

RAPPORT DE STAGE : CHAUFFE-EAU ÉLECTRIQUE AVEC PV

SOMMACAL Mathis
M1 EEA Parc I3A
Année universitaire 2023/2024

Table des matières

I	Déroulement général du projet	2
1	Compréhension du fonctionnement d'un chauffe-eau électrique et mise en équation d'un modèle en temps continu, suivi de sa discrétisation	3
1.1	Fonctionnement panneaux photovoltaïque classique avec batterie	3
1.2	Fonctionnement des panneaux solaire photovoltaïque avec stockage via chauffe-eau sanitaire	4
1.3	Mise en équation d'un modèle en temps continu, puis sa discrétisation	5
1.3.1	Equation en continu	5
1.3.2	Equation en temps discret	5
2	Developpement d'un code de simulation du modèle et test avec les données d'entrée exogènes	6
2.1	Données et stratégies	6
2.1.1	Données du système	6
2.1.2	Variables à calculer lors de la simulation	6
2.1.3	Les différentes stratégies à mettre en place	6
2.2	Développement du modèle sur MATLAB/SIMULINK	7
2.2.1	Réflexion préliminaire	7
2.2.2	Éléments à modéliser	7
2.3	stratégie 1	8
2.3.1	Conception du fichier simulink	10
2.3.2	Les sous-systèmes	10
3	Développement et test en simulation d'une commande de référence	15
3.1	Stratégie 1	15
3.2	Stratégie 2	16
3.3	Stratégie 3	20
3.3.1	Paramètres d'optimisation	20
3.3.2	L'algorithme génétique	20
3.3.3	Résultats de l'optimisation	22
3.4	Bilan	24
3.4.1	Stratégie 1	24
3.4.2	Stratégie 2	24
3.4.3	Stratégie 3	24
3.4.4	Résultats	24
II	Annexes	25

Première partie

Déroulement général du projet

Chapitre 1

Compréhension du fonctionnement d'un chauffe-eau électrique et mise en équation d'un modèle en temps continu, suivi de sa discrétisation

1.1 Fonctionnement panneaux photovoltaïque classique avec batterie

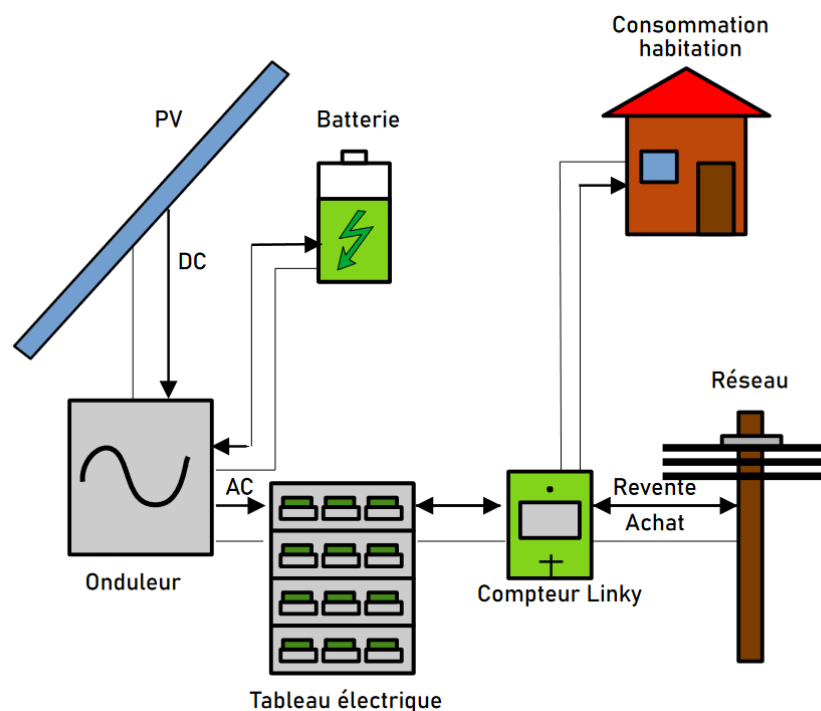


FIGURE 1.1 – Schéma PV classique

Le dispositif de panneaux photovoltaïques capte l'énergie lumineuse émise par le soleil, la convertissant ainsi en électricité. Cette électricité produite est généralement en courant continu (DC) et doit être convertie en courant alternatif (AC) par un onduleur pour être utilisée par les

appareils électriques domestiques.

L'électricité générée par les panneaux solaires est priorisée pour répondre aux besoins de consommation domestique. Le surplus d'énergie produit est dirigé soit vers une batterie de stockage pour une utilisation ultérieure, soit vers le réseau électrique, où il peut être vendu.

En cas de demande électrique excédant la production des panneaux photovoltaïques, l'électricité nécessaire est alors achetée auprès du réseau public.

1.2 Fonctionnement des panneaux solaire photovoltaïque avec stockage via chauffe-eau sanitaire

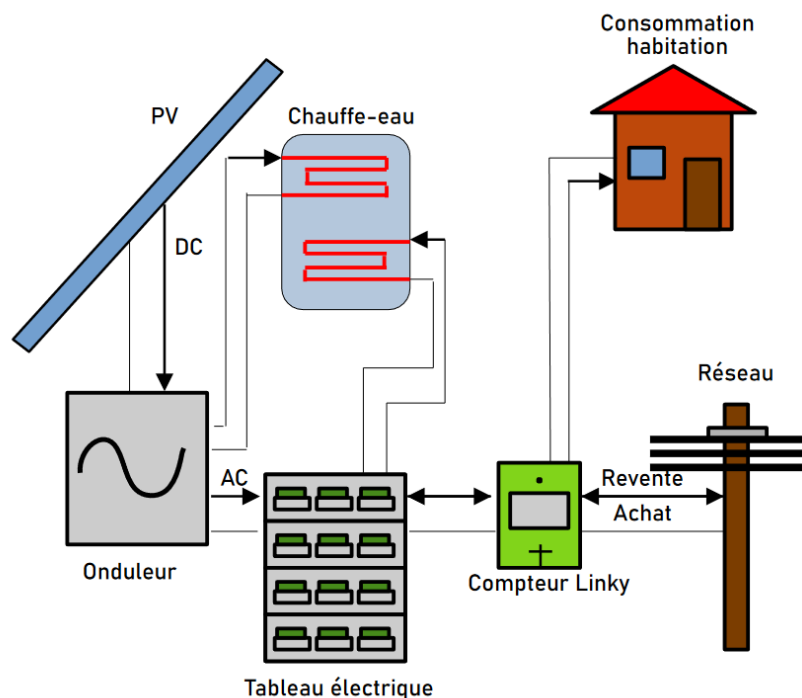


FIGURE 1.2 – Schéma PV stockage chauffe-eau

Dans le cas de notre sujet, au lieu d'être stockée électriquement via une batterie, l'énergie électrique en surplus est transformée en chaleur via une résistance et est stockée par l'eau dans le ballon d'eau chaude sanitaire.

Ce système offre un moyen efficace d'utiliser l'électricité produite par les panneaux solaires lorsqu'elle dépasse les besoins immédiats de la maison, tout en offrant un avantage supplémentaire en fournissant de l'eau chaude domestique grâce à une source d'énergie propre et renouvelable.

1.3 Mise en équation d'un modèle en temps continu, puis sa discrétisation

1.3.1 Equation en continu

$$Q = m * C * (T_f - T_i) \quad (1.1)$$

où :

T : Température (en °K)
 C : Capacité calorifique de l'eau (en J/Kg.K)
 m : masse de l'eau (en Kg)
 Q : Energie à envoyer (en J)

Pour obtenir la puissance en Watt, on divise par le temps des 2 côtés de l'équation. On obtient la formule suivante :

$$\phi = Qm * C * (T_f - T_i) \quad (1.2)$$

où :

T : Température (en °K)
 C : Capacité calorifique de l'eau (en J/Kg.K)
 Qm : Débit massique de l'eau (en Kg/s)
 ϕ : Energie à envoyer (en W)

Nous voulons déterminer le débit d'eau chaude dans le ballon donc :

$$\frac{dVec}{dt} = \frac{\phi}{\rho * C * (Tec - Tef)} \quad (1.3)$$

où :

T : Température (en °K)
 C : Capacité calorifique de l'eau (en J/Kg.K)
 $dVec$: différence de volume d'eau chaude (en m^3)
 ϕ : Energie à envoyer (en W)

1.3.2 Equation en temps discret

$$\frac{Vec(k+1) - Vec(k)}{Te} = \frac{\phi(k)}{\rho * C * (Tec - Tef) - ECS(k)} \quad (1.4)$$

où :

T : Température (en °K)
 C : Capacité calorifique de l'eau (en J/Kg.K)
 ECS : Débit de sortie d'eau chaude (en m^3/s)
 ϕ : Puissance à envoyer (en W)
 Te : Temps d'échantillonnage (en min)

Chapitre 2

Développement d'un code de simulation du modèle et test avec les données d'entrée exogènes

2.1 Données et stratégies

2.1.1 Données du système

Type de données	Valeurs
T_{eau_chaude}	60°C
T_{eau_froide}	10°C
V_{ballon}	0.150 m ³
$V_{eau_chaude_min}$	0.03 m ³
P_{elec}	1500 W (allumé)
Temps de simulation	1 semaine
Temps d'échantillonnage	10 min
ρ_{eau}	1000 Kg/m ³
C_{eau}	4185 J/Kg

TABLE 2.1 – Données du système de chauffe-eau solaire

2.1.2 Variables à calculer lors de la simulation

- Coût électrique
- Volume d'eau chaude dans le ballon en fonction du temps
- Production du système de panneaux PV
- La surproduction du système PV
- L'autoconsommation

2.1.3 Les différentes stratégies à mettre en place

Stratégie 1 : Basique

- Allumer la résistance en heures creuses si le ballon n'est pas plein d'eau chaude.
- Ne pas allumer la résistance en heures pleines.
- Éteindre la résistance si le ballon a atteint le volume maximal d'eau chaude.

Stratégie 2 : À base de règles

- Allumer la résistance en heures creuses si le ballon n'est pas plein d'eau chaude avec ou sans surplus photovoltaïque.

- Allumer la résistance en heures pleines si le surplus est suffisant pour que le prix à payer soit inférieur au tarif heures creuses.
- Allumer la résistance si le volume d'eau chaude est inférieur à 20% du volume maximal.
- Éteindre la résistance si le ballon a atteint le volume maximal d'eau chaude.

