est trop court pour être précis (± 1 seconde sur la mesure = $\pm 10\%$ sur le débit) ...

J'ai fabriqué une capacité en poches poubelle de 595 litres qui se gonfle en 34 à 39s :



(Belle capote !!!)

Courbes de températures :

A la mise en route du ventilateur, un peu après 12h00, de l'air extérieur à la température ambiante entre dans le capteur :

- la température ardoise **Tardoises** chute de 170°C à 60°C,
- **Tentcapt** chute de 50°C à 20°C sans jamais atteindre la température ambiante, normal les ardoises sont chaudes et rayonnent sur le capteur de température
- l'air circule et se réchauffe : **Tsortcapt** passe de 40°C à 90°C et l'air en sortie **Tairsort** passe de 20°C à 50°C.

La température de l'ardoise **Tardoises** baisse bien : le courant d'air dans le capteur va bien jusque dans les coins vu l'emplacement du capteur...

L'extraction des calories des ardoises et leur transfert dans l'air semble assez efficace, en tous cas beaucoup plus efficace que lors de l'essai précédent.

Le ventilateur a été arrêté à environ 16h00 alors que le capteur était à l'ombre de ma maison.

Courbe de puissance : Voir méthode en annexe 2

Augmenter le débit augmente bien la puissance : $P_{\text{Maxi}} = 800W$

Ensuite la puissance décline normalement avec le soleil qui baisse par rapport à l'horizon.

En faisant l'intégrale de la puissance on obtient une énergie de 1.8 KWh, produite de 12H à 16H,

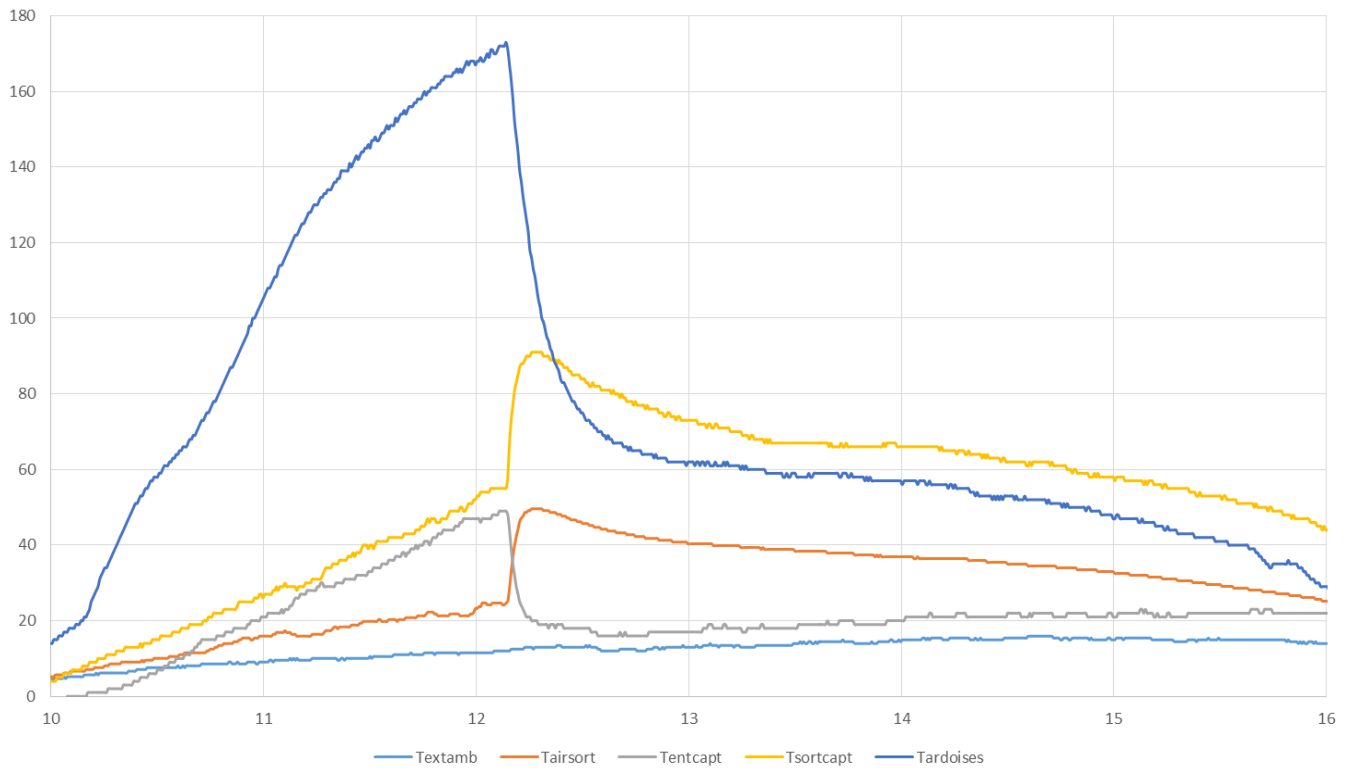
Si on fait l'hypothèse d'un ensoleillement sans ombre (CAD pas dans mon jardin mais en hauteur) il doit être possible d'obtenir au moins le double voire le triple soit de 4 à 6 KWh dans la journée avec un très bel ensoleillement en deuxième quinzaine de Février ...

Ce n'est pas si mal que ça avec un capteur qui est à 56° par rapport au Sud et avec une pente de 22° comme mon toit.

