

## Table des matières

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 Introduction .....</b>   | <b>3</b>  |
| 1.1 Contexte .....  | 3         |
| 1.2 Le chauffage à distance de Verbier .....  | 4         |
| 1.3 Les objectifs .....   | 6         |
| <b>2 La modélisation des besoins et de la prédiction de la demande du CAD de Verbier.....</b> | <b>9</b>  |
| 2.1 Les modèles thermiques.....   | 9         |
| 2.2 Equation bilan .....  | 12        |
| 2.3 L'outil informatique.....   | 13        |
| 2.4 Provenance des données .....  | 13        |
| 2.5 L'ajustement .....  | 14        |
| 2.6 Dimensionnement des matrices .....  | 15        |
| 2.7 Premier modèle de prévision : « météo réelle ».....                                       | 15        |
| 2.8 Résultats modèle : « météo réelle » .....   | 20        |
| 2.9 Analyse du premier modèle .....   | 28        |
| 2.10 Deuxième modèle de prévision « météo réelle sans rampes chauffantes » .....              | 29        |
| 2.11 Résultat modèle « météo réelle sans rampes ».....  | 30        |
| 2.12 Analyse modèle « météo réelle sans rampes ».....   | 32        |
| 2.13 Troisième modèle de prévision « prévision météo » .....                                  | 33        |
| 2.14 Résultats modèle de prévision « prévision météo ».....                                   | 37        |
| 2.15 Analyse modèle de prévision « prévision météo » .....                                    | 39        |
| 2.16 Quatrième modèle de prévision « prévision météo sans données réelles » .....             | 39        |
| 2.17 Résultats modèle de prévision « prévision météo sans données réelles » .....             | 40        |
| 2.18 Analyse de la prévision « prévision météo sans réalité » .....                           | 42        |
| 2.19 Choix du modèle.....   | 42        |
| <b>3 Gestion des chaudières.....</b>  | <b>43</b> |
| 3.1 La méthode de résolution.....   | 43        |
| 3.2 Le détail de chaque coût .....  | 44        |
| 3.3 La stratégie de résolution .....  | 45        |
| 3.4 Résultats .....   | 47        |
| <b>4 Améliorations.....</b>   | <b>51</b> |
| 4.1 Prévision de la demande .....   | 51        |
| 4.2 Gestion des chaudières.....   | 52        |

|                                     |           |
|-------------------------------------|-----------|
| <b>5 Rendu final.....</b>           | <b>53</b> |
| <b>6 Intégration sur site .....</b> | <b>55</b> |
| <b>7 Conclusion.....</b>            | <b>57</b> |
| <b>8 Remerciements .....</b>        | <b>59</b> |
| <b>9 Annexes .....</b>              | <b>61</b> |

# 1 Introduction

## 1.1 Contexte

**CAD** Un réseau de chauffage à distance, plus communément appelé CAD est une installation permettant d'assurer les besoins thermiques de plusieurs consommateurs se situant dans une zone géographique proche. Un CAD répond principalement aux besoins en chauffage et en eau chaude sanitaire (ECS) du consommateur final. Pour répondre aux besoins, un CAD est constitué d'une centrale de chauffe, d'un réseau de conduites enterrées et isolées, ainsi que de sous-stations dans chaque bâtiment chauffé par le CAD. Le chauffage à distance répond aux besoins de tout type de constructions. Un quartier entier, une industrie, un immeuble, une collectivité publique ou une maison individuelle peuvent se raccorder à un CAD.

**Fonctionnement** Pour répondre aux besoins thermiques, de l'eau est chauffée en passant dans des chaudières. Il est possible d'utiliser différentes sources de chaleur comme le mazout, le gaz, les copeaux de bois, les pellets ou encore les rejets de chaleur d'une usine d'incinération<sup>1</sup>. Cette chaleur permet de chauffer l'eau qui se trouve dans les conduites enterrées, plus communément appelées réseau primaire. Après être chauffée, l'eau va être conduite dans chaque sous-station, puis grâce à un échangeur, la chaleur va être distribuée dans le réseau secondaire. Le réseau secondaire est l'installation technique appartenant au client final. Après que l'eau ait distribué son énergie, le cycle recommence.

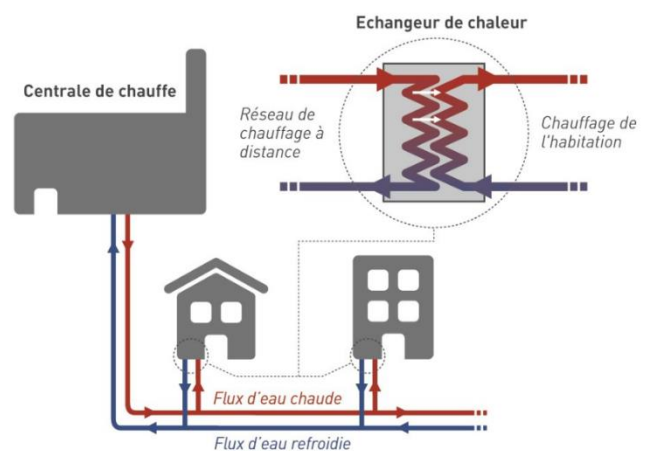


Figure 1. Schéma de principe d'un CAD Source: gruyere-energie.ch

**Avantages** Le raccordement au chauffage à distance apporte de nombreux avantages<sup>2</sup>. Il permet de valoriser le bâtiment en libérant de l'espace. En effet, l'ancien système de production de chaleur est remplacé par un simple échangeur qui ne prend que peu de place. Le client a une sécurité optimale concernant l'exploitation et l'approvisionnement car la société qui gère le CAD doit s'en occuper. De plus, un chauffage à distance a une meilleure efficacité énergétique en comparaison à une installation décentralisée. Il est aussi plus facile d'utiliser de l'énergie locale et propre tout en minimisant les rejets de CO<sub>2</sub>. D'un point de vue exergétique, le rendement d'un CAD est plus durable qu'une chaufferie décentralisée. La régulation d'un chauffage à distance est plus précise et de meilleure qualité que pour un chauffage décentralisé.

**Situation** En Suisse, l'installation des premiers chauffages à distance s'est déroulée dans les années 1960. Aujourd'hui encore, de nouvelles centrales sont construites ou sont en projet. Il est possible d'obtenir des subventions, qui diffèrent en fonction du canton dans lequel le CAD se situe. Actuellement, 20 % des combustibles utilisés pour la production de chaleur d'un CAD proviennent d'énergies fossiles tels que le gaz ou le mazout. Seulement 3% des bâtiments se trouvant sur le territoire suisse sont chauffés par un chauffage à distance.

<sup>1</sup> energie-environnement, [energie-environnement.ch](http://energie-environnement.ch) [en ligne].  
<https://www.energie-environnement.ch/maison/renovation-et-chauffage/installations/chauffage-a-distance-cad> (Consulté le 4 Juin 2019)

<sup>2</sup> Fernwärme-Schweiz, *Chauffage à distance l'énergie du confort* [en ligne].  
<https://www.fernwaerme-schweiz.ch/fernwaerme-franz/allgemeine-Fragen/Vorteile-der-Fernwaerme.php> (Consulté le 4 Juin 2019)

## 1.2 Le chauffage à distance de Verbier

**CAD Verbier** Le mandant, Altis<sup>3</sup> est le propriétaire et le gestionnaire du réseau de chauffage à distance de Verbier qui fournit principalement de l'eau chaude sanitaire et du chauffage pour plus de 120 clients. Le réseau de chauffage à distance chauffe aussi certaines piscines de la région et plus de 2800 m<sup>2</sup> de rampes chauffantes réparties dans la station. Le réseau mesure 11 km de long et fournit environ 10 GWh d'énergie par an.

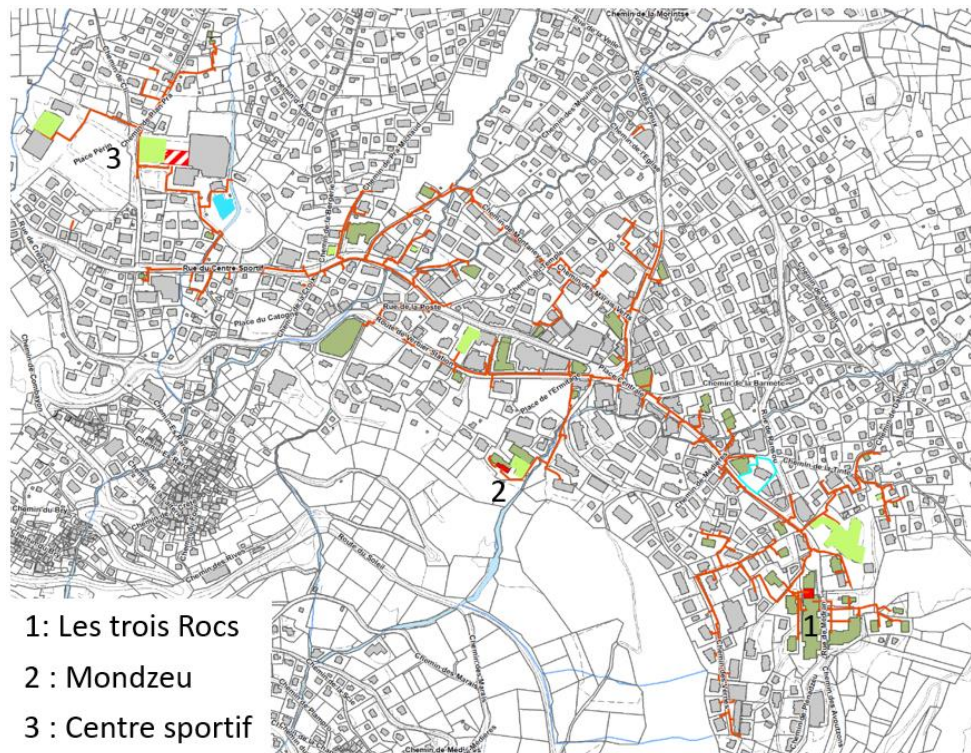


Figure 2: Carte du CAD de Verbier Source :Altis

**Chaudières actuelles** En ce moment, le réseau est composé de deux chaufferies. Tout d'abord, il y a la centrale de Mondzeu. Cette chaufferie est constituée de deux chaudières à mazout de 1 MW chacune. Les Trois Rocs est la deuxième chaufferie. C'est une centrale à pellets de 3.2 MW. On y trouve trois chaudières l'une de 800 KW et deux de 1.2 MW. Le CAD est déjà pourvu d'un système d'automatisation et de régulation qui est bien maîtrisé par l'exploitant.

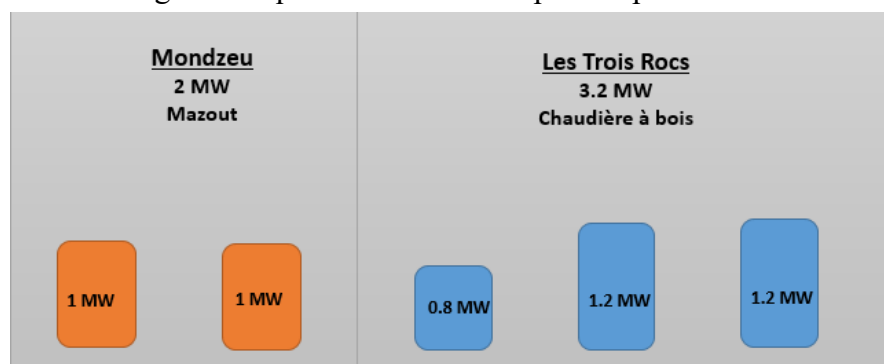


Figure 3: Constitution des deux chaufferies utilisées actuellement

<sup>3</sup> Altis, [altis.swiss/chaueur](https://www.altis.swiss/chaueur) [en ligne].  
<https://www.altis.swiss/chaueur> (Consulté le 30 Juin 2019)



**Expansion** Le réseau va s'agrandir avec une troisième chaufferie de 10.3 MW se situant au centre sportif de Verbier. Elle est en cours de réalisation. Cette centrale sera constituée de trois différents types de chaudières. Il y aura une centrale à pellets d'une puissance totale de 6 MW, une centrale à mazout de 3.5 MW et pour finir une pompe à chaleur (PAC) de 800 KW. La mise en fonction de ces chaudières va commencer progressivement en 2020 pour se finir en 2026.

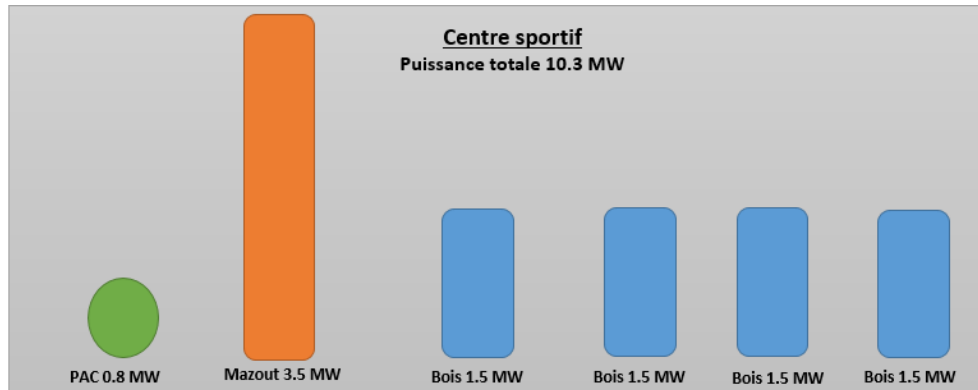


Figure 4: Constitution de la troisième chaufferie du centre sportif

**Technique** La Figure 5 ci-dessous montre une vision globale du réseau de Verbier. Le réseau primaire est constitué des différentes chaudières ainsi que des sous-stations. Dans le réseau secondaire se trouvent deux sous-réseaux : le réseau pour le chauffage et le réseau pour l'ECS. L'emplacement des mesures de températures (T), des mesures de pressions (P), des régulateurs (R), des vannes, des vannes trois voies et des pompes de circulation sont également représentées.

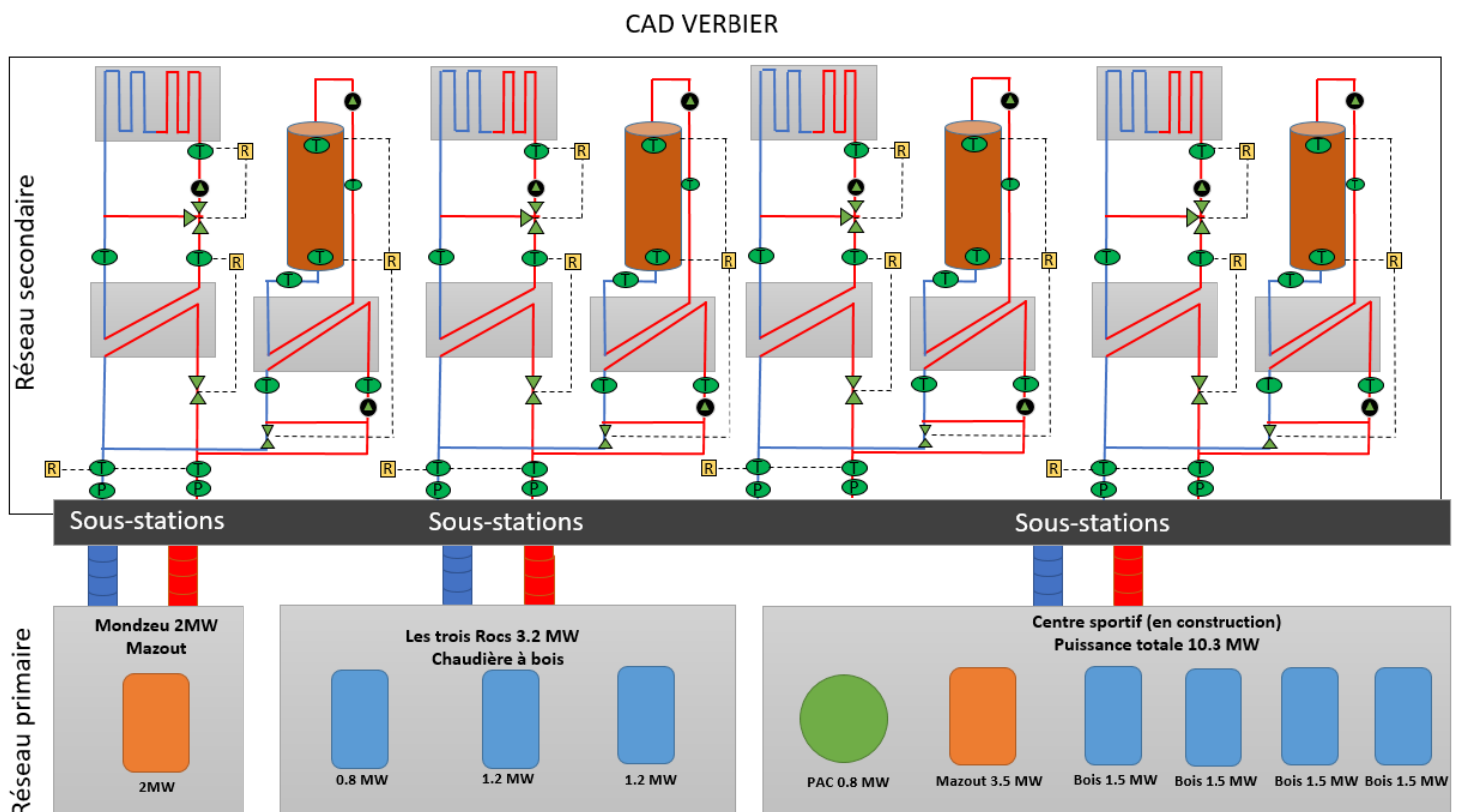


Figure 5: Représentation des divers éléments techniques du CAD de Verbier

### 1.3 Les objectifs

**L'objectif** L'objectif de ce travail de diplôme est de prédire la demande future en énergie du CAD de Verbier, puis grâce à cette prédiction de proposer l'engagement des différentes chaudières en fonction sur le réseau.

**Prédire le futur** La première phase de ce travail de diplôme consiste à prédire la demande. Pour ce faire, les différents types de besoins doivent être modélisés. Comme décrit précédemment, le CAD fournit 4 types de besoins : le chauffage, l'ECS, le chauffage des piscines et celui des rampes chauffantes. Pour être le plus réaliste possible, les pertes terrain ainsi que l'effet du rayonnement solaire sur la demande vont être prises en compte. La modélisation de tous ces besoins permettra de prédire la demande totale. Quand la prédiction de la demande sera connue, la deuxième phase de ce projet consistera à créer un modèle d'engagement des cinq chaudières actuellement en fonction sur la station de Verbier.

**Outil d'aide à la décision** Le but de ces deux modèles est de produire l'énergie thermique au plus juste de la demande horaire, tout en utilisant le moins de chaudières possible. Les chaudières engagées devront travailler à leurs meilleurs points de fonctionnement. En outre, ce travail a pour but de favoriser au maximum les ressources renouvelables. C'est la raison pour laquelle, la chaufferie de Mondzeu sera utilisée le moins possible, afin d'éviter de recourir aux énergies fossiles.

**Avantages pour Altis** Finalement, la société Altis aura plusieurs avantages à utiliser cet outil d'aide à la décision. Tout d'abord, le réseau pourra être mieux géré grâce à la connaissance de l'engagement des chaudières dans le futur. Ceci permettra par exemple de prévoir la maintenance des chaudières, tout en n'interférant pas sur la production d'énergie. Ensuite, le gestionnaire sera plus efficace car les chaudières seront utilisées à leurs puissances optimales. Enfin, cette gestion et cette efficacité rendront possible une économie financière en réduisant la consommation de combustibles.

**Les besoins** Pour réaliser le modèle de prévision et celui de planification, plusieurs grandeurs physiques et informations concernant le CAD de Verbier doivent être connues. Ces informations sont résumées dans la Figure 6 et Figure 7.

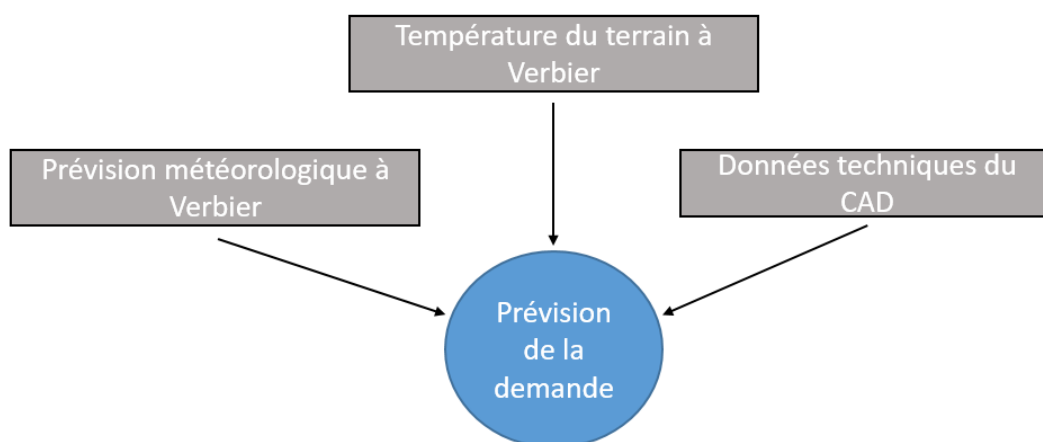


Figure 6: Données nécessaires pour réaliser la prévision de la demande

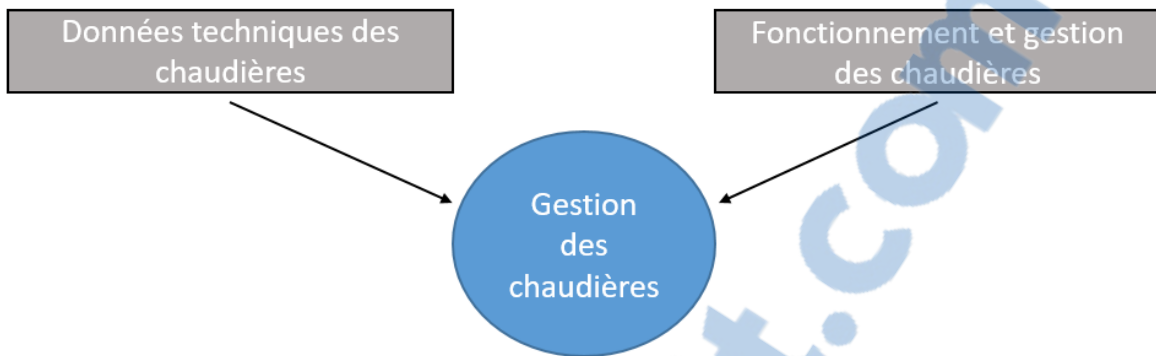


Figure 7: Données nécessaires pour réaliser la gestion des chaudières

**Contraintes** La réalisation de cet outil de prédiction aura bien entendu des contraintes auxquelles il faudra se soumettre pour permettre une bonne gestion. La Figure 8 schématise les contraintes techniques liées à la gestion des chaudières en fonction de la prévision de la demande

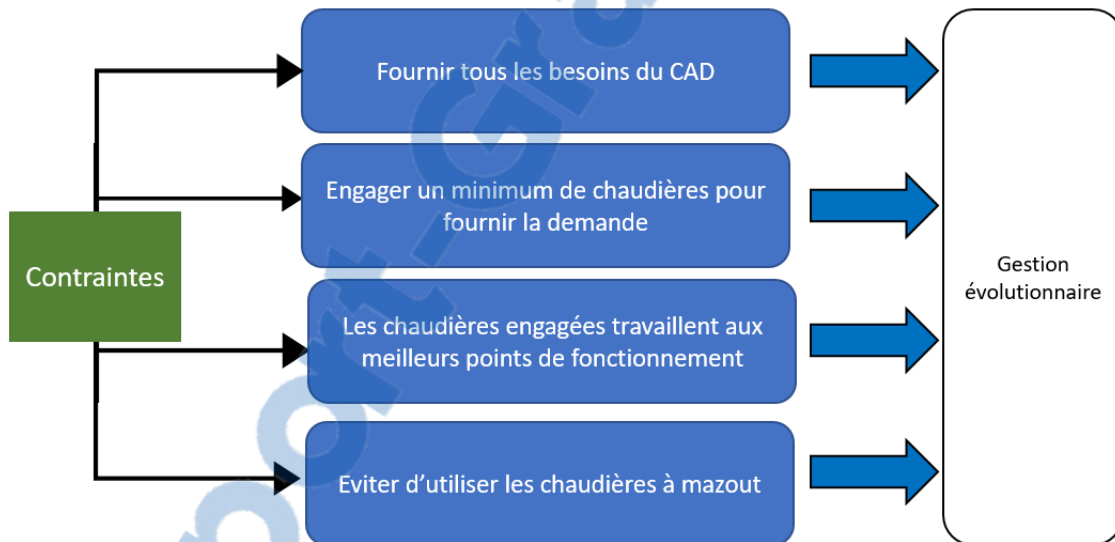


Figure 8: Schéma de principe des contraintes liées à la gestion des chaudières



## 2 La modélisation des besoins et de la prédiction de la demande du CAD de Verbier

### 2.1 Les modèles thermiques

Comment prédire ?

Pour pouvoir connaître la prévision de la demande du CAD, il est nécessaire de modéliser chaque besoin thermique. Dans les paragraphes suivants, la modélisation de chaque besoin va être décrite pour prédire la demande. La méthode de résolution va être expliquée par la suite. Cependant, pour chacune des équations, un coefficient va être ajouté pour permettre au modèle de s'ajuster par rapport à la puissance réellement fournie par le CAD et car les grandeurs connues ne permettent pas de trouver directement une valeur de puissance en [kW].

#### Modélisation des besoins en chauffage

Le besoin d'un bâtiment

La puissance en chauffage d'une habitation dépend de la surface de l'enveloppe, des différentes valeurs du coefficient de transfert thermique de chaque constituant de l'enveloppe du bâtiment et de la différence de températures entre la température intérieure et la température extérieure.

Il serait fastidieux et contreproductif de réaliser une étude de chaque bâtiment raccordé au réseau. L'algorithme développé a pour but de prendre en compte par lui-même l'ajout de nouveaux raccordements sur le réseau. C'est pourquoi, la surface de l'enveloppe des bâtiments et les coefficients de transfert thermique ne sont pas utilisés dans ce modèle.

$$P_{\text{chauffage}} = U \cdot A \cdot (T_c - T_{\text{ext}}) \text{ [kW]}$$

U= Coefficients de transfert thermique [kW/m<sup>2</sup> · K]

A= Enveloppe du bâtiment [m<sup>2</sup>]

Équation 1: Puissance chauffage

TC La température intérieure ou température de consigne (TC) est la température souhaitée dans chaque habitation. Cette température change en fonction des personnes, des pièces, des affectations et des saisons. Dans ce projet, une température de consigne de 20°C a été choisie. Cette valeur correspond à une température recommandée dans les pièces à vivre d'une habitation.

Variations dans le passé

Pour cette modélisation, les différences entre la température de consigne et la température extérieure dans le passé sont considérées afin que le modèle retienne ces variations. A noter que si la température intérieure est plus grande ou égale à la température extérieure, le modèle ne prévoit pas une puissance de chauffage. Le nombre d'heures prises en compte dans le passé va être décrit dans le paragraphe 2.8. Pour chaque heure, le coefficient ajouté dans ce modèle est  $\alpha$ .

$$P_{\text{chauffage}}(h) = \alpha_{-2} \cdot (T_c - T_{-2}) + \alpha_{-1} \cdot (T_c - T_{-1}) + \alpha_0 \cdot (T_c - T_0) \text{ [kW]}$$

$T_c$  = Température de consigne [K]

$T_h$  = Température extérieur [K]

$$\alpha_h = \left[ \frac{\text{kW}}{\text{K}} \right]$$

Rapport-*gratuit.com*

Équation 2: Modèle puissance chauffage

LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES





### Modélisation des pertes dans le terrain

Les pertes  
terrain

Une partie de la chaleur produite est perdue dans le terrain. L'Équation 3 permet de calculer ces pertes.

$$P_{\text{Pertes}} = [(T_{\text{aller}} - T_{\text{terrain}})] + [(T_{\text{retour}} - T_{\text{terrain}})] \cdot h_{\text{CAD}} \cdot S_{\text{CAD}} \text{ [kW]}$$

*Équation 3: Pertes dans le terrain*

Cependant, la valeur de la conductivité thermique ( $h_{\text{CAD}}$ ) et de la surface des tuyaux ( $S_{\text{CAD}}$ ) n'est pas connue. De plus, le diamètre des tuyaux varie tout au long du réseau. Ce réseau étant en constante évolution, la surface des tuyaux va varier avec le temps, ce qui nécessitera l'adaptation du modèle. C'est pour ces raisons que la conductivité et la surface du réseau ne sont pas prises en compte dans le modèle.

Les températures aller et retour sont connues et fournies par le logiciel de gestion. La température dans le terrain est elle aussi estimée. Elle provient des données du logiciel Bsol. La température a été calculée à une profondeur de deux mètres dans la station de Verbier sur une année entière. Dès lors, il est possible de créer le modèle pour les pertes dans le terrain. Pour ce modèle, le coefficient  $\beta$  est ajouté. Il a pour unité des [kW/K] et permet ainsi à la puissance pertes terrain d'avoir comme unité des [kW]. Il y en a un pour l'aller et un pour le retour.

$$P_{\text{Pertes}} = [\beta_{\text{aller}} \cdot (T_{\text{aller}} - T_{\text{terrain}})] + [\beta_{\text{retour}} \cdot (T_{\text{retour}} - T_{\text{terrain}})] \text{ [kW]}$$

$$\beta_{\text{aller}} = [\text{KW/K}]$$

$$\beta_{\text{retour}} = [\text{KW/K}]$$

*Équation 4: Modèle pertes terrain*

### Modélisation de la puissance en eau chaude sanitaire

Quantité de  
chaleur

La quantité de chaleur pour chauffer un corps est définie par l'Équation 5 :

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \text{ [J]}$$

*Équation 5: Quantité de chaleur*

A partir de cette équation, il est possible de connaître la puissance que doit fournir le CAD pour l'ECS. Il faut en moyenne 50 litres d'eau chaude sanitaire par personne et par jour. La différence des températures est estimée à 40°K. La capacité calorifique de l'eau vaut 4200 [J/Kg K]. Cette équation, dont le résultat est de 2.33 [kW], donne la puissance nécessaire pour chauffer l'eau chaude sanitaire pour une personne par jour.

$$E_{\text{ecs}} = \gamma \cdot (m \cdot c \cdot \Delta T / 3'600) = \gamma \cdot 2.33 \text{ [kWh]}$$

*Pour une heure*

$$P_{\text{ecs}} = \gamma \cdot 2.33 \text{ [kW]}$$

$$\gamma = [\%]$$

*Équation 6: Modèle ECS*

Actuellement, l'exploitant remplit les chauffe-eaux une fois le matin et une fois l'après-midi. Le mardi, il contrôle que tous les chauffe-eaux soient à une température plus grande que 60°C pour lutter contre la légionellose<sup>4</sup>. Si un chauffe-eau se vide de manière significative durant la journée, il est automatiquement rempli.

Dans le modèle, une puissance de 2.33 [kW] sera créée pour chaque heure. Le coefficient  $\gamma$  permettra de définir le nombre de personnes qui se trouvent sur le réseau et donc par la même occasion la fréquence de remplissage.

### Modélisation des rampes chauffantes

Conditions  
d'allumage

Pour permettre aux usagers de circuler sur des routes glacées et/ou enneigées, un système de rampes chauffantes, branchées sur le CAD, a été mis en place. La surface des rampes est de 2'862 [m<sup>2</sup>] et leur puissance est de 330 [W/m<sup>2</sup>]. Il faut ajouter à cela les conditions d'enclenchement soient une température extérieure plus basse que 4°C, des précipitations et un taux d'humidité supérieur à 40 %. Pour le modèle, la valeur du taux d'humidité n'est pas connue. Dans ce cas, les rampes seront enclenchées si la température est inférieure à 4°C et qu'une précipitation a été mesurée.

Les modèles décrits précédemment sont les plus généraux possible afin de favoriser l'augmentation du nombre de raccordements. Cependant, le modèle est faux si la puissance totale des rampes, qui est connue, n'est pas intégrée.

Le coefficient  $\delta$  donne la proportion de surface de rampes fonctionnant à pleine puissance. Cette manière de représenter les rampes est réaliste car l'exploitant a indiqué que les capteurs d'humidité rencontrent fréquemment des problèmes qui empêchent parfois la mise en fonction des rampes.

$$P_{\text{Rampes}} = \delta \cdot \text{surface} \cdot \text{densité surfacique de puissance} \\ = \delta \cdot 2862 \cdot 0.33 = \delta \cdot 945 \text{ [KW]}$$

$$\delta[\%]$$

Équation 7 : Modèle pour les rampes chauffantes

Sécher  
les rampes

Il faut aussi prendre en compte le temps nécessaire au séchage des rampes. Ce temps est obtenu grâce à l'Équation 8.

$$Q = L_f \cdot m \text{ [kJ]} \Rightarrow t = \frac{L_f \cdot m}{P_{\text{Rampes}}} \text{ [s]} \text{ où } L_f = 333 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

Équation 8: Temps de séchage des rampes chauffantes

### Modélisation de l'apport solaire

Le rayonn-  
ement

La puissance solaire permet, à l'inverse des autres puissances, de diminuer les besoins thermiques demandés au CAD. Si le soleil rayonne sur un bâtiment, l'inertie de ce dernier permettra d'emmagasiner une partie de la chaleur. Les valeurs de rayonnement notées "I" mesurées sur la station permettent de calculer cette puissance.

<sup>4</sup> La légionellose est une maladie infectieuse due à bactérie qui se développe dans les réseaux d'eau douce naturels ou artificiels et dans un milieu organique favorable riche en fer, zinc et aluminium. Elle peut se développer dans les chauffe-eaux quand l'eau a une température plus basse que 60°C.

Variations  
dans le  
passé

Comme pour la modélisation du chauffage, le rayonnement dans le passé est considéré. Ce mode de calcul prend en compte le passé et le présent afin que le modèle retienne la variation de rayonnement dans le passé.

$$P_{\text{solaire}}(h) = \varepsilon_{-2} \cdot I_{-2} + \varepsilon_{-1} \cdot I_{-1} + \varepsilon_{-0} \cdot I_{-0} \text{ [kW]}$$

$$I_h = \text{Rayonnement [kW/m}^2\text{]}$$

$$\varepsilon_h = [\text{m}^2]$$

Équation 9: Modèle de l'apport solaire

Le nombre d'heures prises en compte dans le passé va être décrit dans le paragraphe 2.8. Pour chaque heure, le coefficient ajouté dans ce modèle est  $\varepsilon$ . Mathématiquement, il correspond à une surface ensoleillée sur la commune.

### Modélisation des piscines

Piscines  
privées et  
publiques

Sur la commune de Verbier se trouvent deux piscines communales raccordées au réseau de chaleur à distance. D'autres piscines sont aussi raccordées au CAD mais sont privées. Il n'est pas forcément possible de connaître la puissance des piscines privées. Cependant, les puissances des deux piscines peuvent être connues séparément des autres besoins.

Il faut encore que l'exploitant fournisse ces puissances pour les intégrer dans le modèle. Pour l'heure, les piscines ne sont donc pas modélisées.

## 2.2 Equation bilan

La prévision  
totale

Les besoins du CAD peuvent être modélisés par une simple équation. La puissance du chauffage et la puissance solaire prennent en compte les heures dans le passé pour retenir les variations antérieures. La figure suivante représente cette équation bilan de manière schématique avec les grandeurs physiques utiles pour chaque besoin thermique.

$$P_{\text{CAD}}(h) = \alpha \cdot P_{\text{chauffage}}(h) + \beta \cdot P_{\text{pertes}}(h) + \gamma \cdot P_{\text{ecs}}(h) + \delta \cdot P_{\text{rampes}}(h) - \varepsilon \cdot P_{\text{solaire}}(h)$$

Équation 10 : Equation des besoins du CAD de Verbier

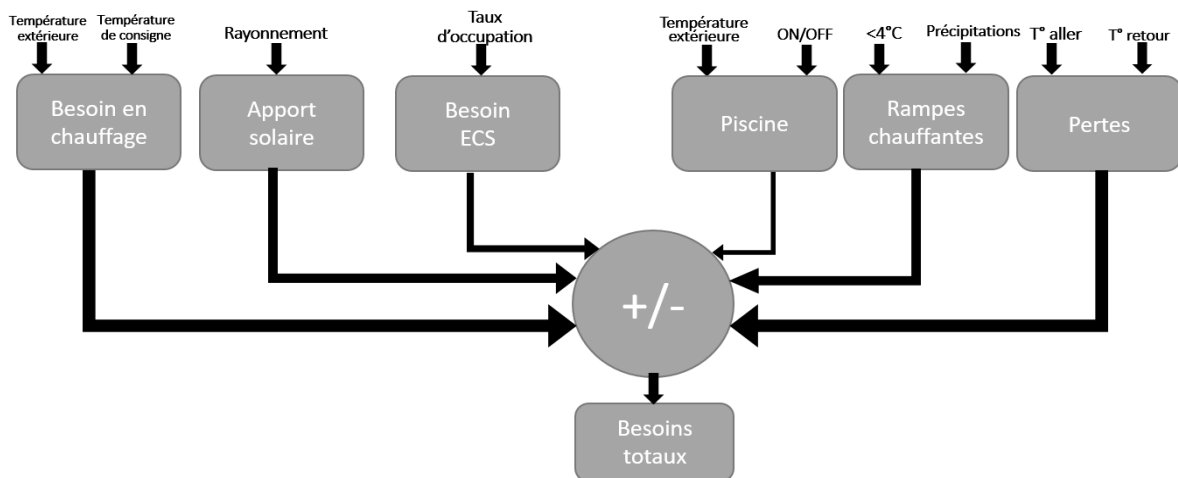


Figure 9: Equation bilan sous forme schématique

## 2.3 L'outil informatique

**Excel** Durant le projet du 5<sup>ème</sup> semestre, Excel a été utilisé pour réaliser le modèle de prévision. La prédiction de la demande se faisait sur des centaines d'heures de données. Les limites de ce logiciel ont rapidement été atteintes que ce soit pour les calculs ou pour la représentation graphique. C'est pour ces raisons que Qt a été utilisé.

**Qt** Pour ce travail de diplôme, le logiciel Qt Creator<sup>5</sup> va être utilisé. Ce logiciel est un programme de développement intégré multiplateforme. Il est orienté en programmation C++. Qt permet de créer des fonctions et résoudre des problèmes de grandes tailles. Il est possible dès lors de prédire la demande à chaque heure, ce qu'il n'était pas possible de réaliser avec Excel. Il intègre aussi des interfaces graphiques créées par M. Morand qui permettent de superposer plusieurs graphiques, de zoomer et proposent des graphiques de bonne qualité. Ce programme offre donc à Altis une interface lisible et évolutive.

## 2.4 Provenance des données

**Altis** Pour résoudre le problème, plusieurs données sont nécessaires. La puissance fournie chaque heure, la température aller et retour sont utiles dans le modèle et sont fournies par l'exploitant. Altis a fourni ces données du 1<sup>er</sup> septembre 2018 à 00h00 au 6 décembre 2018 à 15h00 pour chaque minute. Cependant, les données ont été transformées de manière à être disponible heure par heure, ce qui correspond à plus de 2'300 heures de données. La température extérieure sur cette même période a aussi été fournie par Altis.

En travaillant sur les données réellement fournies dans le passé, l'idée est de calibrer le modèle de prévision avec la puissance fournie par Altis pour pouvoir ensuite l'utiliser pour créer la prévision.

