

# Filière Energie et techniques environnementales

Orientation Energies renouvelables

## Travail de bachelor Diplôme 2017

*Rémi Maillat*

*Pilotage d'un système PV & PAC  
optimisant l'autoconsommation*

-  *Professeur*  
Gilbert Morand
-  *Expert*  
Didier Baumgartner
-  *Date de la remise du rapport*  
18.08.2017



|   |   |  |
|---|---|--|
| Filière / Studiengang<br><b>ETE</b>   | Année académique / Studienjahr<br><b>2016/2017</b>  | No TD / Nr. DA<br><b>er/2017/74</b>  |
| Mandant / Auftraggeber<br><input type="checkbox"/> HES—SO Valais<br><input checked="" type="checkbox"/> Industrie<br><input type="checkbox"/> Etablissement partenaire<br><i>Partnerinstitution</i> | Etudiant / Student<br><b>Rémi Maillat</b><br><hr/> Professeur / Dozent<br><b>Gilbert Morand</b>                         | Lieu d'exécution / Ausführungsort<br><input checked="" type="checkbox"/> HES—SO Valais<br><input type="checkbox"/> Industrie<br><input type="checkbox"/> Etablissement partenaire<br><i>Partnerinstitution</i> |
| Travail confidentiel / vertrauliche Arbeit<br><input type="checkbox"/> oui / ja <sup>1</sup> <input checked="" type="checkbox"/> non / nein   | Expert / Experte (données complètes)<br><b>Didier Baumgartner</b><br>Mobile: 079 772 17 61 / Email: didier@eco6therm.ch |  |

|  |
|--|
| Titre / Titel<br><p style="text-align: center;"><b>Pilotage d'un système PV &amp; PAC optimisant l'autoconsommation</b></p>  |
| Description / Beschreibung<br><p>De plus en plus d'habitation ont recours à une pompe à chaleur pour chauffer le bâtiment en hiver et faire de l'eau chaude sanitaire tout au long de l'année.</p> <p>La baisse spectaculaire du coût du photovoltaïque a décidé un grand nombre de propriétaire de couvrir le toit de panneaux solaires et de faire fonctionner la pompe à chaleur avec l'électricité générée localement favorisant ainsi l'autoconsommation. L'ajout d'éléments de stockage électrique permet d'augmenter de manière significative la fraction d'autoconsommation.</p> <p>Le pilotage des différents composants devient de plus en plus complexe. Dans ce projet, il s'agit de mettre en place un système de pilotage, permettant de</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• piloter la pompe à chaleur en faussant la température extérieure,</li> <li>• stocker ou déstocker le contenu de la batterie,</li> <li>• stocker en supplément thermique dans la masse du bâtiment et dans l'eau chaude sanitaire sans réduire le confort des habitants.</li> </ul> <p>Il s'agira de tenir compte des paramètres à caractères aléatoires comme</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• la production de photovoltaïque,</li> <li>• la consommation d'électricité,</li> <li>• les besoins de chaleur.</li> </ul> <p>Les prix des énergies, fortement différents, en fonction des situations (vente ou achat) guident des stratégies qui permettent d'optimiser différentes grandeurs comme</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• l'autoconsommation,</li> <li>• le coût de l'énergie,</li> <li>• le confort.</li> </ul> <p>Le système qui sera développé tournera sur un « raspberry PI » ou un automate programmable, dans le cadre d'une habitation familiale du Jura disposant d'un toit solaire et d'une pompe à chaleur comme moyen de chauffage, ainsi que d'une certaine capacité de stockage électrique.</p> <p>Objectifs / Ziele</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Développer un système de pilotage qui par la gestion des charges d'une habitation optimise l'autoconsommation.</li> </ul> |

<sup>1</sup> Par sa signature, l'étudiant-e s'engage à respecter strictement la directive DI.1.2.02.07 liée au travail de diplôme.  
 Durch seine Unterschrift verpflichtet sich der/die Student/in, sich an die Richtlinie DI.1.2.02.07 der Diplomarbeit zu halten.

|  |  |
|--|--|
| <p>Signature ou visa / Unterschrift oder Visum</p> <p>Responsable de l'orientation / filière<br/>Leiter der Vertiefungsrichtung / Studiengang:</p> <p>.....</p> <p><sup>1</sup> Etudiant / Student :<br/>.....</p> | <p>Délais / Termine</p> <p>Attribution du thème / Ausgabe des Auftrags:<br/><b>15.05.2017</b></p> <p>Présentation intermédiaire / Zwischenpräsentation<br/><b>08 – 09.06.2017</b></p> <p>Remise du rapport / Abgabe des Schlussberichts:<br/><b>18.08.2017 / 12h00</b></p> <p>Expositions / Ausstellungen der Diplomarbeiten:<br/><b>30.08 – 31.08 – 01.09.2017</b></p> <p>Défense orale / Mündliche Verfechtung:<br/><b>Semaine 36 / Woche 36</b></p> |
|--|--|

## Pilotage d'un système PV et PAC optimisant l'autoconsommation

Diplômant/e Rémi Maillat

### Objectif du projet

Développer un système de gestion autonome permettant d'optimiser l'autoconsommation. Le système pilote la pompe à chaleur ainsi que le boiler en fonction des différents besoins thermiques et de la production photovoltaïque.

### Méthodes | Expériences | Résultats

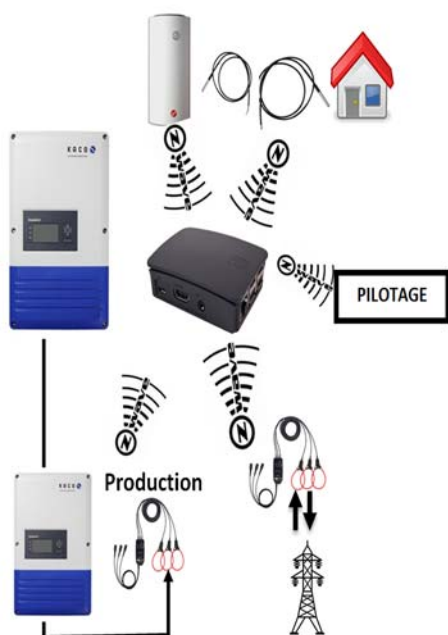
Suite à la réalisation d'une installation photovoltaïque sur la grange d'une maison familiale à Rebeuvelier (JU), le projet a pour but de piloter les charges flexibles afin de maximiser la part d'énergie autoconsommée.

Après avoir installé différents appareils de mesure et dispositifs de commande au sein de l'installation, un algorithme de gestion est utilisé afin de piloter les charges qui le permettent, soit la pompe à chaleur et le boiler. Ces deux consommateurs qui offrent une flexibilité d'utilisation sont désormais engagés dans le but de suivre au mieux le profil de la production photovoltaïque, sans porter atteinte au confort des habitants.

Une simulation de planification de la gestion des charges a été réalisée avant de mettre au point un réel système de gestion.

L'installation est désormais gérée par un algorithme utilisant des dispositifs communicants par Z-Wave aussi bien pour l'acquisition des mesures que pour la commande des différents appareils pilotés.

Les représentations graphiques démontrent à présent une corrélation entre la production et la consommation des producteurs de chaleur.



Travail de diplôme  
| édition 2017 |

#### Filière

Energie et techniques  
environnementales

#### Domaine d'application

Nouvelles énergies  
renouvelables

#### Professeur responsable

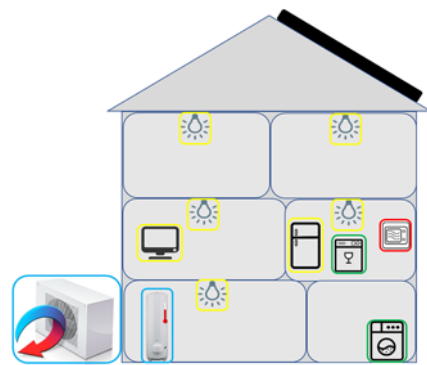
Gilbert Morand  
Gilbert.morand@hevs.ch

#### Partenaire

Eco6therm Sàrl



Pose du dernier module photovoltaïque de l'installation composée de 96 modules pour une puissance installée de 20kWc



Représentation des éléments de l'installation.

Les éléments pilotés sont les producteurs de chaleur (boiler et PAC) entourés en bleu.

## Table des matières

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introduction .....</b>                                      | <b>2</b>  |
| 1.1      | Contexte et enjeux.....  | 2         |
| 1.2      | Cas de l'étude .....   | 4         |
| <b>2</b> | <b>Installation .....</b>                                      | <b>5</b>  |
| 2.1      | Installation électrique .....                                  | 5         |
| 2.2      | Modélisation des différents organes .....                      | 8         |
|          | Maison .....   | 8         |
|          | Toiture photovoltaïque.....                                    | 12        |
|          | Eau chaude sanitaire.....                                      | 13        |
| <b>3</b> | <b>Simulation d'un algorithme de gestion des charges .....</b> | <b>14</b> |
| 3.1      | Eléments pris en compte .....                                  | 14        |
|          | Production solaire.....  | 14        |
|          | Besoins électriques « classiques » .....                       | 14        |
|          | Besoins thermiques .....                                       | 14        |
|          | Coefficients de performances PAC .....                         | 15        |
|          | Température intérieure .....                                   | 15        |
|          | Eau chaude sanitaire.....                                      | 15        |
|          | Tarif électricité .....  | 15        |
| 3.2      | Préparation des données .....                                  | 16        |
| 3.3      | Elaboration de l'algorithme.....                               | 17        |
|          | Fonction de coût.....  | 17        |
|          | Mise en forme Excel .....                                      | 19        |
|          | Exemples de régulation .....                                   | 21        |
| <b>4</b> | <b>Mesure et commande .....</b>                                | <b>23</b> |
| 4.1      | Schéma de principe.....  | 23        |
| 4.2      | Communication .....  | 24        |
| 4.3      | Appareils utilisés.....  | 25        |
|          | Mesures .....  | 25        |
|          | Commande .....   | 26        |
| 4.4      | Acquisition de données & commande par Z-Wave .....             | 31        |
|          | Acquisition .....  | 31        |
|          | Commande .....   | 33        |
| <b>5</b> | <b>Optimisation et pilotage.....</b>                           | <b>34</b> |

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>5.1</b> | <b>Programme d'optimisation « basique »</b>               | <b>34</b> |
|            | Mise en place   | 34        |
|            | Corps de chauffe  | 35        |
|            | Pompe à chaleur   | 36        |
|            | Résultats   | 36        |
|            | Programme d'optimisation « futur »                        | 40        |
| <b>6</b>   | <b>Conclusion</b>   | <b>42</b> |
| <b>7</b>   | <b>Remerciements</b>                                      | <b>43</b> |
| <b>8</b>   | <b>Bibliographie</b>                                      | <b>44</b> |
| <b>9</b>   | <b>Annexes</b>  | <b>45</b> |
| 9.1        | Annexe 1 : Utilisation domoticVisu                        | 45        |
| 9.2        | Annexe 2 : Utilisation watchMe                            | 50        |
| 9.3        | Annexe 3 : Codes VBA Excel                                | 52        |
| 9.4        | Annexe 4 : Documents Excel algorithme d'optimisation      | 54        |
| 9.5        | Annexe 5 : Codes et librairies Qt Creator                 | 54        |
| 9.6        | Annexe 6 : Montage vidéo de l'installation photovoltaïque | 54        |
| 9.7        | Annexe 7 : Fichiers modélisation BSol (maison&toiture)    | 54        |

# 1 Introduction

## 1.1 Contexte et enjeux

La production d'électricité en Suisse provient actuellement en grande partie de l'hydroélectricité. Cependant, près d'un tiers de la production provient encore de sources nucléaires. Suite à l'accident nucléaire de Fukushima, le conseil fédéral a annoncé en mai 2011 sa volonté de participer à une sortie programmée du nucléaire. De plus, en mai 2017, le peuple suisse a accepté sa participation à la stratégie énergétique 2050. Cette stratégie a pour but de minimiser l'impact environnemental lié à la consommation d'énergie en Suisse. Pour atteindre les objectifs souhaités, la promotion des énergies renouvelables a été lancée par la confédération et comprend, entre autres, des subventions aux particuliers pour l'installation de panneaux photovoltaïques.

Le volume de nouvelles installations ne cessant d'augmenter a non seulement mené à une baisse du prix lié à l'investissement lors de la réalisation d'installations, mais également à une baisse des subventions ainsi qu'à une baisse du prix de rachat de l'énergie par les gestionnaires de réseaux. Alors que le prix d'achat d'électricité est en moyenne de 20 à 30cts/kWh dans le Jura (Figure 1-1), le prix de rachat est de seulement 4cts/kWh (sans subventions).

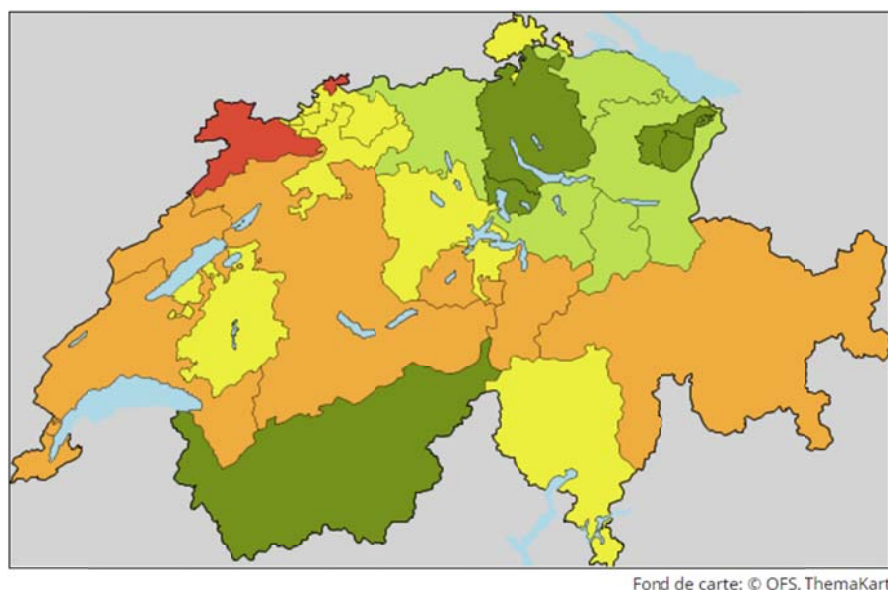
Le tableau de tarifs de l'électricité suivant relève les différents tarifs selon les abonnements proposés par le gestionnaire FMB/BKW.

|  | CHF/an       |             | ct./kWh             |             |                    |             | ct./kWh             |             |                    |             | ct./kWh             |             |                    |             |
|--|--------------|-------------|---------------------|-------------|--------------------|-------------|---------------------|-------------|--------------------|-------------|---------------------|-------------|--------------------|-------------|
|  |              |             | Energy Green        |             |                    |             | Energy Blue         |             |                    |             | Energy Grey         |             |                    |             |
|  | Prix de base |             | Haut tarif (7-21 h) |             | Bas tarif (21-7 h) |             | Haut tarif (7-21 h) |             | Bas tarif (21-7 h) |             | Haut tarif (7-21 h) |             | Bas tarif (21-7 h) |             |
|  | hors TVA     | TVA incluse | hors TVA            | TVA incluse | hors TVA           | TVA incluse | hors TVA            | TVA incluse | hors TVA           | TVA incluse | hors TVA            | TVA incluse | hors TVA           | TVA incluse |
| <b>Energie</b>                           |              |             |                     |             |                    |             |                     |             |                    |             |                     |             |                    |             |
| Prix travail                             |              |             | 14,00               | 15,12       | 10,45              | 11,29       | 11,50               | 12,42       | 7,95               | 8,59        | 10,50               | 11,34       | 6,95               | 7,51        |
| <b>Utilisation du réseau</b>             |              |             |                     |             |                    |             |                     |             |                    |             |                     |             |                    |             |
| Utilisation du réseau BT DT              | 114,00       | 123,12      | 12,20               | 13,18       | 6,10               | 6,59        | 12,20               | 13,18       | 6,10               | 6,59        | 12,20               | 13,18       | 6,10               | 6,59        |
| Services-système de Swissgrid            |              |             | 0,40                | 0,43        | 0,40               | 0,43        | 0,40                | 0,43        | 0,40               | 0,43        | 0,40                | 0,43        | 0,40               | 0,43        |
| <b>Taxes et redevances</b>               |              |             |                     |             |                    |             |                     |             |                    |             |                     |             |                    |             |
| Taxe d'encouragement légale <sup>1</sup> |              |             | 1,50                | 1,62        | 1,50               | 1,62        | 1,50                | 1,62        | 1,50               | 1,62        | 1,50                | 1,62        | 1,50               | 1,62        |
| Redevances communales <sup>2</sup>       |              |             | 1,50                | 1,62        | 1,50               | 1,62        | 1,50                | 1,62        | 1,50               | 1,62        | 1,50                | 1,62        | 1,50               | 1,62        |
| <b>Total</b>                             |              |             | 29,60               | 31,97       | 19,95              | 21,55       | 27,10               | 29,27       | 17,45              | 18,85       | 26,10               | 28,19       | 16,45              | 17,77       |

Figure 1-1. Tarifs électricité BKW/FMB 2017.



La carte suivante (Figure 1-2) illustre les différences entre les tarifs d'électricité selon les régions de Suisse. Le Jura se démarque des autres cantons en ayant un tarif d'achat supérieur à 19.42 cts/kWh.



Comparaison tarifaire en cent./kWh: Catégorie H7, Prix total pour l'année 2017 ?

■ < 14.36   ■ 14.36 - 16.05   ■ 16.05 - 17.73   ■ 17.73 - 19.42   ■ > 19.42

Figure 1-2 Coûts électricité en Suisse ([www.elcom.ch](http://www.elcom.ch)), pour des consommateurs de type H7, soit une habitation ayant une consommation inférieure à 13'000kWh/an

Si les consommateurs jurassiens clients des forces motrices bernoises sont relativement défavorisés à l'achat de l'électricité comparativement aux cantons voisins, les producteurs privés d'électricité sont, eux aussi relativement défavorisés. La carte suivante (Figure 1-3) représente la tarification de rachat de l'énergie photovoltaïque selon la situation géographique :

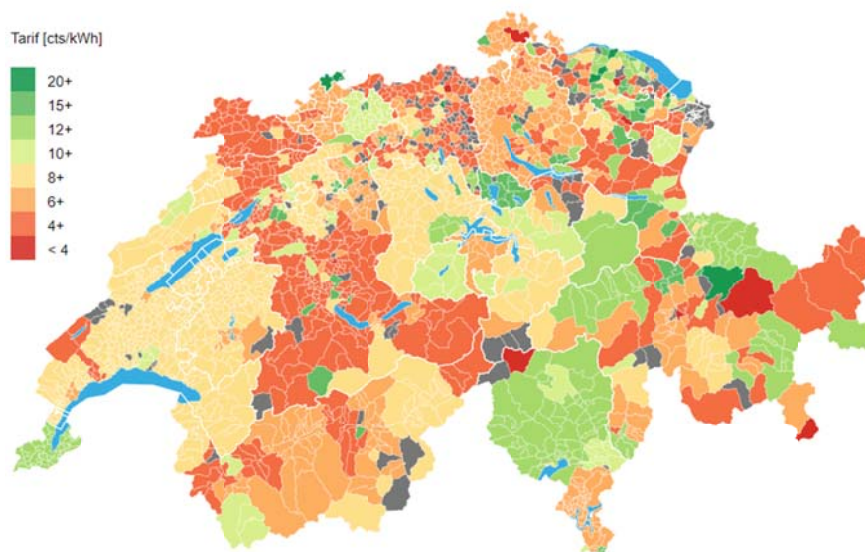


Figure 1-3 Prix de rachat/kWh pour les communes suisses ([www.vese.ch](http://www.vese.ch)).

Sachant que le prix d'achat ne varie que très peu et reste élevé tandis que le prix de rachat devient de plus en plus bas, il devient toujours plus intéressant d'autoconsommer un maximum de sa production. La fraction d'autoconsommation est la part d'électricité produite qui est utilisée sur le site même de production. De plus, c'est principalement pendant les heures de haute tarification des fournisseurs d'électricité que la production photovoltaïque est la plus importante. 1 kWh consommé coûte donc plus de 20 cts de moins s'il est autoproduit que s'il provient du réseau.

Afin d'autoconsommer au maximum, une solution est de mettre en place un système intégré intelligent qui permet de gérer les consommateurs pilotables afin de mettre en équation la consommation avec la production. S'il existe déjà actuellement des systèmes permettant de gérer certains consommateurs, ce type d'application n'en est encore qu'à ses débuts. Dans ce projet, nous avons créé un modèle intégrant une multitude de paramètres permettant de connaître toutes les influences extérieures au système afin de le piloter au mieux.

## 1.2 Cas de l'étude

Pour une installation d'une maison familiale située à La Sarasine 3, dans le village jurassien de Rebeuvelier, comportant une production photovoltaïque (PV), une pompe à chaleur (PAC), un boiler électrique ainsi que différents consommateurs, il s'agira de mettre au point des dispositifs de gestion des charges ainsi que de communication afin de, par la suite, élaborer un algorithme de gestion intelligent ayant pour but de maximiser la part d'autoconsommation.

La production photovoltaïque, le tarif de l'électricité, les besoins thermiques du bâtiment ainsi que de l'eau chaude sanitaire, les prévisions météorologiques comportant les prévisions de gains solaires ainsi que les coefficients de performance (COP) de la PAC en fonction de la température extérieure sont les éléments à prendre en compte pour une planification de gestion des charges optimale.