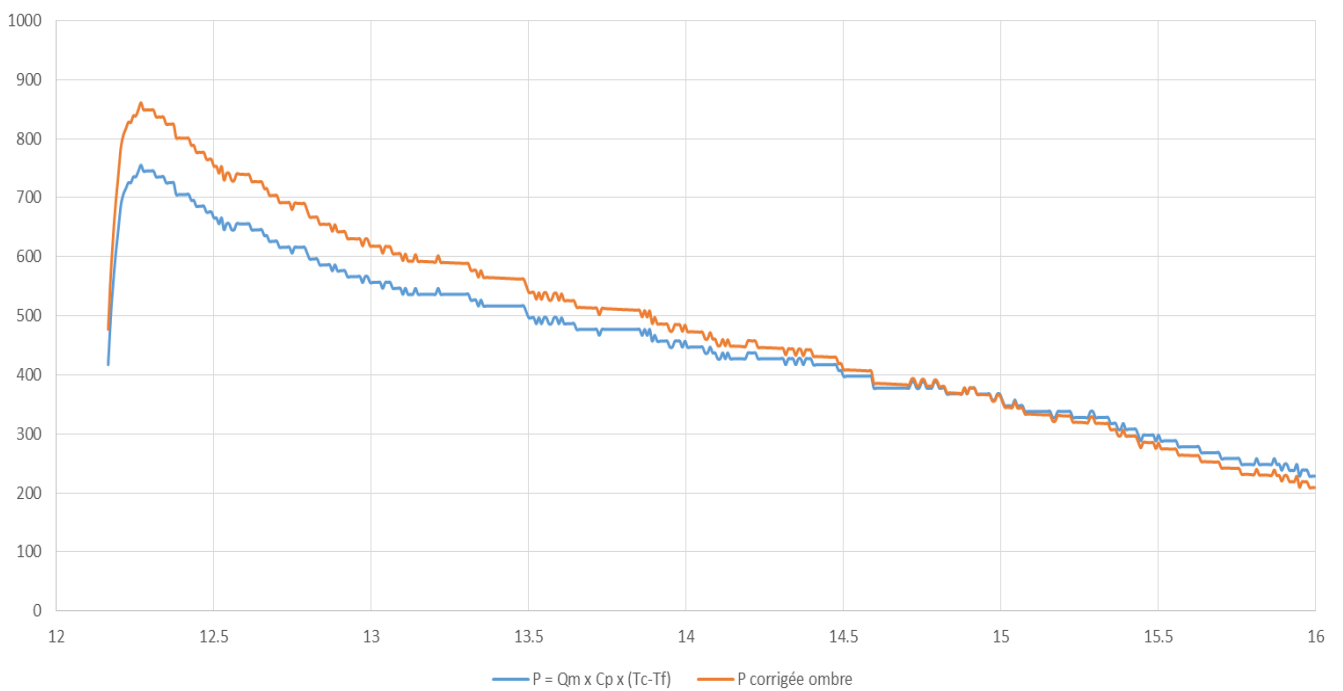
Mais c'est tout de même faible ...

Cette position du capteur solaire n'est effectivement pas terrible.

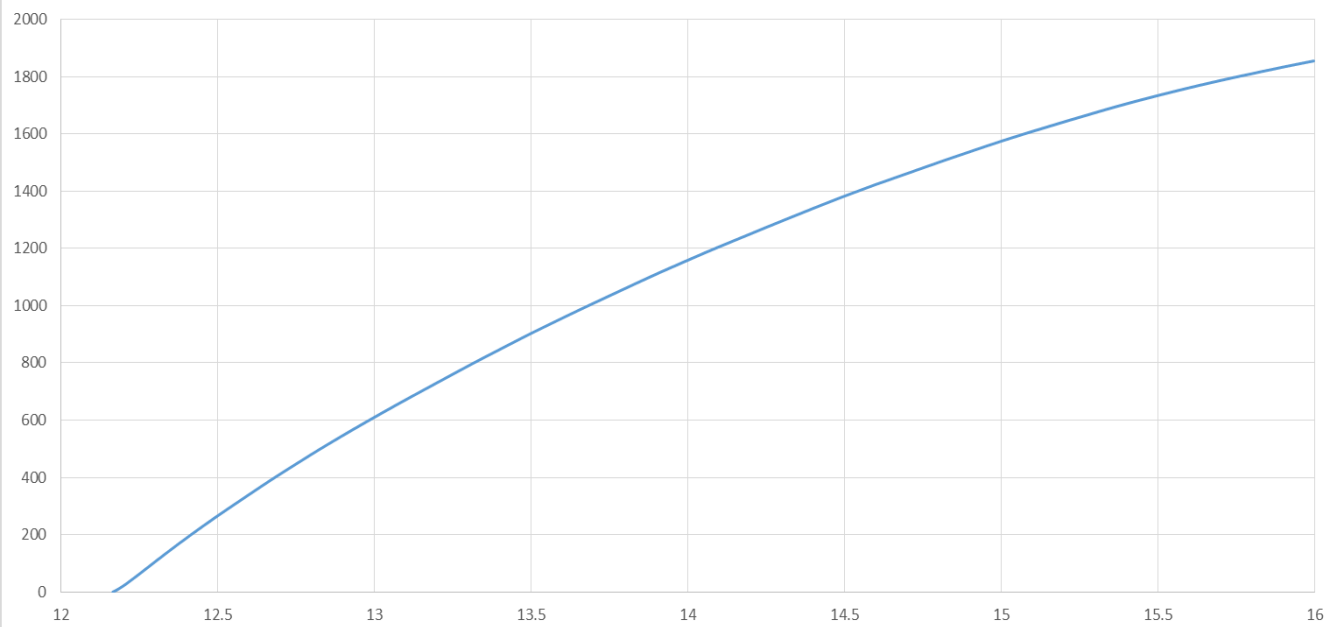
Essai du 19/02/2015



Puissance W Essai du 19/02/2015



Energie (Wh)



ESSAI du 22/02 :

Enregistrement 1000 points de mesure sur 8 heures.

RESULTATS : Les courbes obtenues des températures et de puissance sont page suivante. L'axe des abscisses est en heure.

COMMENTAIRES :

Journée ensoleillée mais nébulosités, quelques nuages à partir de 14h30, plus de nuages à partir de 15h. Cette journée est plus représentative d'une journée standard de Février ...

Le ventilateur a été mis en route à 10H20 (10.33) et arrêté à 15h45 (15.75).

Il a gelé le matin : Dans le capteur les températures sont négatives jusqu'à 10h.

Ça dégèle quand les ardoises voient le soleil (CAD quand elles ne sont plus à l'ombre de la maison du voisin) ...

Courbes de températures :

L'air en sortie passe rapidement au-dessus de 20°C pour atteindre 40°C à 13h.

