Ce document décrit l'installation du Ohmpilot Fronius qui est associé à ma centrale 3 kW avec un ballon de 300 litres.

Le Ohmpilot est un convertisseur ac-ac qui va délivrer une tension alternative 50 Hz continûment ajustée en amplitude de 0 à 100% de la valeur du réseau, soit 0-230 V rms (nominal) chez nous en France. Cette tension sera appliquée à la résistance électrique d'un ballon d'eau chaude et sera modulée selon la puissance disponible en maintenant le 0-W injecté. En effet, dans ce mode, on essaie de consommer toute la puissance produite par les panneaux solaires mais si celle-ci vient à dépasser celle absorbée par la maison, l'onduleur ajuste son point de fonctionnement afin de ne pas injecter sur le réseau. Avec le Ohmpilot, si la maison consomme 650 W et le potentiel solaire, à ce moment, s'élève à 1.2 kW, il existe un excédent non consommé de 550 W qui sera orienté vers le ballon pour stocker l'énergie disponible. Prenons en exemple un ballon de 300 litres équipé d'une résistance de 2 kW et supposons qu'un Ohmpilot est en marche :

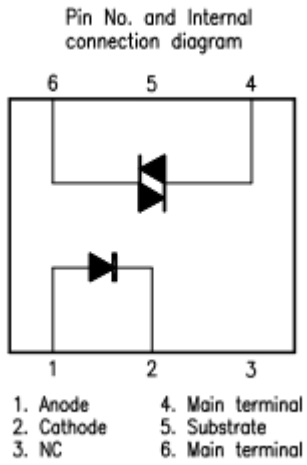
P_{ballon} = 2 kW à 230 V – puissance de chauffe
$R = U^2/P = 230^2/2000 = 26.5\ \Omega$ – valeur ohmique de la résistance 2 kW
→ 550 W implique une tension appliquée de $V = \mathrm{sqrt}(P \times R) \approx 121$ V rms
Le Ohmpilot va ajuster sa sortie et appliquera cette tension aux bornes de la résistance, développant ainsi 550 W

L'excédent de puissance passe à 1.3 kW, le Ohmpilot délivre $V = \mathrm{sqrt}(1.3k \times 26.5) \approx 186$ V rms
L'excédent de puissance monte à 2 kW, le Ohmpilot délivre 100% de la puissance réseau soit 230 V
Il n'y a pas d'excédent, le Ohmpilot délivre 0 V

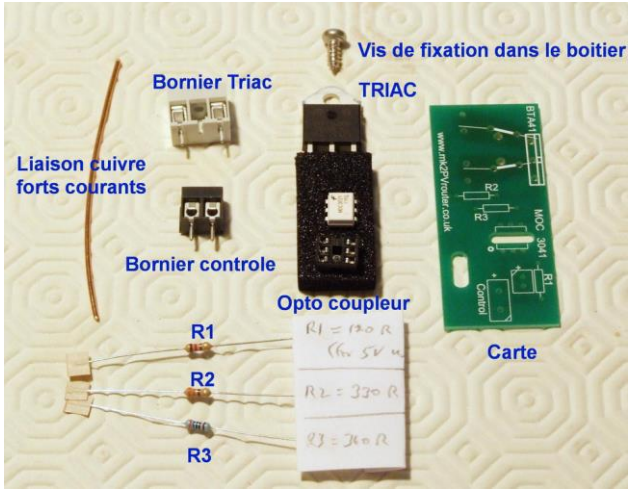
Le convertisseur dialogue en permanence avec l'onduleur qui, lui, est relié à l'énergie-mètre de l'installation. Ce dernier sait donc la puissance absorbée par la maison et indique à l'onduleur comment ajuster sa puissance pour maintenir une injection à 0 W.

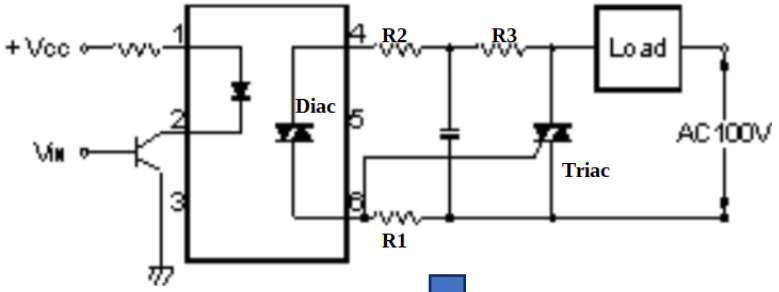
Rms, root mean square = efficace

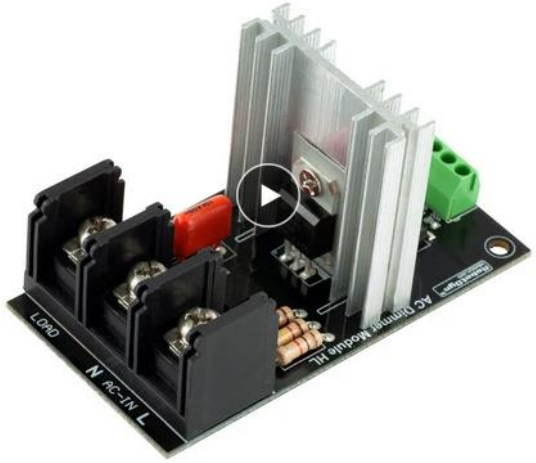
Il existe des « routeurs solaires » – c'est le sobriquet retenu pour ces modules – et ils sont réalisés à partir de triacs commandés par un opto-diac dont le MOC3021 fut introduit par MOTO il y a très longtemps :



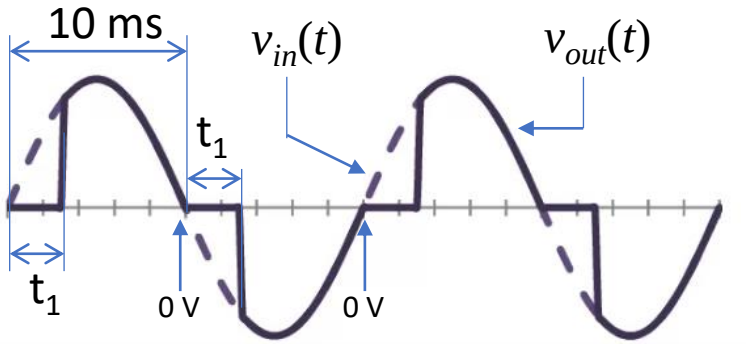
On peut soit construire son module soi-même avec les nombreux tutos sur le web ou le commander chez Ali-Express comme celui-ci de RobotDyn (10 € pour la version 10 A)

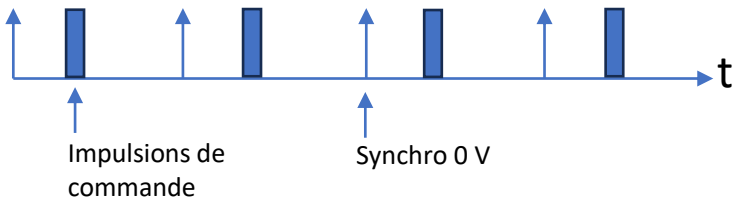






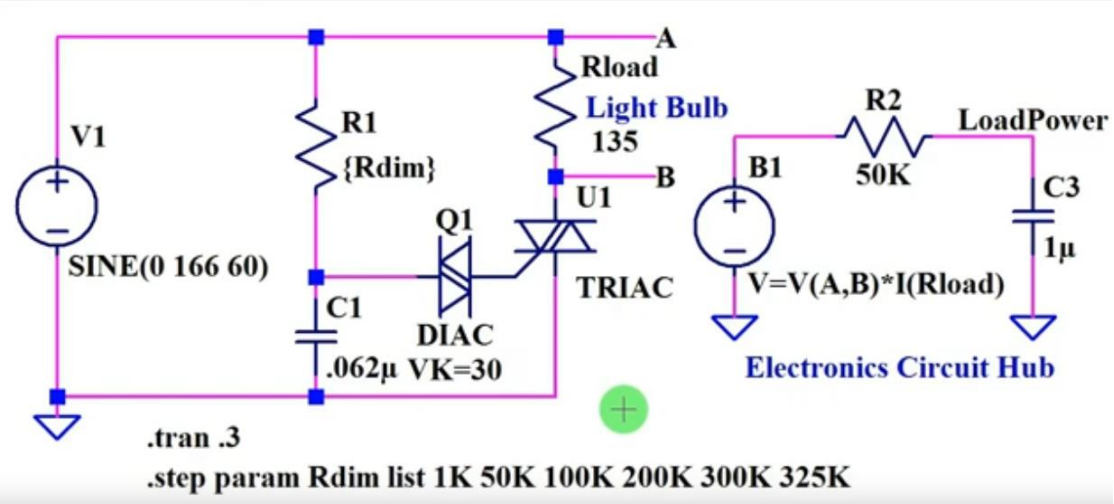
Avec un micro - un Arduino habituellement - on envoie via l'opto-diac une impulsion à t_1 qui amorce le triac. Celui-ci conduit pendant (10 ms – t_1) et produit la forme d'onde noire.





Le micro reçoit des informations de consommation via une pince en courant et ajuste t_1 pour moduler la puissance à la charge afin de maintenir le 0-W injecté.

Calculs de puissance autour d'un gradateur classique à diac et triac :



C'est la configuration classique d'un gradateur à triac comme on les bricolait dans les années 80 pour baisser la lumière dans les boums de garage. Le principe est simple : le réseau R_1C_1 introduit un pôle dans la fonction de transfert liant la tension aux bornes de C_1 et le réseau V_1. Ce pôle retarde la tension d'entrée V_1 et la modifie en amplitude selon la constante de temps R_1C_1. Un diac est l'équivalent de deux diodes Zener montées tête-bêche et conduit dans les deux polarités aux alentours de 32 V. Ainsi, lorsque la tension aux bornes de C_1 atteint $\pm$ 32 V plus le seuil de tension du triac (et que le courant de gâchette est obtenu), le triac conduit dans le cadran I ou III selon la polarité du réseau. En ajustant R_1, on modifie l'angle d'allumage et donc la tension efficace produite aux bornes de la charge.

Voici les calculs pour déterminer l'angle d'allumage selon la valeur de la constante de temps :

Dimmer components

$R_1 := 33k\Omega$ $\quad C_1 := 100nF$ $\quad V_{th} := 32V$ Diac threshold

$$f_p := \frac{1}{2\cdot\pi\cdot R_1\cdot C_1} = 48.229Hz$$

$$Mag := \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{F}{f_p}\right)^2}} = 0.694 \qquad \varphi := -atan\left(\frac{F}{f_p}\right) = -46.033°$$

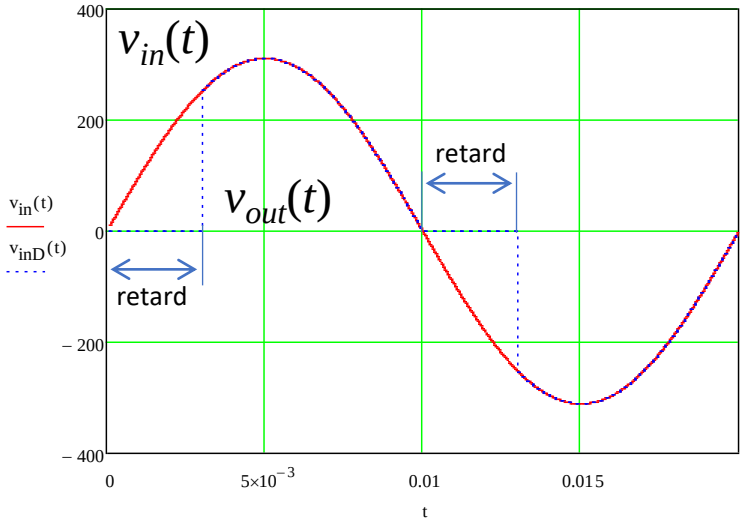
Mag and phase delay of the RC network

$$V_{th} = V_p\cdot Mag\cdot sin(\omega\cdot t_1 + \varphi)$$

At what time does the voltage reach the diac threshold?

$$t_{del} := \frac{asin\left(\frac{\frac{1}{Mag}}{V_p}\cdot V_{th}\right) - \varphi}{\omega} = 3.031ms$$

La forme d'onde typique obtenue ressemble à ça :



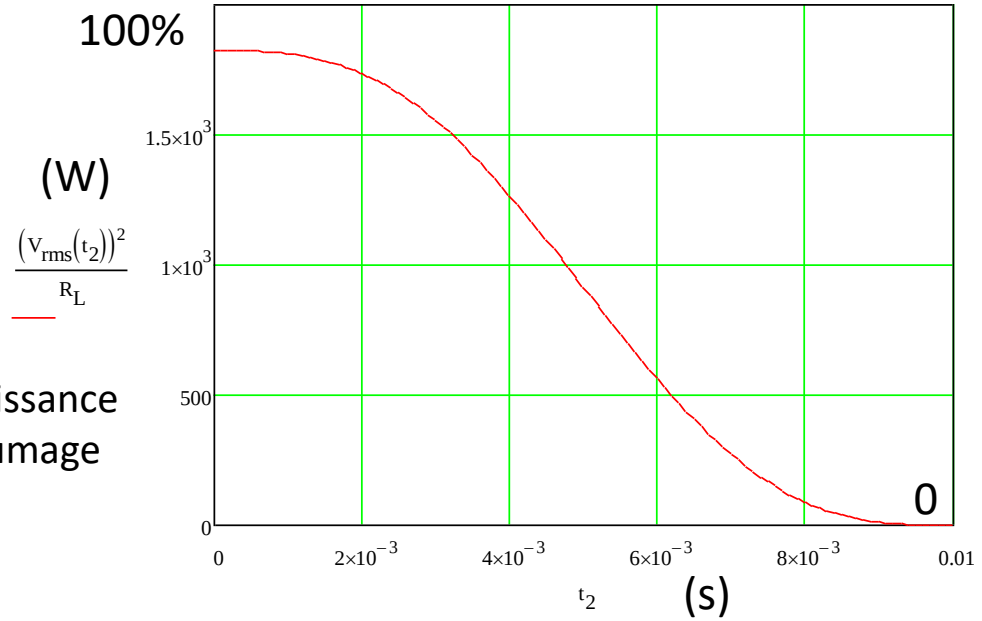
On peut maintenant calculer la valeur efficace transmise à la charge et qui va varier selon l'angle choisi. Avec un Arduino, il n'y a plus de constante de temps mais l'angle est calculé afin d'ajuster exactement la puissance transmise à la charge (ou assurer le 0-W injecté) :

t_1 = 3.03 ms

$$V_{rms}(t_1) = \sqrt{\frac{2}{T}\cdot\left[\int_{t_1}^{\frac{T}{2}} \left(V_p\cdot\sin(\omega\cdot t)\right)^2 dt\right]}$$

