

0

 Institut Systèmes industriels
Institut Systemtechnik

Programme d'acquisition de données

« xServer »
« dataHub & watchData »
« domoticVisu »

Version 1.0 / juin 2018

Version 2.0 / septembre 2020

Version 3.0 / octobre 2020

Version 3.1 / janvier 2021

Version 3.2 / mars 2021

Version 3.3 / avril 2021



Gilbert Morand

Table des matières

1.	Introduction	3
2.	Architecture logicielle du système développé	4
2.1.	Architecture à trois niveaux d'information	4
2.2.	La couche d'accès aux données (hardware).....	6
2.3.	Communication avec les capteurs hardware	8
2.4.	Les serveurs	9
2.5.	Principes de fonctionnement	12
2.6.	Configuration	14
2.7.	La couche de traitement des données.....	18
2.8.	La couche de présentation des données.....	21
3.	Mesure de la performance d'une pompe à chaleur (COP)	22
3.2.	Définition et mesure du COP	22
3.3.	Traitement des données	28
3.4.	De la mesure au processus.....	34
3.5.	Résultats obtenus	39
3.6.	Interface web pour visualiser les données	42
4.	Bilan des quatre premières installations.....	44
5.	Conclusion, remarques, best practices et suite à donner.....	50
6.	Annexes	55
5.1	Installation et configuration	56
6.2.	Backup/restore de l'installation	57
5.3	Accès aux fichiers par FTP	58
5.3	VNC : accès à distance	59
5.4	Installations	61
1.	Liste des figures	61
2.	Références.....	62
	Bibliographie.....	62

1. Introduction

Besoins et objectifs



L'objectif de ce papier est de présenter un système à bas coût qui permet :

- d'acquérir des données physiques
- de commander ou de piloter des acteurs
- de visualiser l'information (reporting et graphiques)
- de superviser des installations (visualisation des données dans un navigateur internet).

Le système développé se base, pour l'acquisition des données sur l'utilisation de Raspberry pi, de son bus 1-fil [1] ainsi que des capteurs et acteurs répondant à la norme z-wave [2].

Le système se veut ouvert et évolutif, simple, fiable et robuste. Il sera mis en place dans le domaine de la domotique et plus particulièrement dans la gestion des énergies et du confort dans la maison.



La mise en place de ce système permettra, entre-autres :

- d'augmenter l'autoconsommation d'un « producteur-consommateur »
- de gérer le chauffage d'un bâtiment sur la base de mesures physiques
- de mesurer les performances d'installations

Suite logicielle et système d'exploitation



Les programmes développés s'intègrent dans une architecture logicielle, pour laquelle le principe des trois tiers [3] a été pleinement respecté.

Les logiciels ont été développés avec l'outil QT Creator [4]. Ils fonctionnent donc sur toutes les plateformes sur lesquelles QT peut être déployé.

Il s'agit des plateformes :

- PC-window,
- raspberry pi,
- mac,
- smart phone.

2. Architecture logicielle du système développé

2.1. Architecture à trois niveaux d'information

Trois niveaux d'information

La suite logicielle présentée ici, acquiert des données physiques, les analyse, puis les présente.
L'architecture mise en place, comme le montre le schéma suivant, est une architecture à trois tiers ou à trois niveaux.
Tous les niveaux de programmation sont codés en C/C++.

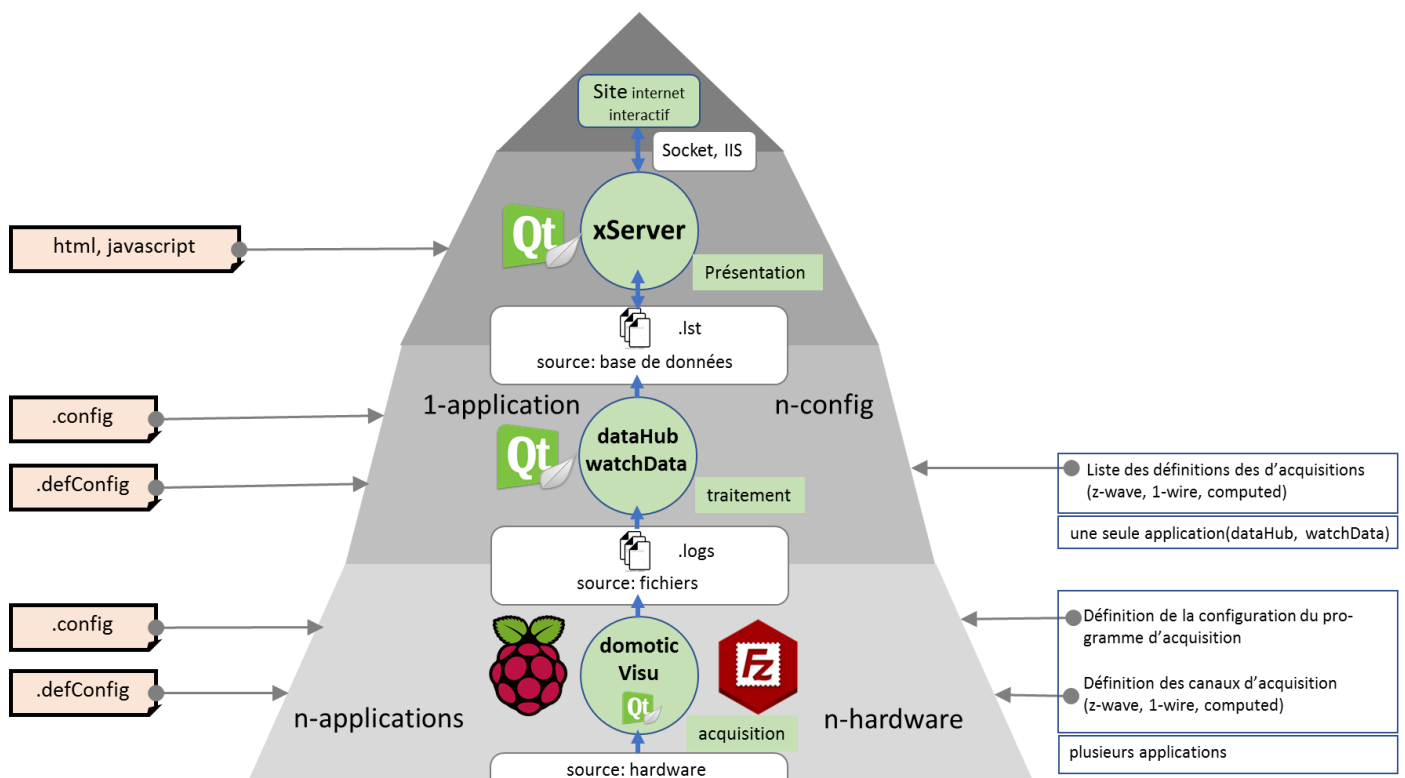


Figure 1 : Architecture et applications logicielles.

On reconnaît comme montré sur la figure 2 :

- la couche de présentation (**niveau présentation**) exploite l'application serveur développée (xServer) pour accéder à l'information. La technologie Javascript est utilisée pour la mise en forme des données dans le site internet mis en place pour la visualisation des données (<http://teneo.ddns.net>).

- le niveau de traitement des données (**process**) déploie les fonctionnalités suivantes :
 - 1) surveiller la réception des fichiers envoyés par les différentes acquisitions réparties dans le Valais central (dataHub), stocker l'information des n-installations, organiser les données dans une base de données.
 - 2) analyser de manière fine les données d'un système d'acquisition en générant des tableaux et des graphiques pertinents.
- la couche d'accès aux données (**niveau hardware**). Chaque instance de domoticVisu (avec son fichier de configuration) assure l'acquisition et le transfert des données (FTP) vers le serveur qui récolte les données de toutes les instances.

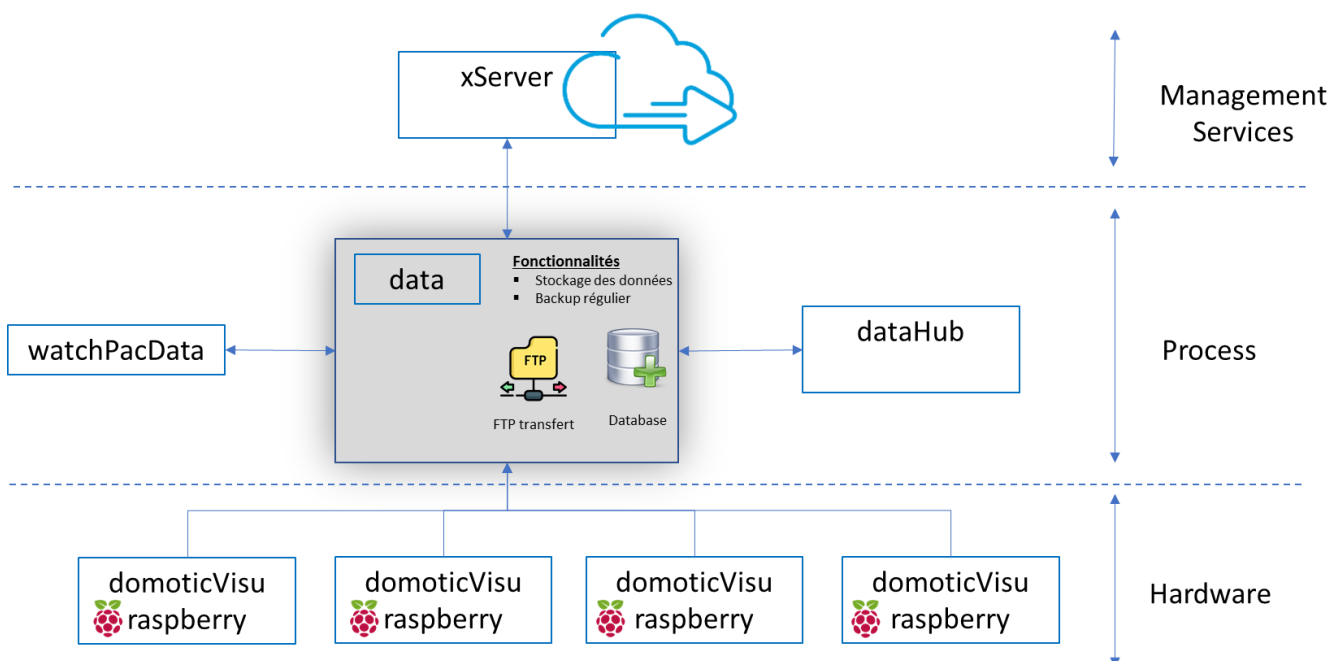


Figure 2 : Les trois niveaux d'information.



2.2 La couche d'accès aux données (hardware)

Le Raspberry pi

Le Raspberry Pi [5](figure 3) est un nano-ordinateur monocarte à processeur ARM de la taille d'une carte de crédit. Il est peu gourmand en électricité (~5 W) et offre une bonne fiabilité à bas prix (moins de 100 CHF par unité).



Figure 3 :Raspberry pi en format carte de crédit.

La tendance : http request

De plus en plus des systèmes basés sur des Raspberry Pi tournent des serveurs qui répondent à des requêtes http. Le principe de base est montré dans la figure 4.

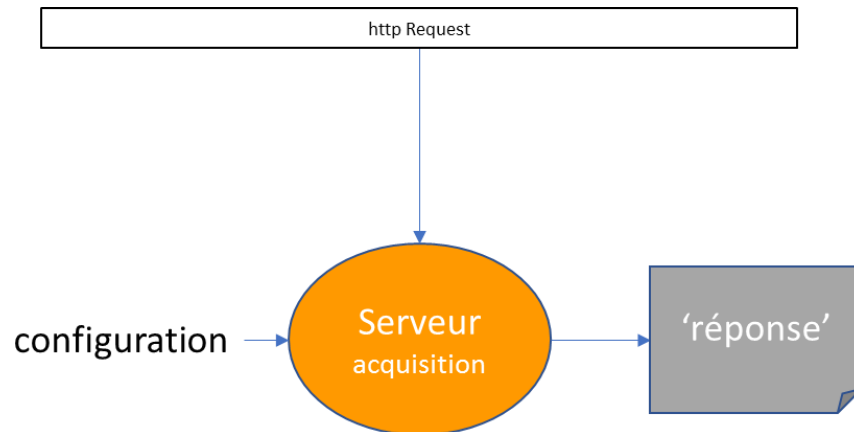


Figure 4 : Schéma de principe d'une requête http sur un serveur.

Serveurs accèdent aux hardware

Le système présenté se base sur l'utilisation d'un Raspberry pi, sur lequel nous exploitons :

- un serveur domoticz [6],
- un serveur one-wire [7].

Le logiciel « **domoticVisu** » gère les données acquises par les deux serveurs pré-cités.

Les données acquises sont stockées localement sur la carte micro SD du Raspberry. Régulièrement les données acquises sont exportées sur un serveur distant. Ce principe assure aux données la sécurité nécessaire.

Fonctionnalités de la couche qui accède aux données

Les fonctionnalités, gérées par la couche d'accès aux données (**domoticVisu**), sont :

- Interroger à intervalle régulier les serveurs (domoticz et one_wire) en envoyant une requête http à ces serveurs.
- Recevoir les données, les filtrer, les stocker dans une base de données, créer des fichiers « log ».
- Relire des fichiers « log » pour retraiter des données déjà acquises.
- Echanger des fichiers « logs » avec un serveur pour sécuriser les données (FTP).
- Agir par une commande (par callback).
- Décoder les fichiers générés par les serveurs
- Calibrer les canaux lus

La figure 5 présente l'architecture mise en place au niveau hardware.

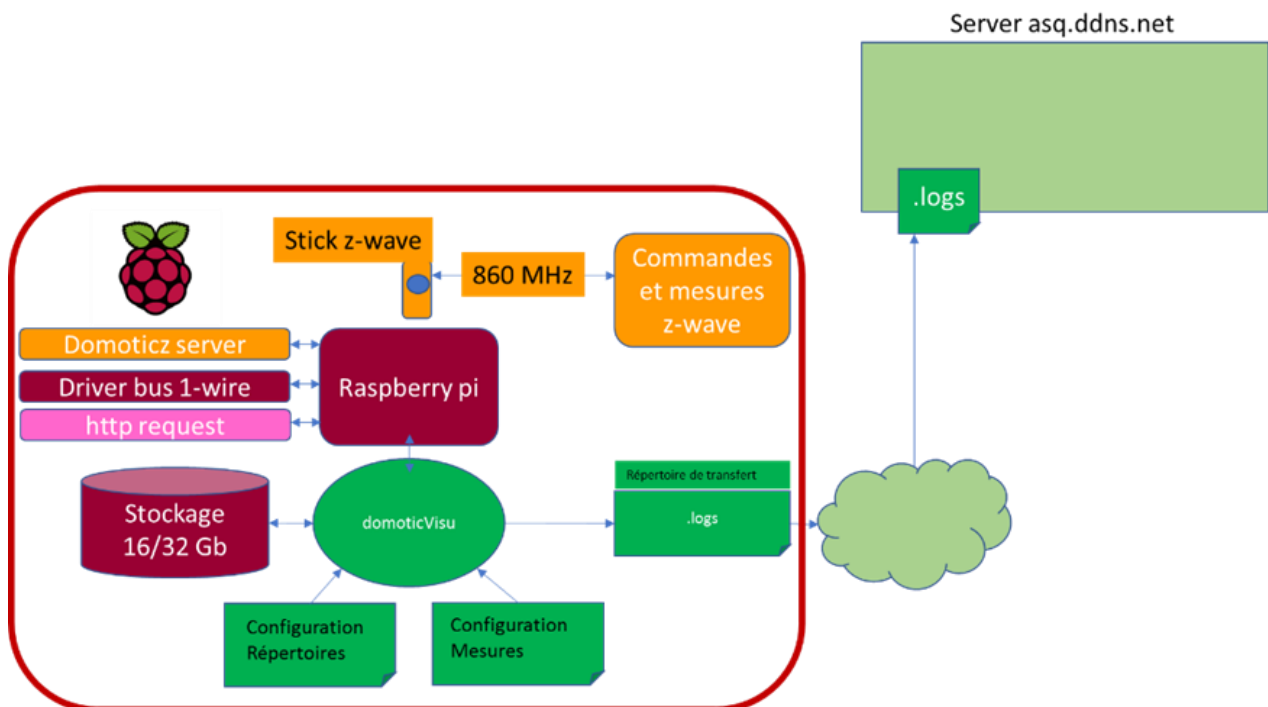


Figure 5: Architecture logicielle et matérielle.

Applications logicielles

Le niveau hardware comporte plusieurs instances qui fonctionnent sur n-hardware différents. Les données récoltées, par le niveau hardware, sont régulièrement envoyées au niveau process.

Au niveau process, les données sont mises en forme, recalibrées si nécessaire, consolidées au besoin, puis stockées dans une base de données.

Pour gérer l'information, plusieurs applications, ont été écrites.

dataHub résume statistiquement les données stockées.

watchData permet d'isoler, suivant l'espace temporel désiré, les données stockées de la base de données, et de les représenter graphiquement.

xServer met en forme les données pour une représentation dans un navigateur internet.

2.3 Communication avec les capteurs hardware

Radio à 868 Mhz

Le Z-Wave est un protocole de communication sans fil. Il utilise les fréquences radio (868 Mhz) pour établir les communications. Il permet donc à 2 composants électroniques Z-Wave de discuter ensemble pour échanger des informations. Ces informations peuvent être des données (relevé de température...), des ordres (ordre ON ou OFF...), des statuts (« je suis enclenché » ...).

Comme tout signal RF sans fil, la portée d'un signal Z-Wave est très fortement influencée par l'environnement dans lequel il est émis. Les murs par exemple freinent sa progression dans les airs. On a l'habitude de considérer que le signal Z-Wave dans une résidence classique a une portée de 30 mètres à l'intérieur et de plus de 100 mètres à l'extérieur en plein air [8].

Le contrôleur z-stick

Le contrôleur Z-stick centralise les données sur le Raspberry-pi.

Les liens entre le contrôleur et les nœuds sont conservés dans la mémoire interne du contrôleur, on appelle cela, la topologie réseau.

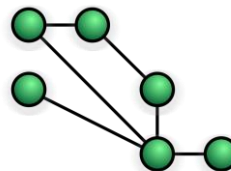


Figure 6 : Z-stick avec son interface USB.

2.4. Les serveurs

Domoticz et son serveur



Domoticz travaille sur ce principe. Il met en jeu un serveur Domoticz sur Raspberry ou sur PC. Le serveur Domoticz répond aux requêtes qui lui sont envoyées.

Le serveur « Domoticz » est atteignable avec la commande suivante, écrite dans la barre de navigation de n'importe quel navigateur internet :

<http://localhost:8080>

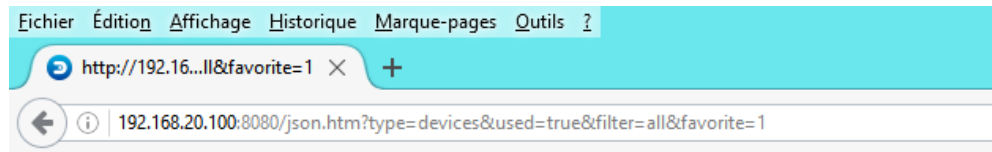
ou par l'adresse ip comme

<http://192.168.20.13:8080>

Le serveur gère les données (mesures des capteurs et commandes des actuateurs) qui passent par un « z-stick » répondant au standard « z-wave ».

Exemple de requête pour Domoticz

Par une entrée sur la barre d'adresse d'un navigateur, en indiquant d'une part l'adresse ip de la machine où tourne le serveur Domoticz et d'autre part le port, ici le 8080, le serveur va répondre à la requête.



Réponse de Domoticz

Le serveur Domoticz répond alors en format JSON

```
{
  "ActTime" : 1510122007,
  "ServerTime" : "2017-11-08 07:20:07",
  "Sunrise" : "07:26",
  "Sunset" : "17:04",
  "result" : [
    {
      "AdjMulti" : 1.0,
      "AdjMulti2" : 1.0,
      "AdjValue" : 0.0,
      "AdjValue2" : 0.0,
      "BatteryLevel" : 100,
      "CustomImage" : 0,
      "Data" : "0 Lux",
      "Description" : "",
      "Favorite" : 1,
      "HardwareID" : 2,
      "HardwareName" : "Z-stick",
      "HardwareType" : "OpenZWave USB",
      "HardwareTypeVal" : 21,
      "HaveTimeout" : false,
      "ID" : "0000203",
      "LastUpdate" : "2017-11-08 07:19:39",
      "Name" : "lux_salon",
      "Notifications" : "false",
      "PlanID" : "0",
      "PlanIDs" : [ 0 ],
      "Protected" : false,

```

```

        "ShowNotifications" : true,
        "SignalLevel" : "-",
        "SubType" : "Lux",
        "Timers" : "false",
        "Type" : "Lux",
        "TypeImg" : "lux",
        "Unit" : 255,
        "Used" : 1,
        "XOffset" : "0",
        "YOffset" : "0",
        "idx" : "92"
    },
    {
        "AdjMulti" : 1.0,
        "AdjMulti
...