**Météo** Ces données ne sont pas suffisantes pour réaliser le modèle. Comme décrit précédemment, la température du terrain à Verbier à une profondeur de 2 mètres provient de Bsol. A cela s'ajoute les données météorologiques réelles, soit les précipitations et le rayonnement sur la commune de Verbier. Ces données ont été fournies par MétéoSuisse depuis le portail idaweb. Ces valeurs ont été mesurées grâce à la station météo de Montagnier. Un autre modèle utilisera la prévision météorologique provenant d'un serveur météo<sup>6</sup> appartenant à M. Morand. Elles découlent d'un abonnement conclu chez météoest.ch avec une station météo sur la commune de Verbier.

---

<sup>5</sup> Wikipedia, [wikipedia.org \[en ligne\]](https://fr.wikipedia.org/wiki/Qt_Creator).  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Qt\\_Creator](https://fr.wikipedia.org/wiki/Qt_Creator) (Consulté le 12 Juin 2019)

<sup>6</sup> Accès au serveur météo : <http://asq.ddns.net/>

## 2.5 L'ajustement

**Définition** Les besoins thermiques ayant été modélisés, il convient désormais de prédire la demande. Cette prédiction va être réalisée à l'aide d'un ajustement. Un ajustement consiste en un calcul matriciel. L'Équation 11 est un exemple d'ajustement matriciel. Elle est constituée de quatre matrices. La matrice «  $\eta_n$  » correspond au résultat réel c'est-à-dire la puissance qui a été fournie par le CAD dans le passé. La seconde matrice «  $X$  » se rapporte aux modèles développés avec les valeurs du passé. La matrice «  $\beta$  », quant à elle, équivaut aux coefficients ajoutés dans les modèles développés dans les paragraphes précédents. Le nombre de coefficients correspond au nombre de colonnes, donc de modèles développés dans la matrice «  $X$  ». La dernière matrice appelée matrice résidus équivaut à la différence entre la réalité et la prévision.

$$\begin{pmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ \eta_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & P_1 & T_{eau_1} & P_{atm_1} & T_{air_1} \\ 1 & P_2 & T_{eau_2} & P_{atm_2} & T_{air_2} \\ 1 & P_3 & T_{eau_3} & P_{atm_3} & T_{air_3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & P_n & T_{eau_n} & P_{atm_n} & T_{air_n} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{pmatrix}$$

Équation 11: Exemple d'un ajustement matriciel

**Ajustement pour prévision** Dans le cas de la prévision de la puissance du CAD de Verbier, la puissance réellement fournie dans le passé et le modèle développé en utilisant les valeurs connues du passé permettent de calculer les valeurs des coefficients. Puis, pour prédire la demande future, la matrice «  $X$  » utilise les valeurs de température, de rayonnement et de précipitations futures. Enfin, cette matrice est multipliée par les coefficients trouvés auparavant dans le but de minimiser les résidus. De manière générale, l'idée est de recalculer les coefficients du passé chaque heure pour les appliquer dans le futur.

L'Équation 12 résume les calculs qui vont être réalisés pour prédire la puissance future du CAD. Cette équation nécessite l'utilisation d'une matrice transposée et inverse telle que définies dans l'annexe 9.1.

$$\beta_i = ({}^T X_{passé} \cdot X_{passé})^{-1} \cdot {}^T X_{passé} \cdot \eta_{passé}$$

$$\eta_{futur} = X_{futur} \cdot \beta_i$$

Le but étant de minimiser les résidus ->

$$\epsilon_i = \eta_{futur\_réel} - X_{futur} \cdot \beta_i$$

$$\|\epsilon_i\|^2 = {}^T \epsilon_i \cdot \epsilon_i$$

Équation 12: Résolution de l'équation



## 2.6 Dimensionnement des matrices

**Définition** La taille d'une matrice est fonction du nombre de colonnes et du nombre de lignes. Pour l'ajustement, la matrice à définir est la matrice « X ».

**Nombre de colonnes** Le nombre de modèles décrit dans le paragraphe 2.1 est de six. Le modèle perte terrain en a deux. En ajoutant une première colonne constituée de « 1 », permettant l'ajustement, le nombre de colonnes est de sept. Dans la modélisation des besoins, le nombre d'heures retenues dans le passé n'est pas défini pour la puissance de chauffage et la puissance solaire. En fait, le nombre de colonnes correspond au nombre de modèles. Le nombre de modèles exact est détaillé au paragraphe 2.8.

**Nombre de lignes** Le nombre de lignes est fonction de la prévision souhaitée. Mis à part pour la matrice coefficient, chaque ligne correspond à une heure que ce soit pour le modèle du passé ou pour le modèle de la prévision. En d'autres termes, une prévision de 48 heures nécessite une matrice « X<sub>futur</sub> » de 48 lignes ce qui impliquera une même dimension pour les matrices « η<sub>futur</sub> » et « ε<sub>futur</sub> ». Pour calculer la valeur des coefficients sur les 168 heures passées, les matrices « X<sub>passé</sub> » et « η<sub>passé</sub> » auront 168 lignes tout comme « ε<sub>passé</sub> ». Le nombre idéal de lignes pour le futur et le passé va être expliqué dans le paragraphe 2.8.

**Exemple** L'Équation 13 décrit l'ajustement de la prévision de la demande. Pour cette représentation de 11 modèles, 4 modèles sont ajoutés au modèle de base décrit plus haut, de manière à prendre en compte une variation dans le passé de deux heures pour la puissance du chauffage et solaire. Cette variation est intégrée pour l'exemple. La dernière colonne de la matrice « X » peut prendre 2 valeurs. Si les conditions sont réunies (précipitations et température < 4°C), la puissance des rampes est égale à 945 [kW]. Sinon, la puissance est de 0 [kW].

$$\begin{pmatrix} \eta_0 \\ \eta_1 \\ \eta_2 \\ \vdots \\ \eta_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \Delta T_{-2} & \Delta T_{-1} & \Delta T_0 & T_{aller\ 0} - T_{terrain\ 0} & T_{retour\ 0} - T_{terrain\ 0} & I_{-2} & I_{-1} & I_0 & 2.33 & 0/945 \\ 1 & \Delta T_{-1} & \Delta T_0 & \Delta T_1 & T_{aller\ 1} - T_{terrain\ 1} & T_{retour\ 1} - T_{terrain\ 1} & I_{-1} & I_0 & I_1 & 2.33 & 0/945 \\ 1 & \Delta T_0 & \Delta T_1 & \Delta T_2 & T_{aller\ 2} - T_{terrain\ 2} & T_{retour\ 2} - T_{terrain\ 2} & I_0 & I_1 & I_2 & 2.33 & 0/945 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \Delta T_{i-2} & \Delta T_{i-1} & \Delta T_i & T_{aller\ i} - T_{terrain\ i} & T_{retour\ i} - T_{terrain\ i} & I_{i-2} & I_{i-1} & I_i & 2.33 & 0/945 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \alpha_{-2} \\ \alpha_{-1} \\ \alpha_0 \\ \beta_{aller} \\ \beta_{retour} \\ \varepsilon_{-2} \\ \varepsilon_{-1} \\ \varepsilon_0 \\ \gamma \\ \varepsilon \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_i \end{pmatrix}$$

Équation 13: Exemple d'ajustement avec une matrice "X" de 11 modèles

## 2.7 Premier modèle de prévision : « météo réelle »

**Spécificité du modèle** Pour ce premier modèle, les données de température, de précipitations et de rayonnement qui ont réellement eu lieu à Verbier durant la période de mesure du 1<sup>er</sup> septembre 2018 au 6 décembre 2018 ont été utilisées. La seconde spécificité de ce modèle est la température aller et retour du réseau. Pour chaque heure de prévision de la demande, les vraies valeurs ont été utilisées. Ces choix ont été fait de manière à simplifier le codage afin de valider rapidement la méthode de l'ajustement.

## Structure des données et du code pour le calcul de la prévision

### Les modèles thermiques

Dans un premier temps, les modèles des besoins thermiques ont été implémentés sur Excel. Les calculs de multiplication concernant le modèle de l'ECS, la soustraction pour le modèle du chauffage et les conditions d'allumage des rampes chauffantes ont été réalisés sur une feuille Excel. Ensuite, cette feuille a ensuite été copiée dans un fichier.txt pour permettre la lecture des données depuis le logiciel de programmation. La Figure 10 représente la forme des données implémentées sur Excel. Le nombre de lignes correspond au nombre de données fournies. Le nombre de colonnes correspond à « 1+ le nombre de modèles ». L'ajout d'une colonne par rapport au nombre de modèles correspond à la puissance réellement fournie par le CAD.

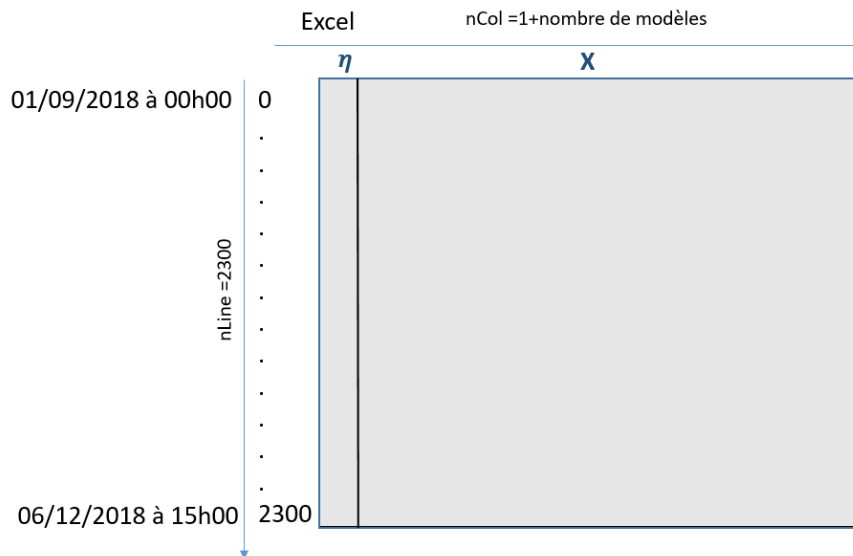


Figure 10: Structure des données sur Excel

### Le modèle de prévision

Puis, les matrices « X » et «  $\eta_n$  » ont été créées à partir de Qt. Les calculs liés à l'ajustement de la prévision de la demande ont pu être réalisés. La Figure 11 et la Figure 12 montrent les calculs réalisés sur Qt pour trouver la prévision.

### Calcul matrice $\beta$

Le principe est de trouver les valeurs de la matrice coefficient. Pour ce faire, une heure est choisie, cette heure correspond à l'heure actuelle. Elle est nommée  $h_{Actuel}$  sur la Figure 11. A partir de cette heure, les données passées sont incluses. Le nombre de lignes saisies dans la structure de données correspond au nombre d'heures que l'on souhaite intégrer dans le modèle. La dernière heure retenue est nommée  $h_{Passé}$ , elle se retrouve sur la même figure. Puis les données de  $h_{Passé}$  à  $h_{Actuel}$  sont séparées du reste et implémentées dans les matrices " $X_{passé}$ " et " $\eta_{passé}$ ". Ces matrices vont être employées de manière à calculer la matrice coefficient " $\beta$ ". Cette matrice est ensuite multipliée avec " $X_{passé}$ " pour créer la prévision dans le passé.

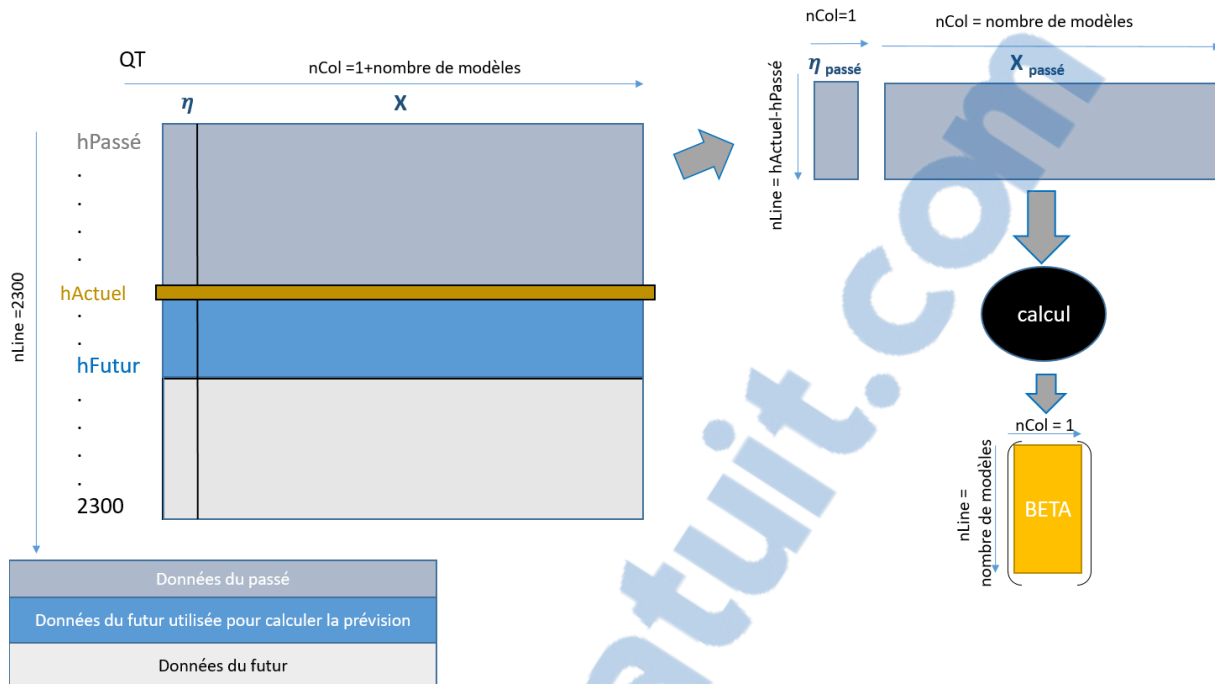


Figure 11: : Structure des données pour calculer la matrice Coefficient " $\beta_i$ "

Prévision  
passée

La dernière étape consiste à calculer la prévision passée. Cette prévision permet de comparer la puissance qui a été réellement fournie dans le passé et celle que le modèle prévoyait. Cette prévision permet de se rendre compte de la justesse des coefficients calculés dans le passé.

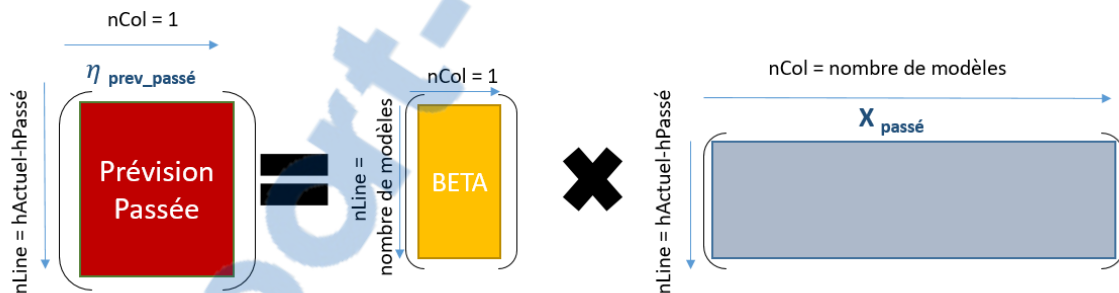


Figure 12: Calcul de la prévision passée

$$\eta_{\text{prév\_passé}} = \beta_i \cdot X_{\text{futur}}$$

Équation 14: Calcul de la prévision passé

Les calculs qui sont réalisés pour trouver la matrice « BETA » sont liés à l'Équation 12. L'annexe 9.2 décrit ces calculs sous forme schématique.

Prévision  
future

Les valeurs des coefficients qui constituent la matrice " $\beta$ " sont connues. Pour créer la prévision future, il est toujours nécessaire de se baser sur la structure de données. A partir d' $h_{Actuel}$ , les données du futur vont être incluses. Le nombre de lignes saisies dans la structure de données correspond au nombre d'heures de prévision souhaitées. La dernière heure retenue est nommée  $h_{Futur}$  (Figure 13). Puis les données de  $h_{Futur}$  à  $h_{Actuel}$  sont séparées du reste et implémentées dans les matrices " $X_{futur}$ " et " $\eta_{futur}$ ". La matrice " $\eta_{futur}$ " n'est pas utilisée immédiatement car elle équivaut à la puissance fournie dans le futur. Le but du projet consiste à trouver cette puissance.

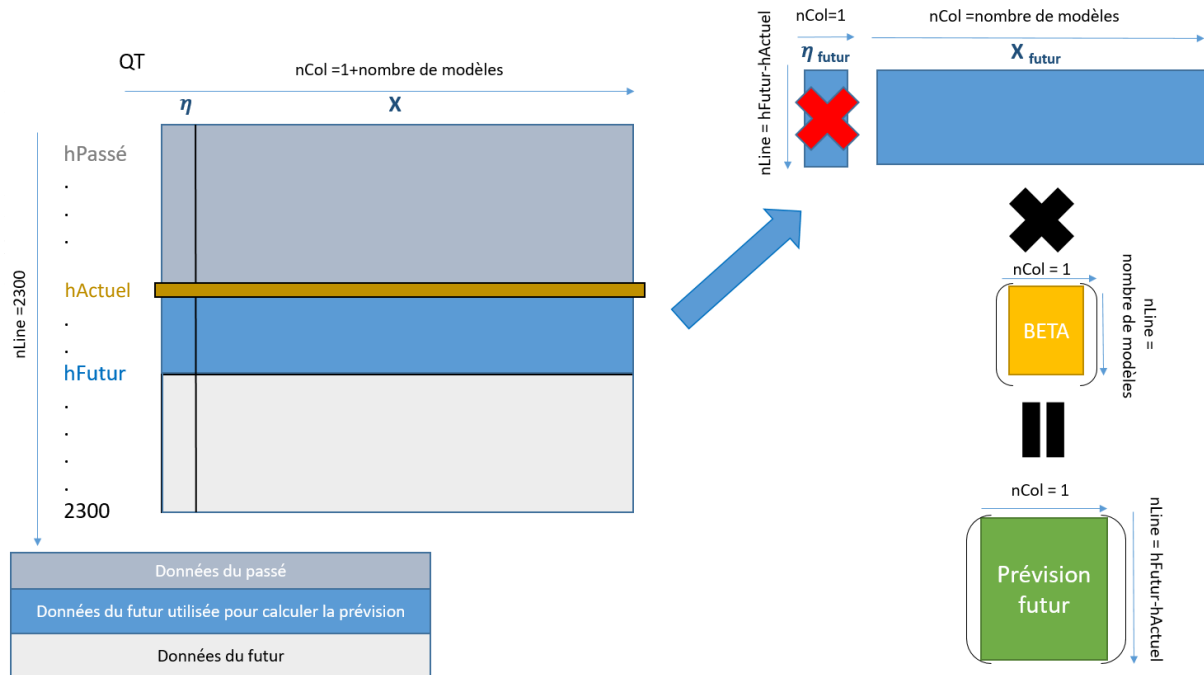


Figure 13: Structure des données pour calculer la matrice prévision

## Méthode de contrôle

**Résidus** Pour pouvoir comparer les différents modèles, les coefficients de corrélation et les résidus vont être analysés sur toute la période de mesure et pour chaque modèle.

Les résidus sont calculés selon l'Équation 12, le but étant de minimiser les différents résidus. Il existe deux types de résidus, les résidus passés et les résidus futurs. Ils sont calculés pour chaque heure du présent c'est-à-dire pour chaque  $h_{Actuel}$ . Le premier résidu est calculé à partir de la différence entre la puissance réellement fournie dans le passé et la puissance prédite dans le passé. Le second est calculé à partir de la différence entre la puissance réellement fournie dans le futur et la puissance prédite dans le futur. Ces deux calculs sont représentés dans l'Équation 16.

$$\epsilon_{passé} = \eta_{réel\_passé} - X_{passé} \cdot \beta_i$$

$$\text{Résidu passé} = \|\epsilon_{passé}\|^2 = {}^T\epsilon_{passé} \cdot \epsilon_{passé}$$

$$\epsilon_{futur} = \eta_{réel\_futur} - X_{futur} \cdot \beta_i$$

$$\text{Résidu futur} = \|\epsilon_{futur}\|^2 = {}^T\epsilon_{futur} \cdot \epsilon_{futur}$$

Équation 16: Calcul des résidus

La dimension, de « 1 X 1 », est la même pour les résidus passés ou futurs. Les différents calculs pour trouver la valeur du résidu passé ou futur ainsi que sa dimension sont schématisés dans l'annexe 9.3. La valeur du résidu correspond à la somme des erreurs au carré entre la réalité et la prévision future ou passée.

Dans ce projet, plusieurs essais vont être réalisés. Les modèles qui vont être comparés entre eux n'auront pas la même longueur de matrice. Pour que cette comparaison soit réaliste, la racine carrée va être appliquée sur chaque résidu, suivi d'une division qui constitue la différence entre  $h_{Futur}$  et  $h_{Actuel}$  pour les résidus futurs et entre  $h_{Actuel}$  et  $h_{Passé}$  pour les résidus passés.

$$\text{Résidu passé} = \frac{\sqrt{\|\epsilon_{passé}\|^2}}{h_{Actuel} - h_{Passé}}$$

$$\text{Résidu futur} = \frac{\sqrt{\|\epsilon_{futur}\|^2}}{h_{Futur} - h_{Actuel}}$$

Équation 17: Calcul pour comparaison des résidus

**Corrélation** La seconde méthode de contrôle calcule le coefficient de corrélation noté *Corr*. Ce coefficient est une mesure relative de la variation de deux variables « x » et « y » qui sont dans ce projet la puissance réellement fournie et la prévision de la puissance. Les calculs réalisés pour trouver la corrélation se trouvent dans l'annexe 9.4.

$$\text{Corr}(x, y) = \frac{\text{Cov}(x, y)}{S_x \cdot S_y}$$

Équation 18: Coefficient de corrélation

Le coefficient de corrélation se trouve toujours entre -1 et 1. Un coefficient proche de 1 signifie que quand la puissance réelle augmente, la prévision augmente proportionnellement. Un coefficient proche de -1 signifie que quand la puissance réelle augmente, la prévision diminue proportionnellement. Un coefficient proche de 0 signifie que les variations de la puissance réelle et de la prévision ne sont pas liées par une relation linéaire.



Corrélation  
dans la  
prévision

Cette étude comporte deux coefficients de corrélation. Tout comme pour les résidus, un coefficient correspond au passé et un au futur. Le coefficient passé est créé à partir de la puissance réellement fournie dans le passé et la prévision dans le passé. Le coefficient futur est créé à partir de la puissance réellement fournie dans le futur et la prévision future. L'idéal est d'avoir un coefficient qui a une valeur proche de 1.

### La puissance réellement fournie par le CAD

Puissance  
réelle

La figure suivante présente la puissance qui a réellement été fournie par le CAD durant la période de données. La demande augmente au fil du temps. Cette augmentation est liée à plusieurs facteurs, mais le principal consiste en la diminution des températures extérieures au fil des mois. Il y a une grande variation de la demande sur cette période. En plus de deux mille heures, la puissance passe de moins de 200 KW à plus de 1800 KW.

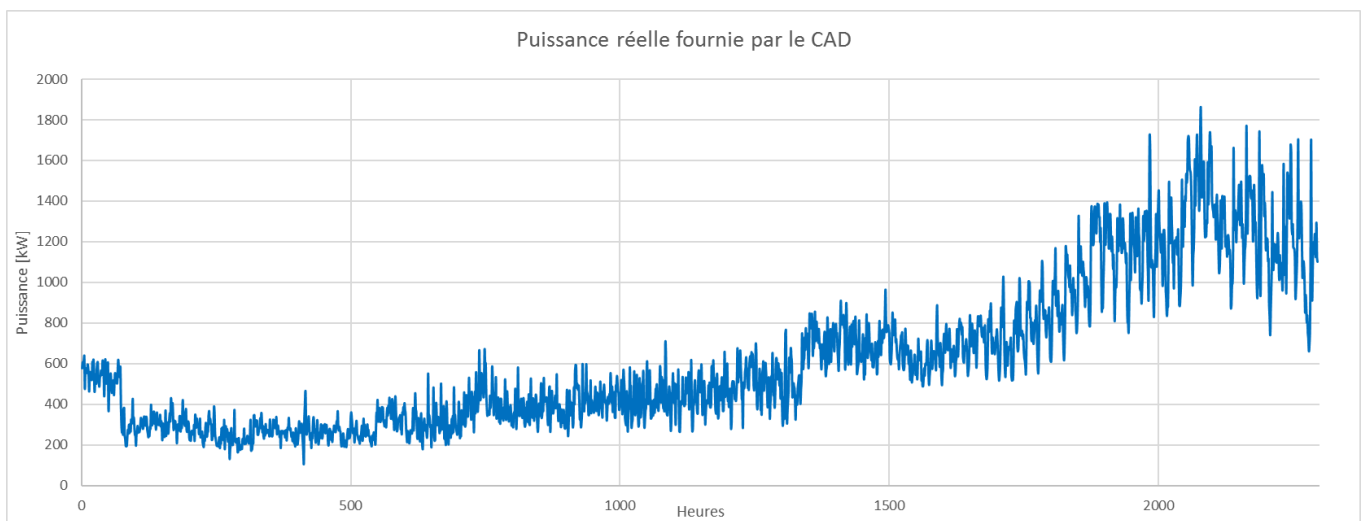


Figure 14: Puissance réellement fournie par le CAD

## 2.8 Résultats modèle : « météo réelle »

Ce premier modèle d'ajustement et les deux moyens de contrôle ayant été implémentés dans le logiciel de programmation, les premiers résultats peuvent être décrits. Dans les paragraphes suivants, la dimension de la matrice « X », la longueur de calcul des coefficients dans le passé, et la longueur de la prévision future vont être définis de manière à valider la méthode utilisée, soit l'ajustement.

### Dimensionnement de la matrice « X »

Modèles  
chauffage et  
solaire

Dans ce paragraphe, le nombre de modèles pour la matrice « X » va être défini. Les modèles peuvent varier selon le nombre d'heures prises en compte dans le passé pour la puissance de chauffage et la puissance solaire. Ces puissances sont liées à la température extérieure et au rayonnement. Dans les deux cas, le principe consiste à considérer la variation jour-nuit de manière à ce que la matrice coefficient réagisse en fonction du jour ou de la nuit. Le nombre de variations pour le modèle chauffage et solaire sera identique. La durée d'une nuit dépend évidemment de la saison. En été, les nuits sont plus courtes qu'en hiver. Les jours durent environ 15 heures en été. En hiver, ils ne sont que de 8 heures. Pour les deux puissances, les essais vont être réalisés en remontant entre 8 heures et 12 heures dans le passé.

**La méthode** La durée passée du calcul des coefficients et la durée de la prévision sont identiques afin d'avoir la même durée de calcul et donc un même point de comparaison. La matrice coefficient va être calculée avec un *hPassé* de 168 heures. Puis la matrice coefficient va être appliquée sur la matrice prévision qui a un *hFutur* de 48 heures.

**Résultats** Le Tableau 1 et le Tableau 2, résument les résultats de corrélations et des résidus obtenus sur 2100 heures d'essai. Les valeurs minimum, maximum et la moyenne des quatre grandeurs sont représentées. Il est important de souligner que sur 2100 points, les variations entre le minimum et le maximum demeurent élevées. Il est donc important de prendre en compte la moyenne de ces valeurs.

| Variation | Corrélation passé |       |       | Corrélation futur |       |       |
|-----------|-------------------|-------|-------|-------------------|-------|-------|
|           | min               | max   | moy   | min               | max   | moy   |
| 0 Heure   | 0.114             | 0.924 | 0.639 | -0.365            | 0.963 | 0.529 |
| 1 Heure   | 0.115             | 0.941 | 0.665 | -0.301            | 0.962 | 0.536 |
| 2 Heures  | 0.148             | 0.944 | 0.676 | -0.334            | 0.961 | 0.534 |
| 3 Heures  | 0.179             | 0.946 | 0.692 | -0.284            | 0.954 | 0.535 |
| 4 Heures  | 0.184             | 0.950 | 0.702 | -0.290            | 0.956 | 0.532 |
| 5 Heures  | 0.238             | 0.953 | 0.710 | -0.200            | 0.949 | 0.525 |
| 6 Heures  | 0.240             | 0.956 | 0.721 | -0.196            | 0.948 | 0.520 |
| 7 Heures  | 0.247             | 0.657 | 0.732 | -0.179            | 0.936 | 0.530 |
| 8 Heures  | 0.326             | 0.959 | 0.744 | -0.128            | 0.927 | 0.540 |
| 9 Heures  | 0.342             | 0.964 | 0.753 | -0.133            | 0.940 | 0.545 |
| 10 Heures | 0.346             | 0.967 | 0.758 | -0.154            | 0.948 | 0.541 |
| 11 Heures | 0.355             | 0.968 | 0.762 | -0.169            | 0.951 | 0.543 |
| 12 Heures | 0.357             | 0.968 | 0.767 | -0.157            | 0.954 | 0.540 |

Tableau 1: Résultat des essais concernant la corrélation pour le dimensionnement de la matrice « X »

| Variation | Résidus passé |        |       | Erreur sur 168 Heures [KW] |          |          | Résidus futur |        |        | Erreur sur 48 Heures [KW] |          |         |
|-----------|---------------|--------|-------|----------------------------|----------|----------|---------------|--------|--------|---------------------------|----------|---------|
|           | min           | max    | moy   | min                        | max      | moy      | min           | max    | moy    | min                       | max      | moy     |
| 0 Heure   | 2.716         | 13.677 | 5.640 | 456.288                    | 2297.736 | 947.520  | 4.192         | 52.667 | 14.318 | 201.216                   | 2528.016 | 687.264 |
| 1 Heure   | 2.678         | 14.314 | 5.450 | 449.904                    | 2404.752 | 915.600  | 4.145         | 50.751 | 14.075 | 198.960                   | 2436.048 | 675.600 |
| 2 Heures  | 2.650         | 13.388 | 5.400 | 445.200                    | 2249.184 | 907.200  | 4.020         | 41.162 | 14.061 | 192.960                   | 1975.776 | 674.928 |
| 3 Heures  | 2.615         | 14.861 | 5.300 | 439.320                    | 2496.648 | 890.400  | 4.101         | 45.520 | 14.082 | 196.848                   | 2184.960 | 675.936 |
| 4 Heures  | 2.570         | 13.135 | 5.900 | 431.760                    | 2206.680 | 991.200  | 3.934         | 43.441 | 14.125 | 188.832                   | 2085.168 | 678.000 |
| 5 Heures  | 2.560         | 14.000 | 5.220 | 430.080                    | 2352.000 | 876.960  | 3.891         | 48.024 | 14.150 | 186.768                   | 2305.152 | 679.200 |
| 6 Heures  | 2.561         | 14.124 | 5.160 | 430.248                    | 2372.832 | 866.880  | 3.937         | 45.852 | 14.100 | 188.976                   | 2200.896 | 676.800 |
| 7 Heures  | 2.547         | 14.479 | 5.000 | 427.896                    | 2432.472 | 840.000  | 4.005         | 43.088 | 13.900 | 192.240                   | 2068.224 | 667.200 |
| 8 Heures  | 2.520         | 13.130 | 4.920 | 423.360                    | 2205.840 | 826.560  | 3.750         | 46.280 | 13.650 | 180.000                   | 2221.440 | 655.200 |
| 9 Heures  | 2.460         | 11.830 | 4.800 | 413.280                    | 1987.440 | 806.400  | 3.806         | 50.402 | 13.520 | 182.688                   | 2419.296 | 648.960 |
| 10 Heures | 2.470         | 11.560 | 4.730 | 414.960                    | 1942.080 | 794.640  | 3.806         | 45.844 | 13.550 | 182.688                   | 2200.512 | 650.400 |
| 11 Heures | 2.400         | 12.460 | 7.400 | 403.200                    | 2093.280 | 1243.200 | 3.813         | 52.244 | 13.560 | 183.024                   | 2507.712 | 650.880 |
| 12 Heures | 2.380         | 12.740 | 4.680 | 399.840                    | 2140.320 | 786.240  | 3.837         | 41.753 | 13.670 | 184.176                   | 2004.144 | 656.160 |

Tableau 2: Résultat des essais concernant les résidus pour le dimensionnement de la matrice « X »

**Choix** Pour rappel, les coefficients de corrélation doivent être le plus proche de 1 et les résidus doivent être le plus petit possible. De plus, on souhaite prendre en compte la variation jour-nuit sur toute une année. C'est en prenant compte de tous ces critères qu'une variation de 10 heures a été choisie. Les coefficients de corrélation font partie des valeurs les plus hautes, les résidus font parties des valeurs les plus basses. Le nombre d'heures de variation donne une moyenne de la durée des jours sur l'année. La somme absolue des erreurs et aussi représentée pour chaque essai.

#### Résultats graphiques

La Figure 15 et la Figure 16 montrent les coefficients de corrélation et les résidus avec 10 heures de variation sur l'ensemble des données. Pour la corrélation et les résidus passés, chaque point correspond au coefficient de corrélation et aux résidus calculés de l'heure  $h_{Actuel}$  jusqu'à l'heure  $h_{Passé}$ . Pour la corrélation et les résidus futurs, chaque point correspond au coefficient de corrélation et aux résidus calculés de l'heure  $h_{Actuel}$  jusqu'à l'heure  $h_{Futur}$ . Pour simplifier, derrière chaque point se trouvent la corrélation et les résidus passés des 168 heures utilisées pour calculer la prévision passée. Il en va de même pour la corrélation et les résidus futurs où derrière chaque point se trouvent les 48 prochaines heures auxquelles la matrice coefficient a été appliquée pour créer la matrice prévision future.

De manière générale, la corrélation et les résidus passés ont des meilleures valeurs que les résultats futurs. Ce résultat est expliqué par le fait que la prévision passée est calculée à partir des valeurs de puissances réelles. Le modèle s'ajuste à chaque fois dans le passé pour être le plus proche des valeurs de puissances réelles. Les valeurs futures sont de moins bonne qualité car il s'agit d'une prévision.

**Corrélation** En ce qui concerne la corrélation, en comparaison de la puissance réellement fournie (Figure 14), plus la valeur de la puissance est haute meilleure est la corrélation.

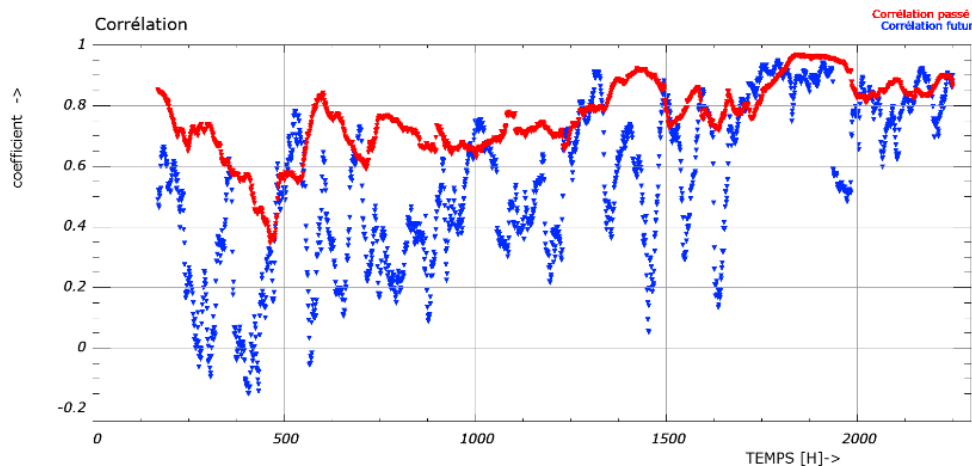


Figure 15: Résultats de la corrélation passée et future

**Résidus** Pour les résidus, plus la puissance réelle est élevée, plus les résidus augmentent. Même si la corrélation est meilleure dans ce cas.

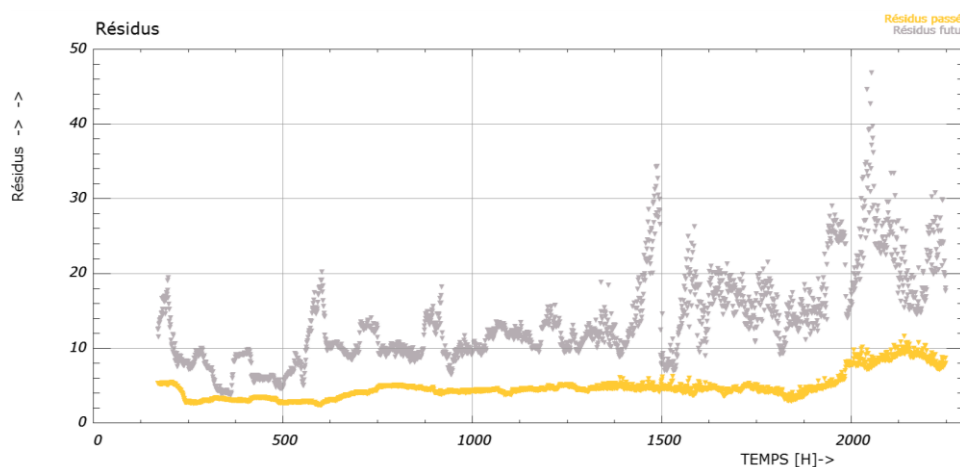


Figure 16: Résultat des résidus passés et futurs

**Dimension** Avec ce choix de dix heures, le nombre de colonnes de la Matrice « X » est de vingt-sept. Il y a donc onze colonnes pour la puissance du chauffage et pour la puissance solaire. Le Tableau 3 résume la répartition des colonnes de cette matrice. Cela signifie que pour les figures précédentes, le nombres de modèles est de vingt-sept.

| Besoins thermiques | Colonnes  |
|--------------------|-----------|
| L'ajustement "1"   | 1         |
| Chauffage          | 11        |
| Perte terrain      | 2         |
| Rayonnement        | 11        |
| ECS                | 1         |
| Rampes             | 1         |
| <b>Total</b>       | <b>27</b> |

Tableau 3 : Récapitulatif dimension de la matrice "X"

Pour se rendre compte de la dimension de la matrice, l'annexe 9.5 montre cette matrice de taille 27 X 48 dont le nombre de colonnes va rester inchangé pour la suite de ce projet.

La Figure 17 schématise la structure de données avec la variation de 10 heures dans le passé. Pour chaque  $h_{\text{Actuel}}$ , les dix dernières valeurs de température et de rayonnement vont être intégrées.

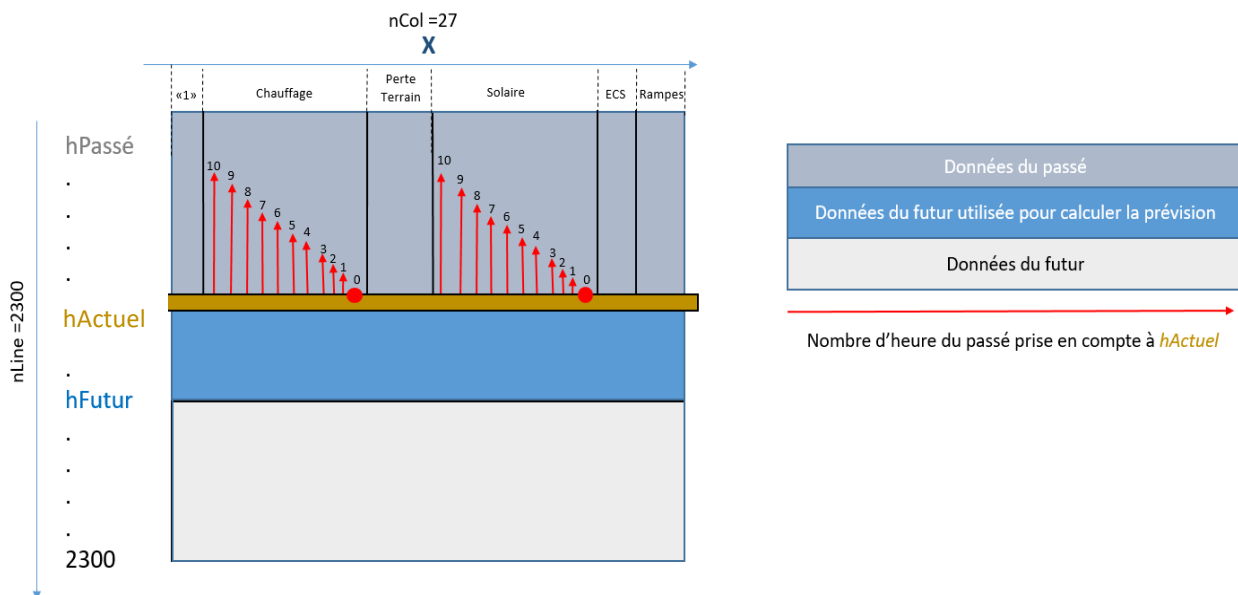


Figure 17: Structure de données avec le choix du nombre de modèles de 10 heures

## Dimension de la longueur de la prévision

Les premiers résultats sont satisfaisants d'un point de vue mathématique. Cependant, il est encore possible d'améliorer le modèle en modifiant la longueur de la matrice " $\eta_{passé}$ " pour calculer la matrice coefficient et la longueur de la prévision future à laquelle la matrice coefficient est appliquée.