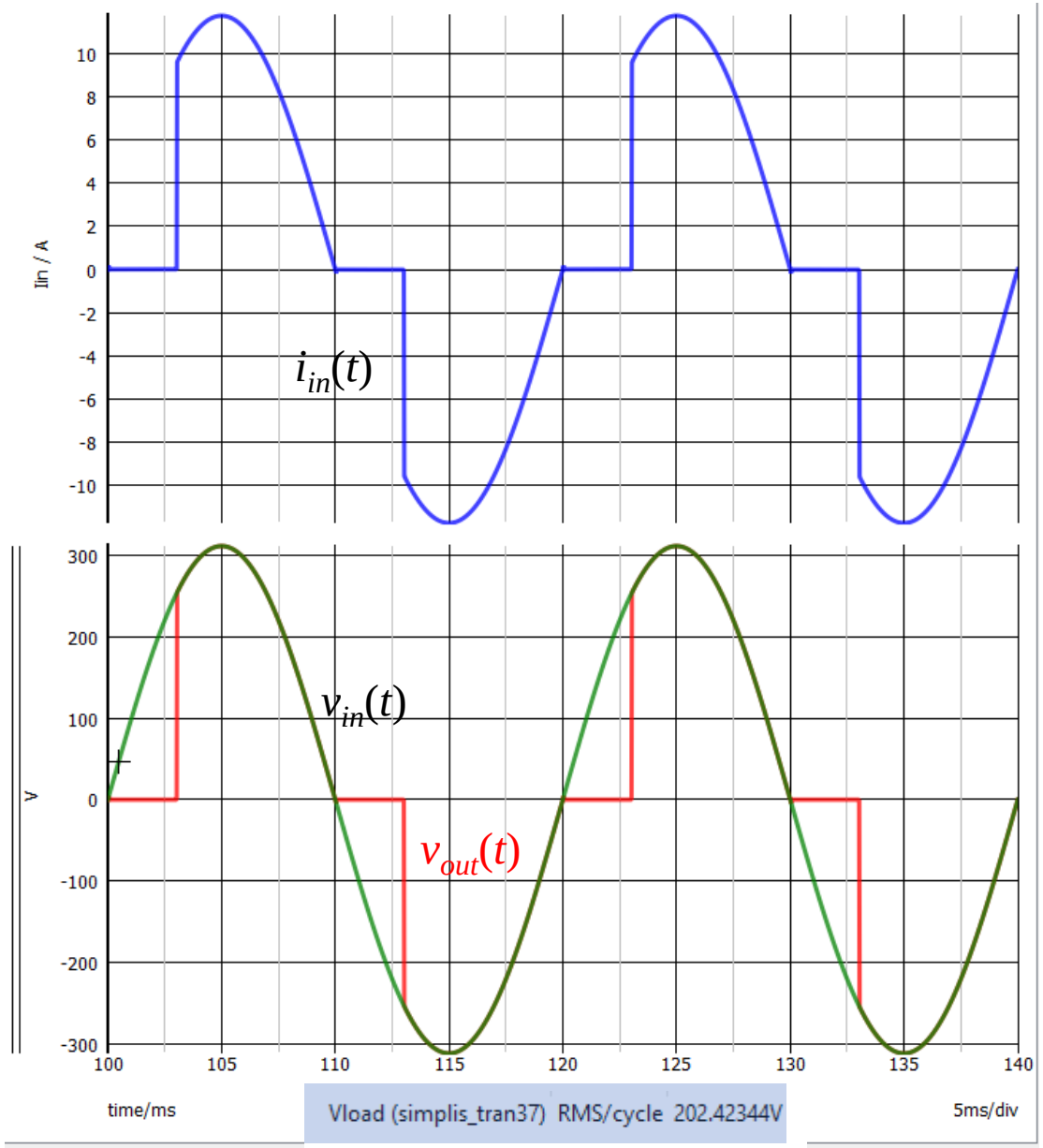
$$V_{rms}(t_1) := \frac{V_p}{\sqrt{2}}\cdot\sqrt{\frac{\left(\sin(2\cdot\omega\cdot t_1) - \sin(T\cdot\omega) + T\cdot\omega - 2\cdot\omega\cdot t_1\right)}{T\cdot\omega}}$$

$$V_{rms}(t_1) = 202.422\,V$$

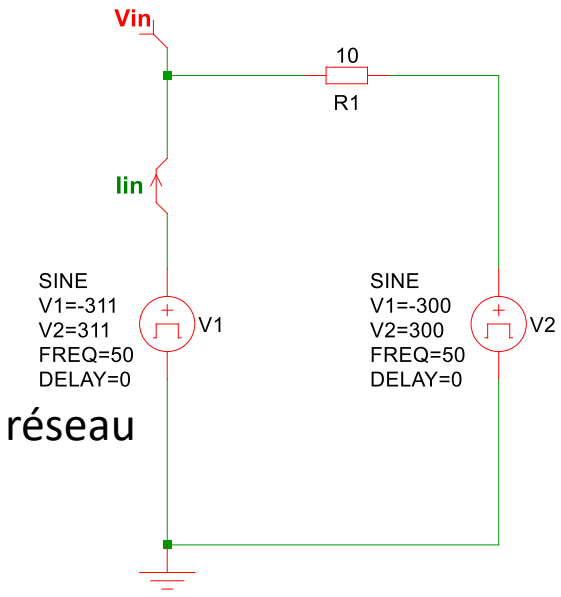


Variation de la puissance selon l'angle d'allumage (2 kW = 100%)

Courant d'entrée

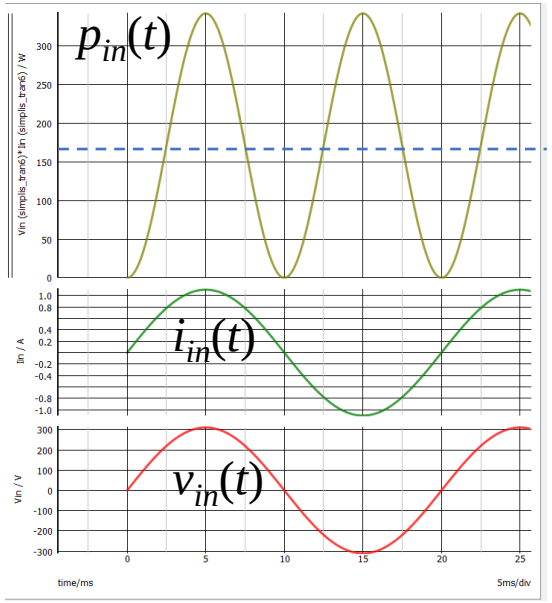


Un routeur solaire, quelle que soit sa mise en œuvre, travaille afin de maintenir le 0-W injecté. On doit donc mesurer la puissance absorbée du réseau et, selon sa polarité, on sait si la maison est réceptrice ou émettrice de puissance.



Sur cette simu, la source de droite est inférieure en tension à celle de gauche qui symbolise le réseau. Le courant est exclusivement positif et la puissance instantanée $i_{in}(t).v_{in}(t)$ représente le flow transmis entre les deux sources :

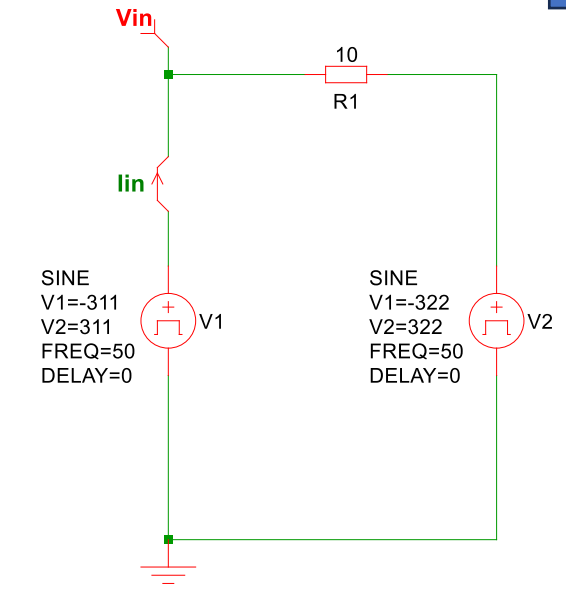
Name	Value
Mean/cycle	171.05W



P_{avg} = 171 W

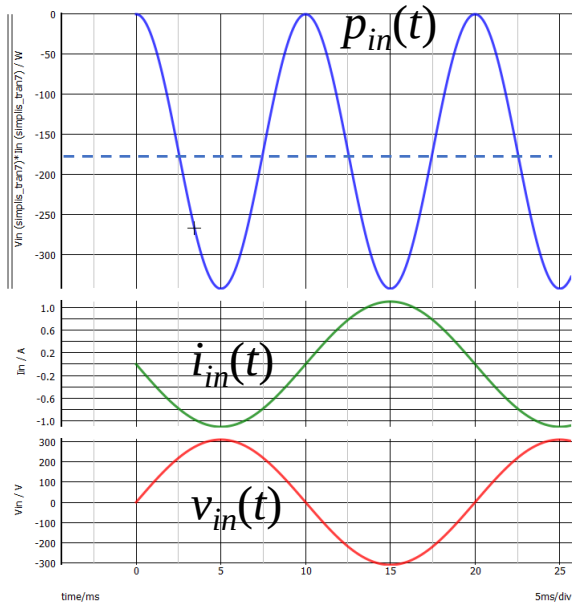
Absorbe

Il faut échantillonner avec un ADC et un micro pour calculer la puissance active puis vérifier sa polarité. Cette vidéo l'explique bien. Le site associé est ici.



Cette fois la source de droite présente une tension supérieure à celle du réseau et la puissance est réinjectée. C'est le cas lors d'un surplus de puissance solaire par exemple. Le courant est à présent en opposition de phase et l'intégrale de la puissance instantanée retourne une valeur négative :

Name	Value
Mean	-171.05W



P_{avg} = -171 W

Injecte

Le point gênant avec la régulation par gradateur, à mon sens, est le facteur de puissance qui se dégrade avec l'angle de commande :

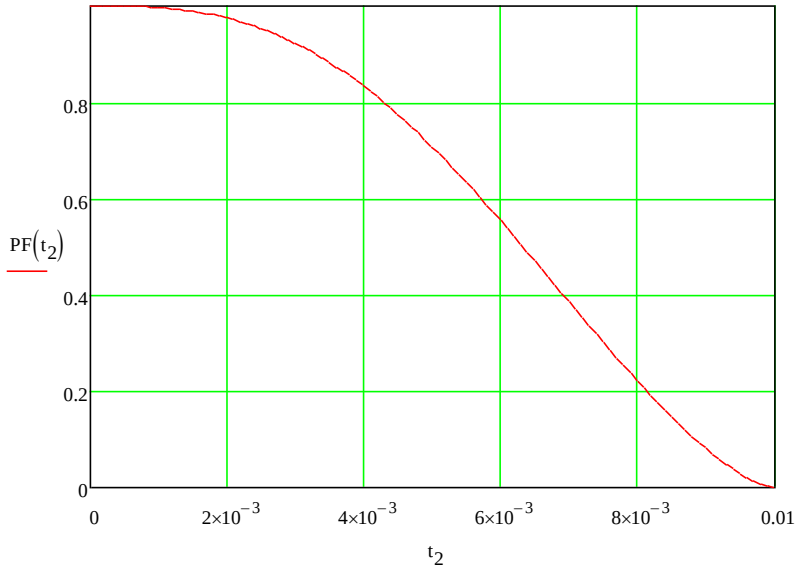
$$P_W(t_1) := \frac{(V_{rms}(t_1))^2}{R_L}$$ Rated power in W supplied to the load

$$P_{VA}(t_1) := \frac{V_p}{\sqrt{2}} \cdot I_{rms}(t_1)$$ Apparent input power, Vin_rms x Iin_rms