Courbes de puissance :

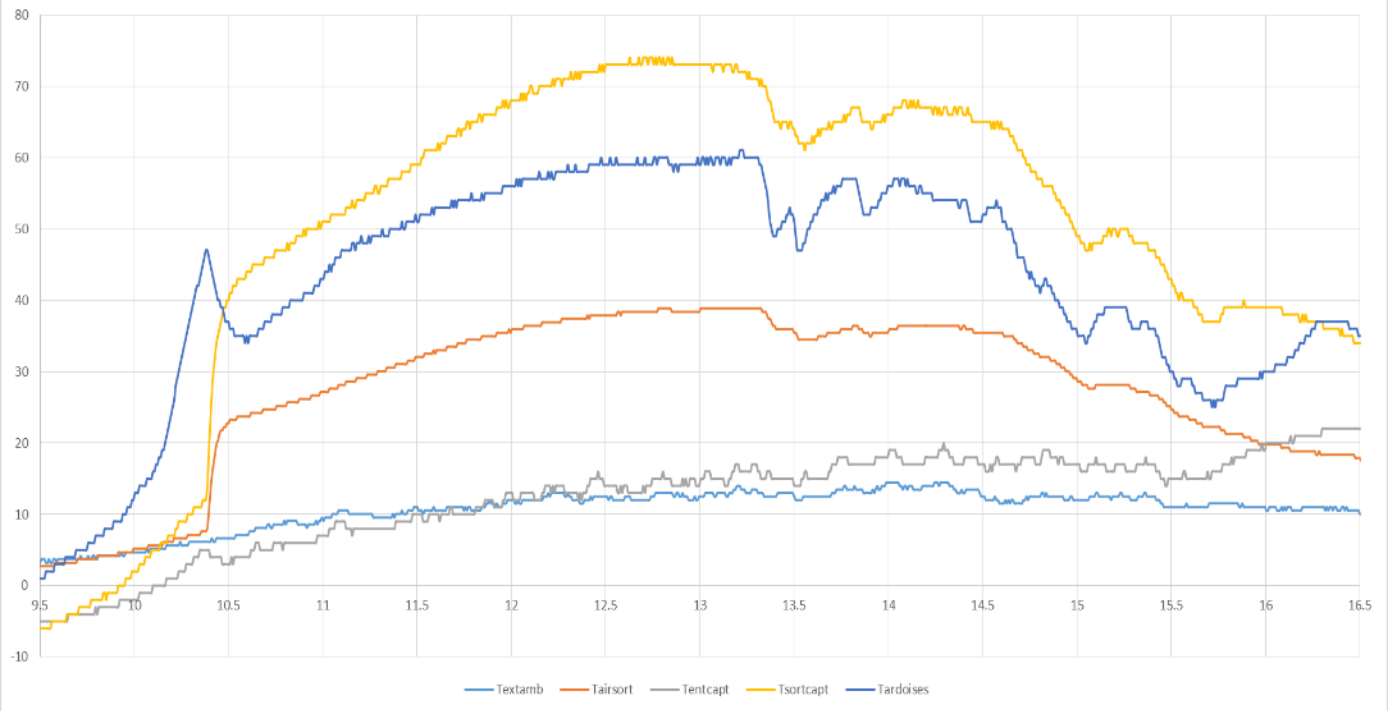
Les nébulosités baissent la puissance : **Pmax = 600W**

L'intégrale de P corrigée ombre donne 2.5 KWh pour 5.42h soit 5h25 de fonctionnement

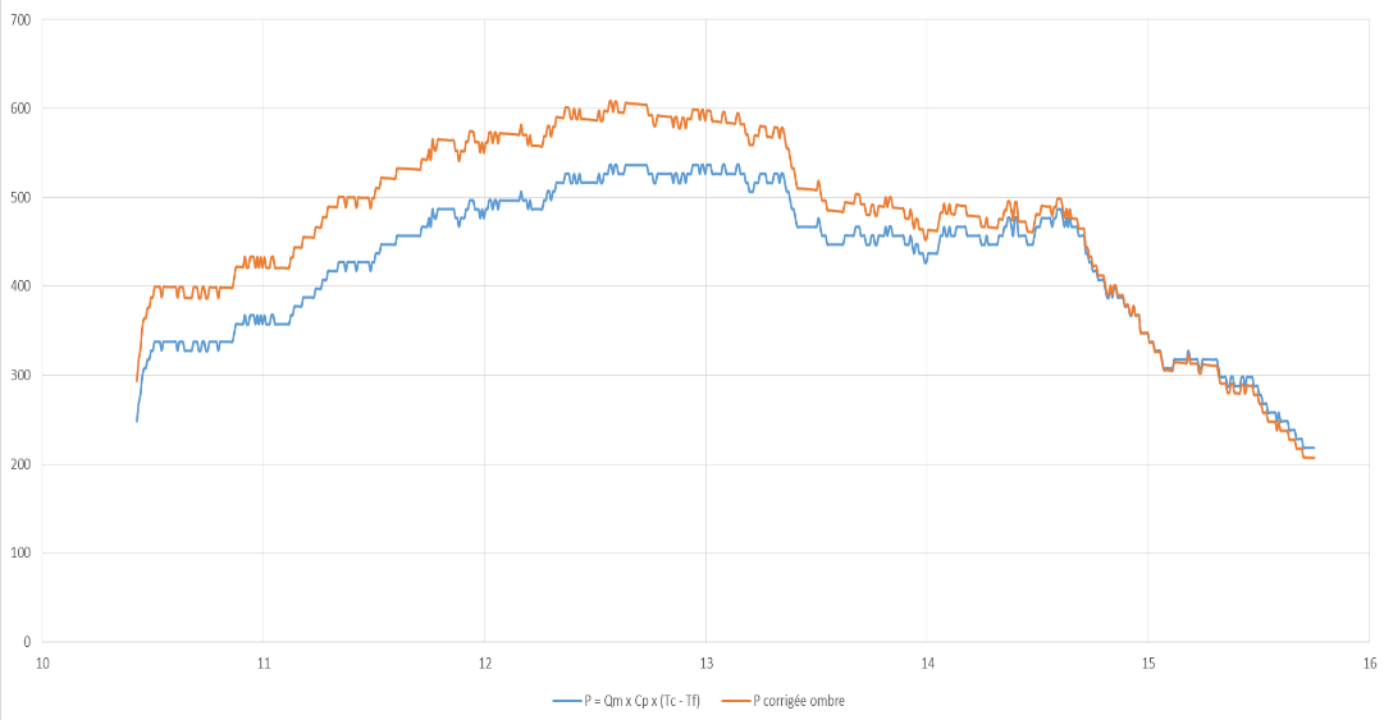
Ces résultats sont cohérents de l'essai précédent compte tenu de la luminosité.