Afin de respecter une certaine logique et d'avoir un mode de fonctionnement identique, le nombre d'heures prises en compte dans le passé et pour la prévision est multiple de 24. Ce qui correspond au nombre d'heure dans un jour. Comme ce premier modèle n'est pas tout à fait réaliste car ce sont les conditions météorologiques réelles qui ont été implémentées, les résultats suivants sont indicatifs. Ils permettent de montrer les variations des résultats en fonction de la longueur des matrices. Dans les annexes 9.6, 9.7 et 9.8 se trouvent les résultats des différents essais concernant la longueur des matrices " $\eta_{passé}$ " et " $X_{futur}$ ".

**Résultats** Au premier abord, on s'aperçoit qu'il y a de grandes variations entre chaque modèle. De manière générale, une longueur d' $h_{Passé}$  plus grande ou égale à la longueur d' $h_{Futur}$  donne de meilleurs résultats. Ce n'est pas forcément la plus grande longueur d' $h_{Passé}$  qui va donner de meilleurs résultats pour le futur. Cependant, plus la longueur d' $h_{Futur}$  est courte meilleures sont les valeurs futures. L'essai avec une longueur d' $h_{Passé}$  de 168 et d' $h_{Futur}$  de 48 rentre dans les critères de corrélation et de résidus pour ce premier modèle de prévision.

**Graphiques** Pour ces deux longueurs de matrice, la Figure 18 et la Figure 19 représentent la prévision de la demande où la corrélation future est minimum ( $h_{Actuel} = 406$ ), puis maximum ( $h_{Actuel} = 1790$ ).

La puissance fournie dans le passé est décrite par la courbe rouge. La courbe bleue représente la puissance prédite dans le passé. La puissance qui a été réellement fournie dans le futur est verte. Le modèle de prévision est décrit avec la courbe grise. Le passé va d' $h_{Passé}$  à  $h_{Actuel}$  et le futur va d' $h_{Actuel}$  jusqu'à  $h_{Futur}$ .

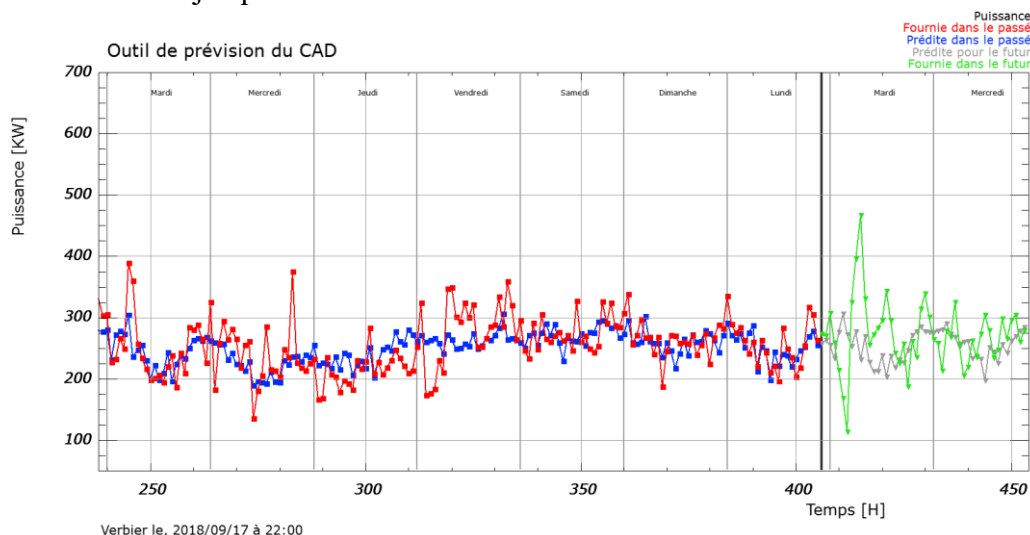


Figure 18: Graphique de la prévision à  $h_{Actuel} = 406$ ,  $h_{Passé} = 168$  et  $h_{Futur} = 48$

On constate que le modèle ne suit pas la courbe de la puissance réelle future. Quand la puissance augmente, le modèle diminue et inversement. La corrélation future est de -0.15. Sur la période, l'erreur entre la prévision et la puissance est de 455 [kW].



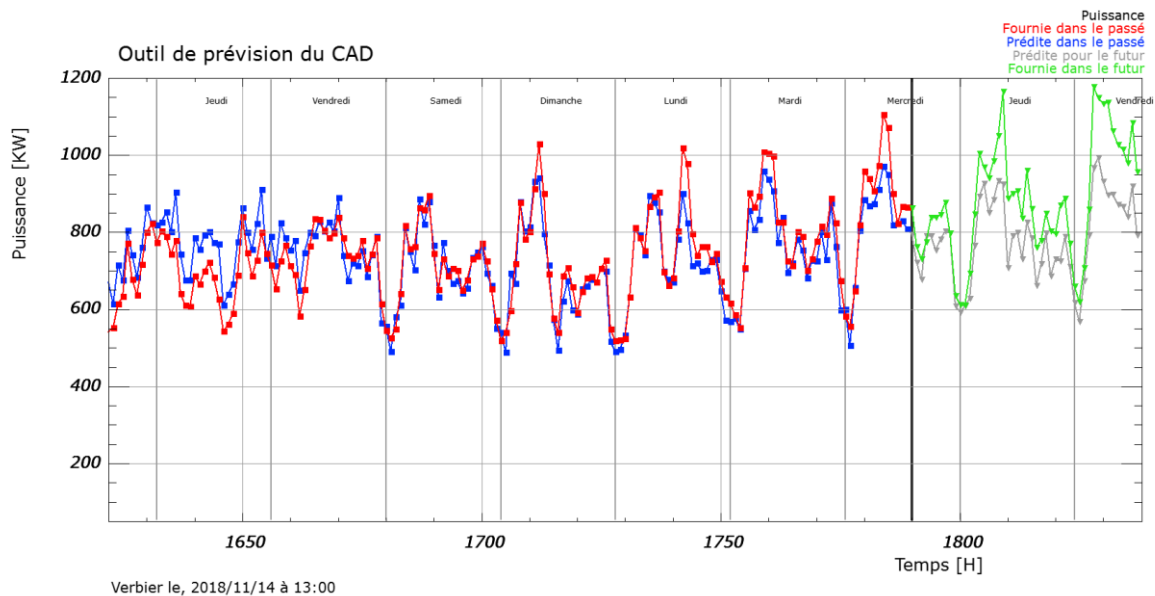


Figure 19: Graphique de la prévision à  $h_{Actuel} = 1790$ ,  $h_{Passé}=168$  et  $h_{Futur}=48$

Dans cette prévision, le modèle de prévision suit exactement la réalité future. La corrélation est de 0.95. Il est vrai que les valeurs de puissance sont plus basses, mais cette  $h_{Actuel}$  correspond au point où le résidu fait partie du résidu le plus élevé. Sur cette période, l'erreur est de 790 [kW].

**Comparaison** Il est aussi intéressant de comparer, les heures où le résidu futur est minimum ( $h_{Actuel} = 361$ ) puis maximum ( $h_{Actuel} = 2052$ ) avec ces deux premiers résultats.

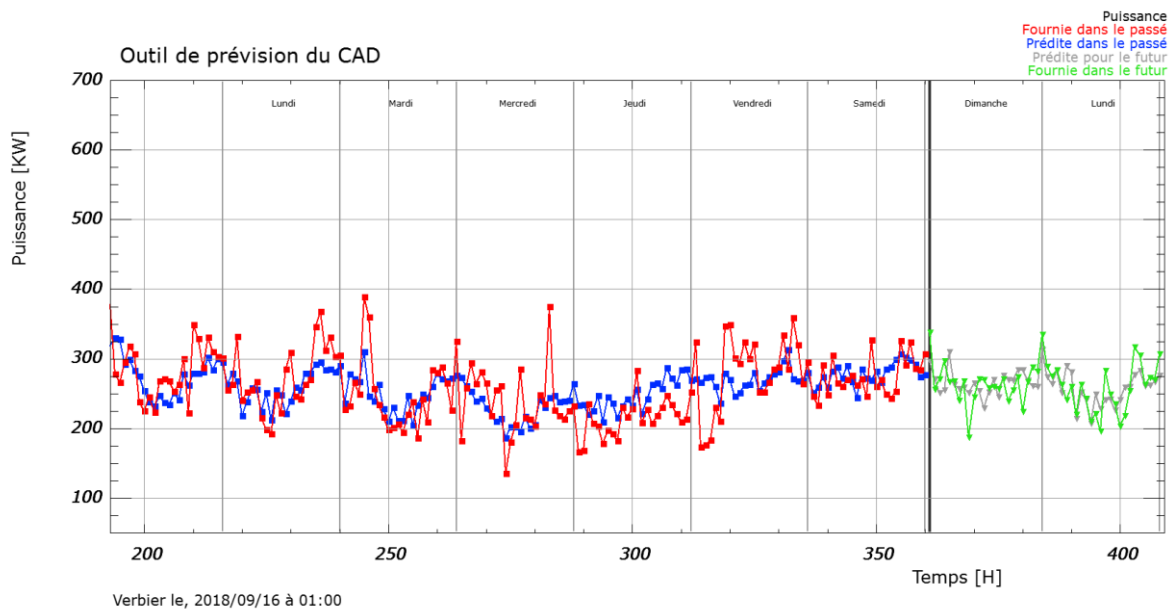


Figure 20: Graphique de la prévision  $h_{Actuel} = 361$ ,  $h_{Passé}=168$  et  $h_{Futur}=48$

Dans ce cas, l'erreur est au plus bas, elle est de 182 [kW]. La corrélation est de 0.57.

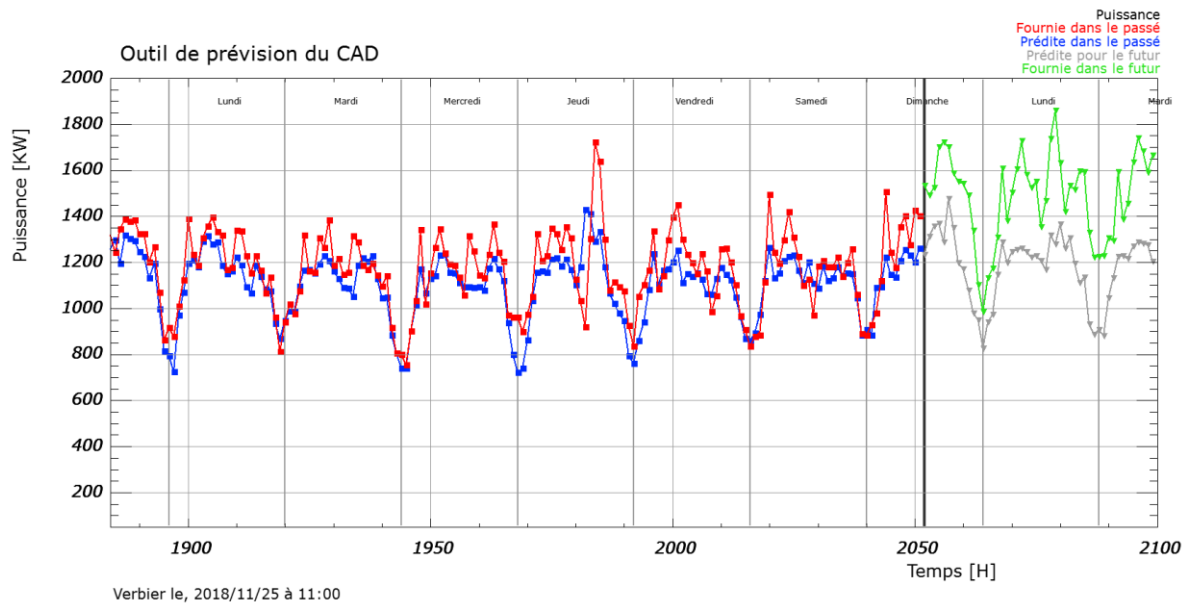


Figure 21: Graphique de la prévision  $h_{Actuel} = 2052$ ,  $h_{Passé}=168$  et  $h_{Futur}=48$

Dans cette prévision, l'erreur sur 48 heures est de plus de 2200 [kW]. Cependant, la corrélation est de 0.83. Même si la différence est élevée, force est de constater que le modèle suit la tendance de la puissance réellement fournie.

Dans les quatre graphiques précédents, ce sont les points critiques qui sont représentés que ce soit pour les résidus ou la corrélation.

En se référant à la Figure 15 et à la Figure 16, il y a plusieurs points où la corrélation future et les résidus futurs sont en même temps acceptables. L'exemple ci-dessous se trouve à l' $h_{Actuel} = 1000$ . Pour ce résultat<sup>7</sup>, la corrélation est de 0.75, tandis que l'erreur est de 450 KW sur toute la période de prévision.

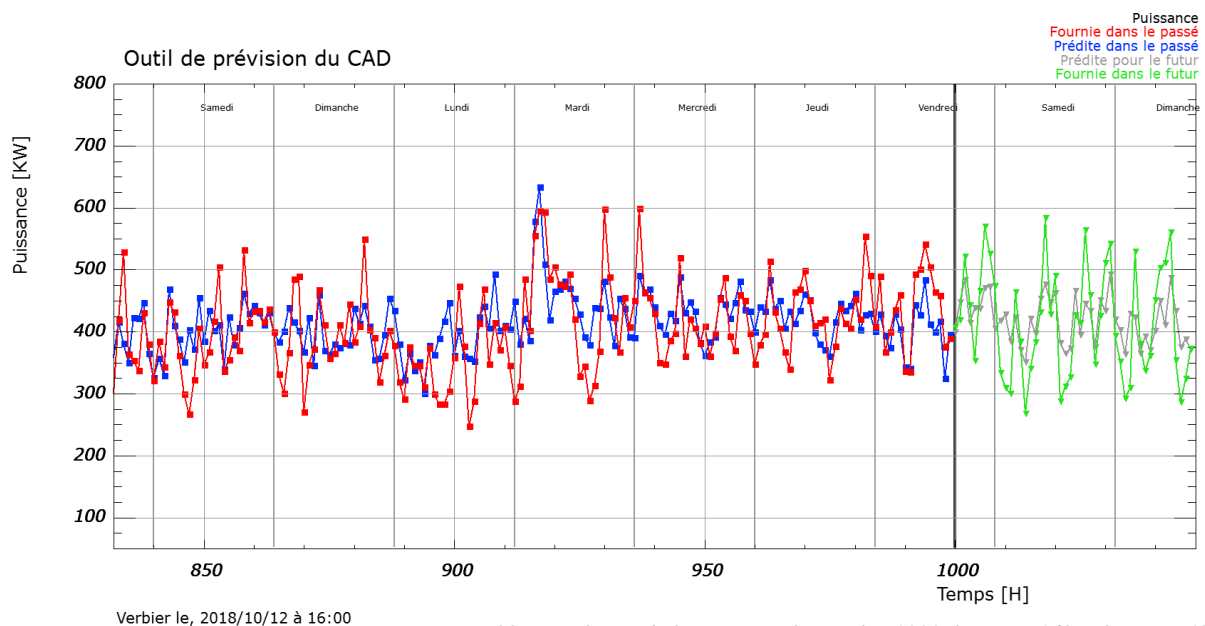


Figure 22: Graphique de la prévision  $h_{Actuel} = 1000$ ,  $h_{Passé}=168$  et  $h_{Futur}=48$

<sup>7</sup> Possibilité de visualiser l'ensemble des résultats de ce modèle dans la clé USB sous « modèle : météo réelle »

Mauvaise  
prévision

Les résultats présentés ci-dessus correspondent à une longueur de calcul de 168 heures dans le passé et une longueur de prévision de 48 heures. Dans ce cas, la prévision future est privilégiée. Comme le démontrent les annexes 9.7 et 9.8, certains modèles privilégient la prévision réalisée dans le passé. C'est le cas pour le modèle qui calcule la prévision passée sur 48 heures et qui l'applique sur 168 heures dans le futur. C'est exactement le modèle inverse.

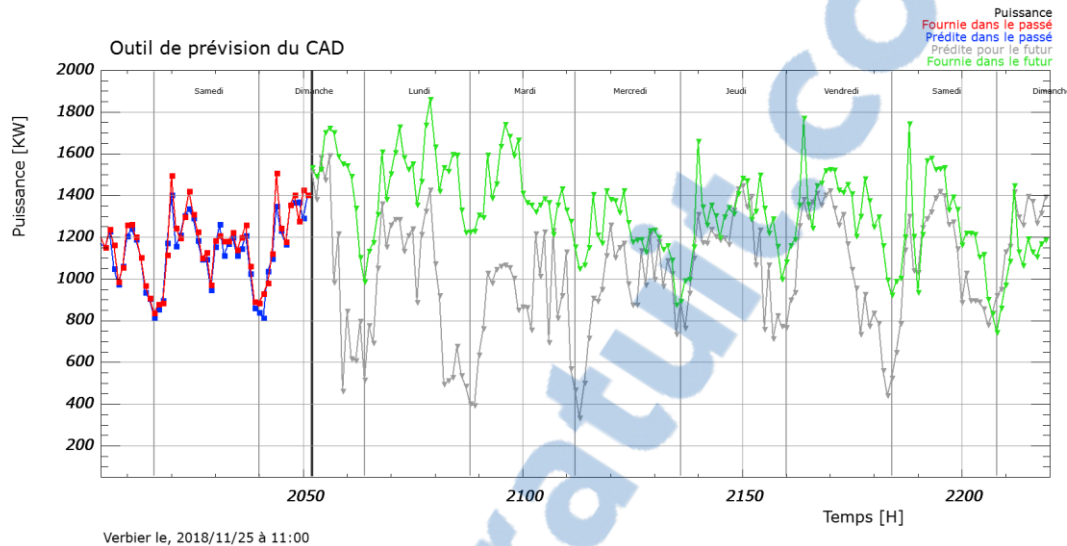


Figure 23: Graphique de la prévision  $h_{Actuel} = 2052$ ,  $h_{Passé}=48$  et  $h_{Futur}=168$

Pour une même  $h_{Actuel}$  (2052), là où le résidu était maximum précédemment, le résultat est peu convaincant comme le démontrent les grands écarts de puissance. Même si à certaines heures la corrélation est visuellement correcte, elle est dans ce cas de 0.4, l'erreur sur la période de prévision est de plus de 5200 [kW]. Cependant, en regardant le passé, c'est-à-dire les courbes rouge et bleue, on voit que la puissance réellement fournie dans le passé et la puissance prédite dans le passé sont identiques. La corrélation est de 0.96 et l'erreur est de 360 [kW]. Ce qui n'est pas le cas pour le modèle précédent.

Matrice  
coefficient

Il est aussi intéressant d'analyser la valeur des coefficients calculée par le modèle dans le passé pour les appliquer dans le futur. Il y en a 27. L'annexe 9.9 montre la valeur de tous les coefficients calculés pour chaque  $h_{Actuel}$ . Il est difficile de comprendre les raisons des variations de valeurs de chaque coefficient.

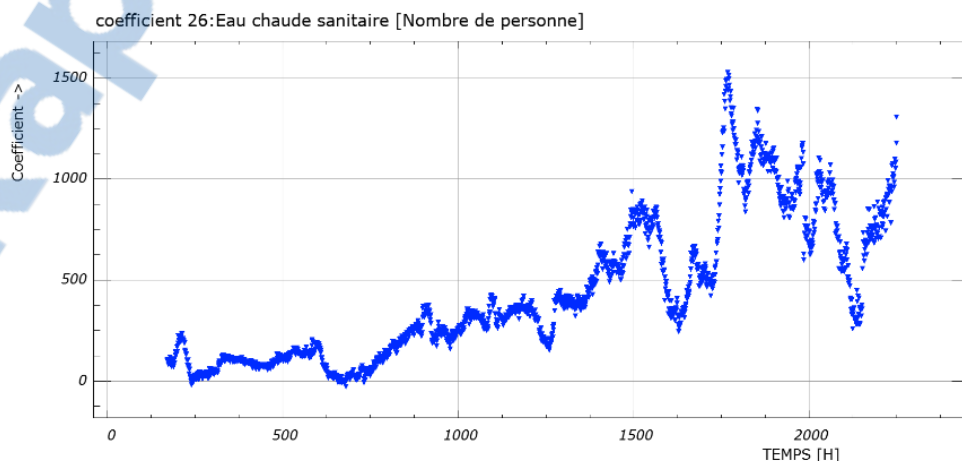


Figure 24: Valeur du coefficient BETA pour l'eau chaude sanitaire

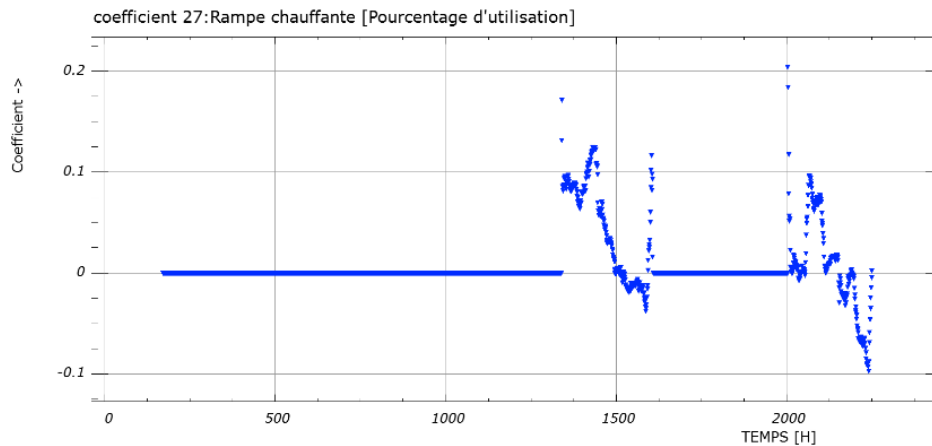


Figure 25: Valeur du coefficient BETA pour les rampes chauffantes

ECS et  
rampes

L'ECS et les rampes sont calculées de manière similaire aux autres coefficients c'est-à-dire grâce à l'ajustement. Les deux derniers graphiques, qui représentent le coefficient pour l'ECS et le coefficient des rampes, sont intéressants.

Pour l'eau chaude sanitaire, pour la plupart des  $h_{Actuel}$ , le coefficient est positif. Il varie de -25 à plus de 1500. Ces valeurs peuvent être mises en relation avec le taux d'occupation du CAD de Verbier pendant cette période allant de septembre à début décembre. Certes, ce n'est pas le taux d'occupation réel mais la valeur des coefficients est cohérente.

Pour les rampes chauffantes, on aperçoit les heures où elles sont en fonction. Parfois, les coefficients ne sont pas cohérents. Le pourcentage de rampes en fonction varie de -10% à 20%. L'ajustement calcule des valeurs de coefficients négatives mais celles-ci ne sont pas réelles.

## 2.9 Analyse du premier modèle

Analyse

Avec ces résultats, il est possible de tirer un premier bilan. Tout d'abord, la méthode d'ajustement pour trouver la prévision de la demande est réaliste. Les résultats statistiques et graphiques donnent des prévisions utilisables, même si pour certaines  $h_{Actuel}$ , les résidus et les coefficients de corrélation sont de moins bonnes qualités. Les endroits critiques où la corrélation est plus petite que 0 et où les résidus sont hauts peuvent être expliqués par des raisons de gestion du CAD à ces moments précis. Il est possible qu'une piscine municipale extérieure ait été arrêtée. La demande en chauffage ou en eau chaude sanitaire peut aussi avoir augmenté de manière considérable en très peu de temps. A cette forte demande peut s'ajouter l'enclenchement des rampes chauffantes par exemple. En fait, toutes ces possibilités qui ne sont pas prévues par le modèle demandent à l'algorithme plusieurs heures pour se rendre compte de ces augmentations ou diminutions de la demande. Les cas critiques sont donc des heures de transition où l'algorithme est en train de prendre en compte ces variations.

Il ne faut pas oublier que ce modèle n'est pas tout à fait réaliste car les températures, le rayonnement et les températures aller et retour corresponde aux valeurs réelles du passé. De plus, la valeur des coefficients des rampes chauffantes n'est pas tout à fait cohérente.

Dans le paragraphe suivant, un modèle de prévision de la demande qui ne prend pas en compte les rampes chauffantes va être testé pour améliorer, si possible, le modèle.

## 2.10 Deuxième modèle de prévision « météo réelle sans rampes chauffantes »

Modèle  
sans  
rampes

Au vu des coefficients du modèle des rampes chauffantes, des essais vont être réalisés sans ce modèle. Pour ce faire, la structure du code change en quelques points. La structure des données dans Excel change en deux aspects. Tout d'abord, le modèle rampes est enlevé de la structure. Puis la colonne " $\eta$ " qui correspond à la puissance réelle est remplacée par la différence entre cette colonne et la colonne « rampes ». Elle est notée " $\eta_{inter}$ ". Cela veut dire qu'on crée une puissance réelle sans rampes pour calculer la prévision passée et future.

Il ne faut pas oublier que pour la colonne des rampes chauffantes, les puissances sont déjà implémentées. S'il fait  $< 4^{\circ}\text{C}$  et qu'il y a une précipitation, la puissance est de 945 [kW], sinon elle est de 0 [kW].

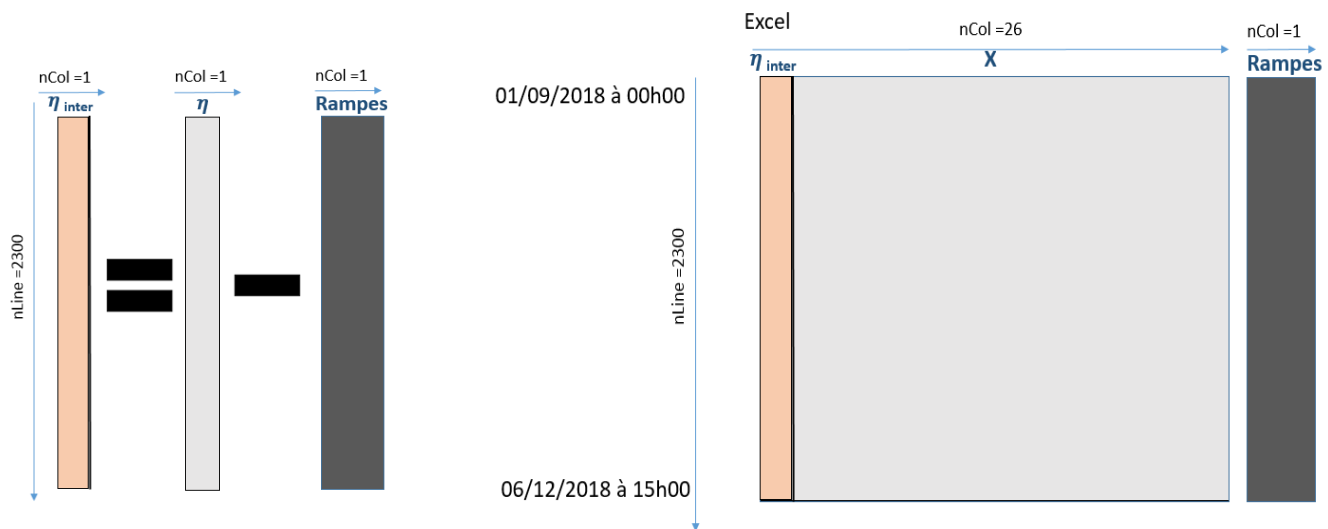


Figure 26: Structure des données pour le modèle sans rampes

Différence

Cette modification engendre donc une correction de la taille de la matrice "X" qui passe de 27 à 26 colonnes. Les calculs réalisés pour trouver les prévisions sont décrits par l'Équation 19 et schématisés dans l'annexe 9.10. L'idée générale est de soustraire la puissance des rampes, réaliser l'ajustement pour ensuite rajouter la puissance des rampes à la puissance prédite. Des essais avec des puissances de rampes différentes vont être testés pour voir s'il y a moins d'écart entre la prévision et la réalité.

$$\eta_{inter} = \eta - Rampes$$

$$\eta_{passé} = \eta_{inter} + Rampes_{passé}$$

$$\eta_{futur} = \eta_{inter} + Rampes_{futur}$$

$$\eta_{prév\_passé} = X_{passé} \cdot \beta_i + Rampes_{passé}$$

$$\eta_{prév\_futur} = X_{futur} \cdot \beta_i + Rampes_{futur}$$

Équation 19: Calcul réalisé pour trouver les matrices  
prévision

Rapport-gratuit.com

LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES



## 2.11 Résultat modèle « météo réelle sans rampes »

Pour ces essais, la taille du modèle est le même qu'auparavant. La dimension du passé est de 168 heures et celle du futur est de 48 heures dans le but d'avoir le même point de comparaison.

Les essais résumés dans les deux tableaux ci-dessous, montrent les valeurs des coefficients de corrélation et des résidus avec une certaine puissance de rampes en fonction soustraite puis, après que l'ajustement ait été calculé, rajoutée.

| Puissance Rampes<br>[KW] | Corrélation passée |      |      | Corrélation future |      |      |
|--------------------------|--------------------|------|------|--------------------|------|------|
|                          | min                | max  | moy  | min                | max  | moy  |
| 945                      | 0.17               | 0.97 | 0.68 | -0.72              | 0.95 | 0.42 |
| 700                      | 0.17               | 0.97 | 0.68 | -0.70              | 0.95 | 0.43 |
| 500                      | -0.45              | 0.97 | 0.60 | -0.70              | 0.95 | 0.43 |
| 300                      | 0.35               | 0.97 | 0.75 | -0.46              | 0.95 | 0.50 |
| 100                      | 0.35               | 0.97 | 0.75 | -0.15              | 0.95 | 0.53 |

Tableau 5: Résultats des coefficients de corrélations pour le modèle sans rampes

| Puissance Rampes<br>[KW] | Résidus passé |       |      | Erreur sur 168 Heures [KW] |         |         | Résidus futur |        |       | Erreur sur 48 Heures [KW] |         |         |
|--------------------------|---------------|-------|------|----------------------------|---------|---------|---------------|--------|-------|---------------------------|---------|---------|
|                          | min           | max   | moy  | min                        | max     | moy     | min           | max    | moy   | min                       | max     | moy     |
| 945                      | 2.47          | 27.69 | 7.90 | 414.96                     | 4652.42 | 1327.03 | 3.81          | 166.45 | 28.18 | 182.69                    | 7989.79 | 1352.83 |
| 700                      | 2.47          | 20.70 | 6.80 | 414.96                     | 3477.26 | 1142.74 | 3.81          | 124.60 | 23.33 | 182.69                    | 5980.94 | 1119.74 |
| 500                      | 2.47          | 20.70 | 6.80 | 414.96                     | 3477.26 | 1142.74 | 3.81          | 124.60 | 23.33 | 182.69                    | 5980.94 | 1119.74 |
| 300                      | 2.42          | 12.49 | 5.23 | 406.06                     | 2097.65 | 878.64  | 3.81          | 57.34  | 16.08 | 182.69                    | 2752.08 | 771.98  |
| 100                      | 2.42          | 10.82 | 4.75 | 406.06                     | 1818.10 | 798.00  | 3.81          | 38.75  | 13.60 | 182.69                    | 1859.76 | 652.80  |

Tableau 4: Résultats des résidus pour le modèle sans rampes

Plus la puissance des rampes est grande, moins les résultats sont bons. De plus, quand la puissance des rampes est basse, le modèle se rapproche du premier modèle « météo réelle ». Le coefficient de corrélation minimum augmente avec une diminution de la puissance des rampes. Les résidus diminuent avec une diminution de la puissance.

Résultats

Une représentation graphique de la corrélation avec le modèle de puissance de rampes de 945 [kW] montre que quand les rampes ne sont pas enclenchées, le modèle est identique au modèle « météo réelle ». Ce n'est pas le cas quand elles sont enclenchées. Les corrélations sont beaucoup plus basses qu'auparavant.

Corrélation

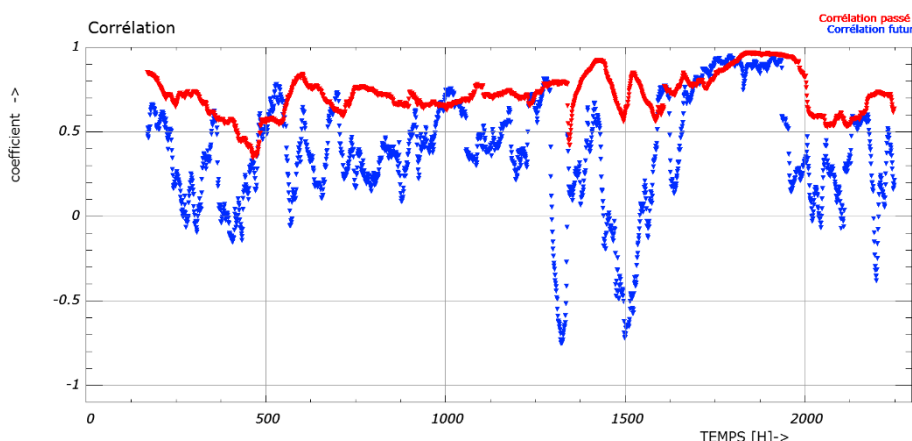


Figure 27: Coefficients de corrélation pour le modèle sans rampes avec une puissance de 945[kW]



**Résidus** L'approche est la même que pour la corrélation. Quand les rampes sont en fonction, les résidus sont beaucoup plus élevés que précédemment.

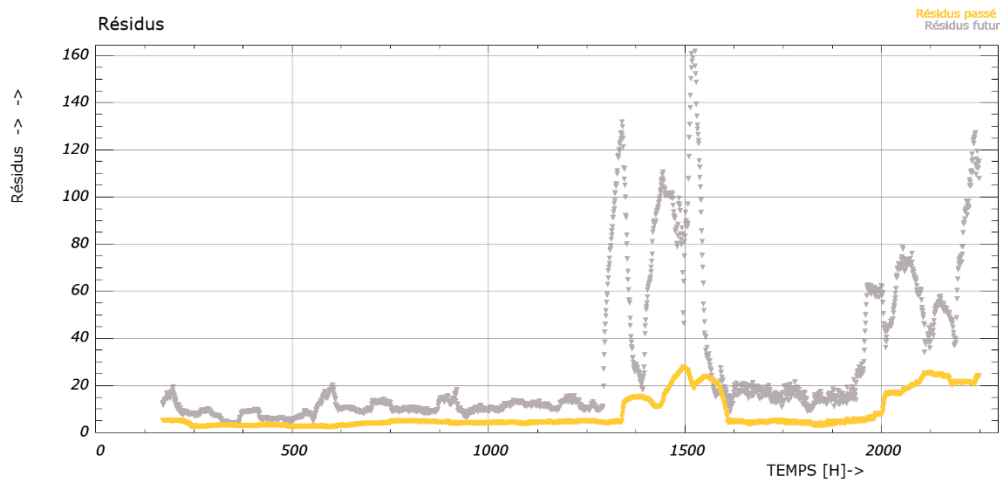


Figure 28: : Résidus pour le modèle sans rampes avec une puissance de 945[kW]

**Comparaison** Il est intéressant de comparer graphiquement ces résultats avec le premier modèle « météo réelle » L'hActuel = 1498 correspond à l'heure où la corrélation est la plus basse (-0.72). L'hActuel = 1522 correspond à l'heure où le résidu est le plus haut (166).

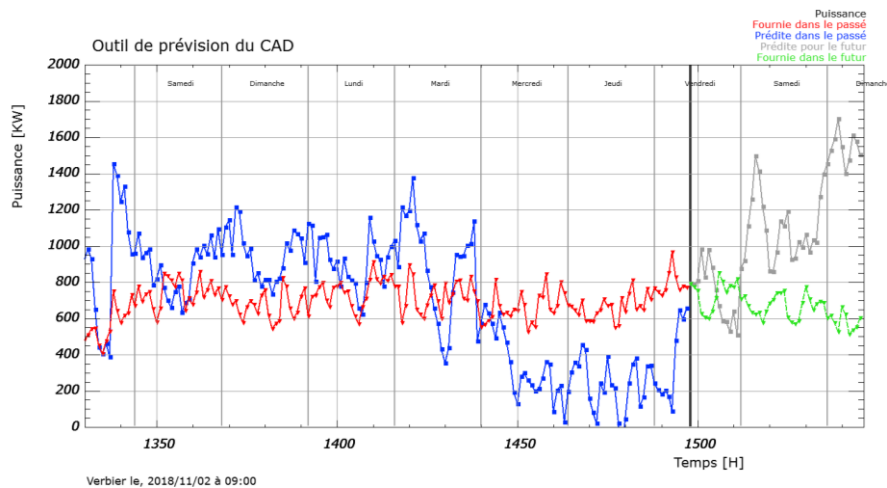


Figure 29: Corrélation futur minimum, hActuel = 1498

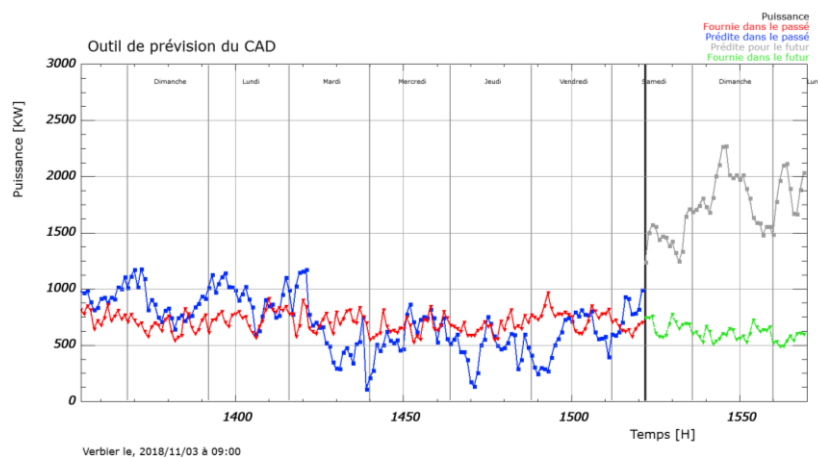


Figure 30: Résidu futur le plus haut, hActuel = 1522

Les graphiques suivants représentent le résultat pour ces mêmes points avec le premier modèle de prévision « météo réelle ». Pour les mêmes heures, les résultats sont de meilleures qualités.