```

Le serveur OWFS

OWFS (One Wire File System) procède de manière similaire. Ce serveur fonctionne sur le même principe que tout serveur. Une fois installé, il répond aux requêtes qui lui sont envoyées.

Exemple de requête pour one-wire

Ce serveur est atteignable par le port **2121**.

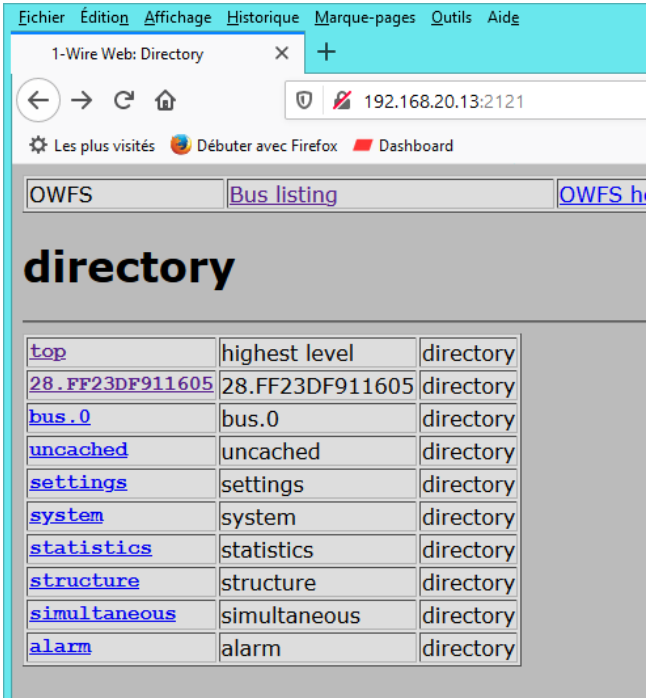


Figure 7 : Copie écran de la réponse du serveur OWFS.

Réponse de one-wire

La réponse renvoyée par le serveur one-wire correspond au contenu montré ci-dessous.

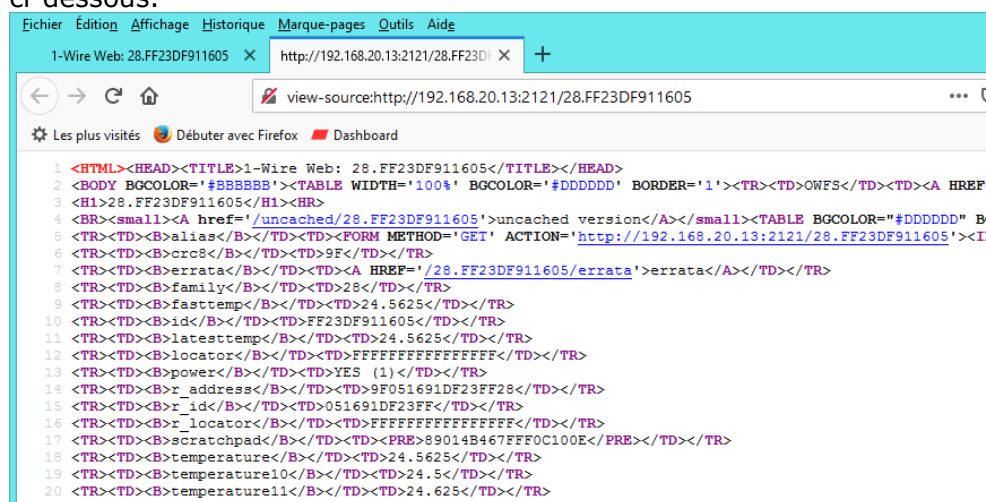


Figure 8 : Copie écran de la réponse du serveur OWFS pour le capteur spécifié.

Les sources de données

Différentes sources de données peuvent être connectées sur l'acquisition domoticVisu.

Les sources de données sont :

- Serveur Domoticz.
- Serveur One-wire
- Fichiers « log ».

2.5. Principes de fonctionnement

Schéma de principe de domoticVisu

Le schéma de principe de domoticVisu est montré dans la figure suivante.

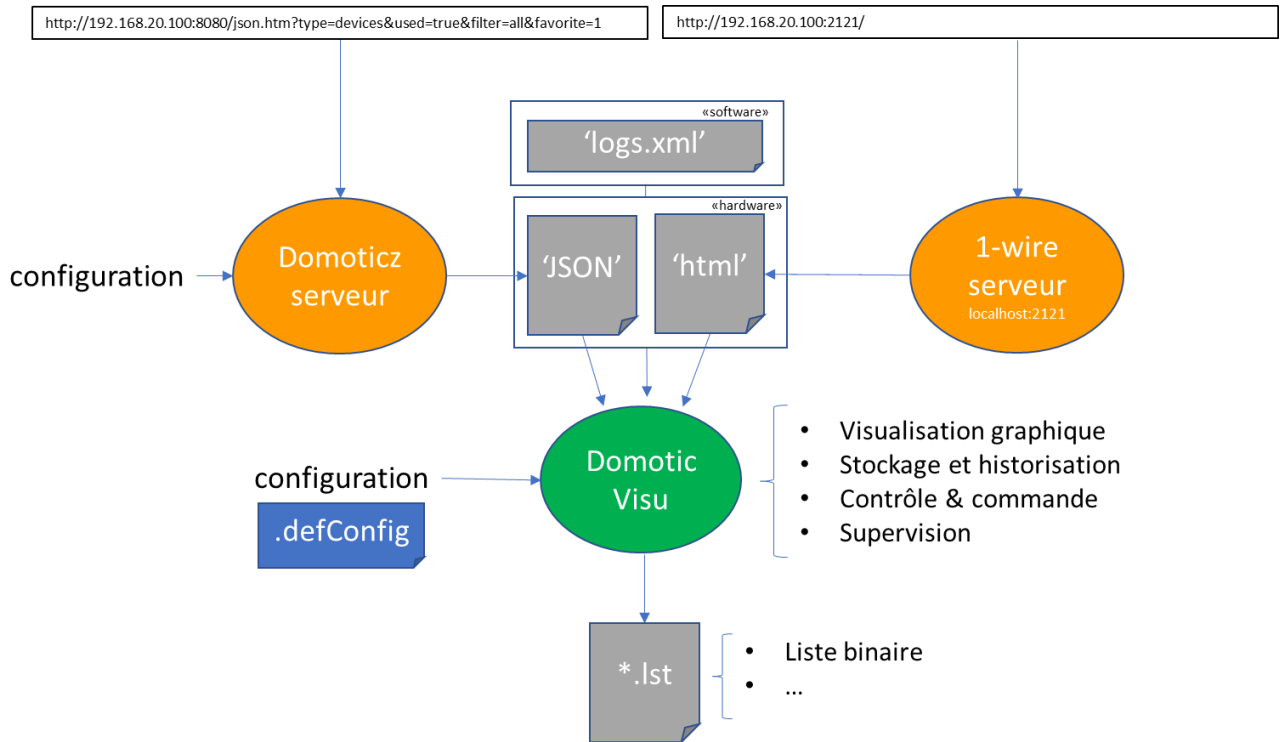


Figure 9 : Schéma de principe des deux serveurs (domoticz et one-wire).

Le travail de décodage de domoticVisu

Le travail de domoticVisu consiste, une fois les serveurs interrogés, à filtrer les données reçues et à les stocker dans un fichier de type XML. Chaque fichier XML est désigné par le nom de l'acquisition puis par la date et l'heure de l'acquisition.

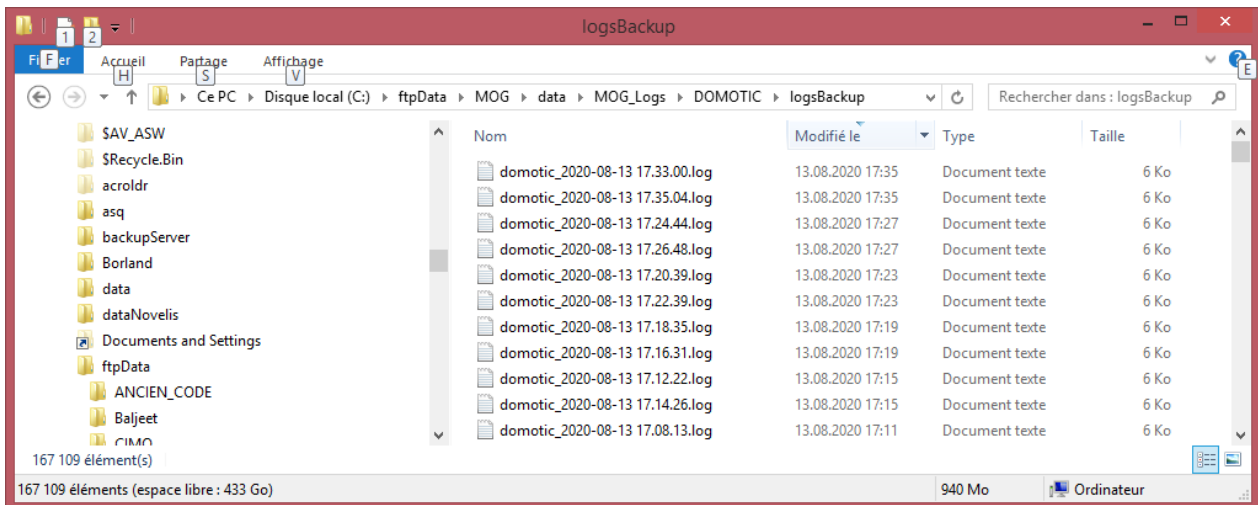


Figure 10 : Copie écran qui montre les fichiers acquis.

Fichier .log en format XML

Le format du fichier xml stocké est montré ci-dessous.

Ces fichiers peuvent être rejoués, c'est-à-dire qu'ils peuvent devenir source de données.

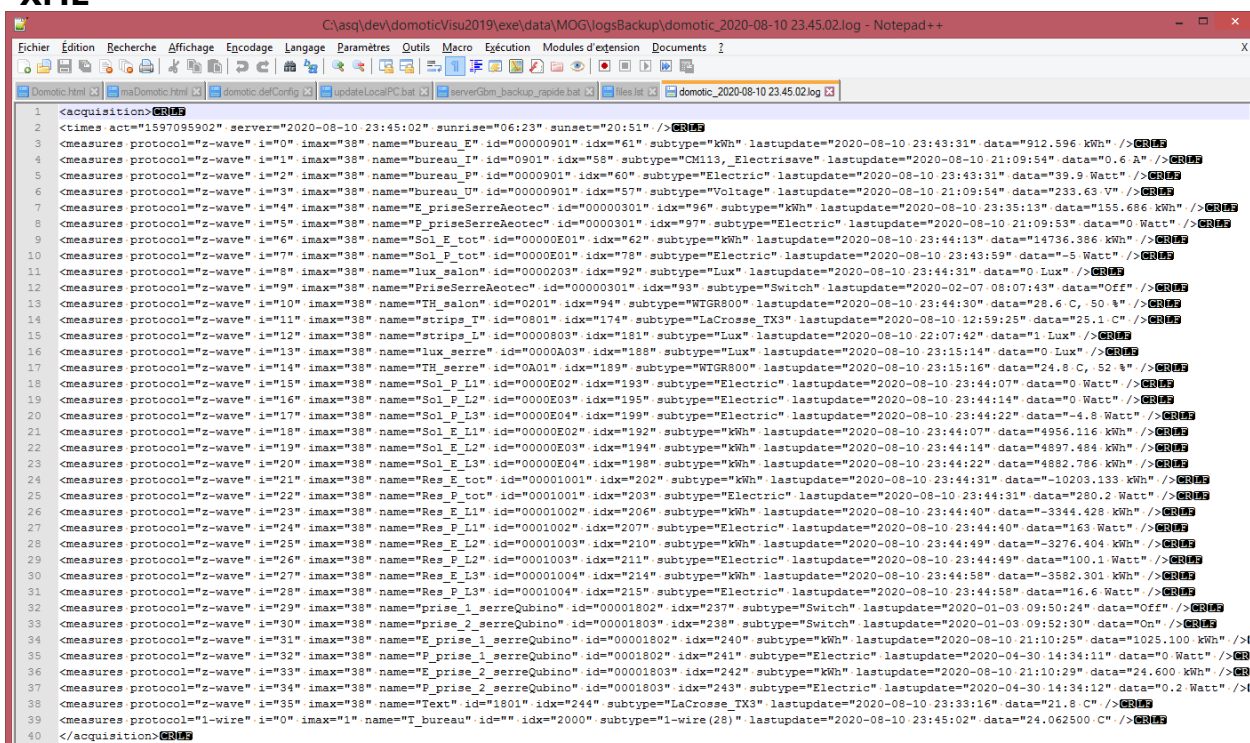


Figure 11 : Exemple du contenu du fichier d'acquisition en format xml.

Interface utilisateur

L'interface du programme d'acquisition est montrée dans l'image suivante.

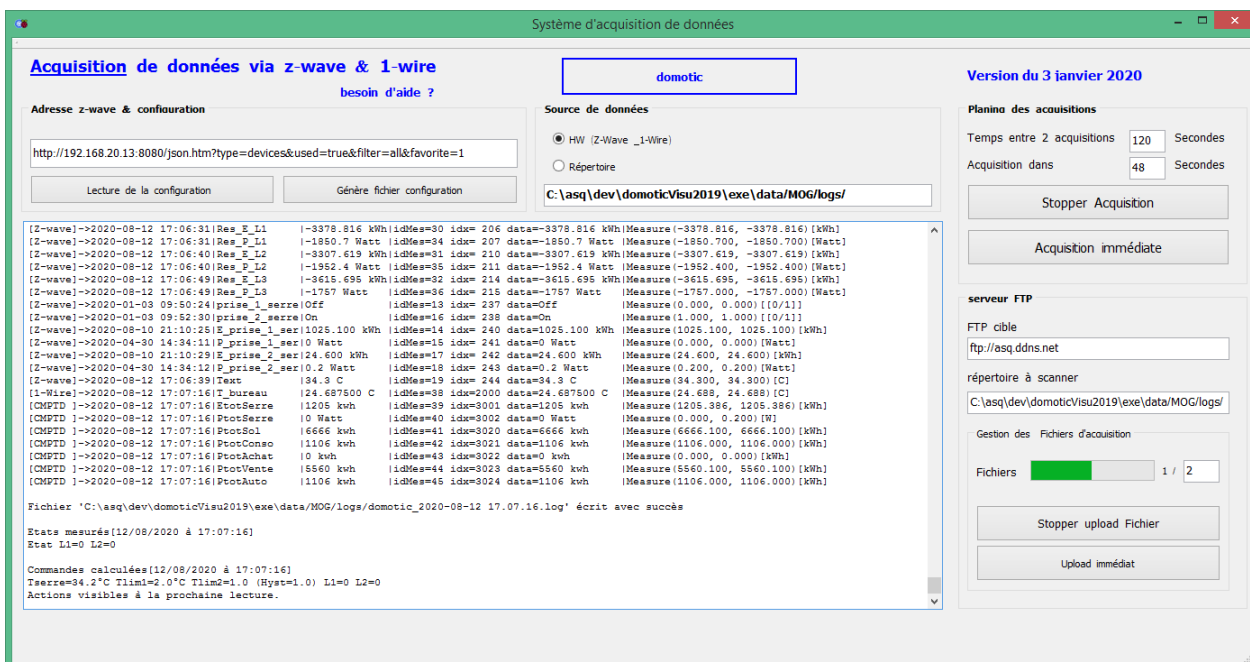


Figure 12 : Copie écran de l'interface utilisateur.

2.6. Configuration

Organisation des répertoires

L'organisation des répertoires proposés est montrée dans la copie écran suivante :

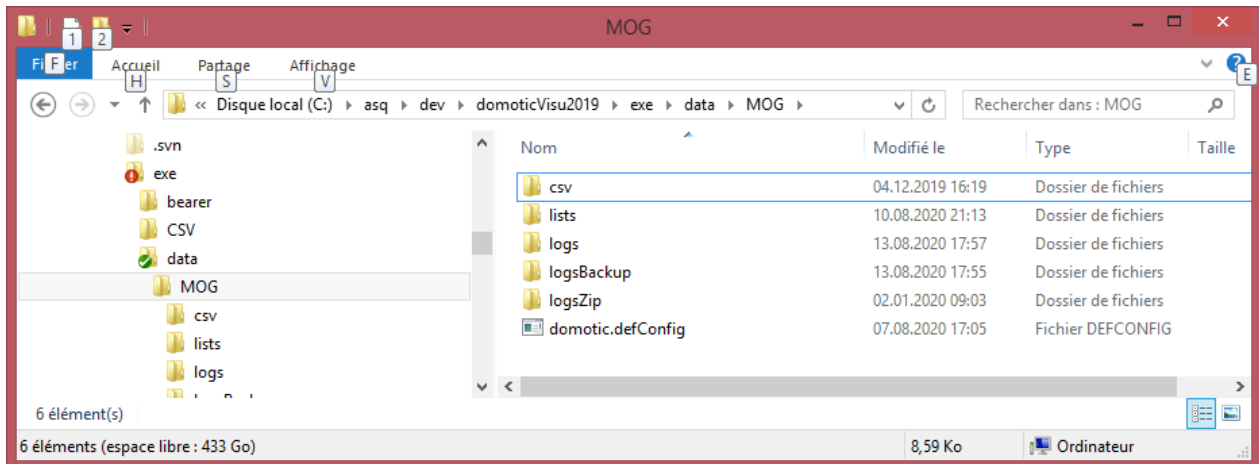


Figure 13 : Organisation des répertoires de domoticVisu.

Configuration du programme :

Le fichier « domoticVisu.config » permet de définir :

- les répertoires de sauvegarde des informations,
- les serveurs utilisés,
- les paramètres pour assurer le transfert par ftp.

Configuration des capteurs

La configuration des capteurs (c'est-à-dire les capteurs qui sont décodés) est définie par l'intermédiaire d'un fichier, dont le contenu est montré à la page suivante.

Le protocole peut avoir les paramètres suivants :

- z-wave
- 1-wire
- computed

Les acquisitions dont le protocole est « computed » doivent être définies en fin de liste, car elles utilisent les acquisitions physiques précédentes pour définir un nouveau canal d'acquisition.

Par exemple, il se peut qu'un utilisateur soit intéressé à la somme de l'énergie électrique traversant les trois phases, ayant à disposition les acquisitions physiques de chacune des phases.

Pour cela, l'utilisateur devra définir un callback dont le nom est dans la colonne « dec » du fichier de configuration.

Le callback « **toPowerProd** » doit être programmé par l'utilisateur sous forme de fonction en C/C++. Le code à écrire, pour cet exemple, est montré ci-dessous :

Exemple de callback : toPowerProd

```
// -----
ir = strcmp(dec,"toPowerProd");
if(ir==0){ trouve = 1;
    ir = GetRefAcquisConfig("Sol_P_L1","toPower",&iAcq0,
                           &iConfig,msgErr);
    if(ir<0) ASQText(msgErr);
    Get_Power_Sol_Res(Sol_P, Res_P);
    P = Sol_P[0] + Sol_P[1] + Sol_P[2];
    RenseigneMes(&this->lastAcquis[iAcq0],mes,"PtotSol",
                "toPowerProd",P,"%-.0f kwh","kWh");
    mes->valide = 1;
}
```

Principe de calibration

De manière similaire, il est possible de définir une calibration pour les canaux souhaités. Le principe consiste à définir un libellé qui identifie de manière unique le capteur considéré (dans l'exemple donné « TSalon »).

L'exemple suivant calibre le capteur nommé « TSalon » par deux points de calibration.