Le capteur solaire dans cette position n'est pas très productif.

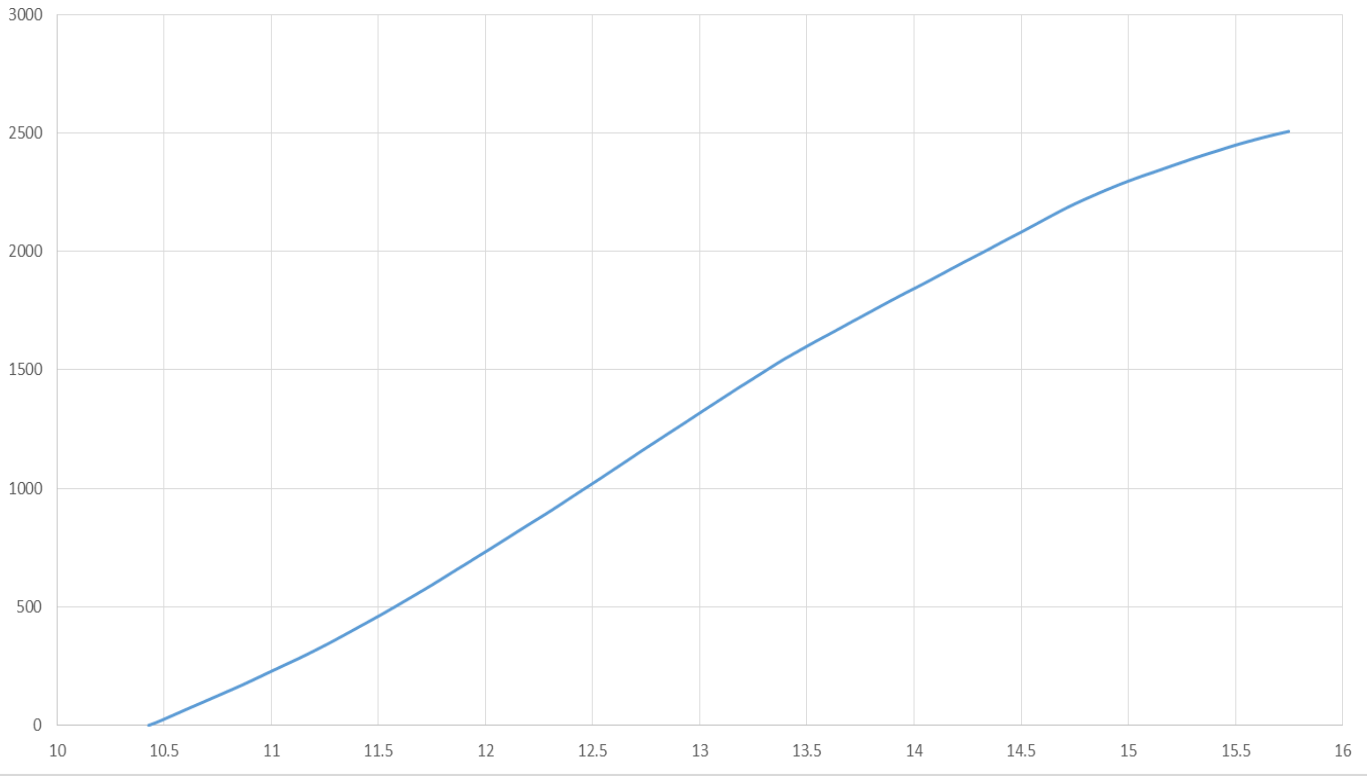
Essai du 22/02/2015



Puissance W Essai du 22/02/2015



Energie Wh Essai du 22/02/2015



Deuxième installation :

Le panneau a été installé le 9 Mars, pour expérimentation dans le jardin, verticalement comme s'il était plaqué sur le mur orienté côté jardin.

La photo ci-dessous montre cette installation :



La photo ci-dessous montre le mur côté jardin qui pourrait recevoir le capteur :



Si je l'installe ici il faudra que je raccourcisse les branches de mon arbre qui font de l'ombre sur le mur ...

J'ai déjà fait quelques essais mais je n'ai pas pris le temps de tout analyser ...

Les photos ci-dessous montrent l'ombre des bambous sur le capteur :



Il faut que je passe du temps pour chiffrer correctement l'importance de cette ombre pour pouvoir calculer une puissance « corrigée ombre » crédible ...

La suite au prochain épisode.