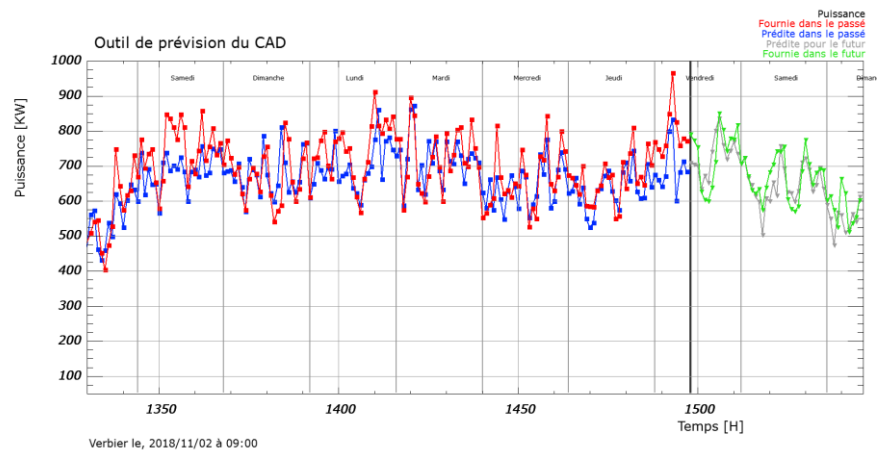


Figure 31: Modèle "météo réelle",  $h_{\text{Actuel}}=1498$

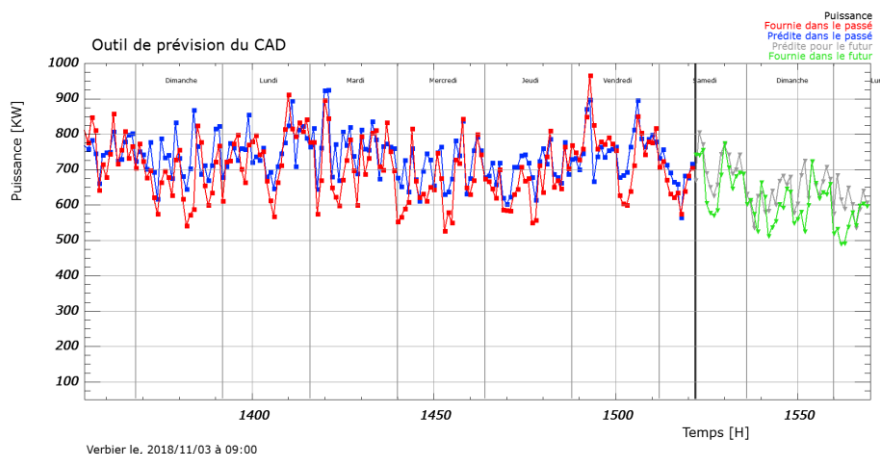


Figure 32: Modèle "météo réelle",  $h_{\text{Actuel}} = 1522$

## 2.12 Analyse modèle « météo réelle sans rampes »

**Analyse** Pour ce modèle<sup>8</sup>, les résultats ne sont pas convaincants. Le modèle ne fonctionne que si la puissance des rampes ajoutée par la suite se situe autour de 100 [kW]. Cette manière de procéder correspond au premier modèle où la puissance des rampes était faible à cause du coefficient calculé. Il est donc préférable de rester sur la dimension du premier modèle, même si la valeur des coefficients calculée pour le modèle de rampes n'est pas réaliste.

**Raisons** Ce résultat s'explique aussi par le fait que quand la puissance des rampes a été soustraite de la puissance réelle, il arrivait parfois qu'à certaines heures la puissance " $\eta_{\text{inter}}$ " soit plus petite que zéro, ce qui n'est pas imaginable.

<sup>8</sup> Possibilité de visualiser l'ensemble des résultats de ce modèle dans la clé USB sous « modèle : météo réelle sans rampes »

Il est possible que les données météo ne soient pas réalistes par rapport au fonctionnement des rampes ou que les rampes ne fonctionnent pas à 100% quand les conditions sont réunies. Il est donc difficile de séparer la puissance de rampes de la puissance totale réellement fournie.

C'est pour ces raisons que des essais avec une puissance plus faible ont été réalisés. Cependant, en appliquant cette méthode, on se rapproche du premier modèle de prévision et donc il n'y a aucun intérêt à privilégier ce modèle.

Les données de puissance de Verbier ne sont pas en plein hiver. Même si pendant le mois d'octobre et début décembre 2018 il avait neigé, le modèle pourrait être amélioré avec des données se situant en plein hiver. Il serait peut-être plus facile de séparer la puissance de rampes de la puissance totale.

### 2.13 Troisième modèle de prévision « prévision météo »

#### Différences

Ce modèle va utiliser les prévisions météorologiques et non la météo réellement mesurée. La dimension de la matrice reste identique au premier modèle, c'est dire que la matrice « X » a 27 colonnes. Pour le modèle des pertes dans le terrain, les températures aller et retour ne seront pas connues dans le futur, ce sont les températures aller et retour du passé qui vont être utilisées pour construire le modèle futur. Le but de ces modifications est de rendre le modèle de prévision réaliste, car on ne connaît pas les valeurs réelles du futur mais seulement les prévisions.

#### Données

La prévision météorologique provient d'un serveur météo. Les données de prévision météo ne couvrent pas toutes les données de puissance fournies par le CAD. Elles commencent le 5 octobre 2018 à 16h00 et finissent le 30 novembre à 23h00, ce qui correspond à 1352 heures. La prévision météo pour toute heure est recalculée à chaque heure qui passe. Par exemple, le 20 novembre à 16h00, il est possible d'avoir la prévision à 20h. Mais cette prévision sera recalculée chaque heure jusqu'à 20h00. Pour diminuer ce nombre de valeurs, une moyenne de prévisions sur 24 heures a été réalisée pour chaque heure.

Pour toute  $h_{Actuel}$ , il y a sept prévisions pour la température extérieure, pour le rayonnement et pour la précipitation. Il est possible d'avoir la prévision météo d' $h_{Actuel}$ , il y a 24 heures, 48 heures, 72 heures, 96 heures, 120 heures, 144 heures et 168 heures.

Il est clair que plus on se situe proche d' $h_{Actuel}$ , plus les prévisions météorologiques sont fiables. Il en sera de même pour la prévision de la demande.

Dans ce modèle, différentes sources sont utilisées pour la température et le rayonnement. La température réelle provient d'Altis, le rayonnement réel provient de MétéoSuisse et les prévisions proviennent de météoest.ch. Il est donc intéressant de comparer la prévision et la réalité, ces comparaisons trouvent dans l'annexe 9.11. Il y a passablement de différence à certaines heures (Figure 33). Par contre, pour la température extérieure et le rayonnement, la tendance est identique (Annexe 9.11). Les prévisions pour la température extérieure donnent parfois une température de 0°C mais en réalité cela correspond à l'absence de données de prévisions météorologiques.

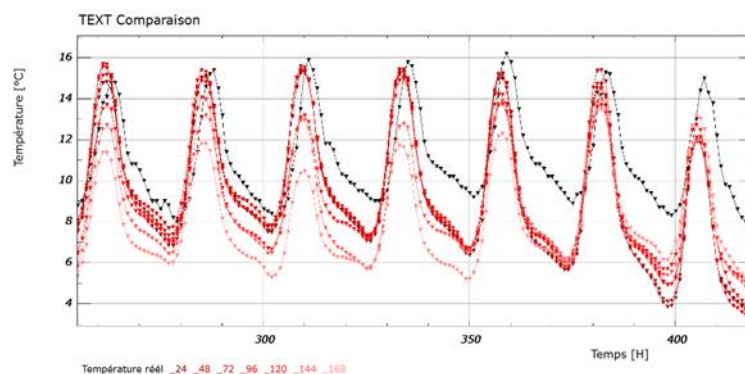


Figure 33: Exemple de décalage entre les prévisions en rouge et la réalité en noir pour la température

**Structure** La structure des données va changer, ce changement implique une modification du code. Les données seront toujours implémentées sur un fichier Excel, mais elles seront brutes. Tous les calculs concernant les modèles thermiques sont réalisés sur Qt. Cette manière de faire permet de créer entièrement tous les modèles sur le même logiciel.

**Structure prévision météo** Les données de prévision météo ont été implémentées sur Excel de manière à avoir pour chaque heure, les 7 prévisions de la température extérieure, de la précipitation et du rayonnement. Chaque heure et chaque type de prévision incorpore le nombre de valeurs utilisées pour calculer la moyenne ainsi que le minimum, le maximum et l'écart-type. A noter que dans la prévision météo, le rayonnement est séparé en deux, il y a le rayonnement global et direct. Ces deux grandeurs vont être additionnées par la suite. La structure est identique pour les autres heures de prévision.

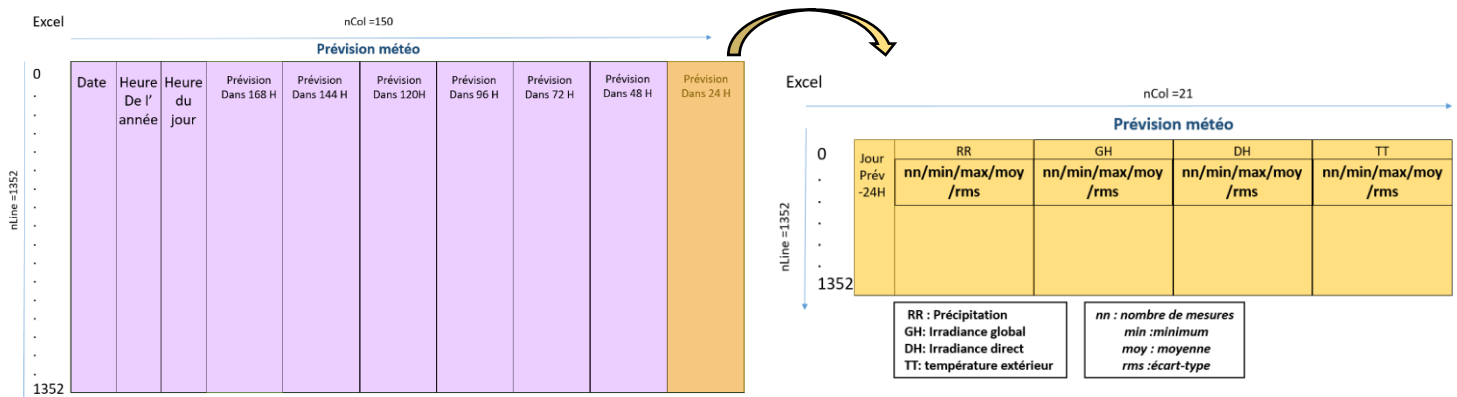


Figure 34: Structure des données de prévision météorologique

**Taller Tretour** La température aller et retour du CAD a été implémentée sur un fichier Excel et codée de manière à avoir la même longueur de données que pour la prévision météo. Pour chaque  $h_{Actuel}$ , ce sont les valeurs de température d' $h_{Actuel}$  à  $h_{Passé}$  qui vont être implémentées dans le modèle. La structure est visible dans l'annexe 9.12. Les mêmes valeurs de température aller et retour vont être implémentées dans le futur que dans le passé.

**Prévision** Les prévisions météo ne donnent pas une température fixe dans le futur. Il y a toujours une marge d'erreur. La Figure 35 montre la prévision météorologique à Verbier. On voit qu'il y a une prévision minimum et une prévision maximum. Pour la prévision de la demande du CAD de Verbier, l'idée est de recréer une prévision minimum et maximum.

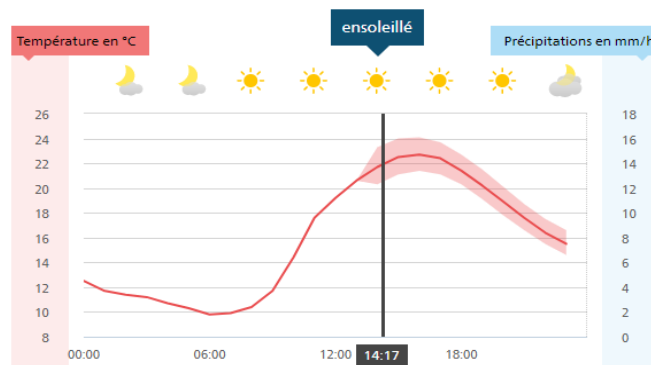


Figure 35: Prévision météo Verbier Source : [météosuisse.admin.ch](http://météosuisse.admin.ch)

**Prévision  
min et max**

Ces deux types de prévisions vont être créées à partir de la prévision minimale et maximale. La prévision minimale de la demande se construit avec la prévision maximale de la température et du rayonnement et avec une prévision de la précipitation minimale. La prévision maximale se construit avec la prévision minimale du rayonnement et de la température et avec la prévision maximale de précipitations.

Pour fournir ces deux prévisions, la matrice « X » est recrée. Par contre, ce sont les prévisions météo qui sont implémentées et les températures aller et retour sont décalées d'*hPassé*. Les prévisions météorologiques permettent de créer une prévision de la demande de 168 heures au maximum.

**Manière**

Pour ces plus de 1300 heures de fonctionnement, toutes les prévisions météo sont connues. Comme décrit précédemment, pour chaque *hActuel*, il y a 7 prévisions différentes. C'est pour cela que 7 matrices « X » sont créées. Cela veut dire que chaque matrice a la même longueur, soit plus de 1300 lignes et le même nombre de colonnes, mais les valeurs utilisées dans chacune d'elles dépendent de l'heure de la prévision (24,48,72,96,120,144 et 168 heures). Puis, en utilisant les valeurs minimales et maximales, 14 matrices « X » sont créées.



Figure 36: Création des 14 matrices "X"

Ces matrices ne peuvent pas être directement utilisées. Premièrement, pour le modèle de chauffage et le modèle de rayonnement, les valeurs des 10 dernières heures doivent être prises en considération. Deuxièmement, les matrices ne suivent pas l'ordre des heures de prévisions. Dans chaque matrice, le nombre d'heures entre le moment où la prévision météorologique a été réalisée et l'*hActuel* est toujours la même. Il faut assembler les différentes matrices pour créer une prévision réaliste notée " $X_{final}$ ". Pour chaque *hActuel*, la matrice " $X_{final}$ " pourra prédire les 168 prochaines heures ( $hFutur=168$ ).

10 heures  
dans le  
passé

Le modèle utilise les 10 dernières heures de température et de rayonnement à chaque  $h_{Actuel}$  pour calculer la prévision. Cela veut dire que des valeurs réelles doivent être implémentées pour chaque  $h_{Actuel}$ . Ce sont les mêmes valeurs qui ont été utilisées dans le modèle de prévision « météo réelle ». La Figure 17 montre la méthode utilisée. Cette même méthode va être appliquée pour le reste de la création de la matrice " $X_{final}$ " aux heures critiques.

Par exemple pour la prévision à  $h_{Actuel} + 24$ , les 10 dernières heures de la prévision dans 24 heures sont combinées avec les 10 premières heures de la prévision dans 48 heures et cela jusqu'à la prévision dans 168 heures de manière à toujours prendre en compte ces dix heures de variations. La représentation graphique a été faite avec la prévision maximale, mais elle est identique pour la prévision minimale.

En résumé, pour chaque  $h_{Actuel}$ , des valeurs dans la matrice " $X_{passé}$ " sont combinées avec " $X_{MAX_{24_{heures}}}$ ". Puis les matrices prévisions sont combinées entre elles en augmentant à chaque fois la valeur de  $h_{Actuel}$  de 24 heures.

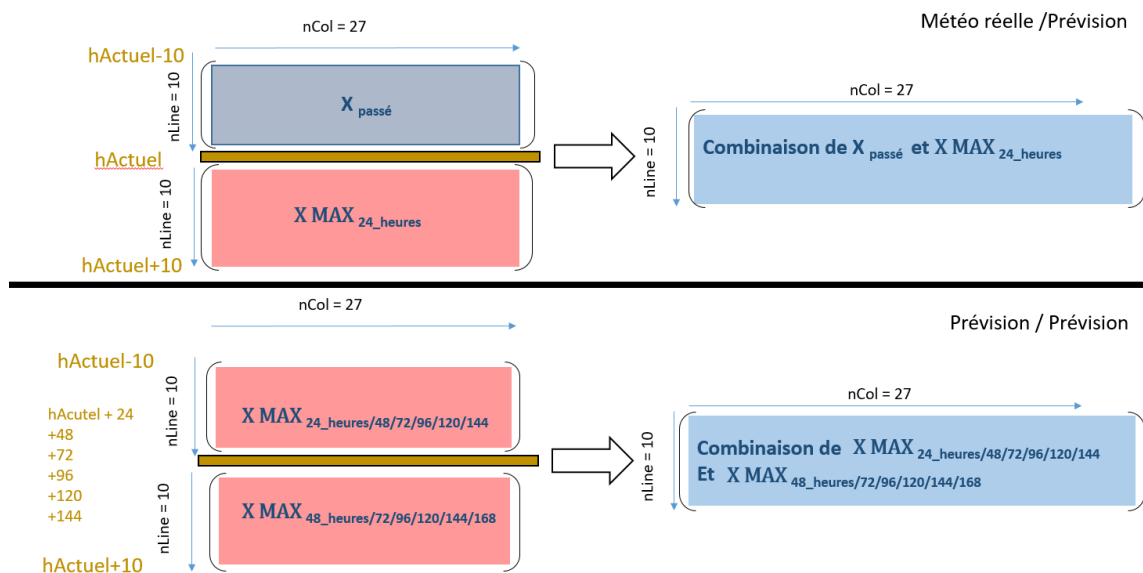


Figure 37: Variation de 10 heures dans le passé pour le modèle « prévision météo »

Matrices  
combinées

En prenant en compte ces variations de 10 heures, des matrices de 27 colonnes et 10 lignes sont créées à partir des figures ci-dessus. Au total, il y a 7 matrices combinées qui sont créées pour chaque matrice " $X_{final}$ ".

Matrice  
" $X_{final}$ "

Pour finaliser la matrice " $X_{final}$ ", il faut prendre les matrices combinées créées ci-dessus et les 14 lignes suivantes dans chaque matrice " $X_{MIN}$  et  $X_{MAX}$ " pour créer la prévision journalière de 24 heures. Enfin, toutes ces matrices sont assemblées pour créer la matrice " $X_{final}$ " qui mesure 168 heures de long. Cette matrice est représentée dans l'annexe 9.13.

Calcul  
prévision

Le calcul de la matrice coefficient est identique au premier modèle « météo réelle » (Figure 11). Les températures, rayonnements et précipitations réels sont utilisés pour calculer les coefficients. Puis ces coefficients vont être appliqués à la fois à la matrice " $X_{MAX_{final}}$ " et " $X_{MIN_{final}}$ " pour fournir les deux prévisions de la demande du CAD de Verbier.



## 2.14 Résultats modèle de prévision « prévision météo »

Les essais pour ce modèle ont été réalisés en faisant varier la taille de la prévision passée et de la prévision future. Une prévision future de 168 heures n'est pas obligatoirement nécessaire, sa dimension peut être plus petite. Pour ce modèle, il y a deux fois plus de coefficients de corrélation et de résidus, car il y a deux prévisions de la demande. Les annexes 9.14 et 9.15 montrent les différents résultats de corrélation et de résidus obtenus en variant la dimension de la prévision passée et future. Pour tous les essais, les résultats sont moins bons que précédemment.

Longueur  
matrice

En ce qui concerne la corrélation passée, plus la longueur d' $h_{\text{Passé}}$  est grande, moins bonne est la corrélation. Pour les corrélations futures, plus les longueurs d' $h_{\text{Passé}}$  et d' $h_{\text{Futur}}$  sont grands, meilleurs sont les coefficients. Cette même analyse peut être faite pour les résidus. Le but est de privilégier la prévision future à la prévision passée.

Une longueur d' $h_{\text{Futur}}$  de 168 heures donne de meilleurs résultats qu'une prévision plus petite. Il est aussi préférable d'avoir la longueur de la prévision passée plus grande que la longueur de la prévision future. Pour ne pas avoir à calculer les coefficients sur une trop longue période dans le passé, le modèle avec une prévision de 192 heures dans le passé et de 168 heures dans le futur est choisi.

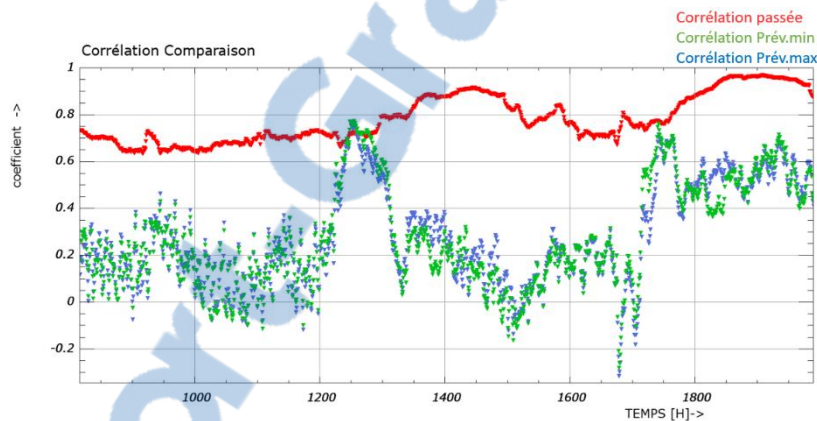


Figure 38: Coefficients de corrélations du modèle de prévision de la demande « prévision météo »,  $h_{\text{Futur}}=168$  et  $h_{\text{Passé}}=192$

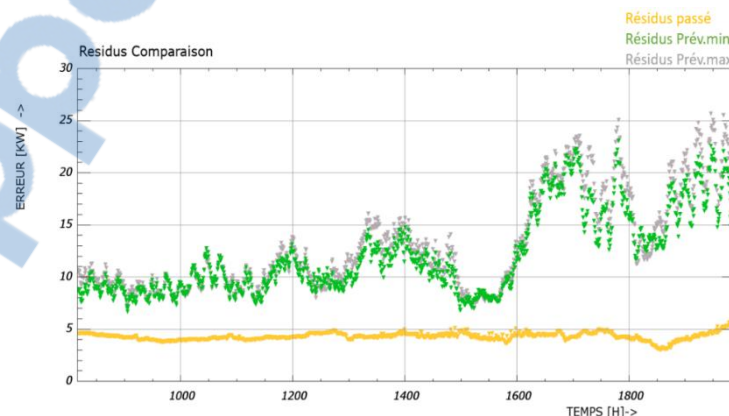
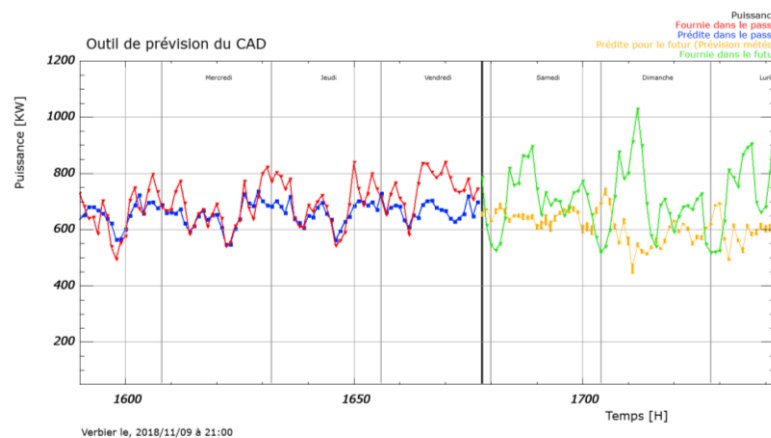
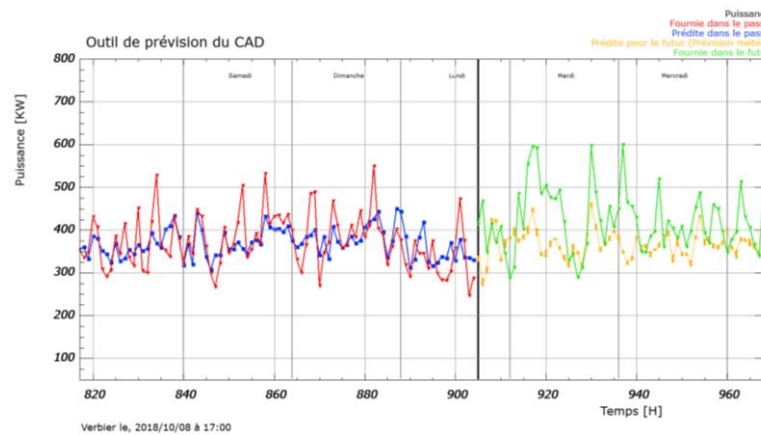
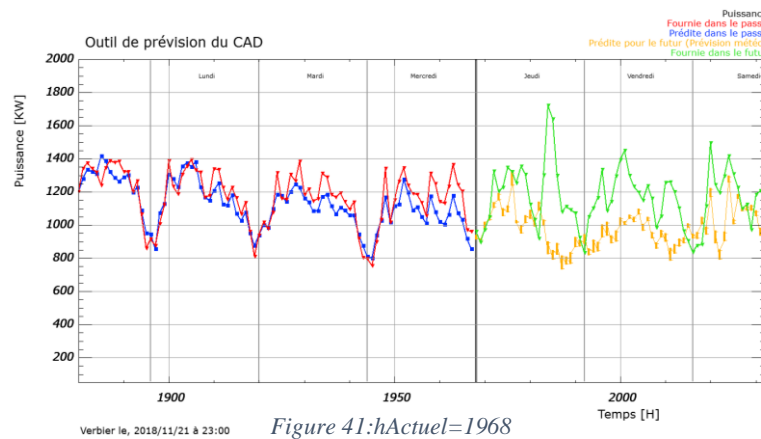
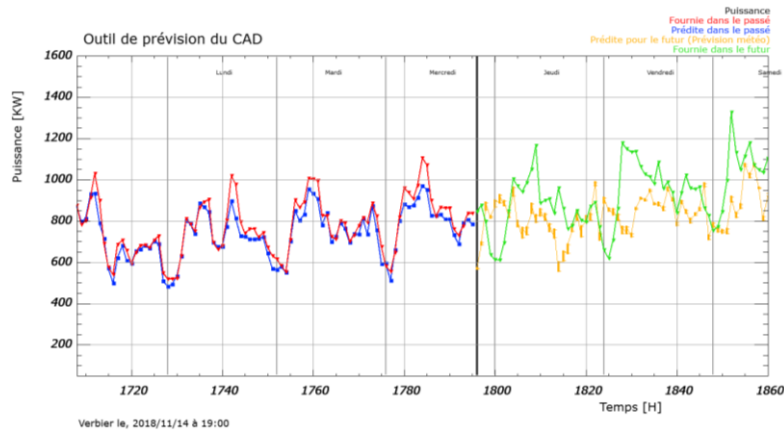


Figure 39: Résidus du modèle de prévision de la demande "prévision météo",  $h_{\text{Futur}}=168$  et  $h_{\text{Passé}}=192$

Pour ce modèle, les corrélations et les résidus min et max ont la même tendance. Cependant, ils ne suivent pas la même tendance que la corrélation et les résidus passés. A  $h_{\text{Actuel}}=1796$ , la corrélation est la plus haute et à  $h_{\text{Actuel}}=1678$  elle est la plus basse. Pour les résidus, le plus élevé se situe à  $h_{\text{Actuel}}=1968$  et le plus bas à  $h_{\text{Actuel}}=905$ . Par souci de lisibilité, 104 heures sont affichées dans le passé et dans le futur même si les longueurs sont plus longues. La prévision de la demande est décrite en jaune dans les figures suivantes.



**Comparaison** De manière générale<sup>9</sup>, on voit que ce modèle a plus de difficulté à prédire la demande future que le premier modèle. Cependant, la plupart du temps, il y a un bon compromis entre la corrélation et les résidus. Par exemple à l' $h_{Actuel}=1526$ . Dans ce graphique, la puissance prédite par le premier modèle « météo réelle » est aussi représentée. On voit que les deux modèles prédisent en même temps certains pics de puissances réelles, même si le premier modèle donne de meilleurs résultats que le modèle « prévision météo ». Pour les deux modèles, plus on est proche d' $h_{Actuel}$ , meilleures sont les prévisions. L'annexe 9.16 montre les valeurs des coefficients calculés.

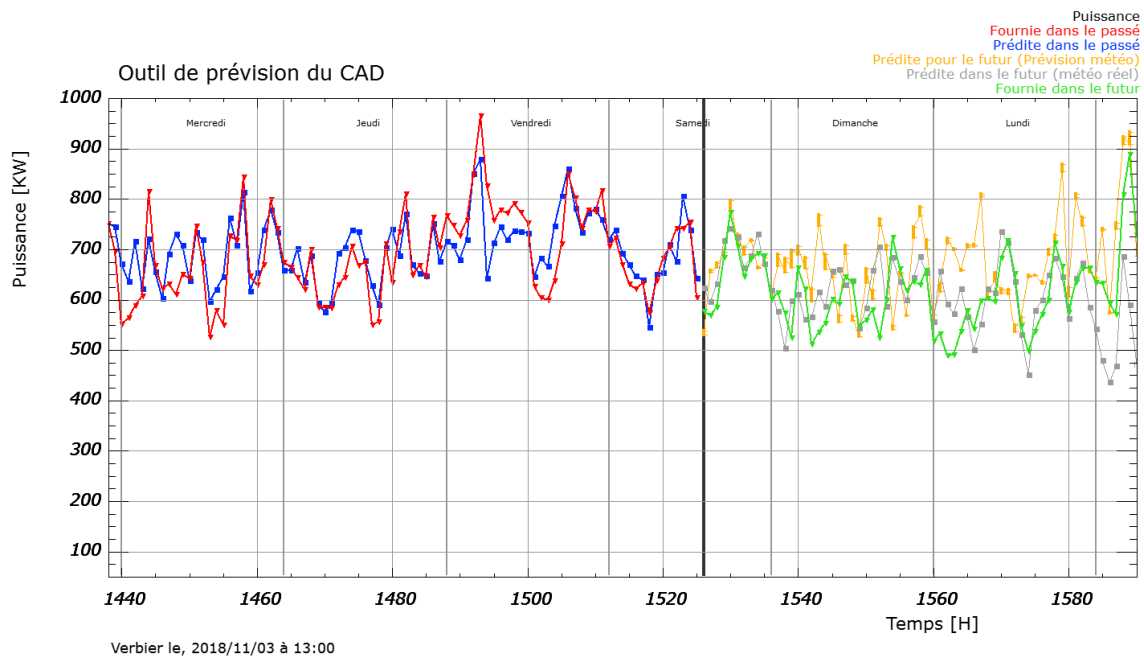


Figure 44: Résultats  $h_{Actuel}=1526$

## 2.15 Analyse modèle de prévision « prévision météo »

**Analyse** Ce modèle est de moins bonne qualité que les modèles précédents. Tout d'abord, les températures aller et retour sont décalées. Ce sont les mêmes valeurs pour le calcul de la prévision passée que pour la prévision future. Ce n'était pas le cas pour les autres modèles. Ensuite, la prévision météo utilisée ne correspond pas tout à fait à la réalité, les sources sont différentes. Il est aussi normal que les coefficients de corrélation et les résidus soient moins bons, car plus la prévision est loin d' $h_{Actuel}$  moins les données de prévision sont fiables. Cette fiabilité se retrouve dans la prévision de la demande. De plus, seuls les minimums et maximums sont utilisés pour créer la prévision. Certes, le modèle est moins bon que les autres, mais il correspond à la réalité des données de prévisions météo accessibles.

## 2.16 Quatrième modèle de prévision « prévision météo sans données réelles »

Ce modèle est amélioré en remplaçant les données de température et de rayonnement réelles par la prévision météo. A la vue des différences entre la réalité et la prévision météo, seules les prévisions météorologiques seront employées. La différence réside dans la création de la prévision passée.

<sup>9</sup> Possibilité de visualiser l'ensemble des résultats de ce modèle dans la clé USB sous « prévision météo »

A la place d'implémenter la température, la précipitation et le rayonnement réels, ce sont les prévisions de 24 heures auparavant qui sont implémentées. Le passé utilise les valeurs moyennes pour calculer la matrice coefficient. Ensuite, cette matrice sera appliquée à la matrice " $X \text{ MAX}_{final}$ " et " $X \text{ MIN}_{final}$ " pour créer la prévision future. Ce sont les seules différences avec le modèle précédent, tout le reste de la structure et de la méthode est identique.

## 2.17 Résultats modèle de prévision « prévision météo sans données réelles »

En utilisant la même longueur que dans le modèle précédent, c'est-à-dire qu' $h_{Passé} = 192$  et  $h_{Futur} = 168$ , les coefficients de corrélation et les résidus ont été calculés (Figure 45 et Figure 46).

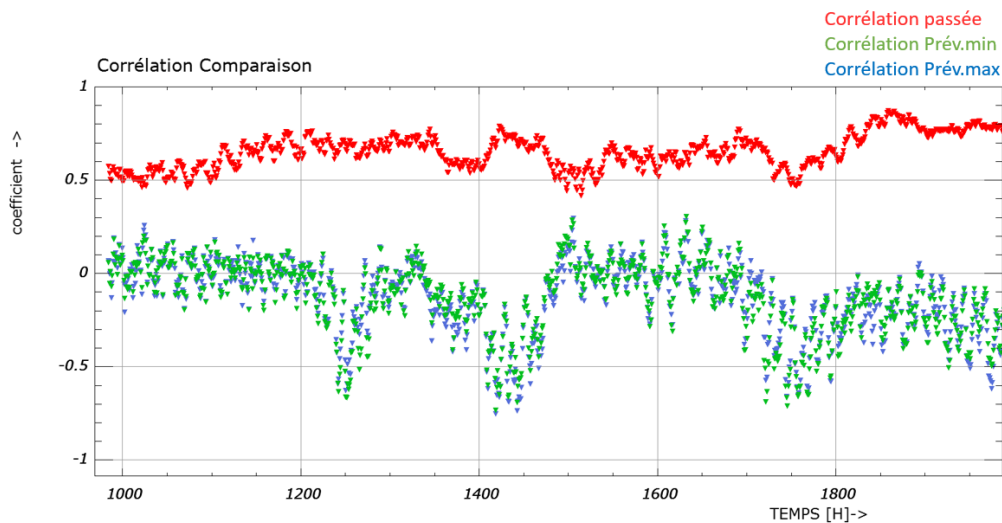


Figure 45 : Coefficients de corrélation du modèle de prévision de la demande « prévision météo sans réalité »,  $h_{Futur}=168$  et  $h_{Passé}=192$

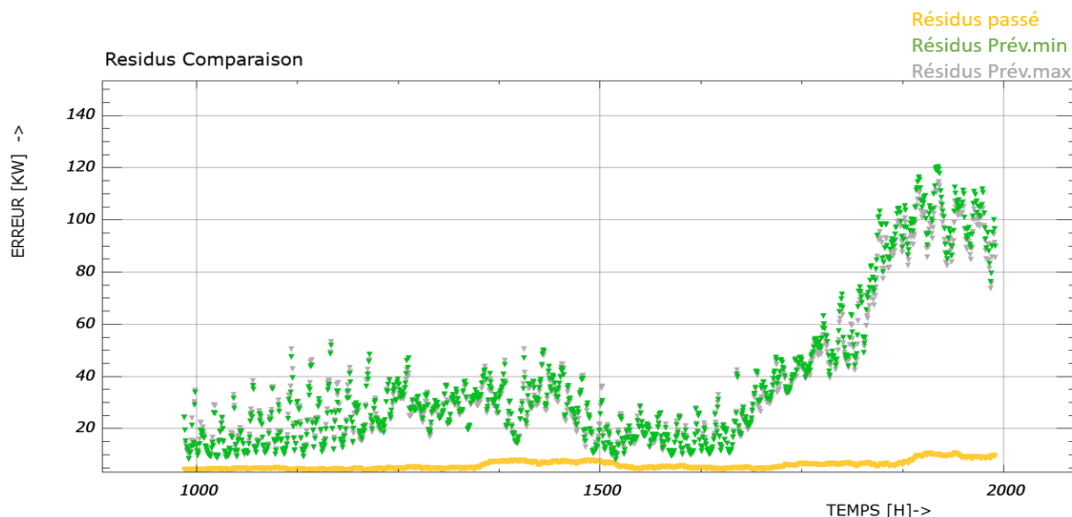


Figure 46: Résidus du modèle de prévision de la demande « prévision météo sans réalité »,  $h_{Futur}=168$  et  $h_{Passé}=192$

On voit que pour la corrélation, les valeurs sont beaucoup plus basses que pour le modèle antérieur. Pour les résidus, les valeurs sont plus hautes. Le modèle de la prévision passée qui utilise les prévisions météo fonctionne. Cependant, en appliquant la matrice coefficient sur le futur, l'ajustement ne se fait pas correctement, ce qui a pour conséquence une prévision future qui n'est pas réaliste. Pour comparaison, la figure ci-dessous représente la prévision pour la même  $h_{Actuel} = 1526$ .

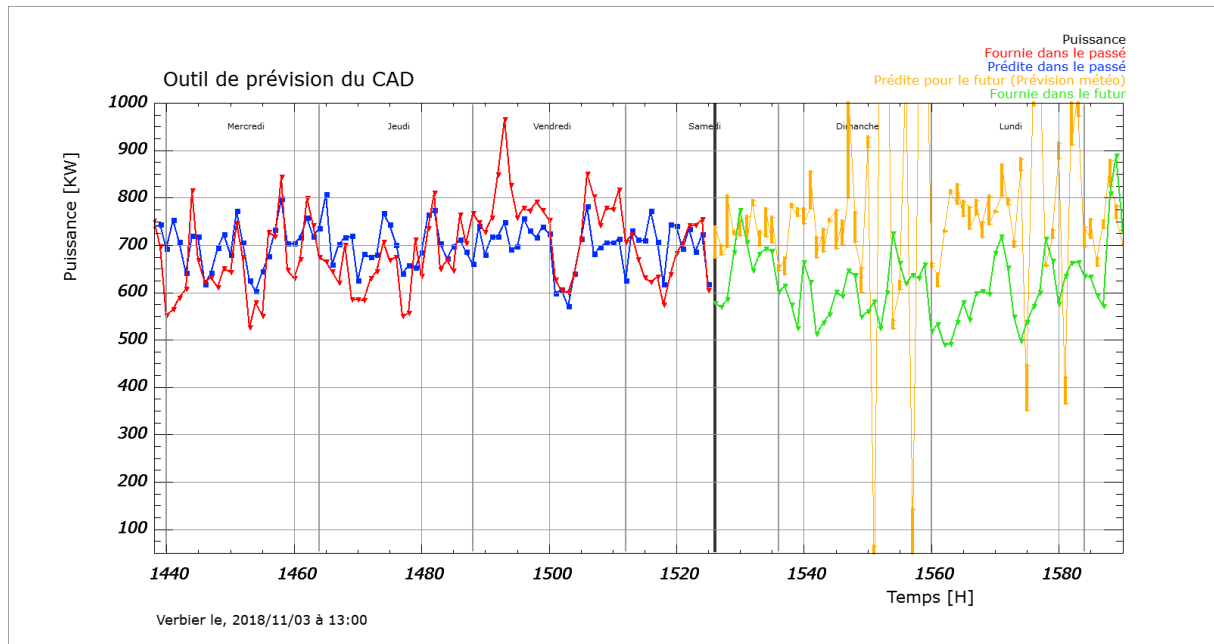


Figure 47 : Résultat  $h_{\text{Actuel}}=1526$

**Raisons** Il est vrai que la prévision dans le passé se calcule assez bien, mais en analysant la valeur des coefficients, on voit que l'ajustement crée des coefficients qui varient beaucoup chaque heure. C'est pour cela que la prévision n'est pas cohérente. La figure suivante représente le coefficient n°15. C'est un coefficient qui varie beaucoup au fil du temps et ce n'est pas le seul. En comparant ce coefficient aux coefficients calculés en annexes 9.9 et 9.16, les variations entre chaque heure sont moins grandes, les modèles sont donc plus stables.