Exemple de code

```
//.....
ir = strcmp(calibreStr,"TSalon");
if(ir==0){
    // correction linéaire avec 2 points de
    // calibration
    float Tx[2]={23.0, 26.0}; // valeur non calibrée
    float Ty[2]={20.9, 23.5}; // valeur calibrée
    trouve = 1;
    calibratedValue = Ty[0] + (Ty[1] - Ty[0])*
                      (value - Tx[0])/(Tx[1] - Tx[0]);
    return(calibratedValue);
}
```

Fichier *thermolab.defConfig*

```
#
#config      protocol      code=      idx=      name=      dec1=      calibration=  unit=
<config      protocol="Z-wave"  code="0302"  idx=25     name="L1_I"  dec="toCurrent"  calibre=""    unit="A" />
<config      protocol="Z-wave"  code="0303"  idx=29     name="L2_I"  dec="toCurrent"  calibre=""    unit="A" />
<config      protocol="Z-wave"  code="0304"  idx=33     name="L3_I"  dec="toCurrent"  calibre=""    unit="A" />
<config      protocol="Z-wave"  code="0301"  idx=21     name="Ltot_I"  dec="toCurrent"  calibre=""    unit="V" />
<config      protocol="Z-wave"  code="00000302"  idx=24     name="L1_U"  dec="toVolt"    calibre=""    unit="V" />
<config      protocol="Z-wave"  code="00000303"  idx=28     name="L2_U"  dec="toVolt"    calibre=""    unit="V" />
<config      protocol="Z-wave"  code="00000304"  idx=32     name="L3_U"  dec="toVolt"    calibre=""    unit="V" />
<config      protocol="Z-wave"  code="00000301"  idx=20     name="Ltot_U"  dec="toVolt"    calibre=""    unit="V" />
<config      protocol="Z-wave"  code="0000302"  idx=22     name="L1_E"  dec="toEner"    calibre=""    unit="kWh" />
<config      protocol="Z-wave"  code="0000303"  idx=26     name="L2_E"  dec="toEner"    calibre=""    unit="kWh" />
<config      protocol="Z-wave"  code="0000304"  idx=30     name="L3_E"  dec="toEner"    calibre=""    unit="kWh" />
<config      protocol="Z-wave"  code="0000301"  idx=18     name="Ltot_E"  dec="toEner"    calibre=""    unit="kWh" />
<config      protocol="Z-wave"  code="00000302"  idx=23     name="L1_P"  dec="toPower"   calibre=""    unit="W" />
<config      protocol="Z-wave"  code="00000303"  idx=27     name="L2_P"  dec="toPower"   calibre=""    unit="W" />
<config      protocol="Z-wave"  code="00000304"  idx=31     name="L3_P"  dec="toPower"   calibre=""    unit="W" />
<config      protocol="Z-wave"  code="00000301"  idx=19     name="Ltot_P"  dec="toPower"   calibre=""    unit="W" />
<config      protocol="Z-wave"  code="0000403"  idx=34     name="lux"    dec="toLum"     calibre=""    unit="lux" />
<config      protocol="Z-wave"  code="0401"    idx=35     name="Text"   dec="toTemp"    calibre=""    unit="C" />
<config      protocol="1-wire"  code="28.FF6893011703"  idx=2000  name="T11"    dec="toTempOWFS"  calibre="FF6893011703"  unit="[C]" />
<config      protocol="1-wire"  code="28.FFB371011703"  idx=2001  name="T12"    dec="toTempOWFS"  calibre="FFB371011703"  unit="[C]" />
<config      protocol="1-wire"  code="28.FFFA19251703"  idx=2002  name="T21"    dec="toTempOWFS"  calibre="FFFA19251703"  unit="[C]" />
<config      protocol="1-wire"  code="28.FFA569301704"  idx=2003  name="T22"    dec="toTempOWFS"  calibre="FFA569301704"  unit="[C]" />
<config      protocol="1-wire"  code="1D.FD8A0F000000"  idx=2010  name="counter"  dec="toCounterOWFS"  calibre="GWF"          unit="[]" />

# EOF
```

Data/PAC_LABO.config

```
#fichier de configuration-----|
acquisitionTitle=thermoLab#      |
#-----|
owfsServerCmd=http://153.109.5.120:2121/uncached/#          ou localhost:2121 |
acquisitionUrl=http://153.109.5.120:8080/json.htm?type=devices&used=true&filter=all&favorite=1# |
#-----|
acquisitionName=PAC_2# nom de l'acquisition. un même titre peut avoir plusieurs acquisitionName différent. |
pathData.base=# si =="" prend le répertoire de base (là ou se trouve l'ex:directoryBase), sinon prend celui spécifié. |
pathData.data=data/PAC_2/# |
pathAndFile.config=data/PAC_2.config# configuration active lors de l'acquisition de données. |
pathAndFile.defConfig=data/PAC_2/PAC_2.defConfig# configuration des canaux d'acquisition. |
pathData.data=data/PAC_logs/PAC_2/# |
    comme sous répertoires à pathData.data: logs\           :là où arrivent les fichiers logs des raspberry pi. |
# logsZip\           :là ou sont stockés les fichiers d'acquisition |
# logsBackup\        :les fichiers sont aussi copiés là pour sécurité dans un premier temps. |
# lists\             :les fichiers binaires .lst y sont stockés. |
# csv\               :les répertoires où les fichiers csv sont stockés. |
# temp\              :répertoires pour fichiers temporaires. |
flagCreateLogsBackup=1# savoir si quand on rejoue les fichiers log (source = fichiers logs). |
flagDumpCSVFile= 0 # dump un fichier ASC séparé par des TAB |
#user callback-----|
flagUserCallBack= 1 # |
userCallBack=thermoLab# |
#données associées au ftp-----|
flagUseFtpUpload= 1 # |
serverName=ftp://asq.ddns.net# nom du serveur ftp qui va recevoir les données d'acquisition |
dirUpload=PAC_Logs/PAC_2/logs# répertoire sur le serveur où les données sont placées |
userName=PAC# |
password=PAC_2019# |
port=21# |
#eof
```

2.7. La couche de traitement des données

Applications pour traitement des données

Plusieurs applications ont été développées pour gérer et analyser l'information envoyée par les nombreux Raspberry Pi déployés :

- dataHub centralise les données sur le serveur
- watchPacData analyse les données
- xServer montre les données sur la toile

La figure suivante montre les interactions entre les diverses applications.

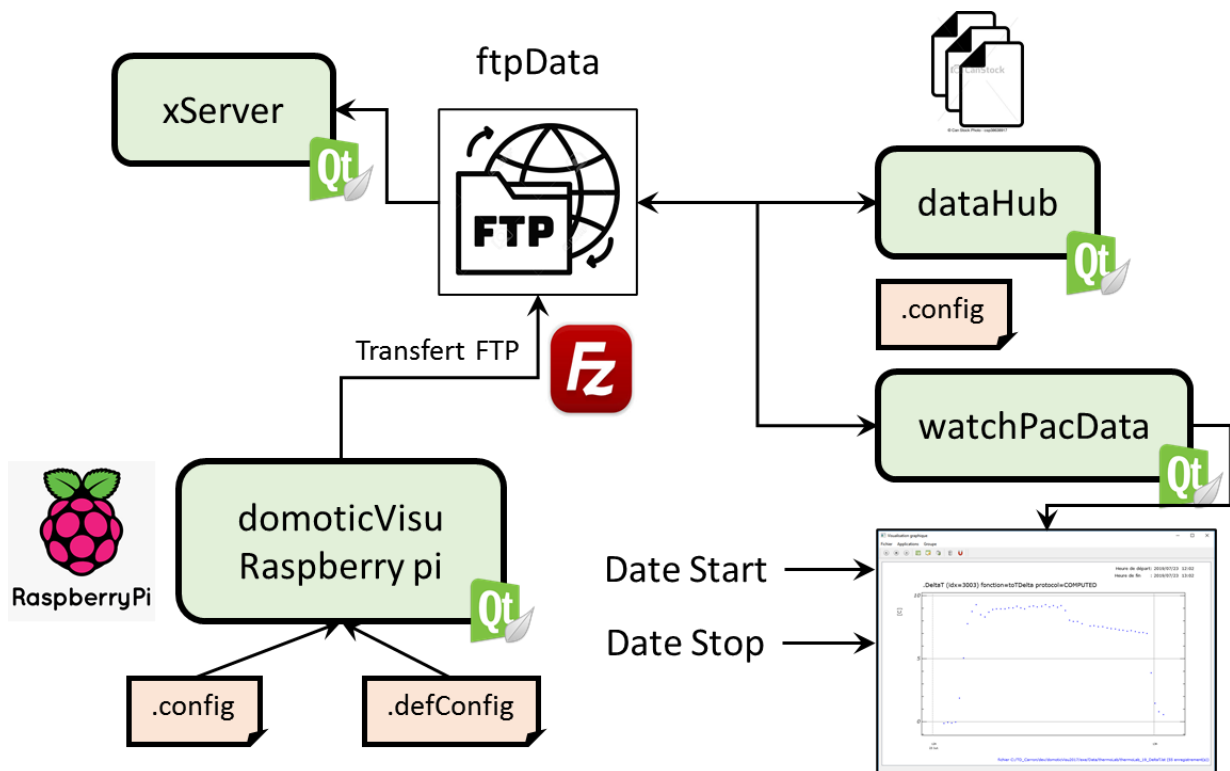


Figure 14 : Organisation des applications développées.

Fonctionnalités de la couche de traitement

Les fonctionnalités assurées par la couche de traitement sont :

- Calibration ou recalibration des données
- Ajout et calcul après acquisition de canaux construits sur les acquisitions physiques
- Consolidation et filtration des événements.
- Personnalisation du traitement des données par l'utilisation des callbacks
- Consolidation statistique des résultats

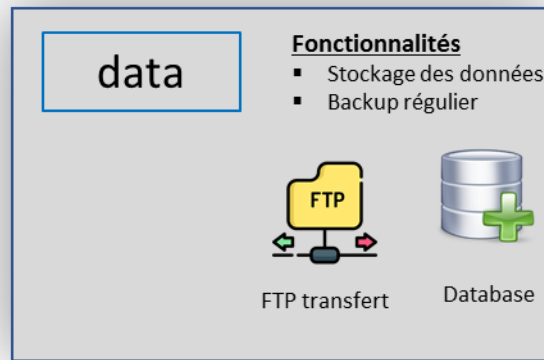


Figure15 : Fonctionnalités et outils utilisés pour le module data (acquisition de données).

Quantité de données

Chaque installation envoie par FTP un fichier XML de ~4 kbytes et ceci chaque 120 secondes. Les données par installation atteignent 2.8Mbytes par jour, et pour une année entière, plus de 1Gbytes, soit 250'000 fichiers de 4kbytes.

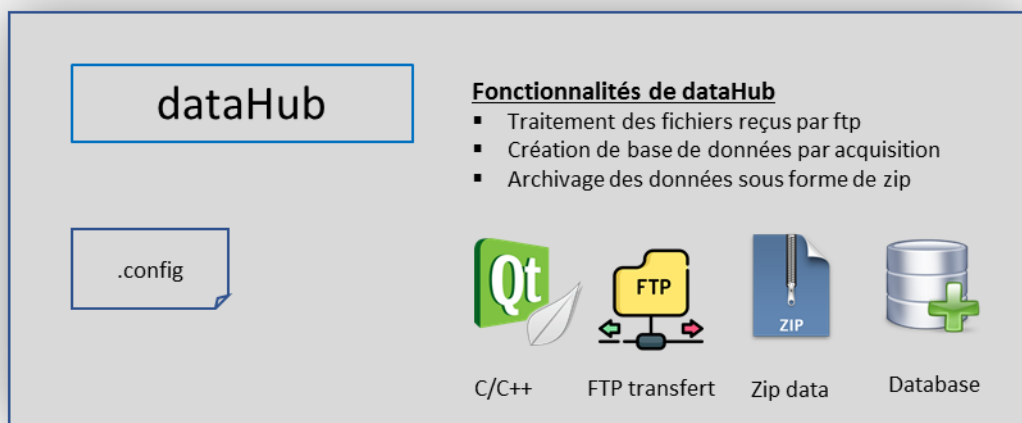


Figure 16: Fonctionnalités et outils utilisés pour le module dataHub.

dataHub

dataHub donne la possibilité de surveiller l'arrivée des fichiers XML depuis les diverses installations. Les fonctionnalités de dataHub sont montrées dans la figure 16. La figure 17 montre l'interface utilisateur de l'application. Une version WEB montre la même information sur une page dynamique du site <http://teno.ddns.net>.

dataHub: gestion de multiples acquisitions de données (z-wave & 1-wire)

Date heure: 2020/12/20 08:28:33

	Répertoire surveillé	Nom	Acquisition	Canaux[Z/1/C]	Prem. Acq	Dem. Acq	Tot. acq	Last month	Last week	Last day	Last hour	Logs In	Dernier contact
1	c:/ftpData/MOG/data/MOG_Logs/DOMOTI...	domotic	domotic	51 [38/1/12]	2020-11-01	2020-12-20	33972	20801	4873	696	29	0	< 5 minutes (2 min)
2	c:/ftpData/PAC/data/PAC_Logs/PAC_2/logs/	pac_2	thermoLab	23 [18/5/0]	2020-11-10	2020-12-20	22494	17427	3582	603	26	0	< 1 heure (22 min)
3	c:/ftpData/PAC/data/PAC_Logs/PAC_4/logs/	pac_4	thermoLab	16 [11/5/0]	2020-11-18	2020-12-20	18921	17765	3763	606	26	0	< 1/4h (8 min)

Action en cours: ... Egrainer les secondes...

☒ Traitement des fichiers .log
☐ Traitement bloqué
☐ Ne plus dumper

Traiter chaque(s) 1 fichier(s) faire traitement faire les stats

>Analyse 'thermoLab' 23 canaux de 2020-11-10 à 2020-12-20 : 22494 enregistrements
 Acquisition N° 2 : Statistique sur les fichiers .lst
 >Analyse 'thermoLab' 16 canaux de 2020-11-18 à 2020-12-20 : 18921 enregistrements
 Acquisition N° 0 : Statistique sur les fichiers .lst
 >Analyse 'domotic' 51 canaux de 2020-11-01 à 2020-12-20 : 33972 enregistrements
 Acquisition N° 1 : Statistique sur les fichiers .lst
 >Analyse 'thermoLab' 23 canaux de 2020-11-10 à 2020-12-20 : 22494 enregistrements
 Acquisition N° 2 : Statistique sur les fichiers .lst
 >Analyse 'thermoLab' 16 canaux de 2020-11-18 à 2020-12-20 : 18921 enregistrements
 Acquisition N° 0 : Statistique sur les fichiers .lst
 >Analyse 'domotic' 51 canaux de 2020-11-01 à 2020-12-20 : 33972 enregistrements
 Acquisition N° 1 : Statistique sur les fichiers .lst
 >Analyse 'thermoLab' 23 canaux de 2020-11-10 à 2020-12-20 : 22494 enregistrements
 Acquisition N° 2 : Statistique sur les fichiers .lst
 >Analyse 'thermoLab' 16 canaux de 2020-11-18 à 2020-12-20 : 18921 enregistrements

Figure 17: Interface de dataHub.

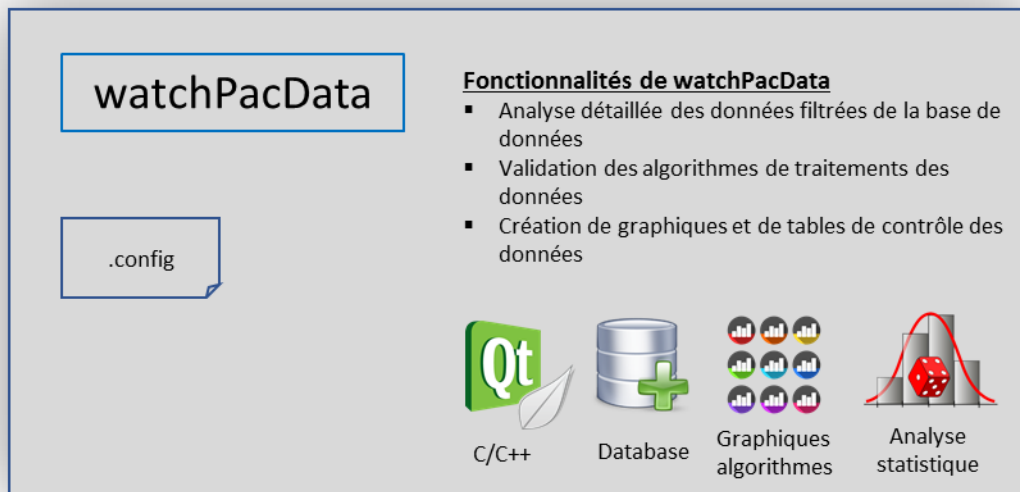


Figure 18: Fonctionnalités et outils utilisés pour le module watchPacData.

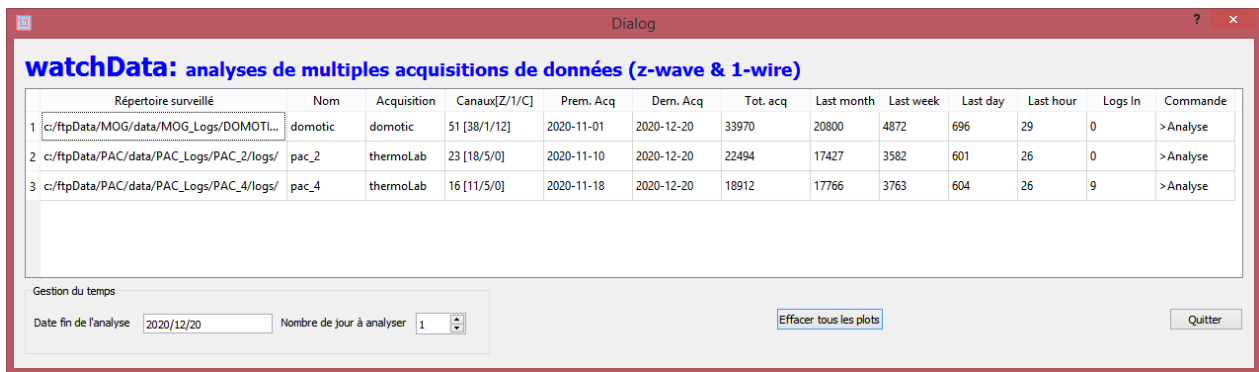


Figure 19: Interface de watchData.

2.8. La couche de présentation des données

Fonctionnalités de la couche présentation

La couche présentation comporte les fonctionnalités :

- Présentation des résultats sous forme de graphique
- Présentation des résultats sous forme tabulaire
- Interactivité

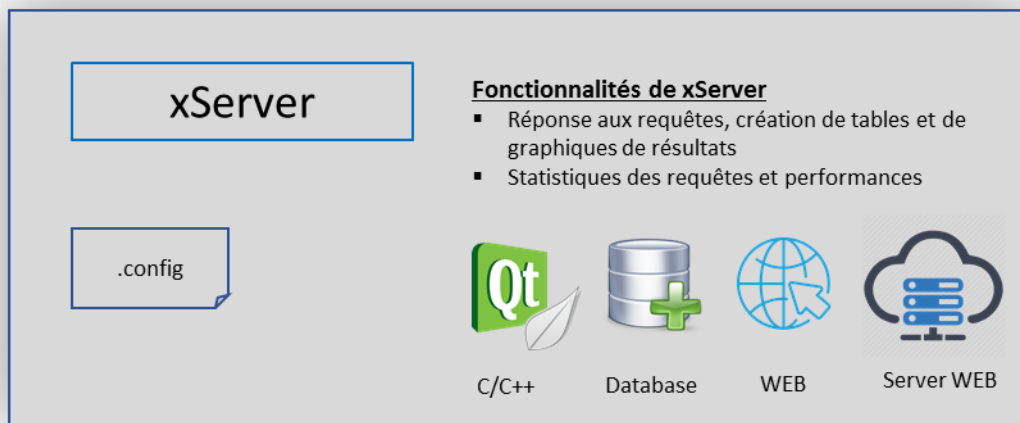


Figure 20: Fonctionnalités et outils utilisés pour le module xServer.

3. Mesure de la performance d'une pompe à chaleur (COP)

Cahier de charges du système de mesure

Le système de mesure qui détermine le COP d'une pompe à chaleur doit avoir les caractéristiques suivantes :

- être indépendant du fabricant de la PAC
- ne pas interférer avec des signaux de commande
- acquérir les conditions extérieures (température du côté froid de la PAC)
- déterminer le COP avec une précision meilleure que 5%
- le système ne doit pas être invasif
- le système doit être évolutif
- le coût du système doit être faible

3.2. Définition et mesure du COP

Mesure de la performance d'une pompe à chaleur (COP)

Pour déterminer le coefficient de performance d'une pompe à chaleur, il est nécessaire de mesurer :

- La quantité d'énergie sous forme de chaleur livrée par la PAC
- La quantité d'énergie électrique consommée par la PAC

Le COP est le rapport des deux grandeurs précédemment décrites :

$$COP = \frac{\text{Energie thermique produite}}{\text{Energie électrique consommée}}$$

Équation 1

COP instantané et COP moyen

Les acquisitions se font au fil du temps de manière séparée pour les grandeurs électriques (basées sur la technologie Z-Wave) et les grandeurs thermiques (basées sur la technologie 1-wire).