Stratégie 3 : Avec optimisation

- Minimiser le coût sur 24 heures grâce à une optimisation du vecteur de puissance de la résistance électrique (1 optimisation pour chaque jour de la semaine).
- Respecter des contraintes telles que le volume d'eau chaude doit être supérieur à 20% et inférieur au volume maximal.

2.2 Développement du modèle sur MATLAB/SIMULINK

2.2.1 Réflexion préliminaire

Avant de commencer à développer le modèle, je me suis penché sur quels éléments j'allais devoir modéliser :

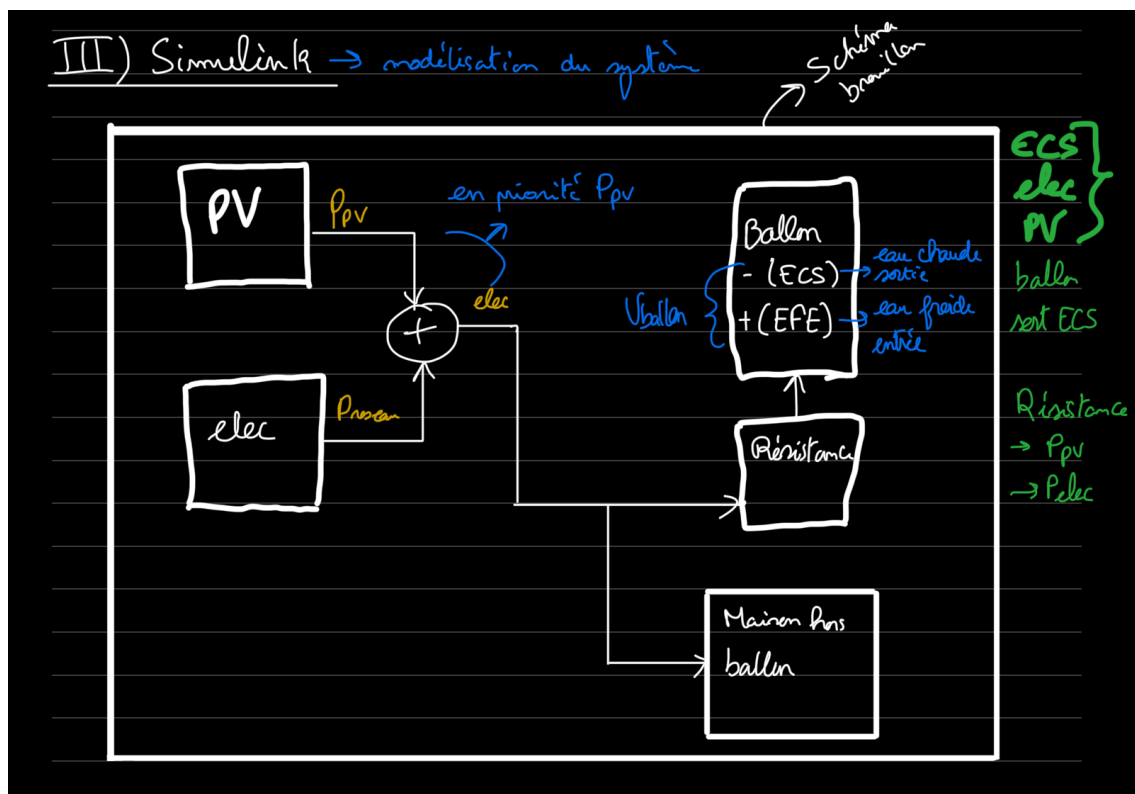


FIGURE 2.1 – Schéma brouillon du simulink

2.2.2 Éléments à modéliser

- La production du système PV
- L'achat de l'électricité sur le réseau
- La consommation de la maison
- Le volume d'eau chaude dans le ballon
- La consommation de la résistance du ballon

J'ai aussi créé un fichier live script afin d'obtenir les variables pour le modèle simulink et de visualiser les séries des variables du système.

2.3 stratégie 1

Pour le script matlab, j'ai commencé par charger les données et les stocker dans des variables en les convertissant dans les unités les plus appropriées.

Pour TEDF qui est le vecteur de prix de l'électricité acheté en €/kWh, je l'ai converti en €/W.10 min car notre temps d'échantillonnage est de 10 min.

Ensuite j'ai créé des variables HP (heures pleines) et HC (heures creuses) afin de pouvoir mieux les utiliser comme contraintes pour les boucles.

Ensuite j'ai calculé la quantité d'eau que la résistance peut chauffer dans le ballon en 10 min :

$$C_{Te} = \frac{\phi \cdot Te}{\rho \cdot C \cdot (T_f - T_i)}; \quad (2.1)$$

Où :

C_{Te} est le volume d'eau chaude produite après 10 minutes de chauffe

ϕ est la puissance de la résistance, dans notre cas $\phi = 1500$ W

Te est le temps d'échantillonnage

ρ est la masse volumique de l'eau

C est la capacité calorifique de l'eau

T_f est la température de l'eau chaude

T_i est la température de l'eau froide

Calcul du volume d'eau que l'on peut chauffer sur Te (10 min)

```

% Calcul du volume d'eau que l'on peut chauffer sur 10 min
% Equation discrétisée => (Vec(k+1) - Vec(k)) / Te = phi / (rho*C*(Tf-Ti))
% On a donc dVec = phi * Te / (rho*C*(Tf-Ti))
Te = 10*60; % en s
rho = 1000; % en Kg/m3
C_Te = phi * Te / (rho*C*(Tf-Ti));
disp(['Si le volume d eau chaude > 0.150 - ', num2str(C_Te)])

```

Si le volume d eau chaude > 0.150 - 0.0043011

FIGURE 2.2 – Calcul du volume d'eau chaude produit après 10 min de chauffe

Ce résultat vas nous permettre de mettre une marge de sécurité dans notre boucle afin que le volume d'eau chaude dans le ballon ne dépasse pas le volume du ballon.

Ensuite j'ai créé une boucle nous permettant d'obtenir le vecteur de résistance qui respecte le cahier des charges de la stratégie 1 et de calculer le volume d'eau chaude dans le ballon.

Résistance

```

% Calcul de V_ec
Vec = zeros(1009,1);
Vec(1) = 0.150; % m3
Resistance_bool = zeros(1009,1);
Resistance_bool(1) = 0;
% Calcul du fonctionnement de la résistance
Resistance = zeros(1009,1);
for i = 2 : 1009
    if HC(i) > 0 && Vec(i-1) < (0.150 - C_Te)
        Resistance(i) = 1500;
        Resistance_bool(i) = 1;
        Vec(i) = Vec(i-1)+(C_Te * Resistance_bool(i)) - ECS(i);
    else
        Resistance(i) = 0;
        Resistance_bool(i) = 0;
        Vec(i) = Vec(i-1)+(C_Te * Resistance_bool(i)) - ECS(i);
    end
end
end

```

FIGURE 2.3 – Calcul du vecteur du fonctionnement de la résistance et du volume d'eau chaude dans le ballon

Dans les conditions du **if**, si $HC(i) > 0$ (on est en heure creuses) && $Vec(i-1) < (0.150 - C_{TE})$ (Volume d'eau chaude dans le ballon à l'instant précédant est inférieur au volume du ballon - la marge de sécurité)

On chauffe.

Else on ne chauffe pas On obtient finalement le tracé des résultats :

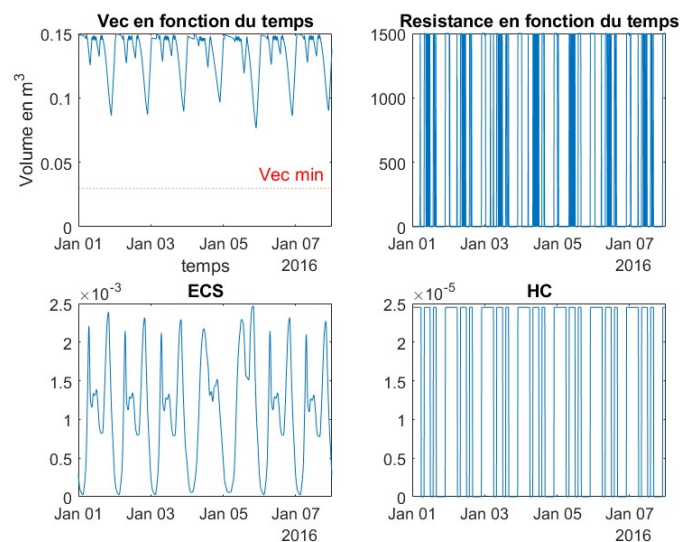


FIGURE 2.4 – Tracé des résultats de la stratégie 1

2.3.1 Conception du fichier simulink

J'ai donc commencé à créer le système précédant sur simulink :

