"Analyse énergétique des bâtiments" Notes de Cours
Préparé par D. Mather

EA2 : Conception et simulation d'un système de chauffage simple

1. Conception d'un système de chauffage simple - Partie A
2. Simulation d'un système de chauffage simple
3. Simulation par la méthode d'Euler
4. Simulation par hypothèse "quasi-stable
5. Conception d'un système de chauffage simple - Partie B
6. Conception d'un système de chauffage simple - Partie C

Aperçu du module

Ce module utilise l'exemple d'un système de chauffage très simple pour introduire des concepts importants relatifs à la conception et à la simulation des systèmes CVC. Ces concepts restent valables pour des systèmes plus complexes.

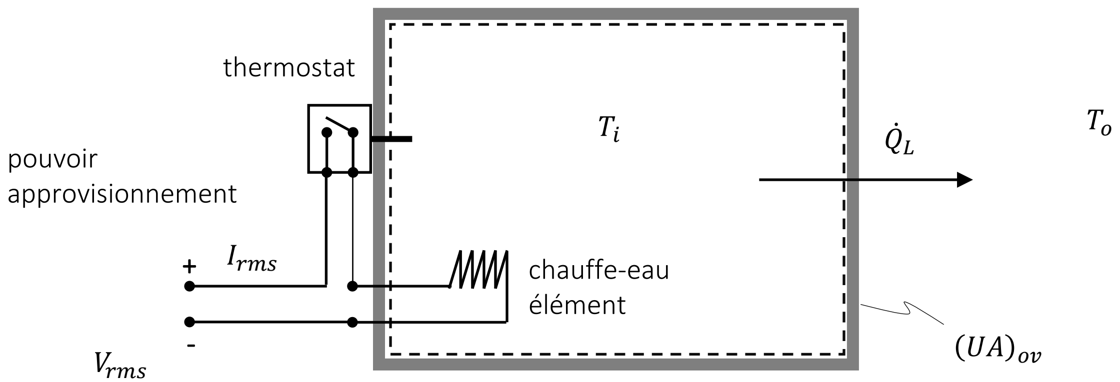
Résultats d'apprentissage visés par le cours :

- Appliquer les calculs énergétiques de base à une variété de composants et de systèmes ayant un impact sur l'utilisation de l'énergie dans les bâtiments.
- Appliquer des techniques d'analyse simples à l'audit et à la simulation énergétiques des bâtiments.

1. Conception d'un système de chauffage simple - Partie A

Examinons la conception simplifiée d'un système de chauffage pour une petite enceinte simple devant être maintenue à une température élevée par rapport à son environnement. Pour simplifier, prenons l'enceinte comme un réservoir isolé rempli d'eau. Supposons que l'eau dans le réservoir soit suffisamment "bien mélangée" pour que la température interne soit uniforme. (Ce réservoir servira temporairement d'analogie simplifiée pour un "bâtiment").

Le chauffage sera assuré par un élément de résistance électrique situé à l'intérieur du réservoir. Un simple thermostat "marche-arrêt" activera le chauffage de manière à ce que son taux moyen de production de chaleur corresponde approximativement à la perte de chaleur du réservoir au cours d'une période raisonnable. Lorsque le thermostat ferme l'interrupteur, l'élément chauffant est alimenté et la chaleur est délivrée au réservoir. Lorsque l'interrupteur s'ouvre, l'alimentation électrique et la production de chaleur s'arrêtent.



thermostat

élément chauffant à résistance électrique

Supposons que la seule perte de chaleur significative soit due à la transmission thermique (à travers la surface isolée du réservoir) et que le taux de perte de chaleur constante puisse être estimé en appliquant un facteur de perte de chaleur globale approprié $(UA)_{ov}$ $[W/°C]$:

$$\dot{Q}_L = (UA)_{ov} \cdot (T_i - T_o)$$

Dans ce cas, nous pouvons considérer que le "système de chauffage" se compose du chauffage à résistance (c'est-à-dire du dispositif de conversion d'énergie), du thermostat (c'est-à-dire du contrôleur) et du câblage (c'est-à-dire du conduit de flux d'énergie) qui relie l'équipement de chauffage à l'alimentation électrique disponible (par exemple, un panneau électrique à proximité).

Considérons un exercice de conception dans lequel l'élément chauffant et la taille du fil doivent être sélectionnés à partir d'une liste de choix disponibles.

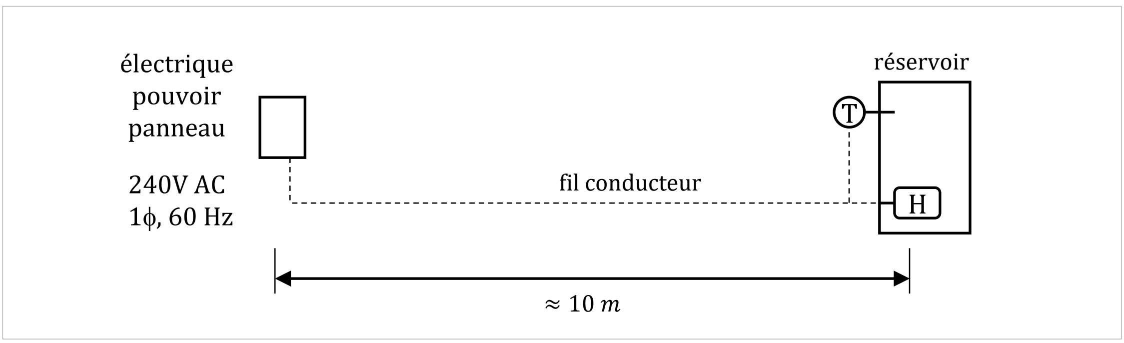
Exercice de conception

Caractéristique de perte de chaleur du réservoir : $(UA)_{ov} = 60\ W/°C$ (estimation fournie par un collègue)

Températures extérieures prévues : -20 à 35°C

Point de consigne du chauffage : $\approx 50°C$

Coût du réservoir isolé : $250
Coût du thermostat : $15



Éléments chauffants disponibles (240V) :

kW	Coût
3.0	$25
4.5	$29
6.0	$32

Note : facteur de puissance (pf) = 1 pour une charge entièrement résistive.