$$PF(t_1) := \frac{P_W(t_1)}{P_{VA}(t_1)}$$ Power factor

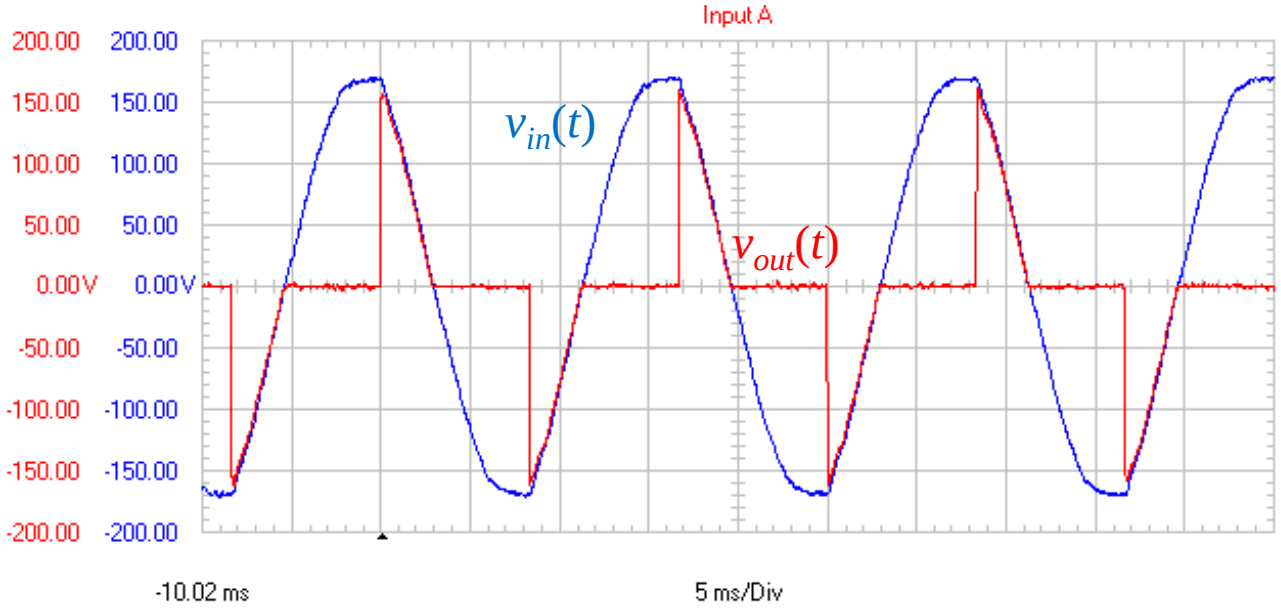
$$PF(t_1) = 0.92$$

1 = pure resistance

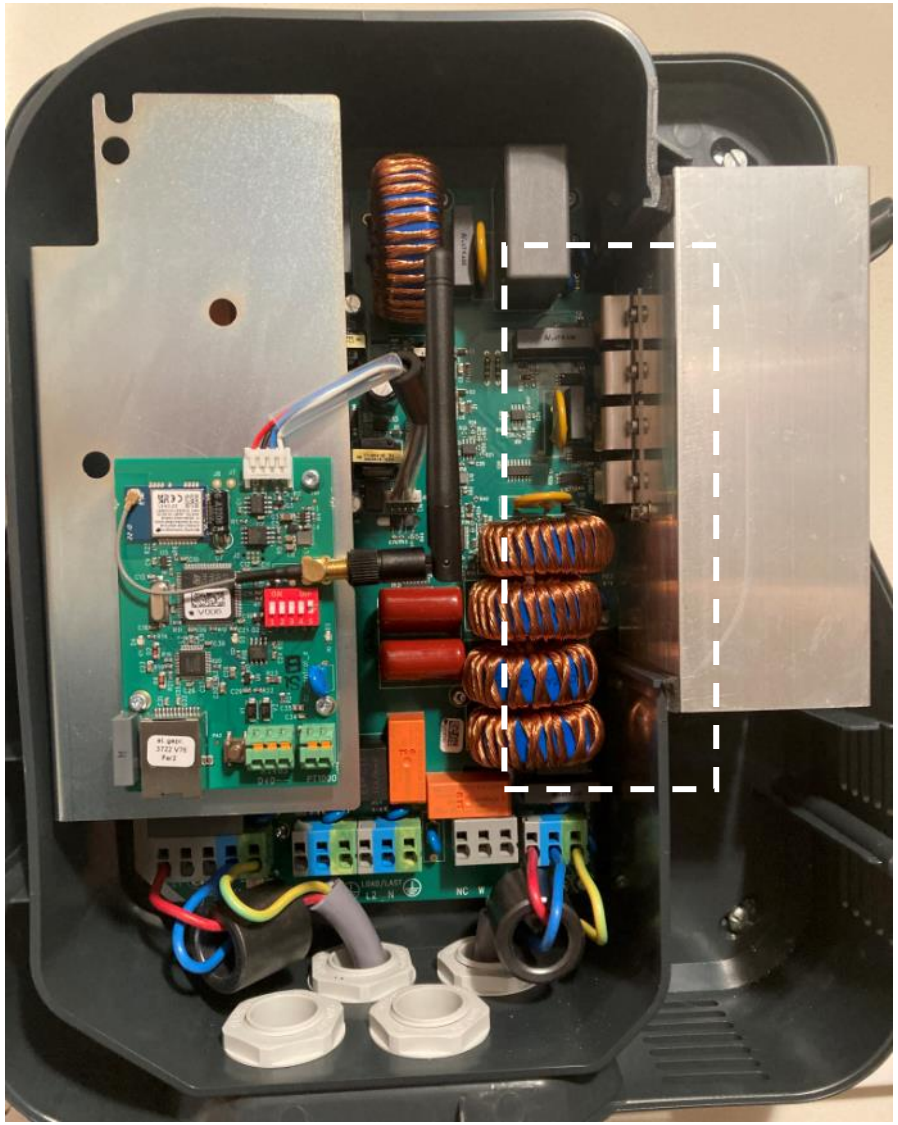


Facteur de puissance selon le retard sélectionné

Pour un triac conduisant sur toute l'alternance, la charge vue du réseau est purement résistive. Puis, lorsque le temps de conduction du triac diminue, en baissant la puissance transmise, la distorsion de courant augmente et la puissance apparente également, dégradant naturellement le facteur de puissance. Voilà la forme d'onde typique obtenue avec ces dispositifs. Lien ici.



La solution d'un convertisseur dévolteur alternatif-alternatif ou buck ac-ac, semble être celle retenue par Fronius. Je n'ai pas eu accès au schéma de principe mais la présence de quatre boitier TO247 pourrait confirmer cette approche :



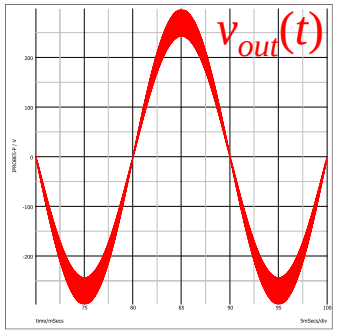
Cet article publié en 2006 par Sam Ben-Yaakov décrit la structure pour une mise en œuvre bidirectionnelle, comme un transformateur classique. Les avantages et inconvénients de ce dévolteur ac-ac sont :

- ✓ Excellent rendement sur la gamme de puissance
- ✓ Courant prélevé sinusoïdal donc facteur de puissance proche de 1
- ✓ Découpage haute fréquence avec inducteurs de petite taille

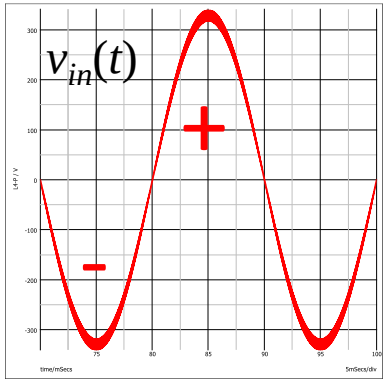
- ❖ Difficulté de mise en œuvre avec une commande high-side
- ❖ Drivers opto-isolés obligatoires, le bootstrap ne fonctionnerait pas
- ❖ Modules dc-dc high- and low-side avec très faible capacité parasite obligatoires compte tenu des dV/dt des SiC. Ceux-ci offrent 15 pF de capacité primaire-secondaire.
- ❖ Ondulation haute-fréquence dans le câble qui part vers le ballon avec pollution électro-magnétique importante
- ❖ Filtre de la tension d'entrée compte tenu du découpage

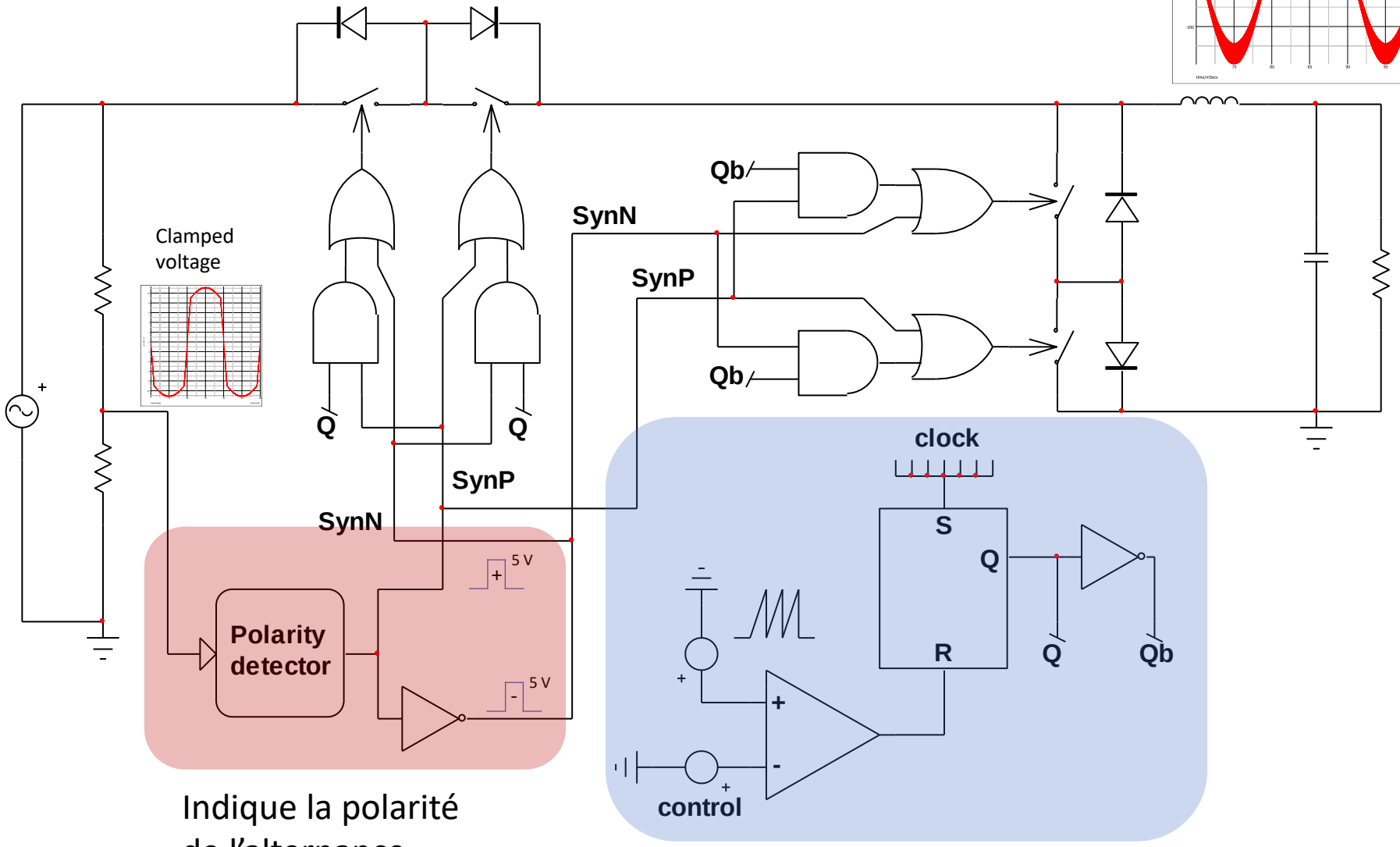
Voici le principe de fonctionnement d'un buck ac-ac :