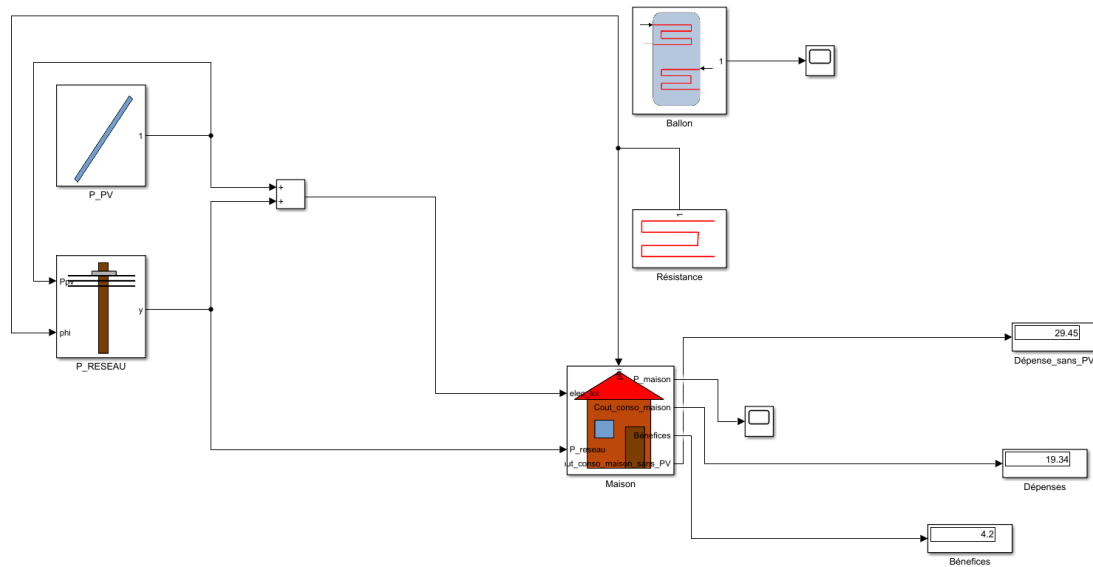


FIGURE 2.5 – Modèle simulink

2.3.2 Les sous-systèmes

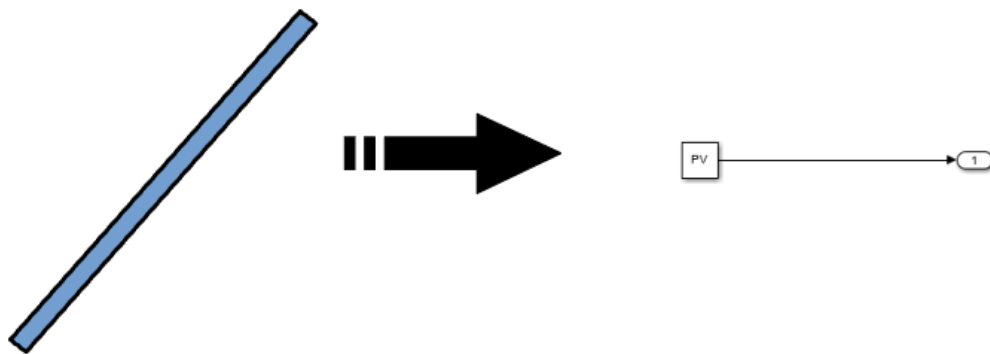


FIGURE 2.6 – sousystème PV

Le sousystème du panneau PV est juste constitué des données de PV.

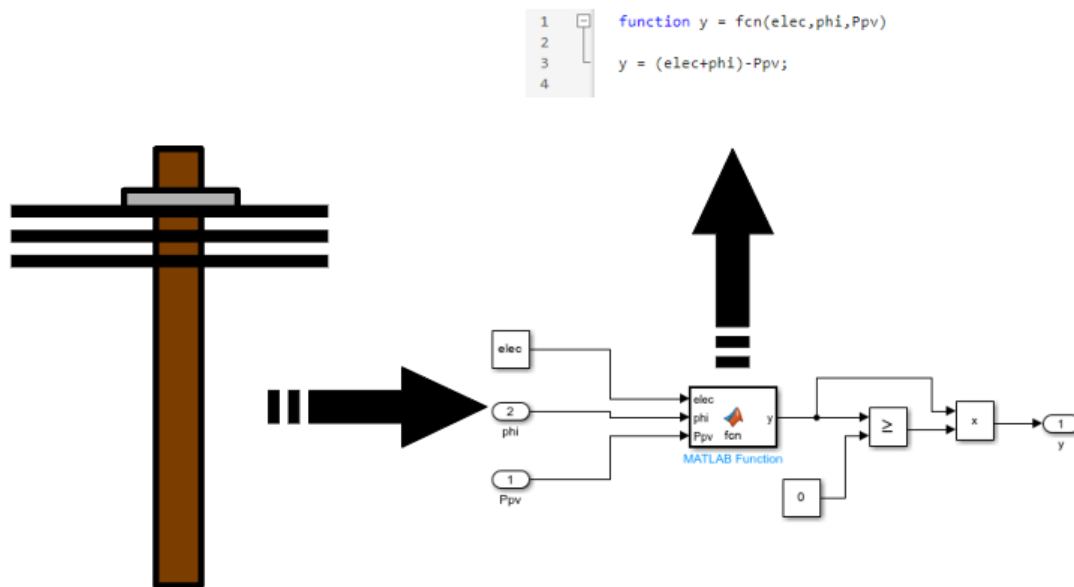


FIGURE 2.7 – subsystème P réseau

Le subsystème de P réseau est constitué d'une fonction qui comprend les variables *elec*, *phi* et *Ppv*.

Cette dernière permet d'effectuer l'équation :

$$P_{\text{reseau}} = \text{elec} + \text{phi} - P_{\text{pv}} \quad (2.2)$$

Où *phi* est la puissance consommée par la résistance du ballon, et *Ppv* la puissance produite par le système PV.

Le vecteur résultant contient des valeurs négatives du fait que le système PV produira plus que la consommation de $\text{phi} + \text{elec}$ à certains moments.

Nous faisons donc passer le vecteur à travers un bloc logique \geq à la constante 0 afin d'obtenir un 1 quand la valeur est \geq à 0 et un 0 sinon.

Puis finalement on multiplie le vecteur booléen au vecteur résultat du bloc fonction afin d'obtenir le vecteur d'utilisation de la puissance du réseau.

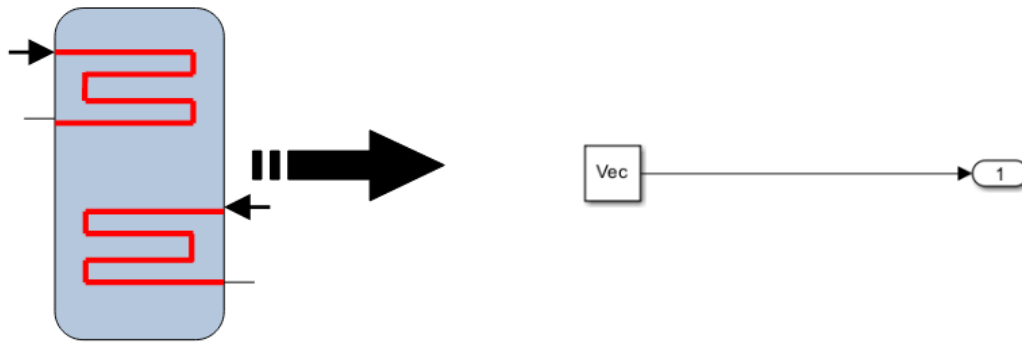


FIGURE 2.8 – sousystème ballon

Le sousystème du ballon est constitué d'un bloc constant permettant d'obtenir les valeurs du vecteur *Vec* vecteur du Volume d'eau chaude dans le ballon calculé précédemment dans le script matlab.

Dans le sousystème de la résistance du ballon, la série Résistance est la valeur de la puissance

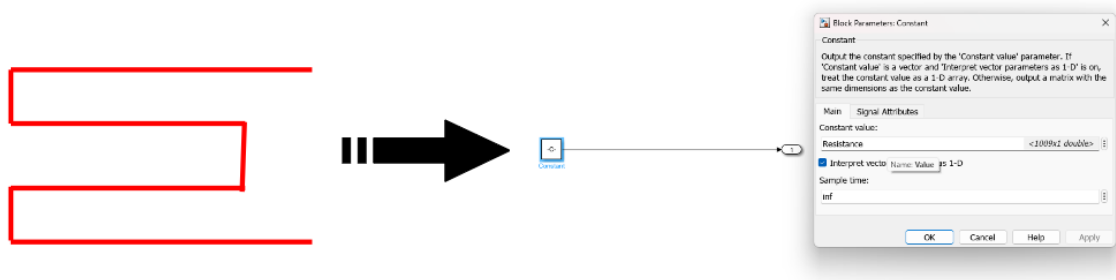


FIGURE 2.9 – sousystème résistance du ballon

de la résistance en fonction du temps déterminée précédemment dans le fichier matlab (dernier graphique).

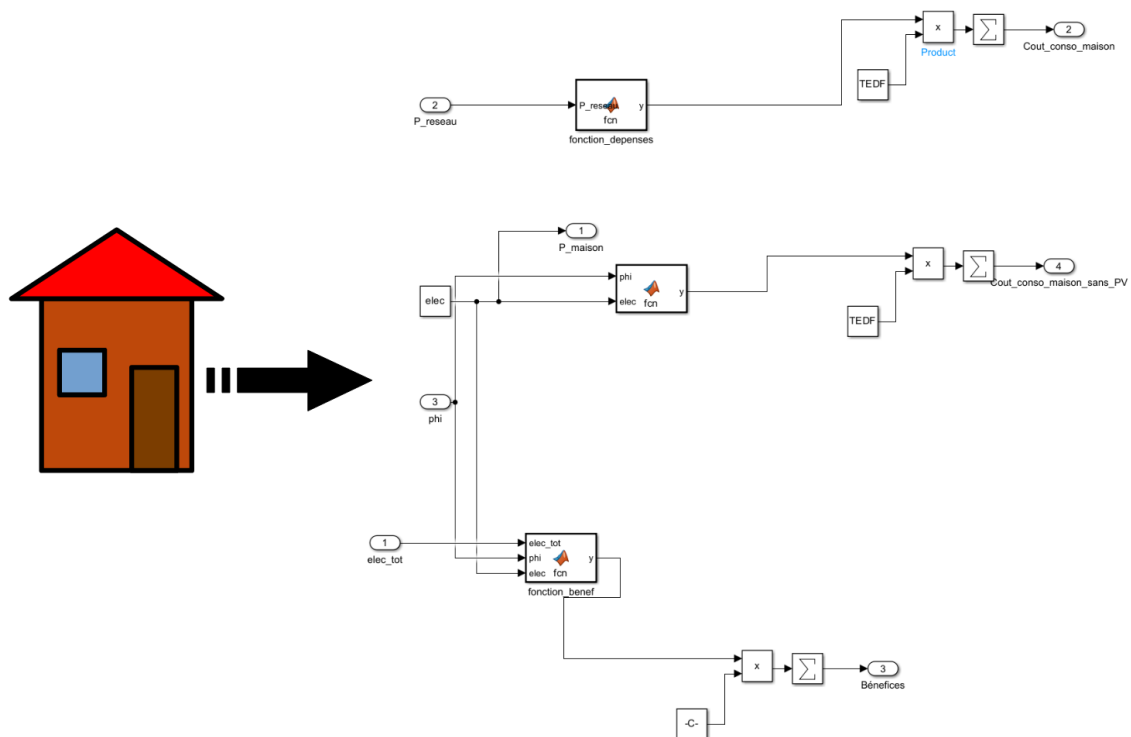


FIGURE 2.10 – subsysteme de la consommation maison

Le subsysteme de la maison comprend 3 fonctions :

- Fonction des bénéfices

```

function y = fcn(elec_tot,phi,elec)

y = elec_tot - (phi+elec);

```

FIGURE 2.11 – Fonction des bénéfices

$$Surplus = elect_tot - (phi + elec) \quad (2.3)$$

où elect_tot est la production totale d'électricité (avec le surplus), et phi+elec la consommation totale d'électricité. On détermine ainsi le surplus du système PV qui est ensuite multiplié par le tarif de vente d'électricité. tarif de vente = 10 centimes/KW.h
la consommation est donnée en W/10 min donc :

$$vente = \frac{0.10}{1000 * 6} \quad (2.4)$$

Finalement on passe le vecteur dans un bloc sommateur qui va donner la somme de tous les éléments pour obtenir le résultat des bénéfices affiché par un bloc display.