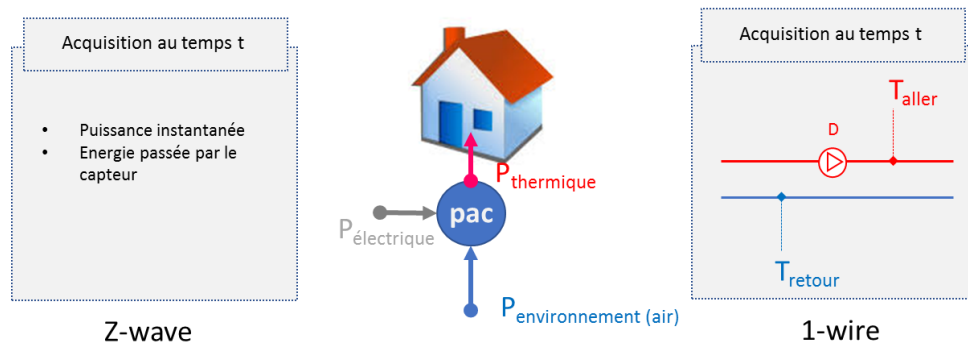


Figure 21 : Acquisition de la puissance électrique et thermique.

Déterminer au temps t , le COP d'une pompe à chaleur n'a pas de sens, du fait qu'il y a un décalage temporel entre la consommation électrique et la production thermique.

Le COP d'une PAC a donc un sens que sur une durée de l'ordre de l'heure. Pour être proche du fonctionnement et de la commande d'une pompe à chaleur, il a été décidé de déterminer le COP sur un **run** de la PAC.

Un run, vise un objectif bien précis, et est caractérisé par un démarrage du compresseur qui va consommer de l'électricité à un instant t pour produire de l'énergie thermique avec un certain retard. Cette énergie thermique est distribuée au bâtiment par la commande d'une pompe de circulation.

Types de run

Il peut s'agir d'un run :

- de production d'énergie thermique de chauffage à une certaine température
- de production d'ECS, à une température plus haute
- ou d'une phase de dégivrage

Le COP sera associé à chaque run. La température moyenne de production d'eau et les rendements de Carnot seront calculés pour caractériser les runs effectués. L'énergie de dégivrage impactera la performance du run et ne sera pas considérée comme un run à proprement dit.

Mesure de l'énergie thermique

La détermination de la puissance et de l'énergie thermique se base sur la mesure de la « température aller » (T_{aller}), de la « température retour » (T_{retour}) et du débit d'eau (D) généré par la pompe de circulation :

$$P_{thermique} = D \cdot c_{eau} \cdot (T_{aller} - T_{retour})$$

Équation 2

La mesure du débit (D) est faite par le compteur à impulsions, comme montré sur la figure 22. Pour déterminer le débit D , deux mesures successives sont nécessaires. Pour les PAC2, PAC3, PAC5, le compteur délivre 1 impulsion par litre, pour la PAC4 le compteur délivre 1 impulsion pour chaque 10 litres.



Figure 22 : Compteur à impulsions pour déterminer le débit d'eau.

La quantification génère un problème et cela d'autant plus que le quanta est grand. Le débit d'eau qui sert à distribuer l'énergie dans la maison est de l'ordre de 0.2 à 0.6 l/s. Ce débit dépend évidemment de la puissance de la PAC ainsi que du dimensionnement établi par le thermicien.

Chaque mesure étant effectuée avec un intervalle de ~ 120 secondes, cela induit sur la mesure du débit une incertitude de :

$$\Delta D \approx \frac{1l}{120s} = 0.008 \frac{l}{s}$$

La propagation de l'erreur de mesure faite sur le *débit* et sur la détermination des *températures aller et retour* donne pour l'erreur relative sur la puissance thermique l'expression suivante :

$$\frac{\Delta P_{thermique}}{P_{thermique}} \approx \frac{\Delta D}{D} + \frac{(\Delta T_{aller} + \Delta T_{retour})}{(T_{aller} - T_{retour})}$$

Équation 3

Le premier terme de l'équation 3, représente l'erreur relative sur le débit. Cette erreur atteint $\sim 2\%$ quand le débitmètre compte par pas d'un litre. Dès que le pas est de 10 litres, l'erreur peut atteindre plus de 20%. Pour pallier ce problème, la détermination du débit est faite sur plus de 2 mesures (moyenne glissante sur les n dernières mesures). Ceci a un effet spectaculaire sur le débit à court terme, mais n'influence que peu le débit moyen mesuré sur une période de l'ordre du quart d'heure.

Le second terme de l'équation 3, comporte un numérateur qui est approximativement 2 fois plus grand que l'erreur de mesure sur une des températures, et un dénominateur qui tend vers zéro quand la puissance thermique est petite.

Pour réduire l'erreur de mesure, les capteurs de mesure de T_{aller} et T_{retour} , ont été doublés. Ceci réduit l'erreur sur T_{aller} et T_{retour} d'un facteur $\sqrt{2}$. C'est donc quatre capteurs qui déterminent les deux températures (aller et retour).

Chaque mesure de température est faite à l'aide de capteurs DS18B20 directement fixés sur la distribution de chaleur de la PAC.



Figure 23 : Capteurs de température de type DS18B20.

Des pièces en cuivre spécialement usinées augmentent le contact thermique entre la sonde et le tuyau. Une isolation a été fixée autour du dispositif pour que la température mesurée soit la plus représentative de la température de l'eau à l'intérieur du tuyau (voir figure 22).

Erreur sys-tématique

La détermination de la température intérieure du tuyau en mesurant la température sur l'extérieur du tuyau induit une erreur systématique. Cette erreur est proportionnelle à la différence de température entre le liquide et la température de la chaufferie.

La présence d'isolation réduit fortement cet effet.

Le fait que la puissance thermique est proportionnelle à la différence entre la température aller et retour, a comme effet d'annihiler les erreurs purement systématiques.

Toutefois, quand la différence de température aller - retour, est grande, la tendance est de sous-estimer, systématiquement, la puissance thermique distribuée.

Il est bon de rappeler qu'une erreur systématique de 0.5 °C sur la mesure du ΔT_{ar} induit une erreur sur la puissance de l'ordre de 800 W.

$$\Delta T_{ar} = T_{aller} - T_{retour}$$

Mesure de l'énergie électrique

Les mesures de l'énergie et de la puissance électrique distribuées sur les trois phases de la PAC sont faites par un capteur HOME ENERGY METER d'Aeotec [9], répondant à la norme Z-wave.

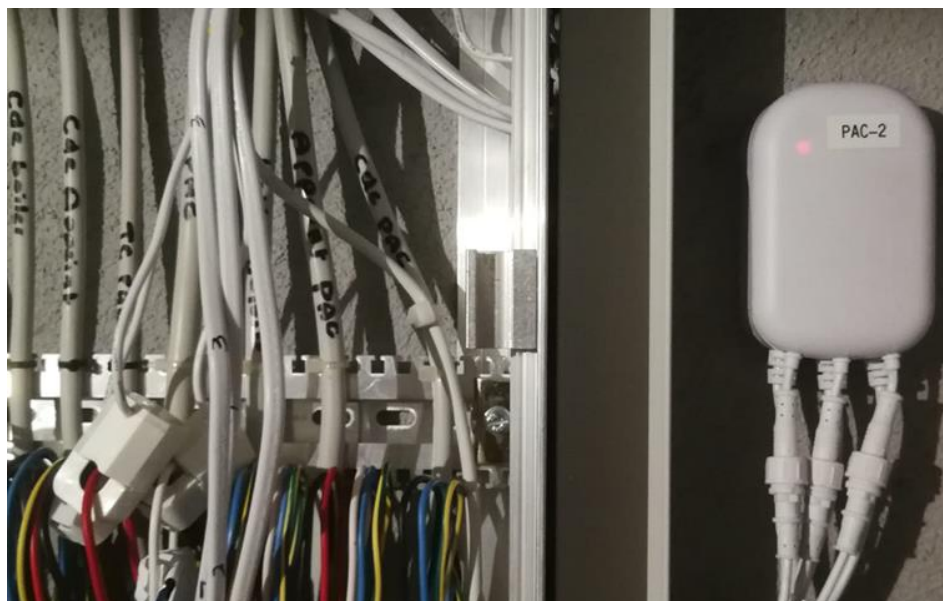


Figure 24 : Capteur Home Energy Meter d'Aeotec.

La figure 25 montre l'installation du Raspberry Pi et du débitmètre pour l'installation nommée PAC2.



Figure 25 : Raspberry Pi et compteur de débit.

3.3. Traitement des données

Visualisation des données brutes

La visualisation des données en fonction du temps, permet d'en connaître la pertinence et d'y repérer des mesures erronées.

La figure 26 montre l'évolution de la mesure du compteur de débit en fonction du temps. Sur une période de trois jours, 1'754 enregistrements ont été acquis.

Sur chaque graphique créé, des lignes verticales indiquent l'instant du lever (sunrise) et du coucher de soleil (sunset). Cette information permet de vérifier si l'engagement de la pompe à chaleur se fait lorsque les panneaux photovoltaïques possiblement installés sur le toit de la maison, ont une bonne probabilité de produire de l'« énergie gratuite ».

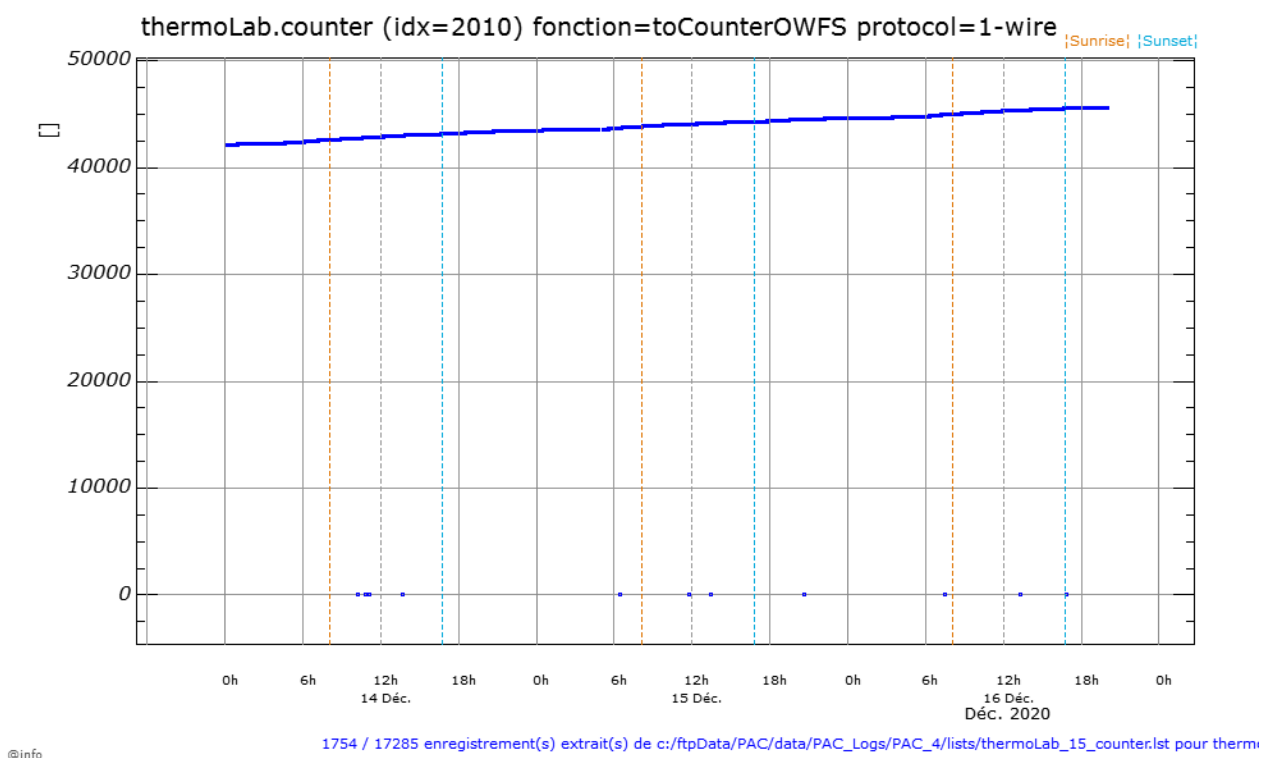


Figure 26 : Valeurs du compteur de débit en fonction du temps.

Axe du temps et zoom

Un soin tout particulier a été mis pour rendre la lecture des graphiques facilitée en définissant les jours et les heures observées. Par un simple mouvement de la souris, des zooms sont exécutés pour chacun des axes de chaque graphique produit.

Nettoyage des données

Les points de mesure du graphique précédent, qui indiquent une valeur nulle, ont été filtrés. De manière similaire des points de mesures électriques qui correspondent à des mesures visiblement erronées ont été éliminées de l'analyse.

Lorsqu'un point est éliminé, tous les enregistrements simultanément acquis sont éliminés.

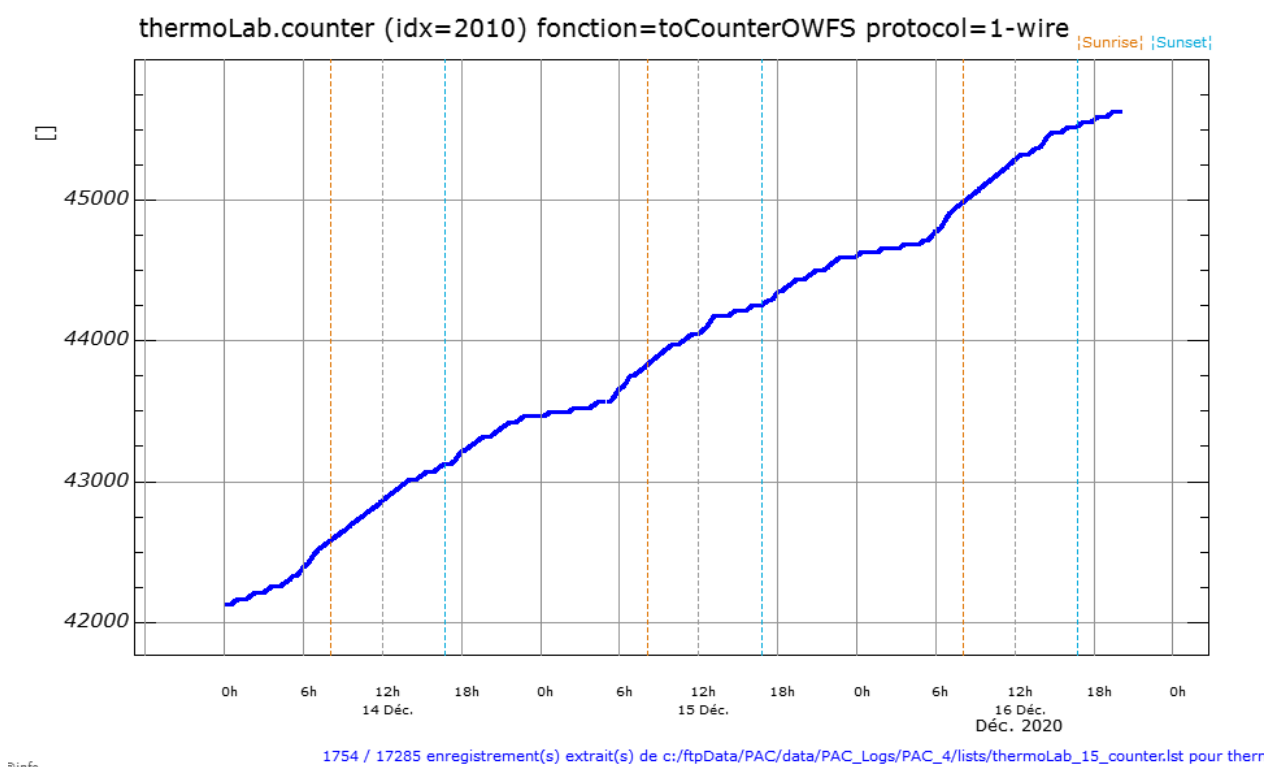


Figure 27 : Valeurs du compteur de débit, après filtration en fonction du temps.

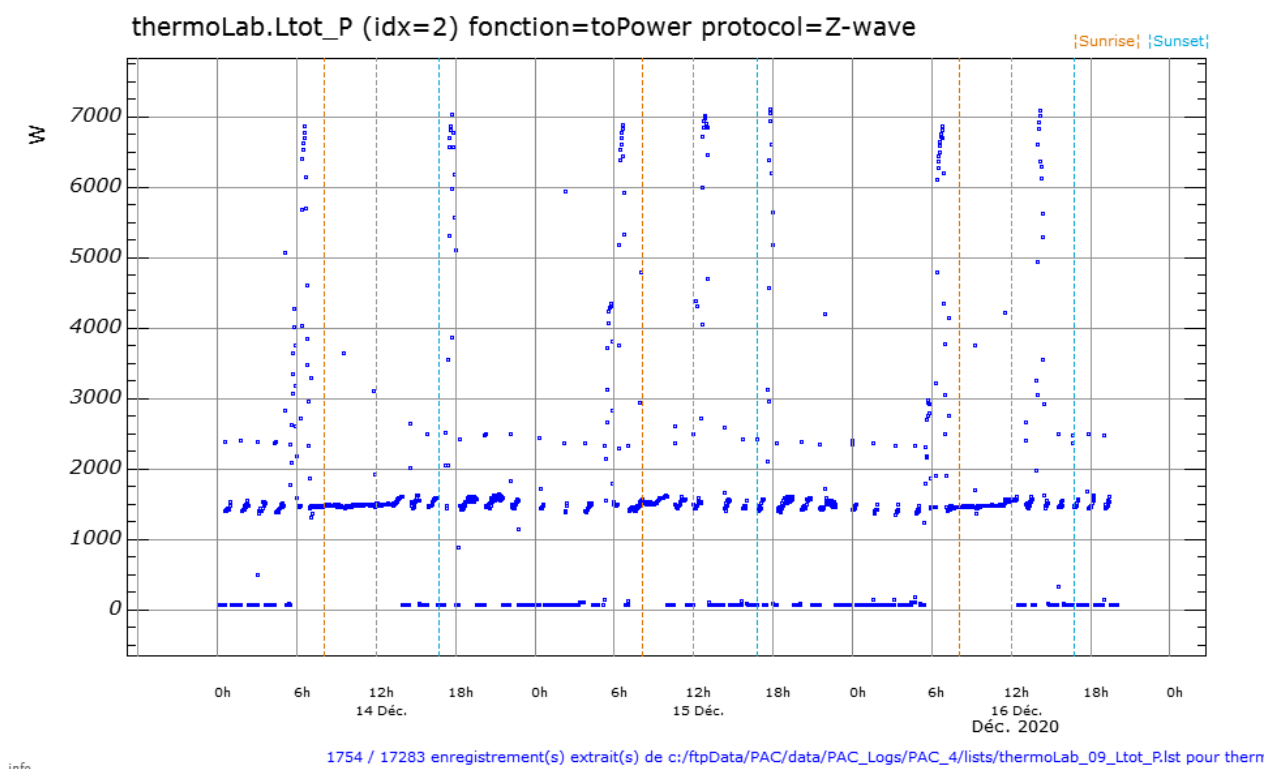


Figure 28 : Puissance électrique mesurée en fonction du temps.

Puissance électrique

La figure 28 montre la puissance électrique mesurée par le capteur Home Energy Meter.

Plusieurs observations peuvent être déduites de ce graphique : les pics de puissance électrique qui dépassent les 7kW correspondent aux runs de préparation d'eau chaude sanitaire. Les runs dont la puissance est comprise entre 1kW et 3kW électriques correspondent aux runs de chauffage du bâtiment. Lorsque la pompe à chaleur est en « stand by », la puissance consommée est approximativement de 70¹ W.

¹ Les valeurs limites de puissance maximale pour de « standby » ou de température minimale de production d'ECS sont évidemment paramétrables. Les valeurs numériques sont données dans le texte pour en simplifier la lecture.

Puissance et énergie électrique

Le capteur Home Energy Meter mesure également l'énergie électrique qui le traverse, qui est simplement l'intégrale de la puissance multipliée par le temps. Cette grandeur est importante car elle ne dépend pas de la fréquence d'acquisition ni de la variabilité de la grandeur mesurée.

Suite à l'observation des mesures, le retard entre la consommation électrique et la production de chaleur est de l'ordre de 3 à 15 minutes pour les pompes à chaleur observées. Un décalage même faible entre l'énergie électrique et thermique impacte de manière significative la détermination du COP instantané.