## 2 Installation

### 2.1 Installation électrique

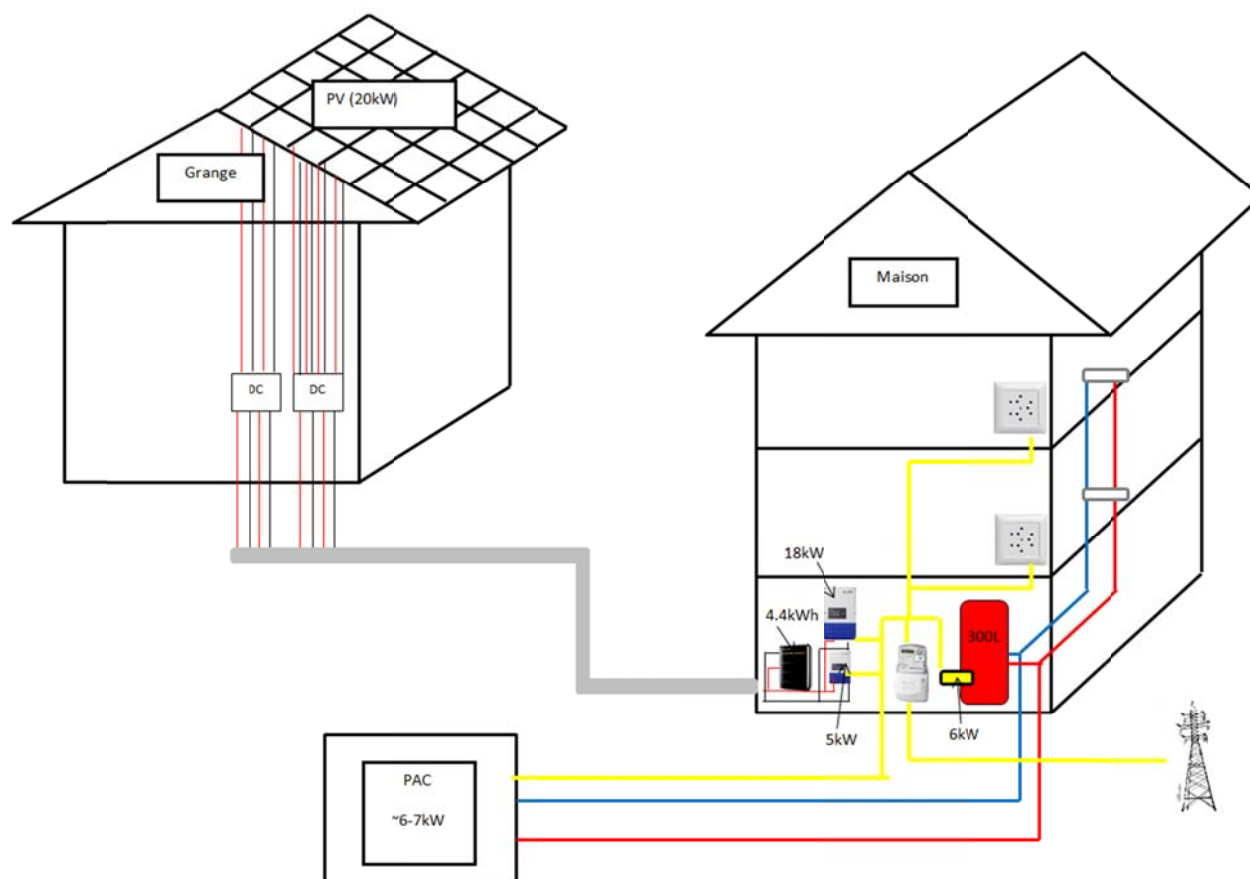


Figure 2-1 Schéma général de l'installation.

L'installation de production photovoltaïque est composée de 96 modules monocristallins d'une puissance de 205Wc chacun (Figure 2-1). Le montage vidéo de l'installation sur la toiture est visible en annexe (Annexe 6). Ils sont répartis sur la toiture en 6 strings (chaînes de modules) dont deux composées de 14 modules et 4 composées de 17 modules. Les deux strings de 14 modules passent uniquement dans le boîtier DC afin d'assurer les aspects sécuritaires et de pouvoir couper l'alimentation DC. L'une des deux strings est connectée à la batterie en sortie du boîtier DC pour finalement être connectée sur l'une des deux entrées de l'onduleur de 5kW avec l'autre string de 14 modules. Les 4 dernières strings passent par le deuxième boîtier DC avant d'être mises en parallèle afin de ne ressortir qu'en deux strings différentes connectées chacune sur une entrée de l'onduleur de 18kW. Le courant alternatif est ensuite distribué sur les différents consommateurs de la maison avant d'être, en cas de surplus, réinjecté sur le réseau électrique des forces motrices bernoises (FMB).

L'installation étant fraîchement réalisée et le réseau actuel n'étant pas encore prêt à accueillir une puissance de réinjection de 20kW, l'onduleur principal a été « bridé » provisoirement à une puissance de 10kW afin d'obtenir, les deux onduleurs réunis, une puissance totale maximale de 15kW acceptée par le gestionnaire. L'onduleur fonctionnera à pleine puissance aussitôt que la ligne jusqu'à la sous-station la plus proche aura été renforcée.

Comme il est possible de le voir sur le schéma ci-dessus (Figure 2-1), la batterie est branchée sur le courant continu, avant l'arrivée du courant vers les onduleurs. La mesure de la puissance de production est réalisée à la mise en commun des deux sorties du courant alternatif des onduleurs. En cas de surproduction, si la puissance de charge est à son maximum, soit 1.5kW, la puissance de production mesurée sera donc 1.5kW inférieure à sa réelle valeur de production. Dans le cas inverse, si la production est faible ou nulle et que la consommation est élevée, une mesure de production de 1.5kW, découlant de la décharge de la batterie, pourra être observée en sortie des onduleurs.

La batterie possède son propre système de gestion autonome de charge et décharge, c'est pourquoi elle n'est pas directement prise en compte dans le programme de gestion.

Si certains consommateurs tolèrent une gestion flexible des charges, ce n'est malheureusement pas le cas pour tous les consommateurs. Qui dit manque de lumière dit manque de production photovoltaïque. En effet, on allume les lampes la plupart du temps quand il fait sombre et que la production photovoltaïque est faible, peut-être même nulle. Même si l'utilisation des appareils ménagers (four, plaques, etc.) peut être réfléchi en fonction de la production journalière, il arrive régulièrement que l'on cuisine lorsque la production est nulle. Le schéma suivant tente d'illustrer quels consommateurs acceptent une gestion des charges et dans quelles mesures elle peut être automatisée :

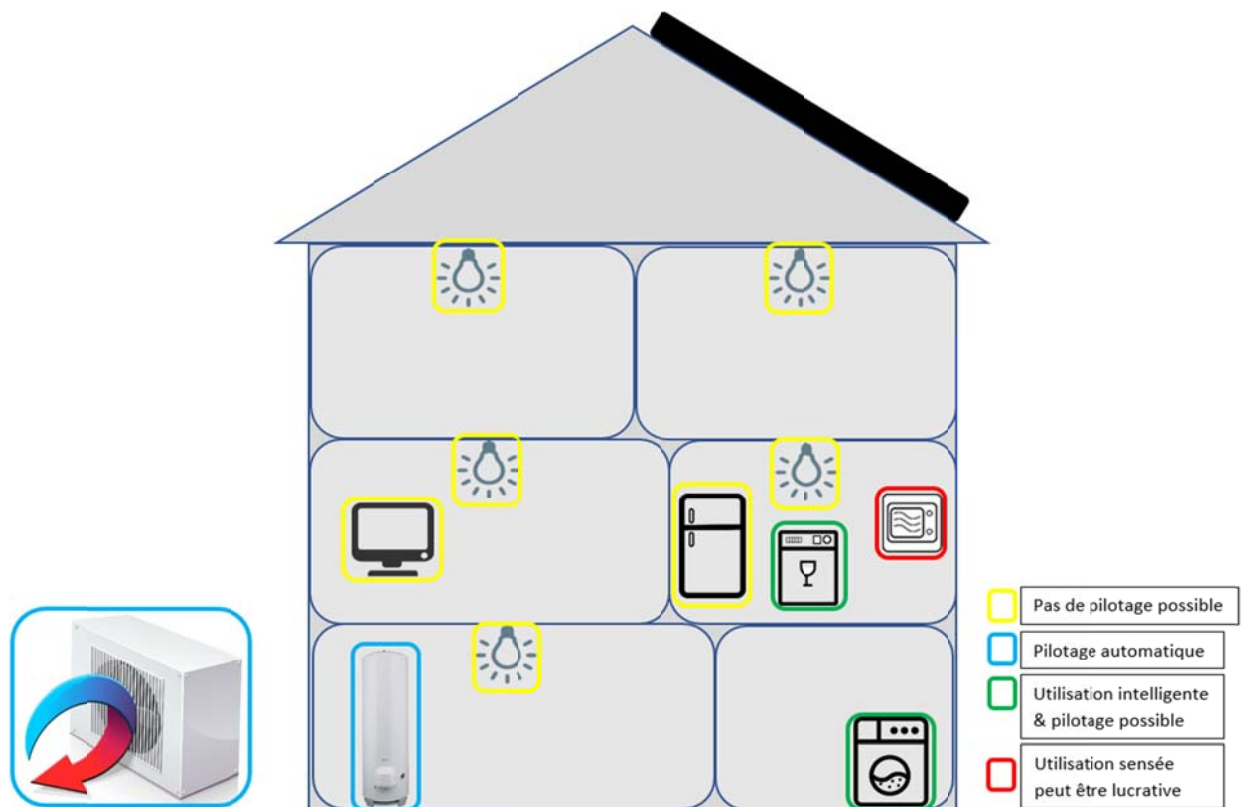


Figure 2-2. Flexibilité des charges au sein de la maison.

Comme illustré ci-dessus (Figure 2-2), les seuls appareils pouvant être pilotés sans problème de manière totalement automatisée sont les producteurs de chaleur (boiler et PAC). Par manque d'informations techniques et dans l'optique de comprendre et d'anticiper les comportements de ces deux producteurs de chaleur, certains tests et mesures ont été

réalisés. Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un « compteur » électrique triphasé de la marque PEL branché comme illustré ci-dessous (Figure 2-3).



Figure 2-3. Acquisition de données de consommation électrique.

L'eau chaude sanitaire, dont la température maximale souhaitée est d'environ 60 degrés, est produite par un simple corps de chauffe électrique pouvant être enclenché/déclenché selon envie. Les mesures réalisées ont relevé que la puissance du corps de chauffe électrique est d'environ 6kW d'alimentation triphasée. La pompe à chaleur est un dispositif relativement plus complexe car, une fois en route, elle ne peut s'arrêter avant que la totalité de son cycle ait été réalisé. Un branchement spécial uniquement sur l'alimentation triphasée de la PAC a permis de relever que le temps d'un cycle avoisine les 15 minutes et sa puissance électrique utile à son fonctionnement est d'environ 6-7kW. Trois cycles de mise en route ont été représentés graphiquement (Figure 2-4).

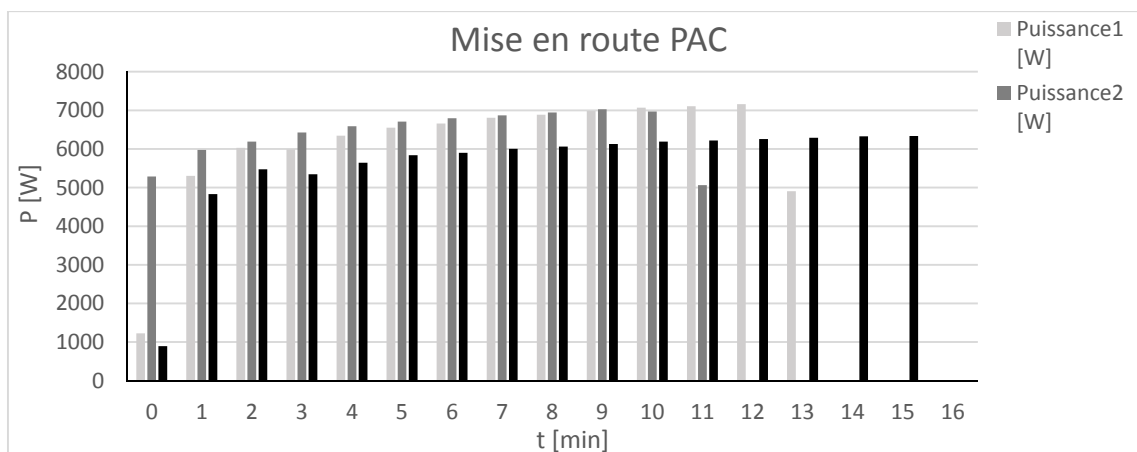


Figure 2-4. Cycles PAC mesurés au domicile de la Sarasine 3.



## 2.2 Modélisation des différents organes

### Maison

La totalité de la maison a été modélisée sur le programme BSol (programme développé par Physeos SA) en suivant les plans de construction de la maison. Les éléments de l'enveloppe, les masses de stockage thermique et les surfaces vitrées comportant leurs ombrages ont été introduits dans le logiciel comme suit.

### Projet

La modélisation débute en inscrivant les informations générales du projet (Figure 2-5).

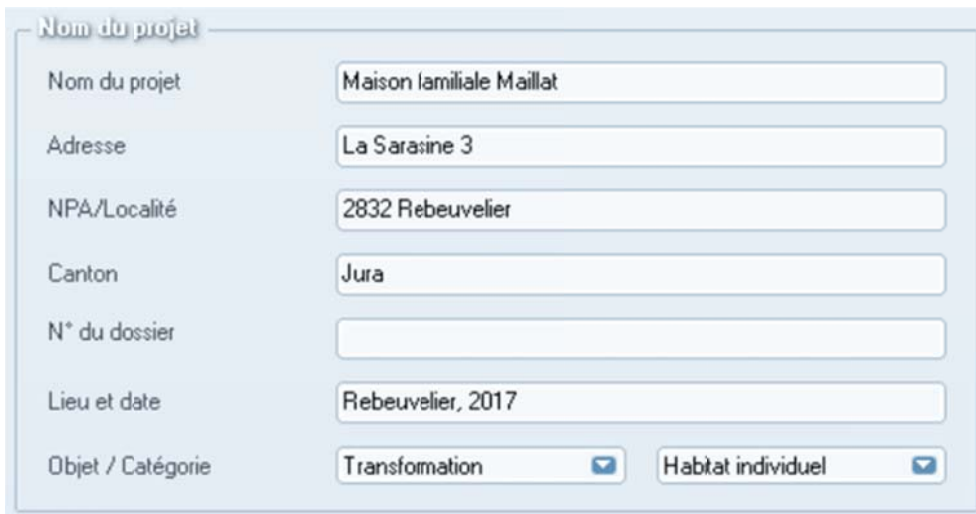


Figure 2-5. Fenêtre d'initialisation de projet BSol (Projet).

### Bâtiment

L'étape suivante est la modélisation technique de tous les éléments, l'orientation, les ombrages, les contacts avec le sol ou l'air extérieur etc. Une fois la SRE (surface de référence énergétique) spécifiée, les éléments de l'enveloppe ainsi que les masses de stockage thermique du bâtiment sont introduits à la modélisation de la manière suivante (Figure 2-6 à Figure 2-9) :

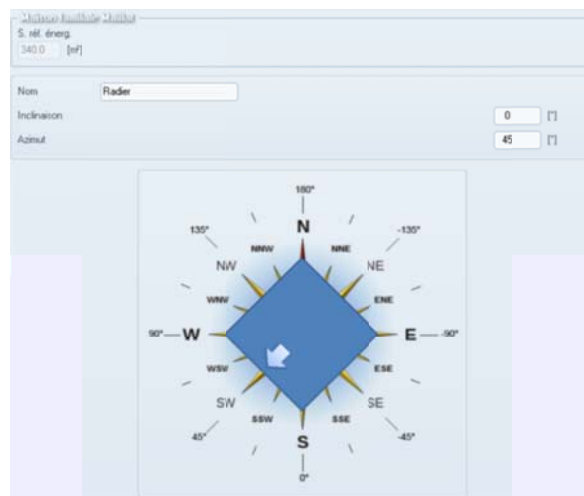


Figure 2-6. BSol (orientation radier).

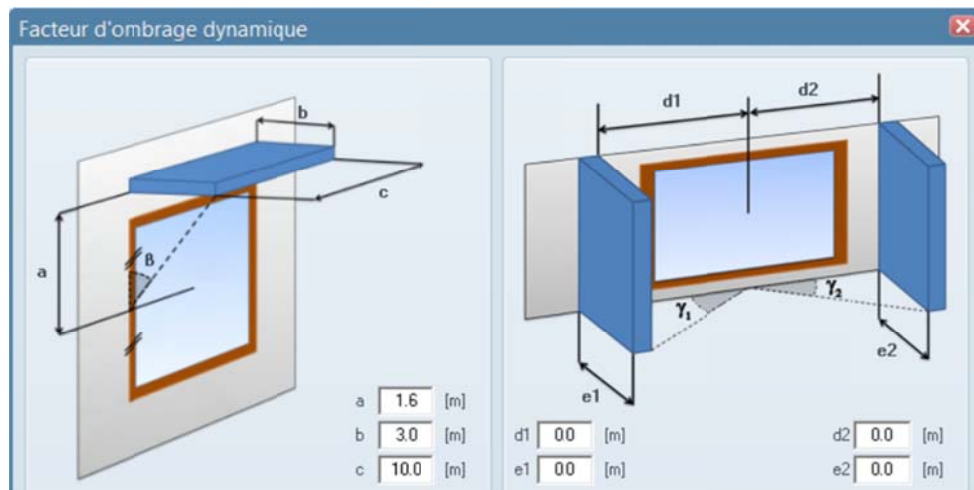


Figure 2-7. BSol (Ombrage terrasse couverte).



Figure 2-8. BSol (éléments masse).

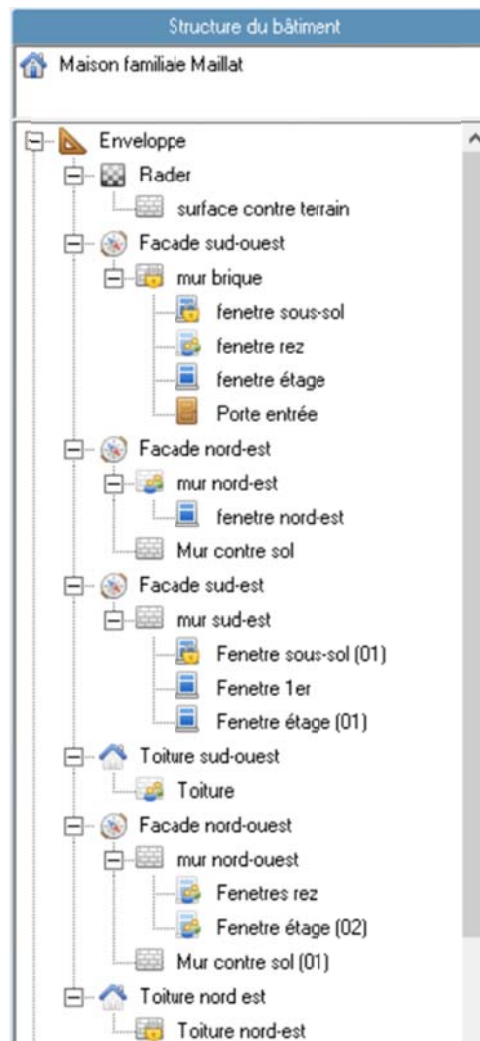


Figure 2-9. BSol (éléments enveloppe).

### Exploitation

Les éléments à introduire dans le modèle, dans la partie « exploitation », sont les apports thermiques résultants des personnes présentes, des appareils ayant des rejets thermiques quelconques ainsi que l'aération moyenne. Prenant un apport thermique de 70W par personne et 4 personnes présentes dans la maison, la puissance surfacique moyenne est d'environ  $0,8\text{W/m}^2$ . L'apport thermique provenant des appareils a été estimé et le renouvellement de l'air est tiré de l'aération moyenne pour une maison qui n'est pas équipée d'un système de ventilation contrôlée (Figure 2-10).



Catégorie

Type de bâtiment: Habitat individuel

Appliquer les consignes: ↓

---

Habitat individuel

Charges internes (personnes): 0.8 [W/m²]

Charges internes (appareils): 0.5 [W/m²]

Aération avec l'extérieur: 0.7 [m³/h m²]

☐ Récupérateur de chaleur sur l'air extrait

☐ Rafraîchissement par aération

---

Occultation des fenêtres:

☐ En fonction de la température (surchauffe)

☐ En fonction du rayonnement (éblouissement)

---

☒ Chauffage: 20 [°C]

Limitation Puissance: 10.0 [W/m²]

Figure 2-10. BSol (exploitation).

### Météo/horizon

Afin de réaliser des simulations de scénarios au plus proches de la réalité, les données météorologiques de Rebeuvelier, composées des températures, de l'irradiance ainsi que de l'horizon pour une année « type » ont été importées depuis la base de données « Meteonorm » :

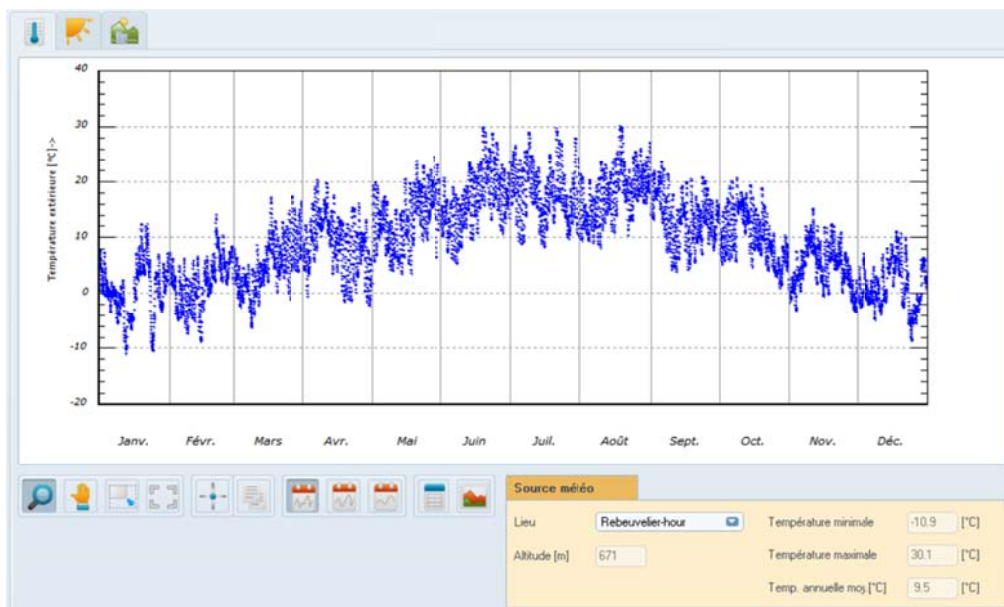


Figure 2-11. BSol (météo/horizon).