- Fonction des dépenses sans système PV

$$Consommation = elec + phi \quad (2.5)$$

La consommation d'électricité est égale à la consommation de la maison elec plus la consommation de la résistance phi.

```

function y = fcn(elec,phi)

y = elec + phi; % elec + phi

```

FIGURE 2.12 – Fonction des dépenses sans système PV

Les résultats sont ensuite multipliés par TEDF le coût de l'énergie au temps t puis on fait la somme de tous les éléments afin d'obtenir le résultat des dépenses s'il n'y avait pas de système PV affiché par un display.

- Fonction des dépenses

```

function y = fcn(P_reseau)

y = P_reseau; % elec + phi

```

FIGURE 2.13 – Fonction des dépenses

$$Consommation = P_reseau \quad (2.6)$$

On calcul la puissance achetée au réseau, puis on la multiplie par TEDF, le prix à l'instant t :

$$TEDF = \frac{TEDF}{1000 * 6} \quad (2.7)$$

Cette opération est effectuée dans le code matlab afin de passer le tarif en €/W.min. Finalement le vecteur passe par le sommateur et le résultat des dépenses est affiché par un bloc display.

Chapitre 3

Développement et test en simulation d'une commande de référence

3.1 Stratégie 1

Dans le fichier live script matlab précédent, nous avons modélisé les variables suivantes :

- La puissance consommée par la résistance du ballon en fonction du temps
- La consommation d'électricité totale (elec + résistance)
- La surproduction PV
- Puissance achetée au réseau

Puis sur le fichier simulink nous avons injecté les variables ci-dessus afin de calculer les dépenses et les bénéfices pour la stratégie 1.

Nous avons obtenus les résultats suivants :

Type de données	Valeurs
Dépenses sans PV	29.45
Dépenses avec PV	19.34
Bénéfices (vente surplus)	4.2
Facture d'électricité	15.14

En ce qui concerne le confort, d'après les données, le volume d'eau chaude ne descend pas en dessous de la limite fixée.

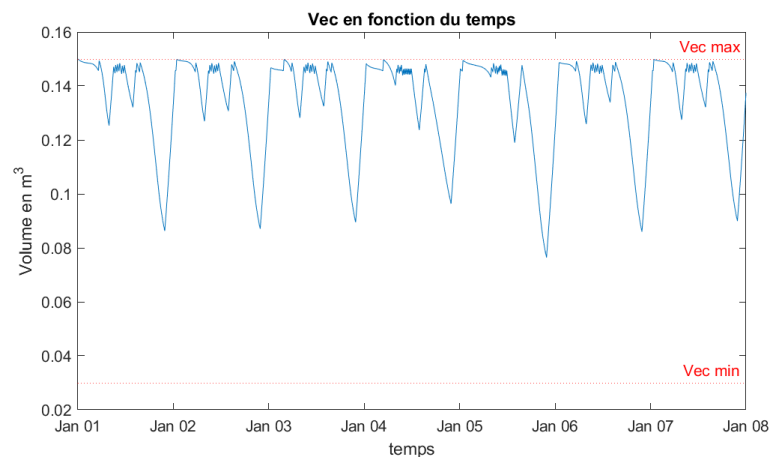


FIGURE 3.1 – Volume d'eau chaude en fonction du temps

3.2 Stratégie 2

Rappel de la stratégie 2 :

- Allumer la résistance en heures creuse (HC) si le ballon n'est pas plein d'eau chaude
- Allumer la résistance en heures pleines (HP) si le surplus est suffisant pour que le prix à payer soit inférieur au tarif des heures creuses
- Allumer la résistance si V_{ec} (Volume d'eau chaude) $\leq 0.03 \text{ m}^3$
- Eteindre la résistance si V_{ec} atteint le volume maximal du ballon - le volume chauffé en 10 min afin de s'assurer que V_{ec} ne dépasse pas le volume du ballon.

On reprend le même fonctionnement que pour la stratégie 1, puis on ajoute de nouvelles conditions afin d'adapter les conditions de la boucles à celles du cahier des charges de la stratégie 2.

Sachant que dans cette dernière on allume la résistance en heures pleines si le surplus est suffisant pour que le prix à payer soit inférieur au tarif des heures creuses, on crée une nouvelle variable Pseuil qui nous permettra de déterminer à partir de quel niveau de puissance du surplus de PV il sera intéressant de mettre en marche la résistance en heures pleines.

$$P_{seuil} = \frac{(THP * \phi - THC * \phi)}{THP - T_{vente}} \quad (3.1)$$

où :

THP : Tarif en heures pleines (en €)

ϕ : Puissance de la résistance (en W)

THC : Tarif en heures creuses (en €)

T_{vente} : Tarif de vente (en €)

```
Pseuil = (1500*0.3068-1500*0.2450)/(0.3068-0.1)
Pseuil = 448.2592
```

FIGURE 3.2 – Calcul Pseuil

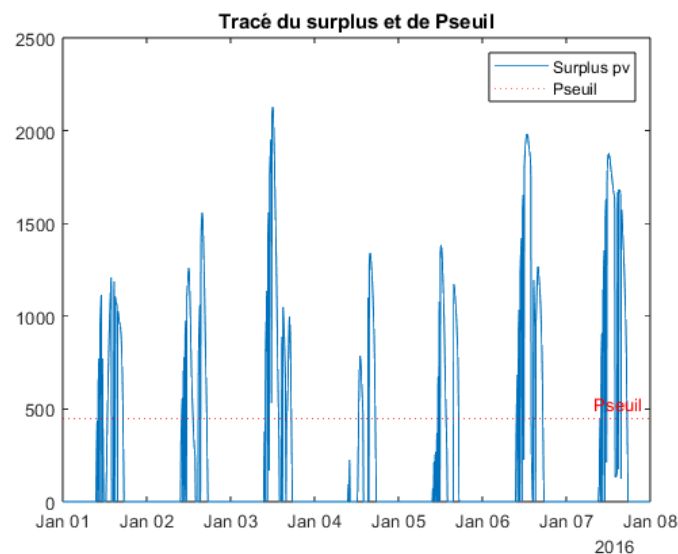


FIGURE 3.3 – Tracé du surplus et de Pseuil

Maintenant que nous avons Pseuil, nous pouvons implémenter les nouvelles conditions dans la boucle qui permet de piloter la résistance.

Dans le **if**, on rajoute un ou avec ||, si $\text{surplus}(i) \geq \text{Pseuil}$ (Surplus supérieur ou égal au seuil) && $\text{Vec}(i-1) < 0.150 - C_Te$ (Condition de sécurité afin que Vec ne dépasse pas le volume maximal du ballon)

On chauffe. **Else**

On ne chauffe pas. On obtient les résultats suivants

```

% Calcul du fonctionnement de la résistance
Resistance = zeros(1009,1);
for i = 2 : 1009
    if (HC(i) > 0 && Vec(i-1) < (0.150 - C_Te)) || Surplus(i) >= Pseuil && Vec(i-1) < (0.150 - C_Te)
        Resistance(i) = 1500;
        Resistance_bool(i) = 1;
        Vec(i) = Vec(i-1) + (C_Te * Resistance_bool(i)) - ECS(i);
    else
        Resistance(i) = 0;
        Resistance_bool(i) = 0;
        Vec(i) = Vec(i-1) + (C_Te * Resistance_bool(i)) - ECS(i);
    end
end
end

```

FIGURE 3.4 – Boucle fonctionnement de la résistance stratégie 2

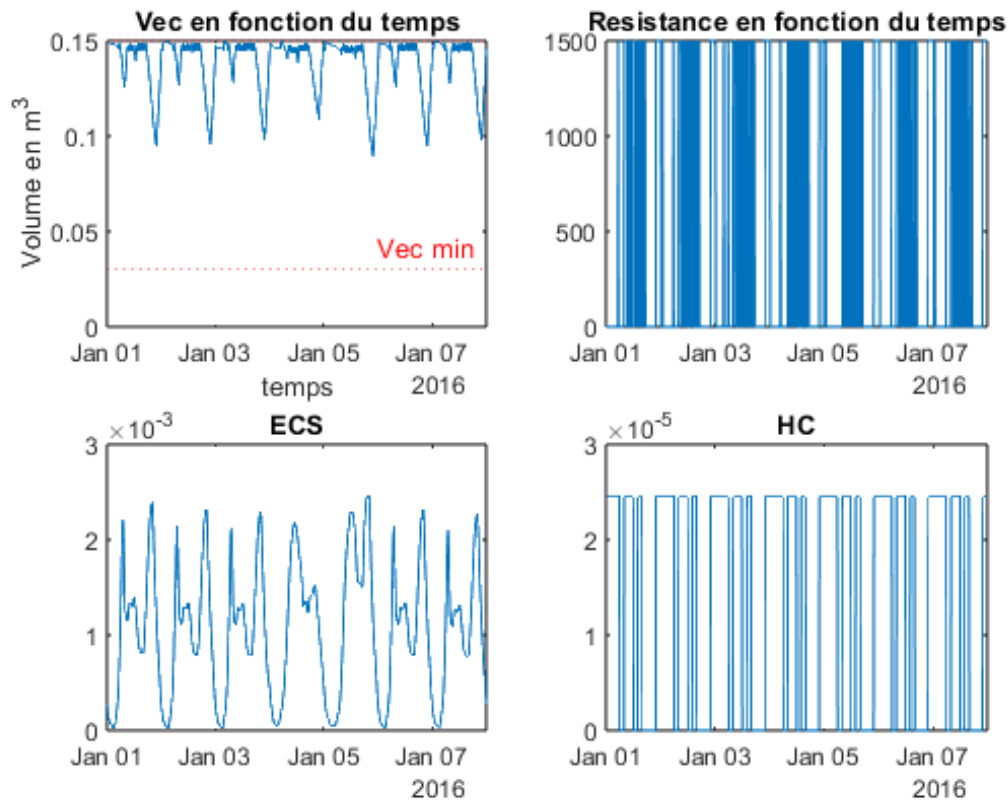


FIGURE 3.5 – Tracé des résultats de la stratégie 2

Après avoir lancé la simulation sur simulink on obtient les résultats suivants :