Les deux estimations de la puissance consommée (une fois par la mesure de l'énergie, une fois par la mesure échantillonnée de la puissance) donnent l'opportunité de calculer la précision de la mesure de l'énergie thermique produite par la pompe à chaleur et d'associer une erreur à la valeur du COP. Dans la suite de l'analyse, ils seront désignés par « **cop_e** » et « **cop_p** », respectivement. La composante électrique de **cop_e** est déterminée à partir de la mesure de l'énergie électrique. La composante électrique de **cop_p** est déterminée à partir de la mesure échantillonnée de la **puissance** électrique.

Le profil temporel de l'énergie électrique mesurée par le capteur est montré dans la figure 29.

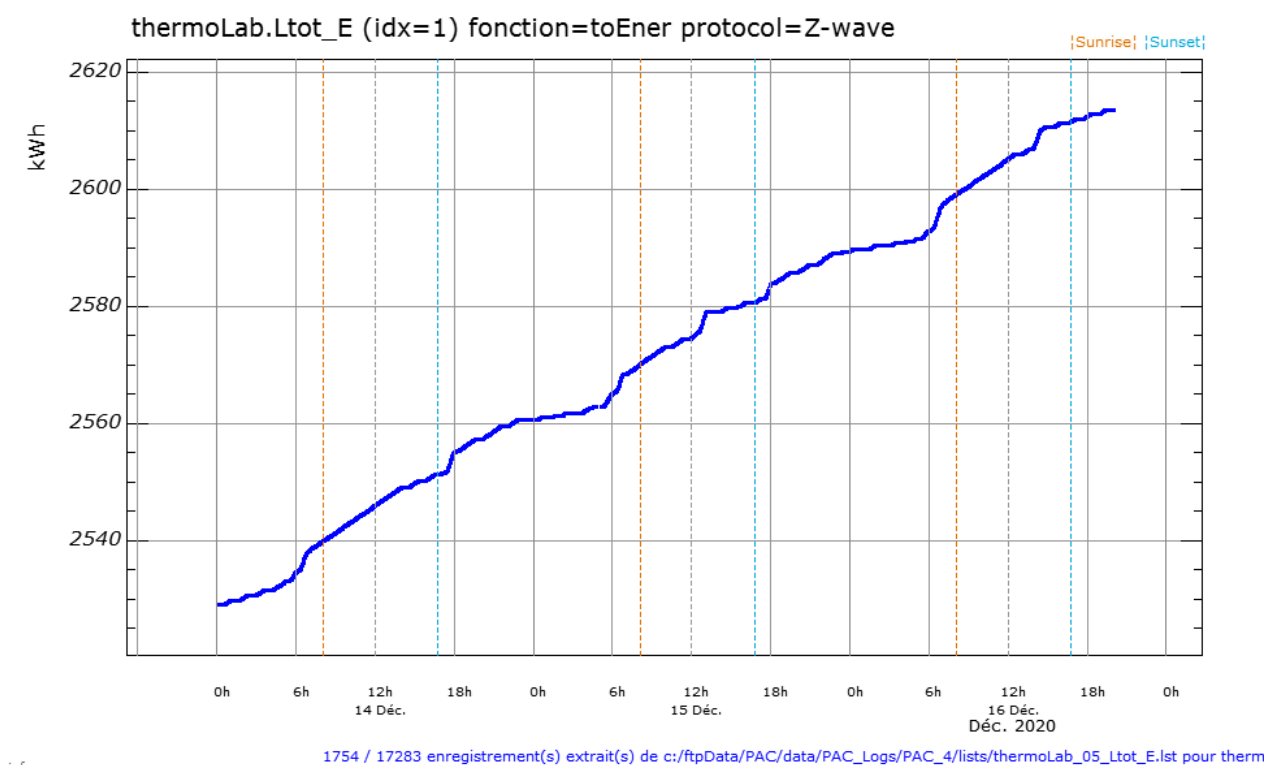


Figure 29 : Énergie mesurée par le capteur Home Energy Meter.

Calcul de l'énergie électrique

Le calcul de l'énergie à partir de la mesure de la puissance, qu'il s'agisse de puissance thermique ou électrique, est régi par l'équation suivante.

$$Energie = \sum_{i=0}^{i=n-1} \frac{1}{2} \cdot (P_i + P_{i+1}) \cdot (t_{i+1} - t_i)$$

Équation 4

L'énergie correspond à la surface sous la courbe (somme de la surface des trapèzes) comme montré dans la figure 30.

La difficulté ne tient pas dans le calcul, mais dans les éléments suivants :

- A partir des données d'une seule acquisition, de déterminer dans quel état se trouve la machine thermique
- De déterminer le run (son numéro et son objectif chauffage ou production d'ECS) et quelle mesure du dit run, vient d'être acquise
- De mesurer l'effet de l'élimination d'une mesure dans la phase de filtration des données.

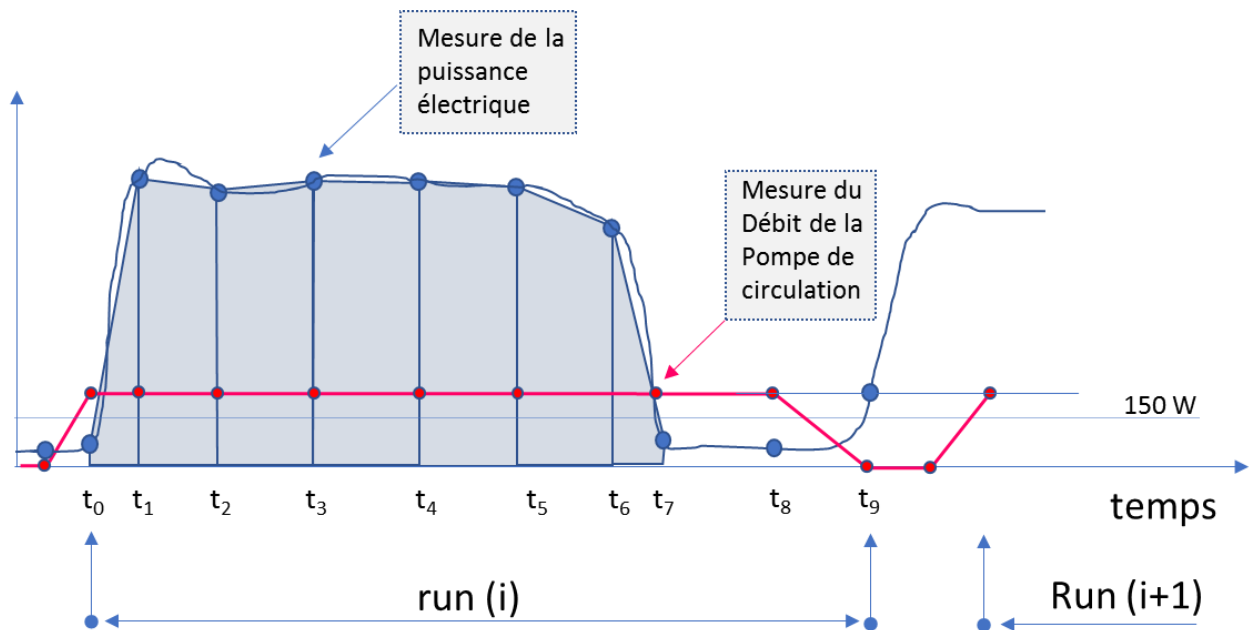


Figure 30 : Détermination de l'énergie électrique à partir de la puissance mesurée.

Détection des flancs

Pour connaître l'état dans lequel la PAC se trouve, une détection des flancs a été réalisée entre deux acquisitions successives.

Les flancs détectés à partir des données sont :

- Enclenchement / déclenchement de la puissance électrique sur la PAC
- Enclenchement / déclenchement de la pompe de circulation
- Passage de la température aller plus ou moins 35 °C
- Passage de la puissance thermique à une valeur négative ou positive

Les états de la machine

Les états ainsi repérés et considérés comme intéressants sont :

Puissance électrique	ON	OFF
Pompe de circulation	ON	OFF
Température aller	<35°C Chauffage	>=35°C Production d'ECS
Puissance thermique	>0	<=0 Phase de dégivrage

3.4. De la mesure au processus

Identi- fication des phases de fonction- nement de la PAC

L'automate programmable de la PAC gère différents états (ou phases) de production de chaleur. Il s'agit des phases suivantes :

- Phase de production de chauffage
- Phase de production d'ECS
- Phase de dégivrage

L'enjeu consiste à partir des signaux et des mesures enregistrés au *moment t* , de déterminer dans quelle phase de fonctionnement la PAC se trouve.

Définition d'un run

Le début d'un run est caractérisé par une consommation électrique de la PAC supérieure (inférieure) à 150 [W]. Les PAC utilisent moins que cette puissance pour faire fonctionner l'électronique de régulation.

La fin d'un run est caractérisée par une consommation électrique inférieure à 150 W et l'arrêt de la pompe de circulation.

Si durant un run, la température aller est supérieure à 35°C, le run sert à produire de l'ECS.

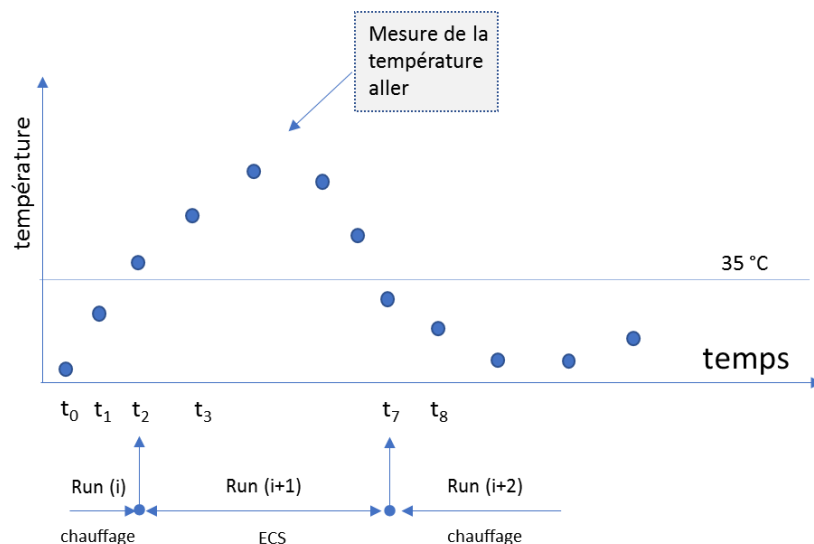


Figure 31 : Différenciation des runs de chauffage et d'ECS.

Durant toute la durée du run, si la température aller est inférieure à la température retour, c'est-à-dire que la puissance thermique délivrée par la PAC est négative, cela indique que la PAC est en phase de dégivrage.

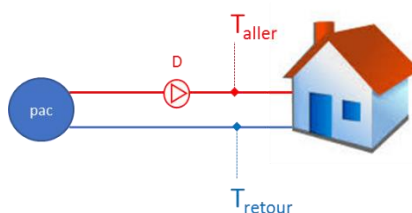


Figure 32 : Température aller et température retour.

Tant que la température aller est inférieure à 35°C, il n'y a pas moyen de savoir si le run est un run de chauffage ou de préparation d'eau chaude sanitaire. En période estivale, la décision sera simplifiée puisque chaque run sera exclusivement un run d'ECS.

Etat de la machine

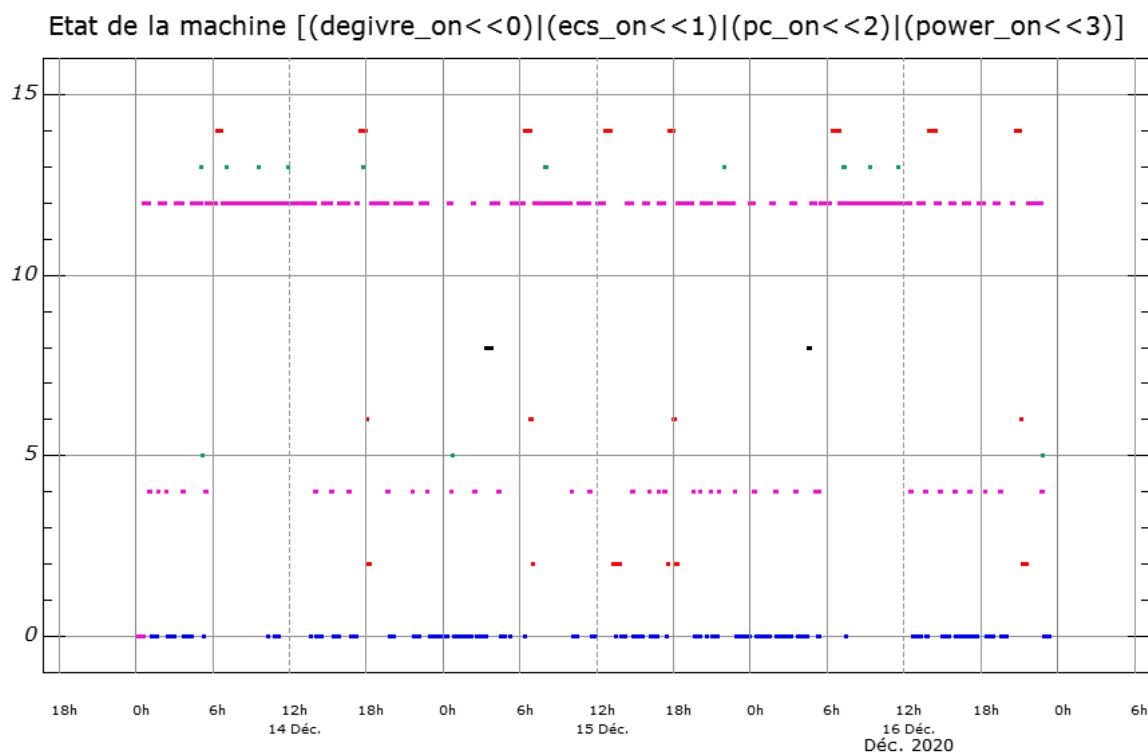
Sur les trois jours analysés, pour illustration, une variable « Etat de la machine » a été définie. Celle-ci est composée de plusieurs bits.

Le bit 0 : 0 ou 1 indique si la phase de dégivrage est en cours (point vert sur le graphique).

Le bit 1 : 0 ou 1 indique si un run d'ECS est en cours (point rouge).

Le bit 2 : 0 ou 1 indique si la pompe de circulation est enclenchée.

Le bit 3 : 0 ou 1 indique si la puissance électrique de la PAC est engagée.



/Dégivrage ON//ECS ON//Chauffage ON//PAC&PC OFF//Sinon/

Figure 33 : Différents états de la pompe à chaleur sur les trois jours analysés.

Caractéristiques d'un run

Un run sera caractérisé par les grandeurs suivantes :

- Date et heure du début (fin) du run
- Durée du run
- Température maximale de départ (run ECS ou chauffage)
- Différence de température maximale et moyenne entre aller et retour
- Durée de fonctionnement de la pompe de circulation
- Energie électrique utilisée durant le run (deux manières différentes sont utilisées pour déterminer cette énergie électrique : soit utiliser la puissance instantanée qui multiplie le temps entre deux acquisitions, soit utiliser la différence d'énergie électrique que le capteur a intégré)
- Energie thermique produite
- COP
- Température extérieure

Barre d'erreur verticale

Les barres verticales représentent l'erreur mesurée. La détermination de la température aller (ou retour) est basée sur deux capteurs. L'erreur a été définie comme la moitié de la différence des deux mesures. La valeur de mesure a été définie comme la moyenne des deux grandeurs.

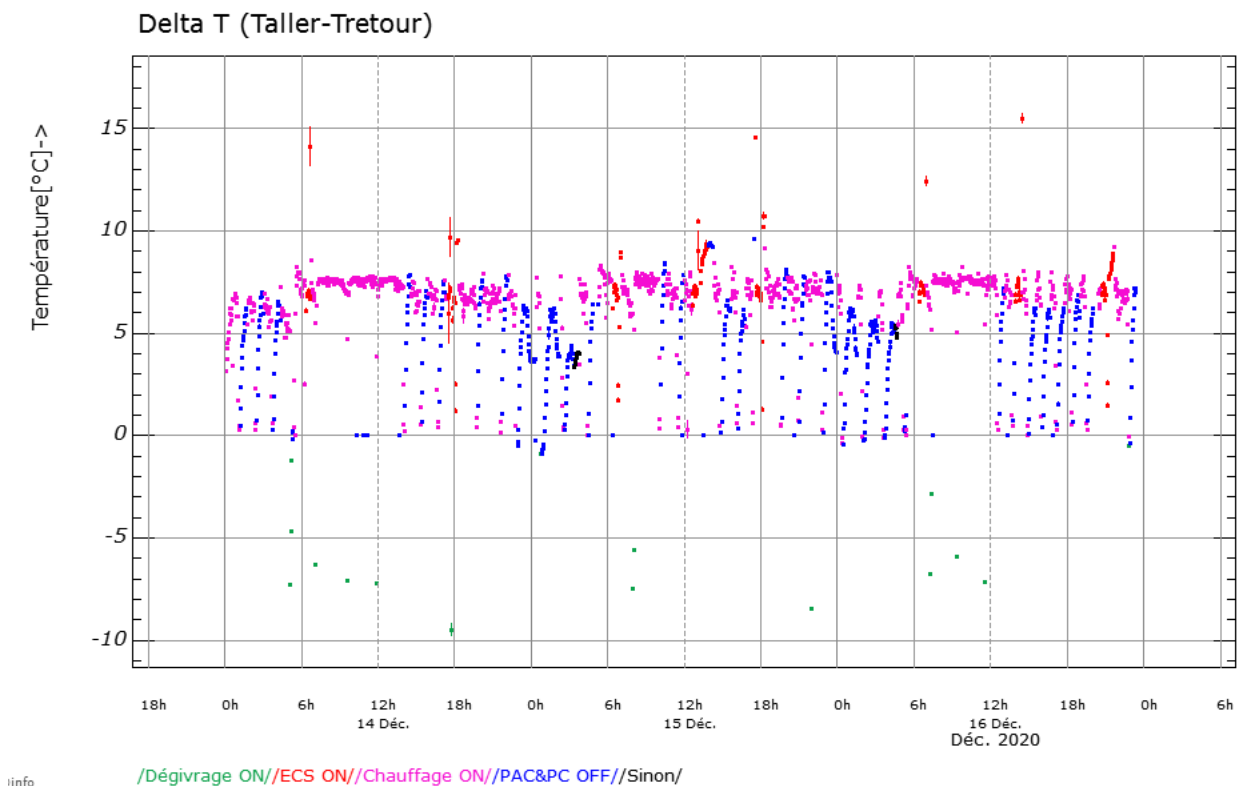


Figure 34 : Delta T (entre T_{aller} et T_{retour}) pour les différents runs.

La barre d'erreur pour le « delta T » sera donc la somme des erreurs de T_{aller} et T_{retour} .

Barre horizontale

La barre horizontale représente la durée du run.

Code couleur

Les points bleus correspondent aux runs de chauffage du bâtiment, les points rouges aux runs d'ECS.

Les points verts visualisent les phases de dégivrage.

Delta T

Le graphique 34 montre le delta T ($T_{aller} - T_{retour}$). Une différence de 7-8 °C assure l'échange thermique nécessaire. Une valeur de delta T négative caractérise des phases de dégivrage quand la pompe de circulation est en action.