Tension de sortie



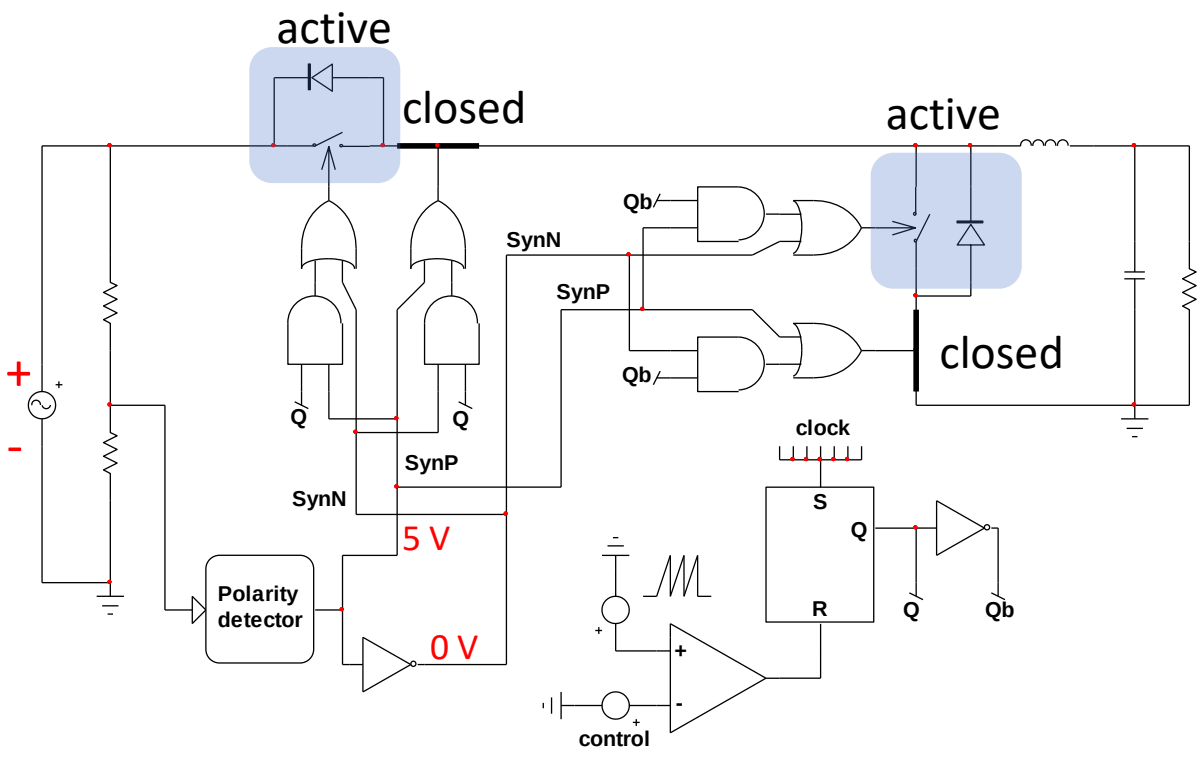
Tension d'entrée

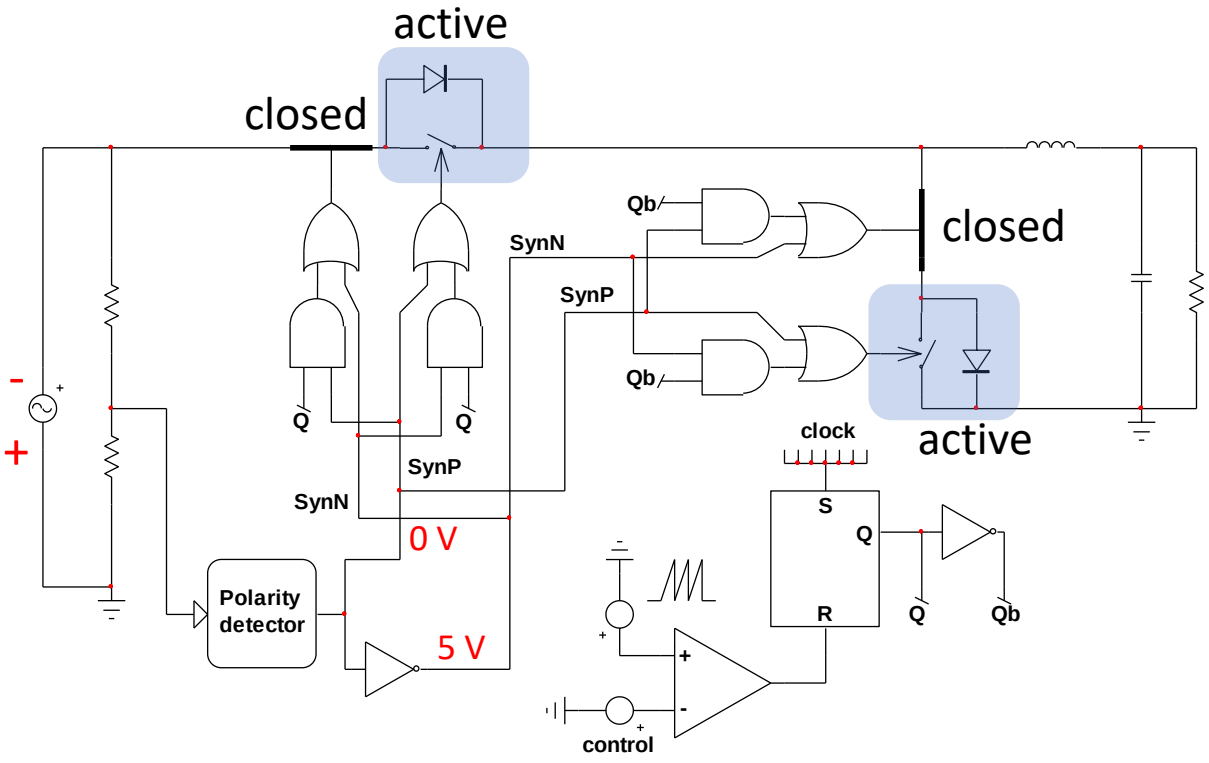




Indique la polarité de l'alternance

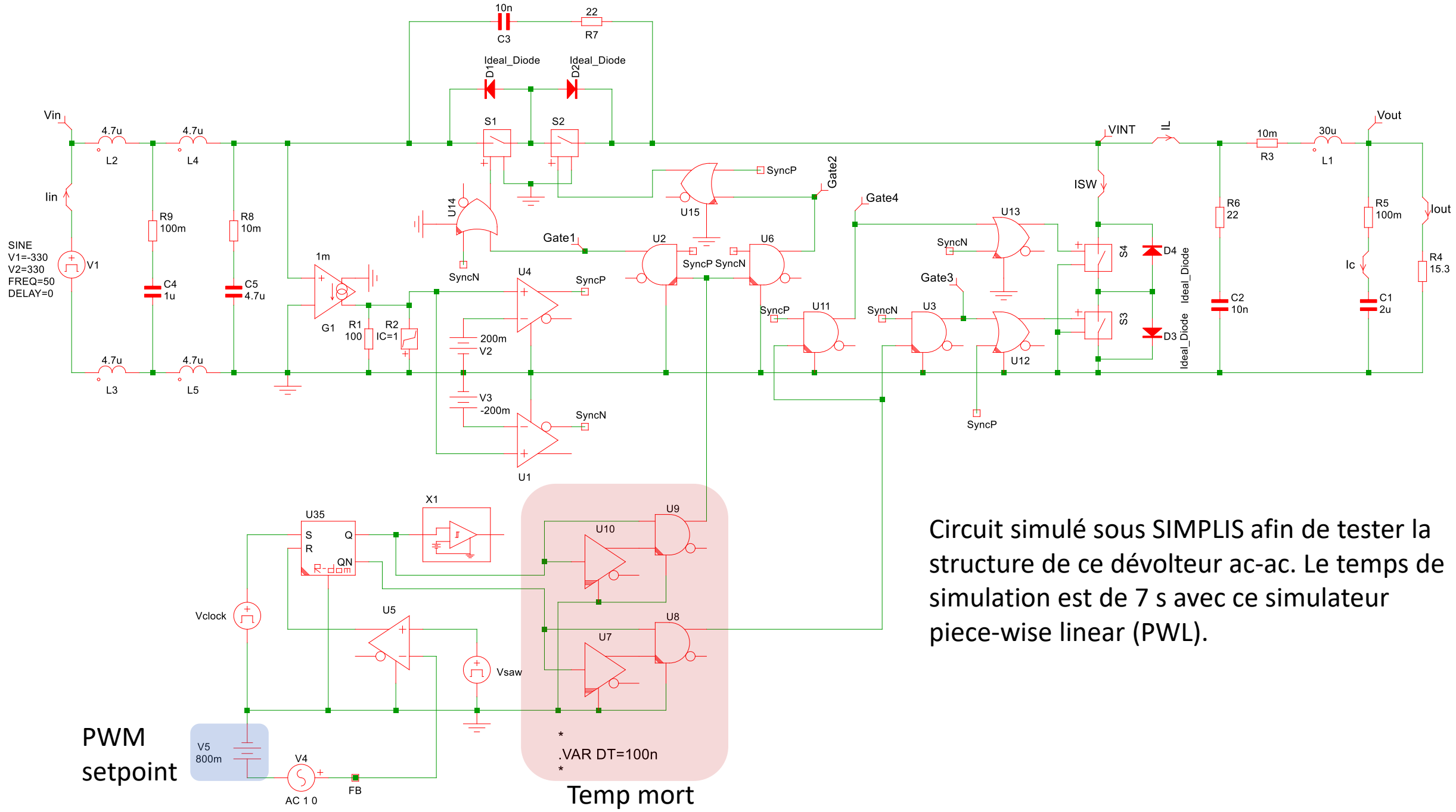
Modulateur de largeur d'impulsions





Lorsque la tension d'entrée est positive par rapport à la masse, le circuit fonctionne selon le principe d'un buck classique en redressement synchrone. Deux des interrupteurs sont fermés en permanence afin d'assurer la circulation du courant. Un temps mort est inséré pour contrôler les switches actifs et limiter les courants de commutation. La tension de contrôle ajuste le rapport cyclique et détermine la tension de sortie voulue.

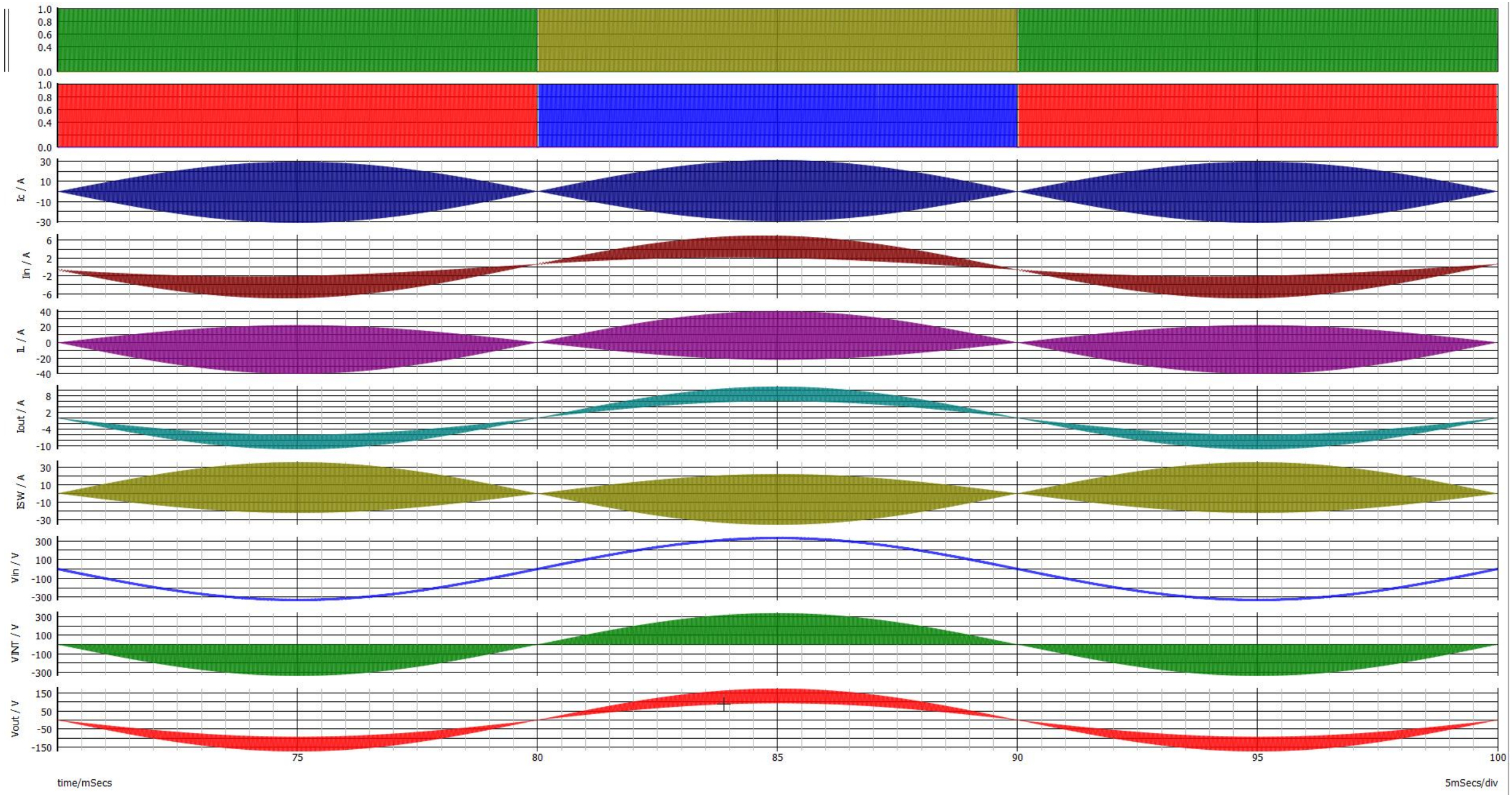
Lors de l'alternance négative, les interrupteurs auparavant fermés deviennent actifs et ceux qui étaient actifs se ferment. Le courant change de direction et la tension de sortie passe en négatif également afin de reconstruire la sinusoïde. Un temps mort est inséré au voisinage de 0 V en entrée et il est possible que des techniques de redémarrage doux soient mises en œuvre comme dans un PFC de type totem-pole.