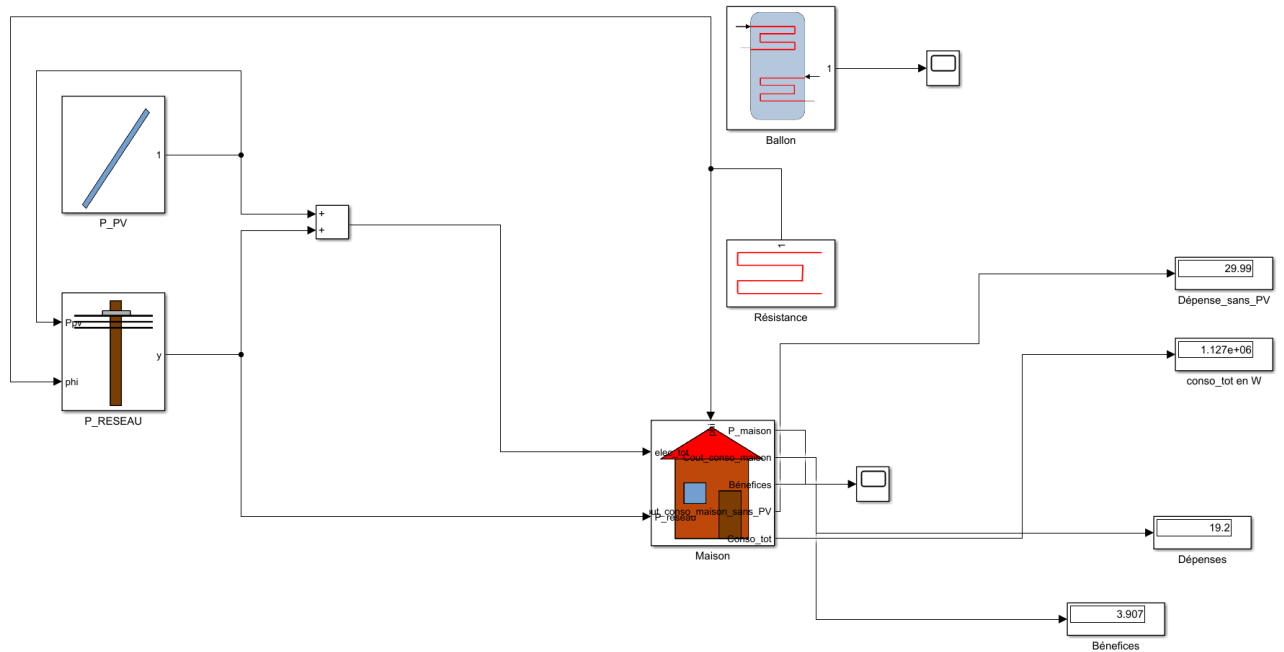


FIGURE 3.6 – Simulation de la stratégie 2

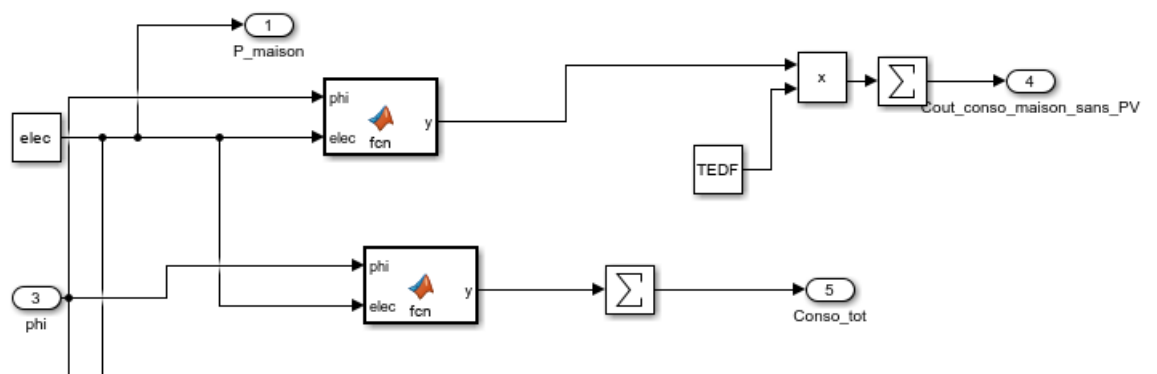


FIGURE 3.7 – Fonction consommation d'électricité totale

J'ai ajouté une nouvelle fonction au bloc Maison du fichier simulink nous permettant d'obtenir comme information la consommation totale d'électricité. Pour cela on récupère les vecteurs de la consommation d'électricité de la maison (elec) et la consommation de la résistance (phi dans le simulink, Resistance dans le fichier matlab), on les additionne et on récupère la somme des éléments du vecteur de sortie du bloc fonction afin d'obtenir la valeur de la consommation totale d'électricité.

Après simulation on obtient les valeurs suivantes :

$$Facture = Dépenses - bénéfices \quad (3.2)$$

$$Prix_{KWh} = \frac{facture}{consommation} \quad (3.3)$$

Type de données	Valeurs
Dépenses sans PV	29.99
Dépenses avec PV	19.2
Bénéfices (vente surplus)	3.907
Facture d'électricité	15.293
consommation d'électricité	$1.127 * 10^6 W$
Prix du KWh	$1.7167 * 10^{-5} / W.10min$

Pour la première stratégie on trouve le prix du kWh à $1.7213 * 10^{-5} / W.10min$.

On pourrait en conclure que la première stratégie permet d'avoir une facture moins importante que la stratégie numéro 2 (stratégie 1 : 15.14 € < stratégie 2 : 15.293 €) mais le prix du Kwh est plus faible pour la stratégie numéro 2. Cela peut s'expliquer par le fait que la stratégie 2 a plus de volume d'eau chaude à la fin de la semaine. Afin de bien comparer les 2 stratégies nous allons donc nous référer au prix du kWh de chaque stratégie.

Cela nous permet de dire que la stratégie 2 est la plus avantageuse et permet d'utiliser l'électricité à moindre coût.

Nous allons maintenant comparer le volume d'eau chaude pour les 2 stratégies :

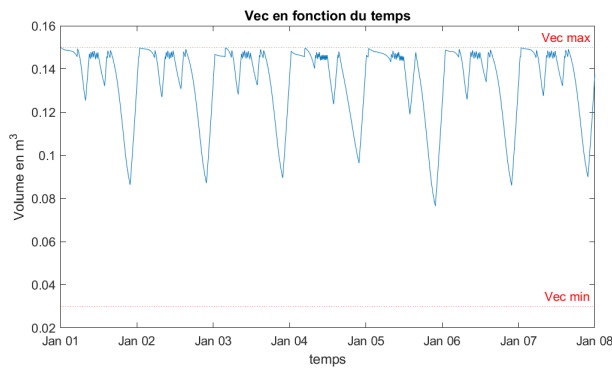


FIGURE 3.8 – Vec stratégie 1

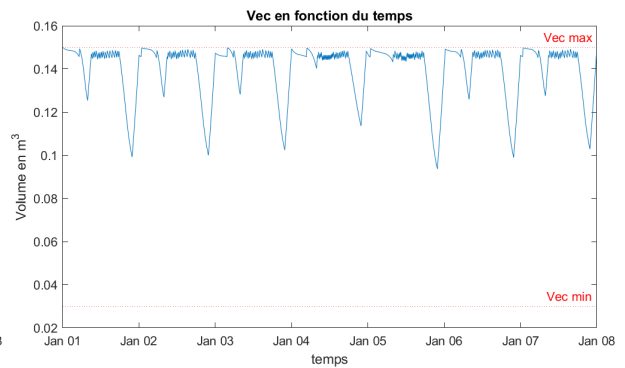


FIGURE 3.9 – Vec stratégie 2

On observe bien que la stratégie numéro 2 permet de plus faire fonctionner la résistance, on voit cela grâce au graphique où Vec reste en général au dessus de $0.1 m^3$, alors que pour la stratégie 1 Vec, sur les minimums, est aux alentours des $0.08 m^3$.

En conclusion la stratégie 2 permet d'avoir une facture et un revient du KWh plus faible. Le fait que la facture de la stratégie 1 a pu être plus faible est que le volume d'eau chaude restant à la fin de la semaine n'a pas été pris en compte.

De plus, la stratégie 2 permet de plus faire fonctionner la résistance sans trop augmenter la facture et le coût de revient du KWh.

3.3 Stratégie 3

Rappel de la stratégie 3 (avec optimisation) :

- Minimiser le coût sur 24 h grâce à une optimisation du vecteur Pelec
- Respect des contraintes sur le volume d'eau chaude dans le ballon

3.3.1 Paramètres d'optimisation

Nous devons optimiser le vecteur de fonctionnement de la résistance sur 24h, pour cela, j'ai au préalable découpé des données sur 24 h pour chaque jour de la semaine.

Nous obtenons des vecteurs de taille 144*1 ce qui correspond à 144 lignes et 1 colonne.

Notre **vecteur à optimiser** contient donc **144 variables**.

Pour optimiser le vecteur j'ai créé un vecteur Resistance_bool, qui contient les valeurs 0 ou 1. Nous allons donc **optimiser un vecteur d'entier**.

Fonction à minimiser :

Afin d'avoir la facture d'électricité la plus faible, nous devons minimiser la fonction de coût :

$$\text{cost} = \sum ((\text{elec} \cdot \text{TEDF}) + (x \cdot 1500) \cdot \text{TEDF}) - \sum (\text{Surplus} \cdot \text{Tventes}) \quad (3.4)$$

où :

elec : conso maison (en W)

TEDF : Prix du W.10min (en €/W.10min)

x : Vecteur booléen à optimiser (*1500 W)

Surplus : Surplus de PV (en W)

Tventes : Tarif de vente du surplus (€/W.10min)

Pour finir et choisir l'algorithme, on observe que la fonction de coût de par ses paramètres, est **non linéaire**.