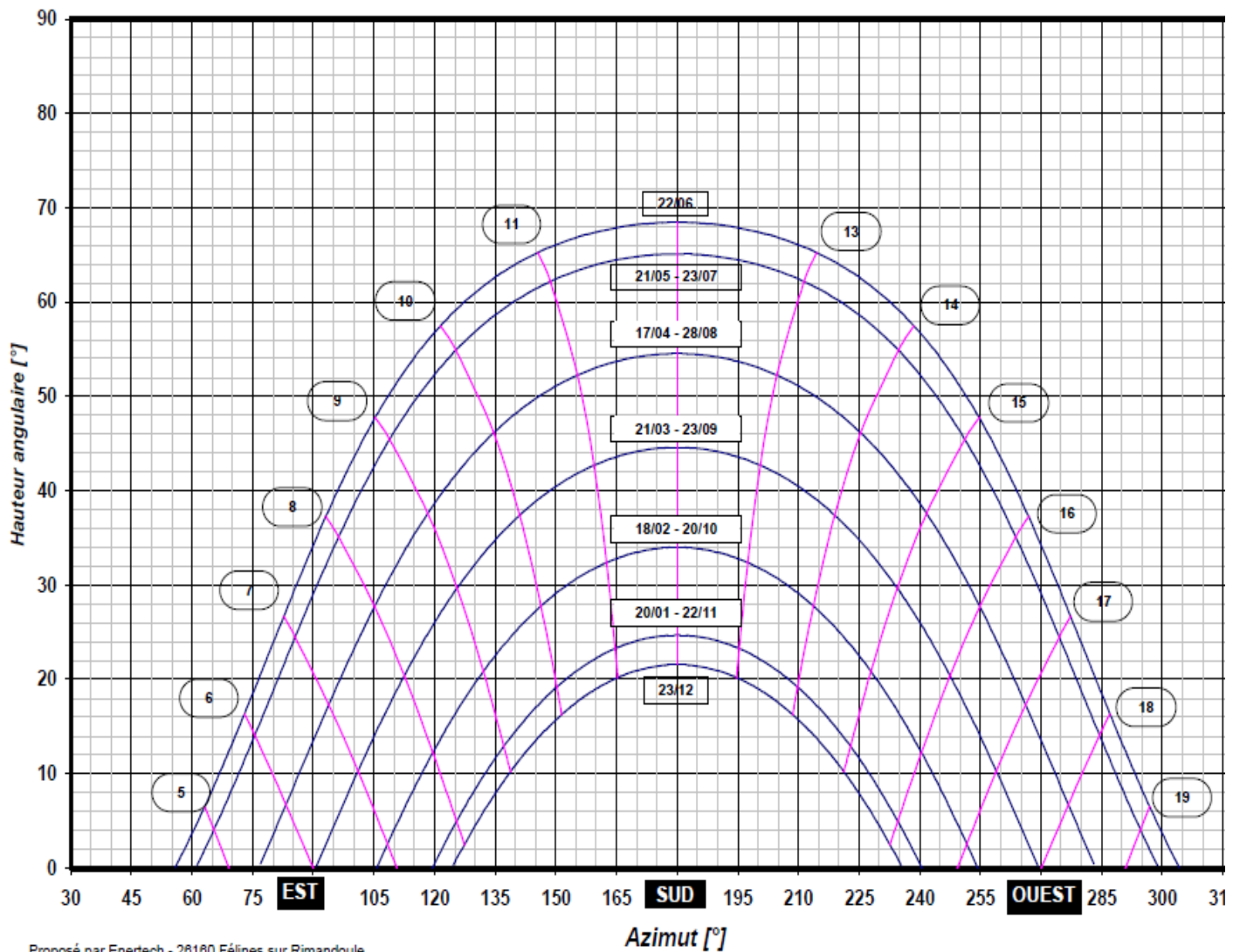
ANNEXE 1

TRAJECTOIRES DU SOLEIL

MA MAISON - ORIENTATION

TRAJECTOIRES DU SOLEIL - Bordeaux : 44.5° Nord

TRAJECTOIRES DU SOLEIL (Latitude = 45 °N)



MA MAISON - ORIENTATION

NORD



FACADE COTE JARDIN

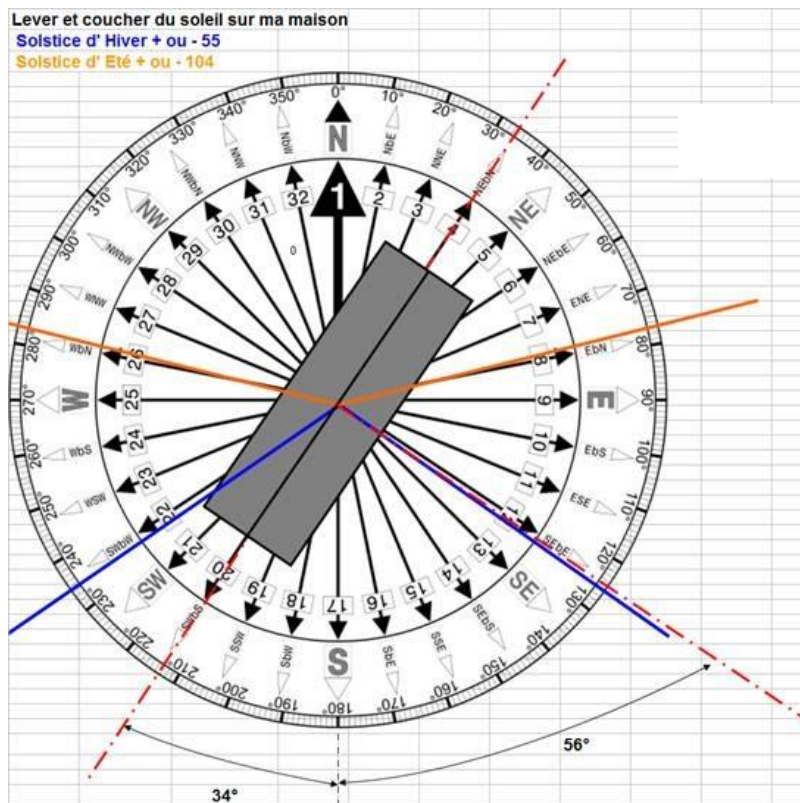
⊥ à 34° / SUD



FACADE COTE RUE

⊥ à 56° / SUD

SUD



ANNEXE 2

CALCULS DE PUISSANCE

CALCULS D'ENERGIE

PUISSANCE

METHODE :

Au début j'ai calculé la puissance avec la formule suivante (Influencé que j'étais par certains commentaires trouvés sur des forums solaires du web) :

$$P = Qv \times Cv \times (Tc - Tf)$$

Où :

P : Puissance en W

Qv : Débit volumique en litres L/s

Cv : capacité thermique volumique de l'air en J/K/L

La capacité thermique molaire C (grand C) de l'air (qui est diatomique), à pression constante, est $\frac{7}{2} \cdot R$, soit $3,5 \cdot 8,31 \approx 29$ J/K/mol.

Le volume molaire Vm d'un gaz dans les conditions ordinaires (pression 1 atm, T ≈ 20 °C) est 24 L/mol.