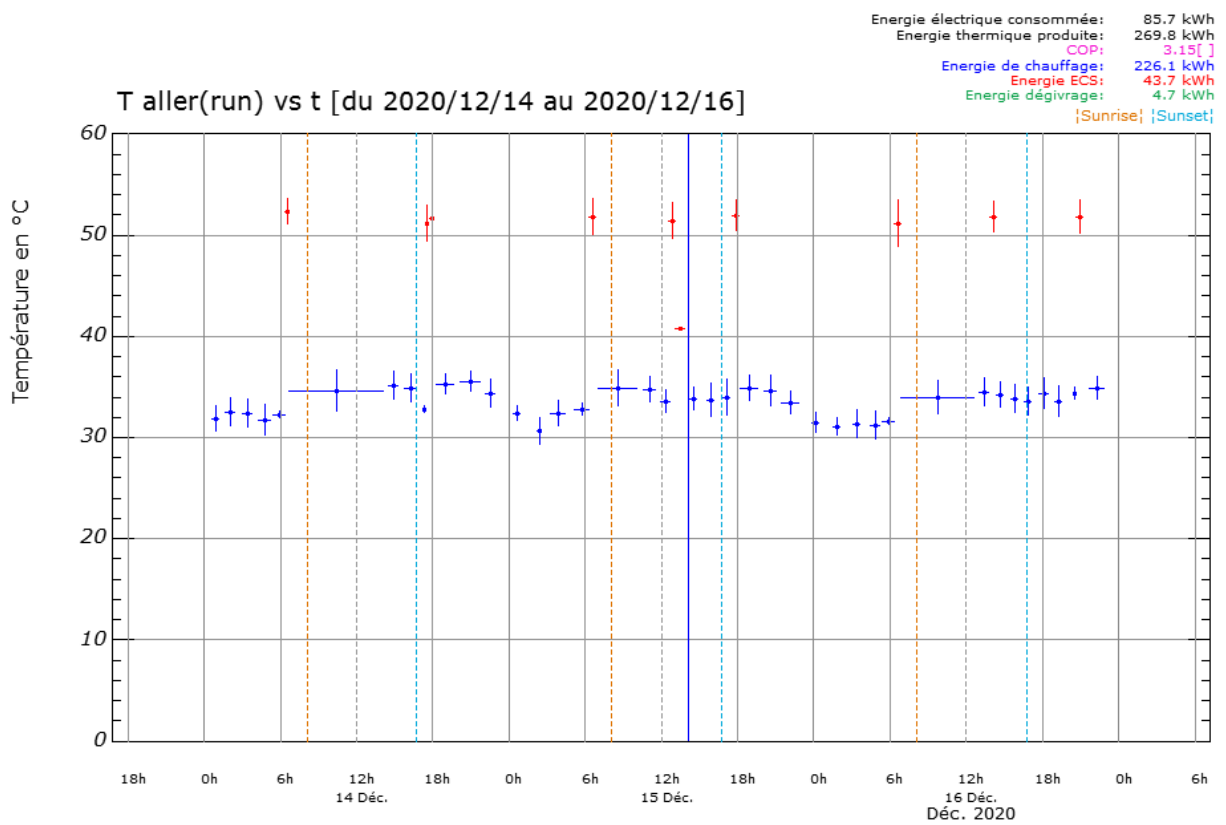


Figure 35 : T_{aller} pour les différents runs sur les trois jours.

Consigne de température nocturne

En observant le graphique 35, on remarque que la température T_{aller} la nuit est inférieure à la température T_{aller} le jour. Cela s'explique sans doute par le fait que la température de consigne de nuit est abaissée par rapport à celle de jour ou à des subtilités de réglage programmées dans l'automate de la machine.

Run d'ECS

Les runs d'ECS sont faits quand la demande s'en fait sentir. Habituellement dès que la température du réservoir d'ECS est inférieure à une valeur de consigne (appelée consigne Température ECS), la demande d'un run d'ECS est lancée.

Une solution élégante serait de placer cette consigne de température ECS plus haute la journée que la nuit. Ceci aurait pour effet de rendre les runs d'ECS plus nombreux durant la journée quand le soleil a une plus grande probabilité d'être présent.

Au niveau énergétique, l'effet est double : durant la journée, la température est plus haute, donc le COP de la machine thermique plus favorable ; d'autre part, si la maison est équipée de photovoltaïque, l'électricité est gratuite !

3.5. Résultats obtenus

Energie électrique

Une fois les runs identifiés, le décompte de l'énergie thermique et de l'énergie électrique peuvent être faits. Le logiciel développé permet donc de déterminer le COP pour chaque run.

Le graphique 36 montre pour les différents runs analysés, l'énergie électrique consommée pour répondre aux besoins en énergie thermique du bâtiment.

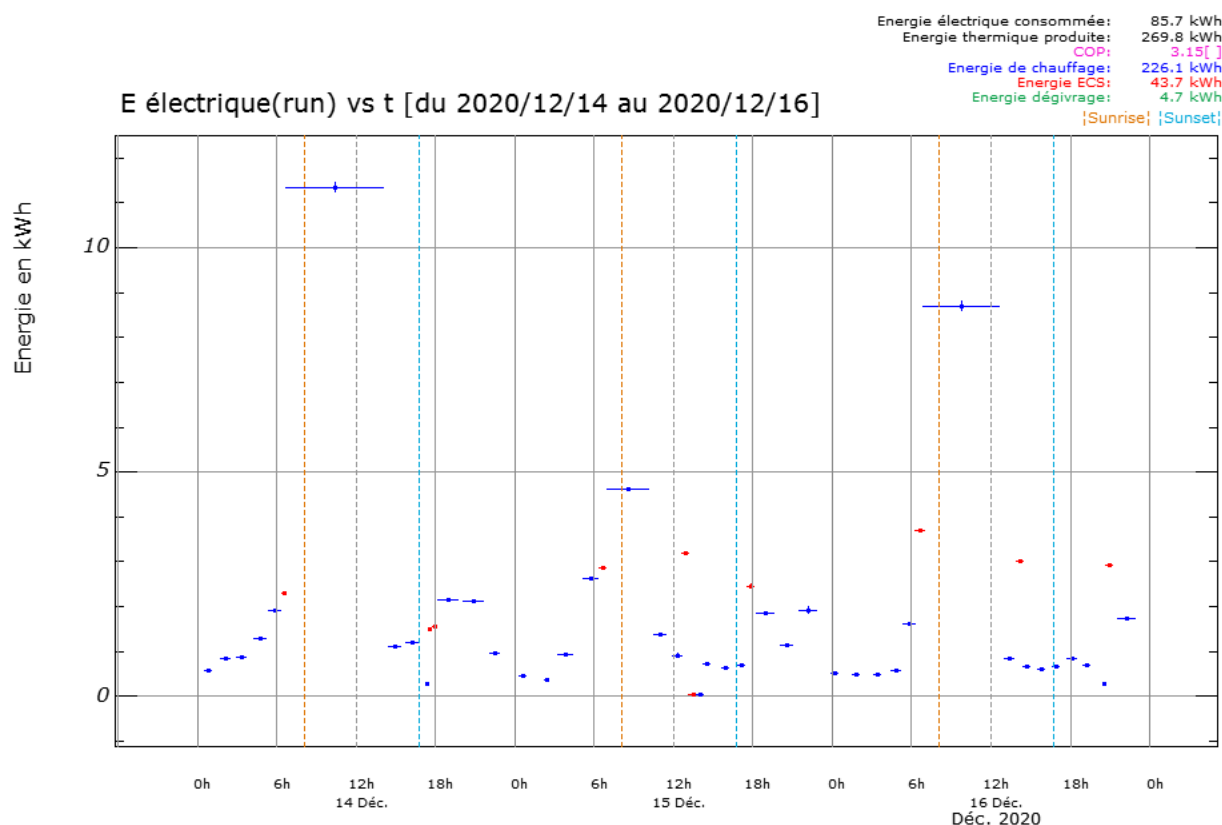


Figure 36 : Consommation électrique pour les différents runs sur les trois jours.

La relance du matin

Les longs runs de chauffage du bâtiment sont visibles après le lever du soleil (sunrise). C'est la « relance du matin » qui apparait quand la consigne de chauffage de nuit est abaissée par rapport à celle de jour.

Le graphique 37 montre pour la même période analysée la production de chaleur faite par la pompe à chaleur.

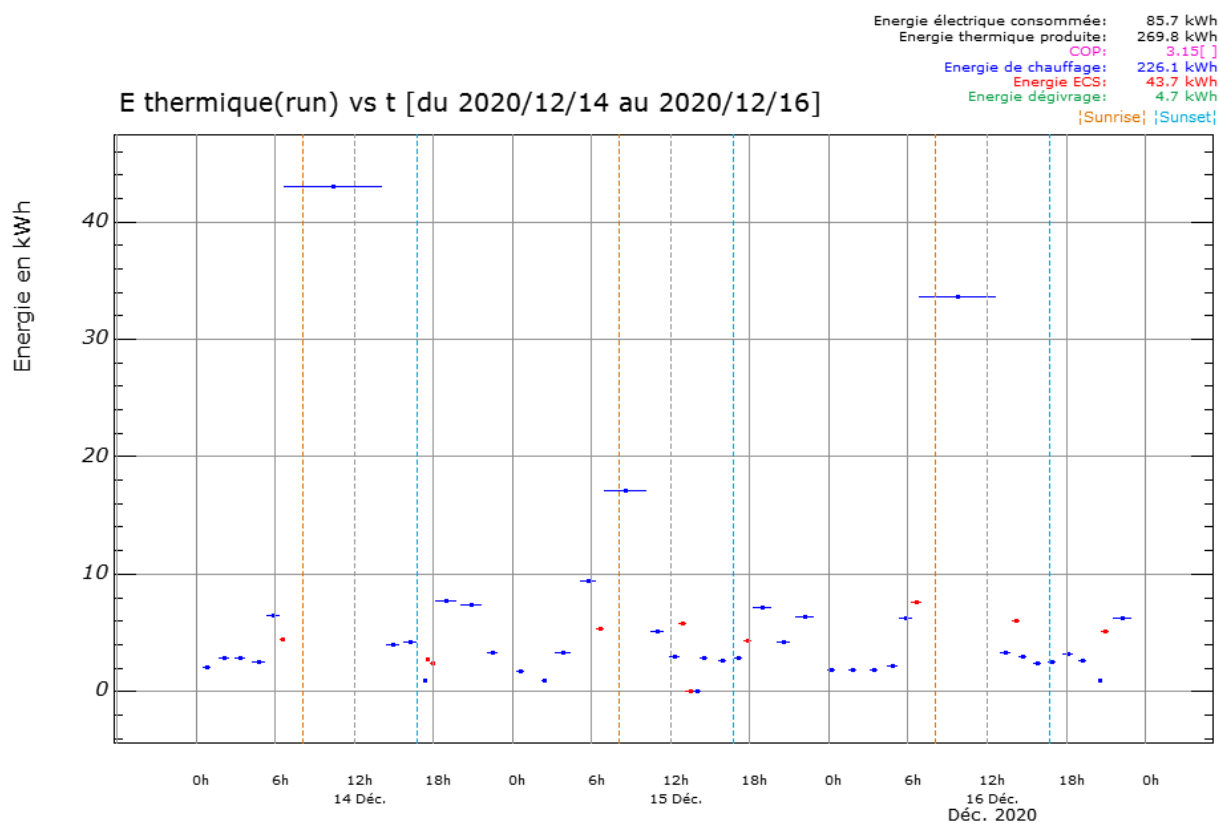


Figure 37 : Production d'énergie thermique pour les différents runs sur les trois jours.

Le COP

Le rapport des amplitudes des énergies thermiques et électriques monitoré la performance de la PAC pour chacun des runs.

La figure 38 montre les performances mesurées sur trois jours pour la PAC_4.

La ligne horizontale fuchsia représente la valeur moyenne du cop (3.15) sur la période étudiée pour tous les types de runs. La moyenne est pondérée par l'énergie thermique de chaque run.

Pour les runs d'ECS, le COP est proche de 2.

Pour les runs de chauffage, le COP approche 4.

L'énergie (thermique) de dégivrage est inférieure à 2%.

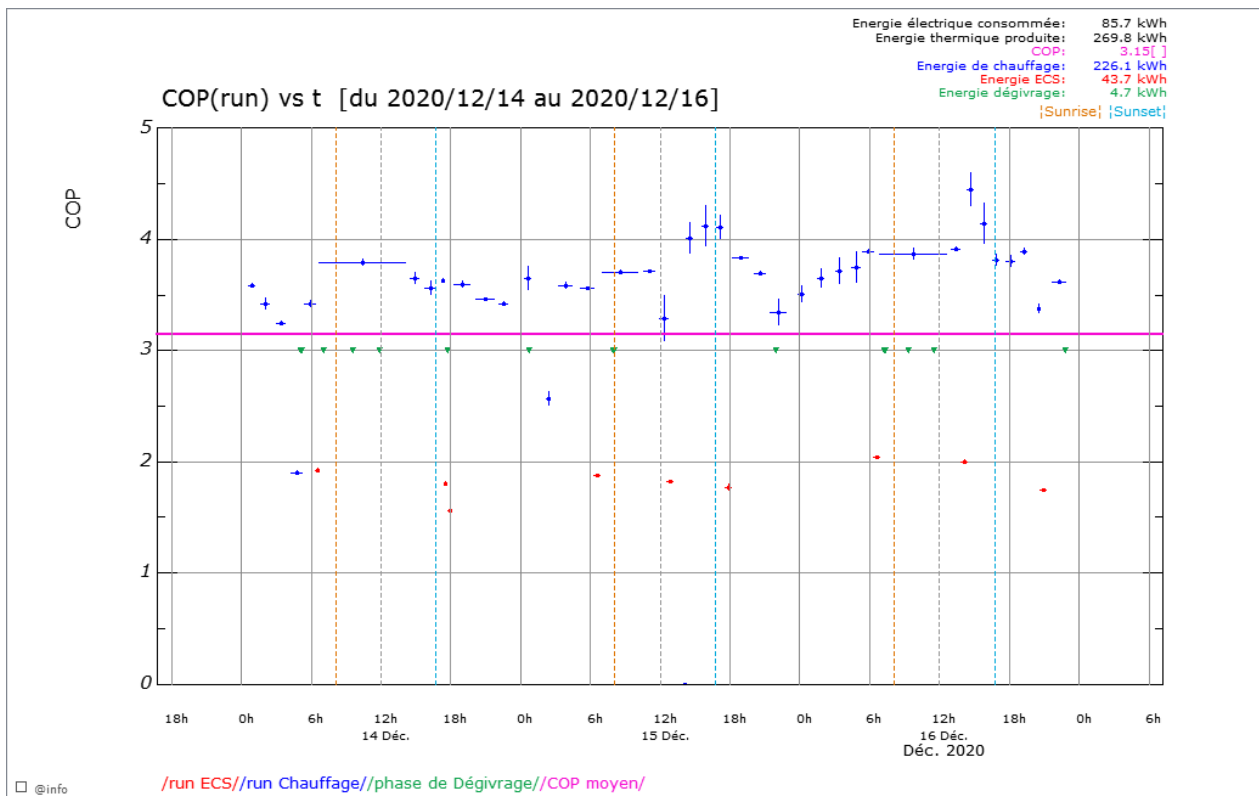


Figure 38 : T_{aller} pour les différents runs sur les trois jours.

Filtration universelle des données

Le développement d'algorithmes de filtration et d'identification universelles des données associées aux pompes à chaleur, quel que soit leur type, leur régulation et leur point de fonctionnement, est extrêmement difficile à réaliser, et dépasse de loin le cadre de ce projet.

La robustesse des algorithmes développés sera améliorée dans les phases suivantes de ce projet.

3.6. Interface web pour visualiser les données

Interface web

L'interface web proposée est basique. Elle permet de spécifier la pompe à chaleur à étudier, et le nombre de jour à analyser.

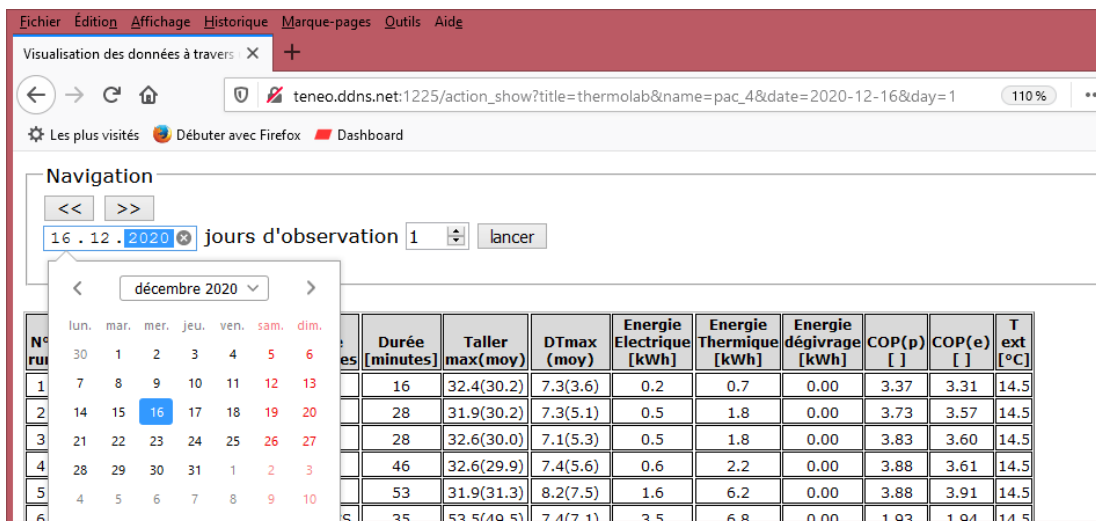


Figure 39 : Interface utilisateur pour le traitement des données acquises.

Les réponses tabulaires

L'appel au serveur « xServer » déclenche l'analyse des données et délivre les résultats sous forme tabulaire comme montré dans le tableau suivant ou sous forme graphique dans la figure 40.

Les fonctions appelées pour produire les graphiques par l'interface web étant les mêmes que celles qui analysent finement les données (watchData) les résultats montrés sont équivalents dans leur fond et leur forme.

N° run	N° jour	Date début run	Type mesures	Durée [minutes]	Taller max(moy)	DTmax (moy)	Energie Electrique [kWh]	Energie Thermique [kWh]	Energie dégivrage [kWh]	COP(p) []	COP(e) []
1	0	16.12.2020 00:02	6	16	32.4(30.2)	7.3(3.6)	0.2	0.7	0	3.37	3.31
2	0	16.12.2020 01:27	11	28	31.9(30.2)	7.3(5.1)	0.5	1.8	0	3.73	3.57
3	0	16.12.2020 03:05	11	28	32.6(30.0)	7.1(5.3)	0.5	1.8	0	3.83	3.6
4	0	16.12.2020 04:21	19	46	32.6(29.9)	7.4(5.6)	0.6	2.2	0	3.88	3.61
5	0	16.12.2020 05:21	21	53	31.9(31.3)	8.2(7.5)	1.6	6.2	0	3.88	3.91
6	0	16.12.2020 06:14	15 ECS	35	53.5(49.5)	7.4(7.1)	3.5	6.8	0	1.93	1.94
7	0	16.12.2020 06:49	145	342	38.1(32.3)	12.4(7.0)	8.8	34.4	1.36	3.91	3.83
8	0	16.12.2020 12:58	16	39	35.8(33.0)	7.8(6.2)	0.8	3.3	0	3.93	3.89

10	0	16.12.2020 13:49	14 ECS	32	53.3(50.2)	15.5(7.6)	3	6	0	2.01	1.98
11	0	16.12.2020 14:21	12	28	35.4(32.9)	9.6(6.0)	0.7	3	0	4.6	4.3
12	0	16.12.2020 15:26	12	30	35.2(32.5)	8.0(6.0)	0.6	2.5	0	4.32	3.96
13	0	16.12.2020 16:33	13	32	34.8(32.2)	8.0(5.6)	0.7	2.5	0	3.77	3.86
14	0	16.12.2020 17:40	16	39	35.8(32.9)	7.8(6.3)	0.8	3.2	0	3.85	3.75
15	0	16.12.2020 18:54	14	35	35.0(32.0)	7.8(5.8)	0.7	2.7	0	3.92	3.85
16	0	16.12.2020 20:17	4	16	34.9(33.7)	7.1(6.7)	0.3	0.9	0	3.35	3.41
17	0	16.12.2020 20:33	15 ECS	35	53.4(50.2)	7.9(6.3)	2.9	5.1	0	1.74	1.75
18	0	16.12.2020 21:33	31	74	36.0(33.8)	9.2(6.4)	1.7	6.2	0.01	3.64	3.6

Tableau 1 : Interface utilisateur pour le traitement des données acquises.