Nous avons donc un problème d'optimisation non linéaire avec contraintes et variable entières. Je choisi donc d'utiliser l'algorithme génétique.

3.3.2 L'algorithme génétique

Principe de fonctionnement de l'algorithme génétique :

Algorithm 1 Algorithme Génétique

- 1: **Initialisation** : Générer une population initiale de solutions
 - 2: **Évaluation** : Évaluer chaque individu de la population
 - 3: **while** critère d'arrêt non atteint **do**
 - 4: **Sélection** : Sélectionner des parents pour la reproduction
 - 5: **Reproduction** : Croiser les parents et appliquer des mutations
 - 6: **Évaluation** : Évaluer la nouvelle population
 - 7: **Remplacement** : Remplacer les individus moins performants
 - 8: **end while**
 - 9: **Solution optimale** : Retourner la meilleure solution trouvée
-

1. **Initialisation** : Dans notre cas, nous allons initialiser l'algorithme avec la solution de la stratégie 2.

2. **Évaluation** : Chaque individu de la population est évalué en fonction de son aptitude à résoudre le problème. Cette évaluation se fait en utilisant une fonction d'évaluation (fitness function) qui attribue un score à chaque individu en fonction de sa performance par rapport aux critères de réussite du problème. Elle joue donc un rôle crucial dans la sélection, la reproduction et le remplacement des individus au sein de la population, en guidant l'évolution vers des solutions optimales.

3. **Sélection** : Cette étape consiste à sélectionner des individus pour la reproduction, en privilégiant ceux qui ont une meilleure aptitude. Il existe plusieurs méthodes de sélection, telles que la sélection par tournoi, la sélection par roulette, la sélection par rang, etc.

4. **Reproduction** : Les individus sélectionnés sont croisés et mutés pour créer de nouvelles solutions potentielles. Le croisement implique la combinaison de parties des parents pour créer des enfants, tandis que la mutation consiste à apporter des modifications aléatoires à ces enfants afin qu'ils soient uniques et possèdent de nouvelles caractéristiques.

5. **Évaluation** : La nouvelle population est évaluée de la même manière que la population initiale. Les individus sont notés en fonction de leur performance par rapport aux critères de réussite du problème.

6. **Remplacement** : Les individus moins performants de la population sont remplacés par les nouveaux individus créés par la reproduction. Cela garantit que la population évolue vers de meilleures solutions au fil des générations.

7. **Critère d'arrêt** : L'algorithme continue de répéter les étapes de sélection, de reproduction et de remplacement jusqu'à ce qu'un certain critère d'arrêt soit atteint. Ce critère peut être un nombre fixe d'itérations, une amélioration minimale de la solution d'une génération à l'autre, ou d'autres critères spécifiques au problème.

8. **Solution optimale** : Une fois que le critère d'arrêt est atteint, l'algorithme retourne la meilleure solution trouvée au cours de l'exécution. Cette solution est celle qui a obtenu le meilleur score lors de l'évaluation finale de la population.

Implémentation matlab :

```

options = gaoptimset(@ga);
options.Display = 'iter';
options.MutationFcn = @mutationadaptfeasible;
options.PlotFcns = (@gplotbestf,@gplotbestindiv,@gplotdistance,@gplotexpectation,@gplotmaxconstr,@gplotrange,@gplotsselection,@gplotscorediversity,@gplotscores);
options.InitialPopulation = Resistance_bool; % Utiliser le vecteur trouvé en stratégie 2 comme population initiale

[x,fval,exitflag,output] = ga(@(x) funobj(x),144,[],[],[],[],xmin,xmax,@(x) mycon(x),intcon,options)

```

FIGURE 3.10 – Appel de l'algorithme génétique

```
options.MutationFcn = @mutationadaptfeasible;
```

Cette option nous permet de choisir la fonction de mutation utilisée par l'algorithme génétique. Dans ce cas, la fonction `mutationadaptfeasible` est utilisée. Cette fonction effectue une mutation adaptative des individus de la population, tout en maintenant leur faisabilité par rapport aux contraintes du problème. Cela signifie que les mutations sont appliquées de manière à ne pas compromettre la validité des solutions.

```
options.PlotFcns = {...};
```

Cette option spécifie les fonctions de tracé utilisées pour visualiser les métriques et les performances de l'algorithme génétique au fil des générations. Dans cet exemple, plusieurs fonctions de tracé sont fournies :

- `@gplotbestf` : Trace l'évolution de la meilleure valeur de fitness au fil des générations.

- @gaplotbestindiv : Trace les valeurs de fitness des meilleurs individus de chaque génération.
- @gaplotdistance : Trace les distances entre les individus de la population.
- @gaplotexpectation : Trace les valeurs d'attente (moyennes) des individus dans la population.
- @gaplotmaxconstr : Trace les contraintes maximales pour chaque génération.
- @gaplotrange : Trace l'amplitude des valeurs de fitness pour chaque génération.
- @gaplotselection : Trace les détails sur la sélection des individus.
- @gaplotscorediversity : Trace la diversité des scores de fitness.
- @gaplotscores : Trace les valeurs de fitness des individus dans la population.

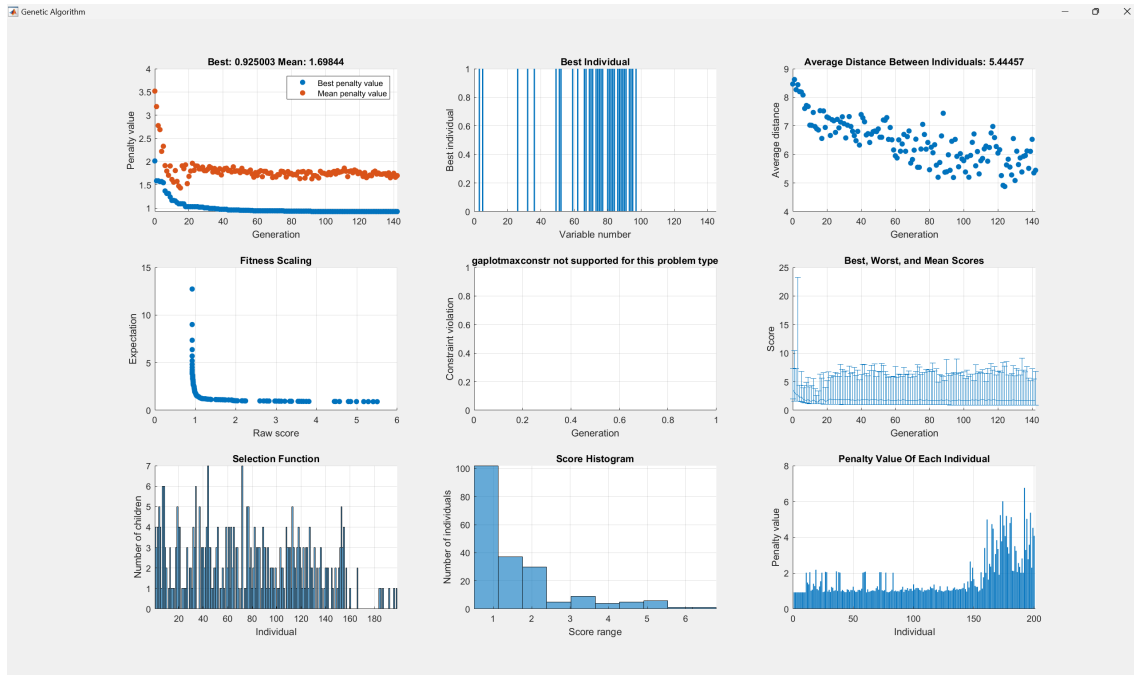


FIGURE 3.11 – Plot

3.3.3 Résultats de l'optimisation

Afin de pouvoir optimiser le vecteur de fonctionnement de la résistance, j'ai créé plusieurs scripts matlab en parallèle du script de base.

Les script sont les suivant :

- 1 script par jour permettant de calculer la fonction objectif pour le jour même .
- un script mycon pour les contraintes non linéaires sur le volume d'eau chaude dans le ballon
- un script calculate_volume permettant d'effectuer le calcul du volume afin de pouvoir connaître ce dernier et l'implémenter dans mycon.

Après avoir effectué l'optimisation du vecteur de fonctionnement de la résistance pour chaque jour de la semaine, on obtient les résultats suivants :

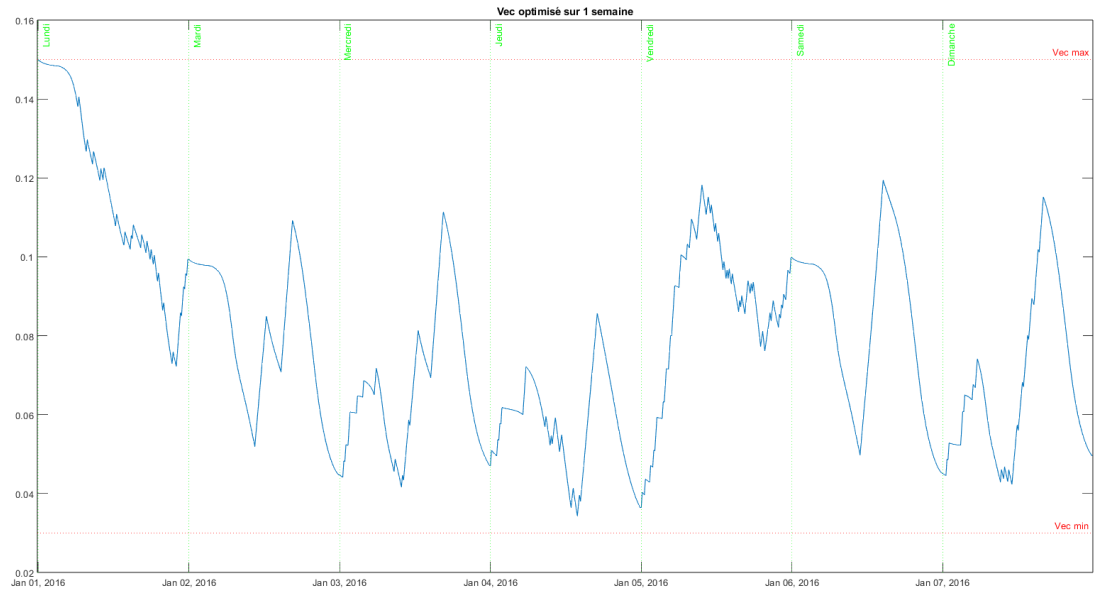


FIGURE 3.12 – Vec en fonction du temps pour la stratégie 3

Avec cette stratégie, on obtient une facture de : 14.6193 €.