PWM setpoint

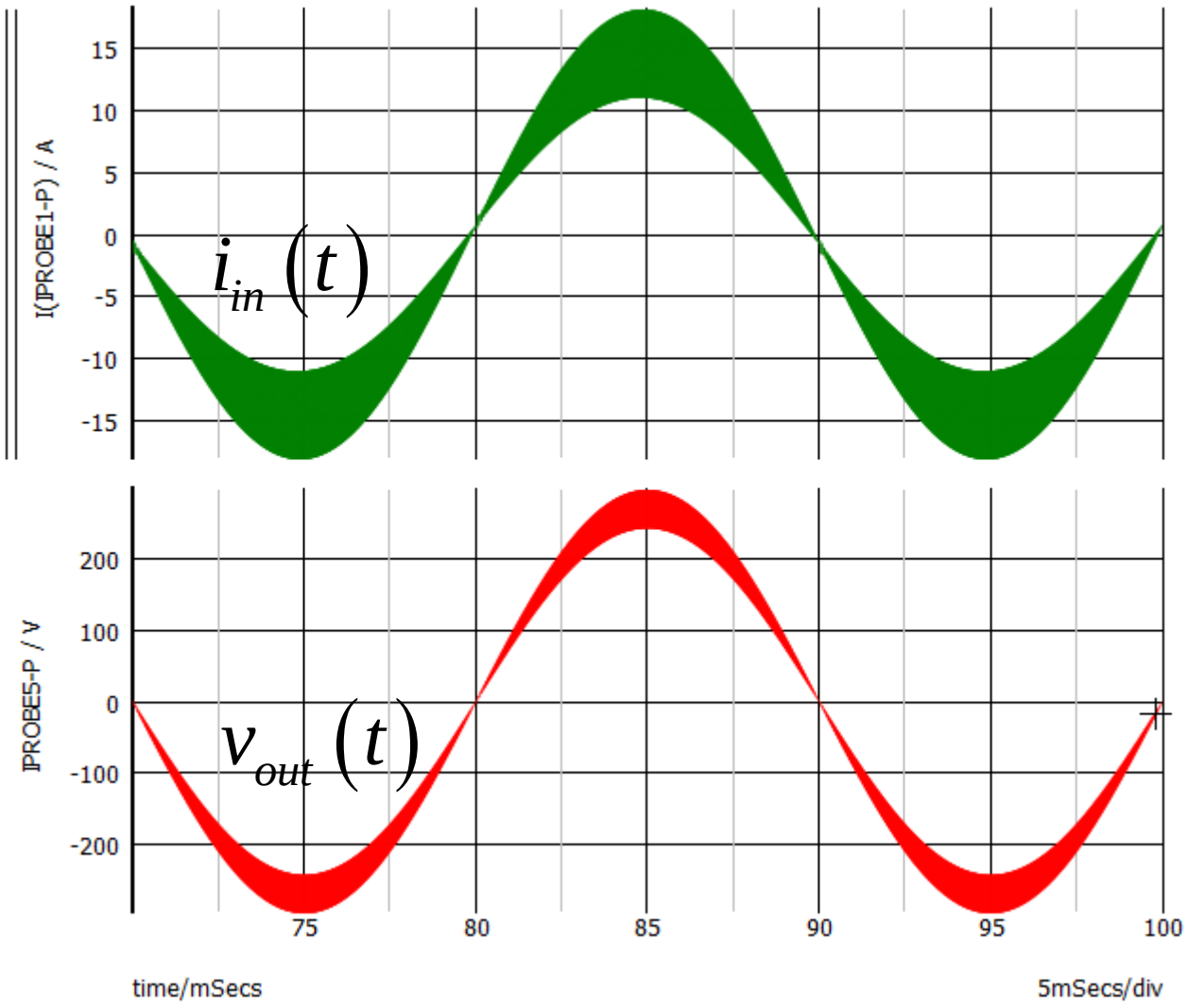
Temp mort

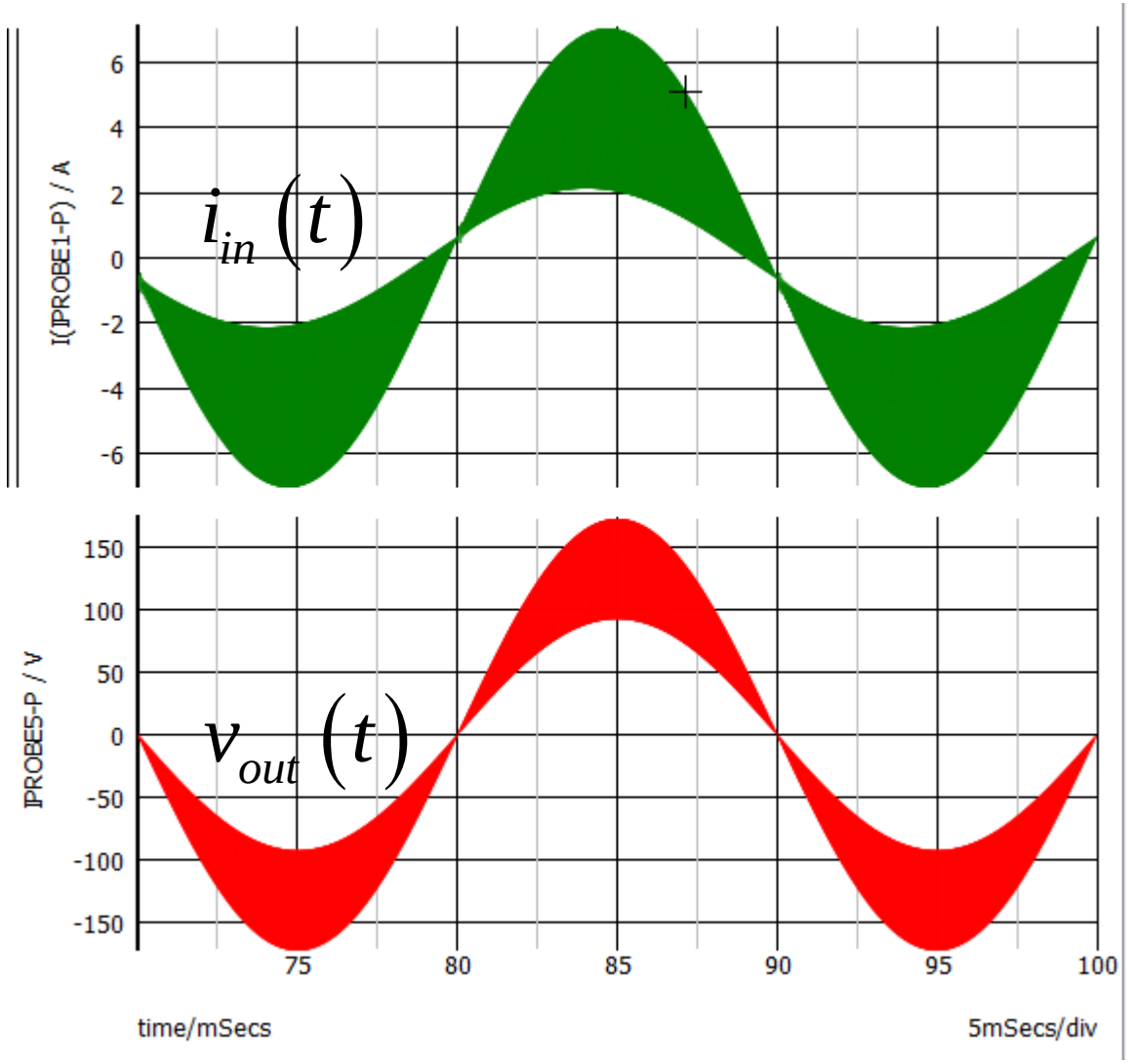
Circuit simulé sous SIMPLIS afin de tester la structure de ce dévolteur ac-ac. Le temps de simulation est de 7 s avec ce simulateur piece-wise linear (PWL).



Les formes d’onde sont douces et bien sinusoïdales. La sortie est en phase avec l’entrée et offre un taux de distorsion très faible. Ce point de fonctionnement programme la sortie à 106 V rms pour une entrée à 230 V rms.

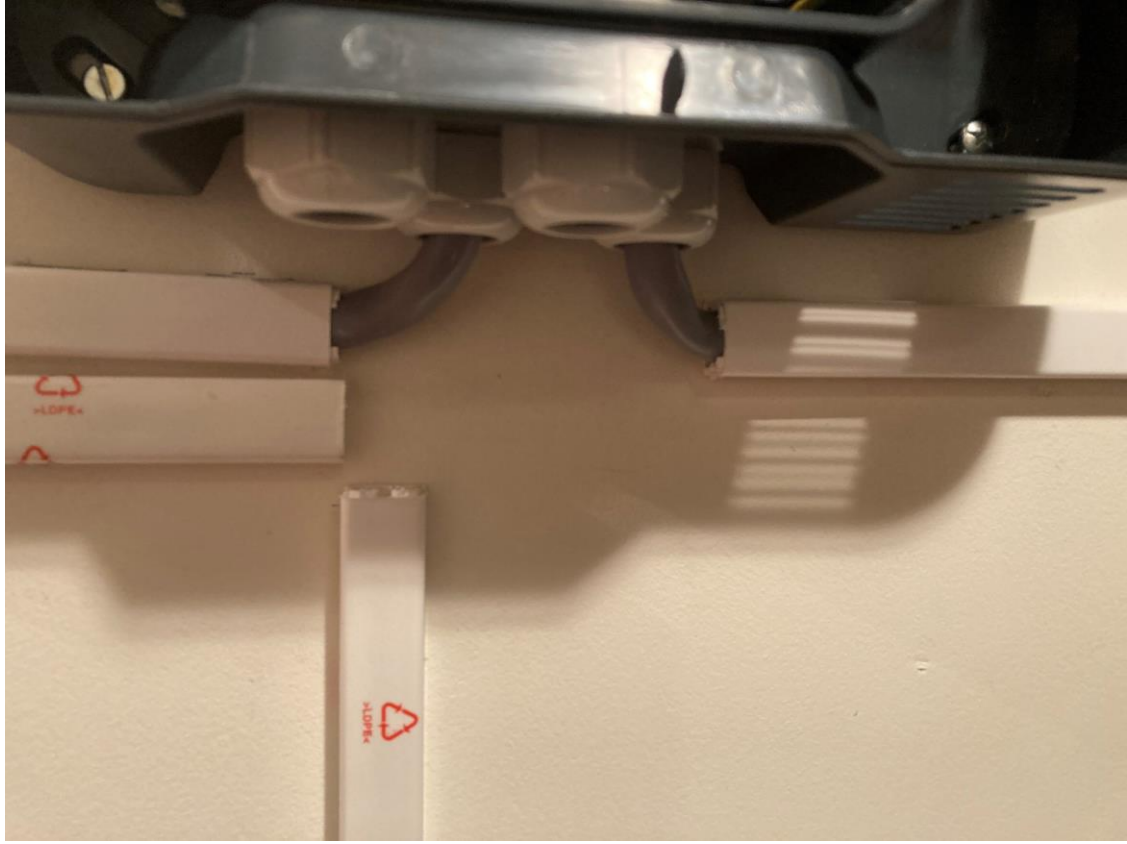
Voici deux points de fonctionnement différents avec les rendements associés : puissance nominale et tiers de puissance.





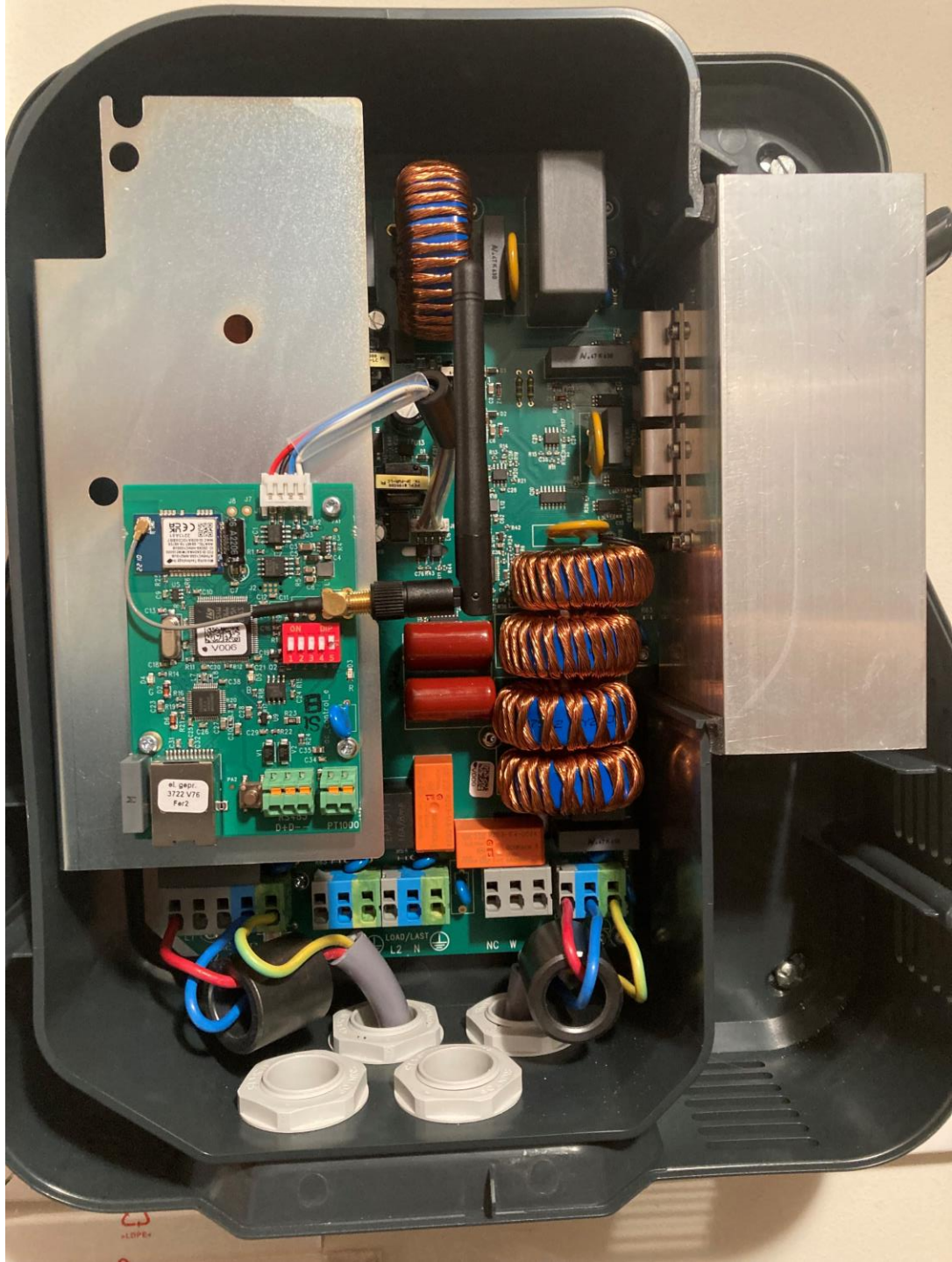
V_{set} = 0.8 V → V_{out} = 188 V rms, I_{in} = 10.4 A rms → P_{out} = 2.3 kW, P_{in} = 2.39 kW, η = 96.2%