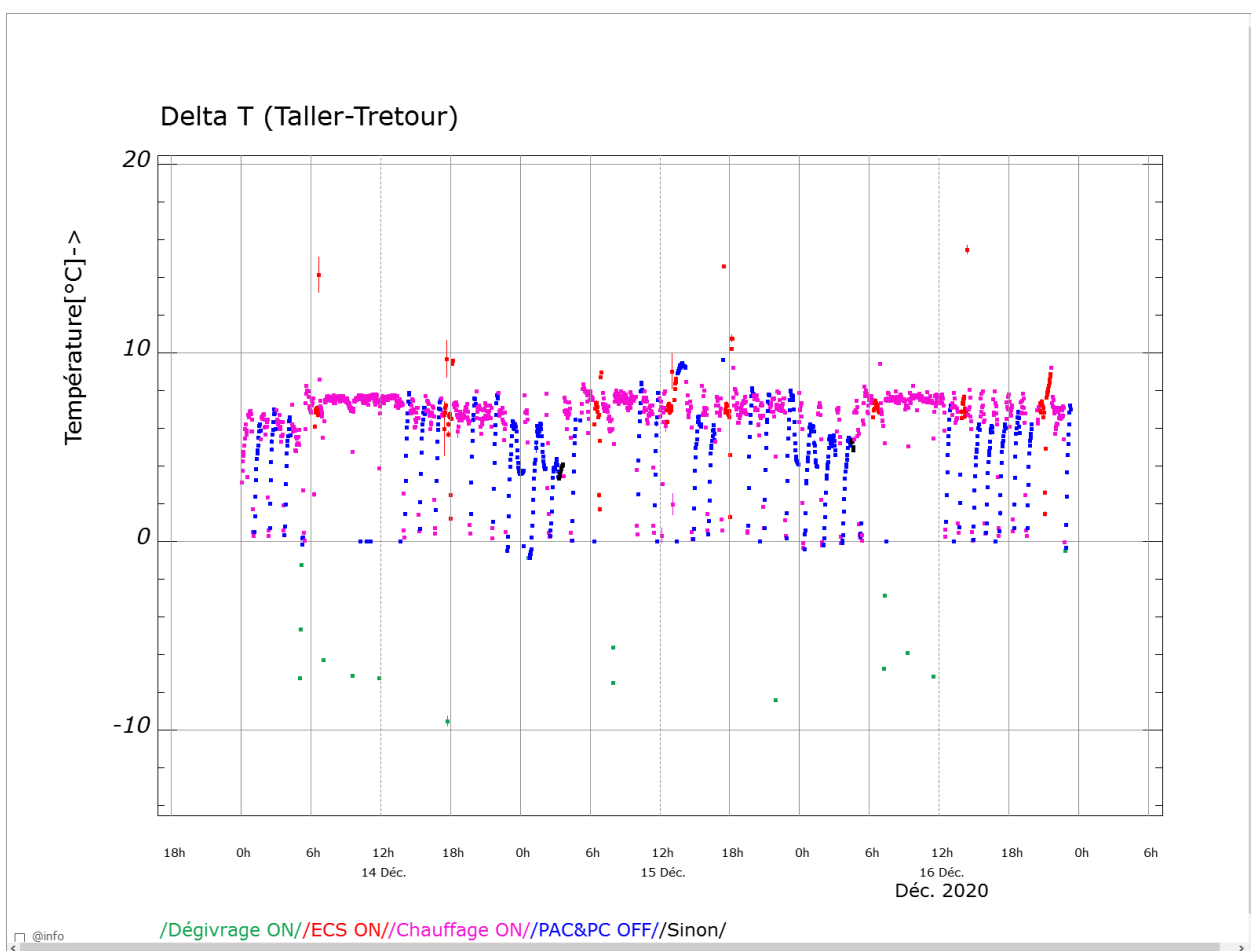


Figure 40 : Graphique produit depuis l'interface web.

4. Bilan des quatre premières installations

Quatre installations

Les quatre pompes à chaleur air-eau, instrumentées ont été nommées :
PAC_2, PAC_3, PAC_4, PAC_5.

La PAC_1 est la pompe à chaleur (eau-eau) du laboratoire de thermodynamique de l'école d'ingénieurs, qui a servi à faire les développements.

Toutes les pompes à chaleur instrumentées se trouvent, et c'est un hasard, sur la rive droite, la plus ensoleillée de la vallée du Rhône.

PAC_2

M. Patrice Cordonier
Rue d'en Haut 33
1978 Lens

Altitude ~1100 m

Système installé : pompe à chaleur air-eau, produit de la chaleur uniquement pour le chauffage d'une maison individuelle. La maison est équipée de panneaux solaires photovoltaïques. L'eau chaude est produite par des panneaux solaires thermiques.

Système installé : pompe à chaleur air-eau Dimplex

PAC_3

M. Louis-Philippe Gard
Chemin du Moulin 20
3968 Veyras

Altitude ~645 m

Système installé : pompe à chaleur air-eau Hoval² (unité extérieure Belaria®S (14), et son unité intérieure Belaria®SRM (14)) [10].

Caractéristiques PAC

Puissance : 8.6 kW A2/W35

Puissance : 10.7 kW A-7/W35

COP : 4.8 A7/W35

COP : 4.1 A2/W35

COP : 3.2 A-2/W35

² La seule PAC qui ne tourne pas rond 😊.

PAC_4

M. Eric Mabillard
Rue du Stade 14
3960 Loc

Altitude ~800 m.

Système installé : Pompe à chaleur air-eau de la marque ELCO type : AEROTOP (G07-14M) [11], produit de l'eau chaude sanitaire et le chauffage de deux appartements. Deux réservoirs de 300 litres et 527 litres (équipés d'appoint électriques) pour le stockage de l'eau de chauffage et d'ECS respectivement

Caractéristiques PAC

Puissance : 15.2 kW A2/W35

Puissance : 12.7 kW A-7/W35

COP : 3.84 A2/W35

PAC_5

M. Balaj Faik
Chemin de la Fréha 14
1978 Lens

Altitude ~1100 m.

Système installé : Pompe à chaleur de type air-eau Dimplex (Chauffage et eau chaude sanitaire)

452158 29 31

Dimplex

Glen Dimplex Deutschland GmbH
Geschäftsbereich Dimplex
Am Goldenen Feld 18
D-95326 Kulmbach

Typ: **LI 11 AS** Art.-Nr.: **339 890**

Fabr.-Nr.: **809 221** KI: **03** FD: **8602**

3~400 V, 50 Hz **R 404 A** **2,5** kg **cos Φ 0,8** **16** A **23** A

V_{WOA} 2500 m³/h **P_{max} 28** bar **I_A 23** A

V_{WNA} 1,0 m³/h **Δp_{WOA} 25** Pa **t_{WOA} -20/+35** °C

Schutzart IP 21 **Δp_{WNA} 0,03 · 10⁵** Pa **t_{WNA} +27/+55** °C

P_E A2 W35 **1 Verdichter** **200** kg

P_H A7 W35 **2,7** kW **11,3** kW

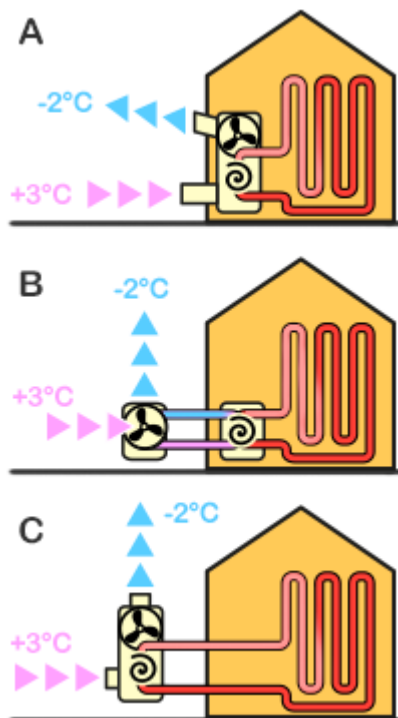
FCKW-frei
Arbeiten an der Anlage dürfen nur von sachkundigen Personen durchgeführt werden.

452158 29 41

Figure 41 : Photographie de la fiche technique de la pompe à chaleur (PAC_5).

Configuration split

L'exécution split des pompes à chaleur, peut être classé suivant trois types distincts (A, B, ou C) comme le montre le schéma de la figure 42.



La PAC_2, et PAC_5 sont de type A. L'échange l'air avec l'extérieur est assuré par un saut de loup.

La PAC_3 est de type B. L'évaporateur extérieur, est placé à ~20 mètres. de la chaufferie.

La PAC_4 est de type C. Une distance ~10 mètres sépare la PAC de la chaufferie.

Figure 42 : Schéma tiré du fameux site www.energie-environnement.ch.

La saison de chauffe 2020 - 2021

Des quatre installations, durant la saison de chauffe 2020-2021, trois seulement ont livrés des données pour analyse. La PAC_5 n'a pas pu communiquer plus de quelques heures avec le monde extérieur (et ce n'est pas faute d'avoir essayé !).

Les trois autres ont livrés des données, sur des périodes de plus 2 mois.

L'eau chaude sanitaire est produite par la pompe à chaleur seulement pour la PAC_4. Les PAC_2 et PAC_3 ne produisent que de l'eau pour chauffage.

Engagement des PAC

La PAC_2 ne fonctionne jamais durant la nuit. C'est la volonté du propriétaire qui a mis en place un « système de relais » pour y parvenir. Cette volonté a été initiée, dès que les premiers résultats du système d'acquisition mis en place ont été observés.

Les PAC_3 et PAC_4 s'enclenchent sur la base de courbe de chauffe et peuvent faire démarrer la PAC à tout moment, dès que le besoin s'en fait sentir.

Préparation de l'ECS

Pour la PAC_4, par exemple, de longs runs de préparation d'eau chaude sanitaire démarrent le matin, avant le lever du soleil. On sait que c'est exactement à ce moment-là, que la température journalière est au plus bas, diminuant ainsi, selon les lois immuables de la thermodynamique, l'efficacité énergétique de toute machine thermique.

Si ces runs d'ECS partaient quand le soleil était présent, l'électricité photovoltaïque produite par la maison (qui abrite la PAC_4) pourrait être autoconsommée. Il y a donc des potentiels d'optimisation. Réduire la consigne de l'eau chaude sanitaire suivant un profil journalier serait une piste élégante d'amélioration.

Résultats de synthèse

Les performances d'une PAC sont bien évidemment dépendantes de facteurs physiques extérieurs, et de la configuration de l'installation.

Les PAC instrumentées ne sont jamais dans un état stationnaire. La température, l'humidité de l'air extérieur ainsi que les besoins en chaleur changent perpétuellement. Il est donc difficile voire même impossible de comparer précisément les résultats obtenus par acquisition de données avec les résultats des tests agréés que peut subir une PAC dans un laboratoire.

La PAC_2 donne, la plupart du temps un COP supérieur à 3.

La PAC_3 a un COP qui est plus proche de 2 que de 3 et loin du cop signalé par le constructeur. La PAC_3 est celle qui au niveau performance fonctionne le moins bien. La raison tient au fait que la température de départ est trop haute (plus de 45°C pour un chauffage au sol) réduit clairement les performances de la PAC.

La PAC_4 a le meilleur COP des trois PAC. Pour l'eau chaude sanitaire on a un COP de 2, et pour le chauffage des COP qui dépassent souvent la valeur de 4.

COP promis et mesuré

Les performances mesurées des pompes à chaleur tels que montrées dans les dépliants sont rarement atteintes dans les pompes à chaleur installées sur le terrain. La figure 43 montre les performances atteintes en laboratoire par la pompe à chaleur PAC_4.

Données techniques

Dimensions H x L x P : 1290 x 960 x 1470 mm

AEROTOP® G	Efficiéce énergétique ¹ ■, W35	Niveau de puissance A2/W35 kW	Niveau de puissance A-7/W35 kW	Coefficient de perfor- mance COP A7/W35	Température d'entrée maximale en °C	Niveau sonore à l'extérieur en dB(A) ²
G08.2	A+++ / A+++	3,4-12,2	2,6-9,7	5,2	60	53
G14.2	A+++ / A+++	3,4-15,5	2,6-12,4	5,1	60	56

⁽¹⁾ Classe d'efficacité énergétique:
Règlement (CE) 811/2013

■ Chauffage des locaux: produit / système
Classes labellisées: A+++ → D / A+++ → G

⁽²⁾ Niveau sonore conforme en mode Silence

Figure 43 : Copie des données techniques de la pompe à chaleur (PAC_4).

D'où peut venir cette différence

Chacun a, sans doute, comparé la consommation d'essence de son véhicule avec ce que le dépliant du dit véhicule, nouvellement acheté, promettait.

La consommation mesurée par le constructeur est systématiquement inférieure à la consommation, telle que nous pouvons l'approximer en comptant les kilomètres effectués à chaque plein.

Avec le COP des pompes à chaleur, c'est un peu pareil.

Mais en fait, d'où, pour les pompes à chaleur, peut provenir cette différence de COP ?

Les pistes

Les pistes avancées pour expliquer cette différence sont détaillées dans les paragraphes suivants. Il s'agit des pistes liés à :

- l'état stationnaire :
- la chaleur produite et la chaleur consommée
- les phases de dégivrage :
- le biais probable de l'énergie produite :

Etat station- naire

En laboratoire, le COP des PAC est déterminé dans des états stationnaires, sur des run « infiniment longs ». La mesure des performances in situ, les conditions physiques et les besoins en chaleur ne sont pas stationnaires.

Chaleur produite et consommées

En laboratoire, c'est l'énergie thermique produite par la PAC qui est mesurée. Dans le présent projet c'est l'énergie qui est mise dans le bâtiment qui est mesurée. Dans le premier cas les pertes d'énergie thermiques dans le terrain comme suggéré par le schéma de la figure 44 ne sont pas considérées dans le COP, alors que la PAC a produit cette énergie.

L'isolation et la distance du split augmente la différence d'énergie entre l'énergie produite par la PAC et celle apportée au bâtiment.



Figure 44 : Schéma tiré de la fiche technique de la pompe à chaleur (PAC_4).

Humidité de l'air et dégivrage

L'humidité de l'air dans le fonctionnement des pompes à chaleur air-eau joue un rôle important dans le lancement des phases de dégivrage. L'énergie, prise sur le circuit de retour des pompes à chaleur, n'est jamais, selon mes lectures, spécifiée.

Cette énergie de dégivrage réduit le COP global de la PAC d'évidente manière.

Biais de la mesure

Comme mentionné plus haut dans le texte, la mesure de température de départ (sur l'extérieur du tuyau) a tendance à sous-estimer l'énergie injectée dans le bâtiment et par là même le COP de la PAC.

5. Conclusion, remarques, best practices et suite à donner

Système d'acquisition développé

Le développement fait dans ce projet n'a pas été un produit mais un **système ouvert et évolutif**. Réparti sur trois niveaux logiques, répondant entièrement au cahier de charges établi, le système acquiert, centralise, et présente les données en temps réel.

Le Raspberry Pi

Le choix pour l'acquisition des données s'est construit sur un Raspberry Pi et l'exploitation de :

- son serveur one-wire
- son serveur domoticz.

La communication entre les capteurs est basée sur des ondes radio à une fréquence de 868 MHz. Cette dernière permet une portée et une fiabilité tout à fait acceptable.

Documentation

Tout au long du développement du projet, une large documentation a été réalisée :

Outre le présent document, les documents suivants ont été écrits :

- L'Abécédaire de l'acquisition de données avec un Raspberry Pi. Ce document, très utile pour un développeur, rassemble l'ensemble du savoir-faire avec un Raspberry Pi.
- Serre d'hivernage. Ce document montre une application domotique, basée sur un système similaire à celui utilisé pour monitorer les pompes à chaleur.

L'ensemble de cette documentation est disponible sur le site internet

<http://teneo.ddns.net>

C'est également depuis ce site, que les performances des pompes à chaleur peuvent être interrogées et visualisées.

Outil de développement

Développer le logiciel aux trois niveaux logiques avec le même outil (QT Creator C/C++) a été un choix qui s'est révélé fructueux. Le code est utilisable et est applicable sur chacun des niveaux. Il devient plus robuste et plus fiable sans demander plus d'effort.

Accès à distance et gestion de l'information

L'accès à distance des installations mises en service est indispensable pour dépanner l'installation. Pour moins de cinq installations, ce service auprès de VNC est gratuit, pour d'avantage d'installations, ce service est payant.

Dès que l'accès à distance ne fonctionne plus, causé par une mise à jour trop profonde, le déplacement in situ est inévitable et augmente les coûts de manière non négligeable.

La possibilité de demander par un simple WhatsApp de relancer le système d'acquisition est fondamental. Cette procédure évite de nombreux frais inutiles.

Les coûts hardware et software

Les coûts du hardware ont été, de loin, sous-estimés.

Des offres faites auprès des installateurs de la région, ont montré que l'installation d'un débitmètre dans un système existant revient à plus de 500 CHF (hors matériel). Le prix du débitmètre dès que la section passe de $\frac{3}{4}$ de pouces à un diamètre supérieur, augmente de manière fortement non linéaire. La venue d'un électricien sur place gonfle la facture de plusieurs centaines de francs uniquement pour le déplacement.

La communication par POWERLINE (TP-link) est très aléatoire. Pour certaine installation, cela fonctionne, pour d'autre cela ne fonctionne que durant un instant, ou simplement pas du tout, sans connaître la raison du fonctionnement ou du non-fonctionnement. Cette solution souffre un peu du syndrome du clignotant ! L'acquisition d'un DEVOLO (POWERLINE) haut de gamme a été faite pour augmenter la fiabilité de la communication pour la PAC_5. La solution haut de gamme a été un échec cuisant.

Intrusion chez les gens

L'accès à la chaufferie et l'utilisation du système informatique des foyers visités pour transférer les données techniques consistent en une simple intrusion dans la vie privée des gens. Cet aspect a été omis lors de la phase de l'offre de ce projet. Ceci est néanmoins gênant, quand il faut déplacer la planche à repasser et les chemises ou l'équipement de golf des habitants pour atteindre le Raspberry Pi installé.

Ce malaise, est évidemment un sentiment personnel, qui m'a dérangé alors que je connaissais personnellement les familles visitées. Je ne pensais pas rencontrer ce genre de problèmes pour des installations que je jugeais, en première lecture, comme uniquement techniques. Cette gêne augmentera évidemment lorsque nous auront à faire à des parfaits inconnus (ou non !).

Diversité des systèmes informatiques

Les systèmes informatiques pour communiquer avec le web sont, dans la région, fournis soit par Swisscom soit par Netplus. L'accès à la configuration des systèmes, quel que soit le fournisseur n'est pas envisageables pour diverses raisons.

En effet, il arrive que Swisscom, lors de mises à jour profondes de leur système écrase la configuration des utilisateurs, pour y écrire une nouvelle version.

Personnellement, je n'aimerais pas que quelqu'un d'étranger à ma famille configure ma box internet de quelque manière que ce soit.

Performance des PAC analysées

La performance des PAC, telle que signalée dans les dépliants promotionnels mettent en avant des valeurs qui ne s'accordent pas avec les mesures faites in situ. Les éléments mis en avant par les fabricants de pompes à chaleur sont plus orientés vers le bruit que l'installation émet, plutôt que par les performances énergétiques.

Jamais dans un dépliant promotionnel, on ne parle de phase de dégivrage, de durée de run, ou d'humidité relative de l'air environnant qui impactent le coefficient de performance des PAC air-eau.

Choix des capteurs

Les capteurs pour mesurer les puissances électriques et thermiques se sont avérées fiables et bien choisis. Les capteurs mesurant les températures externes sont moins fiables. Un des capteurs a disparu, certainement emporté par une pie voleuse. Le remplacement du capteur n'a pas été un succès. Celui-ci n'a jamais pu se connecter au système.

Evolution des logiciels

Les logiciels d'analyse peuvent évoluer facilement sans visite sur place sur les installations mises en place. Ce n'est pas le cas des logiciels embarqués, quand l'accès à distance est aléatoire.

Les logiciels d'analyse doivent toutefois être paramétrés de manière individuelle simplement parce que chaque PAC est paramétrée de manière unique pour chaque machine (température aller, loi d'eau, démarrage et arrêt des runs, ...).

Motivation des propriétaires

La motivation des propriétaires est grande, rarement directement liée à l'économie financière potentielle, mais plutôt à l'optimisation systémique de l'installation et au confort thermique. Les propriétaires visités ont tous une bonne connaissance de l'énergie, des systèmes installés et une « conscience énergétique » que je jugerais de grande valeur.

La grande majorité des PAC instrumentées, chauffe une maison qui est équipée de panneaux solaires photovoltaïques et de panneaux solaires thermiques.

Les questions qui reviennent le plus souvent sont en lien avec la régulation complètement magique que personne n'ose « toucher » sous peine de voir la garantie donnée tomber, et geler un peu plus tard de froid durant de longs mois d'hiver :

Les questions sont :

- Comment faire pour que la pompe à chaleur fonctionne quand mon photovoltaïque produit du courant.
- Pourquoi les runs sont si courts quand on sait que le rendement des runs courts est mauvais.
- Une température aller de 45°C pour du chauffage au sol (observé pour la PC_3), est-ce raisonnable ? Qui peut changer les paramètres de régulation ?
- Y a-t-il quelqu'un qui maîtrise la régulation de ces machines ?
- Est que ma pompe à chaleur est bien ou non ? Ai-je eu raison d'installer ce système. Vous pensez quoi du chauffage électrique directe ? pour l'eau chaude sanitaire ? Et pour le chauffage ?

Développements futurs

La suite à donner, coté développement est de fiabiliser, encore d'avantage, l'acquisition pour rendre le logiciel des installations déployées parfaitement identique et hautement robuste.

Pour cela, plusieurs passages sur place ont été inévitables pour trois des quatre installations. Le problème de base rencontré était systématiquement la connexion avec internet.

Choisir une prochaine installation qui dispose d'un accès internet depuis la chaufferie simplifiera la mise en œuvre.

Nouvelles PAC à instrumenter

Si de nouvelles installations doivent être équipées, leur choix s'avère primordial.