## Résultats

Les résultats de la modélisation apportent finalement une prédiction des comportements thermiques de la maison tout au long de l'année type ainsi que les éventuels risques de températures trop basses ou trop élevées (Figure 2-12).

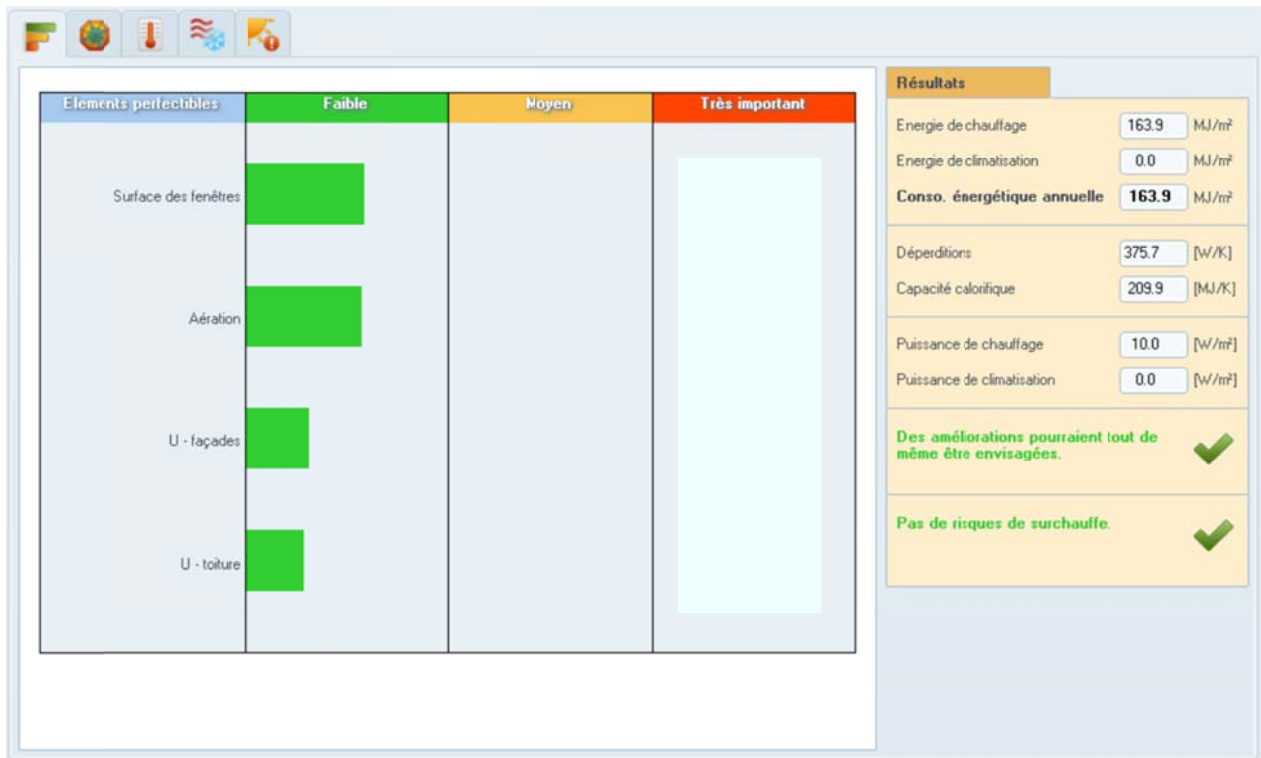


Figure 2-12. BSol (résultats).

## Toiture photovoltaïque

La simulation de production photovoltaïque est également réalisée à l'aide du logiciel BSol. Ce programme n'étant pas directement conçu pour ce type d'utilisation, la production est représentée par une surface vitrée identique à celle des modules photovoltaïques et le rendement des panneaux (16%) est représenté par le pourcentage de quote-part vitrée (Figure 2-13).

Propriétés de l'élément

**Toiture Photovoltaïque 1...**  
 S. réf. énerg.  
 130.0 [m²]

**Strangé**  
 Superficie brute  
 105.0 [m²]  
 Superficie nette  
 -15.0 [m²]  
 Azimut  
 62 [°]  
 Inclinaison  
 24 [°]

**Toiture**  
 Superficie brute  
 105.0 [m²]  
 Superficie nette  
 -15.0 [m²]  
 En contact avec  
 Air extérieur

Nom  
 Photovoltaïque 120m2  
 Surface  
☐ Longueur x Largeur (Hauteur)  
 Nombre  
 Quote-part vitrée  
 F. ombrage  
☐ Facteur d'ombrage dynamique  
 Chauffage  
☐ Chauffage en applique

120.0 [m²]  
 1 [-]  
 16 [%]  
 0 [%]

Composition / U  
 Entrée par l'utilisateur

Vitrage  
 Ug 0.0 [W/m²·K]  
 g 1.0 [0...1]  
 Cadre  
 Uf 0.0 [W/m²·K]  
 Intercalaire  
 psi 0.0 [W/m·K]  
 L 0.0 [m]  
 Occultation  
 g 1.0 [0...1]

Transmission  
 0.0 [W/K]

Figure 2-13. BSol (toiture PV).

## Eau chaude sanitaire

Les besoins thermiques utiles à la fabrication d'eau chaude sanitaire sont calculés en tenant compte des consommations moyennes Suisse, soit 50 litres d'eau à 60°C par personne et par jour, et la formule de transfert de quantité de chaleur :

$$E = m * c * \Delta T,$$

$E$  = énergie,  $m$  = masse,  $c$  = capacité calorifique de l'eau,  $T$  = température

Pour 4 personnes en moyenne et une température d'arrivée de l'eau moyenne annuelle de 10°C :

$$m = 200 \text{ [kg]}$$

$$c = 4185 \text{ [J/kg]}$$

$$\Delta T = 60^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C} = 333\text{K} - 283\text{K} = 50 \text{ K}$$

$$E = 200 \text{ kg} * 4185 \frac{\text{J}}{\text{kg}} * 50 \text{ K} = 11.6\text{kWh}$$

### 3 Simulation d'un algorithme de gestion des charges

L'algorithme de gestion des charges en fonction des différentes entrées et différents paramètres ainsi que les diverses simulations ont été élaborés avec le logiciel Excel en utilisant les résultats de modélisations (Chapitre 2) pour une même année de référence.

#### 3.1 Eléments pris en compte

##### Production solaire

Les données utilisées afin de prédire les productions d'électricité solaire sont tirées des résultats de la simulation BSol de la surface vitrée de 120m<sup>2</sup> ayant la même situation et la même orientation que la centrale photovoltaïque réelle. Une série de modules étant connectée à la batterie avant de passer par l'onduleur, deux simulations ont été réalisées séparément afin de connaître, en temps réel, la capacité et les puissances de charge et de décharge disponibles. La surface totale de 120m<sup>2</sup> a alors été divisée en deux surfaces, une de 102m<sup>2</sup> n'étant pas connectée à la batterie et une de 18m<sup>2</sup> qui elle l'est.

##### Besoins électriques « classiques »

La base de la consommation électrique, autrement dit la consommation ne permettant pas un pilotage des charges comme l'électroménager, la lumière, la télévision, l'outillage etc. a été mesurée à l'aide de l'appareil de mesure PEL afin d'établir une moyenne de consommation type sur une semaine (Figure 3-1). Ces valeurs de consommation par jour n'offrant pas ou peu de flexibilité sont alors considérées comme fixes dans la simulation de l'algorithme de gestion.

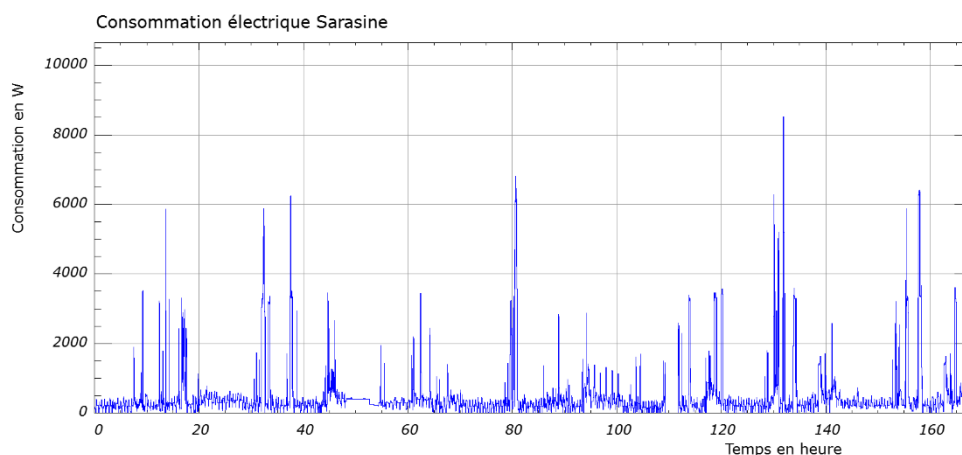


Figure 3-1 Mesure consommation Sarasine sur une semaine

##### Besoins thermiques

Les simulations BSol de la toiture photovoltaïque ainsi que de la maison étant réalisées pour une même année type, tous les éléments peuvent être déterminés. Si le résultat de la simulation de la toiture donne les prévisions de production électrique, la simulation de la maison familiale détermine les besoins thermiques. Les besoins thermiques résultants de la simulation sont les besoins finaux, après avoir pris en compte les gains solaires et autres gains ainsi que les diverses déperditions.

## Coefficients de performances PAC

| ↑ Wärmepumpen Luft/Wasser Aussenauflistung (MODELLE A 9 - A 18) |                       |               |                |                |
|---|-----------------------|---------------|----------------|----------------|
| Titeltext   | Einheit               | Type HLWa 9 A | Type HLWa 12 A | Type HLWa 18 A |
| Bestellnummer   | .                     | 71123.111     | 71123.112      | 71123.114      |
| Bauform   |                       |               |                |                |
| Kompakt/Split   | .                     | O/-           | O/-            | O/-            |
| Schutzart   | .                     | IP 24         | IP 24          | IP 24          |
| Gebrauchseigenschaften  |                       |               |                |                |
| Temperatur Betriebsgrenzen                                      | °C Heizwasser °C Luft | +65/-20       | +65/-20        | +65/-20        |
| Wärmeleistung/Leistungszahl                                     | bei A-15/W50 in kW/-  | 3.5/1.7       | 4.2/1.6        | 7.0/1.5        |
|   | bei A2/W35 in kW/-    | 7.1/3.2       | 9.4/3.2        | 13.7/2.9       |
|   | bei A2/W50 in kW/-    | 6.4/2.7       | 8.3/2.5        | 12.6/2.3       |
|   | bei A7/W35 in kW/-    | 8.5/3.6       | 11.1/3.8       | 15.7/3.2       |

Figure 3-2. Données techniques PAC.

Le principe d'une pompe à chaleur est de puiser de l'énergie dans son environnement. Plus la température de son environnement est élevée, plus l'énergie pouvant être prélevée est importante. Les coefficients de performance découlent directement de la différence entre la température de l'environnement et la température de sortie du liquide caloporteur. Afin de réaliser des simulations au plus proches de la réalité, les approximations de COP ont été faites en se basant sur les données techniques du modèle de la pompe à chaleur ci-dessus (Figure 3-2).

## Température intérieure

La température intérieure « future » est calculée à partir de la température intérieure actuelle mesurée à laquelle sont ajoutées les influences des déperditions thermiques, des gains solaires, des gains de chauffage ainsi que des divers gains internes comme les personnes ou encore les différents appareils enclenchés dans la maison.

## Eau chaude sanitaire

Comme calculée lors de la modélisation des différents organes de l'installation (Chapitre 2), l'énergie électrique nécessaire à la fabrication d'eau chaude sanitaire journalière est d'environ 11kWh. L'unique contrainte concernant la production d'ECS introduite dans le solveur est la part d'énergie électrique journalière délivrée au boiler, qui doit être comprise entre 9 et 12kWh.

## Tarif électricité

Le fournisseur d'électricité de la maison, FMB/BKW, propose un abonnement avec tarifs variables en fonction des heures. L'abonnement en question est le « Energy Blue » qui possède un tarif haut à 29.27cts/kWh de 7h à 21h ainsi qu'un tarif bas de 18.85cts/kWh pour les heures de 21h à 7h.

### 3.2 Préparation des données

Les données provenant des éléments à prendre en compte étant brutes, de multiples opérations sur celles-ci sont nécessaires avant de pouvoir connaître toutes les valeurs intermédiaires utiles afin d'alimenter l'algorithme en informations. Pour faciliter ces démarches et simplifier la fiche de calcul Excel, les formules ont été directement codées à l'aide de l'interface de développement proposé par Excel qui permet de développer ses propres macros. Ainsi, la part d'autoconsommation, le coût des consommations à l'heure, la capacité et les puissances de charge et de décharge disponibles de la batterie ont été calculés avec nos propres fonctions (Annexe 3). Ces différentes fonctions ont été codées comme l'illustre le code ci-dessous (Figure 3-3).

```
Function PChargedispo(Pchargemax, ConsoTOT, ProdPVtot, ProdPV18)
If (ConsoTOT > ProdPVtot) Then

    PChargedispo = 0
Else

    If (ProdPVtot - ConsoTOT <= ProdPV18) Then

        PChargedispo = ProdPVtot - ConsoTOT
    Else

        If (ProdPV18 <= Pchargemax) Then
            PChargedispo = ProdPV18
        Else
            PChargedispo = Pchargemax
        End If
    End If
End If
End Function
```

Figure 3-3. Exemple de création macro dans Excel.

Une fois les fonctions codées, il est alors possible de les réutiliser de manière simplifiée en sélectionnant les paramètres intervenant dans la fonction comme suit (Figure 3-4) :

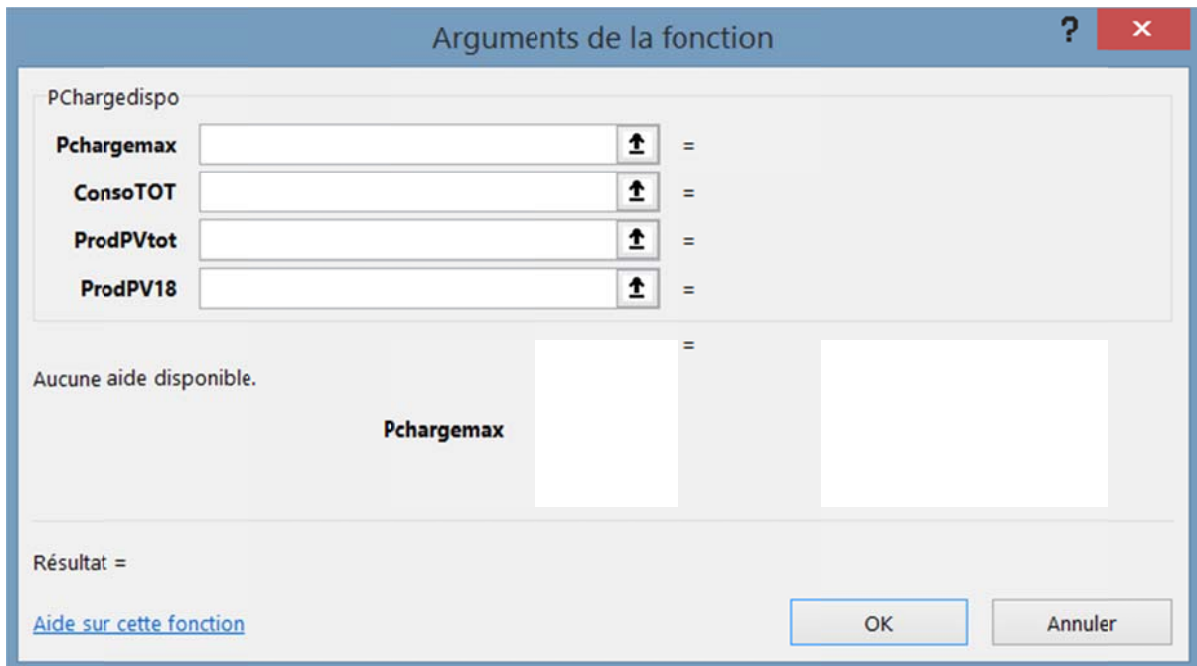


Figure 3-4. Exemple utilisation de fonction VBA.

### 3.3 Elaboration de l'algorithme

Le but de cette simulation d'algorithme est de piloter la pompe à chaleur ainsi que le boiler tout en tenant compte de tous les paramètres décrits précédemment. Excel n'étant pas un logiciel très puissant, le nombre de cellules variables pour l'utilisation du solveur « Algorithme évolutionnaire » est limité à 200. Les données provenant de BSol (besoins et production) étant des données à l'heure, la simulation est alors possible sur 4 jours maximum, soit 96h de simulation avec possibilité d'activer ou non la PAC et/ou le boiler.

Le principe de gestion est basé sur l'élaboration d'une fonction de coût. Autrement dit, les éléments voulant être maximisés et ceux voulant être minimisés sont transformés afin de pouvoir les chiffrer monétairement. Les différents éléments de cette fonction de coût n'ont pas tous la même proportion une fois chiffrés sous forme d'argent, c'est pourquoi chaque élément présent dans la fonction de coût possède sa propre pondération. Il est nécessaire d'optimiser des fonctions ayant des valeurs relativement similaires.

#### Fonction de coût

La fonction de coût à la base de la planification de gestion des charges se fonde sur :

- Le prix lié à l'achat d'énergie
- La part d'énergie autoconsommée
- Le confort

Le prix lié à l'achat d'énergie est composé de la somme des énergies tirées du réseau multipliée par le prix (tarif haut/bas).



Le prix de l'énergie autoconsommée représente l'énergie autoconsommée multipliée par un prix de revient de 10 cts/kWh calculé sur un investissement de l'installation d'environ 40'000 CHF et une durée de vie d'approximativement 20 ans pour une production de 20'000 kWh/an.

$$\frac{40'000 \text{ CHF}}{20'000 \text{ kWh}} \cdot 20 \text{ ans} = \mathbf{0.1 \text{ CHF/kWh}}$$

Le confort est chiffré sous forme monétaire en mettant un prix sur la différence entre la température réelle et la température de consigne. Dans le cas de cette simulation, la consigne de température varie entre le jour et la nuit.

La modélisation BSol a permis de déterminer que 209,9 MJ/K, soit 58kWh thermiques, étaient nécessaires afin d'augmenter la totalité de la maison d'un degré. Ce qui permet de chiffrer une différence de température comme suit :

$$\text{Coût} \Delta T = \text{Capa. Calorifique} \cdot \Delta T / \text{COP} \cdot \text{PrixElec}$$

Le coût relatif à un degré de différence entre la température de consigne et la température réelle peut alors fortement varier en fonction de la température extérieure qui fait varier le COP de la PAC, de la production PV qui génère une électricité bon marché ou encore de l'heure qui influence le tarif de l'électricité prélevée au réseau.

Afin de différencier les écarts de température supérieurs ou inférieurs à la température, une « baisse » du prix de l'écart de 10% est accordée aux écarts de température supérieurs à la consigne tandis qu'une hausse de 10% est ajoutée aux écarts inférieurs à la consigne.

La fonction de coût finale est alors :

$$\text{Fct. coût} = p1 \cdot \text{PrixAchat} + p2 \cdot \text{PrixConfort} - p3 \cdot \text{PrixAutocons}$$





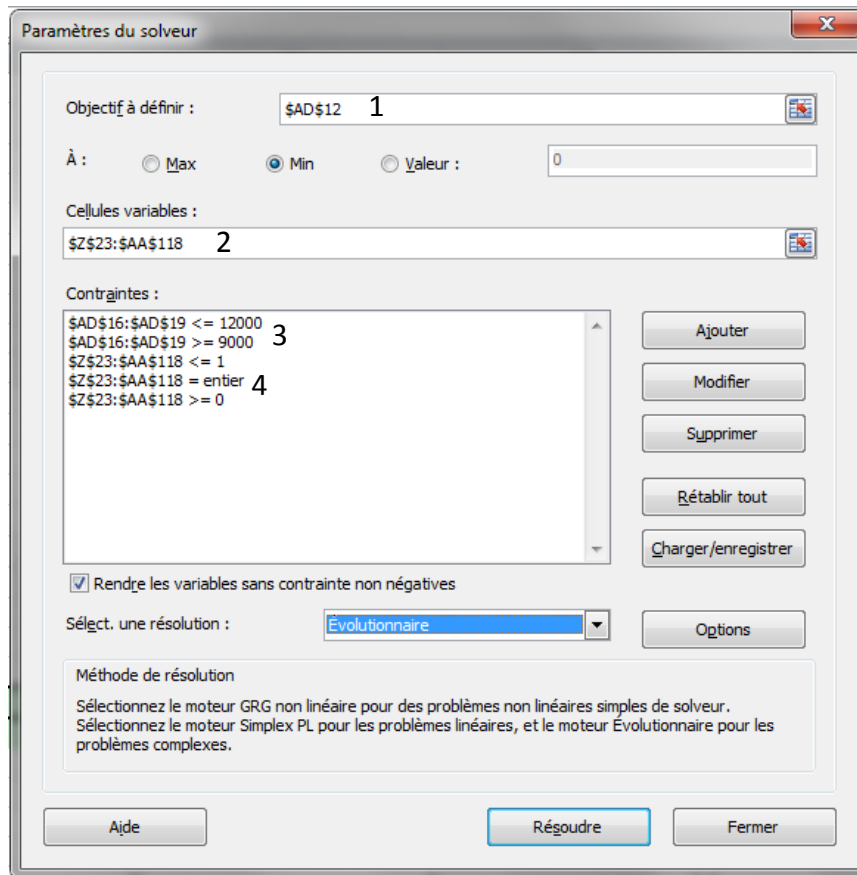


Figure 3-6. Utilisation solveur Excel.