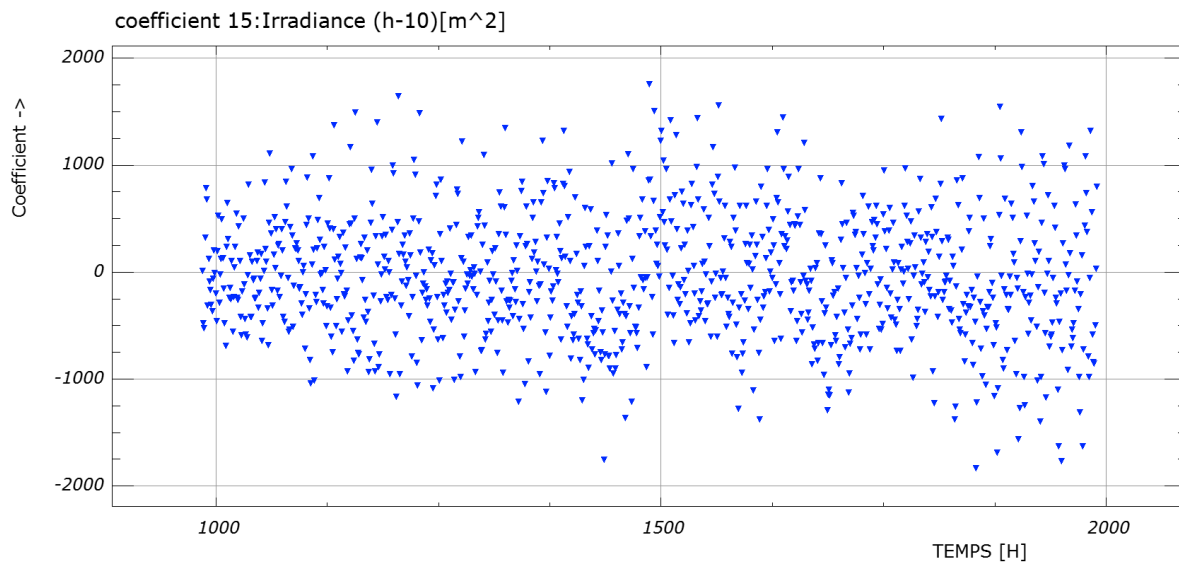


Figure 48: Coefficient N°15, Rayonnement (h-10) pour le modèle de prévision "prévision météo sans réalité "



## 2.18 Analyse de la prévision « prévision météo sans réalité »

Ce modèle<sup>10</sup> ne donne pas de résultats satisfaisants. Il est possible que l'ajustement ait besoin de données réelles pour le passé. Dans les simulations précédentes, la prévision de la puissance future suivait parfois exactement certains des pics de puissance réelle, ce qui montre que les conditions climatiques et météorologiques réelles influencent directement la demande thermique. Il est possible qu'en remplaçant cette réalité par la prévision, le modèle doive trop évoluer chaque heure pour se rapprocher de la puissance réellement fournie dans le passé.

## 2.19 Choix du modèle

Les pages précédentes présentent les quatre différents modèles créés pour prédire la demande en puissance du CAD. Les deux premiers modèles ont surtout servi à dimensionner les matrices pour valider la méthode de calcul de la prévision. Les deux derniers modèles ont permis de rendre la prévision de la demande réaliste par rapport aux données météorologiques utilisables liées à l'échelle du temps. Le dernier modèle devait améliorer le résultat de la prévision. Pour les raisons expliquées ci-dessus, le modèle ne fonctionne pas. C'est pour cela que le choix final du modèle de prévision se porte sur le troisième modèle, « prévision météo ». Cependant, des améliorations peuvent être encore être apportées.

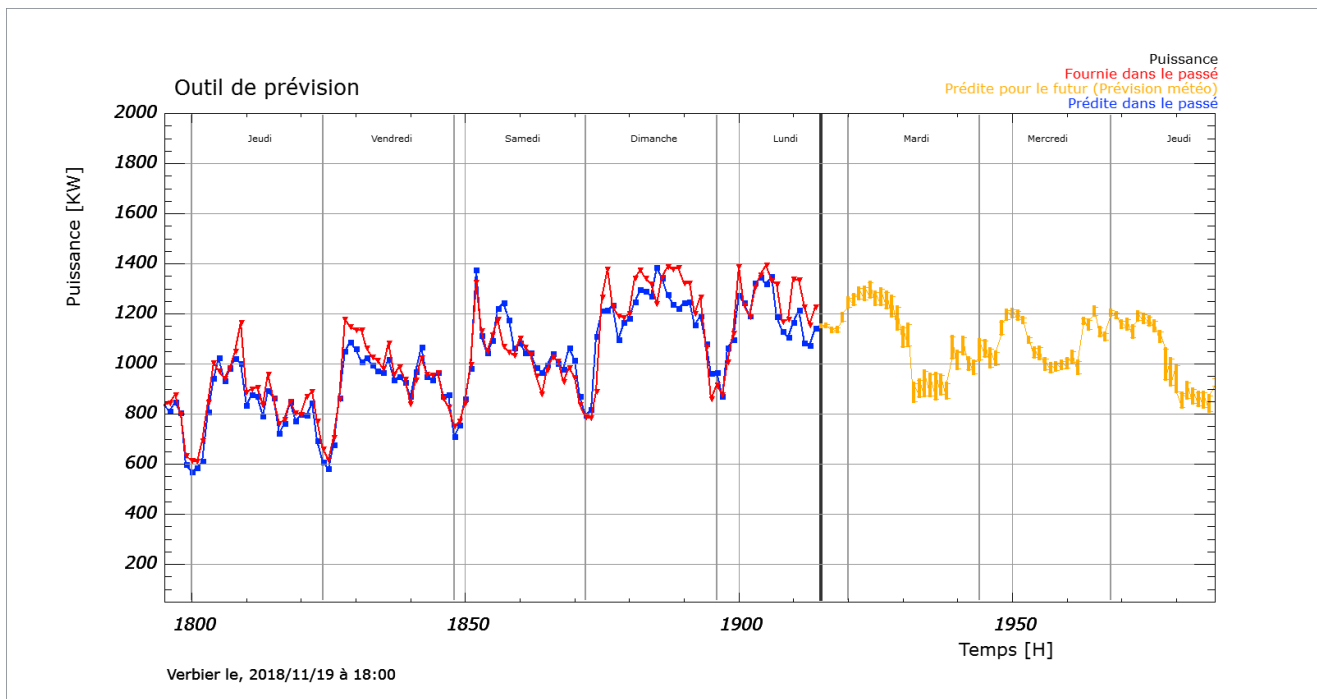


Figure 49: Graphique de la prévision

Le graphique ci-dessus représente la prévision de la demande tel qu'elle devrait être dans la réalité, car dans la réalité, la puissance réelle future n'est pas connue.

<sup>10</sup> Possibilité de visualiser l'ensemble des résultats de ce modèle dans la clé USB sous « prévision météo sans réalité »



### 3 Gestion des chaudières

**But** La prévision de la demande étant réalisée, l'étape suivante consiste à répartir cette puissance sur les chaudières actuelles. Pour rappel, le paragraphe 1.2 décrit le nombre et le type de chaudières fonctionnant sur le réseau. L'objectif principal est de répartir la puissance de manière à utiliser le plus possible les chaudières à pellets.

**Chaudières** Pour les chaudières des Trois Rocs, les courbes de rendements sont inexistantes. On connaît la puissance nominale de ces dernières et la marque de la chaudière « Müller ». Le type de chaque chaudière est aussi connu : « TMV17HT », « TMV15HT » et « TMV 17 ». Cependant, il est impossible d'avoir davantage d'informations car la société « Müller » a fait faillite. Les seules informations concernant les chaudières à pellets sont les plaquettes signalétiques qui se trouvent en annexe 9.17.

Concernant Mondzeu, il y a deux chaudières à mazout de modèles différents. Il est possible d'avoir la courbe de rendement du « Pyronox LRR-GF 47 » en fonction de la température des fumées. La courbe de rendement n'existe pas pour le modèle « Weishaupt WM-L20/3\_A T-3LN ».

Les informations concernant le rendement des chaudières étant rares, il a été choisi que pour toutes les chaudières, les points de fonctionnement idéaux se situent entre 50% et 90% de la puissance nominale.

**Critères** Pour arriver à cet objectif, plusieurs critères sont à prendre en compte. Tout d'abord, la puissance répartie dans les chaudières doit être égale à la puissance prédite. Puis, les chaudières doivent fonctionner dans la plage de puissance idéale (50%-90%). Ensuite, les chaudières des Trois Rocs vont être privilégiées aux dépends de Mondzeu. Pour finir, le but est de faire fonctionner toujours la même chaudière et éviter d'en allumer et d'en éteindre toutes les heures. Actuellement, pour allumer une chaudière à mazout et la faire fonctionner, il suffit d'une heure. Pour les pellets, il faut entre trois et quatre heures pour qu'elle arrive à pleine puissance et tout autant, voir plus pour l'éteindre.

#### 3.1 La méthode de résolution

**La méthode** L'optimisation du fonctionnement des chaudières va être résolue à l'aide d'une fonction objectif. Cette fonction a pour but de minimiser le coût global du fonctionnement des chaudières en prenant en compte les coûts individuels :

$$\text{Coût}_{\text{Total}} = P_1 \cdot \text{Coût}_1 + P_2 \cdot \text{Coût}_2 + P_3 \cdot \text{Coût}_3 + P_4 \cdot \text{Coût}_4$$

*Équation 20: Fonction objectif*

- Coût 1 : La puissance chaudières est égale à la puissance prédite.
- Coût 2 : La plage de fonctionnement des chaudières se situe entre 50% et 90% de la puissance nominale.
- Coût 3 : Les chaudières des Trois Rocs sont privilégiées.
- Coût 4 : Eviter l'enclenchement et le déclenchement horaire.

La fonction objectif est donc la somme de chaque coût individuel auxquels une pondération est appliquée. Le point commun de ces 4 coûts est la puissance.

### 3.2 Le détail de chaque coût

Dans cette fonction, on parle de coût, mais il n'y a pas de lien direct avec des coûts financiers liés à l'exploitation des chaudières. Même si ces coûts ne sont pas concrets, ils vont permettre d'arriver à l'objectif souhaité.

#### Coût 1

La prévision de la demande est créée. Cette puissance va en premier lieu être répartie dans les différentes chaudières. La somme de la répartition doit être au plus proche de la puissance prédite. La valeur absolue de la différence entre la prévision et la répartition représente le premier coût.

$$\text{Coût}_1 = |\Delta P| \text{ [kW]}$$

*Équation 21: Coût 1*

La différence augmente de manière linéaire. Pour ce coût, le but est donc d'arriver à une différence de puissances la plus petite possible.

#### Coût 2

Ce coût sert à faire fonctionner les chaudières dans la plage de puissance souhaitée. Si la chaudière ne se trouve pas dans ces puissances de fonctionnement, le coût 2 intervient.

$$\text{Coût}_2 = \text{Puissance [kW]}$$

*Équation 22: Coût 2*

Le coût 2 correspond à la puissance répartie dans les chaudières qui se trouve en dehors des 50% et 90 % de la puissance nominale de chaque chaudière. Dans ce cas, la fonction a pour objectif de proposer une puissance se trouvant donc dans ces bornes.

#### Coût 3

Ce coût a pour but de privilégier le fonctionnement des chaudières des Trois Rocs. Le coût se calcule ainsi : si la répartition se trouve sur les chaudières de Mondzeu, le coût correspond à la puissance répartie sur Mondzeu. Dans le cas où elle est répartie sur les Trois Rocs, le coût devient un bénéfice. Ce bénéfice correspond à la puissance répartie sur les Trois Rocs.

$$\text{Coût}_3 = \text{Puissance}_{\text{Mondzeu}} \text{ [kW]}$$

$$\text{Coût}_3 = -\text{Puissance}_{\text{Trois Rocs}} \text{ [kW]}$$

*Équation 23: Coût 3*

Toutefois, si la puissance prédite est plus grande que 2880 [kW], il est possible d'utiliser Mondzeu. Dans ce cas, le coût devient aussi un bénéfice. Cette puissance correspond à la puissance maximale que les trois chaudières des Trois Rocs peuvent atteindre.

## Coût 4

Ce dernier coût a pour but d'éviter d'allumer ou d'étendre les chaudières d'heure en heure. L'idée est de prendre en compte l'état passé et l'état futur des chaudières d'heure en heure. Si dans le passé ou futur les chaudières sont éteintes ou allumées et que la fonction propose d'allumer ou d'éteindre la chaudière, le coût sera fonction de la puissance prévue.

$$\text{Coût}_4 = \text{Puissance [kW]}$$

Équation 24: Coût 4

**Pondération** Les coûts individuels sont tous fonction de la puissance de manière linéaire, c'est-à-dire qu'ils ont tous le même poids. Pour différencier les coûts, des pondérations sont ajoutées. La valeur des pondérations va être expliquée dans le paragraphe 3.4.

### 3.3 La stratégie de résolution

**AG** Pour résoudre ce problème et donc minimiser la fonction de coût décrite ci-dessus, un algorithme génétique<sup>11</sup> ou AG va être utilisé. Un AG est une méthode d'optimisation qui permet de résoudre des problèmes complexes. Cet algorithme se base sur la théorie de la sélection naturelle et génétique de Darwin selon laquelle l'être le mieux adapté à son environnement survit. L'algorithme génétique permet de considérer plusieurs critères ou coûts qui peuvent aussi être contradictoires.

**La théorie de l'évolution** L'algorithme génétique a donc pour but de trouver la population la mieux adaptée à la fonction de coût. Pour commencer, une population initiale est choisie arbitrairement. Cette population est évaluée par rapport à sa performance. Sur cette base de performance, une nouvelle population est créée à partir d'une sélection, d'un croisement ou d'une mutation. Puis la boucle recommence jusqu'à ce que l'objectif soit atteint ou, dans le cas présent, jusqu'à ce que le coût total soit le plus petit possible.

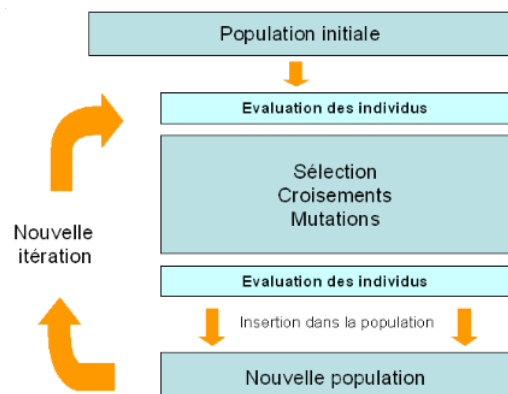


Figure 50: Schéma de principe d'un AG.

Source : developpez.com

L'évolution se fait donc par la sélection, le croisement et la mutation. La sélection détermine la survie de chaque individu au sein de la population. L'individu peut survivre ou mourir en fonction de son adaptabilité à l'environnement. Le croisement permet d'échanger les informations entre les meilleurs individus de manière à se reproduire. Pour finir, la mutation a pour but de créer des changements aléatoires afin de balayer le plus possible l'espace de recherche, par exemple, pour permettre à l'algorithme de ne pas se figer à un seul point où il pense avoir trouvé le minimum. C'est donc grâce à ce type d'algorithme que la fonction de coût et donc la gestion des chaudières va être résolue.

<sup>11</sup> Developpez, *developpez.com* [en ligne].

<https://khayyam.developpez.com/articles/algo/genetic/> (Consulté le 16 Juillet 2019)

Population  
de  
départ

Pour pouvoir démarrer l'algorithme génétique, il est nécessaire d'avoir une population de départ sur laquelle l'AG va se baser. Cette population est créée en fonction des valeurs que chaque chromosome admet. Un chromosome correspond à la puissance d'une chaudière pour une heure. Cela implique que pour chaque heure, il y a 5 chromosomes pour les 5 chaudières actives sur le réseau.

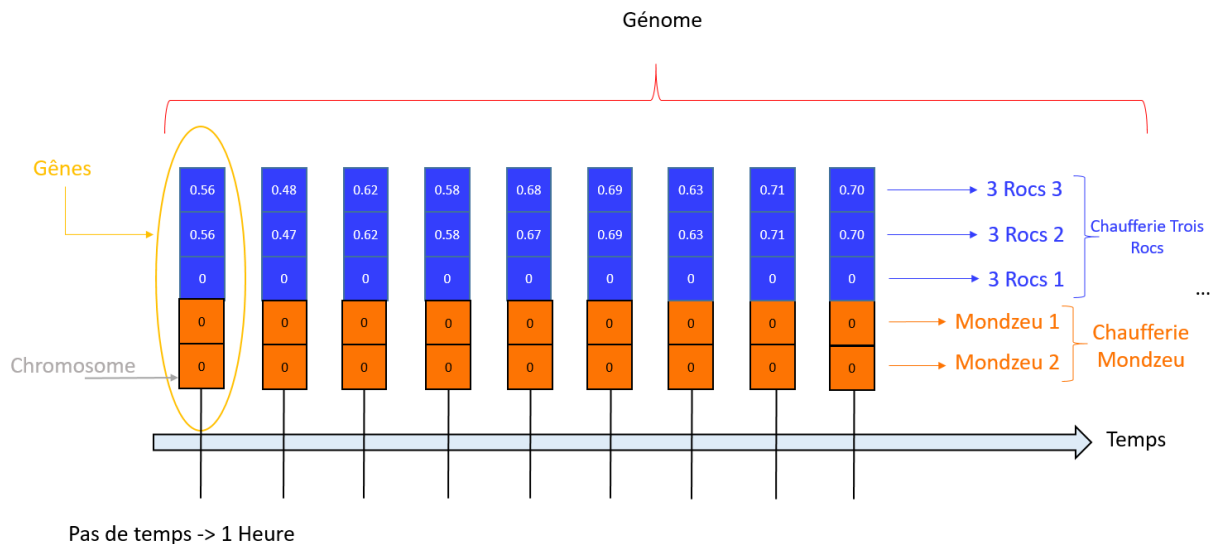


Figure 51: Exemple d'une représentation d'un individu d'une population

Génome  
Gène  
Chromosome

Les gènes du système correspondent à la puissance totale fournie par l'ensemble des chaudières pour chaque heure. Pour chaque chromosome, la valeur est comprise entre 0.00 et 1.00. Cette valeur correspond au pourcentage de la puissance nominale de chaque chaudière, c'est-à-dire que pour le premier chromosome de la troisième chaufferie des Trois Rocs, la puissance est égale à  $P = 0.56 \cdot 1200 = 672 [kW]$ .

Le calcul est identique à la différence de la valeur de la puissance nominale pour les autres chromosomes. Le génome représente l'ensemble des gènes. La longueur du génome correspond au nombre d'heures de gestion souhaitée. Si la prévision de la demande repose sur 168 heures, le génome peut être composé de 168 gènes.

L'outil  
informatique

Pour résoudre cette fonction, Excel est utilisé. Excel a dans ses outils un complément solveur qui implémente une résolution évolutionnaire. En utilisant ce logiciel, l'idée est de réaliser des essais pour tester le poids des pondérations de manière à valider la fonction de coût. Au vu de nombre de chromosomes et du nombre de contraintes, les essais vont se dérouler avec un génome composé de 12 gènes. Même si le nombre de gènes n'est pas idéal pour gérer les chaudières sur le long terme, il permet néanmoins de valider cette fonction de coût.

### 3.4 Résultats

**Population de départ** Comme décrit précédemment, les chromosomes doivent avoir une population de départ. De manière à avoir toujours une même population de départ et pour que l'AG soit le plus libre possible chaque chromosome a 0.00 comme valeur. La puissance totale pour chaque gène est donc de 0 [kW]. L'algorithme va, en réalisant les sélections, les croisements et les mutations, calculer la répartition de la puissance en minimisant les coûts.

**Pondération** Pour trouver la bonne pondération pour chaque coût, plusieurs essais ont été réalisés, de manière à obtenir des résultats concluants.

| Pondérations                      |     |
|-----------------------------------|-----|
| Pondération Coût 1                | 10  |
| Pondération Coût 2                | 100 |
| Pondération Coût 3 (Mondzeu)      | 10  |
| Pondération Coût 3 (Trois Rocs 1) | 5   |
| Pondération Coût 3 (Trois Rocs 2) | 1   |
| Pondération Coût 3 (Trois Rocs 3) | 1   |
| Pondération Coût 4                | 1   |

Tableau 6: Résultats des pondérations

Le Tableau 6 représente la valeur des pondérations. Pour le coût 3, il y a quatre pondérations différentes. Les pondérations des chaudières des Trois Rocs sont positives mais avec un coût négatif. Ces pondérations avec le coût négatif ont pour but de créer pour la fonction objectif un bénéfice en utilisant les chaudières à pellets. Ce bénéfice sera donc plus grand si la première chaufferie des Trois Rocs [0.8 MW] est d'abord utilisée. L'idée est de répartir la puissance en premier lieu dans cette chaudière, ensuite dans les deux autres chaudières à pellets qui ont la même puissance [1.2 MW] et pour finir à Mondzeu. Le coût 2 a la plus grande pondération. On ne souhaite vraiment pas utiliser une chaudière en dehors de la plage de puissance de 50% à 90 %. Altis évite de le faire car en dehors de cette plage de puissance, les rendements des chaudières ne sont pas idéaux. Il est néanmoins important que la puissance répartie soit au plus proche de la puissance prédite. Le coût 4 n'a pas de pondération car son coût suffit à éviter d'allumer et d'éteindre les chaudières. En implémentant cette fonction de coût avec ces pondérations, les résultats sont cohérents.

**Gestion** La gestion se présente sous cette forme. La population est mise à zéro grâce au bouton 1. La case rouge représente la somme de la fonction de coût dont l'objectif est de minimiser la valeur. Les cases en vert représentent la prévision de la puissance. Pour les essais, les valeurs réelles de la puissance ont été implémentées. Pour lancer l'AG, il suffit de remplir les cases vertes et d'appuyer sur le bouton 2.

</

1  
Mise à zéro  
Population de départ

2  
Gestion des chaudières

Figure 52: Gestion des chaudières, population de départ

Les essais vont se dérouler sur différentes plages de puissances. Tout d'abord, des puissances faibles sont intégrées. Ce sont les puissances qui se trouvent au mois de septembre. Elles varient de 250 à 320 [kW] sur les 12 heures.

|        |          | coût total          |                 |                  |                       |                       |                       |                             |
|--------|----------|---------------------|-----------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------|
|        |          | -9023.5             |                 |                  |                       |                       |                       |                             |
|        | Heures   | Prévision puissance | Mondzeu1 [1 MW] | Mondzeu 2 [1 MW] | Trois Rocs 1 [0.8 MW] | Trois Rocs 2 [1.2 MW] | Trois Rocs 3 [1.2 MW] | Puissance totale chaudières |
| Génome | Gènes 1  | 358.66              | ✗ 0.00          | ✗ 0.00           | ● 0.50                | ✗ 0.00                | ✗ 0.00                | 400.00                      |
|        | Gènes 2  | 319.13              | ✗ 0.00          | ✗ 0.00           | ● 0.50                | ✗ 0.00                | ✗ 0.00                | 400.00                      |
|        | Gènes 3  | 263.33              | ✗ 0.00          | ✗ 0.00           | ● 0.50                | ✗ 0.00                | ✗ 0.00                | 400.00                      |
|        | Gènes 4  | 294.81              | ✗ 0.00          | ✗ 0.00           | ● 0.56                | ✗ 0.00                | ✗ 0.00                | 448.00                      |
|        | Gènes 5  | 245.28              | ✗ 0.00          | ✗ 0.00           | ● 0.50                | ✗ 0.00                | ✗ 0.00                | 400.00                      |
|        | Gènes 6  | 233.20              | ✗ 0.00          | ✗ 0.00           | ● 0.53                | ✗ 0.00                | ✗ 0.00                | 424.00                      |
|        | Gènes 7  | 290.13              | ✗ 0.00          | ✗ 0.00           | ● 0.52                | ✗ 0.00                | ✗ 0.00                | 416.00                      |
|        | Gènes 8  | 247.80              | ✗ 0.00          | ✗ 0.00           | ● 0.51                | ✗ 0.00                | ✗ 0.00                | 408.00                      |
|        | Gènes 9  | 304.54              | ✗ 0.00          | ✗ 0.00           | ● 0.50                | ✗ 0.00                | ✗ 0.00                | 400.00                      |
|        | Gènes 10 | 264.20              | ✗ 0.00          | ✗ 0.00           | ● 0.50                | ✗ 0.00                | ✗ 0.00                | 400.00                      |
|        | Gènes 11 | 259.83              | ✗ 0.00          | ✗ 0.00           | ● 0.50                | ✗ 0.00                | ✗ 0.00                | 400.00                      |
|        | Gènes 12 | 269.44              | ✗ 0.00          | ✗ 0.00           | ● 0.50                | ✗ 0.00                | ✗ 0.00                | 400.00                      |

1  
Mise à zéro  
Population de départ

2  
Gestion des chaudières

Figure 53: Gestion chaudières avec faibles puissances

On voit que l'AG propose d'allumer la plus petite des chaudières à pellets mais avec des plages de puissances pas plus hautes que 50%. Cette manière est somme toute assez normale car la pondération est plus élevée pour la plage de puissance que pour la différence entre la puissance prédite et la puissance répartie. Dans ce cas, il faut voir l'intérêt qu'a le gestionnaire entre produire plus de chaleur ou utiliser les chaudières à des points de fonctionnement plus bas.

Les puissances intégrées dans l'exemple ci-dessous sont moyennes. Elles varient entre 950 et 1330 [kW].

|        |          | coût total          |                 |                  |                       |                       |                       |                             |
|--------|----------|---------------------|-----------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------|
|        |          | -34563.0            |                 |                  |                       |                       |                       |                             |
|        | Heures   | Prévision puissance | Mondzeu1 [1 MW] | Mondzeu 2 [1 MW] | Trois Rocs 1 [0.8 MW] | Trois Rocs 2 [1.2 MW] | Trois Rocs 3 [1.2 MW] | Puissance totale chaudières |
| Génome | Gènes 1  | 1326.20             | ✗ 0.00          | ✗ 0.00           | ● 0.85                | ● 0.58                | ✗ 0.00                | 1376.00                     |
|        | Gènes 2  | 1131.30             | ✗ 0.00          | ✗ 0.00           | ● 0.62                | ● 0.53                | ✗ 0.00                | 1132.00                     |
|        | Gènes 3  | 1048.80             | ✗ 0.00          | ✗ 0.00           | ● 0.53                | ● 0.52                | ✗ 0.00                | 1048.00                     |
|        | Gènes 4  | 1114.00             | ✗ 0.00          | ✗ 0.00           | ● 0.63                | ● 0.51                | ✗ 0.00                | 1116.00                     |
|        | Gènes 5  | 1177.50             | ✗ 0.00          | ✗ 0.00           | ● 0.72                | ● 0.50                | ✗ 0.00                | 1176.00                     |
|        | Gènes 6  | 1070.40             | ✗ 0.00          | ✗ 0.00           | ● 0.57                | ● 0.51                | ✗ 0.00                | 1068.00                     |
|        | Gènes 7  | 1047.00             | ✗ 0.00          | ✗ 0.00           | ● 0.52                | ● 0.53                | ✗ 0.00                | 1052.00                     |
|        | Gènes 8  | 1034.50             | ✗ 0.00          | ✗ 0.00           | ● 0.52                | ● 0.52                | ✗ 0.00                | 1040.00                     |
|        | Gènes 9  | 1102.40             | ✗ 0.00          | ✗ 0.00           | ● 0.53                | ● 0.57                | ✗ 0.00                | 1108.00                     |
|        | Gènes 10 | 1065.50             | ✗ 0.00          | ✗ 0.00           | ● 0.57                | ● 0.51                | ✗ 0.00                | 1068.00                     |
|        | Gènes 11 | 1037.90             | ✗ 0.00          | ✗ 0.00           | ● 0.52                | ● 0.52                | ✗ 0.00                | 1040.00                     |
|        | Gènes 12 | 950.20              | ✗ 0.00          | ✗ 0.00           | ● 0.51                | ● 0.50                | ✗ 0.00                | 1008.00                     |

1  
Mise à zéro  
Population de départ

2  
Gestion des chaudières

Figure 54: Gestion chaudières avec moyennes puissances

Dans ce cas, la plus petite chaudière à pellets ne suffit plus et l'AG propose d'avoir deux chaudières en fonction. Si seulement la chaudière des Trois Rocs 2 était allumée, elle ne suffirait pas pour toutes les heures car la puissance dépasse par endroits les 90% de la puissance nominale. Il est intéressant de constater qu'entre chaque heure, les variations de puissance sont faibles.



Les données de puissances ne vont pas plus haut. Pour les prochains résultats, les puissances prédites seront rentrées manuellement en augmentant petit à petit la prévision de la puissance.

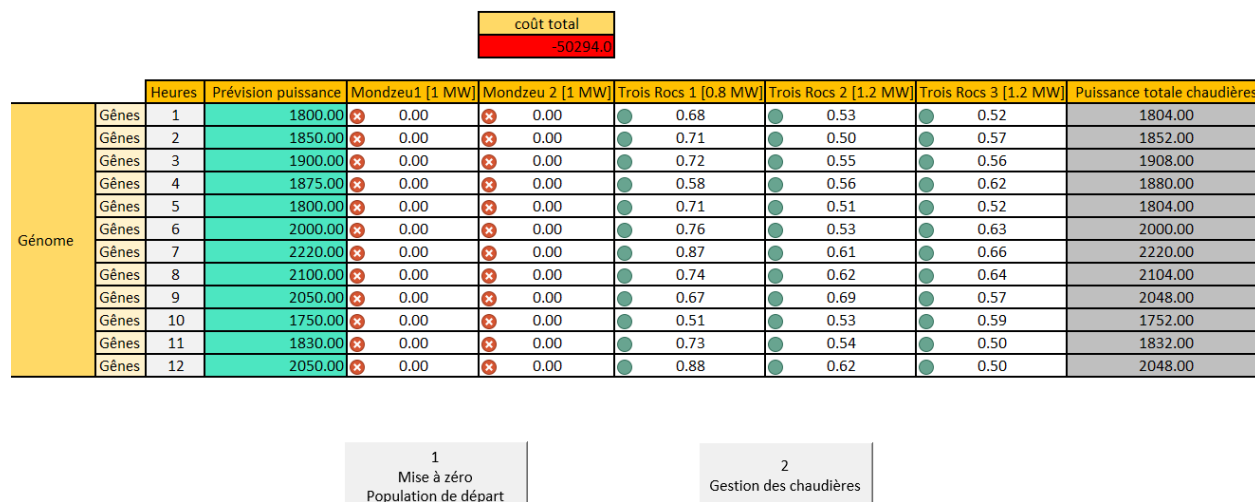


Figure 55: Gestion chaudière puissances élevées

Dans ce cas, les puissances varient entre 1750 et 2220 [kW]. L'AG propose d'allumer trois chaudières. Les puissances prédites sont parfois plus hautes que 2160 [kW]. Cette valeur correspond à la somme des 90 % de la puissance nominale des chaudières Trois Rocs 2 et 3.

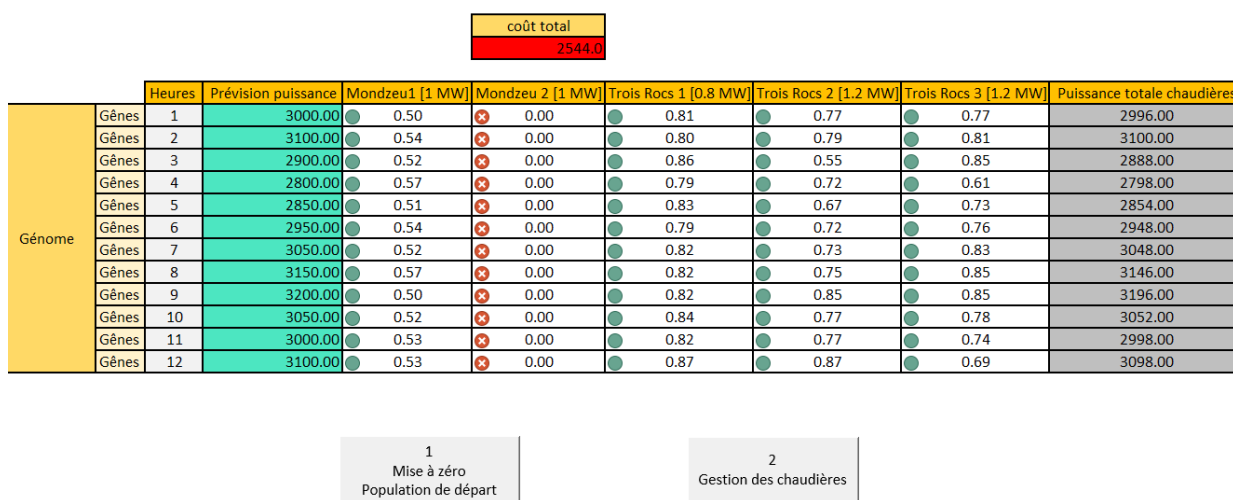


Figure 56: Gestion chaudières puissances élevées, puissances critiques

Pour ce résultat, les puissances prédites sont plus hautes que précédemment. L'AG propose d'allumer Mondzeu 1 car les chaudières à pellets ne suffisent pas à fournir la demande. Même si la pondération est plus élevée pour Mondzeu, l'objectif principal reste de fournir la demande. La puissance maximale que peuvent fournir les trois chaudières à pellets à 90% est de 2880 [kW]. Pour cette gestion, la puissance prédite est parfois inférieure à 2880 [kW], mais l'AG préfère employer toutes les chaudières et ainsi éviter de les éteindre puis les rallumer.

En plein hiver, la demande maximale peut atteindre 3.6 [MW]. Le résultat ci-dessous montre la répartition avec des puissances maximales. On voit que l'AG propose d'allumer toutes les chaudières. Pour les deux chaudières de Mondzeu, la puissance répartie est basse. Il serait peut-être plus judicieux de ne la répartir que sur une seule chaudière. La plage de fonctionnement des chaudières est identique pour Mondzeu que pour les Trois Rocs. Il est possible que pour les chaudières à mazouts, les rendements soient meilleurs à plus haute puissance. Dans ce cas, le choix entre deux chaudières à mazouts fonctionnant à moyenne puissance ou une seule fonctionnant à pleine puissance dépendra des intérêts du gestionnaire.

|        |          |        |                     |                             |                             |                             |                             |                             |                             | coût total |  |
|--------|----------|--------|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------|--|
|        |          |        |                     |                             |                             |                             |                             |                             |                             | 69028.0    |  |
|        |          | Heures | Prévision puissance | Mondzeu1 [1 MW]             | Mondzeu 2 [1 MW]            | Trois Rocs 1 [0.8 MW]       | Trois Rocs 2 [1.2 MW]       | Trois Rocs 3 [1.2 MW]       | Puissance totale chaudières |            |  |
| Génome | Gènes 1  | 1      | 3400.00             | <div><div></div></div> 0.53 | <div><div></div></div> 0.51 | <div><div></div></div> 0.79 | <div><div></div></div> 0.83 | <div><div></div></div> 0.61 | 3400.00                     |            |  |
|        | Gènes 2  | 2      | 3450.00             | <div><div></div></div> 0.54 | <div><div></div></div> 0.50 | <div><div></div></div> 0.84 | <div><div></div></div> 0.77 | <div><div></div></div> 0.68 | 3452.00                     |            |  |
|        | Gènes 3  | 3      | 3500.00             | <div><div></div></div> 0.55 | <div><div></div></div> 0.52 | <div><div></div></div> 0.84 | <div><div></div></div> 0.78 | <div><div></div></div> 0.69 | 3506.00                     |            |  |
|        | Gènes 4  | 4      | 3200.00             | <div><div></div></div> 0.51 | <div><div></div></div> 0.50 | <div><div></div></div> 0.64 | <div><div></div></div> 0.80 | <div><div></div></div> 0.60 | 3202.00                     |            |  |
|        | Gènes 5  | 5      | 3250.00             | <div><div></div></div> 0.51 | <div><div></div></div> 0.57 | <div><div></div></div> 0.74 | <div><div></div></div> 0.62 | <div><div></div></div> 0.70 | 3256.00                     |            |  |
|        | Gènes 6  | 6      | 3300.00             | <div><div></div></div> 0.55 | <div><div></div></div> 0.55 | <div><div></div></div> 0.75 | <div><div></div></div> 0.62 | <div><div></div></div> 0.71 | 3296.00                     |            |  |
|        | Gènes 7  | 7      | 3350.00             | <div><div></div></div> 0.50 | <div><div></div></div> 0.51 | <div><div></div></div> 0.85 | <div><div></div></div> 0.70 | <div><div></div></div> 0.67 | 3334.00                     |            |  |
|        | Gènes 8  | 8      | 3400.00             | <div><div></div></div> 0.54 | <div><div></div></div> 0.56 | <div><div></div></div> 0.76 | <div><div></div></div> 0.82 | <div><div></div></div> 0.59 | 3400.00                     |            |  |
|        | Gènes 9  | 9      | 3500.00             | <div><div></div></div> 0.52 | <div><div></div></div> 0.57 | <div><div></div></div> 0.85 | <div><div></div></div> 0.72 | <div><div></div></div> 0.72 | 3498.00                     |            |  |
|        | Gènes 10 | 10     | 3550.00             | <div><div></div></div> 0.53 | <div><div></div></div> 0.52 | <div><div></div></div> 0.90 | <div><div></div></div> 0.81 | <div><div></div></div> 0.67 | 3546.00                     |            |  |
|        | Gènes 11 | 11     | 3600.00             | <div><div></div></div> 0.53 | <div><div></div></div> 0.56 | <div><div></div></div> 0.89 | <div><div></div></div> 0.90 | <div><div></div></div> 0.60 | 3602.00                     |            |  |
|        | Gènes 12 | 12     | 3550.00             | <div><div></div></div> 0.57 | <div><div></div></div> 0.54 | <div><div></div></div> 0.87 | <div><div></div></div> 0.78 | <div><div></div></div> 0.67 | 3546.00                     |            |  |



Figure 57: Gestion chaudières, puissances maximales (1)

Tous ces cas de figure<sup>12</sup> vont bien évidemment évoluer avec la mise en fonction des chaudières du centre sportif et avec l'augmentation du nombre de raccordements.

**Analyse** Il est difficile d'analyser ces résultats. La principale raison réside dans le fait que les données fournies ne présentent pas la répartition de la puissance de chaque chaudière. Il n'y a donc pas de point de comparaison entre la gestion des chaudières présentée et la réalité. L'AG a été développé selon les différentes discussions avec Altis. On voit qu'il y a encore quelques zones d'ombre qui doivent encore être éclaircies. L'outil de gestion doit encore être testé par le mandant pour être validé. Cependant, on voit que les critères de la fonction de coût sont respectés. Les chaudières à pellets sont utilisées le plus souvent possible à la plage de puissance souhaitée tout en évitant de les éteindre et de les allumer.

<sup>12</sup> Possibilité de tester la gestion des chaudières se référer à l'annexe 9.18

## 4 Améliorations

### 4.1 Prévision de la demande

Le modèle de prévision doit encore être testé et approuvé par Altis. La structure du code pour la récupération des données de prévision météo est déjà réalisée. Il manque encore une structure de code pour récupérer les informations du CAD de Verbier pour chaque heure. Pour créer ce code, il est nécessaire d'avoir une structure de données. Cette structure de données peut permettre d'améliorer la prévision de la demande.

Pour la plupart des sous-stations, Altis connaît la répartition des besoins (chauffage, ECS, rampes et piscines). Avec ces informations pour chaque heure dans le passé, le modèle de prévision pourrait être affiné et donner des puissances plus cohérentes.

La structure serait répartie en trois pages de données qui seraient accessible à distance par exemple en format html, les pages seraient liées entre elles-mêmes par des adresses.

Amélioration  
primordiale

La première page serait un listing de toutes les chaudières et les sous-stations qui constituent le CAD. La répartition des besoins et la puissance nominale seraient décrites. Cette page n'évoluerait que si l'on ajoute des chaudières et des sous-stations au réseau. Les adresses des chaudières quant à elles seraient liées à la deuxième page. Cette page indiquerait l'indisponibilité des chaudières en temps et en heure par exemple pour cause de maintenance. Pour finir, la troisième page décrit pour chaque heure, la puissance et la température aller-retour minimale, maximale et la moyenne sur l'heure pour les chaudières et pour chaque sous-station. Le fichier serait journalier et compterait 24 lignes fois le nombre de chaudières et de sous-stations en service.