Nous allons maintenant comparer les résultats des différentes stratégies, je vais créer une nouvelle variable dans matlab qui va nous permettre de calculer le % d'auto-consommation de chaque stratégie.

$$Autocons = \frac{\sum PVcons}{\sum PV} * 100 \quad (3.5)$$

Où PVcons est la quantité de PV consommée, pour déterminer cette dernière j'ai créé la boucle suivante :

```

PVcons = zeros(1009,1);
for i = 1:1009
    if PV(i) <= elec_tot(i)
        PVcons(i) = PV(i);
    else
        PVcons(i) = elec_tot(i);
    end
end

Rautocons2 = sum(PVcons)/sum(PV) * 100; % Autoconsommation en %
disp(['L autoconsommation sur une semaine de la stratégie 2 est de : ',num2str(Rautocons2),' %']);

L autoconsommation sur une semaine de la stratégie 2 est de : 63.0776 %
    
```

FIGURE 3.13 – Boucle PV cons

Type de donnée	Stratégie 1	Stratégie 2	Stratégie 3
Facture d'électricité (€)	15.14	15.293	14.4866
Autoconsommation (%)	60.037	63.0776	ad
consommation d'électricité (W)	$1.1237 * 10^6 W$	$1.127 * 10^6 W$	$1.0934 * 10^6$
Prix du W*10min (€)	$1.7213 * 10^{-5}$	$1.7167 * 10^{-5}$	$1.337 * 10^{-5}$

On observe que sur le graphique du tracé du volume d'eau chaude en fonction du temps (figure 3.8), les contraintes sur le volume sont respectées, Vec ne dépasse pas la limite haute de $0.150 m^3$ et la limite basse de $0.03 m^3$.

On observe au niveau des données du tableau que la stratégie numéro 3 est bien plus efficace que les autres stratégies, on obtient un coût du W bien inférieur aux 2 stratégies précédentes.

3.4 Bilan

3.4.1 Stratégie 1

- **Fonctionnement de la résistance pendant les heures creuses** : La résistance est allumée uniquement pendant les heures creuses si le ballon n'est pas plein et éteinte lorsque le ballon atteint sa capacité maximale.
- **Analyse de la consommation totale** : Calcul de la consommation totale d'électricité (énergie solaire PV + énergie de la résistance).
- **Utilisation du réseau électrique** : Calcul de la quantité d'électricité provenant du réseau et de l'autoconsommation.
- **Surproduction PV** : Calcul de la surproduction d'électricité solaire par rapport à la consommation totale.
- **Analyse des coûts et bénéfices** : Calcul des dépenses liées à l'utilisation du réseau et des bénéfices de la revente du surplus d'électricité solaire.

3.4.2 Stratégie 2

- **Fonctionnement de la résistance basé sur plusieurs critères** : La résistance est allumée pendant les heures creuses si le ballon n'est pas plein, pendant les heures pleines si le surplus d'électricité solaire est suffisant pour réduire le coût par rapport aux heures creuses, et si le volume d'eau chaude est inférieur à 20% de la capacité maximale.
- **Analyse de la consommation totale** : Comme pour la stratégie 1, calcul de la consommation totale d'électricité.
- **Surproduction PV après utilisation** : Calcul de la surproduction d'électricité solaire après utilisation pour le ballon.
- **Analyse des coûts et bénéfices** : Comme pour la stratégie 1, calcul des dépenses et des bénéfices.

3.4.3 Stratégie 3

- **Optimisation du vecteur de fonctionnement de la résistance par jour de la semaine** : Le vecteur de fonctionnement de la résistance est optimisé pour chaque jour de la semaine (lundi à dimanche) en utilisant l'algorithme génétique pour minimiser la fonction coût de l'énergie.
- **Représentation graphique de la fonction de coût optimisée** : Le vecteur de fonctionnement de la résistance optimisé est représenté graphiquement sur une semaine, avec des indications pour chaque jour de la semaine.
- **Analyse des coûts** : Le coût total de l'énergie est calculé en additionnant les coûts de chaque jour de la semaine.

3.4.4 Résultats

- **Coût du watt sur 10 minutes** : Le coût moyen du watt sur 10 minutes est calculé en divisant le coût total de l'énergie par la consommation totale.
- **Autoconsommation** : Le pourcentage d'autoconsommation pour chaque stratégie est calculé.
- **Coûts et bénéfices** : Les dépenses, les bénéfices de la revente du surplus et la facture totale sont calculés pour chaque stratégie.

Les résultats sont situés dans le tableau (figure 3.8).

On observe que la stratégie 1, qui est la plus basique, est la moins efficace. Ensuite la stratégie 2 plus élaborée, diminue les coûts et permet d'augmenter l'autoconsommation afin d'utiliser plus de surplus de production de PV ce qui est logiquement plus rentable que de le revendre. Pour finir la stratégie 3 qui utilise un algorithme génétique afin de piloter la résistance est la plus efficace en tout point, et permet d'obtenir les meilleurs résultats au niveau des coûts.

Deuxième partie

Annexes

Site consultés :

- <https://www.izi-by-edf-renov.fr/blog/pression-chauffe-eau>
- <https://www.thermexcel.com/french/tables/Eau%20atmosph%E9rique.pdf>

Logiciels utilisés :