Les paramètres suivants doivent être évalués :

- l'entregent des propriétaires,
- l'intérêt que les propriétaires portent à l'énergie et à sa maîtrise,
- l'emplacement des installations, à compter depuis Sion,
- la facilité de connexion internet depuis la chaufferie.

Le budget relatif aux interventions de l'électricien et du chauffagiste doit être « sorti » du prix du projet.

Un budget dédié à :

- suivre les installations mises en service doit être prévu,
- adapter les programmes d'analyse des données
- ajouter des capteurs ad hoc

devrait être trouvé dans le but de valoriser les expériences acquises.

Informations

L'analyse des données pourrait être valorisée en faisant un retour d'information aux installateurs de pompes à chaleur, qui travaillent trop souvent en boucle ouverte, et n'ont jamais de retour des performances mesurées des installations qu'ils ont installés.

Une participation à des séminaires organisés par le **Groupeement professionnel suisse pour les pompes à chaleur GSP**, permettrait de montrer ce que l'HEVS et le SEFH font pour l'efficacité énergétique des pompes à chaleur.

Un retour d'information, aux personnes qui nous ont fait confiance pour les quatre premiers systèmes devrait être fait, pour leur montrer les résultats obtenus.

Formations

Dans le cadre de travaux de diplôme ou de travaux de groupe (PGA et PR3) des sujets hautement intéressants, centrés autour de la régulation ou de l'énergie pourraient être proposés aux étudiants de notre école.

6. Annexes

Les annexes traitent de :

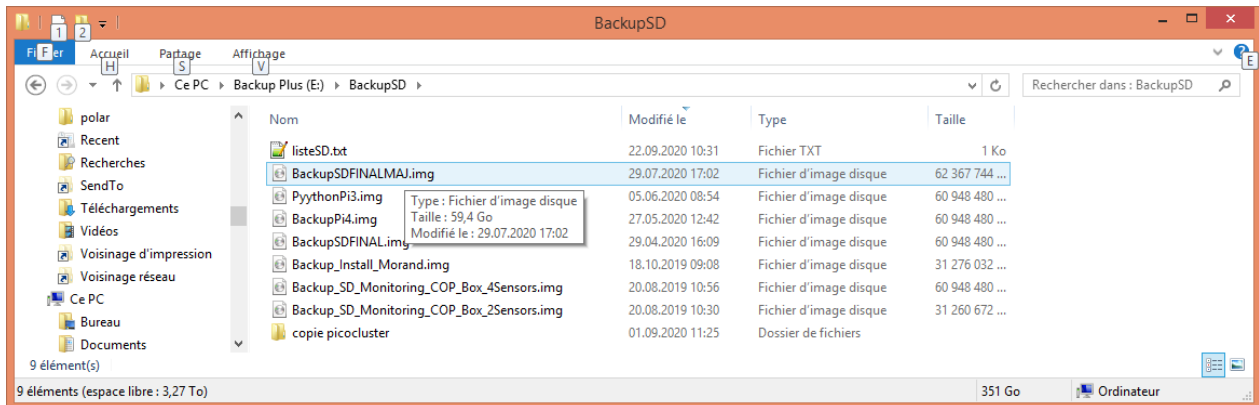
- L'installation et la configuration des cartes sd et de la configuration spécifique des installations
- La manière de « backuper » et de « restorer » une carte sd.
- L'accès par FTP
- L'accès à distance par VNC

5.1 Installation et configuration

Configuration pour la MES d'une nouvelle installation

Pour mettre en service une nouvelle installation, la marche à suivre est la suivante :

Copier sur une carte micro-sd une copie du système. La dernière version mise à jour est backupSDFINALMAJ.img.



Configuration spécifique

Chaque installation est une copie du logiciel de base, paramétrée par quelques fichiers. Il s'agit des fichiers :

- domoticVisu.sh

Ce fichier définit la configuration active.

.domotic-Visu.sh

Le fichier se trouve en :

```
/home/pi/ASQ/DEV/domoticVisu2017/domoticVisu2017/exe/domoticVisu.sh
```

C'est un fichier exécutable qui contient l'information suivante :

```
cd /home/pi/ASQ/DEV/domoticVisu2017/domoticVisu2017/exe/  
sudo ./domoticVisu acq=120 NbrFichiers=10 config="data/PAC_LABO.config"
```

Il définit la fréquence d'acquisition (ici 120 secondes) et le nombre de fichiers à transférer par ftp (ici 10 fichiers).

La dernière information est le fichier de configuration qui s'applique pour cette instance (ici data/PAC_LABO.config).

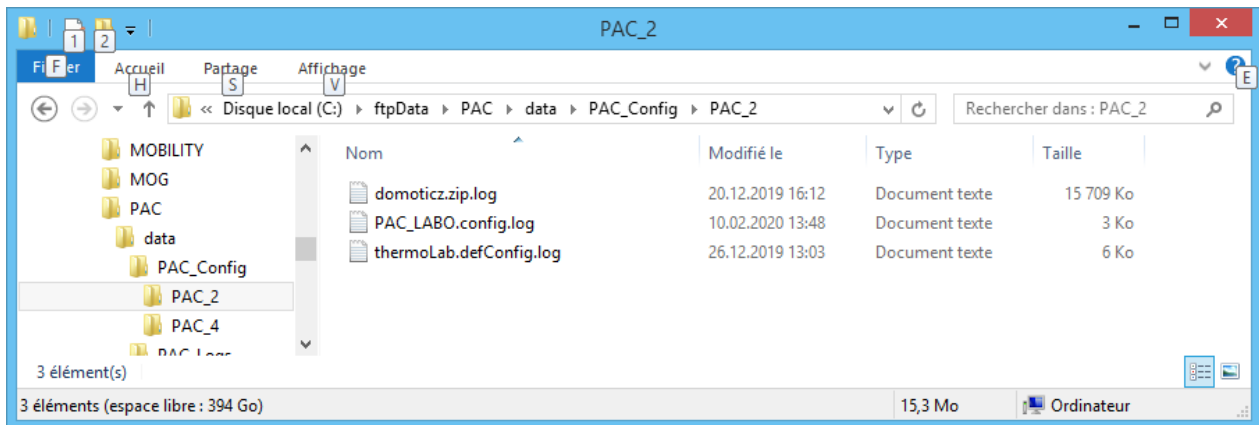
6.2. Backup/restore de l'installation

Fichiers de configuration

Chaque installation comporte des parties spécifiques, qu'il s'agit de backuper dans le cas où la carte micro-sd venait à être détériorée.

Il y a la configuration des canaux par :

- le fichier thermolab.defConfig
- le fichier PAC_LABO.config qui décrit les accès ftp, et le nom de l'installation
- le répertoire qui contient la description du hardware de domoticz.



Comment transférer les données

Tout fichier mis dans le répertoire /Logs/ du Raspberry pi va être automatiquement transféré vers le serveur par FTP. Pour transférer un répertoire entier, il est nécessaire de le compacter avec zip.

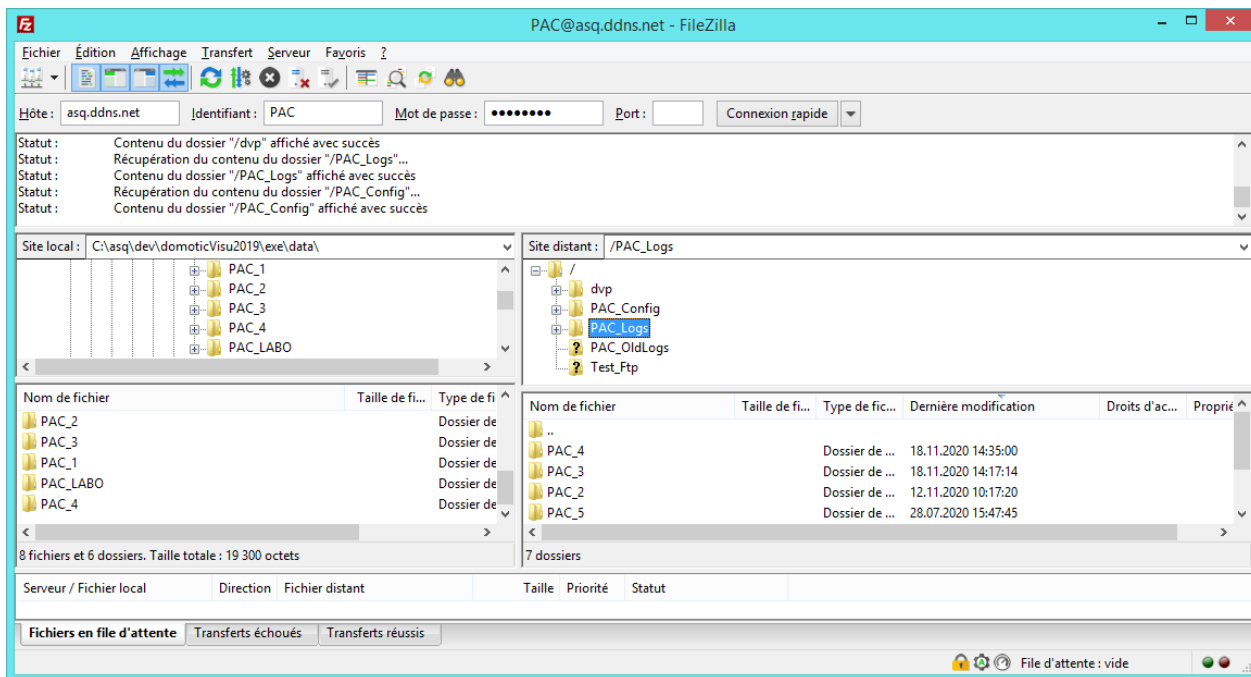
5.3 Accès aux fichiers par FTP

FTP



FileZilla est le logiciel FTP qui a été choisi pour échanger des fichiers avec les systèmes.

Pour accéder au serveur : **asq.ddns.ch** user : **PAC** et pw : XXXXXXXXXX



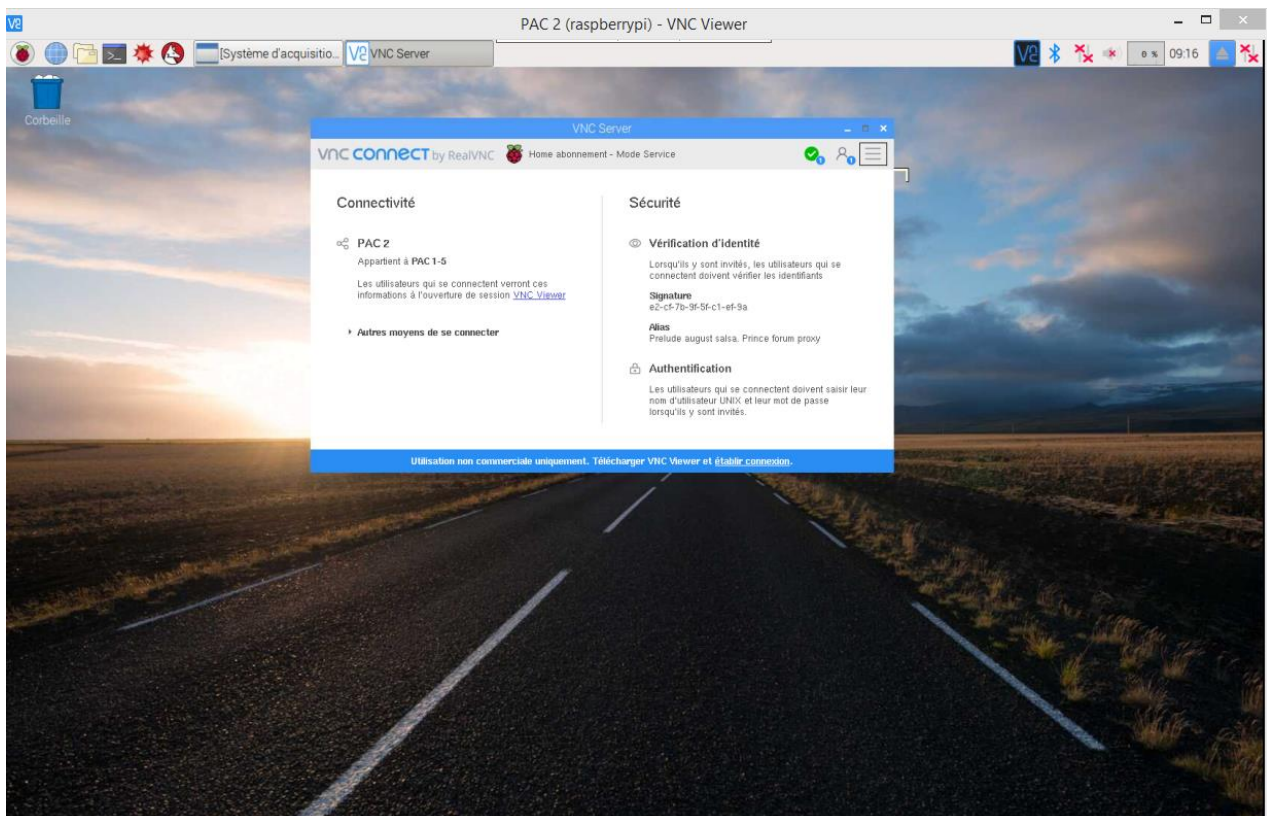
5.3 VNC : accès à distance

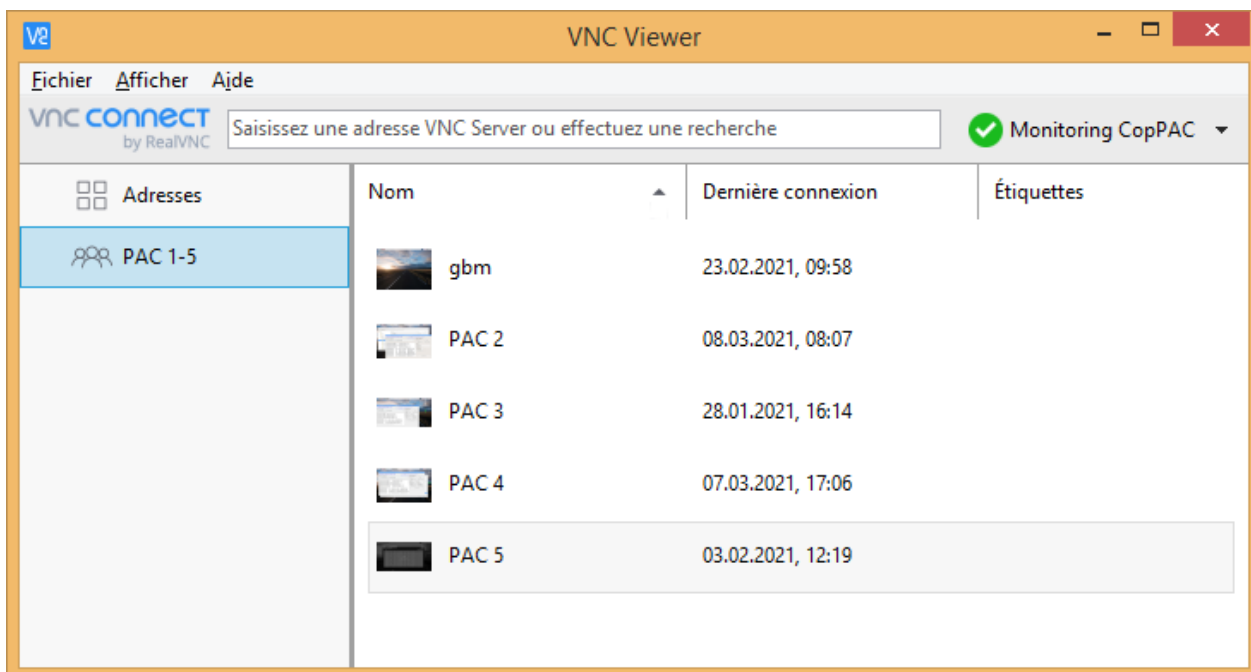
Principe de fonctionnement

Pour accéder aux Raspberry pi à distance, la technique consiste à faire tourner sur les raspberry pi le serveur VNC.



Celui-ci publie sur internet l'interface utilisateur auquel on peut accéder à distance. Il arrive que l'accès ne soit plus atteignable dès que le serveur ne fonctionne pas ou que l'accès internet n'est plus présent. Ce cas de figure arrive plus ou moins souvent. Un reboot du système résout la plupart du temps le problème.





Login et mot de passe...

- monitoringCopPAC1.5@gmail.com

Prénom : Monitoring

Nom : CopPAC

MP : [REDACTED]

Date de naissance : 01.01.1995

Prénom : Monitoring

Nom : CopPAC

MP : [REDACTED]

Date de naissance : 01.01.1995

5.4 Installations

1. Liste des figures

Figure 1 : Architecture et applications logicielles.	4
Figure 2 : Les trois niveaux d'information.	5
Figure 3 : Raspberry pi en format carte de crédit.	6
Figure 4 : Schéma de principe d'une requête http sur un serveur.	6
Figure 5 : Architecture logicielle et matérielle.	7
Figure 6 : Z-stick avec son interface USB.	8
Figure 7 : Copie écran de la réponse du serveur OWFS.	10
Figure 8 : Copie écran de la réponse du serveur OWFS pour le capteur spécifié.	11
Figure 9 : Schéma de principe des deux serveurs (domoticz et one-wire).....	12
Figure 10 : Copie écran qui montre les fichiers acquis.	12
Figure 11 : Exemple du contenu du fichier d'acquisition en format xml.	13
Figure 12 : Copie écran de l'interface utilisateur.	13
Figure 13 : Organisation des répertoires de domoticVisu.	14
Figure 14 : Organisation des applications développées.	18
Figure 15 : Fonctionnalités et outils utilisés pour le module data (acquisition de données). .	19
Figure 16: <i>Fonctionnalités et outils utilisés pour le module dataHub.</i>	19
Figure 17: Interface de dataHub.	20
Figure 18: Fonctionnalités et outils utilisés pour le module watchPacData.....	20
Figure 19: Interface de watchData.	21
Figure 20: Fonctionnalités et outils utilisés pour le module xServer.....	21
Figure 21 : Acquisition de la puissance électrique et thermique.....	22
Figure 22 : Compteur à impulsions pour déterminer le débit d'eau.	24
Figure 23 : Capteurs de température de type DS18B20.	25
Figure 24 : Capteur Home Energy Meter d'Aeotec.	26
Figure 25 : Raspberry Pi et compteur de débit.	27
Figure 26 : Valeurs du compteur de débit en fonction du temps.	28
Figure 27 : Valeurs du compteur de débit, après filtration en fonction du temps.....	29
Figure 28 : Puissance électrique mesurée en fonction du temps.	30
Figure 29 : Energie mesurée par le capteur Home Energy Meter.	31
Figure 30 : Détermination de l'énergie électrique à partir de la puissance mesurée.	32
Figure 31 : Différentiation des runs de chauffage et d'ECS.	34
Figure 32 : Température aller et température retour.	35
Figure 33 : Différents états de la pompe à chaleur sur les trois jours analysés.....	35
Figure 34 : Delta T (entre T_{aller} et T_{retour}) pour les différents runs.	36
Figure 35 : T_{aller} pour les différents runs sur les trois jours.	37
Figure 36 : Consommation électrique pour les différents runs sur les trois jours.	39
Figure 37 : Production d'énergie thermique pour les différents runs sur les trois jours.	40
Figure 38 : T_{aller} pour les différents runs sur les trois jours.	41

2. Références

Bibliographie

- [1] [En ligne]. Available: <https://fr.wikipedia.org/wiki/1-Wire>.
- [2] [En ligne]. Available: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Z-Wave>.
- [3] Wikipédia, «https://fr.wikipedia.org/wiki/Architecture_trois_tiers,» [En ligne].
- [4] w. creator), «https://fr.wikipedia.org/wiki/Qt_Creator,» [En ligne].
- [5] «https://fr.wikipedia.org/wiki/Raspberry_Pi,» [En ligne].
- [6] «<https://www.domoticz.com/>,» [En ligne].
- [7] «<https://en.wikipedia.org/wiki/1-Wire>,» [En ligne].
- [8] «<https://www.domotique-info.fr/technologies-domotique/zwave/>,» [En ligne].
- [9] «<https://aeotec.com/z-wave-home-energy-measure/>,» [En ligne].
- [10] «<https://www.batidoc.ch/m10/95/41114595/etc/54/41251854.pdf>,» [En ligne].
- [11] «https://elco.ch/fr/resources/downloads/fiches_produits/ELCO_CH_19_0279_Broschuere_Aerotop_G_FR_01_05_WEB.pdf,» [En ligne].
- [12] wikipédia, «https://fr.wikipedia.org/wiki/Architecture_trois_tiers,» [En ligne].
- [13] «https://fr.wikipedia.org/wiki/Architecture_trois_tiers,» [En ligne]. [Accès le 2018].