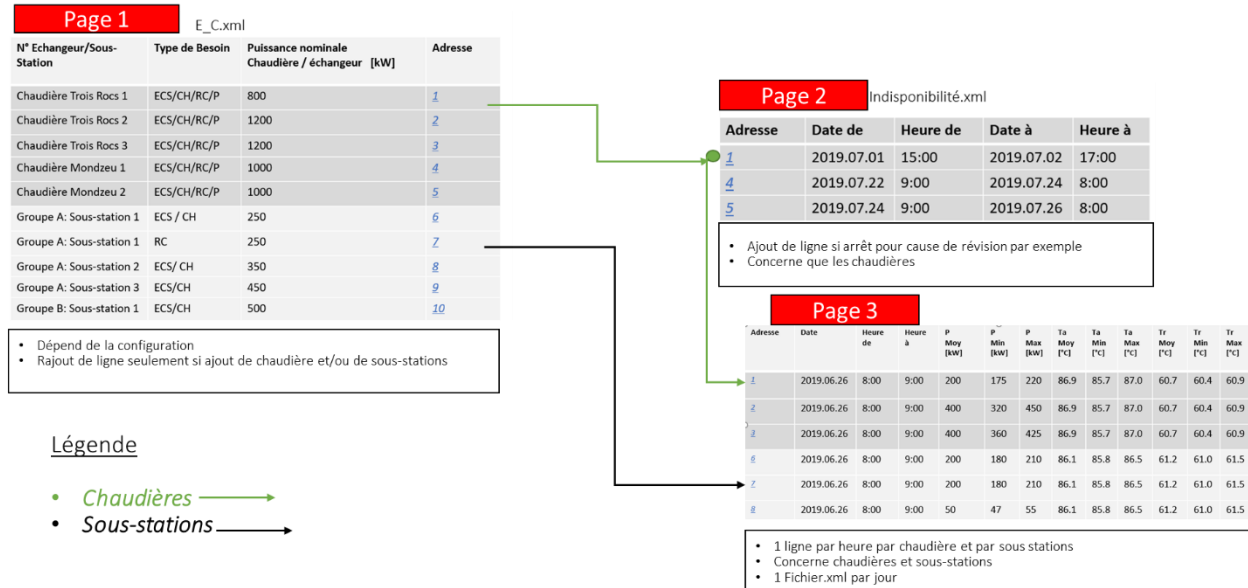


Figure 58: Vue d'ensemble de la structure de données souhaitées

L'annexe 9.19 présente chaque page de manière plus détaillée. Il est clair que quand ces données seront accessibles, des essais concernant la prévision devront être réalisés, mais en connaissant la répartition de la puissance, le modèle proposera une prévision plus précise.

Concernant les prévisions météorologiques et la météo réelle de la température, du rayonnement des précipitations doivent, si possible, provenir d'une seule et même source pour ainsi éviter les décalages de mesures qui engendrent des erreurs sur le modèle de prévision de la demande.

Améliorations  
secondaires

Connaître la surface de référence énergétique pour chaque bâtiment raccordé permettrait de connaître la répartition de la puissance de chauffage. Si pour chaque heure le taux d'occupation du CAD de Verbier est connu, le modèle serait beaucoup plus précis pour la puissance en ECS. Il en serait de même si l'outil de prévision de la demande avait connaissance de l'état de fonctionnement des piscines communales.

#### 4.2 Gestion des chaudières

Pour la gestion des chaudières, l'outil doit encore être validé. Cependant, il est possible de l'améliorer. Tout d'abord, le nombre d'heures de gestion est insuffisant. L'idéal serait que la gestion des chaudières se fasse sur le même nombre d'heures que la prévision de la demande. La prévision de la demande peut aller au maximum à 168 heures. Ce nombre d'heures serait parfait pour la gestion des chaudières en vue de l'anticipation. Pour réaliser cette gestion optimale, il faudrait la réaliser sur Qt. Cela permettrait de lier directement la prévision de la demande et la gestion des chaudières. La seconde amélioration pourrait se faire avec des mesures réalisées sur site pour calculer le rendement de chaque chaudière. Avec des courbes de rendement, l'outil de gestion pourrait être affiné et donc proposer des résultats plus précis de manière à utiliser les chaudières aux meilleurs points de fonctionnement réels.

## 5 Rendu final

**Proposition** Un rendu final a été imaginé pour que le mandant puisse visualiser en tout temps la prévision et la gestion des chaudières depuis une page internet. Deux pages seraient créées, une page graphique et une page plus orientée sur les valeurs numériques de puissances.

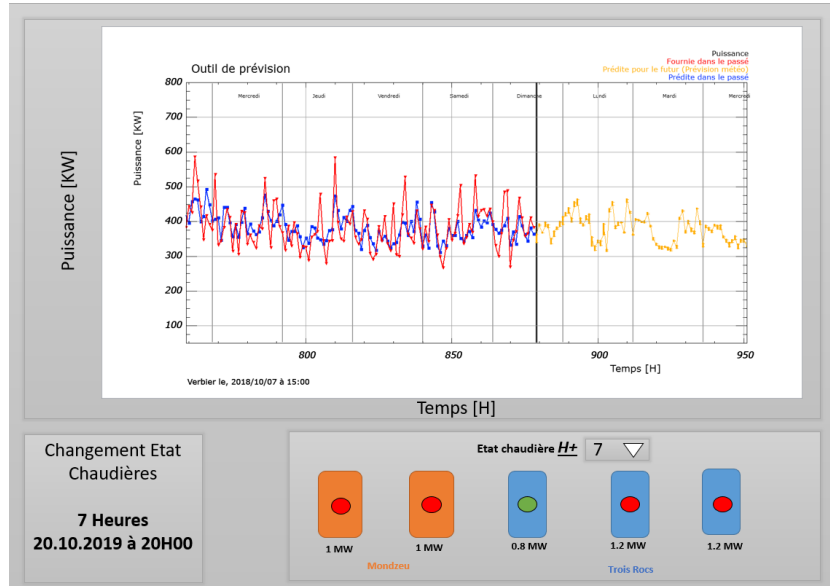


Figure 59 :Page graphique

**1<sup>ère</sup> page** Cette page propose de visualiser la prévision de la demande et indique le nombre de chaudière en fonction. A gauche, une indication afficherait la date et l'heure à laquelle l'algorithme donne un changement de fonctionnement important des chaudières.

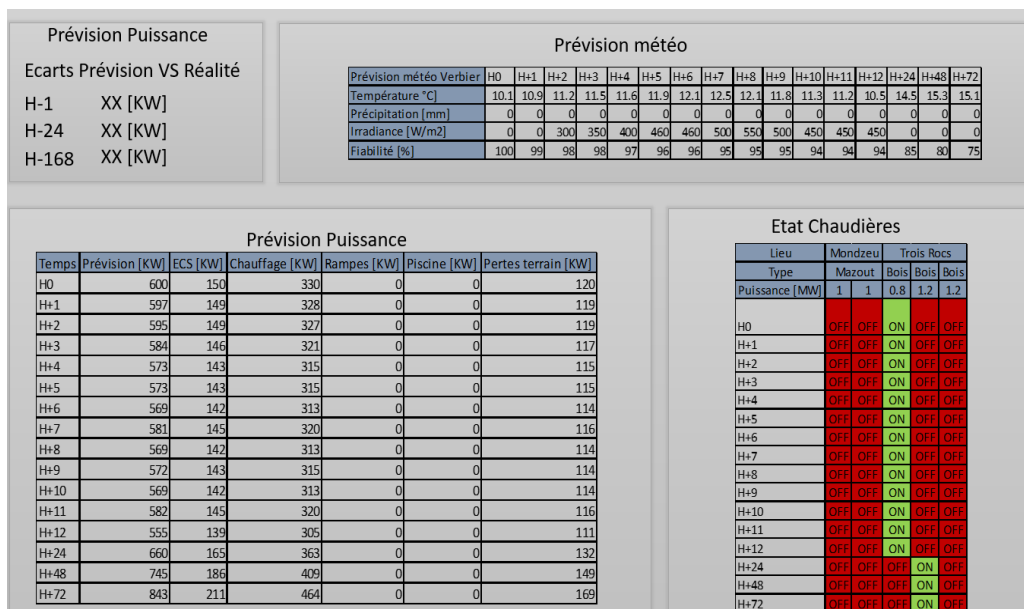


Figure 60:Page numérique

**2<sup>ème</sup> page** Cette page indiquerait de manière numérique la prévision de la puissance ainsi que sa répartition et la gestion des chaudières. Les prévisions météorologiques et les écarts de prévision sur les dernières heures seraient indiqués.





## 6 Intégration sur site

Pour finir totalement le projet et l'utiliser de manière dynamique, plusieurs actions sont encore à réaliser.

- Finir la gestion des chaudières de manière plus précise en accord avec le mandant.
- Créer le code qui lit la structure souhaitée des données en provenance de Verbier.
- Depuis un serveur, avoir accès aux données de Verbier et à la prévision météo.
- Lier le code Qt au serveur.
- Créer une page web qui affiche les résultats de prévision de la demande et de la gestion des chaudières.

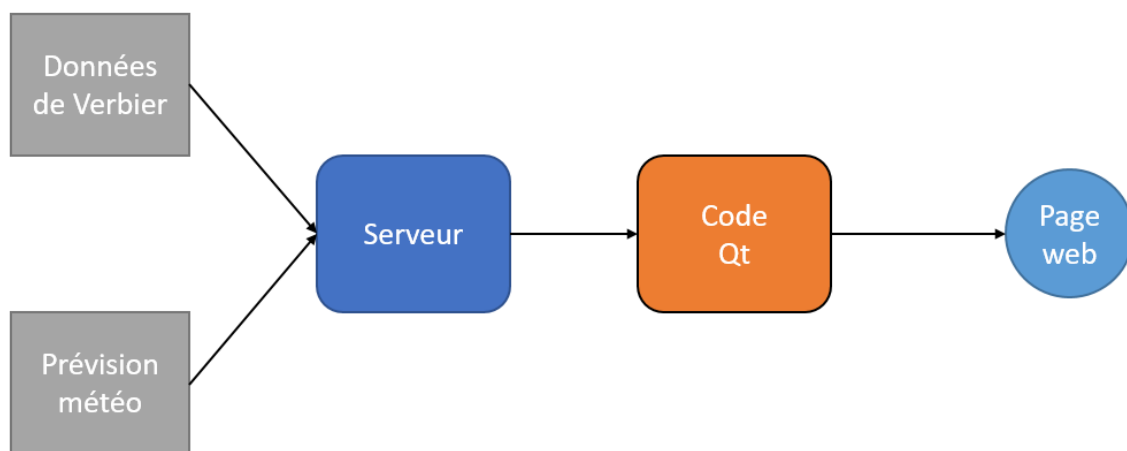


Figure 61: Intégration sur site



## 7 Conclusion

Avec la stratégie énergétique 2050, l'heure est à l'amélioration de l'efficacité énergétique et à la promotion des énergies renouvelables. Les chauffages à distance doivent, eux aussi, améliorer leur efficacité énergétique et l'utilisation des énergies renouvelables. Même si la plupart des CAD utilisent des énergies renouvelables, il y a des possibilités d'améliorations. Ce travail de diplôme en propose.

Après avoir validé la méthode d'ajustement, développé plusieurs modèles de prévision et créé une gestion très simplifiée des chaudières, la fonctionnalité d'un tel système a pu être exposée. Les résultats sont prometteurs, la méthode de l'ajustement permet de créer une prévision totale sensée, même si la valeur des coefficients n'est pas réaliste. Il est vrai qu'en remplaçant la météo réelle par sa prévision, les résultats proposés sont de moins bonne qualité. Il n'empêche que de manière générale, la prévision suit la tendance de la puissance réellement fournie. Les avantages auxquels Altis a accès au travers de l'utilisation de cet outil sont indéniables et permettent notamment l'amélioration de l'efficacité énergétique.

La gestion des chaudières est un domaine plus technique. Sans les courbes de rendement de chaque chaudière, il est difficile de créer une gestion réaliste. Les chaudières ont chacune des spécificités qui les distinguent. Cependant, le but majeur recherché consiste à privilégier la consommation de pellets et pour la suite, l'utilisation de la PAC aux dépens des chaudières à mazout.

En combinant ces deux outils, le chauffage à distance rentre dans les objectifs de la stratégie 2050 en améliorant son efficacité et en utilisant le plus possible les énergies renouvelables. Les deux outils proposés ont, certes, besoin d'améliorations. La prévision de la demande peut encore être parfaite en prenant en compte plus précisément les spécificités du réseau et des utilisateurs. La gestion des chaudières, quant à elle, doit encore être travaillée pour la rendre réaliste par rapport à la prévision de la demande et à la gestion actuelle.

Même si ces outils restent à compléter et à améliorer pour le CAD de Verbier, il est tout à fait imaginable de les reproduire pour d'autres chauffages à distance. Les caractéristiques du chauffage à distance changent, mais le principe de résolution reste identique.



## 8 Remerciements

Je tiens à remercier

- M. Morand, professeur responsable de ce projet, qui m'a accompagné lors de la réalisation de ce travail en faisant preuve d'une grande disponibilité et d'une très grande patience. Sans son aide et ses nombreuses librairies informatique, l'outil de prévision n'aurait jamais vu le jour.
- M Blatter Arnaud d'Altis, pour sa disponibilité lors de nos échanges téléphoniques et son accueil lors de nos rencontres.
- Laure et Benoît, pour les relectures du rapport, qui ont permis, je l'espère, d'en rendre la lecture agréable.





## 9 Annexes

|   |           |
|---|-----------|
| <b>9 Annexes .....</b>  | <b>61</b> |
| 9.1 Transposée et matrice inverse .....   | 62        |
| 9.2 Calculs pour trouver la matrice « BETA » .....  | 63        |
| 9.3 Calculs des résidus .....   | 64        |
| 9.4 Corrélation .....   | 65        |
| 9.5 Matrice « X » .....   | 66        |
| 9.6 Résultats corrélation pour longueur de la matrice " $X_{futur}$ " et " $\eta_{passé}$ " ..... | 67        |
| 9.7 Résultats des résidus pour la matrice " $\eta_{passé}$ " .....                                | 68        |
| 9.8 Résultats corrélation pour longueur de la matrice " $X_{futur}$ " .....                       | 69        |
| 9.9 Valeurs des coefficients BETA pour le modèle « météo réelle » .....                           | 70        |
| 9.10 Structure et calculs réalisés pour le modèle de prévision « météo réelle sans rampes » ..... | 74        |
| 9.11 Comparaison prévision et réalité données météo .....   | 76        |
| 9.12 Structure température aller-retour .....   | 77        |
| 9.13 Représentation de la matrice " $X_{final}$ " .....   | 78        |
| 9.14 Coefficients de corrélation modèle de prévision « prévision météo » .....                    | 79        |
| 9.15 Résidus modèle de prévision « prévision météo » .....  | 80        |
| 9.16 Coefficients BETA pour le modèle : « prévision météo » .....                                 | 81        |
| 9.17 Plaquettes signalétiques .....   | 85        |
| 9.18 Gestion des chaudières .....   | 86        |
| 9.19 Structure de données en provenance de Verbier .....  | 87        |
| 9.20 Fiches techniques des chaudières .....   | 88        |
| 9.21 Le software de la prévision .....  | 88        |
| 9.22 Vidéos .....   | 88        |
| 9.23 Données .....  | 88        |

## 9.1 Transposée et matrice inverse

La transposée d'une matrice notée  $A^T$  est une opération mathématique qui inverse les lignes et les colonnes. Les lignes deviennent les colonnes et les colonnes deviennent les lignes.

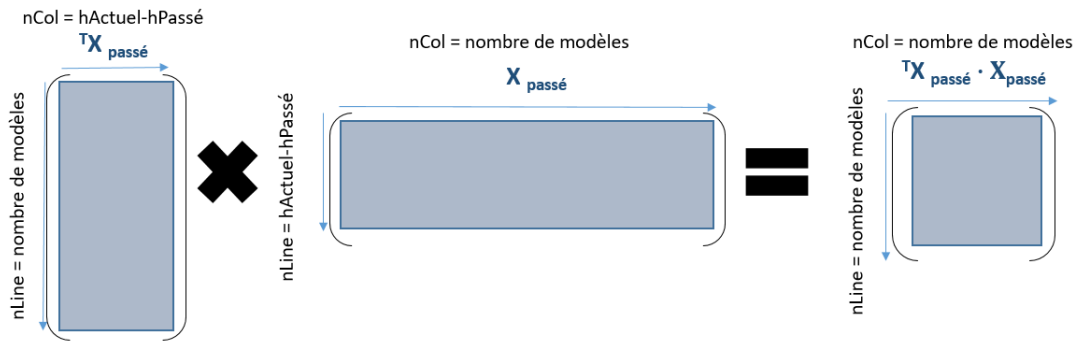
$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \\ 5 & 6 \end{bmatrix} \qquad A^T = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 2 & 4 & 6 \end{bmatrix}$$

En mathématique, une matrice carrée (nombre de lignes et colonnes identique) notée  $A$  est inversible s'il existe une matrice  $B$  appelée matrice inverse de  $A$  dont :

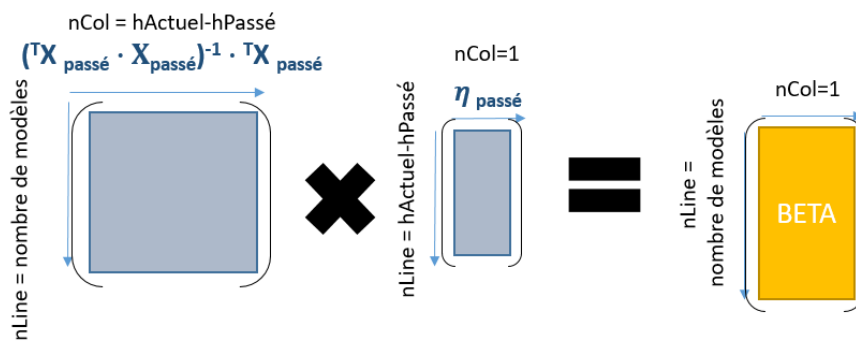
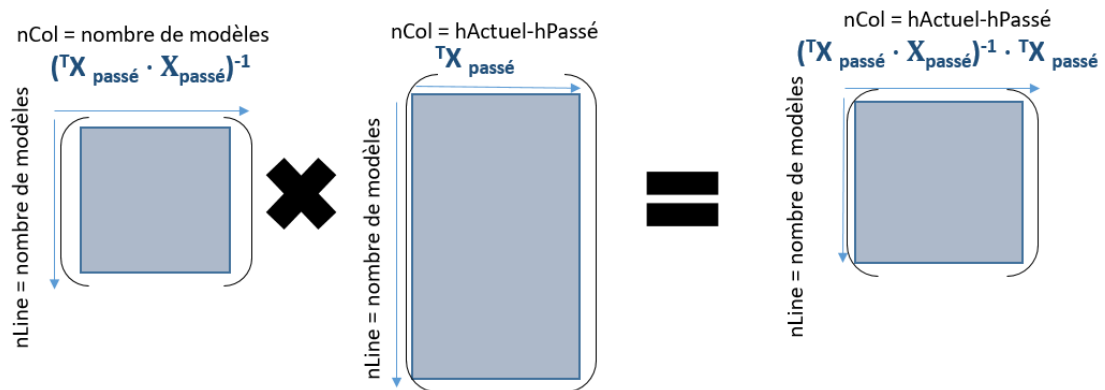
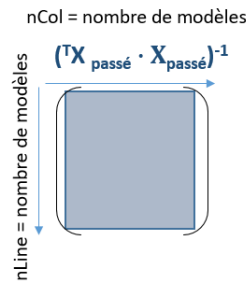
$$B = A^{-1} \text{ telle que } A \cdot B = B \cdot A$$

$$A = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \qquad A^{-1} = \frac{1}{ad-bc} \begin{bmatrix} d & b \\ -c & a \end{bmatrix}$$

## 9.2 Calculs pour trouver la matrice « BETA »

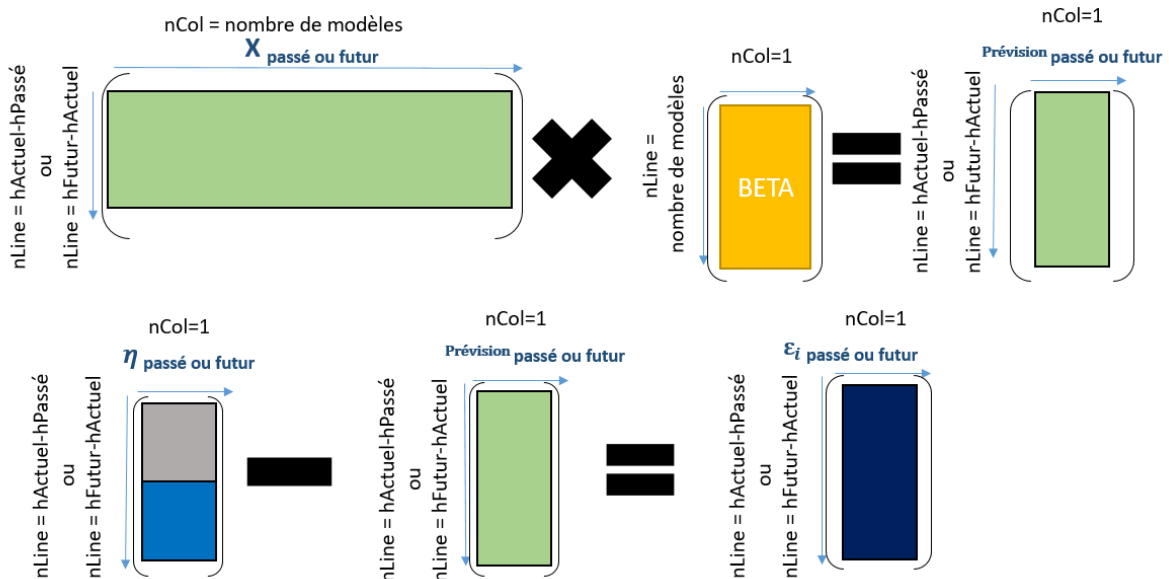


*Pour pouvoir réaliser une inversion, la matrice doit être carrée. L'inversion ne change pas la dimension de la matrice.*

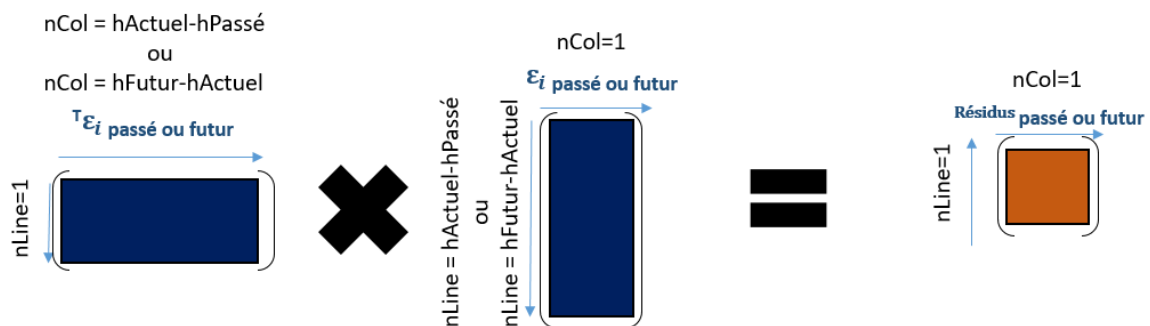


### 9.3 Calculs des résidus

La matrice " $\eta_{\text{futur ou passé}}$ " correspond aux données réelles de puissance qui sont dans le passé ou le futur, suivant où  $h_{\text{Actuel}}$  se situe. La matrice prévision passée ou future correspond à la prévision que l'ajustement calcule après avoir multiplié la matrice coefficient " $\beta$ ". Le résidu passé ou futur correspond donc à la somme des erreurs au carré.



Pour finir :



#### 9.4 Corrélation

La covariance notée  $Cov$  de ces deux variables divisée par la multiplication de chaque écart type noté  $S$  a pour résultat le coefficient de corrélation.

$$Cov(x, y) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x - \bar{x}) \cdot (y - \bar{y})$$

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2}$$

$$S_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2}$$

$n$  = nombre point  
 $\bar{y}$  et  $\bar{x}$  = moyenne des  $y$  et des  $x$





## 9.6 Résultats corrélation pour longueur de la matrice " $X_{\text{futur}}$ " et " $\eta_{\text{passé}}$ "

| hPassé | hFutur | Corr Passé min | Corr Passé max | Corr Futur min | Corr Futur Max |
|--------|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 168.00 | 48.00  | 0.428          | 0.969          | -0.199         | 0.949          |
| 144.00 | 48.00  | 0.470          | 0.971          | -0.333         | 0.946          |
| 120.00 | 48.00  | 0.542          | 0.973          | -0.311         | 0.945          |
| 96.00  | 48.00  | 0.585          | 0.979          | -0.314         | 0.969          |
| 72.00  | 48.00  | 0.553          | 0.987          | -0.508         | 0.962          |
| 48.00  | 48.00  | 0.589          | 0.996          | -0.658         | 0.952          |
| 168.00 | 72.00  | 0.428          | 0.969          | -0.166         | 0.919          |
| 144.00 | 72.00  | 0.470          | 0.971          | -0.245         | 0.921          |
| 120.00 | 72.00  | 0.542          | 0.973          | -0.218         | 0.922          |
| 96.00  | 72.00  | 0.585          | 0.978          | -0.217         | 0.942          |
| 72.00  | 72.00  | 0.553          | 0.984          | -0.358         | 0.942          |
| 48.00  | 72.00  | 0.589          | 0.996          | -0.621         | 0.936          |
| 168.00 | 96.00  | 0.428          | 0.969          | -0.167         | 0.926          |
| 144.00 | 96.00  | 0.470          | 0.971          | -0.170         | 0.921          |
| 120.00 | 96.00  | 0.542          | 0.973          | -0.144         | 0.922          |
| 96.00  | 96.00  | 0.585          | 0.978          | -0.162         | 0.915          |
| 72.00  | 96.00  | 0.553          | 0.984          | -0.406         | 0.911          |
| 48.00  | 96.00  | 0.589          | 0.996          | -0.680         | 0.938          |
| 168.00 | 120.00 | 0.428          | 0.969          | -0.056         | 0.915          |
| 144.00 | 120.00 | 0.470          | 0.971          | -0.090         | 0.917          |
| 120.00 | 120.00 | 0.542          | 0.973          | -0.107         | 0.911          |
| 96.00  | 120.00 | 0.585          | 0.978          | -0.122         | 0.916          |
| 72.00  | 120.00 | 0.553          | 0.984          | -0.453         | 0.919          |
| 48.00  | 120.00 | 0.589          | 0.996          | -0.649         | 0.926          |
| 168.00 | 144.00 | 0.428          | 0.969          | -0.091         | 0.908          |
| 144.00 | 144.00 | 0.470          | 0.971          | -0.173         | 0.915          |
| 120.00 | 144.00 | 0.542          | 0.973          | -0.299         | 0.980          |
| 96.00  | 144.00 | 0.585          | 0.978          | -0.102         | 0.917          |
| 72.00  | 144.00 | 0.553          | 0.984          | -0.374         | 0.919          |
| 48.00  | 144.00 | 0.589          | 0.996          | -0.645         | 0.920          |
| 336.00 | 168.00 | 0.481          | 0.954          | 0.034          | 0.915          |
| 312.00 | 168.00 | 0.478          | 0.958          | 0.020          | 0.911          |
| 288.00 | 168.00 | 0.437          | 0.964          | 0.009          | 0.920          |
| 264.00 | 168.00 | 0.420          | 0.968          | -0.038         | 0.885          |
| 240.00 | 168.00 | 0.393          | 0.696          | -0.049         | 0.881          |
| 216.00 | 168.00 | 0.422          | 0.970          | -0.041         | 0.901          |
| 192.00 | 168.00 | 0.417          | 0.969          | -0.047         | 0.918          |
| 168.00 | 168.00 | 0.428          | 0.969          | -0.023         | 0.904          |
| 144.00 | 168.00 | 0.470          | 0.971          | -0.266         | 0.915          |
| 120.00 | 168.00 | 0.542          | 0.973          | -0.487         | 0.901          |
| 96.00  | 168.00 | 0.585          | 0.978          | -0.426         | 0.914          |
| 72.00  | 168.00 | 0.553          | 0.984          | -0.378         | 0.918          |
| 48.00  | 168.00 | 0.589          | 0.996          | -0.646         | 0.903          |

## 9.7 Résultats des résidus pour la matrice " $\eta_{\text{passé}}$ "

| hPassé | hFutur | Résidu Passé min | Erreur min sur la période [KW] | Résidu Passé max | Erreur max sur la période [KW] | Residus Passé moyenne | Erreur moyenne sur la période [KWh] |
|--------|--------|------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| 168.00 | 48.00  | 2.297            | 385.896                        | 8.603            | 1 445.304                      | 6.306                 | 1 059.408                           |
| 144.00 | 48.00  | 2.421            | 348.624                        | 9.524            | 1 371.456                      | 7.103                 | 1 022.832                           |
| 120.00 | 48.00  | 2.436            | 292.320                        | 9.475            | 1 137.000                      | 7.039                 | 844.680                             |
| 96.00  | 48.00  | 2.563            | 246.048                        | 10.719           | 1 029.024                      | 8.156                 | 782.976                             |
| 72.00  | 48.00  | 2.318            | 166.896                        | 12.408           | 893.376                        | 10.090                | 726.480                             |
| 48.00  | 48.00  | 1.765            | 84.720                         | 15.870           | 761.760                        | 14.105                | 677.040                             |
| 168.00 | 72.00  | 2.297            | 385.896                        | 8.603            | 1 445.304                      | 6.306                 | 1 059.408                           |
| 144.00 | 72.00  | 2.421            | 348.624                        | 9.524            | 1 371.456                      | 7.103                 | 1 022.832                           |
| 120.00 | 72.00  | 2.436            | 292.320                        | 9.475            | 1 137.000                      | 7.039                 | 844.680                             |
| 96.00  | 72.00  | 2.563            | 246.048                        | 10.719           | 1 029.024                      | 8.156                 | 782.976                             |
| 72.00  | 72.00  | 2.318            | 166.896                        | 12.408           | 893.376                        | 10.090                | 726.480                             |
| 48.00  | 72.00  | 1.765            | 84.720                         | 15.870           | 761.760                        | 14.105                | 677.040                             |
| 168.00 | 96.00  | 2.297            | 385.896                        | 8.603            | 1 445.304                      | 6.306                 | 1 059.408                           |
| 144.00 | 96.00  | 2.421            | 348.624                        | 9.524            | 1 371.456                      | 7.103                 | 1 022.832                           |
| 120.00 | 96.00  | 2.436            | 292.320                        | 9.475            | 1 137.000                      | 7.039                 | 844.680                             |
| 96.00  | 96.00  | 2.563            | 246.048                        | 10.719           | 1 029.024                      | 8.156                 | 782.976                             |
| 72.00  | 96.00  | 2.318            | 166.896                        | 12.408           | 893.376                        | 10.090                | 726.480                             |
| 48.00  | 96.00  | 1.765            | 84.720                         | 15.870           | 761.760                        | 14.105                | 677.040                             |
| 168.00 | 120.00 | 2.297            | 385.896                        | 8.603            | 1 445.304                      | 6.306                 | 1 059.408                           |
| 144.00 | 120.00 | 2.421            | 348.624                        | 9.524            | 1 371.456                      | 7.103                 | 1 022.832                           |
| 120.00 | 120.00 | 2.436            | 292.320                        | 9.947            | 1 193.640                      | 7.039                 | 844.680                             |
| 96.00  | 120.00 | 2.563            | 246.048                        | 10.719           | 1 029.024                      | 8.156                 | 782.976                             |
| 72.00  | 120.00 | 2.318            | 166.896                        | 12.408           | 893.376                        | 10.090                | 726.480                             |
| 48.00  | 120.00 | 1.765            | 84.720                         | 15.870           | 761.760                        | 14.105                | 677.040                             |
| 168.00 | 144.00 | 2.297            | 385.896                        | 8.603            | 1 445.304                      | 6.306                 | 1 059.408                           |
| 144.00 | 144.00 | 2.421            | 348.624                        | 9.524            | 1 371.456                      | 7.106                 | 1 023.264                           |
| 120.00 | 144.00 | 2.436            | 292.320                        | 9.475            | 1 137.000                      | 7.039                 | 844.680                             |
| 96.00  | 144.00 | 2.563            | 246.048                        | 10.719           | 1 029.024                      | 8.156                 | 782.976                             |
| 72.00  | 144.00 | 2.318            | 166.896                        | 12.408           | 893.376                        | 10.090                | 726.480                             |
| 48.00  | 144.00 | 1.765            | 84.720                         | 15.870           | 761.760                        | 14.105                | 677.040                             |
| 336.00 | 168.00 | 2.060            | 692.160                        | 5.745            | 1 930.320                      | 3.685                 | 1 238.160                           |
| 312.00 | 168.00 | 2.022            | 630.864                        | 6.082            | 1 897.584                      | 4.060                 | 1 266.720                           |
| 288.00 | 168.00 | 2.114            | 608.832                        | 6.437            | 1 853.856                      | 4.324                 | 1 245.312                           |
| 264.00 | 168.00 | 2.087            | 550.968                        | 6.884            | 1 817.376                      | 4.797                 | 1 266.408                           |
| 240.00 | 168.00 | 2.188            | 525.120                        | 7.090            | 1 701.600                      | 4.091                 | 981.840                             |
| 216.00 | 168.00 | 2.292            | 495.072                        | 7.474            | 1 614.384                      | 5.183                 | 1 119.528                           |
| 192.00 | 168.00 | 2.440            | 468.480                        | 7.769            | 1 491.648                      | 5.329                 | 1 023.168                           |
| 168.00 | 168.00 | 2.297            | 385.896                        | 8.446            | 1 418.928                      | 6.149                 | 1 033.032                           |
| 144.00 | 168.00 | 2.421            | 348.624                        | 9.524            | 1 371.456                      | 7.103                 | 1 022.832                           |
| 120.00 | 168.00 | 2.436            | 292.320                        | 9.475            | 1 137.000                      | 7.039                 | 844.680                             |
| 96.00  | 168.00 | 2.536            | 243.485                        | 10.719           | 1 029.024                      | 8.156                 | 782.976                             |
| 72.00  | 168.00 | 2.318            | 166.896                        | 12.408           | 893.376                        | 10.090                | 726.480                             |
| 48.00  | 168.00 | 1.765            | 84.720                         | 15.870           | 761.760                        | 14.105                | 677.040                             |