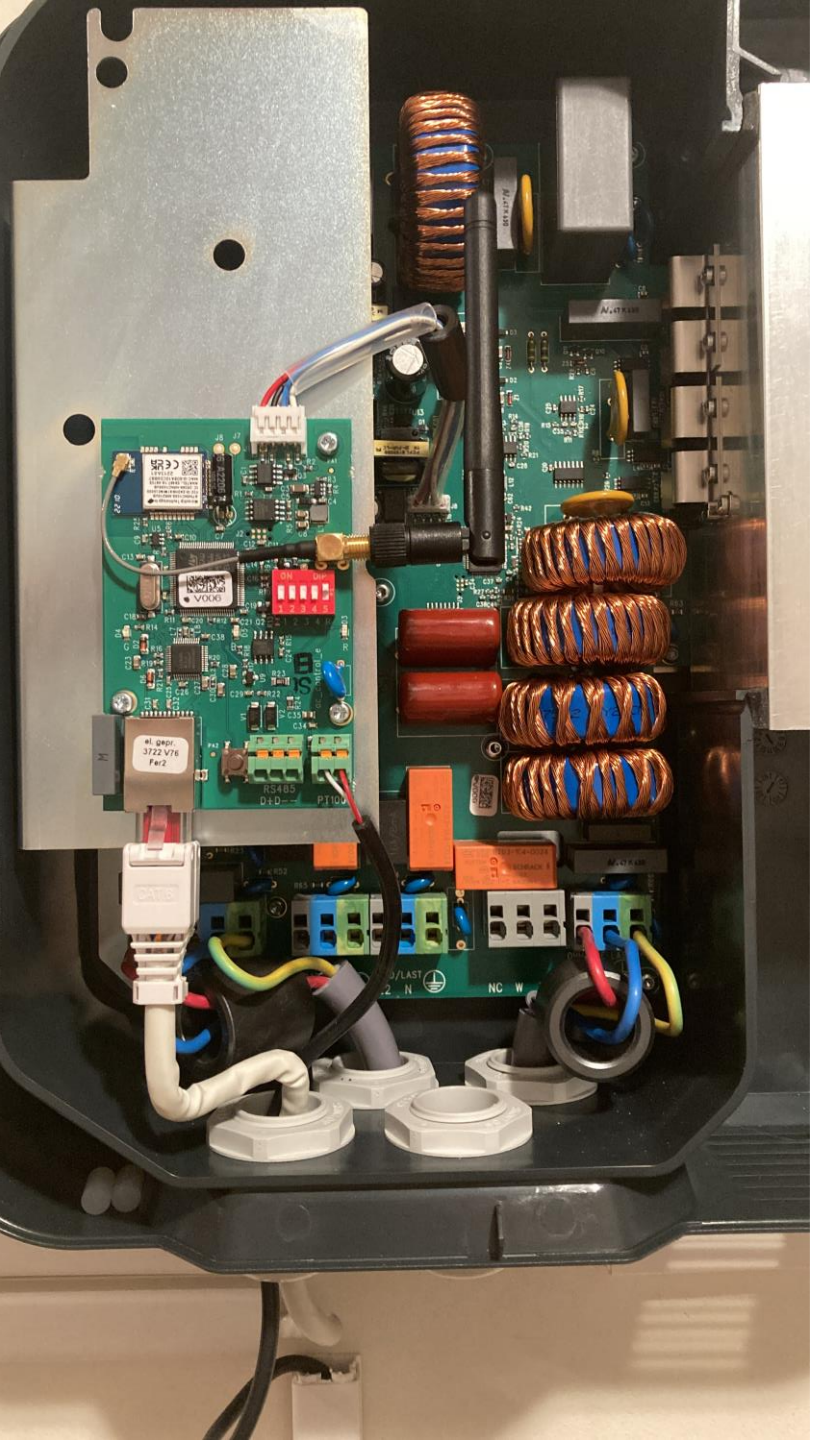
V_{set} = 0.4 V → V_{out} = 98 V rms, I_{in} = 3.28 A rms → P_{out} = 628 W, P_{in} = 754 W, η = 83.3%



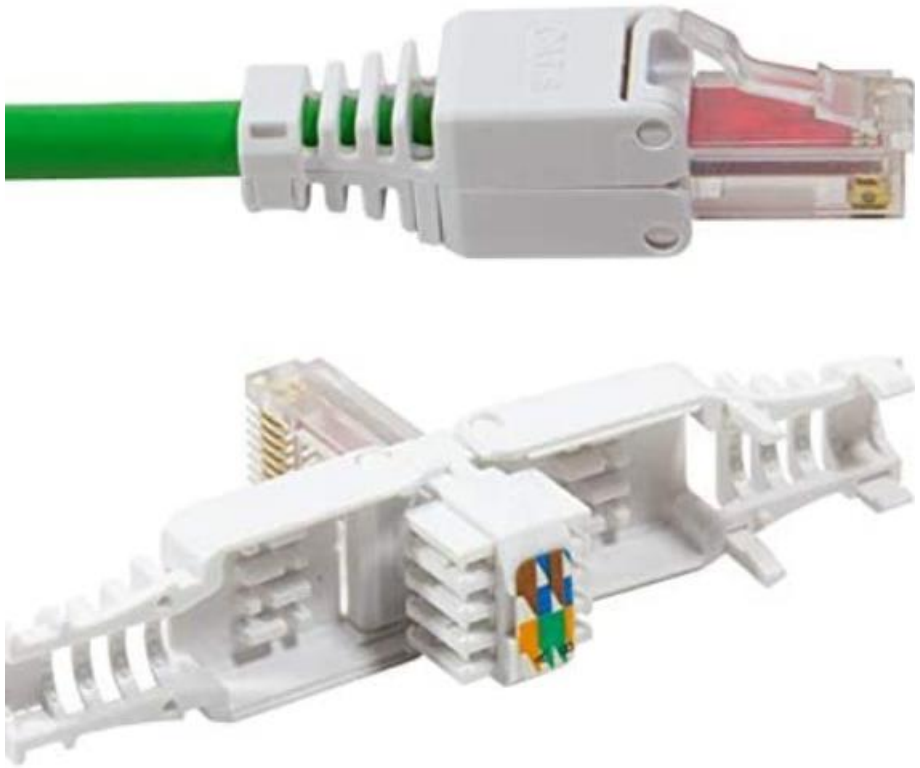
Le Ohmpilot est placé au mur et il reçoit le réseau électrique du tableau principal (non secouru par le GEN24+), protégé par un différentiel 30 mA et un disjoncteur 16 A. La charge prévue pour le Ohmpilot est de 2 kW, soit un courant nominal de 2k/230 = 8.7 A. J'ai tiré du 3 x 2.5 mm² en rigide et ai protégé le passage avant d'entrer dans le coffret. Le réseau Ethernet est acheminé sur le côté gauche.

La sortie du Ohmpilot est descendue côté mur et sera reliée à la résistance du chauffe-eau via des dominos dans une boite de jonction. On voit la sonde PT1000 qui mesurera la température du ballon afin que le Ohmpilot assure la régulation automatiquement en mode solaire mais également la nuit si un apport calorifique est nécessaire.



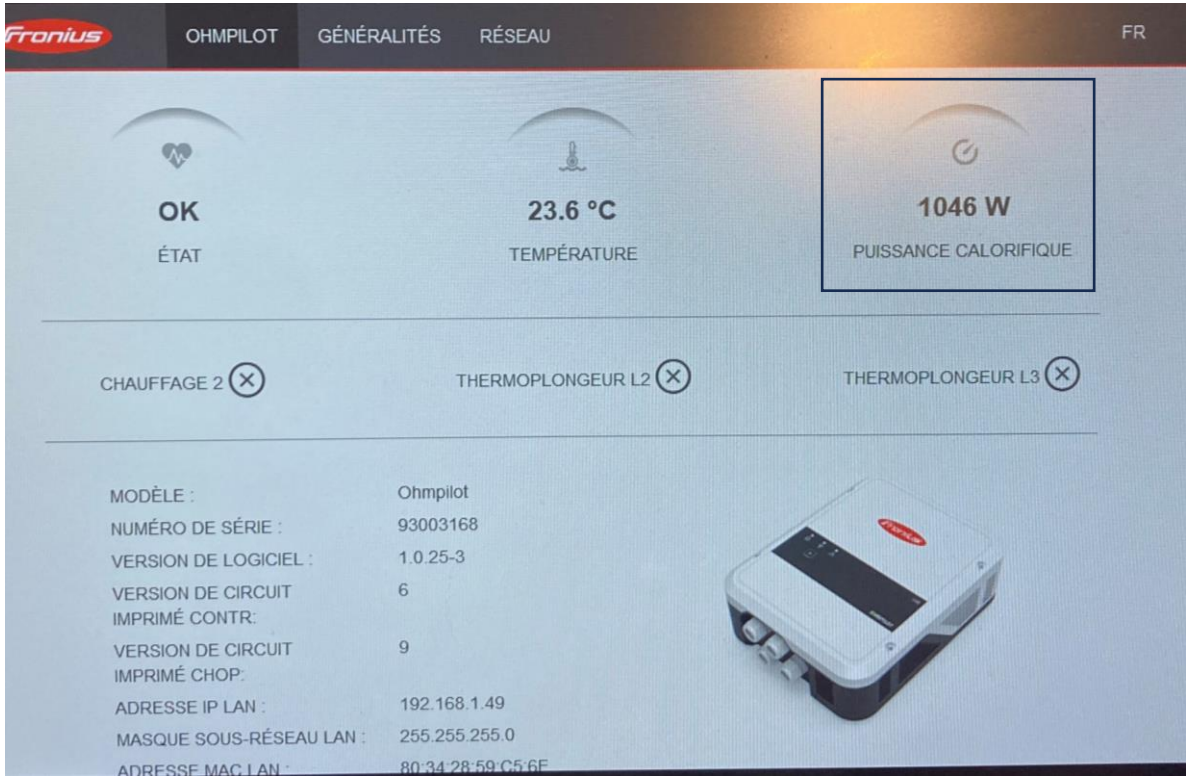


Le câble Ethernet est un CAT6F/UTP 4 P mais qui est ultra rigide et il faut bien le former avant de l'insérer dans le connecteur RJ45 de la carte sous peine de casser ses connexions au PCB. A refaire, je prendrais une catégorie en dessous, blindée mais plus souple comme l'un de ceux décrits ici. Les connecteurs sont des RJ45 assemblés sans outils comme ceux de droite (lien). Ils sont pratiques mais réclament un minimum de dextérité avec une bordée de jurons quasi-impossible à éviter. Non recommandé pour travailler dans un endroit peu accessible.



J'ai pris des câbles blindés mais il n'y a pas de connexion/enveloppe métal pour relier l'écran sur ces connecteurs donc pas de mise à la masse du blindage : {

La première mise en route est faite en utilisant un radiateur de 2 kW équipé d'un ventilateur. Ce dernier est éteint et ne reste que la résistance qui est mesurée à 26.5 Ω soit 1.996 kW sous 230 V.



Un montage volant sécurisé via une prise femelle 16 A est effectué afin de raccorder facilement le radiateur.

Il y a du soleil et la maison absorbe peu de puissance à ce moment. Le surplus est de 1.046 kW (en haut à droite) et la tension est ajustée au radiateur. La température est celle de l'ambiante mesurée par la PT1000 en l'air. Ce sera celle de l'eau plus tard.

P = 0

P = 667 W

P = 804 W

P = 1.65 kW

J'ai choisi ce ballon OSO, fabriqué en Norvège avec cuve inox et résistance stéatite. Son diamètre est constant à 58 cm pour les modèles 150-200 et 300 litres. J'ai pris un 300 litres, il coûte 1031 €. Je l'ai commandé chez France Solaire Chauffage et il a été livré rapidement.

Avantages du ballon inox avec résistance stéatite :

- Cuve Inox AISI 444
- Résistance stéatite 2kW 230 V
- Soupape de sécurité 9 bar prémontée / vanne de vidange (Image point A)
- Vanne mélangeuse manuelle prémontée
- Doigt de gant pour sonde prémontée - Ø8 mm
- Connexions 1/2" pour eau froide et eau chaude
- Câble et fiche électrique prémontés
- Thermostat de contact intelligent réglable de 40°C à 70°C - température de réglage 65°C
- Pieds réglables inclus
- Isolation en PU rigide

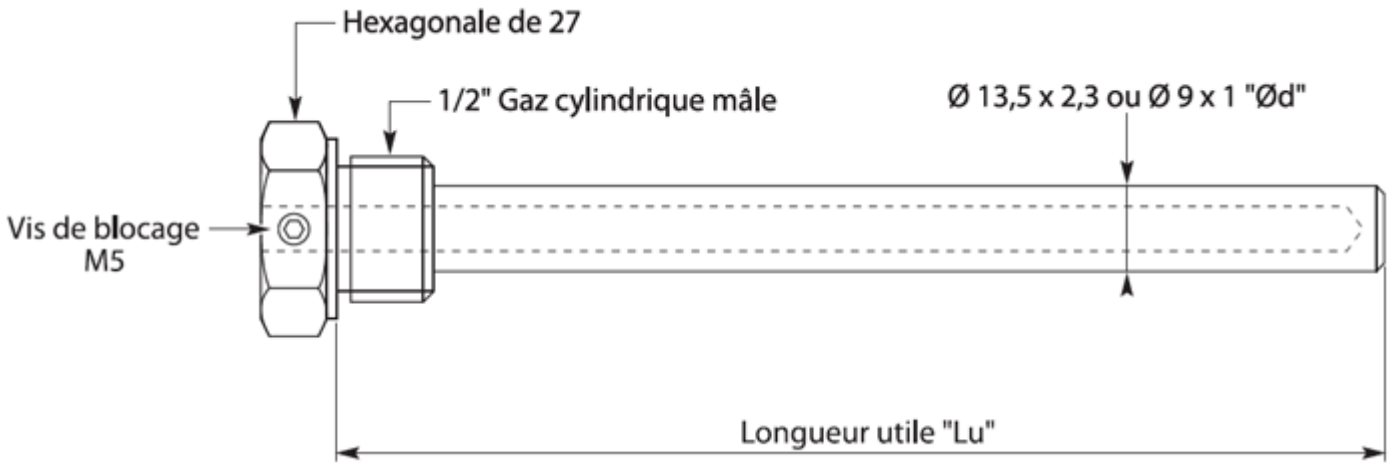
Non, c'est erroné, pas de doigt de gant mais une entrée en ½"

Selon le vendeur, il est équipé d'un doigt de gant dans lequel je pourrai glisser la sonde PT1000. C'est erroné, il n'y en a pas. Je vais donc commander un doigt de gant et le glisser dans la connexion eau chaude en 1/2".

J'ai ajouté un petit galvanomètre à aiguille (qui se moque de la HF) pour lire la puissance.

Cette entrée filetée en ½" devrait me permettre d'enfiler un doigt de gant d'une longueur de 60 cm afin de bien prendre la température, presqu'au milieu du ballon. Bien vérifier la présence de cette entrée filetée pour doigt de gant sinon pas de mesure de température.