- 1** : La cellule « objectif » est le résultat de la fonction de coût définie. Dans le cas présent, l'élément « min » est utilisé afin d'optimiser les différents paramètres de manière à minimiser le résultat présent dans cette cellule.
- 2** : Les cellules variables sont les éléments pouvant être modifiés directement par le solveur. Leur nombre est limité à 200. Dans le cas présent, les cellules variables sont les cellules indiquant si le boiler et/ou la PAC sont enclenchés ou non (1 ou 0).
- 3** : Les deux premières contraintes définissent que l'énergie électrique journalière dédiée à la production d'eau chaude sanitaire doit être comprise entre 9 et 12 kWh.
- 4** : Les trois dernières contraintes permettent de borner les cellules variables, sans quoi le solveur ne peut fonctionner. Ces contraintes permettent de définir que les valeurs sont des nombres entiers compris entre 0 et 1 y compris les valeurs limites. Les uniques valeurs possibles sont donc 0 (éteint) ou 1 (allumé).

En été, la production photovoltaïque étant très élevée est les besoins en chaleur pour le chauffage étant nuls ou presque, l'algorithme est utilisable pour la fabrication de l'eau chaude sanitaire mais possède tout de même un plus grand intérêt lors de périodes froides.

## Exemples de régulation

### Optimisation pour une période estivale de 4 jours

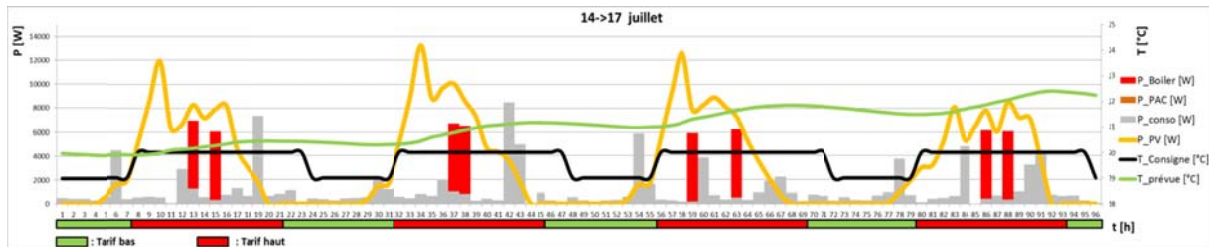


Figure 3-7 Planification du pilotage des charges du 14 au 17 juillet

Comme attendu, les besoins de chaleur pour le bâtiment étant nuls en plein été, l'unique élément à piloter est le producteur de chaleur utile à la fabrication d'eau chaude sanitaire. Le corps de chauffe électrique est utilisé uniquement lors de production solaire. La production étant la plupart du temps en état de surproduction, le boiler (barres rouges) n'a aucune peine à chauffer l'eau sanitaire uniquement lors de production solaire afin de garantir le confort des habitants.

### Optimisation pour une période hivernale de 4 jours

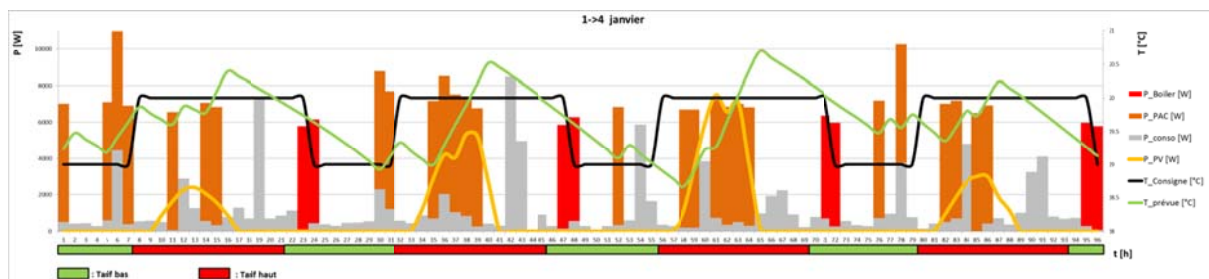


Figure 3-8 Planification du pilotage des charges du 1 au 4 janvier

La courbe verte illustre la prévision de la température à l'intérieur du bâtiment si le « scénario de chauffe » proposé par l'algorithme est suivi et que les prévisions météorologiques utilisées sont effectives.

La régulation en période froide est relativement plus complexe qu'en période chaude. Les graphiques suivants illustrent, séparément jour par jour, la simulation ci-dessus en optimisant chaque jour individuellement.

## Jour 1

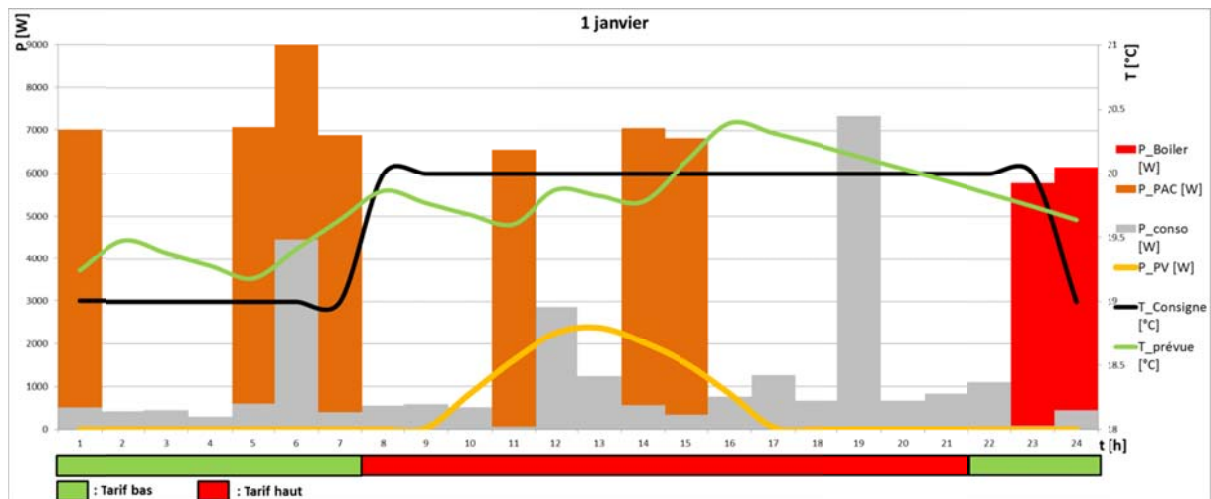


Figure 3-9 Planification du pilotage des charges du 1 janvier

## Jour 2

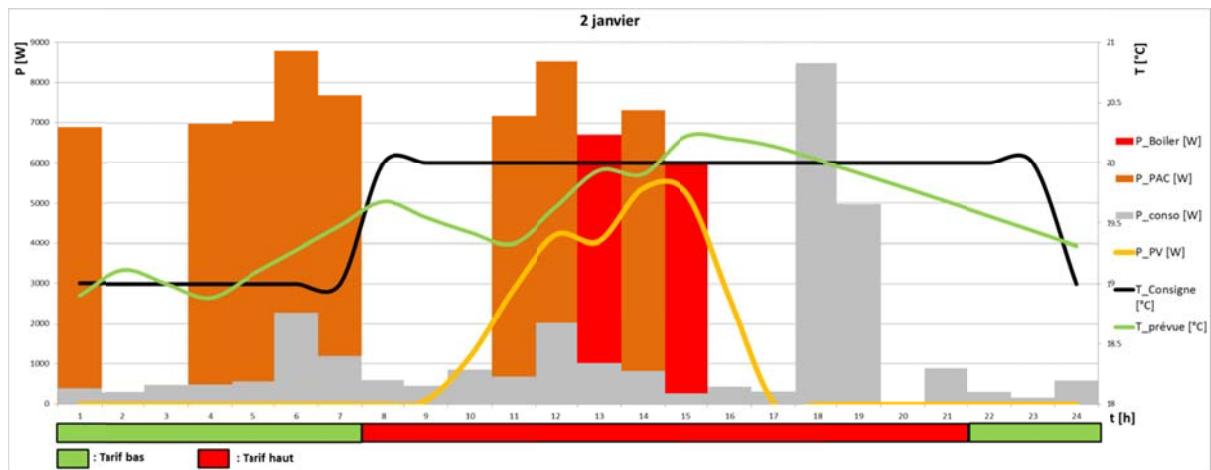


Figure 3-10 Planification du pilotage des charges du 2 janvier

## Jour 3

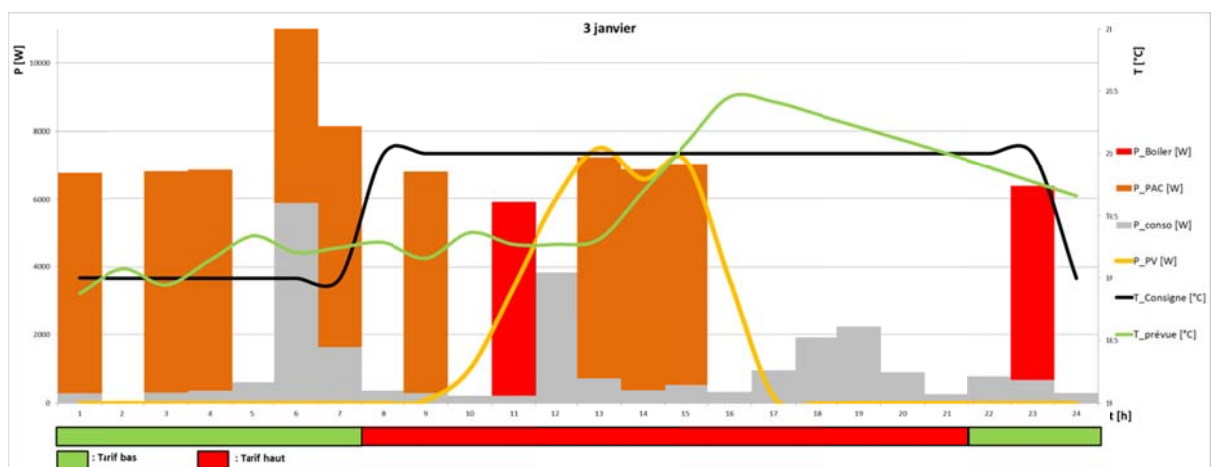


Figure 3-11 Planification du pilotage des charges du 3 janvier

## Jour 4

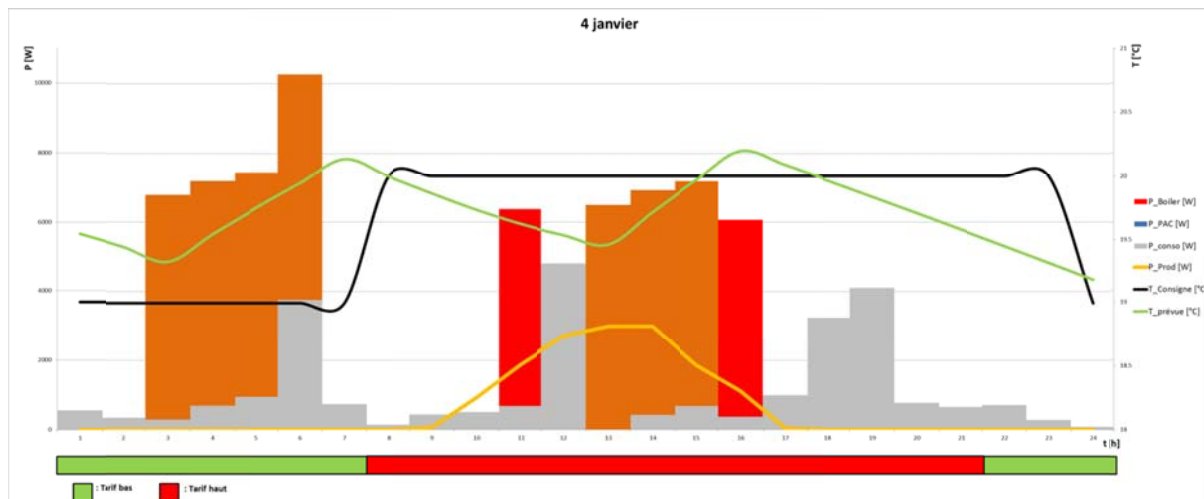


Figure 3-12 Planification du pilotage des charges du 4 janvier

Si tous les éléments intervenants dans la prise de décision (température extérieure, COP de la PAC) utiles à la planification de l'algorithme ne sont pas visibles sur le graphique, il est tout de même observable que la gestion des charges tente de maximiser l'autoconsommation (le profil de consommation suit le profil de production). La production n'étant pas suffisante, utiliser la tarification basse du gestionnaire de réseau s'avère être également une bonne opportunité pour combler les manques thermiques.

## 4 Mesure et commande

### 4.1 Schéma de principe

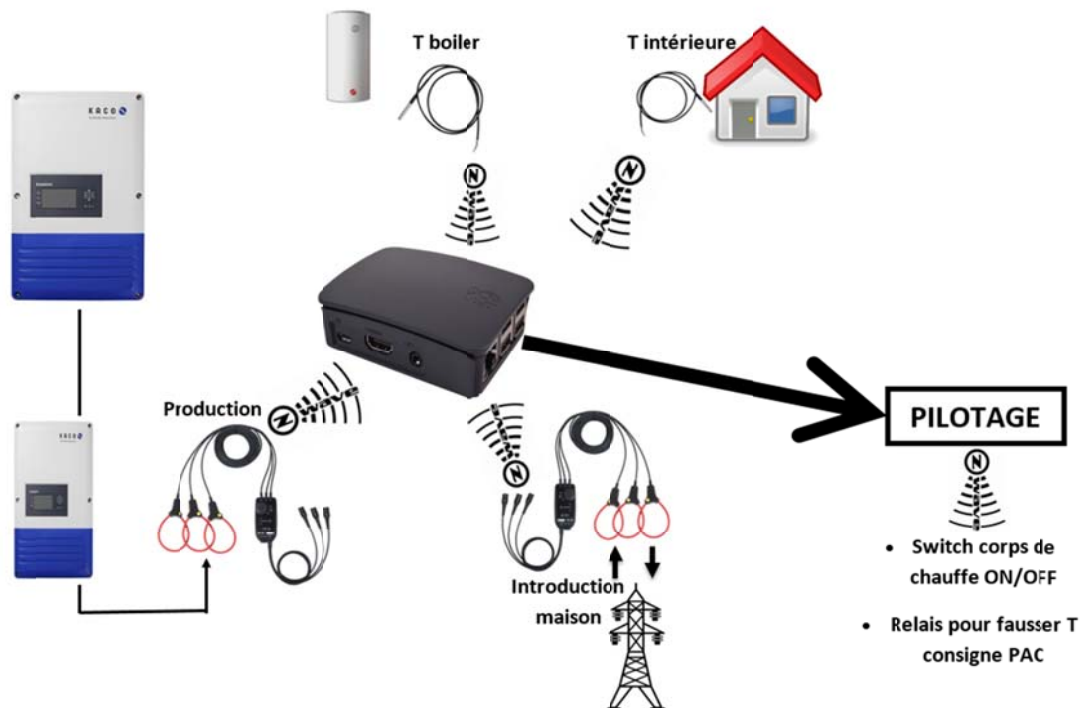


Figure 4-1 Schéma de principe de l'installation de gestion des charges



## 4.2 Communication

La communication entre les différents éléments de l'installation est faite en grande partie par Z-Wave, un protocole de communication utilisant des ondes radios de faible puissance dans la bande de fréquence de 868 MHz.

Un Raspberry Pi (micro-ordinateur), sur lequel est connecté un stick USB permettant de contrôler et d'assurer la liaison avec d'autres appareils Z-Wave dans la maison, est constamment connecté.

Le Raspberry Pi est connecté à la box internet par Wifi. Ceci permet d'avoir accès à ce micro-ordinateur, et donc indirectement à tous les dispositifs Z-Wave présents dans la maison de n'importe où.

Premièrement, une adresse IP fixe doit être attribuée au Raspberry Pi afin de connaître son adresse IP en tout temps et ne pas être surpris par une éventuelle nouvelle attribution suite à une reconnexion (Figure 4-2).







| Attribuer automatiquement une adresse IP statique ⓘ   |                   |                     |   |
|---|-------------------|---------------------|---|
| Nom d'appareil  | Adresse MAC       | Adresse IP statique | Actions   |
|  TV-Box-1      | 5C:DC:96:5B:19:4B | 192.168.1.129       |   |
|  raspberrypi-1 | B8:27:EB:9A:2B:2F | 192.168.1.110       |   |
| <div> <span>Sélectionner l'appareil</span> <input type="text"/> <input type="text"/> </div>     |                   |                     |   |

Figure 4-2. Attribution adresse IP fixe.

Deuxièmement, il est nécessaire de rediriger l'adresse IP de la box vers le port sur lequel est connecté l'appareil voulant être atteint (ici 8080) (Figure 4-3).

Mode: 

Standard

Expert

Aperçu

Réseau

Paramètres

Liste des appareils

Test de vitesse

WLAN

Gérer les paramètres réseau

Paramètres IP

Redirection de port

DynDNS

IPv6

Routes statiques

Pour certaines applications, comme les jeux en ligne ou l'échange de fichiers, des requêtes spécifiques de l'Internet doivent être directement dirigées vers l'appareil correspondant. Il est également possible de définir des règles de redirection de port qui spécifient les requêtes à diriger vers tel ou tel appareil.

Autoriser la redirection de port automatique (UPnP IGD)

Règles de redirection de port

| Activer la règle  | Protocole | Appareil                          | Actions                           |
|---|-----------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| <div><div><div></div></div><div>Raspberry</div><div>Port d'entrée: 8080</div></div> | TCP/UDP   | raspberrypi-1<br>Port cible: 8080 | <div><div></div><div></div></div> |

Figure 4-3. Redirection de port.

L'appareil est désormais accessible de partout en passant par l'adresse IP de la box et non pas de l'appareil en question.

### 4.3 Appareils utilisés

L'ensemble des dispositifs de commande et de mesure est composé par des dispositifs utilisant une communication Z-Wave et installé comme sur le schéma de principe ci-dessus (Figure 4-1).

#### Mesures

##### *Boiler*

Le capteur de température utilisé dans le « doigt de gant » inséré dans le boiler ne possède pas tout à fait les caractéristiques physiques adaptées. Après quelques mesures avec un autre appareil classique, l'offset a pu être déterminé à environ 5-6°C trop bas par rapport à la température réelle.

(Capteur : QUBINO V2 ZMNHAD1)

##### *Maison*

Le capteur de température intérieure est placé au centre de la maison, à proximité du salon. La pièce étant sans cesse aérée, plusieurs capteurs permettant de moyenner la température dans l'ensemble du bâtiment génèreraient des mesures plus cohérentes.

(Capteur : Aeotec - Détecteur multifonctions Z-Wave Plus GEN5 (ZW074))

##### *Production*

La puissance de production est mesurée par un appareil de mesure triphasé. L'appareil est connecté aux bornes en sortie de la mise en commun des deux onduleurs. Il est composé de 3 prises de tensions (3 différentes phases et neutre) ainsi que 3 pinces de courant.

(Capteur: Aeotec – HEM GEN5 ZWave+ / ZW095-3C60)

##### *Consommation*

Pour des raisons de manque de place dans le tableau électrique et d'un encombrement trop important lié à la taille de l'appareil de mesure, la deuxième mesure de puissance est réalisée par le même appareil triphasé que celui utilisé pour la mesure de la production, mais il est installé à l'introduction dans le tableau électrique. Quelques petites opérations sur ces mesures sont alors nécessaires pour déterminer la consommation. Autrement dit, lorsque la production est supérieure à la réinjection dans le réseau, la consommation est la différence entre la puissance de production et celle de réinjection etc.

(Capteur: Aeotec – HEM GEN5 ZWave+ / ZW095-3C60)

## Commande

### Boiler

Le corps de chauffe du boiler, d'une puissance d'environ 6 kW, nécessite une alimentation triphasée. Malheureusement, aucun relais triphasé équipé de communication Z-Wave n'a été trouvé sur le marché. Afin de pouvoir tout de même piloter le corps de chauffe par

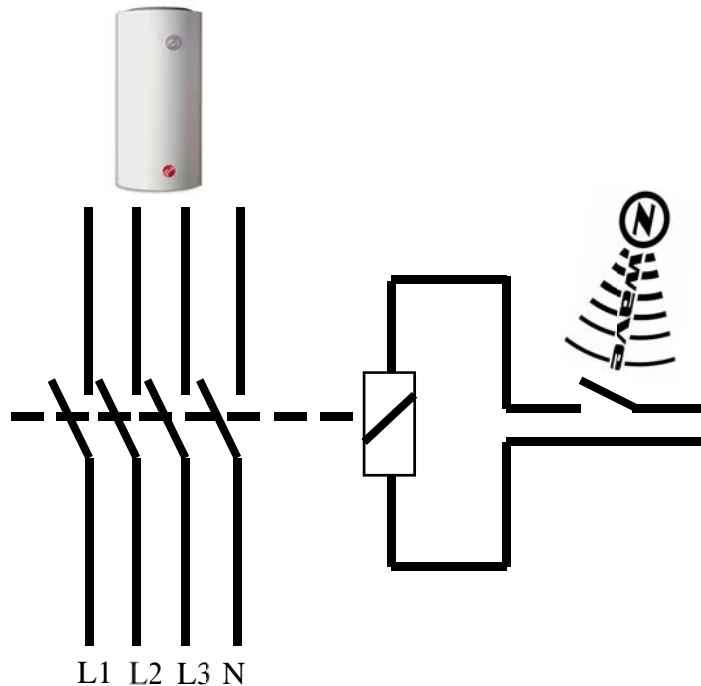


Figure 4-4 Pilotage relais corps de chauffe

commande Z-Wave, l'installation suivante a été réalisée (Figure 4-4).

La commande du corps de chauffe est réalisée par un relais « classique » connecté à l'alimentation triphasée. Ce relais triphasé est ensuite piloté par un relais monophasé qui lui est équipé d'une communication Z-Wave.