- LibreOffice draw (schémas)
- Matlab, Simulink

CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DE L'EAU (à la pression atmosphérique)												
Pression d'utilisation			1,01325 bar (absolu)			http://www.thermexcel.com/french/index.htm						
Température	Pression	Masse	Chaleur sensible			Chaleur massique			Chaleur volumique			Viscosité
ure	référence	volumique	Enthalpie spécifique			(Heat capacity)			Heat capacity			dynamique
°C	Bar	kg/m3	kJ/kg	W/kg	kcal/kg	kJ/kg	w/kg	kcal/kg (4.1868J)	kJ/dm3	W/dm3	kcal/dm3	kg/ms
0°C	1,01325	999,82	0,06	277,73	0,01	4,217	1,171	1,007	4216,14	1171,15	1007,01	0,001792
1°C	1,01325	999,89	4,28	277,75	1,02	4,213	1,170	1,006	4212,98	1170,27	1006,25	0,001731
2°C	1,01325	999,94	8,49	277,76	2,03	4,210	1,170	1,006	4210,15	1169,49	1005,58	0,001674
3°C	1,01325	999,98	12,70	277,77	3,03	4,207	1,169	1,005	4207,32	1168,70	1004,90	0,001620
4°C	1,01325	1000,00	16,91	277,78	4,04	4,205	1,168	1,004	4204,78	1167,99	1004,29	0,001569
5°C	1,01325	1000,00	21,12	277,78	5,04	4,202	1,167	1,004	4202,21	1167,28	1003,68	0,001520
6°C	1,01325	999,99	25,32	277,77	6,05	4,200	1,167	1,003	4199,93	1166,65	1003,13	0,001473
7°C	1,01325	999,96	29,52	277,77	7,05	4,198	1,166	1,003	4197,59	1166,00	1002,58	0,001429
8°C	1,01325	999,91	33,72	277,75	8,05	4,196	1,166	1,002	4195,51	1165,42	1002,08	0,001386
9°C	1,01325	999,85	37,92	277,74	9,06	4,194	1,165	1,002	4193,36	1164,82	1001,57	0,001346
10°C	1,01325	999,77	42,12	277,71	10,06	4,192	1,165	1,001	4191,45	1164,29	1001,11	0,001308
11°C	1,01325	999,68	46,31	277,69	11,06	4,191	1,164	1,001	4189,46	1163,74	1000,64	0,001271
12°C	1,01325	999,58	50,51	277,66	12,06	4,189	1,164	1,001	4187,70	1163,25	1000,22	0,001236
13°C	1,01325	999,46	54,70	277,63	13,06	4,188	1,163	1,000	4185,84	1162,73	999,77	0,001202
14°C	1,01325	999,33	58,89	277,59	14,07	4,187	1,163	1,000	4184,20	1162,28	999,38	0,001170
15°C	1,01325	999,19	63,08	277,55	15,07	4,186	1,163	1,000	4182,45	1161,79	998,96	0,001139
16°C	1,01325	999,03	67,27	277,51	16,07	4,185	1,162	1,000	4180,90	1161,36	998,59	0,001109
17°C	1,01325	998,86	71,46	277,46	17,07	4,184	1,162	0,999	4179,31	1160,92	998,21	0,001081
18°C	1,01325	998,68	75,64	277,41	18,07	4,183	1,162	0,999	4177,68	1160,47	997,82	0,001054
19°C	1,01325	998,49	79,83	277,36	19,07	4,183	1,162	0,999	4176,24	1160,07	997,48	0,001028
20°C	1,01325	998,29	84,01	277,30	20,07	4,182	1,162	0,999	4174,66	1159,63	997,10	0,001003
21°C	1,01325	998,08	88,20	277,24	21,07	4,181	1,161	0,999	4173,27	1159,24	996,77	0,000979
22°C	1,01325	997,86	92,38	277,18	22,06	4,181	1,161	0,999	4171,74	1158,82	996,40	0,000955
23°C	1,01325	997,62	96,56	277,12	23,06	4,180	1,161	0,998	4170,38	1158,44	996,08	0,000933
24°C	1,01325	997,38	100,75	277,05	24,06	4,180	1,161	0,998	4168,88	1158,02	995,72	0,000911
25°C	1,01325	997,13	104,93	276,98	25,06	4,180	1,161	0,998	4167,55	1157,65	995,40	0,000891
26°C	1,01325	996,86	109,11	276,91	26,06	4,179	1,161	0,998	4166,06	1157,24	995,05	0,000871
27°C	1,01325	996,59	113,29	276,83	27,06	4,179	1,161	0,998	4164,75	1156,87	994,73	0,000852
28°C	1,01325	996,31	117,47	276,75	28,06	4,179	1,161	0,998	4163,27	1156,46	994,38	0,000833
29°C	1,01325	996,02	121,65	276,67	29,06	4,179	1,161	0,998	4161,96	1156,10	994,07	0,000815
30°C	1,01325	995,71	125,83	276,59	30,05	4,178	1,161	0,998	4160,49	1155,69	993,71	0,000798
31°C	1,01325	995,41	130,01	276,50	31,05	4,178	1,161	0,998	4159,17	1155,33	993,40	0,000781
32°C	1,01325	995,09	134,19	276,41	32,05	4,178	1,161	0,998	4157,69	1154,91	993,05	0,000765
33°C	1,01325	994,76	138,37	276,32	33,05	4,178	1,161	0,998	4156,37	1154,55	992,73	0,000749
34°C	1,01325	994,43	142,55	276,23	34,05	4,178	1,161	0,998	4154,96	1154,16	992,40	0,000734
35°C	1,01325	994,08	146,73	276,13	35,05	4,178	1,161	0,998	4153,46	1153,74	992,04	0,000720
36°C	1,01325	993,73	150,91	276,04	36,04	4,178	1,161	0,998	4152,12	1153,37	991,72	0,000705
37°C	1,01325	993,37	155,09	275,94	37,04	4,178	1,161	0,998	4150,60	1152,95	991,35	0,000692
38°C	1,01325	993,00	159,27	275,83	38,04	4,178	1,161	0,998	4149,24	1152,57	991,03	0,000678
39°C	1,01325	992,63	163,45	275,73	39,04	4,179	1,161	0,998	4147,70	1152,14	990,66	0,000666
40°C	1,01325	992,25	167,62	275,62	40,04	4,179	1,161	0,998	4146,31	1151,75	990,33	0,000653
41°C	1,01325	991,86	171,80	275,52	41,03	4,179	1,161	0,998	4144,75	1151,32	989,96	0,000641
42°C	1,01325	991,46	175,98	275,41	42,03	4,179	1,161	0,998	4143,34	1150,93	989,62	0,000629
43°C	1,01325	991,05	180,16	275,29	43,03	4,179	1,161	0,998	4141,76	1150,49	989,24	0,000618
44°C	1,01325	990,64	184,34	275,18	44,03	4,179	1,161	0,998	4140,32	1150,09	988,90	0,000607
45°C	1,01325	990,22	188,52	275,06	45,03	4,180	1,161	0,998	4138,70	1149,64	988,51	0,000596
46°C	1,01325	989,80	192,70	274,94	46,02	4,180	1,161	0,998	4137,24	1149,23	988,16	0,000586
47°C	1,01325	989,36	196,88	274,82	47,02	4,180	1,161	0,998	4135,59	1148,78	987,77	0,000576
48°C	1,01325	988,92	201,05	274,70	48,02	4,180	1,161	0,998	4134,10	1148,36	987,41	0,000566
49°C	1,01325	988,47	205,23	274,58	49,02	4,181	1,161	0,999	4132,43	1147,90	987,01	0,000556
50°C	1,01325	988,02	209,41	274,45	50,02	4,181	1,161	0,999	4130,90	1147,47	986,65	0,000547
51°C	1,01325	987,56	213,59	274,32	51,02	4,181	1,161	0,999	4129,28	1147,02	986,26	0,000538
52°C	1,01325	987,09	217,77	274,19	52,01	4,182	1,162	0,999	4127,65	1146,57	985,87	0,000529
53°C	1,01325	986,62	221,95	274,06	53,01	4,182	1,162	0,999	4125,84	1146,07	985,44	0,000521
54°C	1,01325	986,14	226,13	273,93	54,01	4,182	1,162	0,999	4124,34	1145,65	985,08	0,000512
55°C	1,01325	985,65	230,31	273,79	55,01	4,183	1,162	0,999	4122,67	1145,18	984,68	0,000504
56°C	1,01325	985,16	234,49	273,66	56,01	4,183	1,162	0,999	4120,98	1144,72	984,28	0,000496
57°C	1,01325	984,66	238,68	273,52	57,01	4,183	1,162	0,999	4119,11	1144,20	983,83	0,000489
58°C	1,01325	984,16	242,86	273,38	58,01	4,184	1,162	0,999	4117,56	1143,77	983,46	0,000481
59°C	1,01325	983,64	247,04	273,23	59,00	4,184	1,162	0,999	4115,83	1143,29	983,05	0,000474
60°C	1,01325	983,13	251,22	273,09	60,00	4,185	1,162	0,999	4114,09	1142,80	982,63	0,000467
61°C	1,01325	982,60	255,41	272,95	61,00	4,185	1,162	1,000	4112,18	1142,27	982,18	0,000460
62°C	1,01325	982,07	259,59	272,80	62,00	4,186	1,163	1,000	4110,57	1141,82	981,79	0,000453
63°C	1,01325	981,54	263,77	272,65	63,00	4,186	1,163	1,000	4108,79	1141,33	981,37	0,000447

Température °C	Pression référence Bar	Masse volumique (Densité) kg/m3	Chaleur sensible Enthalpie spécifique			Chaleur massique (Heat capacity)			Chaleur volumique Heat capacity			Viscosité dynamique de l'eau kg/ms
			kJ/kg	W/kg	kcal/kg	kJ/kg	w/kg	kcal/kg (4.1868J)	kJ/dm3	W/dm3	kcal/dm3	
64°C	1,01325	981,00	267,96	272,50	64,00	4,187	1,163	1,000	4107,00	1140,83	980,94	0,000440
65°C	1,01325	980,45	272,14	272,35	65,00	4,187	1,163	1,000	4105,05	1140,29	980,47	0,000434
66°C	1,01325	979,90	276,33	272,19	66,00	4,188	1,163	1,000	4103,40	1139,83	980,08	0,000428
67°C	1,01325	979,34	280,51	272,04	67,00	4,188	1,163	1,000	4101,58	1139,33	979,65	0,000422
68°C	1,01325	978,78	284,70	271,88	68,00	4,189	1,164	1,000	4099,75	1138,82	979,21	0,000416
69°C	1,01325	978,21	288,89	271,72	69,00	4,189	1,164	1,001	4097,91	1138,31	978,77	0,000410
70°C	1,01325	977,63	293,08	271,57	70,00	4,190	1,164	1,001	4095,91	1137,75	978,29	0,000404
71°C	1,01325	977,05	297,26	271,40	71,00	4,190	1,164	1,001	4094,21	1137,28	977,89	0,000399
72°C	1,01325	976,47	301,45	271,24	72,00	4,191	1,164	1,001	4092,35	1136,76	977,44	0,000394
73°C	1,01325	975,88	305,64	271,08	73,00	4,192	1,164	1,001	4090,48	1136,25	977,00	0,000388
74°C	1,01325	975,28	309,83	270,91	74,00	4,192	1,164	1,001	4088,45	1135,68	976,51	0,000383
75°C	1,01325	974,68	314,02	270,74	75,00	4,193	1,165	1,001	4086,73	1135,20	976,10	0,000378
76°C	1,01325	974,08	318,22	270,58	76,00	4,194	1,165	1,002	4084,84	1134,68	975,65	0,000373
77°C	1,01325	973,46	322,41	270,41	77,01	4,194	1,165	1,002	4082,95	1134,15	975,19	0,000369
78°C	1,01325	972,85	326,60	270,24	78,01	4,195	1,165	1,002	4080,89	1133,58	974,70	0,000364
79°C	1,01325	972,23	330,80	270,06	79,01	4,196	1,165	1,002	4079,15	1133,10	974,29	0,000359
80°C	1,01325	971,60	334,99	269,89	80,01	4,196	1,166	1,002	4077,24	1132,57	973,83	0,000355
81°C	1,01325	970,97	339,19	269,71	81,01	4,197	1,166	1,002	4075,33	1132,04	973,38	0,000351
82°C	1,01325	970,33	343,38	269,54	82,02	4,198	1,166	1,003	4073,26	1131,46	972,88	0,000346
83°C	1,01325	969,69	347,58	269,36	83,02	4,199	1,166	1,003	4071,50	1130,97	972,46	0,000342
84°C	1,01325	969,04	351,78	269,18	84,02	4,200	1,167	1,003	4069,58	1130,44	972,00	0,000338
85°C	1,01325	968,39	355,98	269,00	85,02	4,200	1,167	1,003	4067,66	1129,91	971,54	0,000334
86°C	1,01325	967,73	360,18	268,82	86,03	4,201	1,167	1,003	4065,74	1129,37	971,08	0,000330
87°C	1,01325	967,07	364,38	268,63	87,03	4,202	1,167	1,004	4063,66	1128,79	970,59	0,000326
88°C	1,01325	966,41	368,58	268,45	88,03	4,203	1,168	1,004	4061,89	1128,30	970,17	0,000322
89°C	1,01325	965,74	372,79	268,26	89,04	4,204	1,168	1,004	4059,96	1127,77	969,71	0,000319
90°C	1,01325	965,06	376,99	268,07	90,04	4,205	1,168	1,004	4058,04	1127,23	969,25	0,000315
91°C	1,01325	964,38	381,20	267,88	91,05	4,206	1,168	1,005	4055,96	1126,65	968,75	0,000311
92°C	1,01325	963,70	385,40	267,69	92,05	4,207	1,169	1,005	4054,19	1126,16	968,33	0,000308
93°C	1,01325	963,01	389,61	267,50	93,06	4,208	1,169	1,005	4052,27	1125,63	967,87	0,000304
94°C	1,01325	962,31	393,82	267,31	94,06	4,209	1,169	1,005	4050,34	1125,10	967,41	0,000301
95°C	1,01325	961,62	398,03	267,12	95,07	4,210	1,169	1,006	4048,27	1124,52	966,91	0,000298
96°C	1,01325	960,91	402,24	266,92	96,07	4,211	1,170	1,006	4046,51	1124,03	966,49	0,000295
97°C	1,01325	960,20	406,45	266,72	97,08	4,212	1,170	1,006	4044,59	1123,50	966,03	0,000291
98°C	1,01325	959,49	410,67	266,53	98,09	4,213	1,170	1,006	4042,68	1122,97	965,58	0,000288
99°C	1,01325	958,78	414,88	266,33	99,09	4,214	1,171	1,007	4040,61	1122,39	965,08	0,000285
100°C	1,01325	958,05	2675,58	266,13	639,05	4,216	1,171	1,007	4038,86	1121,90	964,66	0,000282