Voici le doigt de gant que j'ai trouvé et qui devrait convenir :



Il s'agit de la référence DGV1209-590 qui fait 9 mm de diamètre et convient pour y loger la sonde. Il fait 60 cm et plongera bien au cœur du ballon pour la mesure.

DGV1209-590	9	600

TOTAL NET H.T	Frais administratifs / Port	Taux TVA	TOTAL TVA	TOTAL TTC
45.09	0.00	20.00	9.02	54.11 EUR

ELEC SUD-OUEST

Bureaux et magasins :

13 Avenue de Larrieu

31100 Toulouse

elecsudouest@etn.fr

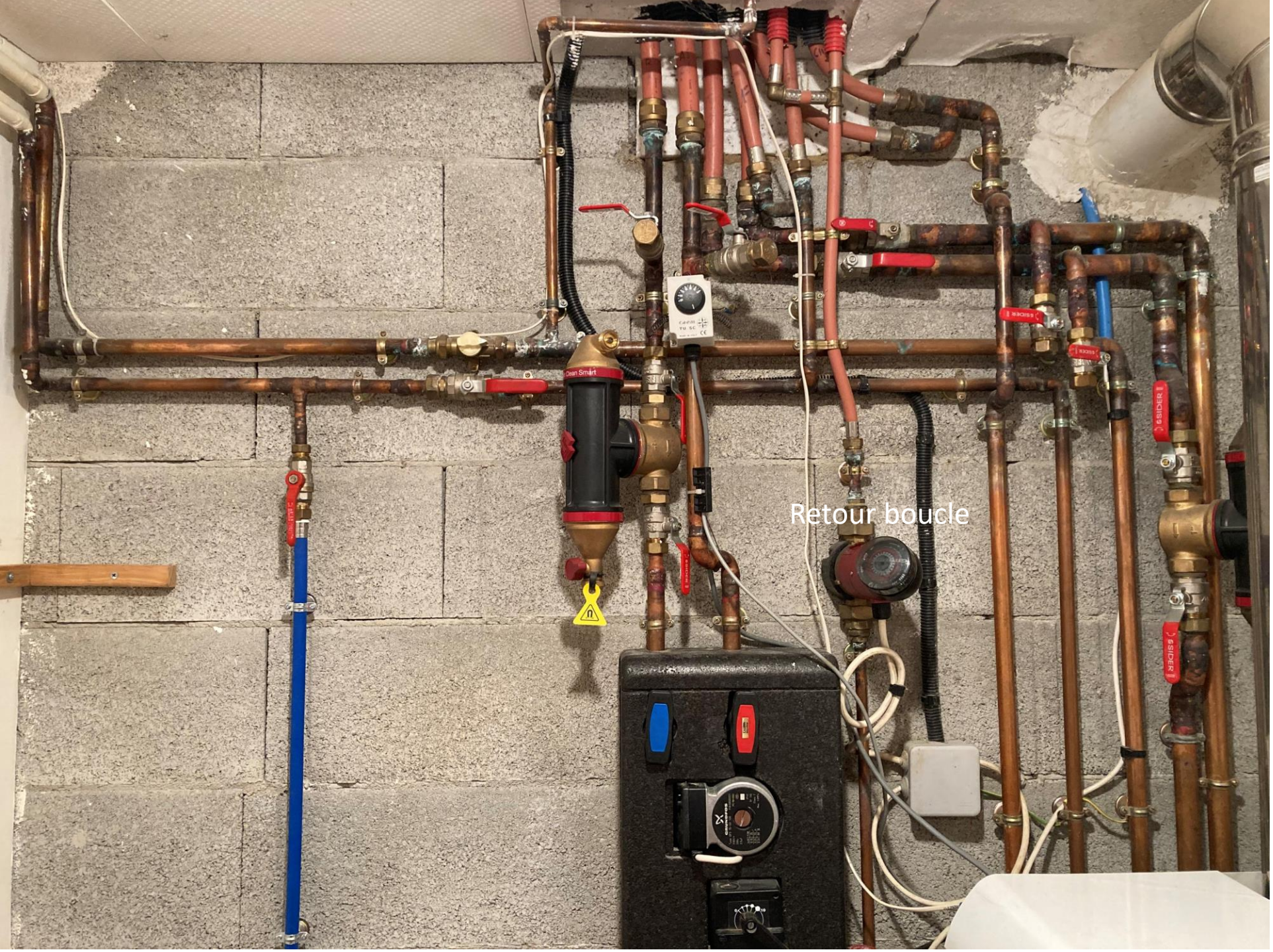
Tél : 05.34.61.57.57

Fax : 05.34.61.57.59

Le doigt de gant est arrivé et il convient parfaitement pour loger la sonde PT1000. Je pensais enduire la sonde de pâte thermique mais le plombier me le déconseille car ces pâtes peuvent sécher et bloquer la sonde ensuite. Donc pas de pâte !

Le doigt de gant sera ensuite équipé de fillasse et fermement vissé à l'ouverture filetée de ½″.

Le thermostat permet de régler la température jusqu'à un maximum de 70 °C. Je fixerai le maxi de l'Ohmpilot à 60 °C afin de laisser 10 degrés de marge.

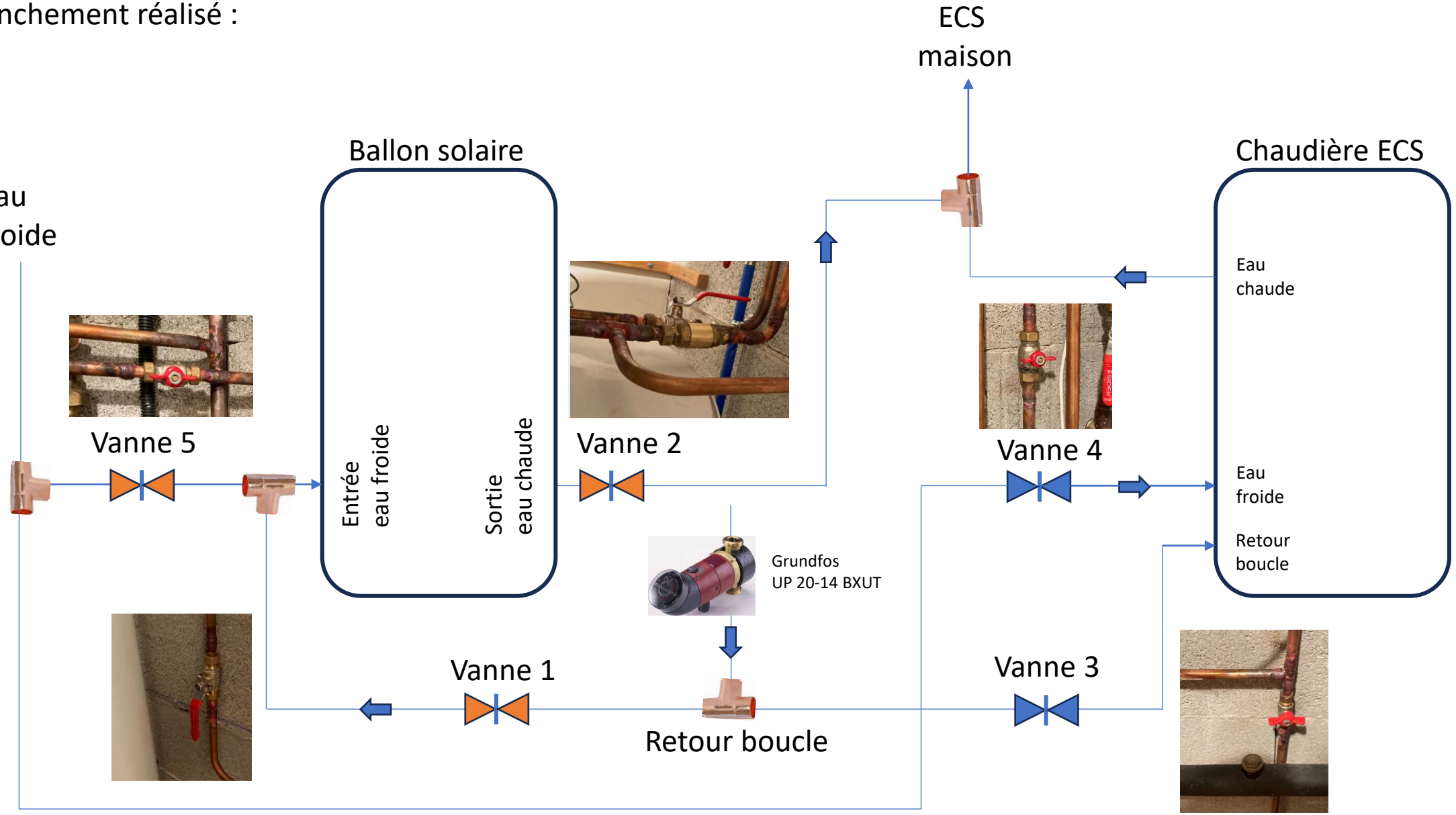


Le ballon sera posé à gauche, en série avec l'arrivée d'eau froide de la chaudière. Des vannes ¼ de tour me permettront de fonctionner exclusivement sur le ballon en été (chaudière à l'arrêt) puis de préchauffer l'eau sanitaire en hiver. Une boucle sanitaire est déjà là et il faut l'inclure dans le montage.

L'installation est terminée et le ballon reçoit le surplus d'énergie solaire. Malheureusement, compte tenu de la configuration très dense des tuyaux existants, il n'a pas été possible de brancher les ballons en série comme initialement souhaité. Ils sont montés en parallèle et indépendants l'un de l'autre : en été, le ballon électrique alimentera seul le circuit en eau chaude sanitaire (ECS) et, en hiver, il laissera la place à l'ECS de la chaudière. Il faudra veiller, à chaque remise en route de l'un ou l'autre ballon, de procéder à une montée temporaire de température supérieure ou égale à 60 °C afin de supprimer tout germe nocif de légionellose.

Le câble de la sonde PT1000 est guidé via des goulottes et le capot est posé sur le haut du ballon afin de masquer les diverses connexions électriques et hydrauliques. C’est fonctionnel !

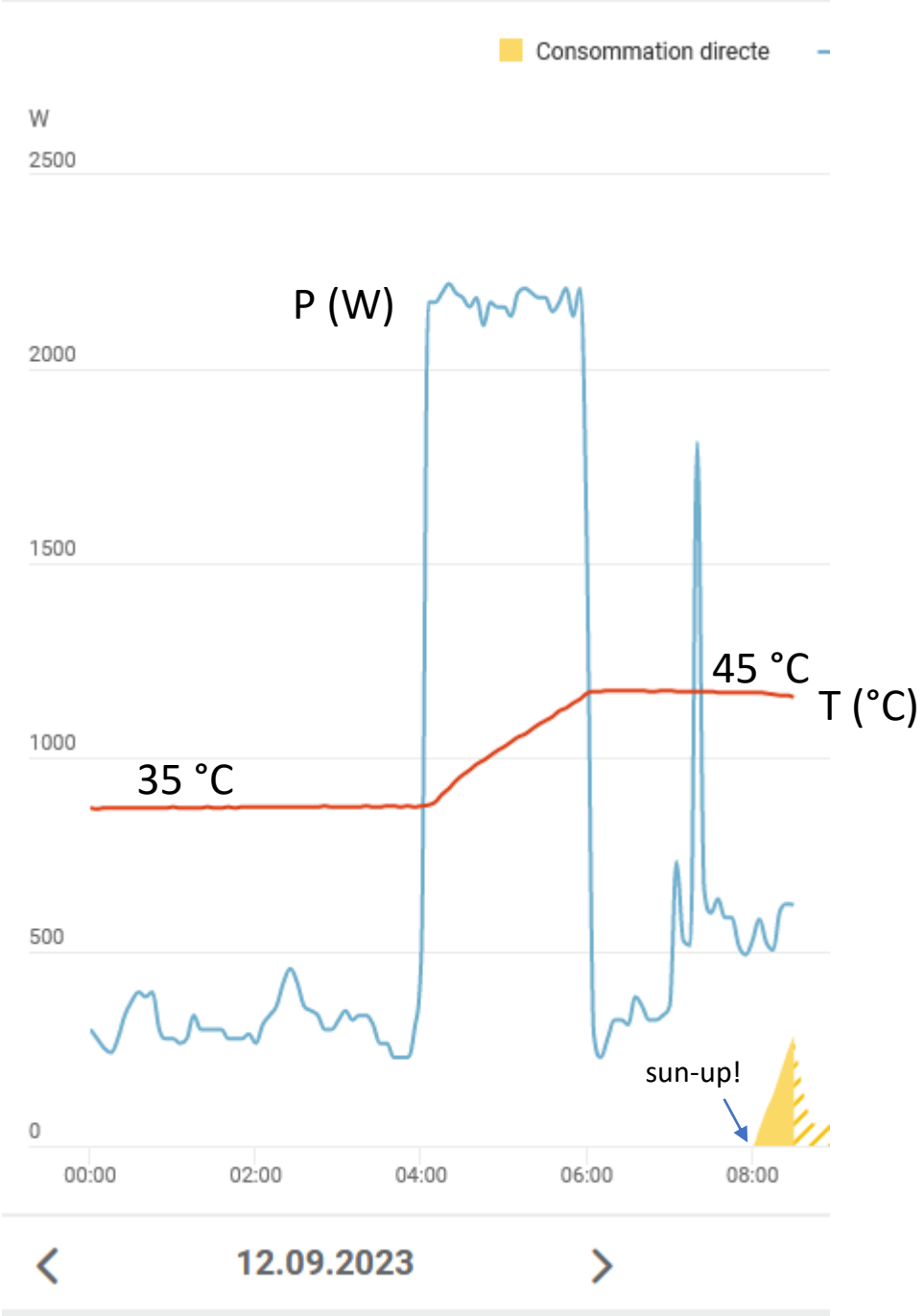
Branchement réalisé :