Donc la capacité thermique volumique de l'air dans votre cas est $Cv = C/Vm \approx 1,2$ J/K/L.

Remarque : $Cv = \rho \times Cp$

Tc : Température « chaude » en °C = Sortie du capteur

Tf : Température « froide » en °C = Entrée du capteur

NB : Normalement l'équation est en K mais comme on fait une différence et que 1K = 1°C on peut faire le calcul en °C.

Cette formule est dite « à volume constant ».

La centrale d'acquisition donne les températures il manque le débit pour faire le calcul.

Remarque : je prenais pour le calcul le débit sortant CAD celui que je mesurais.

Je me suis posé beaucoup de questions : le débit entrant est forcément différent du débit sortant : Il entre de l'air froid qui se réchauffe et donc l'air se dilate forcément.

Je ne voyais pas comment accéder au débit entrant pour le prendre en compte.

Avec les valeurs théoriques de la masse volumique de l'air en fonction de la température je me suis dit que je pouvais calculer le débit entrant.

La formule utilisée est la suivante : $\rho = 1.293 \times 273.15 / (T^{\circ}C + 273.15)$

Avec ce débit entrant la puissance devient :

$$P = Cv \times (Qs \times Tc - Qe \times Tf)$$

Avec Qs débit sortant et Qe débit entrant.

Les résultats étaient très flatteurs : la puissance augmentait nettement par rapport à la première formule simple.

Puis je me suis dit que j'accumulais pas mal de calculs et de formules pour obtenir un résultat et que donc j'empilais les hypothèses sans les avoir vérifiées et donc j'avais des doutes sur la validité des résultats ...

Je me suis donc tourné vers l'autre formule qui permet de calculer la puissance :

$$P = Q_m \times C_p \times (T_c - T_f)$$

Où :

P : Puissance en W

Q_m : Débit massique en litres Kg/s

C_p : capacité thermique massique de l'air en J/K/Kg

La capacité thermique massique de l'air sec est $C_p = 1005$, celle de l'air saturé en vapeur d'eau est $C_p = 1030$.

Pour les calculs j'ai pris la moyenne soit $C_p = 1017.5$.

T_c : Température « chaude » en °C = Sortie du capteur

T_f : Température « froide » en °C = Entrée du capteur

Cette formule est dite « à pression constante ».

Cette méthode permet de s'affranchir de la température : En effet la masse d'air qui sort et la même que la masse d'air qui entre dans le capteur, si le capteur est étanche.

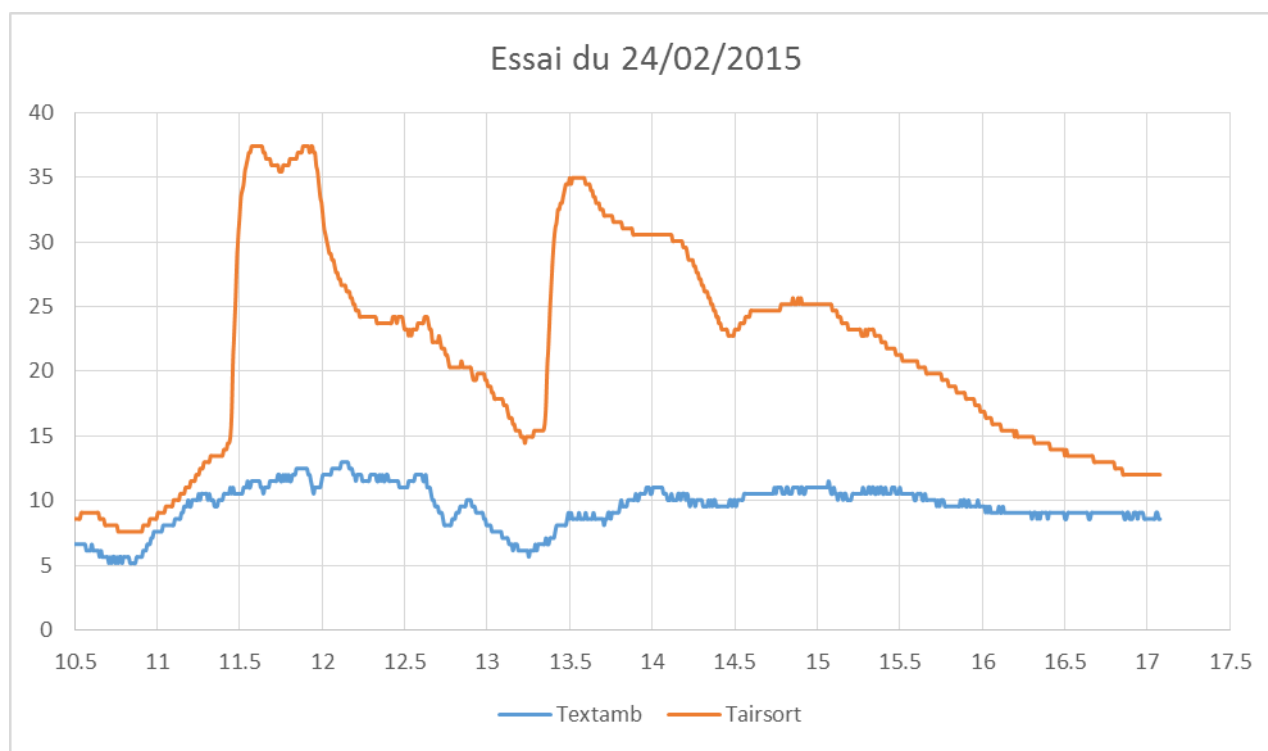
Je mesure le débit volumique et la température de l'air sortant et donc le débit massique est simplement accessible (à l'aide de la masse volumique de l'air en fonction de la température).

J'ai donc fait une série de mesures de gonflage des sacs poubelle sur la journée du 24/02/2015 qui m'ont permis d'établir les éléments suivants.