## 9.8 Résultats corrélation pour longueur de la matrice " $X_{\text{futur}}$ "

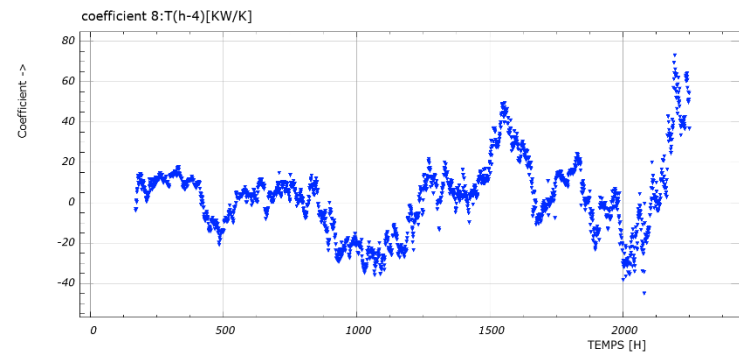
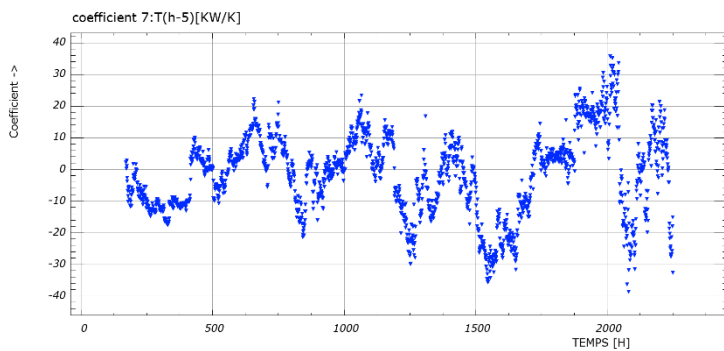
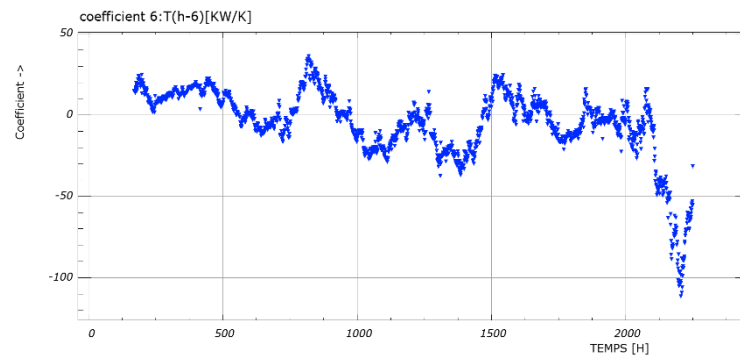
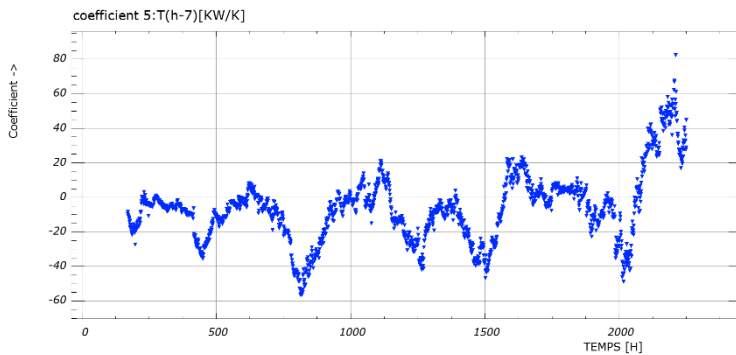
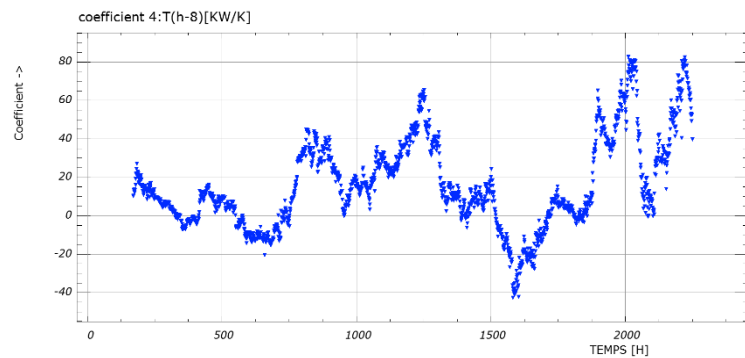
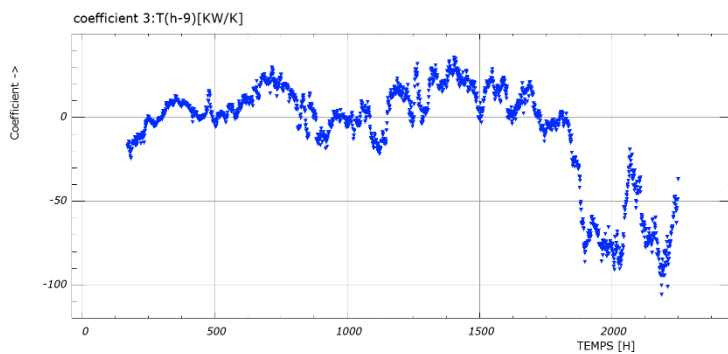
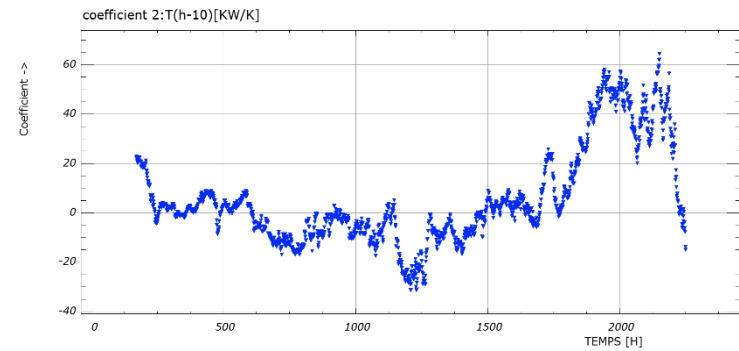
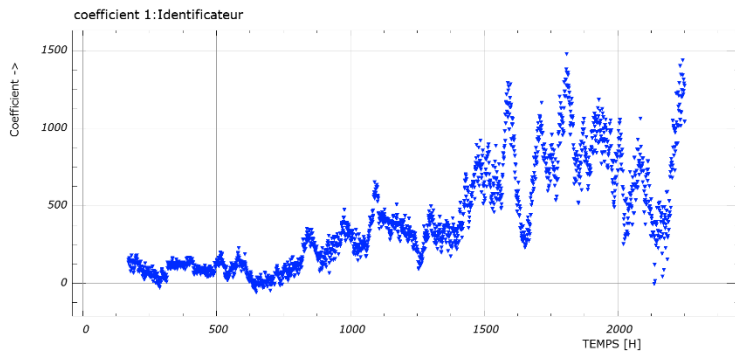
| hPassé | hFutur | Résidu Futur min | Erreur min sur la période [KW] | Résidu Futur max | Erreur max sur la période [KW] | Résidu Futur moyenne | Erreur moyenne sur la période [KW] |
|--------|--------|------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|----------------------|------------------------------------|
| 168.00 | 48.00  | 4.271            | 205.008                        | 35.083           | 1 683.984                      | 30.801               | 1 478.458                          |
| 144.00 | 48.00  | 4.110            | 197.280                        | 39.656           | 1 903.488                      | 35.545               | 1 706.160                          |
| 120.00 | 48.00  | 4.253            | 204.144                        | 41.110           | 1 973.280                      | 36.856               | 1 769.088                          |
| 96.00  | 48.00  | 4.498            | 215.904                        | 79.053           | 3 794.544                      | 74.555               | 3 578.640                          |
| 72.00  | 48.00  | 5.294            | 254.112                        | 64.021           | 3 073.008                      | 58.727               | 2 818.896                          |
| 48.00  | 48.00  | 5.526            | 265.248                        | 166.051          | 7 970.448                      | 160.507              | 7 704.312                          |
| 168.00 | 72.00  | 3.384            | 243.648                        | 28.157           | 2 027.304                      | 24.773               | 1 783.656                          |
| 144.00 | 72.00  | 3.514            | 253.008                        | 29.972           | 2 157.984                      | 26.458               | 1 904.976                          |
| 120.00 | 72.00  | 3.682            | 265.104                        | 33.945           | 2 444.040                      | 30.263               | 2 178.936                          |
| 96.00  | 72.00  | 3.965            | 285.480                        | 73.101           | 5 263.272                      | 69.164               | 4 979.772                          |
| 72.00  | 72.00  | 4.785            | 344.520                        | 57.098           | 4 111.056                      | 52.314               | 3 766.608                          |
| 48.00  | 72.00  | 4.951            | 356.472                        | 152.957          | 11 012.904                     | 148.006              | 10 656.432                         |
| 168.00 | 96.00  | 3.833            | 367.968                        | 22.262           | 2 137.152                      | 18.430               | 1 769.280                          |
| 144.00 | 96.00  | 7.743            | 743.328                        | 23.435           | 2 249.760                      | 19.962               | 1 916.352                          |
| 120.00 | 96.00  | 3.738            | 358.848                        | 27.635           | 2 652.960                      | 23.896               | 2 294.616                          |
| 96.00  | 96.00  | 4.490            | 431.040                        | 67.201           | 6 451.296                      | 63.151               | 6 062.496                          |
| 72.00  | 96.00  | 4.560            | 437.760                        | 51.829           | 4 975.584                      | 47.269               | 4 537.824                          |
| 48.00  | 96.00  | 4.421            | 424.416                        | 140.327          | 13 471.392                     | 135.906              | 13 046.976                         |
| 168.00 | 120.00 | 3.849            | 461.880                        | 20.435           | 2 452.200                      | 16.586               | 3 090.320                          |
| 144.00 | 120.00 | 3.849            | 461.880                        | 22.185           | 2 662.200                      | 18.787               | 2 254.440                          |
| 120.00 | 120.00 | 3.489            | 418.680                        | 23.441           | 2 812.920                      | 19.952               | 2 394.240                          |
| 96.00  | 120.00 | 3.730            | 447.600                        | 62.573           | 7 508.760                      | 58.843               | 7 061.160                          |
| 72.00  | 120.00 | 4.172            | 500.640                        | 46.770           | 5 612.400                      | 42.605               | 5 112.600                          |
| 48.00  | 120.00 | 4.339            | 520.680                        | 131.789          | 15 814.680                     | 127.450              | 15 294.000                         |
| 168.00 | 144.00 | 3.655            | 526.320                        | 20.966           | 3 019.104                      | 17.310               | 2 492.640                          |
| 144.00 | 144.00 | 3.555            | 511.920                        | 24.428           | 3 517.632                      | 20.873               | 3 005.712                          |
| 120.00 | 144.00 | 3.212            | 462.528                        | 23.603           | 3 398.832                      | 20.390               | 2 936.160                          |
| 96.00  | 144.00 | 3.478            | 500.832                        | 58.292           | 8 394.048                      | 54.814               | 7 893.216                          |
| 72.00  | 144.00 | 3.834            | 552.096                        | 42.768           | 6 158.592                      | 38.932               | 5 606.208                          |
| 48.00  | 144.00 | 3.966            | 571.104                        | 124.710          | 17 958.240                     | 120.755              | 17 388.720                         |
| 336.00 | 168.00 | 3.405            | 572.040                        | 21.743           | 3 652.824                      | 18.338               | 3 080.784                          |
| 312.00 | 168.00 | 3.294            | 553.392                        | 21.374           | 3 590.832                      | 18.080               | 3 037.440                          |
| 288.00 | 168.00 | 3.240            | 544.320                        | 22.129           | 3 717.672                      | 18.889               | 3 173.352                          |
| 264.00 | 168.00 | 3.192            | 536.256                        | 21.813           | 3 664.584                      | 18.620               | 3 128.160                          |
| 240.00 | 168.00 | 3.199            | 537.432                        | 18.650           | 3 133.200                      | 15.541               | 2 610.888                          |
| 216.00 | 168.00 | 3.211            | 539.448                        | 17.849           | 2 998.632                      | 14.639               | 2 459.352                          |
| 192.00 | 168.00 | 3.276            | 550.368                        | 17.501           | 2 940.168                      | 14.225               | 2 389.800                          |
| 168.00 | 168.00 | 3.297            | 553.896                        | 21.843           | 3 669.624                      | 18.547               | 3 115.896                          |
| 144.00 | 168.00 | 3.388            | 569.184                        | 25.668           | 4 312.224                      | 22.280               | 3 743.040                          |
| 120.00 | 168.00 | 3.416            | 573.888                        | 23.563           | 3 958.584                      | 20.147               | 3 384.696                          |
| 96.00  | 168.00 | 3.524            | 592.032                        | 56.059           | 9 417.912                      | 52.535               | 8 825.880                          |
| 72.00  | 168.00 | 3.883            | 652.344                        | 40.849           | 6 862.632                      | 36.966               | 6 210.288                          |
| 48.00  | 168.00 | 3.822            | 642.096                        | 120.962          | 20 321.616                     | 117.140              | 19 679.520                         |

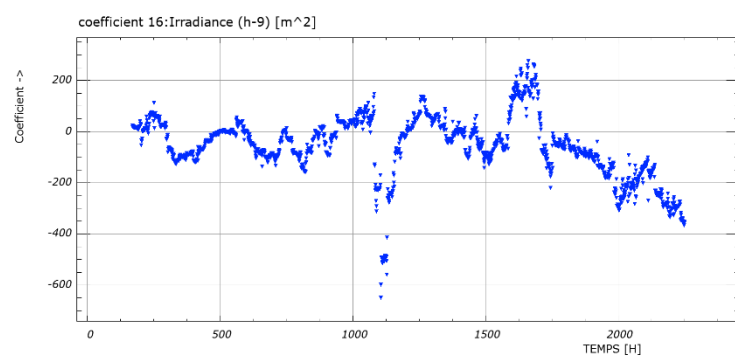
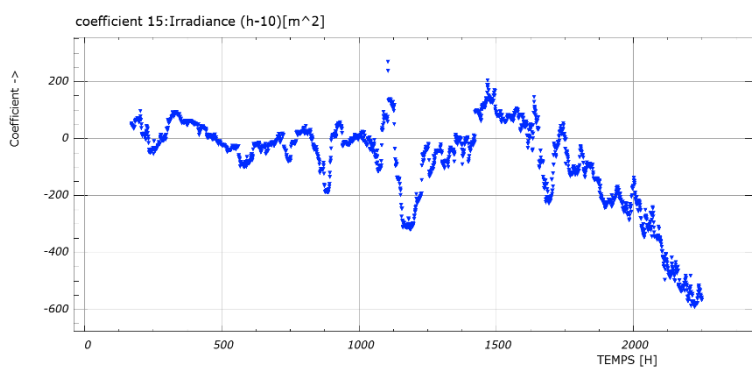
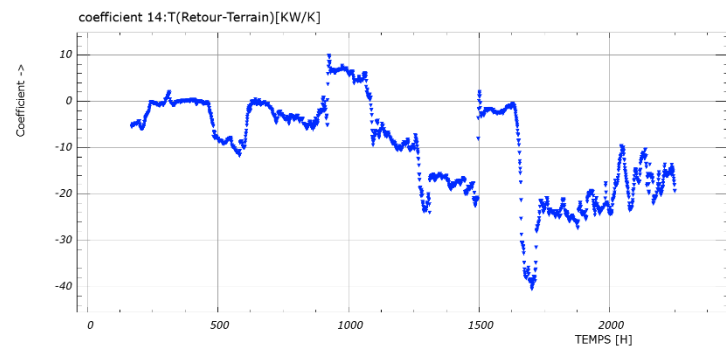
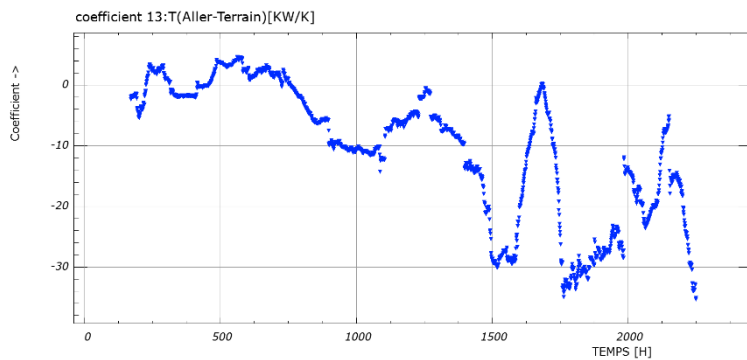
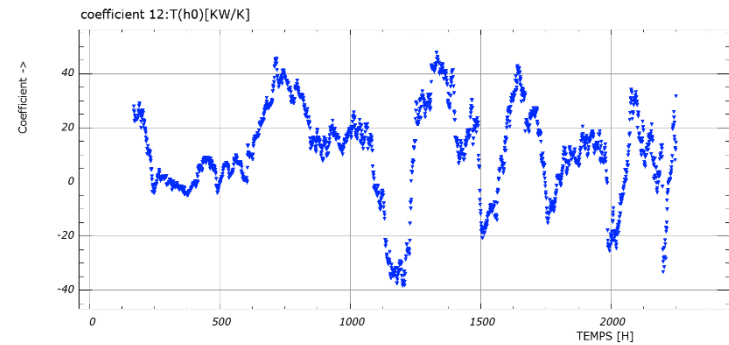
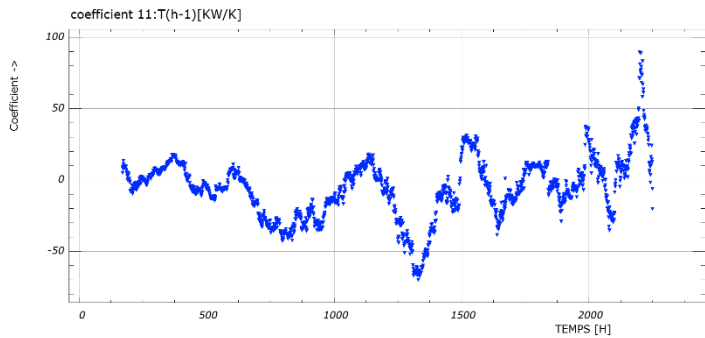
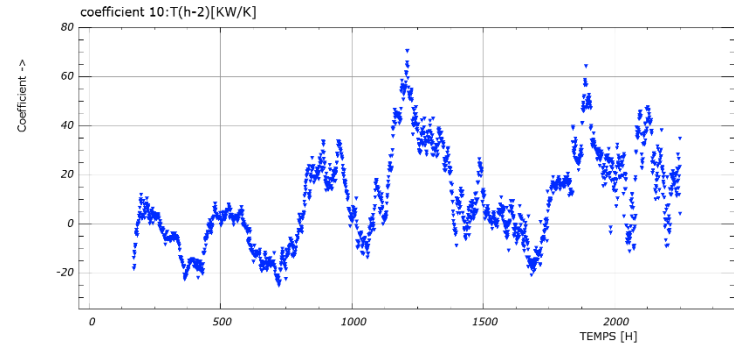
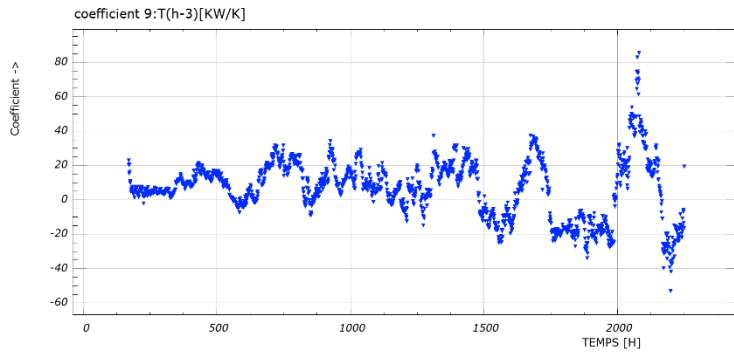
Rapport-gratuit.com

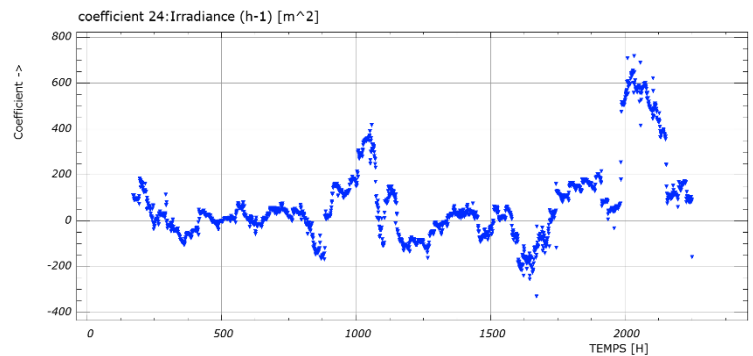
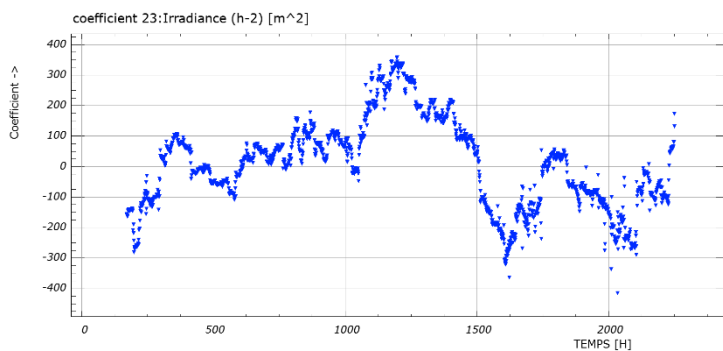
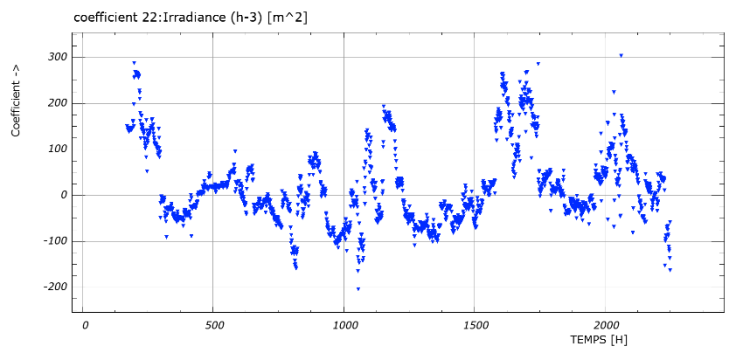
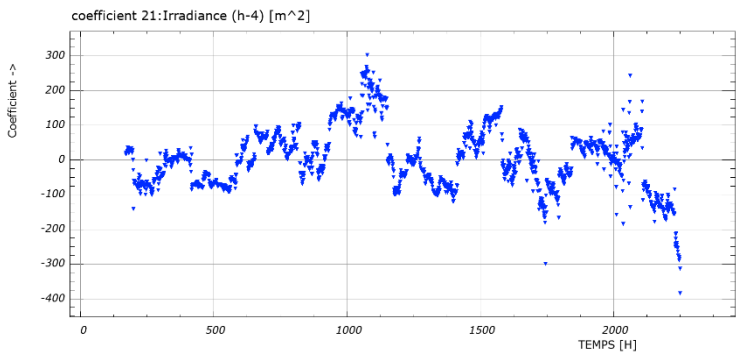
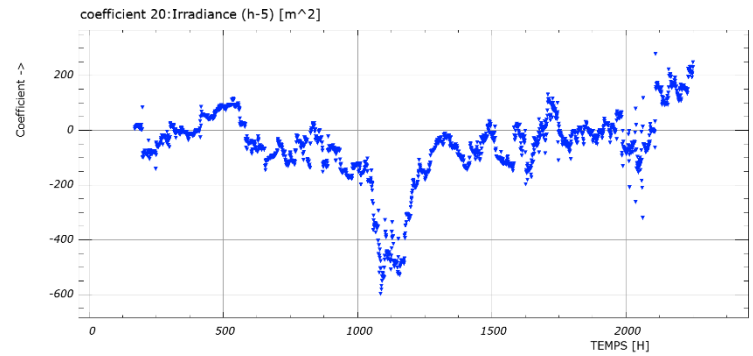
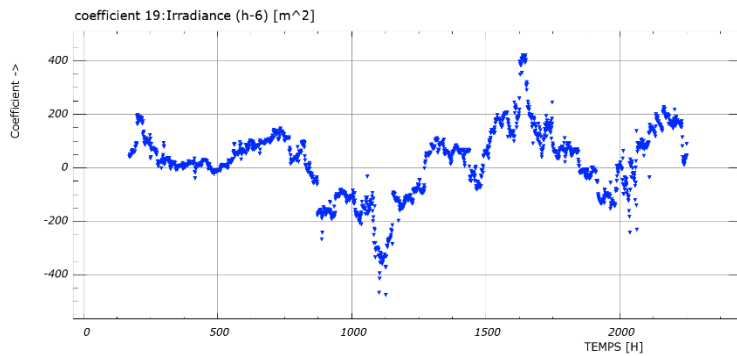
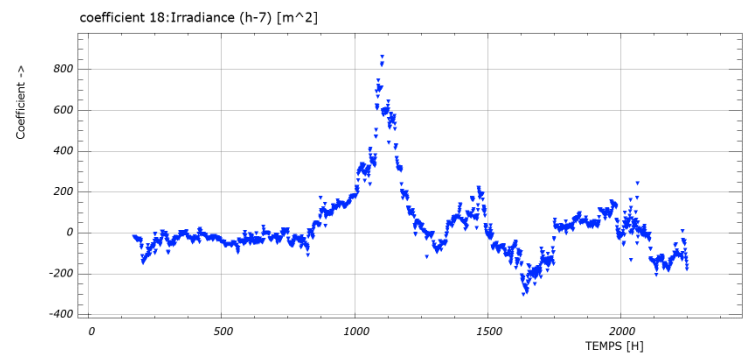
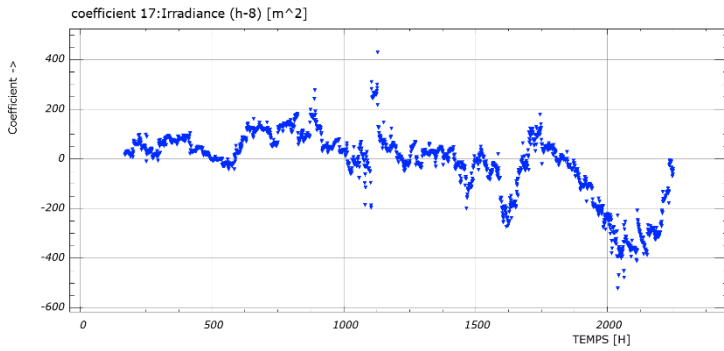
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES



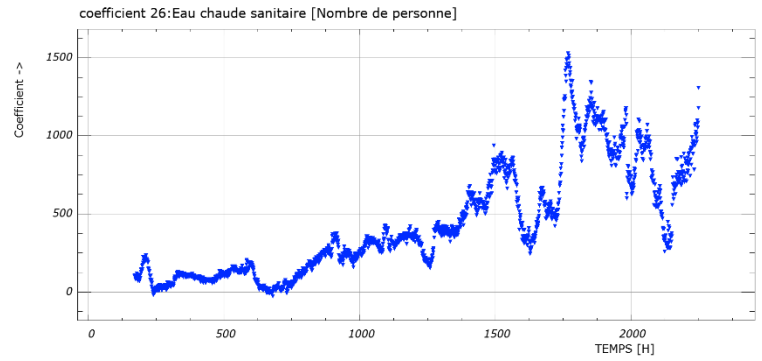
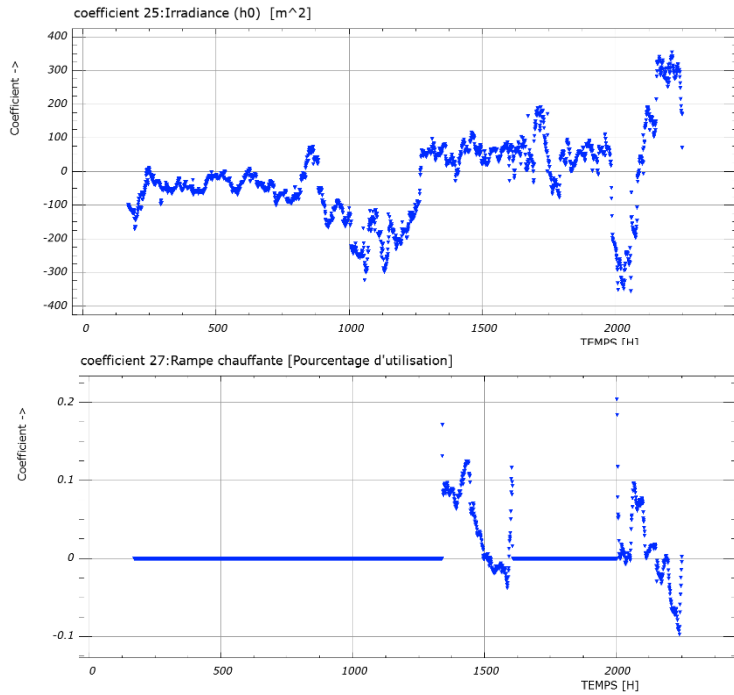
## 9.9 Valeurs des coefficients BETA pour le modèle « météo réelle »





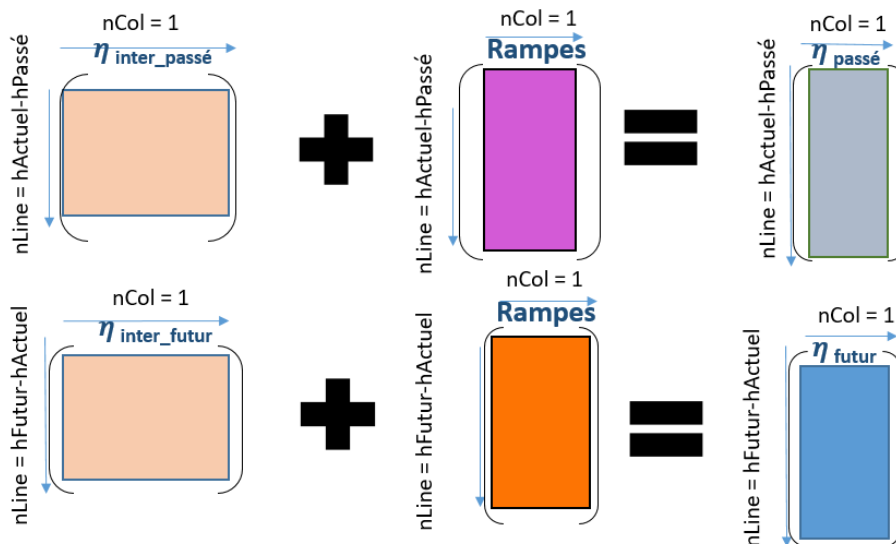
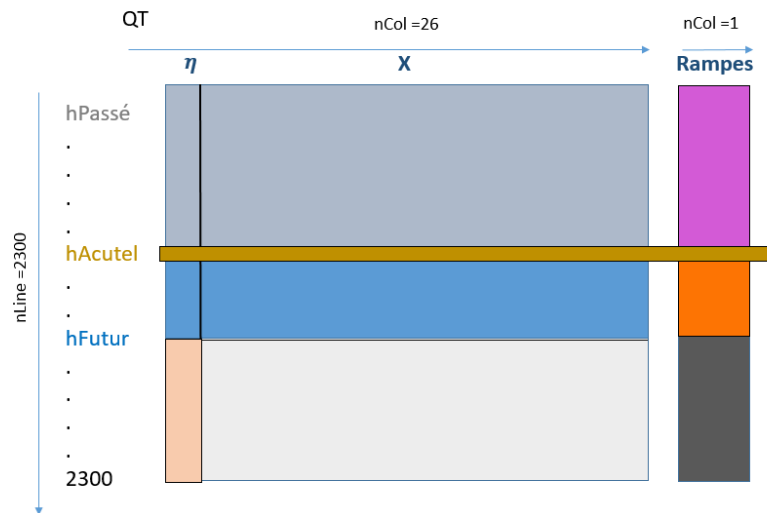


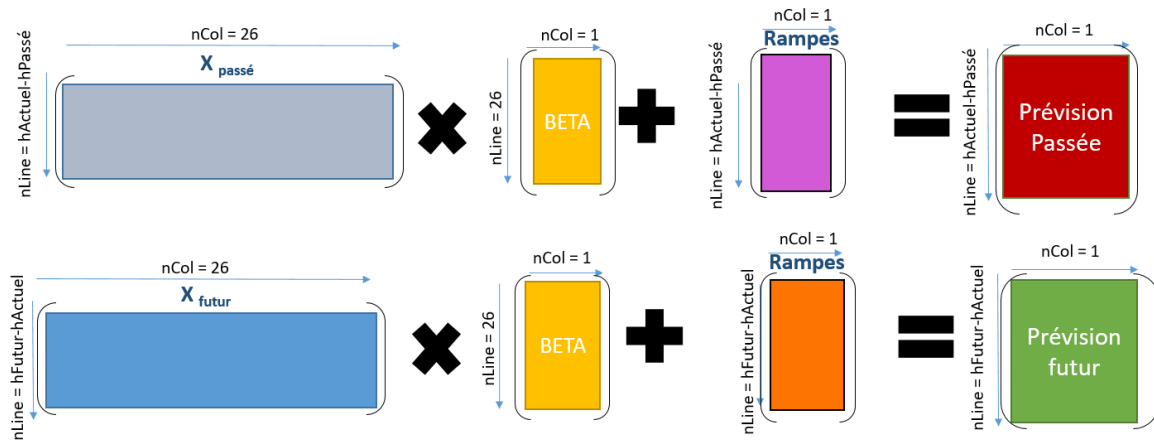




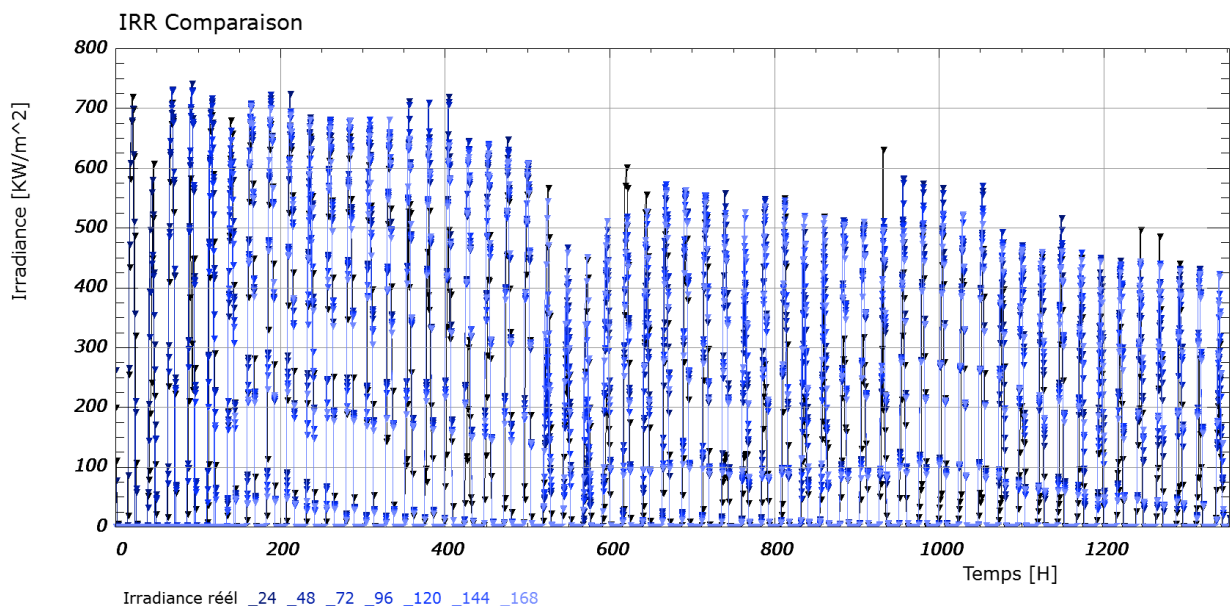
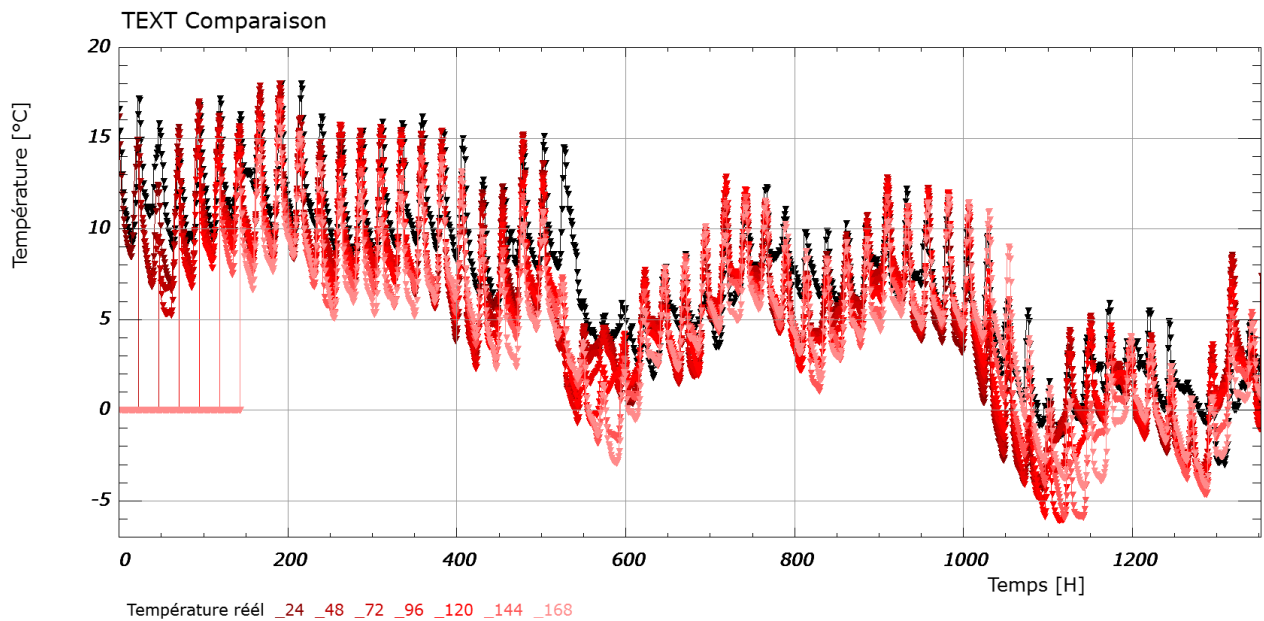
### 9.10 Structure et calculs réalisés pour le modèle de prévision « météo réelle sans rampes »

Le même calcul que pour le premier modèle est réalisé pour créer la prévision passée et la prévision future. Sauf qu'après avoir multiplié la matrice "X" avec la matrice " $\beta$ ", la puissance des rampes est ajoutée. Cette puissance est aussi rajoutée à la matrice " $\eta_{inter}$ " pour recréer la puissance réellement fournie.





### 9.11 Comparaison prévision et réalité données météo

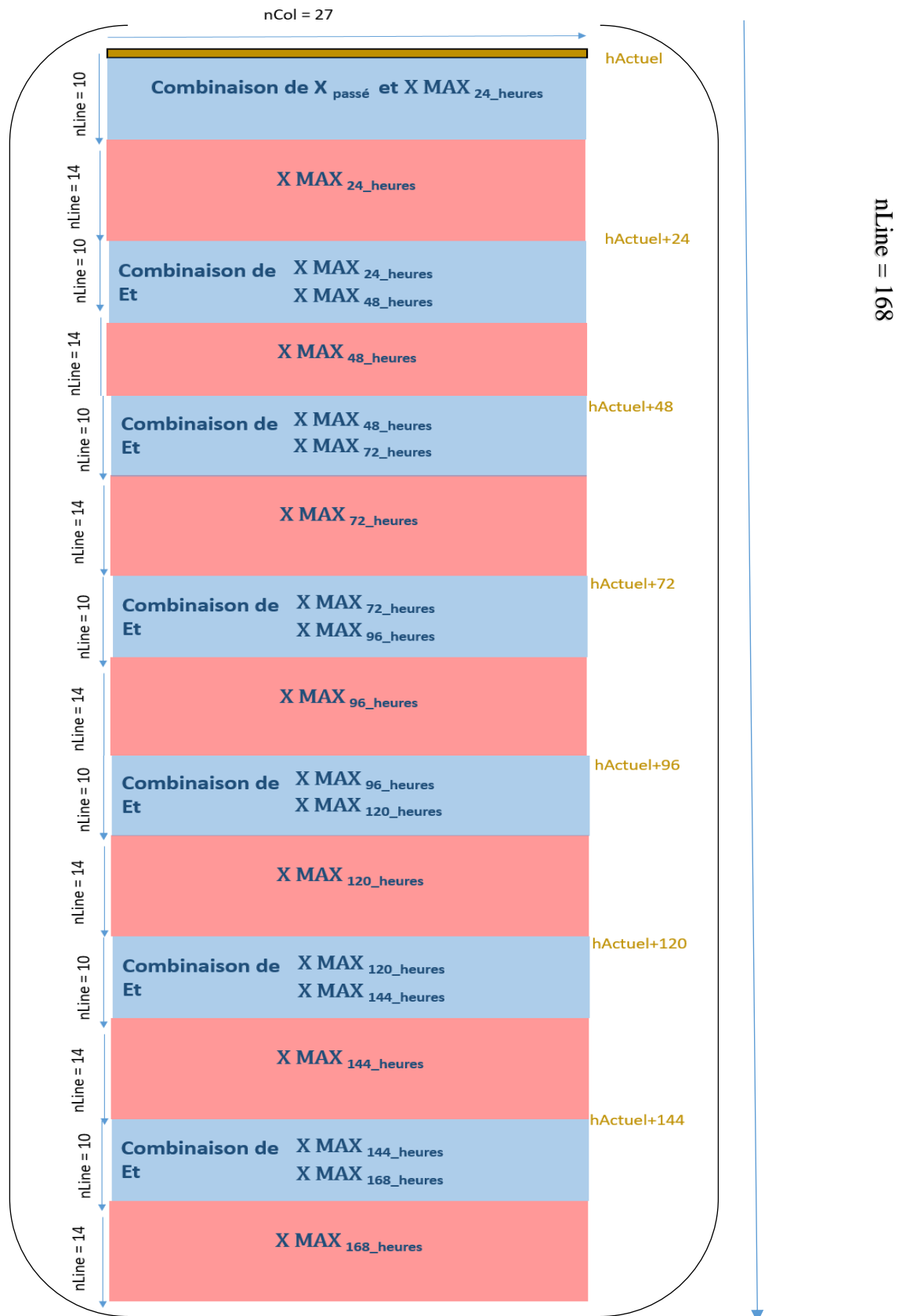


## Excel

## Prévision météo

Diagram illustrating a 2D array structure for a temperature forecast. The array is divided into two columns: "Température aller" and "Température retour". The rows are indexed from 0 to 2300, with a vertical arrow on the left indicating the range. A large diagonal watermark "Gratuit" is overlaid on the array.