Eté : vannes 1, 2 & 5 ouvertes, vannes 3 & 4 fermées

Hiver : vannes 1, 2 & 5 fermées, vannes 3 & 4 ouvertes

Note : la pompe de boucle sanitaire possède son clapet

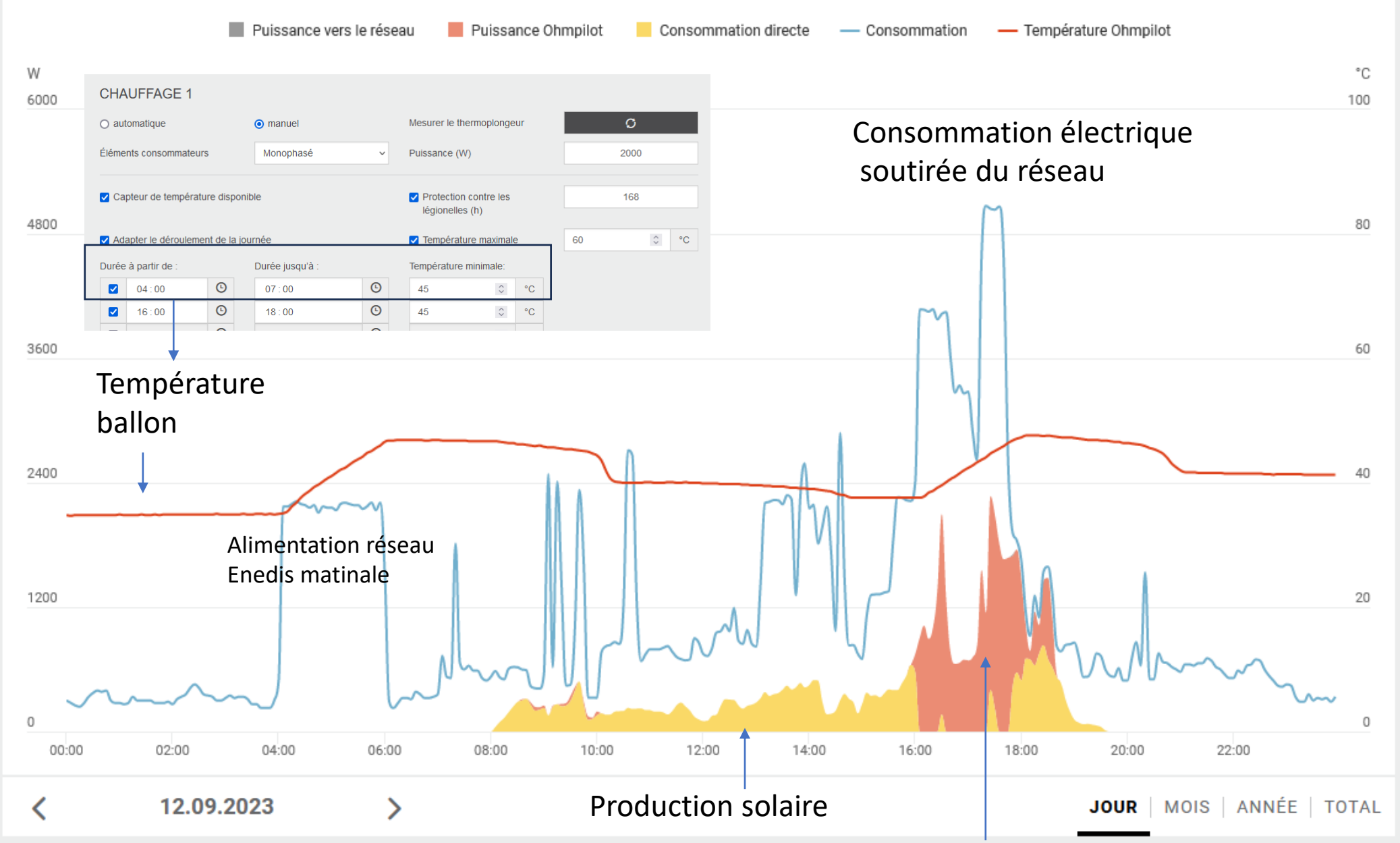


Le Ohmpilot s'est déclenché comme prévu cette nuit afin de monter la température à 45 °C. Elle était, à 4 h du matin, à 35 °C. La puissance étant de 2 kW, la consigne a été atteinte en 2 h, soit une énergie consommée de 4 kWh. Que disent les calculs ?

Pour élever un litre d'eau de 1 °C, il faut apporter une énergie de 1.162 wattheure. Ainsi, pour élever la température du ballon de 10°, sachant qu'il contient un volume de 300 litres, il faudra consacrer : 1.162 x 300 x 10 ≈ 3.5 kWh, on est dans les clous.

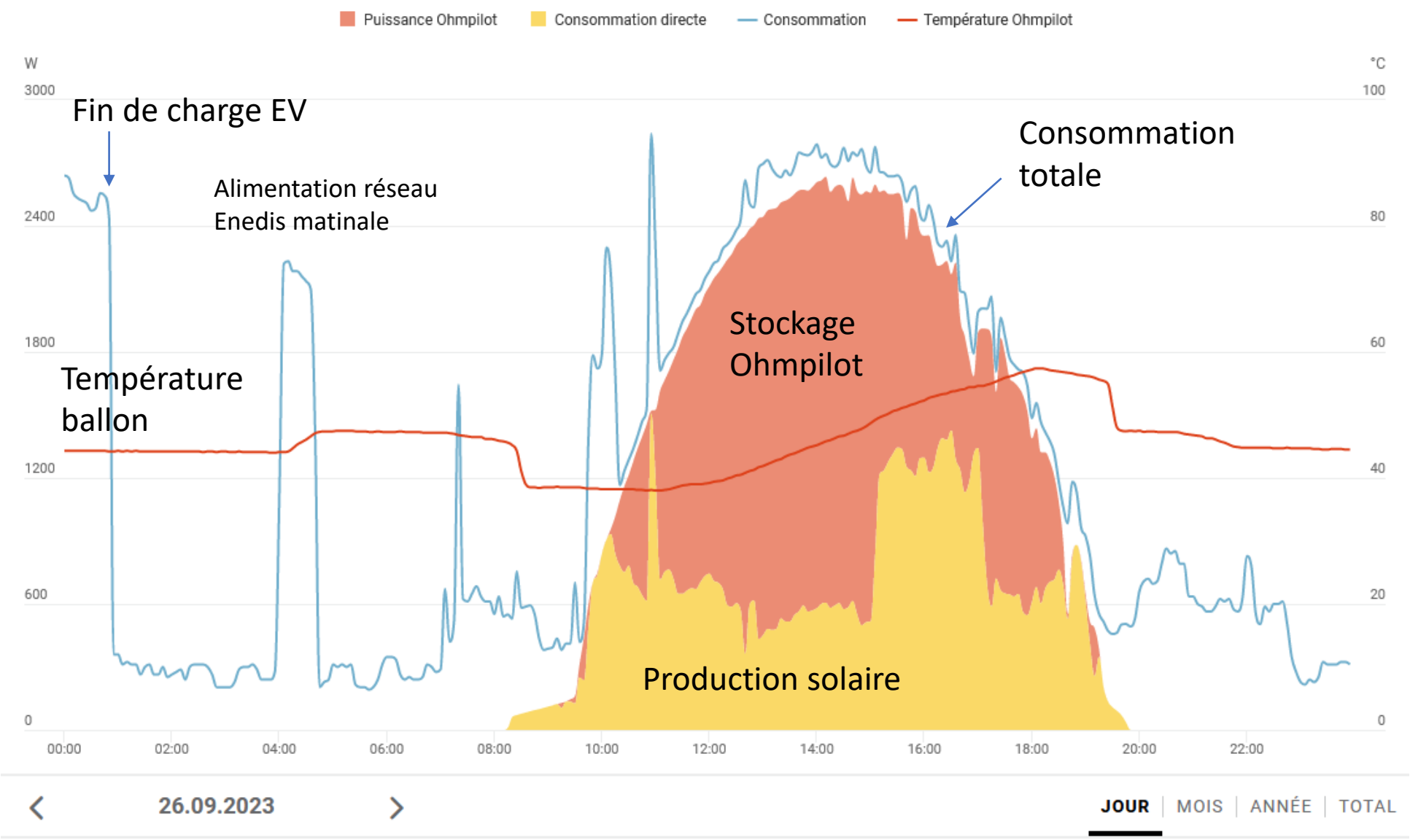
La mise en série des ballons, prévue à l'origine, aurait permis à la chaudière de réchauffer l'eau produite par le ballon électrique en hiver dont la température aurait été naturellement supérieure à celle du réseau de distribution (en supposant quelques wattheures d'énergie solaire disponibles). Compte tenu de la configuration retenue, je laisserai donc le ballon électrique coupé de novembre à mars et, ensuite, aux beaux jours, le ballon sera remis en service en baissant la consigne ECS de la chaudière à 10 °C. Le chauffage central sera toujours opérationnel mais la chaudière ne produira plus d'ECS par le gaz. Comme indiqué auparavant, toute remise en service du ballon sera précédée d'une montée en température temporaire à 65 °C afin d'éliminer tous les germes potentiels.

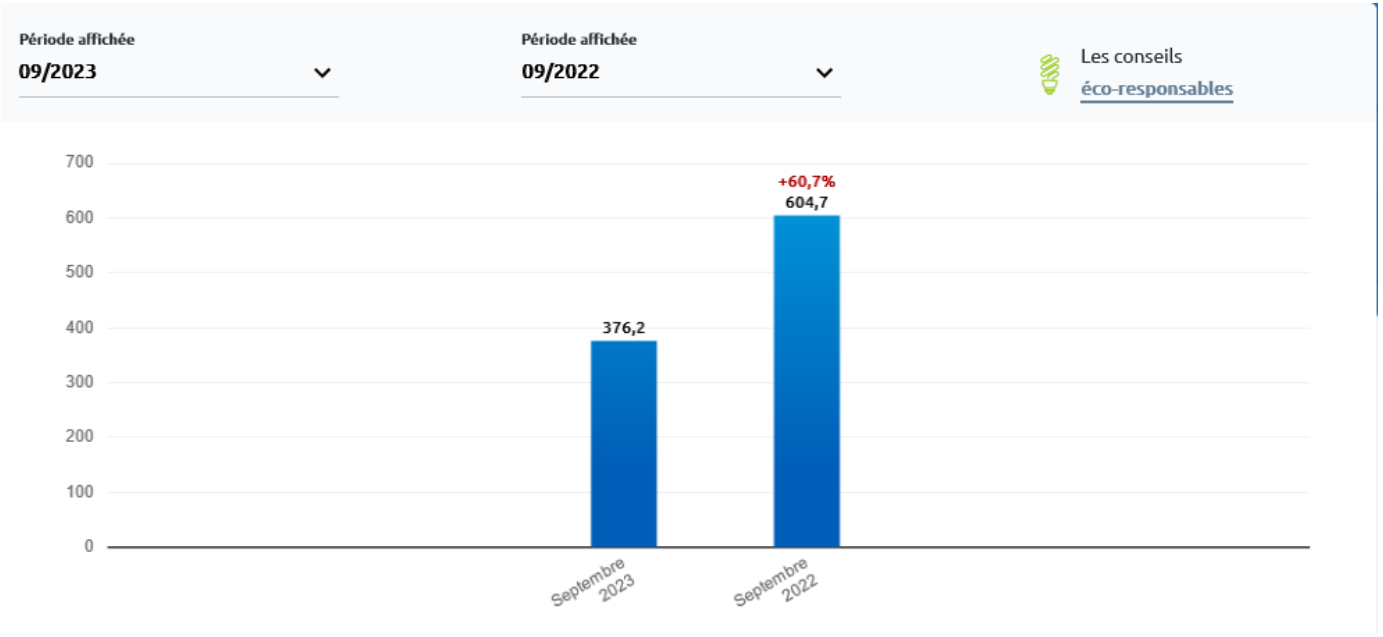
ECS : eau chaude sanitaire



Bilan d'une journée faiblement ensoleillée.

Courbe typique avec bon ensoleillement, 26 septembre 2023

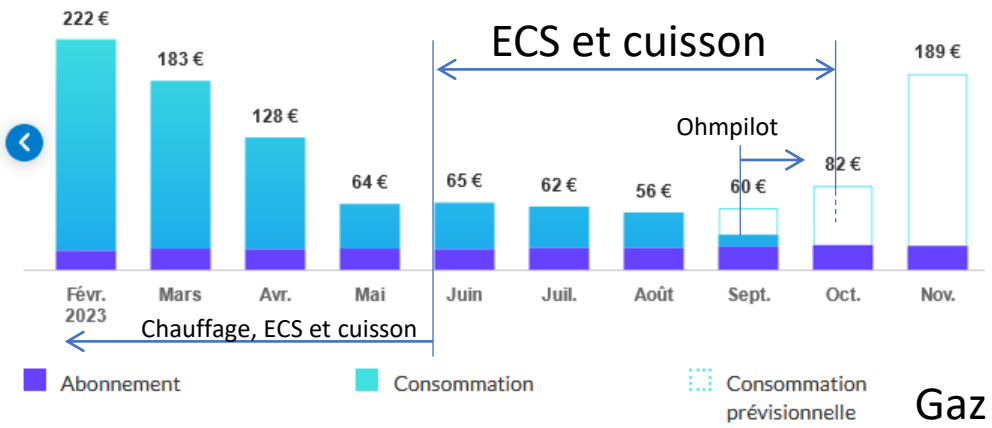




Economie d'électricité :
≈ 38% de réduction en kWh

Jour | Mois | Année | €TTC | kWh | m³ | + Température

Dernière mise à jour effectuée le 09/09/2023



Gaz

Démarrage Ohmpilot
le 11 septembre 2023
Coupure chaudière le 13 septembre

Zoom sur le mois de septembre

Prévision du 1 au 30 septembre 2023

-19% Bonne nouvelle, votre consommation est plus basse que l'an passé.