Série de mesures :

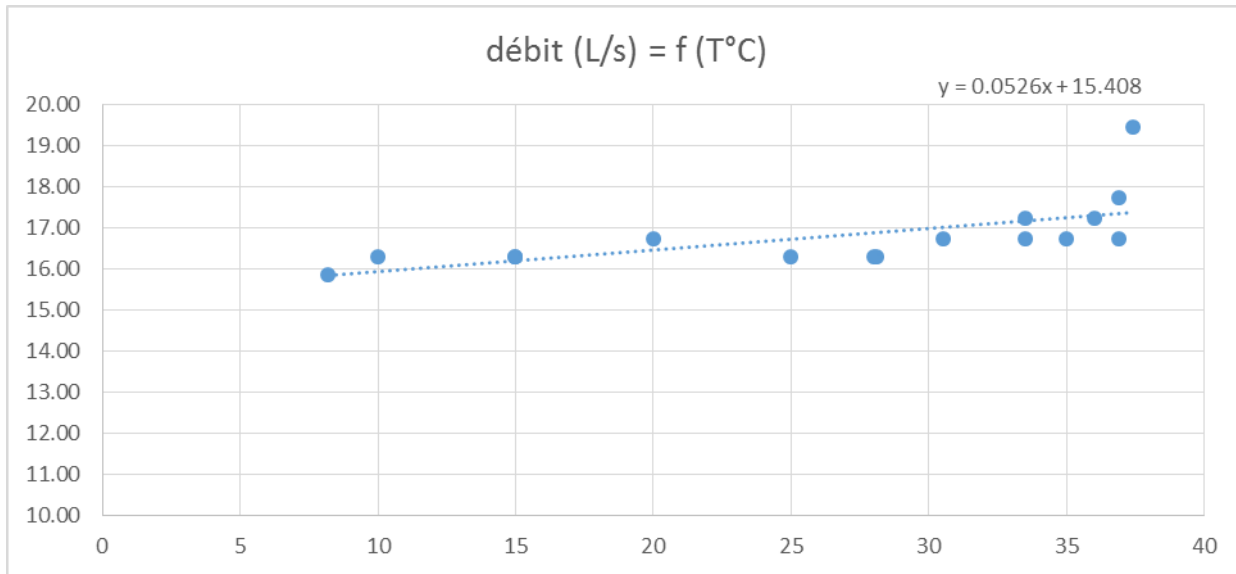
heure et 1/100 ^{ème}	Temps de gonflage (s)	température T°C	débit (L/s)	débit (m3/s)	RHO (Kg/m3) à T°C	Débit massique (Kg/s)
11.500	36	33.49	16.75	0.01675	1.151783688	0.01929726
11.550	35	36	17.23	0.01723	1.142432314	0.01968746
11.617	31	37.4	19.46	0.01946	1.13728208	0.02212757
11.850	36	36.9	16.75	0.01675	1.13911611	0.01908503
11.933	34	36.9	17.74	0.01774	1.13911611	0.02020767
13.400	36	20	16.75	0.01675	1.204785775	0.02018527
13.467	35	33.5	17.23	0.01723	1.151746128	0.01984796
13.533	36	35	16.75	0.01675	1.146139705	0.0192027
13.950	36	30.5	16.75	0.01675	1.163125144	0.01948728
14.250	37	28.1	16.30	0.01630	1.172391535	0.01911165
14.367	37	28	16.30	0.01630	1.17278084	0.019118
14.467	37	25	16.30	0.01630	1.184581419	0.01931036
16.683	37	15	16.30	0.01630	1.225691307	0.01998051
16.833	37	15	16.30	0.01630	1.225691307	0.01998051
18.500	37	10	16.3014235	0.01630142	1.247335158	0.02033334
20.250	38	8.2	15.8724387	0.01587244	1.255315266	0.01992491

Variations des températures de l'air entrant Textamb et sortant Tairsort :



Pluie le matin, puis alternance de nuages (avec parfois pluie) et de période ensoleillées avec nébulosités

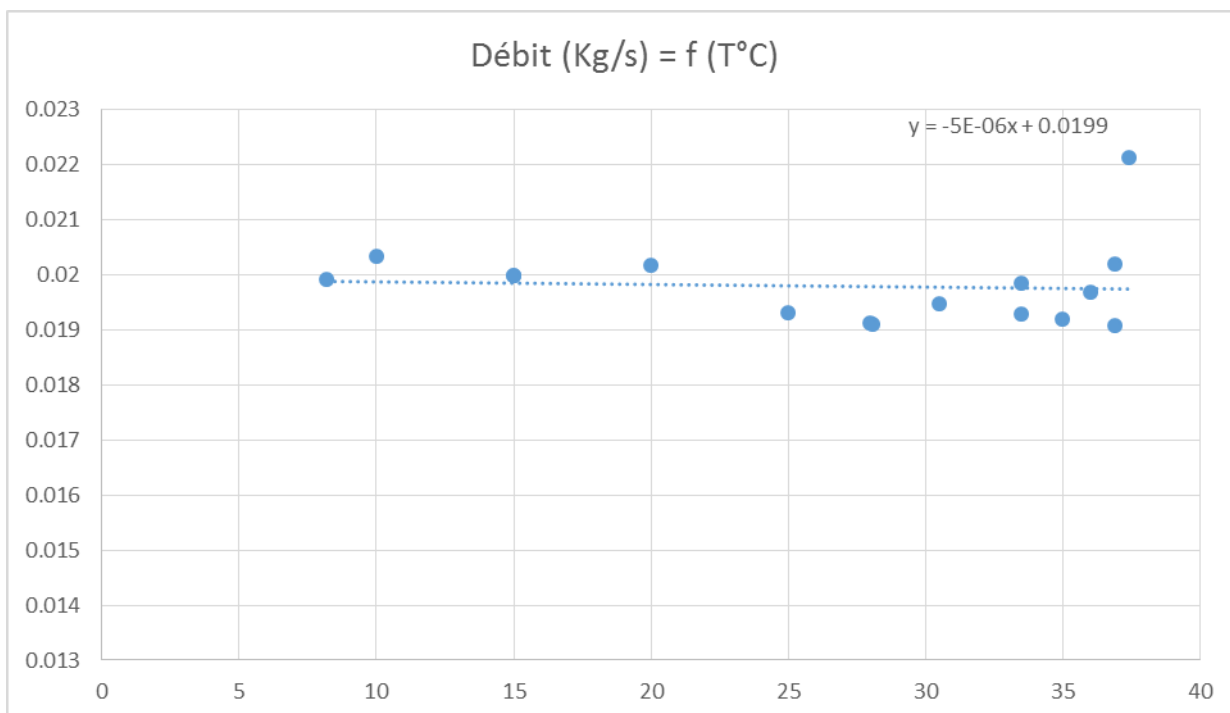
Variation du débit volumique sortant en fonction de la température de l'air sortant :



Le débit volumique semble variable en fonction de la température de l'air de sortie ...