### 9.13 Représentation de la matrice " $X_{final}$ "



## 9.14 Coefficients de corrélation modèle de prévision « prévision météo »

| hPassé | hFutur | Corrélation passée |                |                |
|--------|--------|--------------------|----------------|----------------|
|        |        | Corr Passé min     | Corr Passé max | Corr Passé moy |
| 168    | 48     | 0.63               | 0.967          | 0.792          |
| 168    | 120    | 0.63               | 0.967          | 0.792          |
| 168    | 144    | 0.63               | 0.967          | 0.792          |
| 168    | 168    | 0.63               | 0.967          | 0.792          |
| 96     | 48     | 0.657              | 0.976          |                |
| 144    | 168    | 0.642              | 0.968          | 0.804          |
| 120    | 168    | 0.651              | 0.972          | 0.817          |
| 96     | 168    | 0.657              | 0.976          | 0.835          |
| 72     | 168    | 0.683              | 0.983          | 0.86           |
| 120    | 48     | 0.651              | 0.979          |                |
| 192    | 168    | 0.635              | 0.968          | 0.781          |
| 216    | 168    | 0.562              | 0.969          | 0.769          |
| 336    | 168    | 0.412              | 0.954          | 0.712          |
| 504    | 168    | 0.473              | 0.895          | 0.705          |
| 192    | 48     | 0.635              | 0.968          | 0.781          |
| 240    | 168    | 0.51               | 0.968          | 0.757          |

| hPassé | hFutur | Corrélation future Prévision minmale |                         |                         |
|--------|--------|--------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
|        |        | Corr Futur Prev.min min              | Corr Futur Prev.min max | Corr Futur Prev.min moy |
| 168    | 48     | -0.603                               | 0.75                    | 0.183                   |
| 168    | 120    | -0.453                               | 0.734                   | 0.23                    |
| 168    | 144    | -0.458                               | 0.697                   | 0.243                   |
| 168    | 168    | -0.347                               | 0.681                   | 0.253                   |
| 96     | 48     | -0.388                               | 0.73                    |                         |
| 144    | 168    | -0.375                               | 0.728                   | 0.23                    |
| 120    | 168    | -0.398                               | 0.708                   | 0.209                   |
| 96     | 168    | -0.496                               | 0.726                   | 0.196                   |
| 72     | 168    | -0.518                               | 0.756                   | 0.191                   |
| 120    | 48     | -0.424                               | 0.749                   |                         |
| 192    | 168    | -0.347                               | 0.74                    | 0.277                   |
| 216    | 168    | -0.308                               | 0.749                   | 0.287                   |
| 336    | 168    | -0.332                               | 0.715                   | 0.293                   |
| 504    | 168    | -0.278                               | 0.702                   | 0.348                   |
| 192    | 48     | -0.45                                | 0.751                   | 0.262                   |
| 240    | 168    | -0.278                               | 0.711                   | 0.286                   |

| hPassé | hFutur | Corrélation future Prévision maxiamale |                         |                         |
|--------|--------|--|-------------------------|-------------------------|
|        |        | Corr Futur Prev.max min                | Corr Futur Prev.max max | Corr Futur Prev.max moy |
| 168    | 48     | -0.588                                 | 0.733                   | 0.182                   |
| 168    | 120    | -0.423                                 | 0.704                   | 0.232                   |
| 168    | 144    | -0.434                                 | 0.714                   | 0.253                   |
| 168    | 168    | -0.317                                 | 0.693                   | 0.251                   |
| 96     | 48     | -0.405                                 | 0.696                   |                         |
| 144    | 168    | -0.394                                 | 0.721                   | 0.228                   |
| 120    | 168    | -0.449                                 | 0.715                   | 0.205                   |
| 96     | 168    | -0.532                                 | 0.731                   | 0.197                   |
| 72     | 168    | -0.513                                 | 0.742                   | 0.198                   |
| 120    | 48     | -0.416                                 | 0.732                   |                         |
| 192    | 168    | -0.321                                 | 0.738                   | 0.275                   |
| 216    | 168    | -0.287                                 | 0.742                   | 0.284                   |
| 336    | 168    | -0.326                                 | 0.416                   | 0.293                   |
| 504    | 168    | -0.272                                 | 0.721                   | 0.351                   |
| 192    | 48     | -0.423                                 | 0.735                   | 0.185                   |
| 240    | 168    | -0.267                                 | 0.698                   | 0.285                   |

Rapport-gratuit.com

LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES





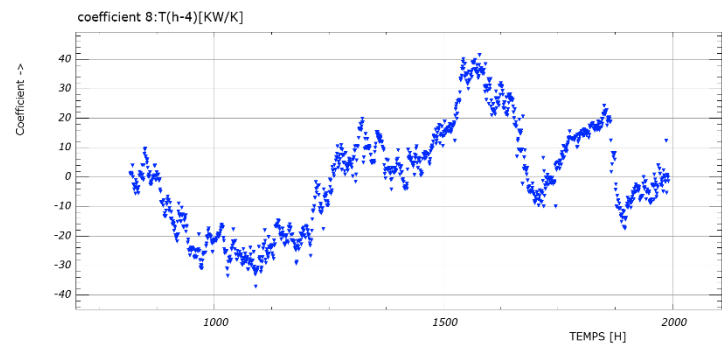
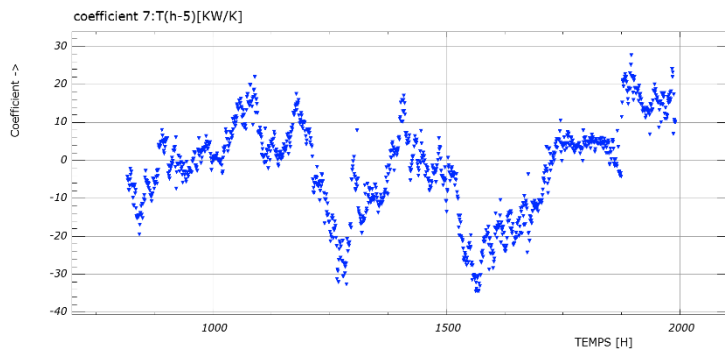
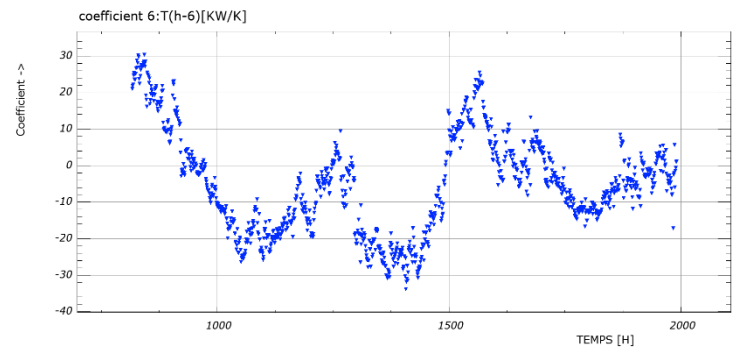
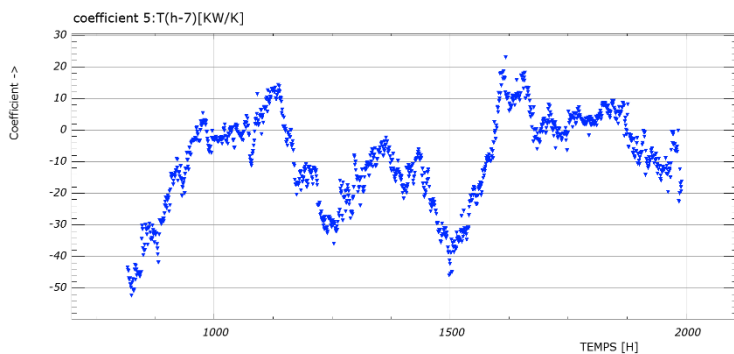
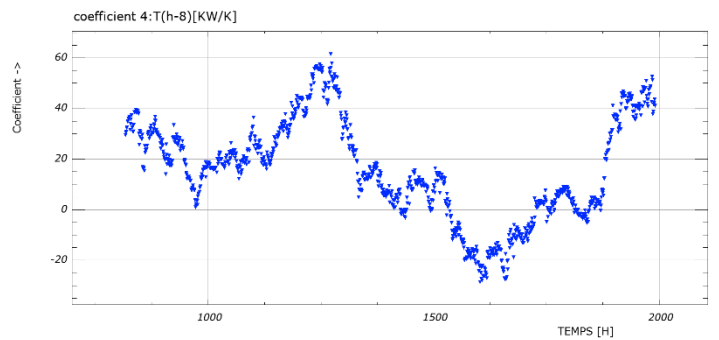
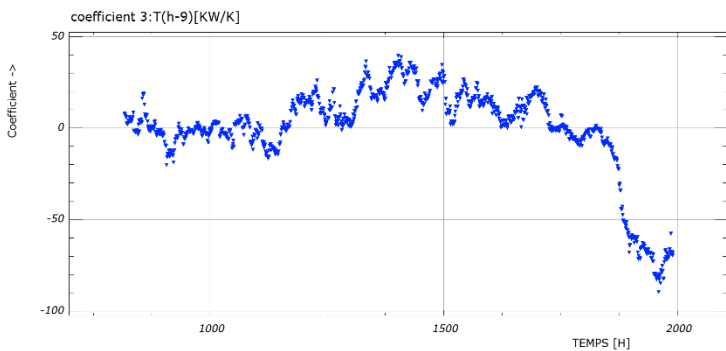
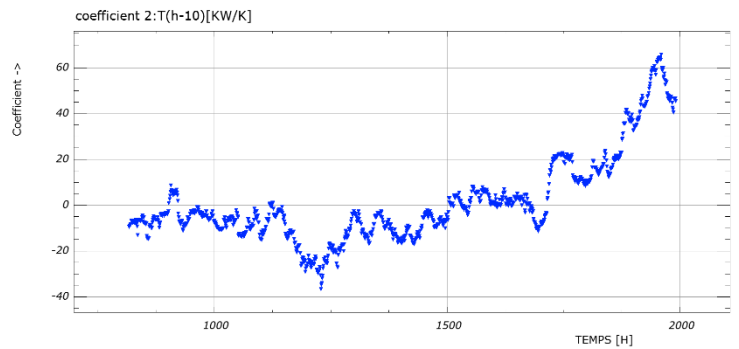
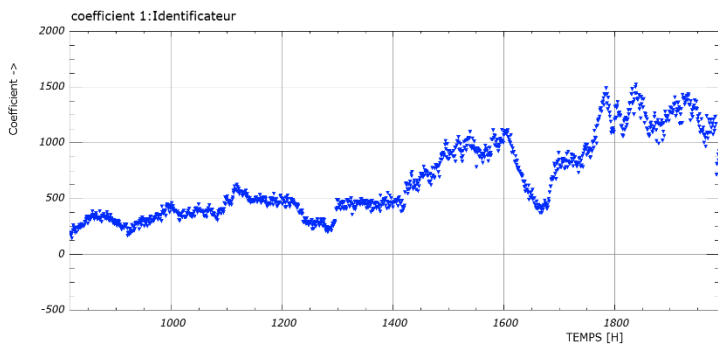
## 9.15 Résidus modèle de prévision « prévision météo »

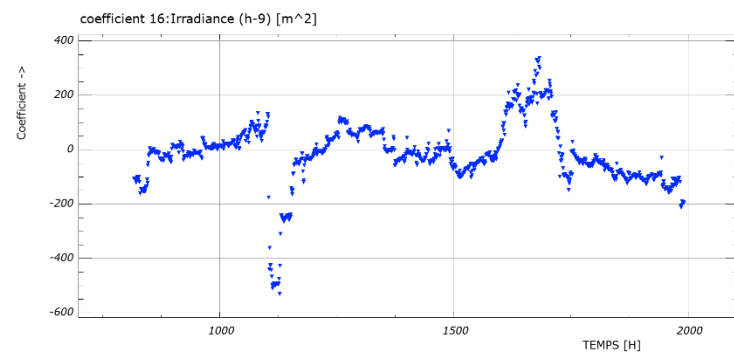
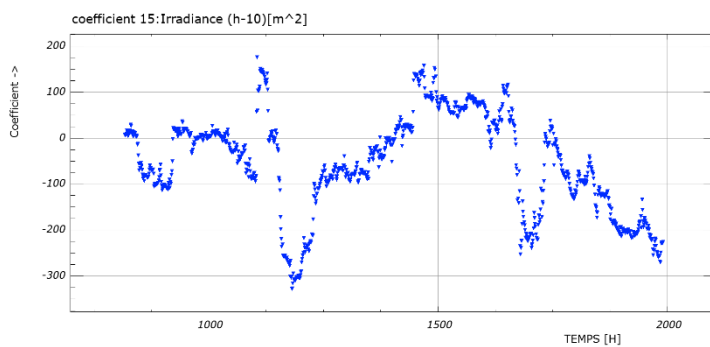
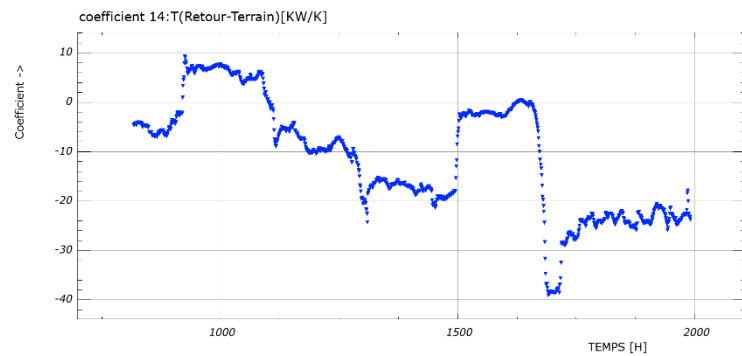
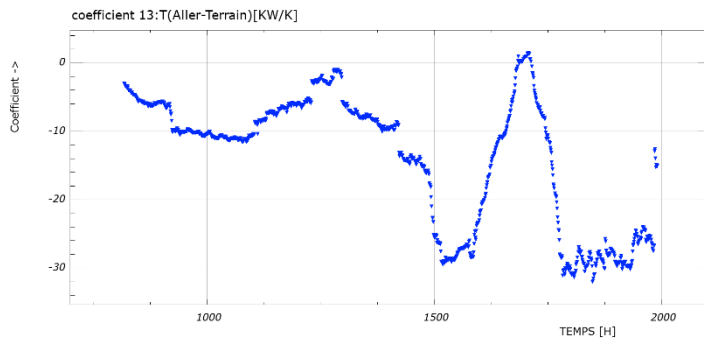
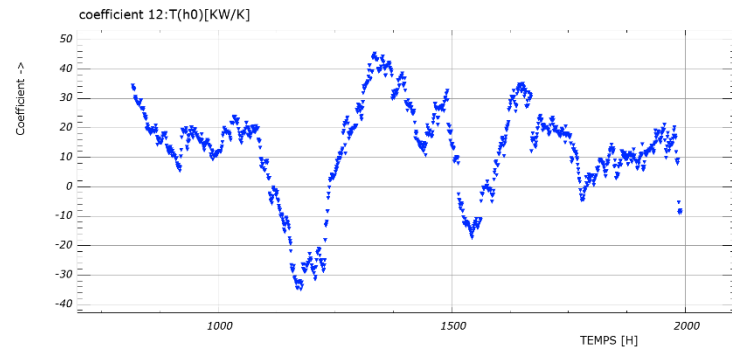
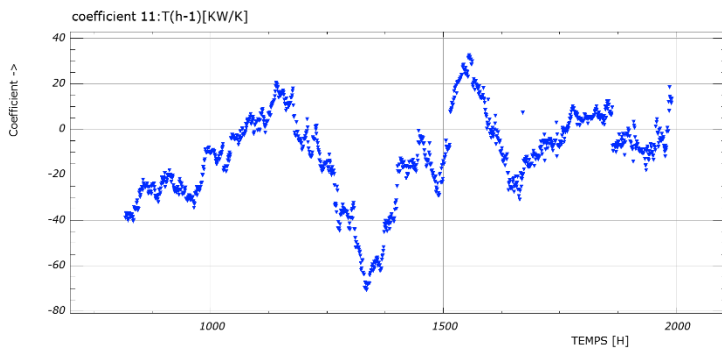
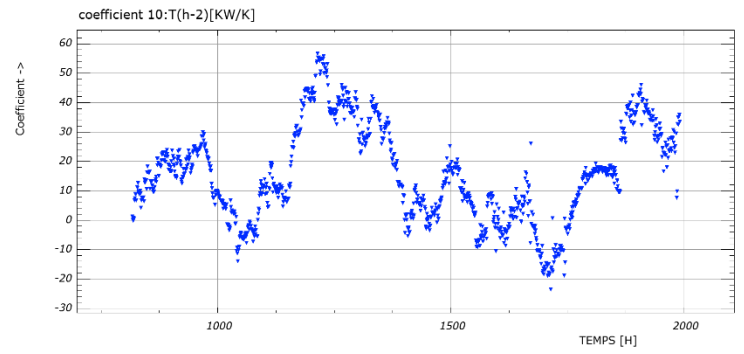
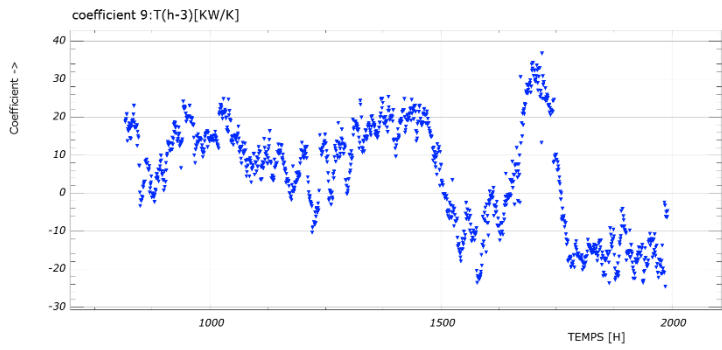
| hPassé | hFutur | Résidus passé    |                 |                  |                     |                  |                 |
|--------|--------|------------------|-----------------|------------------|---------------------|------------------|-----------------|
|        |        | Résidu Passé min | Erreur min [KW] | Résidu Passé max | Erreur max sur [KW] | Résidu Passé moy | Erreur moy [KW] |
| 168    | 48     | 2.942            | 494.256         | 8.128            | 1365.504            | 4.53             | 761.04          |
| 168    | 120    | 2.942            | 494.256         | 8.128            | 1365.504            | 4.53             | 761.04          |
| 168    | 144    | 2.942            | 494.256         | 8.128            | 1365.504            | 4.53             | 761.04          |
| 168    | 168    | 2.942            | 494.256         | 8.128            | 1365.504            | 4.53             | 761.04          |
| 96     | 48     | 3.118            | 523.824         | 33.474           | 5623.632            |                  |                 |
| 144    | 168    | 2.921            | 490.728         | 12.653           | 2125.704            | 5.44             | 783.36          |
| 120    | 168    | 3.018            | 507.024         | 10.773           | 1809.864            | 5.79             | 833.76          |
| 96     | 168    | 3.118            | 523.824         | 33.474           | 5623.632            | 5.33             | 767.52          |
| 72     | 168    | 2.958            | 496.944         | 16.588           | 2786.784            | 5.48             | 789.12          |
| 120    | 48     | 3.018            | 507.024         | 10.773           | 1809.864            |                  |                 |
| 192    | 168    | 3.025            | 508.2           | 7.188            | 1207.584            | 4.29             | 617.76          |
| 216    | 168    | 3.134            | 526.512         | 6.433            | 1080.744            | 4.15             | 597.6           |
| 336    | 168    | 3.098            | 520.464         | 5.899            | 991.032             | 3.856            | 555.264         |
| 504    | 168    | 2.409            | 404.712         | 4.873            | 818.664             | 3.438            | 495.072         |
| 192    | 48     | 3.025            | 508.2           | 7.188            | 1207.584            | 4.3              | 619.2           |
| 240    | 168    | 3.465            | 582.12          | 5.997            | 1007.496            | 4.05             | 583.2           |

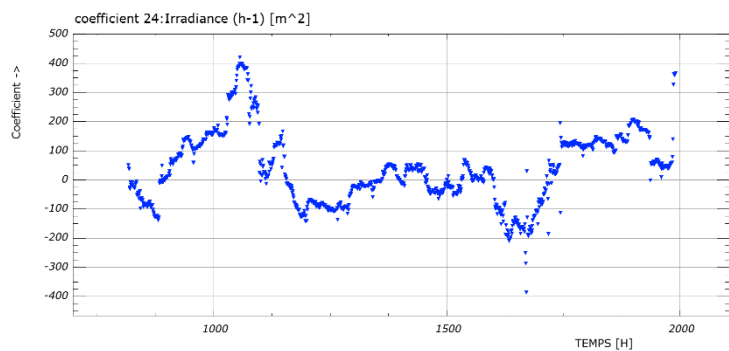
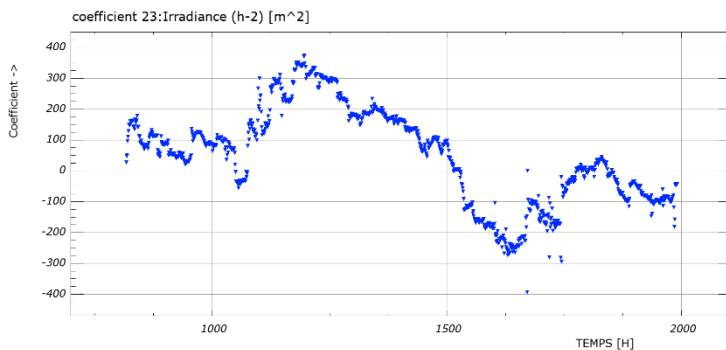
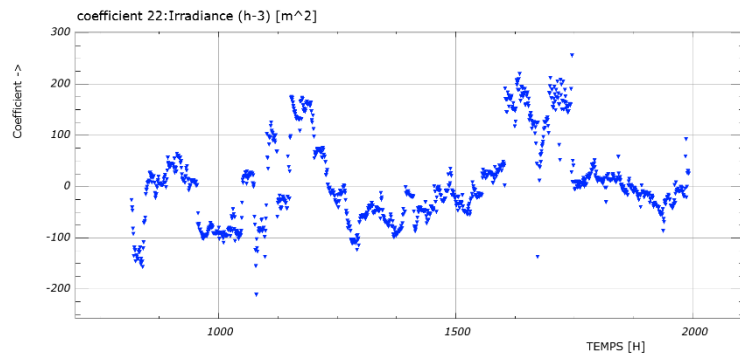
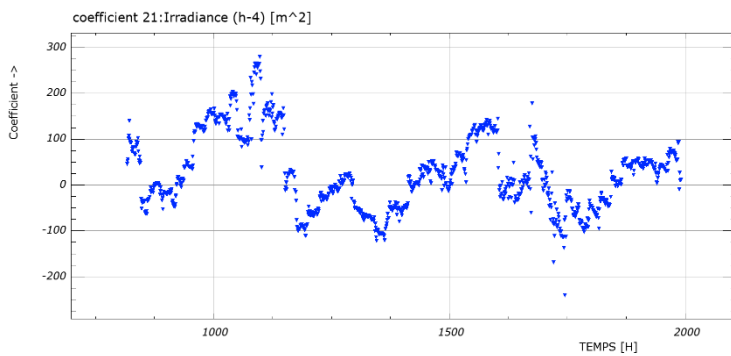
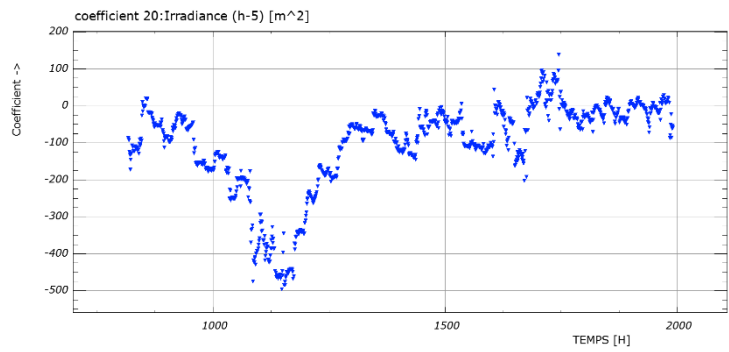
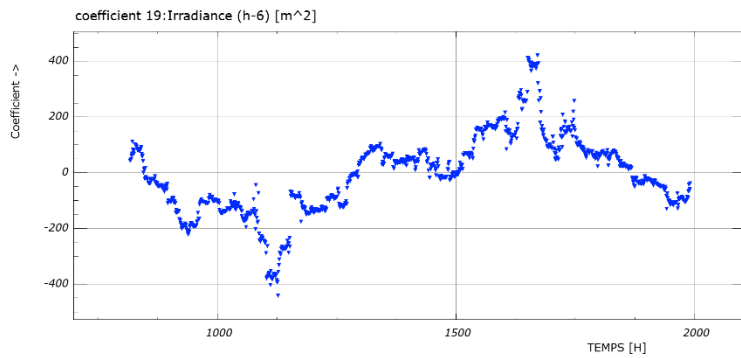
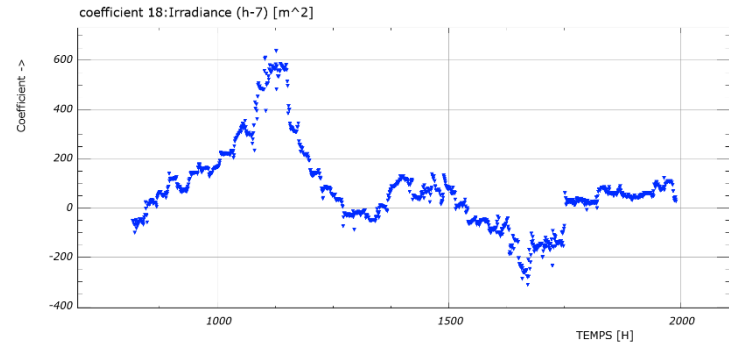
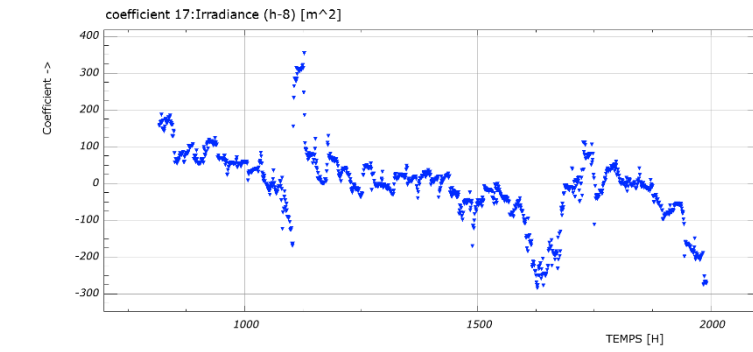
| hPassé | hFutur | Résidus futur Prévision minimale |                     |                      |                     |                      |                     |
|--------|--------|----------------------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
|        |        | Résidu Futur.min min             | Erreur.min min [KW] | Résidu Futur.min max | Erreur.min max [KW] | Résidu Futur.min moy | Erreur.min moy [KW] |
| 168    | 48     | 10.405                           | 499.44              | 50.007               | 2400.336            | 21.52                | 1032.96             |
| 168    | 120    | 7.573                            | 363.504             | 33.038               | 1585.824            | 15.02                | 720.96              |
| 168    | 144    | 7.045                            | 338.16              | 31.838               | 1528.224            | 14.178               | 680.544             |
| 168    | 168    | 6.606                            | 317.088             | 31.389               | 1506.672            | 13.578               | 651.744             |
| 96     | 48     | 11.158                           | 535.584             | 1027                 | 49296               |                      |                     |
| 144    | 168    | 6.637                            | 318.576             | 36.107               | 1733.136            | 14.125               | 678                 |
| 120    | 168    | 6.79                             | 325.92              | 31.486               | 1511.328            | 13.937               | 668.976             |
| 96     | 168    | 6.742                            | 323.616             | 556.304              | 26702.592           | 16.898               | 811.104             |
| 72     | 168    | 7.875                            | 378                 | 152.376              | 7314.048            | 17.668               | 848.064             |
| 120    | 48     | 10.803                           | 518.544             | 48.259               | 2316.432            |                      |                     |
| 192    | 168    | 6.897                            | 331.056             | 25.67                | 1232.16             | 13.117               | 629.616             |
| 216    | 168    | 7.085                            | 340.08              | 25.691               | 1233.168            | 12.771               | 613.008             |
| 336    | 168    | 7.167                            | 344.016             | 30.271               | 1453.008            | 13.361               | 641.328             |
| 504    | 168    | 7.751                            | 372.048             | 34.175               | 1640.4              | 14.172               | 680.256             |
| 192    | 48     | 10.304                           | 494.592             | 46.732               | 2243.136            | 21.185               | 1016.88             |
| 240    | 168    | 7.114                            | 341.472             | 26.204               | 1257.792            | 12.793               | 614.064             |

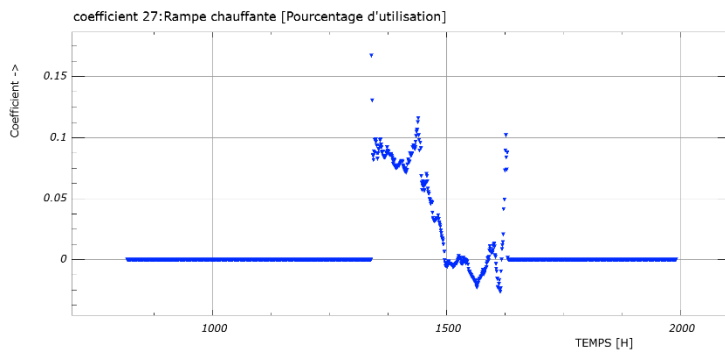
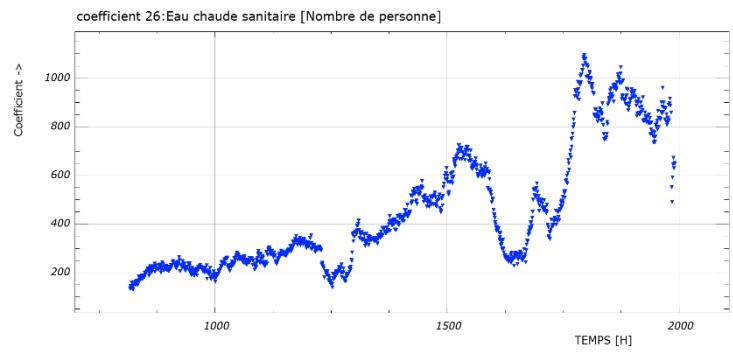
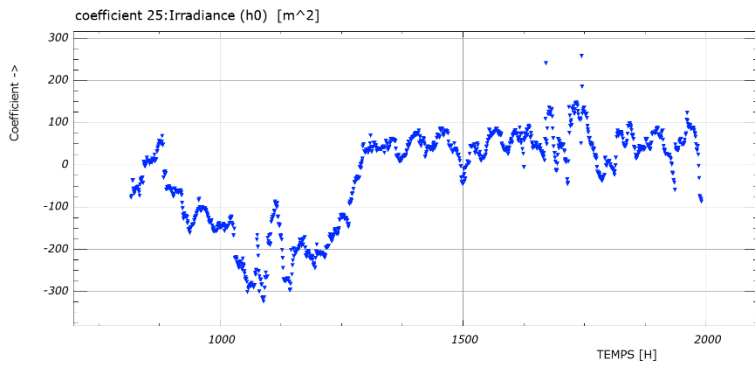
| hPassé | hFutur | Résidus futur prévision maximale |                     |                      |                     |                      |                     |
|--------|--------|----------------------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
|        |        | Résidu Futur.max min             | Erreur.max min [KW] | Résidu Futur.max max | Erreur.max max [KW] | Résidu Futur.max moy | Erreur.max moy [KW] |
| 168    | 48     | 10.418                           | 500.064             | 44.848               | 2152.704            | 20.58                | 987.84              |
| 168    | 120    | 7.209                            | 346.032             | 32.243               | 1547.664            | 14.261               | 684.528             |
| 168    | 144    | 6.579                            | 315.792             | 32.043               | 1538.064            | 13.39                | 642.72              |
| 168    | 168    | 6.147                            | 295.056             | 31.2621              | 1500.5808           | 12.688               | 609.024             |
| 96     | 48     | 9.803                            | 470.544             | 879.099              | 42196.752           |                      |                     |
| 144    | 168    | 6.48                             | 311.04              | 37.43                | 1796.64             | 13.36                | 641.28              |
| 120    | 168    | 6.587                            | 316.176             | 32.01                | 1536.48             | 13.226               | 634.848             |
| 96     | 168    | 7.171                            | 344.208             | 533.441              | 25605.168           | 16.117               | 773.616             |
| 72     | 168    | 7.768                            | 372.864             | 142.885              | 6858.48             | 17.266               | 828.768             |
| 120    | 48     | 9.754                            | 468.192             | 43.412               | 2083.776            |                      |                     |
| 192    | 168    | 6.676                            | 320.448             | 23.109               | 1109.232            | 12.168               | 584.064             |
| 216    | 168    | 6.908                            | 331.584             | 22.983               | 1103.184            | 11.867               | 569.616             |
| 336    | 168    | 6.633                            | 318.384             | 29.534               | 1417.632            | 12.203               | 585.744             |
| 504    | 168    | 6.707                            | 321.936             | 30.216               | 1450.368            | 12.636               | 606.528             |
| 192    | 48     | 10.442                           | 501.216             | 41.832               | 2007.936            | 20.194               | 969.312             |
| 240    | 168    | 7.049                            | 338.352             | 24.347               | 1168.656            | 12.039               | 577.872             |

## 9.16 Coefficients BETA pour le modèle : « prévision météo »

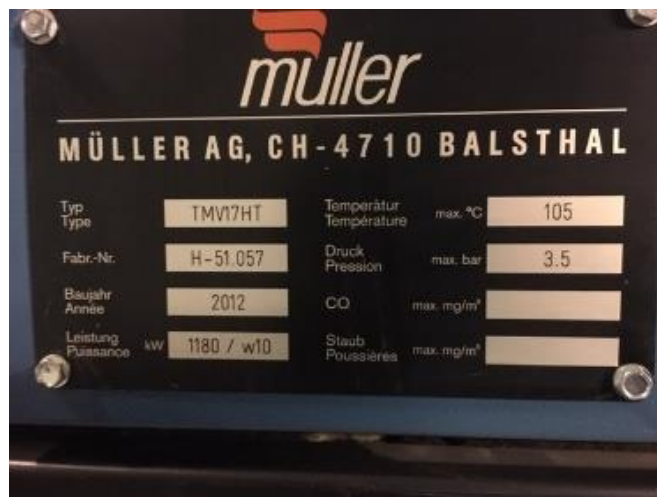
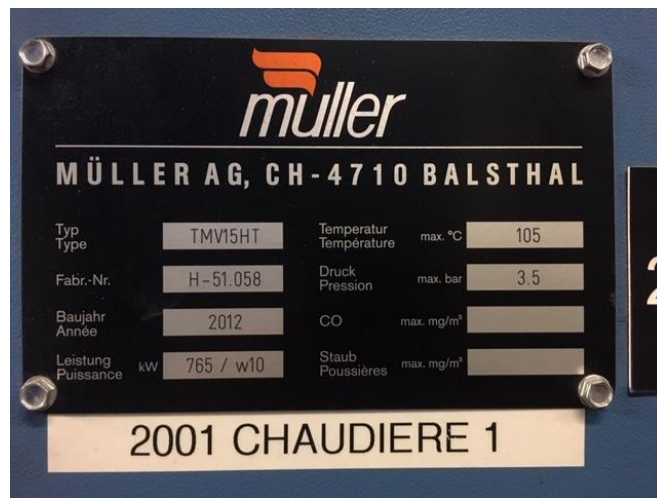








### 9.17 Plaquettes signalétiques



### 9.18 Gestion des chaudières

Excel : *fonction\_cout.xlsm*

Gestion des chaudières sur la clé USB et sur : \R

**Ajouter dans les options, le complément ToolPAk, ToolPak-VBA et complément solveur pour tester la gestion des chaudières**



## 9.19 Structure de données en provenance de Verbier

E\_C.xml

| N° Echangeur/Sous-Station | ECS | CH | RC | P | Puissance nominale Chaudière / échangeur [kW] | Adresse            |
|---------------------------|-----|----|----|---|---|--------------------|
| Chaudière Trois Rocs 1    | 1   | 1  | 1  | 1 | 800   | <a href="#">1</a>  |
| Chaudière Trois Rocs 2    | 1   | 1  | 1  | 1 | 1200  | <a href="#">2</a>  |
| Chaudière Trois Rocs 3    | 1   | 1  | 1  | 1 | 1200  | <a href="#">3</a>  |
| Chaudière Mondzeu 1       | 1   | 1  | 1  | 1 | 1000  | <a href="#">4</a>  |
| Chaudière Mondzeu 2       | 1   | 1  | 1  | 1 | 1000  | <a href="#">5</a>  |
| Groupe A: Sous-station 1  | 1   | 1  | 0  | 0 | 250   | <a href="#">6</a>  |
| Groupe A: Sous-station 1  | 0   | 0  | 1  | 0 | 250   | <a href="#">7</a>  |
| Groupe A: Sous-station 2  | 1   | 1  | 0  | 0 | 350   | <a href="#">8</a>  |
| Groupe A: Sous-station 3  | 1   | 1  | 0  | 0 | 450   | <a href="#">9</a>  |
| Groupe B: Sous-station 1  | 1   | 1  | 0  | 0 | 500   | <a href="#">10</a> |
| Groupe B: Sous-station 1  | 0   | 0  | 1  | 0 | 500   | <a href="#">11</a> |
| Groupe B: Sous-station 1  | 0   | 0  | 0  | 1 | 500   | <a href="#">12</a> |
| Groupe B: Sous-station 2  | 1   | 1  | 0  | 0 | 300   | <a href="#">13</a> |
| Groupe C: Sous-station 1  | 1   | 1  | 0  | 0 | 100   | <a href="#">14</a> |

### Légende

- ECS: *Eau chaude sanitaire*
- CH: *Chauffage*
- RC: *Rampe chauffante*
- P: *Piscine*

Indisponibilité.xml

| Adresse           | Date de    | Heure de | Date à     | Heure à |
|-------------------|------------|----------|------------|---------|
| <a href="#">1</a> | 2019.07.01 | 15:00    | 2019.07.02 | 17:00   |
| <a href="#">4</a> | 2019.07.22 | 9:00     | 2019.07.24 | 8:00    |
| <a href="#">5</a> | 2019.07.24 | 9:00     | 2019.07.26 | 8:00    |

2019.06.26.xml

| Adresse            | Date       | Heure de | Heure à | P Moy [kW] | P Min [kW] | P Max [kW] | Ta Moy [°C] | Ta Min [°C] | Ta Max [°C] | Tr Moy [°C] | Tr Min [°C] | Tr Max [°C] |
|--------------------|------------|----------|---------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <a href="#">1</a>  | 2019.06.26 | 8:00     | 9:00    | 200        | 175        | 220        | 86.9        | 85.7        | 87.0        | 60.7        | 60.4        | 60.9        |
| <a href="#">2</a>  | 2019.06.26 | 8:00     | 9:00    | 400        | 320        | 450        | 86.9        | 85.7        | 87.0        | 60.7        | 60.4        | 60.9        |
| <a href="#">3</a>  | 2019.06.26 | 8:00     | 9:00    | 400        | 360        | 425        | 86.9        | 85.7        | 87.0        | 60.7        | 60.4        | 60.9        |
| <a href="#">6</a>  | 2019.06.26 | 8:00     | 9:00    | 200        | 180        | 210        | 86.1        | 85.8        | 86.5        | 61.2        | 61.0        | 61.5        |
| <a href="#">7</a>  | 2019.06.26 | 8:00     | 9:00    | 200        | 180        | 210        | 86.1        | 85.8        | 86.5        | 61.2        | 61.0        | 61.5        |
| <a href="#">8</a>  | 2019.06.26 | 8:00     | 9:00    | 50         | 47         | 55         | 86.1        | 85.8        | 86.5        | 61.2        | 61.0        | 61.5        |
| <a href="#">9</a>  | 2019.06.26 | 8:00     | 9:00    | 50         | 45         | 57         | 86.1        | 85.8        | 86.5        | 61.2        | 61.0        | 61.5        |
| <a href="#">10</a> | 2019.06.26 | 8:00     | 9:00    | 50         | 42         | 53         | 86.0        | 85.2        | 86.4        | 61          | 60.7        | 61.5        |
| <a href="#">11</a> | 2019.06.26 | 8:00     | 9:00    | 100        | 80         | 120        | 86.0        | 85.2        | 86.4        | 61          | 60.7        | 61.5        |
| <a href="#">12</a> | 2019.06.26 | 8:00     | 9:00    | 100        | 90         | 105        | 86.0        | 85.2        | 86.4        | 61          | 60.7        | 61.5        |
| <a href="#">13</a> | 2019.06.26 | 8:00     | 9:00    | 100        | 75         | 135        | 86.0        | 85.2        | 86.4        | 61          | 60.7        | 61.5        |
| <a href="#">14</a> | 2019.06.26 | 8:00     | 9:00    | 100        | 84         | 112        | 86.0        | 85.2        | 86.4        | 61          | 60.7        | 61.5        |
| <a href="#">1</a>  | 2019.06.26 | 9:00     | 10:00   | 250        | 231        | 265        | 85.8        | 85.2        | 86.2        | 60.7        | 60.4        | 61.2        |

### Légende

- PT: *Puissance fournie*
- Ta: *Température CAD aller*
- Tr: *Température CAD retour*

### 9.20 Fiches techniques des chaudières

Fiche techniques disponibles depuis le disque:\R

*mondzeu1.pdf*  
*mondzeu2.pdf*  
*centresportif.pdf*

### 9.21 Le software de la prévision

Code Qt : *TD\_Bornet*

### 9.22 Vidéos

Vidéo des résultats sur clé USB

### 9.23 Données

- 1 : fin\_pr3.xlsx*
- 2 : strucutre\_modèle\_météo\_relle.xlsx*
- 3 : modele\_meteo\_reelle\_essai\_resultats.xlsx*
- 4 : strucutre\_prevision\_meteo.xlsx*
- 5 : temperature\_rayonnement\_reel.xlsx*
- 6 : Données départ cad 3Rocs septembre\_mi-novembre 2018.xlsx*
- 7 : fonction\_cout.xlsm*
- 8 : Température\_aller\_retour.xlsx*
- 9 : Température\_terrain.xlsx*

*Rapport-gratuit.com*   
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