Une méthode permettant un pilotage plus fin aurait été l'utilisation de 3 relais différents pour piloter les trois phases séparément. Ce pilotage permettrait de chauffer avec des puissances de 2, 4 ou 6 kW.

Comme l'installation technique avait été réalisée avant l'installation photovoltaïque, un relais permettant de couper l'alimentation de jour afin de bénéficier du tarif bas nocturne avait été installé (Figure 4-5).



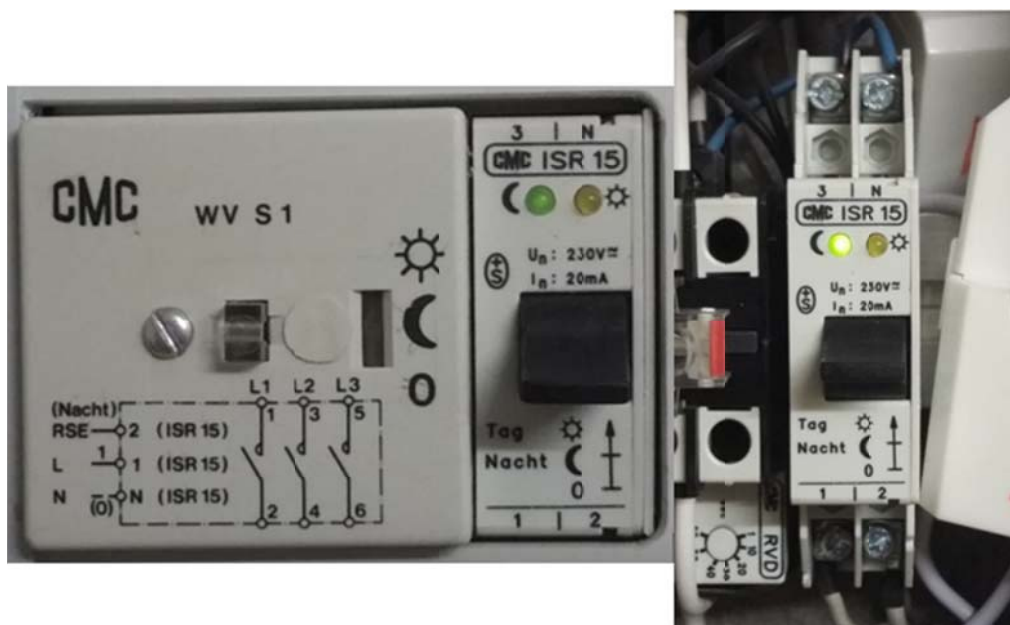


Figure 4-5. Relais jour/nuit boiler.

La position « jour » permet en effet une chauffe journalière, mais une fois la nuit arrivée, le relais se met à nouveau automatiquement en position « nuit ». Afin d'éviter cette action non souhaitée et profiter de l'alimentation de source solaire, les alimentations des contacteurs des positions 1 et 2 ont été inversées. Ainsi, comme illustré sur l'image de droite, même de jour, l'alimentation est permise jusqu'au relais piloté par Z-Wave.

### PAC

La pompe à chaleur à piloter est un ancien modèle datant d'une quinzaine d'années. Elle est pilotée par un régulateur basique qui l'enclenche ou non en mesurant la température de retour du liquide caloporteur ainsi que la température extérieure. Si la température extérieure est élevée, les besoins en chauffage sont alors considérés comme nuls. Jouant sur ce phénomène, il est possible de fausser la mesure de température extérieure afin d'éviter une mise en marche non-souhaitée. Inversement, il est possible de fausser la température en indiquant une valeur de température extérieure inférieure afin de chauffer plus si certaines conditions sont réunies.

La sonde de température n'est autre qu'une résistance qui varie fortement en fonction de la température. Une mesure à l'aide d'un Ohmmètre sur la sonde présente a permis de relever une valeur d'environ 2 kOhm à 25°C. Grâce à quelques recherches sur les sondes de températures fréquemment utilisées pour ce genre d'application (Figure 4-6), la sonde en question a pu être définie.

| Temp<br>°C | PT100<br>$\Omega$ | PT1000<br>$\Omega$ | Ni1000<br>$\Omega$ | Ni1000<br>TK5000<br>$\Omega$ | NTC<br>1kOhm<br>$\Omega$ | NTC<br>2kOhm<br>$\Omega$ | NTC<br>5kOhm<br>$\Omega$ | NTC<br>10kOhm<br>k $\Omega$ | NTC<br>20kOhm<br>k $\Omega$ | KTY<br>81-210<br>$\Omega$ |
|------------|-------------------|--------------------|--------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| -50        | 80                | 803                | 743                | 791                          | 32886                    | 77977                    | 333914                   | 668                         | 1668                        | 1030                      |
| -40        | 84                | 843                | 791                | 831                          | 18641                    | 43040                    | 167835                   | 336                         | 813                         | 1135                      |
| -30        | 88                | 882                | 842                | 872                          | 10961                    | 24651                    | 88342                    | 177                         | 415                         | 1247                      |
| -20        | 92                | 922                | 893                | 913                          | 6662                     | 14615                    | 48487                    | 97                          | 221                         | 1367                      |
| -10        | 96                | 961                | 946                | 956                          | 4175                     | 8947                     | 27649                    | 55                          | 122                         | 1495                      |
| 0          | 100               | 1000               | 1000               | 1000                         | 2961                     | 5642                     | 16325                    | 33                          | 70                          | 1630                      |
| 10         | 104               | 1039               | 1056               | 1045                         | 1781                     | 3657                     | 9952                     | 20                          | 42                          | 1772                      |
| 20         | 108               | 1078               | 1112               | 1091                         | 1205                     | 2421                     | 6247                     | 12                          | 25                          | 1922                      |
| 25         | 110               | 1097               | 1141               | 1114                         | 1000                     | 2000                     | 5000                     | 10                          | 20                          | 2000                      |
| 30         | 112               | 1117               | 1171               | 1138                         | 834                      | 1655                     | 4028                     | 8                           | 16                          | 2080                      |
| 40         | 116               | 1155               | 1230               | 1186                         | 589                      | 1151                     | 2662                     | 5                           | 10                          | 2245                      |
| 50         | 119               | 1194               | 1291               | 1235                         | 424                      | 816                      | 1800                     | 4                           | 7                           | 2417                      |
| 60         | 123               | 1232               | 1353               | 1285                         | 310                      | 590                      | 1244                     | 2                           | 5                           | 2597                      |
| 70         | 127               | 1270               | 1417               | 1337                         | 231                      | 434                      | 876                      | 2                           | 3                           | 2785                      |
| 80         | 131               | 1309               | 1483               | 1390                         | 175                      | 324                      | 628                      | 1                           | 2                           | 2980                      |
| 90         | 135               | 1347               | 1549               | 1444                         | 134                      | 246                      | 458                      | 1                           | 2                           | 3162                      |
| 100        | 139               | 1385               | 1618               | 1500                         | 104                      | 189                      | 339                      | 1                           | 1                           | 3392                      |
| 110        | 142               | 1422               | 1688               | 1557                         | 81                       | 147                      | 255                      | 1                           | 1                           | 3607                      |
| 120        | 146               | 1461               | 1760               | 1615                         | 65                       | 116                      | 194                      | 0                           | 1                           | 3817                      |
| 130        | 150               | 1498               | 1883               | 1675                         | 52                       |                          | 150                      | 0                           | 0                           | 4008                      |
| 140        | 154               | 1536               | 1909               | 1736                         | 42                       |                          | 117                      | 0                           | 0                           | 4166                      |
| 150        | 157               | 1573               | 1987               | 1799                         | 34                       |                          | 92                       | 0                           | 0                           | 4280                      |

Figure 4-6. Résistances sonde température (<http://lampopumput.info/foorum/index.php?topic=18236.15>).

Connaissant ces valeurs, il serait alors possible de réaliser une installation permettant une « chauffe forcée » et un « arrêt forcé ». Un branchement comme sur le schéma suivant permettrait ces deux actions (Figure 4-7) :

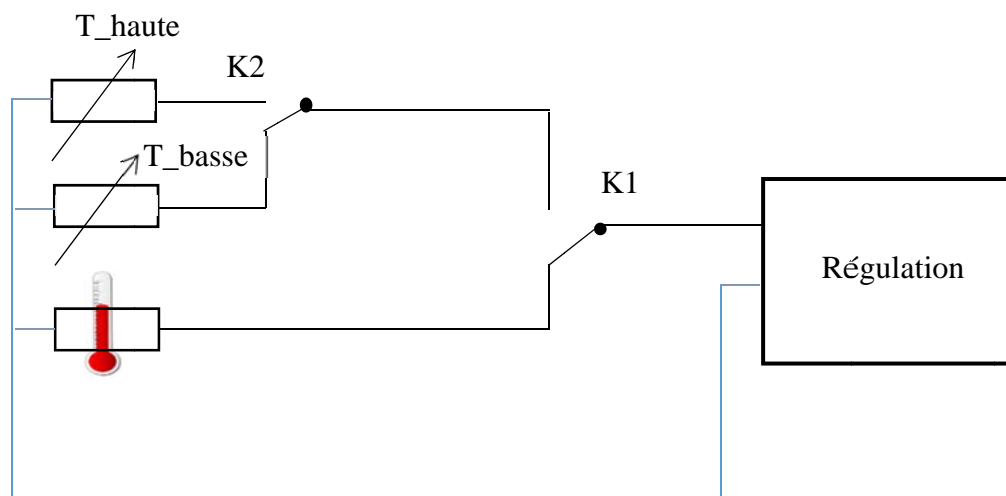


Figure 4-7. Faussement Text (1).

Le relais K1 permet de guider la provenance de l'information dans le cas où la régulation nécessiterait une action particulière. Si une action « forcée » est souhaitée, le relais K2 permet de choisir si l'on veut forcer la mise en route ou l'arrêt de la pompe à chaleur.

Le montage réalisé sur l'installation est plus simple. Etant donné que chaque pièce de la maison est équipée d'un thermostat manuel, le principe choisi est celui d'élèver un peu plus, manuellement, les valeurs de consignes des thermostats afin de permettre une chauffe un peu plus importante que d'habitude. La seule consigne donnée au régulateur est de ne pas mettre en route la PAC. Cette consigne est donnée par un relais double, libre de potentiel et pilotable par Z-Wave. Le branchement réalisé est le suivant (Figure 4-8) :

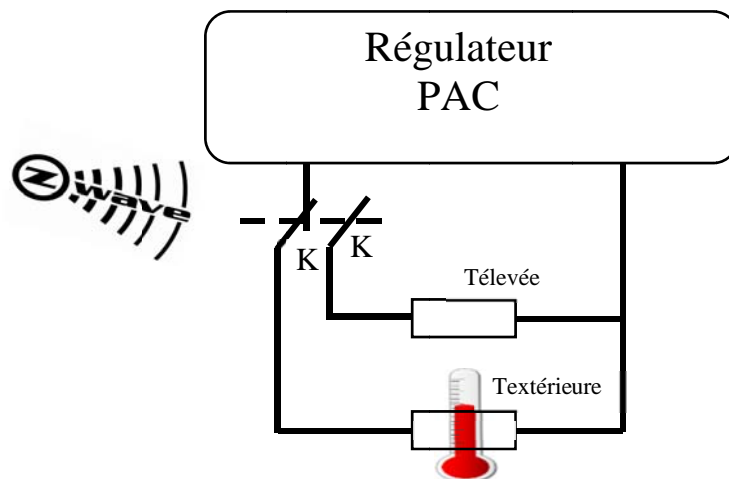


Figure 4-8 Schéma faussement de la température

L'installation provisoire de test réalisée sur le régulateur de la PAC se présente de la manière suivante (Figure 4-9).

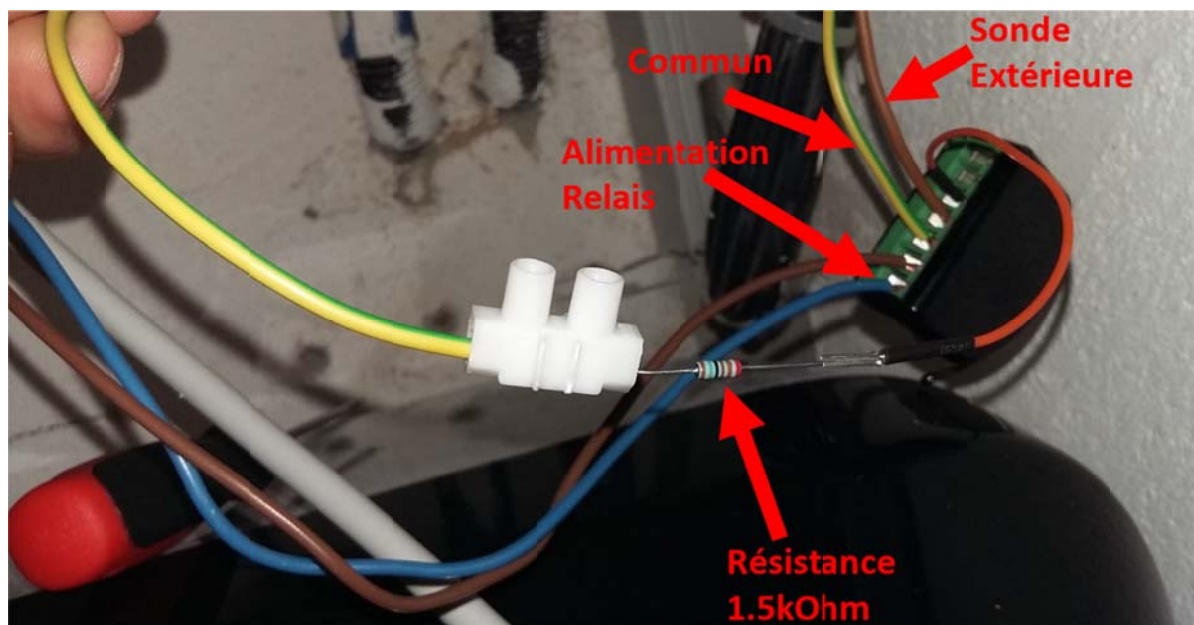
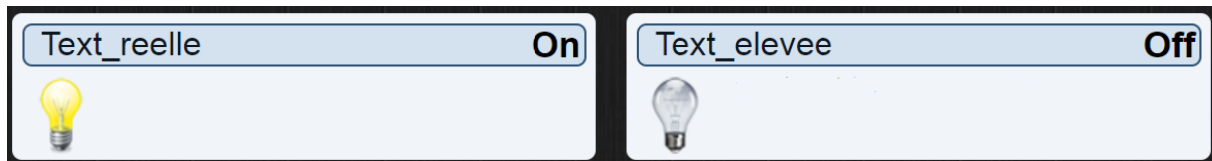


Figure 4-9. Montage provisoire pilotage PAC.

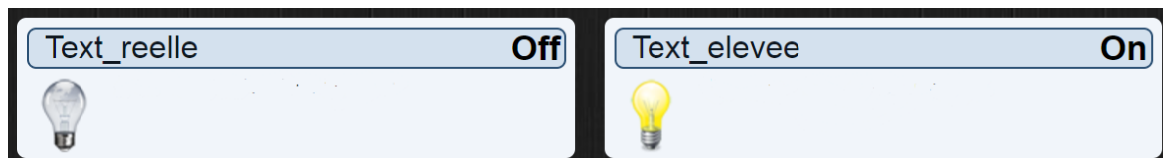
Une fois le montage réalisé, les tests ont démontré :



Avec une consigne d'enclenchement du relais permettant à la sonde extérieure de communiquer, les mesures suivantes ont pu être relevées au moment des tests :



A quelques instants de cette mesure, avec les consignes de relais suivantes :



Les valeurs de résistance et donc de température désormais fixes lisibles sur les deux appareils sont :



Les tests ont démontré avec succès que, peu importe la température extérieure, le relais double installé permet d'imposer une valeur à 32.6°C. Autrement dit, il est désormais possible de faire « croire » au régulateur qu'aucun besoin de chauffage n'existe si les conditions requises pour une mise en route de la PAC sensée ne sont pas remplies.



#### 4.4 Acquisition de données & commande par Z-Wave

Une fois le logiciel de gestion « Domoticz » installé sur le Raspberry Pi, en entrant l'adresse IP du Raspberry Pi suivie du port de la destination (exemple : <http://178.195.188.200:8080>) dans la barre d'adresse du navigateur internet, l'interface proposée par le logiciel Domoticz apparaît (Figure 4-10).

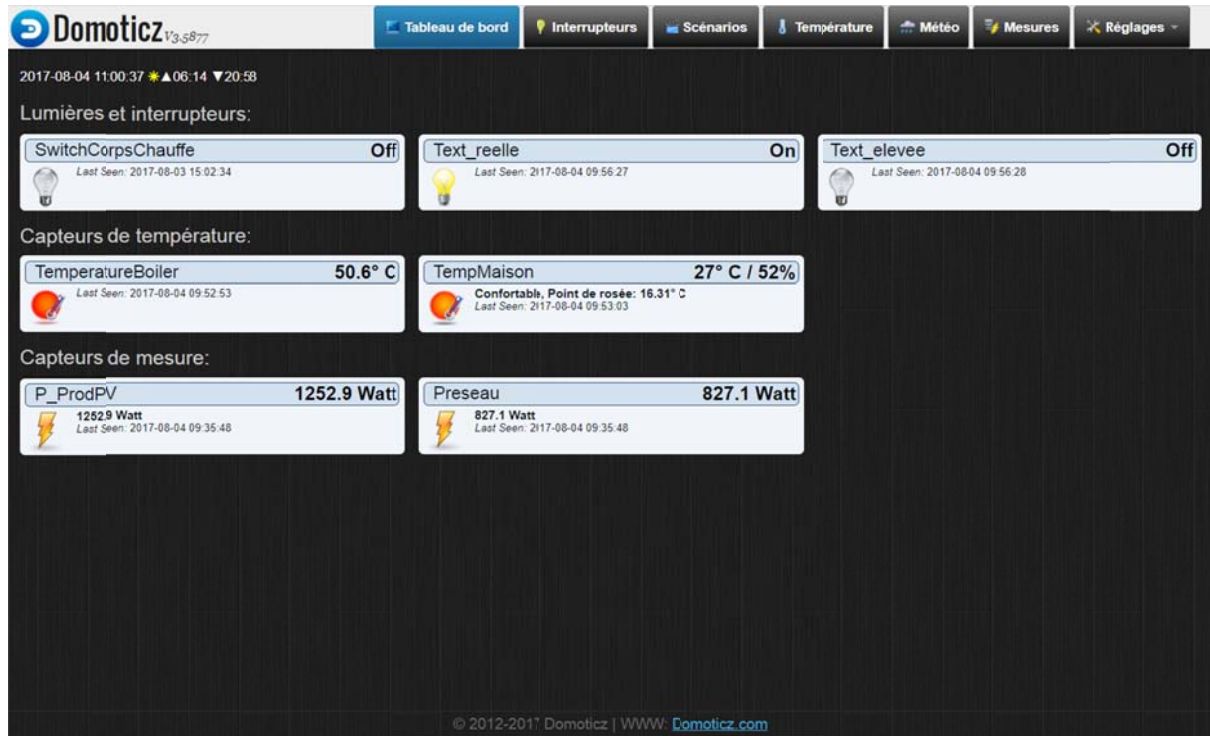


Figure 4-10 Interface Domoticz

Il est alors possible, depuis n'importe quel ordinateur ou smartphone, d'actionner ou non certains relais de manière manuelle ainsi que de relever les mesures en temps réel.

Si l'utilisation manuelle s'avère être très simple, une utilisation automatisée est tout de même nécessaire au bon fonctionnement du programme autonome d'optimisation de l'autoconsommation.

#### Acquisition

Les valeurs des mesures sont lisibles sur l'interface de Domoticz mais il existe également une adresse à entrer dans la barre internet qui permet de lire chaque composant de chaque capteur. En entrant à nouveau l'adresse IP de la box qui est redirigée vers le Raspberry Pi suivi de « :8080/json.htm?type=devices&rid= » puis de l'identifiant « Idx » de l'appareil voulant être atteint (exemple : <http://178.195.188.200:8080/json.htm?type=devices&rid=24>), la liste de toutes la valeurs liées à l'appareil en question apparaît sur la page internet comme suit (Figure 4-11):

```

{
  "ActTime" : 1501845091,
  "ServerTime" : "2017-08-04 13:11:31",
  "Sunrise" : "06:14",
  "Sunset" : "20:58",
  "result" : [
    {
      "AddjMulti" : 1.0,
      "AddjMulti2" : 1.0,
      "AddjValue" : 0.0,
      "AddjValue2" : 0.0,
      "BatteryLevel" : 255,
      "CustomImage" : 0,
      "Data" : "49.6 C",
      "Description" : "",
      "Favorite" : 1,
      "HardwareID" : 3,
      "HardwareName" : "Z-Stick",
      "HardwareType" : "OpenZWave USB",
      "HardwareTypeVal" : 21,
      "HaveTimeout" : false,
      "ID" : "0A01",
      "LastUpdate" : "2017-08-04 12:51:56",
      "Name" : "TemperatureBoiler",
      "Notifications" : "false",
      "PlanID" : "0",
      "PlanIDs" : [ 0 ],
      "Protected" : false,
      "ShowNotifications" : true,
      "SignalLevel" : "-",
      "SubType" : "LaCrosse TX3",
      "Temp" : 49.60,
      "Timers" : "false",
      "Type" : "Temp",
      "TypeImg" : "temperature",
      "Unit" : 1,
      "Used" : 1,
      "XOffset" : "0",
      "YOffset" : "0",
      "idx" : "24"
    }
  ],
  "status" : "OK",
  "title" : "Devices"
}

```

Figure 4-11. Exemple acquisition données.

Afin de pouvoir utiliser ces valeurs dans le programme d'optimisation, une fonction de lecture de cette liste a été codée en C++ sur Qt Creator afin d'obtenir en tout temps les valeurs de chaque capteur présent dans l'installation.