Plus l'air est chaud plus le débit augmente : Pente 5%

Variation du débit massique sortant en fonction de la température de l'air sortant :



Le débit massique semble quasiment constant (pente très faible : $5E-6$).

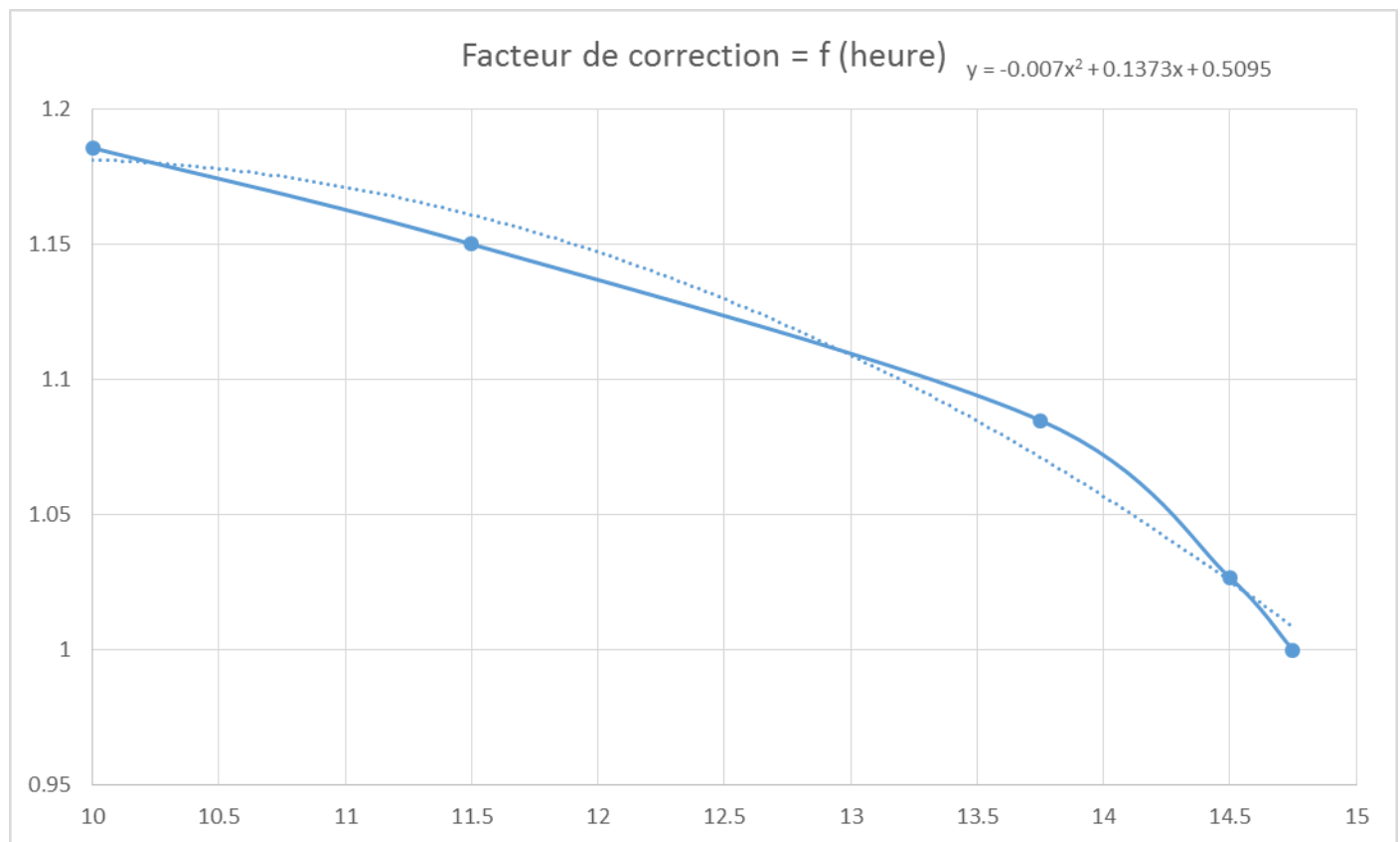
C'est ce que j'ai considéré pour les calculs de Puissance et j'ai donc pris la valeur de débit massique suivante :

$Q_m = 0.02 \text{ Kg/s}$

Correction de la puissance en fonction de l'ombre :

On l'a vu les bambous devant le capteur font de l'ombre.

J'ai relevé ces ombres à différentes heures de la journée, pour la première installation CAD au sol orienté façade coté rue :



J'en ai tiré une corrélation qui me permet de corriger la puissance du capteur en fonction de l'heure h :

$$\text{Facteur de correction} = -0.007 x h^2 + 0.1373 x h + 0.5095$$

Bien sur ce n'est valable que sur une période courte : J'ai considéré que c'était valable 15 jours.

La corrélation ci-dessus a été établie fin février.

Pour la deuxième installation CAD sur le mur côté jardin : j'ai procédé de la même manière.

ENERGIE

L'énergie est l'intégrale de la courbe de puissance en fonction du temps.

$$E = \int_{(t=0 \text{ à } t1)} P(t) dt$$

On commence à produire de l'énergie quand on met en route le ventilateur (t=0) et on finit d'en produire quand on le coupe (t1).

Avec le fichier Excel c'est facile de faire cette intégrale numériquement ...

Si la puissance est en watt (W) et que le temps est en heure (h) on obtient une énergie en wattheure (Wh).

C'est le 1/1000^{ème} de ce que l'on paye auprès de nos fournisseurs d'énergie (CAD le KWh).