Premièrement, pour chaque capteur, une variable comportant son identifiant (idx) a été réalisée afin de pouvoir les utiliser de manière simple et sans confusions (Figure 4-12).

```

int Tboiler_mesureid = 24;
int Text_reelleid = 66;
int Text_eleveeid = 70;
int Switch_boilerid = 54;
int Tmaisonid = 51;
int P_PVid = 71;
int P_reseauid = 87;

```

Figure 4-12. Attribution des idx aux variables.

Puis le code permettant la lecture des valeurs utiles a été conçu comme suit (Figure 4-13) :

```
double MainWindow::getData(int idx)
{
    QString url = "http://178.195.188.200:8080/jsor.htm?type=devices&rid=";
    url += QString::number(idx);

    // create custom temporary event loop on stack
    QEventLoop eventLoop;

    // "quit()" the event-loop, when the network request "finished()"
    QNetworkAccessManager mgr;
    QObject::connect(&mgr, SIGNAL(finished(QNetworkReply*)), &eventLoop, SLOT(quit()));

    // the HTTP request
    QNetworkRequest req((QUrl)url);
    QNetworkReply *reply = mgr.get(req);
    eventLoop.exec(); // blocks stack until "finished()" has been called

    QString strReply = (QString)reply->readAll();

    //parse json
    QJsonDocument jsonResponse = QJsonDocument::fromJson(strReply.toUtf8());
    QJsonObject jsonObj = jsonResponse.object();

    QString maVariable = jsonObj.value("result").toArray()[0].toObject().value("Data").toString();
    int positionDeLEspace = maVariable.indexOf(" "); //cherche la position du premier espace
    maVariable = maVariable.left(positionDeLEspace); //prend uniquement la partie à gauche de la position de l'espace
    return maVariable.toDouble();
}
```

Figure 4-13. Fonction lecture de données.

Cette fonction, appelée « getData » ne possède qu'un seul paramètre, celui de l'idx du capteur. Ainsi, elle génère la commande réalisée précédemment dans la barre internet puis se dirige dans la partie appelée « result » et recherche dans celle-ci la ligne « Data ». Une fois dans la variable « Data », la fonction relève ce qui est présent jusqu'au premier espace. La variable est ensuite convertie en nombre à virgule et peut être insérée dans une nouvelle variable comme cela (Figure 4-14) :

```
double tempBoilermesure = getData(Tboiler_mesureid);
double puissancePV = getData(P_Pvid);
double puissanceRESEAU = getData (P_reseauid);
double Tmaison = getData (Tmaisonid);
```

Figure 4-14. Variables "Valeurs des mesures".

## Commande

De manière similaire à l'acquisition, il existe une commande pour les Switchs pouvant être réalisée en entrant la même adresse IP que précédemment suivi de « :8080/json.htm?type=command&param=switchlight&idx= » puis de l'idx du switch et finalement suivi de « &switchcmd=Off/On » (exemple : <http://178.195.188.200:8080/json.htm?type=command&param=switchlight&idx=66&switchcmd=Off>), cette adresse, une fois entrée dans la barre internet, permet de mettre le switch comportant l'idx 66 sur Off. Afin de piloter automatiquement ces relais, une fonction de commande a également été réalisée sur Qt Creator (Figure 4-15).

```
void MainWindow::setData(int idx, QString state)
{
    QString url = "http://178.195.188.200:8080/json.htm?type=cccommand&param=switchlight&idx=";
    url += QString::number(idx);
    url += "&switchcmd=" + state;

    // create custom temporary event loop on stack
    QEventLoop eventLoop;

    // "quit()" the event-loop, when the network request "finished()"
    QNetworkAccessManager mgr;
    QObject::connect(&mgr, SIGNAL(finished(QNetworkReply*)), &eventLoop, SLOT(quit()));

    // the HTTP request
    QNetworkRequest req((QUrl)url);
    QNetworkReply *reply = mgr.get(req);
    eventLoop.exec(); // blocks stack until "finished()" has been called
}
```

Figure 4-15. Fonction de commande relais.

Cette fonction permet de piloter les différents relais en entrant les paramètres (idx et état) de l'appareil en question.

Ainsi, les commandes peuvent être réalisées très facilement comme suit (Figure 4-16) :

```
setData(Switch_boilerid, "Off");
```

Figure 4-16. Exemple commande relais.

## 5 Optimisation et pilotage

### 5.1 Programme d'optimisation « basique »

#### Mise en place

Une première version d'un programme d'optimisation de l'autoconsommation a été réalisée sur le programme « Qt Creator » et codé en C++. Ce programme, relativement basique, est fondé sur l'utilisation de fonctions logiques ainsi que sur les différents paramètres intervenant dans la régulation.

Le code est paramétré de manière à exécuter le programme après chaque intervalle de temps souhaité (par exemple une minute). De cette manière, on évite des changements trop fréquents de l'activation des relais qui pourraient être endommagés en étant trop mis à contribution.

Le programme est séparé en deux parties, soit la gestion du pilotage du corps de chauffe et celui de la pompe à chaleur.

Comme évoqué précédemment, la mesure de la consommation totale n'ayant pas été possible directement, l'appareil de mesure a été placé à l'introduction de la maison. Quelques opérations ont été utiles dans le but de déterminer les valeurs des puissances de consommation instantanée ainsi que la puissance disponible à une éventuelle activation de charges supplémentaires (Figure 5-1).



```
if (puissancePV>puissanceRESEAU) {
    P_conso=puissancePV-puissanceRESEAU;
}
else {
    P_conso=puissanceRESEAU+puissancePV;
}

if (puissancePV>puissanceRESEAU) {
    P_dispo=puissancePV-P_conso;
}
else {
    P_dispo=0;
}
```

Figure 5-1. Déterminations puissances.

Une fois leurs variables définies, la puissance de consommation et la puissance disponible sont alors déterminées comme suit :

- Si la puissance de production est supérieure à celle réinjectée, cela indique qu'il y a surproduction. La consommation est donc la valeur de la puissance de production à laquelle est soustraite celle réinjectée.
- Si, dans le cas contraire, la valeur de puissance à l'introduction de la maison est supérieure à celle de production, cela signifie que la production est nulle ou simplement plus faible que la consommation. La puissance de consommation est dans ce cas-là la somme de la puissance produite (totalement autoconsommée) et de celle tirée dans le réseau.
- Si la production est supérieure à la réinjection, la puissance disponible est la différence entre les deux mesures.
- Dans le cas où aucune surproduction n'est présente, la puissance d'autoconsommation disponible est nulle.

## Corps de chauffe

```
// Attention: L'appareil mesure un offset de 5°C. Pour une valeur de consigne réelle de 60°C, la msure indique 55°C
bool condition1= (tempBoilermesure<48);
bool condition2= ((tempBoilermesure<50) && (P_dispo>4000));
bool condition3= ((tempBoilermesure<50) && (SwitchBoilerOn) && (P_dispo>=-2000));
bool condition4= (P_dispo>6000);
bool condition5= ((SwitchBoilerOn) && (P_dispo>=0));

if (condition1||condition2||condition3||condition4||condition5) {
    setData(Switch_boilerid, "On");
}
else {
    setData(Switch_boilerid, "Off");
}
```

Figure 5-2. Pilotage corps de chauffe.

La variable « SwitchBoilerOn » est une variable booléenne qui prend la valeur de 1 si l'état est ON et celle de 0 si l'état est OFF (Figure 5-2).

Il y a cinq possibilités qui permettent au corps de chauffe de s'enclencher si :

- La température de mesure est inférieure à 53°C.
- La température de mesure est comprise entre 53°C et 55°C et les mesures indiquent une surproduction de 4kW.
- La température est comprise entre 53°C et 55°C, le corps de chauffe est déjà enclenché et une surproduction d'environ 4kW (sans boiler) est présente. Autrement dit, une puissance de max 2kW peut être tirée du réseau.
- La surproduction permet de remplir à elle seule la consommation du corps de chauffe, soit 6kW.
- Le corps de chauffe est déjà en marche et la surproduction est toujours positive malgré l'état de marche du corps de chauffe

Si le corps de chauffe est en cours de fonctionnement, à la minute suivante, la puissance disponible est alors inférieure à 6 kW.

Afin d'éviter une alternance ON/OFF de minute en minute, si le corps de chauffe est déjà en marche et que la surproduction est toujours positive, cela indique qu'il y a encore la possibilité de le laisser enclencher.

Si par hasard, à un moment de la journée, les conditions météorologiques et les besoins en chaleur remplissent à la fois les conditions de mise en route de la PAC et celles du corps de chauffe, la mise en route en commun, qui pourrait demander de la puissance du réseau, durerait au maximum 1 minute avant que le corps de chauffe ne s'arrête le temps que la PAC finisse son cycle de fonctionnement.

## Pompe à chaleur

```
// Pilotage de la PAC
// permet de forcer une valeur de température élevée à l'extérieure si la température mesurée à l'intérieur est
// jugée suffisante et que la production solaire ne permet pas la mise en route de la PAC (~6.5kW)

if (((Tmaison<23)&&(P_dispo>6500)) || ((Tmaison<21)&&(P_dispo>4500)) || (Tmaison<19)) {
    setData(Text_reelleid, "On");
    setData(Text_eleveeid, "Off");
}
//Empêche de chauffer si les conditions ne sont pas remplies
else {
    setData(Text_reelleid, "Off");
    setData(Text_eleveeid, "On");
}
```

Figure 5-3. Pilotage PAC.

Pour ce qui concerne la régulation du chauffage dans la maison, trois conditions permettent à la pompe à chaleur de s'enclencher si besoin (Figure 5-3).

- Si la surproduction est suffisante à la totalité de l'alimentation de la PAC, la mise en route est permise jusqu'à l'obtention d'une température intérieure de 23°C.
- Si la surproduction est comprise entre 4,5 kW et 6,5 kW, le chauffage est permis jusqu'à une température de 21°C.
- Si la température intérieure est inférieure à 19°C, température de consigne jugée minimale pour un bon confort, la mise en route de la PAC est possible sous toutes conditions.

La PAC étant mise en route pour une durée définie selon le cycle, un faussement de température d'une minute permet à la PAC de se mettre en route. Une fois que les conditions de puissance disponible ne sont plus remplies, la PAC termine obligatoirement son cycle.

## Résultats

Les graphiques des mesures faites sur l'installation sont réalisés par un programme développé par Mr. Gilbert Morand sur Qt Creator.

Une première partie intitulée « domoticVisu » permet de faire l'acquisition des données et de créer des séries de valeurs calculées qui varient en fonction des différentes mesures. Dans le cas présent, des opérations ont été nécessaires afin de déduire la puissance de consommation et la puissance disponible en fonction de la production et de la puissance mesurée à l'introduction de la maison. Ce programme permet de générer des fichiers de résultats pour les mesures de tous les capteurs utilisés. La partie « optimisation » est également lancée depuis l'interface de « domoticVisu ». La marche à suivre pour son utilisation est visible en annexe (Annexe1).

Le deuxième programme, utile à la visualisation des mesures sous forme graphique est intitulé « watchMe ». Le mode opératoire pour utiliser et configurer ce programme se trouve en annexe (Annexe 2).

Une fois le programme de gestion et le programme d'acquisition de données enclenchés, les comportements des différents éléments deviennent observables par la suite grâce au programme « watchMe ».

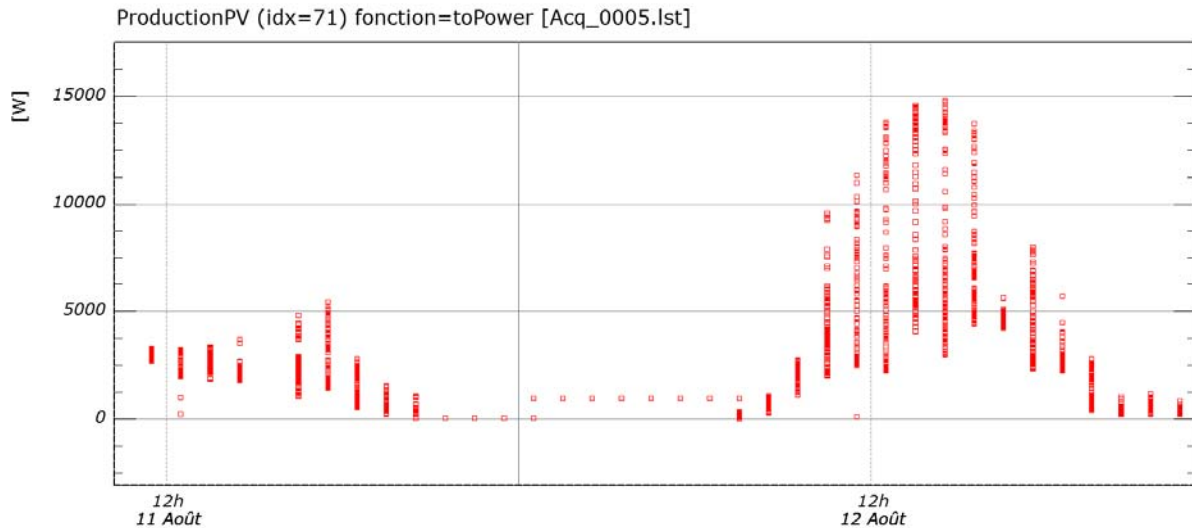


Figure 5-4. Production photovoltaïque.

Les mesures réalisées en sortie des onduleurs permettent de relever les valeurs illustrées sur le graphique (Figure 5-4). Les valeurs de puissances de production durant la nuit découlent de l'utilisation de la batterie comme expliqué au chapitre 3.

Une fois la mesure de production connue et la valeur de la puissance de consommation déterminée, il est désormais possible de déterminer quelle est la valeur de la puissance disponible, soit l'énergie produite qui n'est pas utilisée sur place (réinjectée) (Figure 5-5).

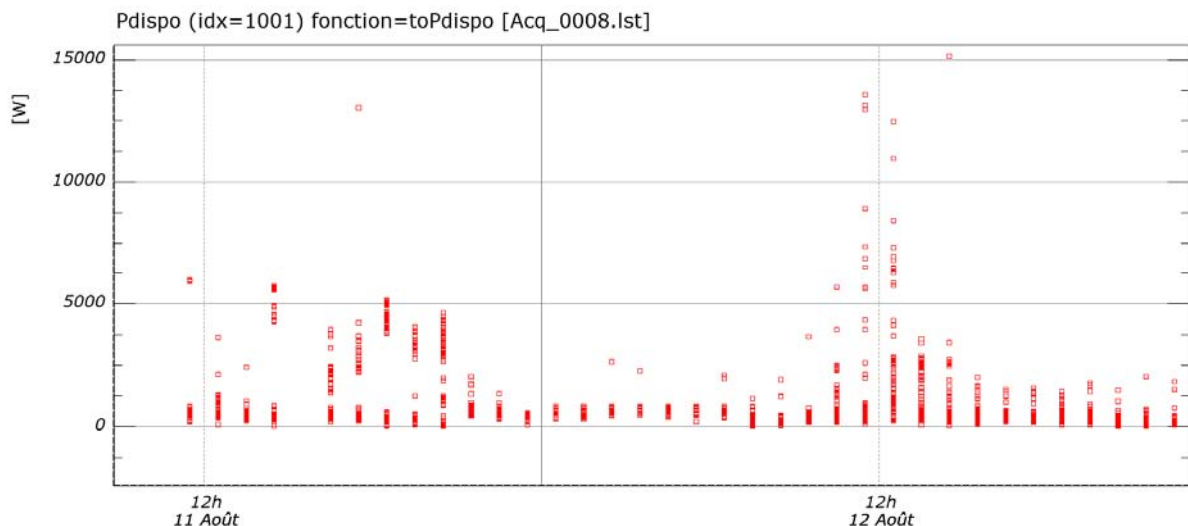


Figure 5-5. Puissance disponible.

Le rôle de l'algorithme de gestion n'est autre que de maximiser la consommation lorsque la puissance disponible est élevée. La figure suivante (Figure 5-6) illustre la mesure de la consommation avec pilotage par l'algorithme.

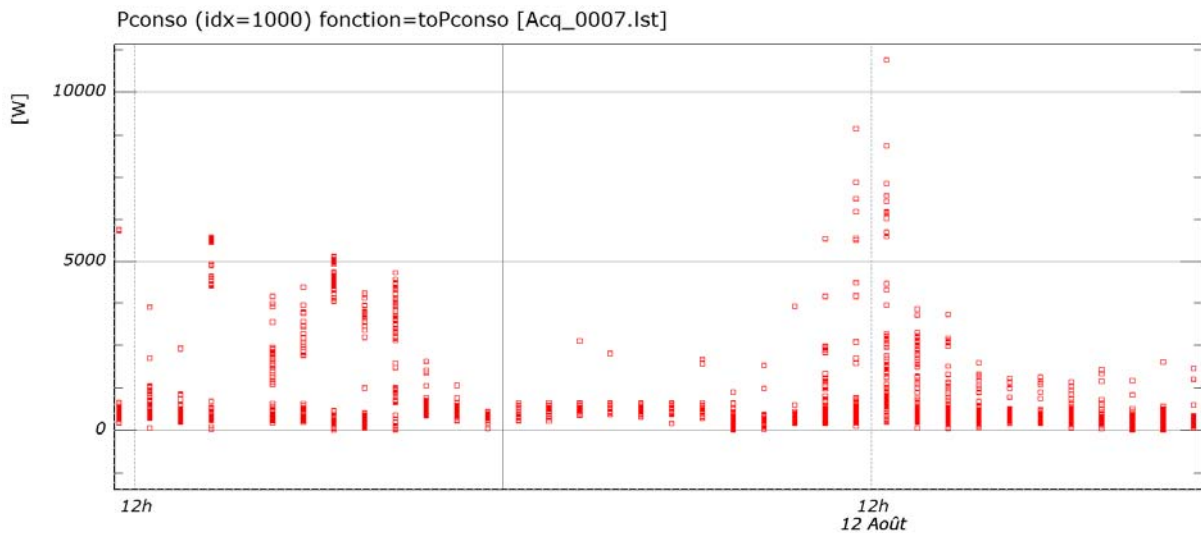


Figure 5-6. Mesure consommation totale.

En faisant le lien entre ces différents graphiques, il est observable que le profil de consommation suit relativement bien le profil de celui de la production. L'algorithme a fonctionné et cela est également observable en relevant les actions qui ont influencés ce profil de courbe de charge.

### Boiler

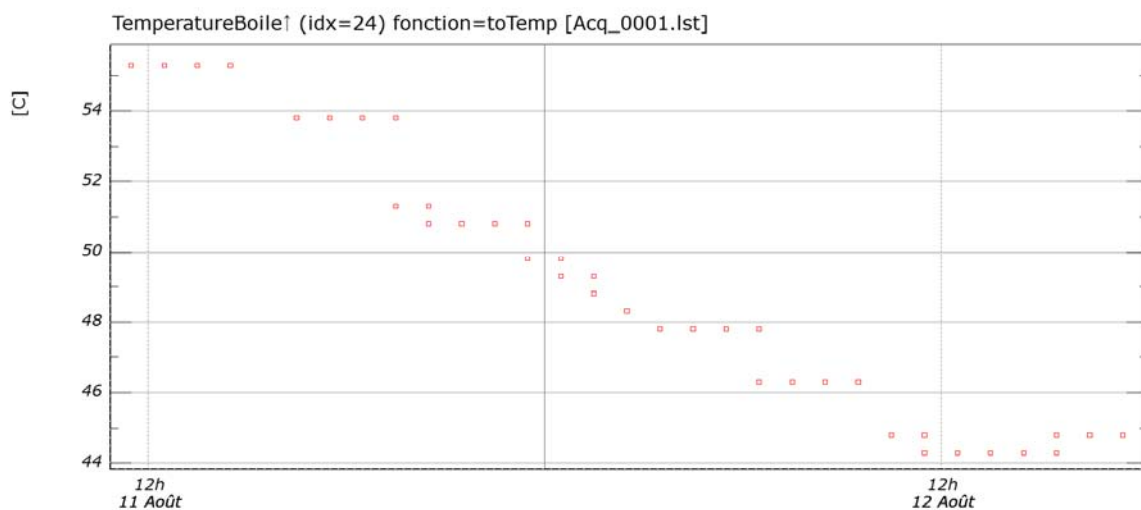


Figure 5-7. Température boiler.

La sonde de température du boiler montre en effet que le corps de chauffe permet une baisse de température lorsque la production est trop faible, voire nulle. Sur la période de mesure, la température maximale était atteinte le 11 août à midi (Figure 5-7). Par la suite, le temps peu ensoleillé de la journée n'a plus permis une autoconsommation totale, la température du boiler a alors gentiment chuté le lendemain avant de se stabiliser à sa valeur minimale et cela jusqu'au moment où l'ensoleillement a permis une augmentation de la température générée par l'autoconsommation.

## PAC

Les états des deux relais utiles à la gestion de la PAC sont observables sur les Figure 5-8 et Figure 5-9. L'état 0 signifie que le relais est en position « éteinte » et ne laisse pas passer de signal tandis que l'état 1 signifie une activation du relais en question.

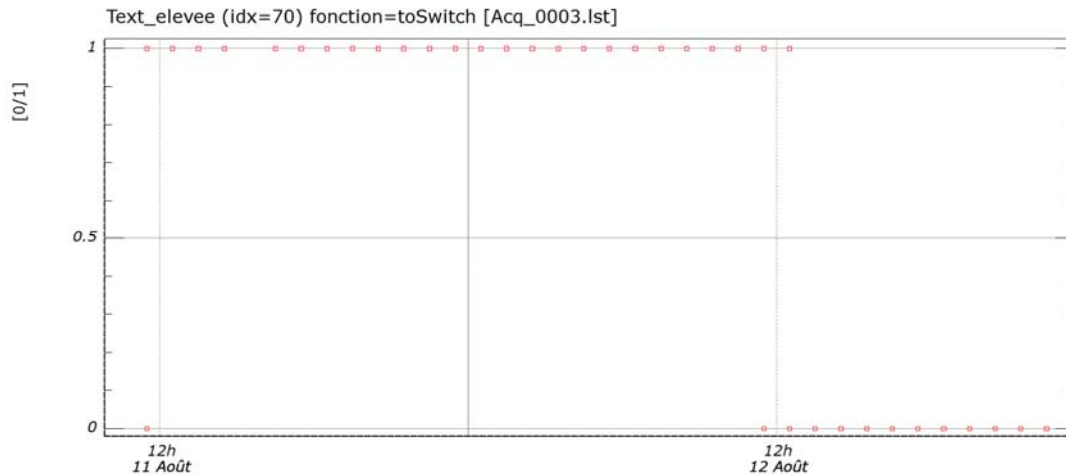


Figure 5-8 Etat relais faussement température

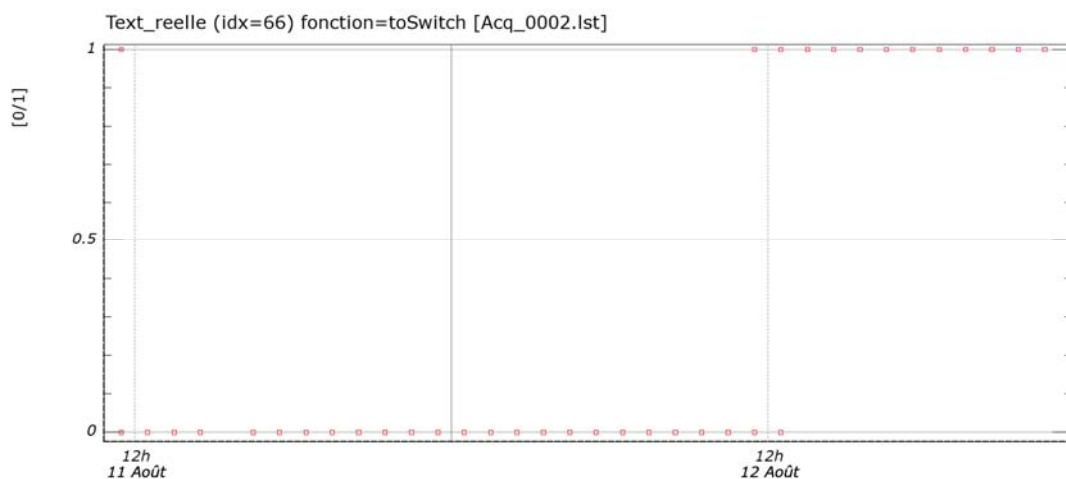


Figure 5-9 Etat relais température extérieure réelle

Durant la journée du 11 août, la température à l'intérieur était suffisante et la production était faible. L'algorithme a alors donné la consigne de simuler une mesure de température élevée. En actionnant cette consigne, la réelle mesure de la température a été remplacée par une température ne nécessitant pas de chauffage.

Jusqu'au lendemain, la température à l'intérieur de la maison a baissé et la production a atteint le stade de surproduction. L'algorithme a donc permis aux deux relais d'échanger leurs états afin d'indiquer la réelle valeur de la température extérieure au régulateur de la PAC.

Même si les relais ont permis au régulateur de lire la température extérieure réelle, le réglage principal de la pompe à chaleur n'a pas déterminé de besoin de chauffer. Cette régulation jouera un rôle plus important en période hivernale lors de grands besoins de chaleur.

## Programme d'optimisation « futur »

Bien que le programme basique réalisé permette d'augmenter de manière considérable la part d'autoconsommation, un algorithme fonctionnant comme celui simulé précédemment sur Excel (Chapitre 3) permet de garantir une gestion optimale des charges en garantissant une maximisation de l'autoconsommation.

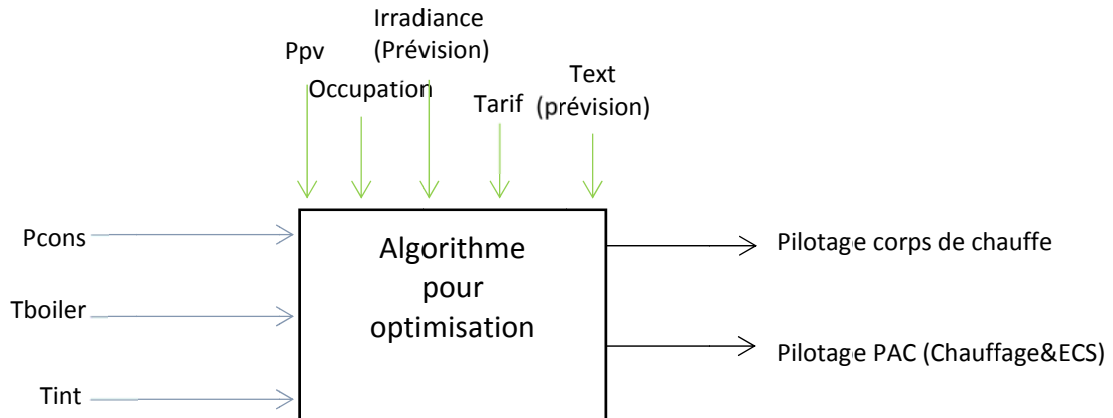


Figure 5-10. Entrées, paramètres et sortie de l'algorithme.

Le principal avantage de ce type d'algorithme est l'utilisation des prévisions météorologiques. Grâce à cela ainsi qu'aux modèles réalisés (toiture et maison), il est possible de prévoir les gains et les déperditions thermiques liés à la température extérieure, les gains solaires impliqués par les surfaces vitrées du bâtiment ainsi que la production photovoltaïque provenant des prévisions de l'irradiance sur un territoire donné.

Tous les dispositifs installés jusqu'à maintenant seront complétés, par la suite, par les éléments suivants afin de réaliser un programme final comme suit :

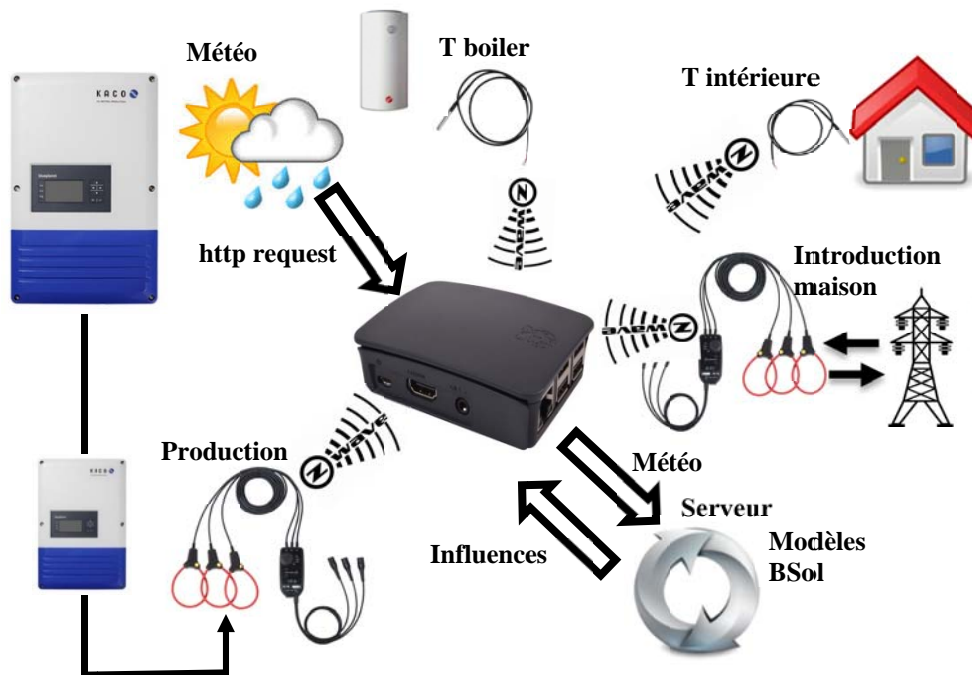


Figure 5-11. Schéma bloc algorithme idéal.



Les données météorologiques, après avoir été acquises sur un serveur par le Raspberry, sont envoyées sur un autre serveur sur lequel se trouvent les modèles BSol du bâtiment ainsi que de la toiture photovoltaïque. Une fois que les données météo sont passées dans le modèle BSol, le comportement thermique du bâtiment ainsi que la prévision de production photovoltaïque sont alors ressortis du serveur puis envoyés à nouveau au Raspberry.

Actualisés chaque quart d'heure (intervalle de temps de l'acquisition des données météo), les besoins futurs sont alors prédits pour les prochains jours (2 ou 3).

Suivant le même principe de fonction de coût que celui réalisé sur la simulation Excel, l'utilisateur détermine ses priorités à l'aide d'une interface comme celle déjà réalisée sur Qt Creator pour l'algorithme futur (Figure 5-12) :

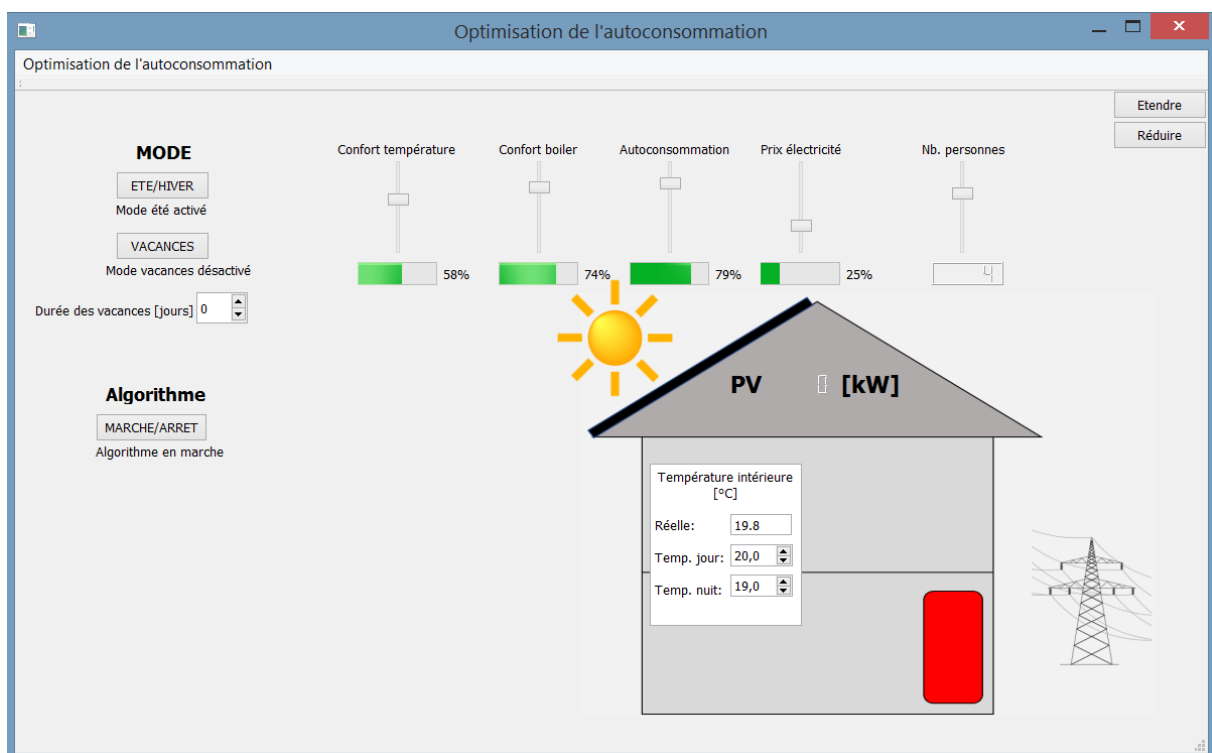


Figure 5-12 Interface futur algorithme

La planification du programme de chauffe est ensuite réalisée en tenant compte des modes et des pondérations entrés par l'utilisateur. En plus des paramètres entrés par l'utilisateur, tous les paramètres utilisés dans la simulation (Chapitre 3) dont les prévisions de production, le coût de l'électricité selon horaire, les gains solaires futurs ainsi que les déperditions futures feront désormais partie des éléments pris en compte lors de la prise de décision de la planification du programme de chauffe.



## 6 Conclusion

L'augmentation de la production d'énergie de sources renouvelables ne cessant d'augmenter, la part de production d'énergie électrique en ruban va inévitablement baisser. Les réseaux électriques suisses actuels ont été conçus pour transporter de l'énergie électrique hydraulique complétée par de l'énergie « du passé » soit de l'énergie nucléaire ou encore du charbon. Pour ces raisons, ils ne sont pas forcément prêts à supporter de fortes variations de puissances sur toutes leurs lignes en fonction des conditions météorologiques. Afin d'éviter ces éventuelles surcharges, une gestion des productions décentralisées est inévitable. Cette gestion passe soit par du stockage décentralisé, soit par une consommation simultanée à la production.

L'autoconsommation directe (sans stockage) permet non seulement d'éviter les coûts d'investissement nécessaires à l'installation de dispositifs de stockage mais également les pertes qui leur sont liées. En effet, qui dit stockage dit pertes lors des transformations du courant (DC/DC, AC/DC ou DC/AC) électrique et perte lors du stockage en lui-même (décharge non souhaitée).

Pour ces différentes raisons, l'optimisation de la part d'autoconsommation est très probablement l'avenir de la gestion de l'énergie décentralisée.

Dans ce projet, nous avons montré au moyen des graphiques réalisés, que ce système permet bel et bien de concentrer la consommation des producteurs de chaleur lorsque la production photovoltaïque le permet.

Comme la maison n'était équipée jusqu'à la réalisation de ce projet d'aucun n'appareil de mesure de consommation, aucune valeur n'a pu être utilisée pour procéder à des comparaisons. Le système de production étant, lui aussi, très récent, peu de valeurs mesurées n'ont encore pu être relevées. Pour ces raisons de manque de mesures, il n'est actuellement pas encore possible de chiffrer précisément les gains futurs. Cependant, des gains sont inévitablement attendus et pourront être augmentés par la mise en place de l'algorithme « futur » prenant plus de paramètres en compte.

La réalisation de cette installation photovoltaïque ainsi que de son système de gestion de l'énergie produite m'a permis de me familiariser aussi bien avec les aspects techniques liés à l'implémentation physique des composants de l'installation qu'avec la logique pouvant être adoptée pour une gestion optimale.

Finalement, même si de multiples modèles de gestion sont possibles pour maximiser cette part d'autoconsommation, le comportement des utilisateurs (consommateurs) joue également un rôle considérable. Le mode d'utilisation des consommateurs peut également être changé, les machines à laver et sèche-linges n'attendent désormais plus la nuit, mais le soleil.

## 7 Remerciements

Je tiens à remercier très chaleureusement tout mon entourage, aussi bien professionnel que privé, sans lequel ce projet n'aurait pu voir le jour. J'adresse mes sincères remerciements à :

- ❖ M. Gilbert-André Morand, professeur à la HES-SO, qui a su m'épauler tout au long de ce projet, en tant que responsable. Il a fait preuve d'une grande disponibilité ainsi que d'une patience exemplaire. De plus, il m'a généreusement mis à disposition différents programmes qu'il a réalisés ainsi que les librairies allant avec.
- ❖ M. Didier Baumgartner d'Eco6therm Sàrl qui m'a suivi et donné d'innombrables conseils tout au long de la réalisation de l'installation photovoltaïque et qui surtout, m'a donné goût aux énergies renouvelables, ce qui m'a mené à l'accomplissement de cette formation.
- ❖ Mon frère, Martin Maillat qui m'a grandement aidé lors de la réalisation de l'installation photovoltaïque.
- ❖ Mon père, Stéphane Maillat, qui m'a fait confiance et a accepté de réaliser et financer cette installation sur la maison familiale, sans quoi, ce projet n'aurait pu être réalisé.
- ❖ Mes amis et anciens collègues d'Eco6therm, Pascal Wälchli et Pierre-Georges Chételat ainsi que mon ami, Evan Widmer, pour les généreux coups de mains qu'ils m'ont donnés sur le toit.
- ❖ Ma copine, Marie Guélat, pour l'aide qu'elle m'a apportée aussi bien sur l'installation que pour la relecture de ce rapport.
- ❖ Ma sœur, Léa Maillat, qui a relu ce rapport et qui m'a aidé à créer une mise en page qui a permis, je l'espère, une agréable lecture de ce rapport.

## 8 Bibliographie

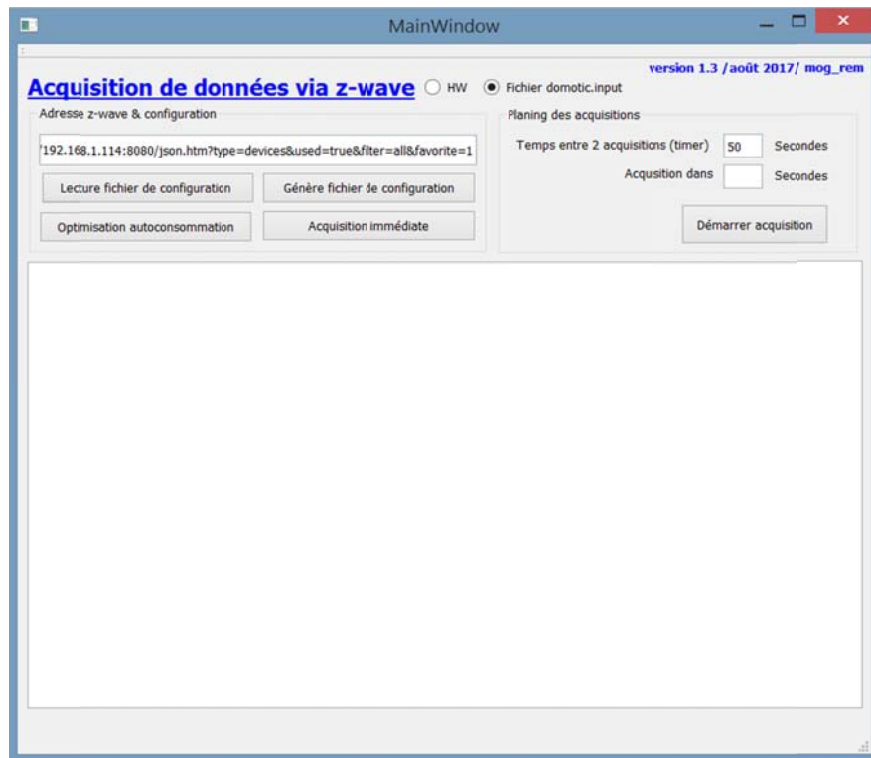
- Informations sur les pompes à chaleur :  
[http://www.fws.ch/home\\_fr.html](http://www.fws.ch/home_fr.html)  
<http://www.waermepumpe.de/>
- Aide pour Qt Creator :  
<https://doc.qt.io/qtcreator/index.html>
- L'autoconsommation :  
[http://www.vese.ch/wp-content/uploads/VESE\\_Manuel\\_optimiser\\_l\\_autoconsommation.pdf](http://www.vese.ch/wp-content/uploads/VESE_Manuel_optimiser_l_autoconsommation.pdf)
- Besoins en eau chaude sanitaire :  
<https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11314#c6039>
- Aération moyenne :  
[http://ge.ch/energie/media/energie/files/fichiers/documents/presentation\\_florentzou\\_simple\\_flux.pdf](http://ge.ch/energie/media/energie/files/fichiers/documents/presentation_florentzou_simple_flux.pdf)

## 9 Annexes

### 9.1 Annexe 1 : Utilisation domoticVisu

Le programme domoticVisu permet d'acquérir des données en temps réel mais permet également de simuler des scénarios ou de lire des données acquises auparavant.

Pour acquérir des données réelles, le curseur Hardware « HW » doit être sélectionné. Si l'on veut utiliser un scénario déjà enregistré, le curseur « Fichier domotic.input » doit être sélectionné.



Acquisition de données Z-Wave avec exécutable *domoticVisu* « HW » :

Etape 1 :

- Installer les dispositifs que l'on souhaite utiliser sur la plateforme en ligne *domoticz*
- Ouvrir le document de configuration *domoticVisu.config* à l'emplacement suivant :  
C:\ASQ\dev\domoticVisu2017\exe
- Insérer l'adresse IP du dispositif gérant les acquisitions Z-Wave

Etape 2 :

- Lancer l'exécutable de l'application *domoticVisu*
- Appuyer sur « Génère un fichier de configuration »
- Copier les éléments en jaune suivant

Ex :

Acquisition demandée[11/08/2017 à 13:50:29]

code="00000901" idx="14" name="Switch1"

code="0000901" idx="15" name="PuissanceSwitch1"

code="0A01" idx="24" name="TemperatureBoiler"

code="0000C01" idx="31" name="P\_conso"

Etape 3 :

- Se rendre dans le fichier acquis.defConfig à l'adresse suivante :  
C:\ASQ\dev\domoticVisu2017\exe\Data
- Entrer les configurations propres aux dispositifs utilisés en collant la sélection copiée à l'étape 2 comme suit :

```
#   code=      idx=      name=      dec1=      tRep=      unit1=
#=====
#=====
<config code="00000901"      idx="14"      name="Switch1"      dec="toSwitch"      tRep=600
  unit="0/1" />
<config code="0000901"      idx="15"      name="PuissanceSwitch1"      dec="toPower"      tRep=600
  unit="W" />
<config code="0A01"      idx="24"      name="TemperatureBoiler"      dec="toTemp"      tRep=600
  unit="C" />
<config code="0000C01"      idx="31"      name="P_conso"      dec="toPower"      tRep=600      unit="W"
/>
```

- Attention à bien se référer aux fonctions et aux unités propres aux dispositifs de mesures (éléments surlignés en rouge)

Etape 4 :

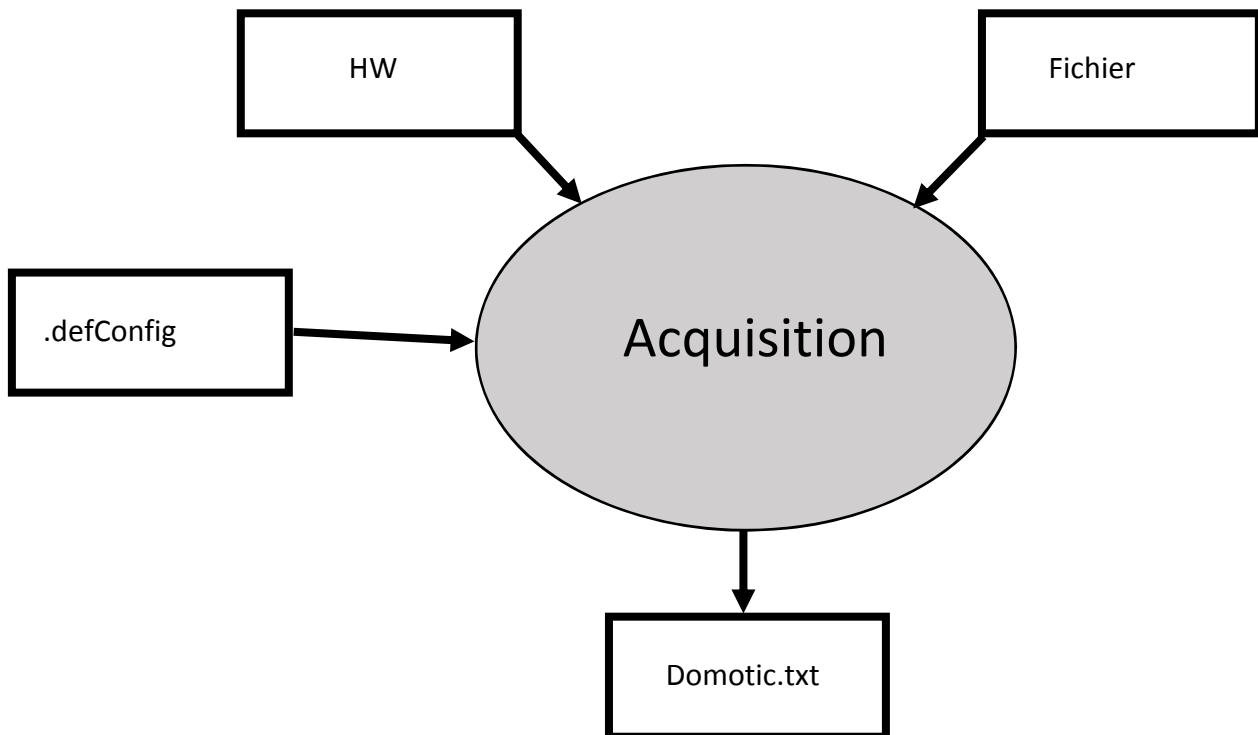
- Vérifier en appuyant sur « Lecture fichier de configuration ». Si les dispositifs de mesure apparaissent, l'acquisition peut alors commencer
- Les mesures seront alors écrites dans des dossiers différents pour chaque capteur à l'endroit où se trouve le fichier de configuration

Rejouer un scénario déjà enregistré « Fichier domotic.input » :

Si les dispositifs simulés sont les mêmes que les réels enregistrés, les valeurs voulant être rejouée doivent être placée dans le fichier domotic.input à l'adresse C:\ASQ\dev\domoticVisu2017\exe\domotic.input.

La lecture pas à pas des acquisitions déjà réalisées simule la prise de mesures réelles.

Le programme est réalisé comme suit :



S'il est nécessaire de déterminer des valeurs découlant d'opérations entre différentes mesures comme pour déterminer une puissance de surproduction en ayant une mesure de production et une mesure de consommation ( $P_{surprod} = P_{prod} - P_{conso}$ ), procéder de la manière suivante :

Un nouveau « point de mesure » fictif doit être introduit dans le fichier de configuration à l'adresse suivante : C:\ASQ\dev\domoticVisu2017\exe\data\acquis.defConfig. Entrer manuellement les noms des variables voulant être calculée.

```

#   code=      idx=      name=          dec1=      tRep=      unit1=
#=====
<config code="00000F01" idx="54" name="SwitchCorpsChauffe" dec="toSwitch" tRep=600 unit="[0/1]" />
<config code="0A01" idx="24" name="TemperatureBoiler" dec="toTemp" tRep=600 unit="[C]" />
<config code="00001001" idx="66" name="Text_reelle" dec="toSwitch" tRep=600 unit="[0/1]" />
<config code="00001002" idx="70" name="Text_elevee" dec="toSwitch" tRep=600 unit="[0/1]" />
<config code="0001201" idx="87" name="Pintroduction" dec="toPower" tRep=600 unit="[W]" />
<config code="0001101" idx="71" name="ProductionPV" dec="toPower" tRep=600 unit="[W]" />
<config code="0D01" idx="51" name="TempMaison" dec="toTemp" tRep=600 unit="[C]" />
<config code="CALCULE" idx="1000" name="Pconso" dec="toPconso" tRep=600 unit="[W]" />
<config code="CALCULE" idx="1001" name="Pdispo" dec="toPdispo" tRep=600 unit="[W]" />
#
  
```



Entrer le code « CALCULE », imposer un idx supérieur ou égal à 1000, nommer la mesure comme souhaité, mettre le nom de la fonction correspondante intitulée dans le code sous « dec » et vérifier que les unités soient les bonnes.

Une fois ces ajouts réalisés, se diriger sur Qt Creator dans le .cpp de domoticVisu.

Exemple pour la réalisation de la mesure calculée de la puissance consommée :

```

ir = strcmp(dec,"toPconso");
if(ir==0){ trouve = 1;
    mes.idx = mesConfig[ipc].idx;

    ir = GetValue(this->lastAcquis[5].data,mesConfig[5].fonction,&value,unit);
    Pprod = value;

    ir = GetValue(this->lastAcquis[6].data,mesConfig[6].fonction,&value,unit);
    Pintro = value;

    if(Pprod > Pintro){
        Pconso = Pprod - Pintro;
    }
    else {
        Pconso = Pprod + Pintro;
    }

    sprintf(mes.sunRise,"%s",this->lastAcquis[5].sunRise);
    sprintf(mes.sunSet,"%s",this->lastAcquis[5].sunSet);
    mes.timeStamp = this->lastAcquis[5].actTime;
    sprintf(mes.timeStampStr,"%s",this->lastAcquis[5].serverTime);
    mes.value = Pconso;
    testTime = ReturnDateTime70(this->lastAcquis[5].serverTime,"a/m/j") - 3600;
    sprintf(mes.timeStampLastStr,"%s",this->lastAcquis[5].lastUpdate);
    mes.timeStampLast = ReturnDateTime70(this->lastAcquis[5].lastUpdate,"a/m/j")-3600;
    sprintf(mes.unit,"W");
    sprintf(mes.measureStr,"%6.0f W",Pconso);

    // dump dans la fenêtre
    sprintf(txt,"=>%s->lastUpdate=%s idMes=%02d idx=%02d [CALCULER]Pconso=%6.0f",
        this->lastAcquis[5].serverTime,
        mes.timeStampLastStr,
        mes.idMes,
        mes.idx,
        Pconso);
    ui->pteListeAcquisition->appendPlainText(txt);
  
```

Une fois la nouvelle fonction déclarée, introduire les valeurs utiles afin de déterminer le résultat.

La variable Pprod est créée par la fonction GetValue avec l'identifiant qui lui correspond (ici le 5)

Les identifiants propres aux points de mesures sont les numéros de lignes en partant de 0 depuis le premier point d'acquisition.

```

<acquisition>
<times act="1502281364" server="2017-08-09 14:22:44" sunrise="06:20" sunset="20:50" />
<measures i="0" imax="7" name="TemperatureBoiler" id="0A01" idx="24" subtype="LaCrosse_TX3" lastupdate="2017-08-09 14:14:07" data="55.4 C" />
<measures i="1" imax="7" name="TempMaison" id="0D01" idx="51" subtype="WTGR300" lastupdate="2017-08-09 14:14:13" data="23.1 C, 48 °" />
<measures i="2" imax="7" name="SwitchCorpsChauffe" id="0000F01" idx="54" subtype="Switch" lastupdate="2017-08-09 14:19:24" data="On" />
<measures i="3" imax="7" name="Text_reelle" id="00001001" idx="66" subtype="Switch" lastupdate="2017-08-09 14:14:32" data="Off" />
<measures i="4" imax="7" name="Text_elevee" id="00001002" idx="70" subtype="Switch" lastupdate="2017-08-09 14:14:32" data="Off" />
<measures i="5" imax="7" name="ProductionPV" id="0001101" idx="71" subtype="Electric" lastupdate="2017-08-09 14:22:43" data="3424.6 Watt" />
<measures i="6" imax="7" name="Pintroduction" id="0001201" idx="87" subtype="Electric" lastupdate="2017-08-09 14:22:44" data="2933.5 Watt" />
</acquisition>
  
```

La position de Pprod est donc 5 et celle de Pintro est 6.










Comme la mesure calculée ne possède aucune information supplémentaire comme l'heure d'acquisition, le dernier update etc., il est nécessaire de lui donner des informations afin

d'être enregistré sous la même forme que les acquisitions réelles. C'est pourquoi la succession de « sprintf » affichent les valeurs découlant de la mesure de la production qui doivent être relativement similaires.

Les différentes opérations peuvent être réalisées pour calculer la mesure voulant être enregistrée.

Finalement, une fois les fonctions déclarées, les éventuels calculs effectués, le programme est prêt à créer un fichier de résultats identiques à celui des mesures réelles. Pour un nombre d'acquisitions donné, il est alors possible d'obtenir plus de fichier de résultats à l'adresse : C:\ASQ\dev\domoticVisu2017\exe\Data

Ces fichiers se présentent comme suit :

|   |                  |             |       |
|---|------------------|-------------|-------|
|  Acq_0000.lst  | 11.08.2017 15:10 | Fichier LST | 5 Ko  |
|  Acq_0001.lst  | 11.08.2017 15:10 | Fichier LST | 3 Ko  |
|  Acq_0002.lst  | 11.08.2017 15:10 | Fichier LST | 5 Ko  |
|  Acq_0003.lst  | 11.08.2017 15:10 | Fichier LST | 5 Ko  |
|  Acq_0004.lst  | 11.08.2017 15:11 | Fichier LST | 12 Ko |
|  Acq_0005.lst  | 11.08.2017 15:11 | Fichier LST | 10 Ko |
|  Acq_0006.lst  | 11.08.2017 15:10 | Fichier LST | 3 Ko  |
|  Acq_0007.lst  | 11.08.2017 15:11 | Fichier LST | 12 Ko |
|  Acq_0008.lst | 11.08.2017 15:11 | Fichier LST | 12 Ko |

Les acquisitions peuvent être réalisées manuellement en appuyant sur « Acquisition immédiate » ou peuvent être générées par le timer situé en haut à droite de l'interface homme machine.

## Optimisation autoconsommation

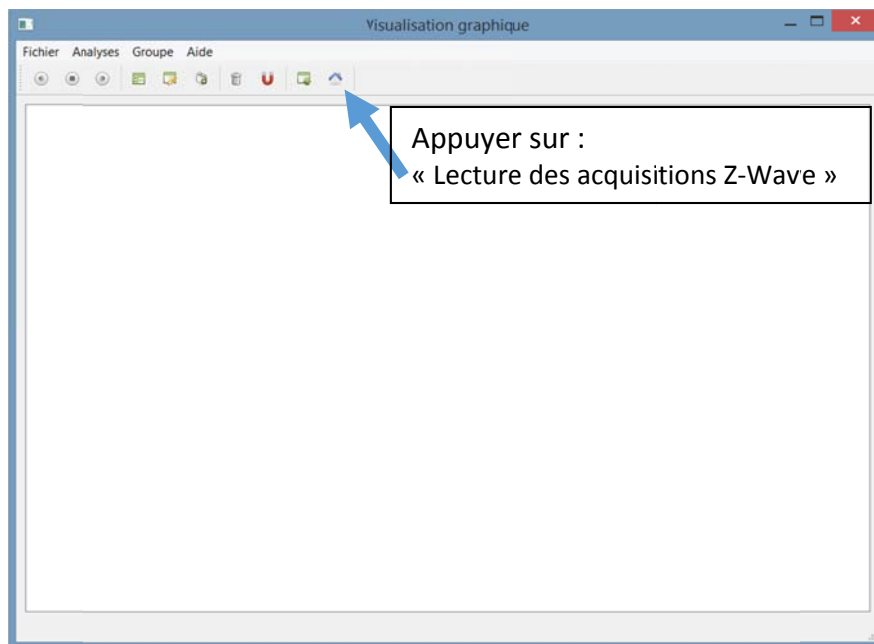
Avant de lancer la gestion du système en appuyant sur le bouton « Optimisation autoconsommation » les dispositifs Z-Wave doivent auparavant être initialisés en suivant les démarches décrites au chapitre 4 du rapport.

## 9.2 Annexe 2 : Utilisation watchMe

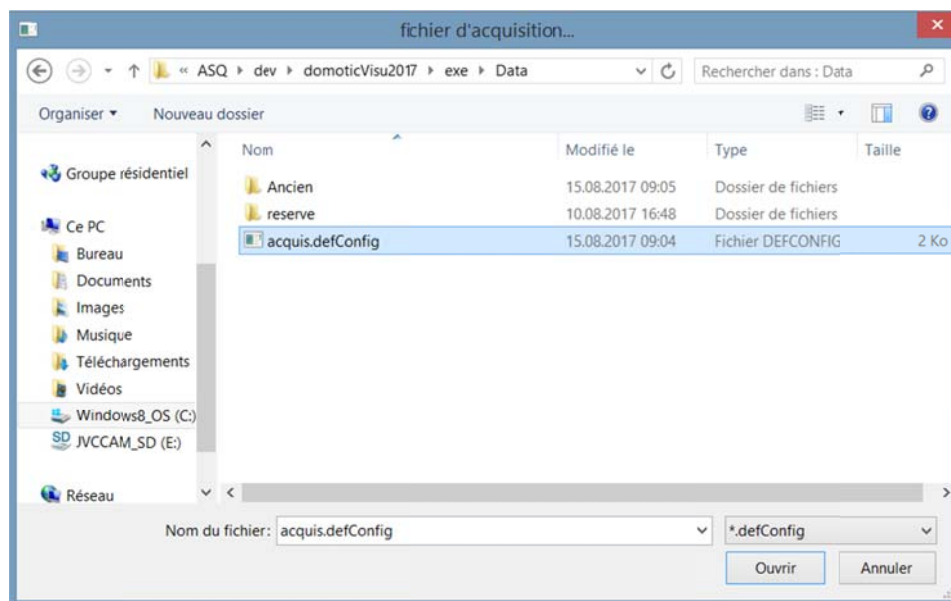
Le programme « watchMe » permet de réaliser des graphiques à partir de mesures. Avec les acquisitions réalisées à l'aide du programme « domoticvisu », il est possible de réaliser tous les graphiques associés aux mesures. De plus le programme « watchMe » permet de réaliser diverses opérations à partir des mesures. Pour utiliser le « watchMe », procéder comme suit :

Afin de lancer le programme, il est possible de compiler le code directement à partir de Qt Creator ou alors de lancer l'exécutable depuis « watchMe.exe » présent à l'adresse « C:\ASQ\dev\watchMe2017 ».

Une fois l'application lancée :

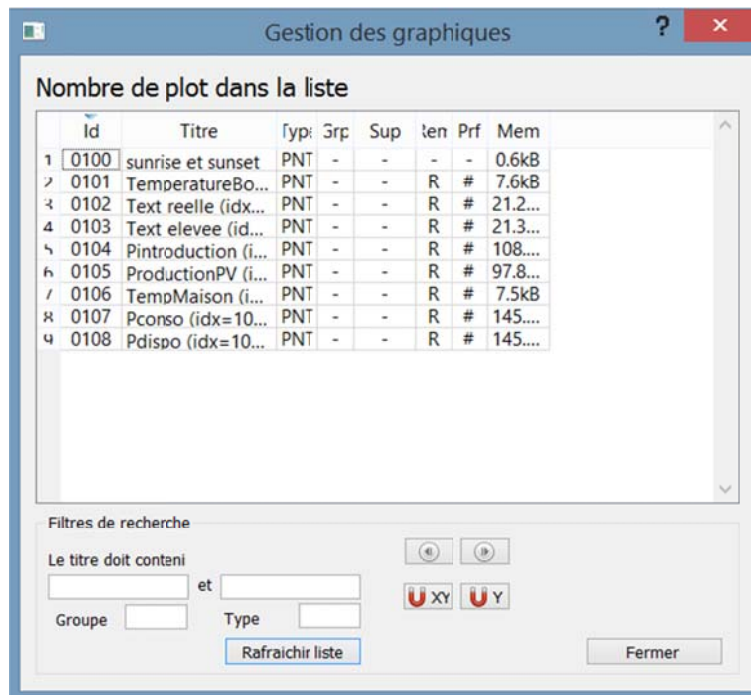


Indiquer le fichier de configuration à l'adresse indiquée sur l'image suivante :



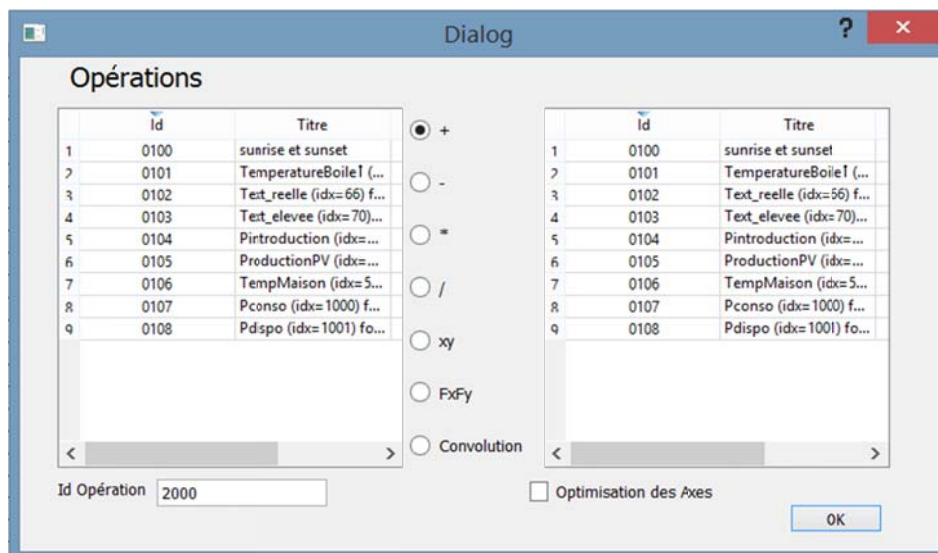
Après avoir cliqué sur « ouvrir », l'onglet « Editer la liste des plot » dans la barre d'outils de l'application peut être cliqué à son tour.

La liste des apparaîît alors comme suit :



Les graphiques sont désormais disponibles.

Si des opérations veulent être réalisées, l'onglet « Opérations » permet de faire des manipulations sur les différents graphiques comme comme suit :



Sélectionner une série de mesures à gauche, choisir l'opérations à faire, indiquer avec quelle série de mesures réaliser l'opération.

Un clic droit sur un graphique permet de réaliser des images de graphiques, des projections sur les axes désirés, de gérer la représentation, de tracer des courbes ou des droites etc.

### 9.3 Annexe 3 : Codes VBA Excel

```
Module1 - 1

Function Autoconsommation(Production, Pdecharge, Consommation)

If ((Production + Pdecharge) < Consommation) Then
    Autoconsommation = (Production + Pdecharge)
Else
    Autoconsommation = Consommation
End If

End Function

Function DateSelonHeure(Heure, date_en_nb_jour)

DateSelonHeure = Heure / 24 + date_en_nb_jour

End Function

Function CoutRevenu(Production, Consommation, TarifH, TarifE, Hact, Hmat, Hsoir, Tarifrachat)

If ((Production < Consommation) And (Hmat <= Hact) And (Hact < Hsoir)) Then

    CoutRevenu = -(Consommation - Production) * TarifH

End If

If ((Production < Consommation) And ((Hact < Hmat) Or (Hsoir <= Hact))) Then

    CoutRevenu = -(Consommation - Production) * TarifB

End If

If (Production > Consommation) Then

    CoutRevenu = (Production - Consommation) * Tarifrachat

End If

End Function
```



```

End If
End Function

Function PChargedispo(Pchargemax, ConsoTOT, ProdPVtot, ProdPV18)
If (ConsoTOT > ProdPVtot) Then

    PChargedispo = 0
Else
    If (ProdPVtot - ConsoTOT <= ProdPV18) Then
    PChargedispo = ProdPVtot - ConsoTOT
Else
    If (ProdPV18 <= Pchargemax) Then
    PChargedispo = ProdPV18
Else
    PChargedispo = Pchargemax

    End If

End If

End If
End Function

```

```

Module1 - 2

Function CapaBatterie(rendement, CapaTOT, CapaAncienne, Pcharge, Pdecharge)
CapaBatterie = CapaAncienne + Pcharge - Pdecharge

End Function

Function Pdécharge(Pconso, PprodPV, Pdécharge_max, Ebatterie_avant)

If (Pconso > PprodPV) And (Ebatterie_avant > 0) Then
    If (Pconso - PprodPV > Pdécharge_max) Then
    Pdécharge = Pdécharge_max
    Else
    Pdécharge = Pconso - PprodPV
    End If

End If

If (Pdécharge > Ebatterie_avant) Then
Pdécharge = Ebatterie_avant
End If

End Function

```



#### 9.4 Annexe 4 : Documents Excel algorithme d'optimisation

Les différents fichiers Excel réalisés se trouvent sur le DVD en annexe.

#### 9.5 Annexe 5 : Codes et bibliothèques Qt Creator

Les différents codes ainsi que toutes les bibliothèques utiles à la mise en place de l'algorithme se trouvent sur le DVD annexé.

#### 9.6 Annexe 6 : Montage vidéo de l'installation photovoltaïque

Le montage vidéo de la réalisation de l'installation photovoltaïque se trouve sur le DVD en annexe et est visible en suivant le lien suivant :  
<https://www.youtube.com/watch?v=MLTFUKCNjG8&feature=youtu.be>

#### 9.7 Annexe 7 : Fichiers modélisation BSol (maison&toiture)

Les deux fichiers des modélisations BSol de la maison et de la toiture photovoltaïque ainsi que le fichier météo de Rebeuvelier se trouvent sur le DVD annexé.