Tailles des conducteurs disponibles :

Gage	Ampacité	Coût
14	18	\$1.60/m
12	23	\$2.80/m
10	29	\$3.80/m
8	36	\$4.80/m
6	50	\$8.60/m

Supposons que 10 m (au total) soient nécessaires.

<u>À FAIRE</u>

1. Choisir l'élément chauffant et la taille du conducteur *(facteur de sécurité ?)*

2. Déterminez le coût total de tous les éléments (réservoir, thermostat, élément, câblage).

3. Supposons qu'un autre modèle de réservoir soit disponible avec une isolation améliorée. (Appelons cette nouvelle version "modèle B" et la version précédente "modèle A"). Le coût du modèle B est de 350 \$ et sa valeur $(UA)_{ov}$ = 30 $W/^oC$. Répétez l'analyse précédente, puis estimez le coût différentiel du choix du modèle B plutôt que du modèle A.

4. À l'issue de l'exercice, nous devrions être en mesure de répondre à la question suivante :

   Quelles seront les conséquences du choix d'"investir" dans un réservoir mieux isolé ?

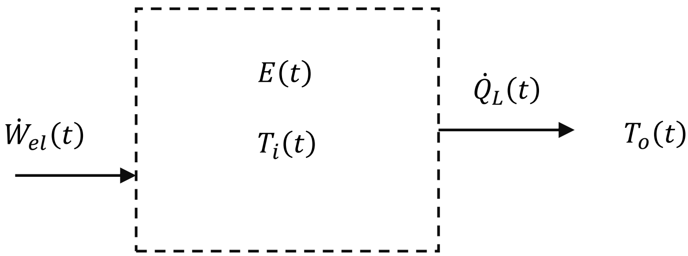
Les impacts seront les suivants :

- *Augmentation du coût du réservoir*
- *Perte de chaleur maximale réduite → élément chauffant plus petit → coût inférieur de l'élément chauffant*
- *Réduction du nombre d'ampères dans le câblage → taille des fils plus petite → coût des conducteurs plus faible*
- *Réduction des pertes de chaleur → économies d'énergie pendant le fonctionnement*

2. Simulation d'un système de chauffage simple

Supposons que nous souhaitions développer une simulation simple qui pourrait être utilisée pour analyser le fonctionnement du système étudié dans la section précédente. Nous autoriserons une légère variation de la température de l'eau dans le temps, mais nous supposerons qu'elle sera maintenue proche du point de consigne de 50°C. Disons 50 ± 0.5°C.

Commencez par établir le bilan énergétique du réservoir à un moment donné :



À tout moment, le débit d'électricité $\dot{W}_{el}(t)$ dépendra de l'état de fonctionnement de l'appareil de chauffage (c'est-à-dire en marche ou à l'arrêt).

Nous modéliserons la perte de chaleur instantanée de la manière suivante :

$$\dot{Q}_L(t) = UA \cdot [T_i(t) - T_o(t)]$$

Le bilan énergétique général du CV :

$$\frac{dE(t)}{dt} = \sum \dot{E}_{in}(t) - \sum \dot{E}_{out}(t)$$

En utilisant les transferts d'énergie comme indiqué dans le schéma :

$$\frac{dE(t)}{dt} = \dot{W}_{el}(t) - \dot{Q}_L(t)$$

Si nous considérons que l'énergie stockée dans le CV est avant tout l'énergie contenue dans l'eau (à l'intérieur du réservoir) :

$$dE = dKE + dPE + dU$$

En supposant que les changements d'énergie cinétique et potentielle sont négligeables :

$$dE \approx dU$$

Traiter les propriétés de l'eau comme étant uniformes dans l'ensemble du réservoir :

$$dU = m \cdot du \quad \text{(masse d'eau à l'intérieur du réservoir)}$$

Supposons que la densité et la chaleur spécifique de l'eau soient approximativement constantes. Avec ces hypothèses, la définition applicable de la chaleur spécifique est la suivante :

$$c_p = \frac{du}{dT} \quad \rightarrow \quad du = c_p \cdot dT$$

C'est pourquoi :

$$dE \approx m \cdot c_p \cdot dT_i$$

Ainsi :

$$\frac{dT_i(t)}{dt} = \frac{1}{m \cdot c_p} \cdot \left(\dot{W}_{el}(t) - UA \cdot [T_i(t) - T_o(t)]\right)$$

Cette équation permet d'estimer le taux de variation de la température de l'eau à tout moment où les termes situés à droite de l'équation peuvent être évalués.

Appliquons maintenant quelques valeurs d'exemple pour permettre d'effectuer un calcul :

$m = 2000\ kg$
$c_p = 4181\ J/kg \cdot °C$
$UA = 60\ W/°C$

$T_i = 50°C$
$T_o = 0°C$

capacité de chauffage = 6000 W (6 kW)

Si le chauffage est éteint, , et pour le moment considéré :

$$\frac{dT_i}{dt} \approx -0.00036\ \frac{°C}{s}$$

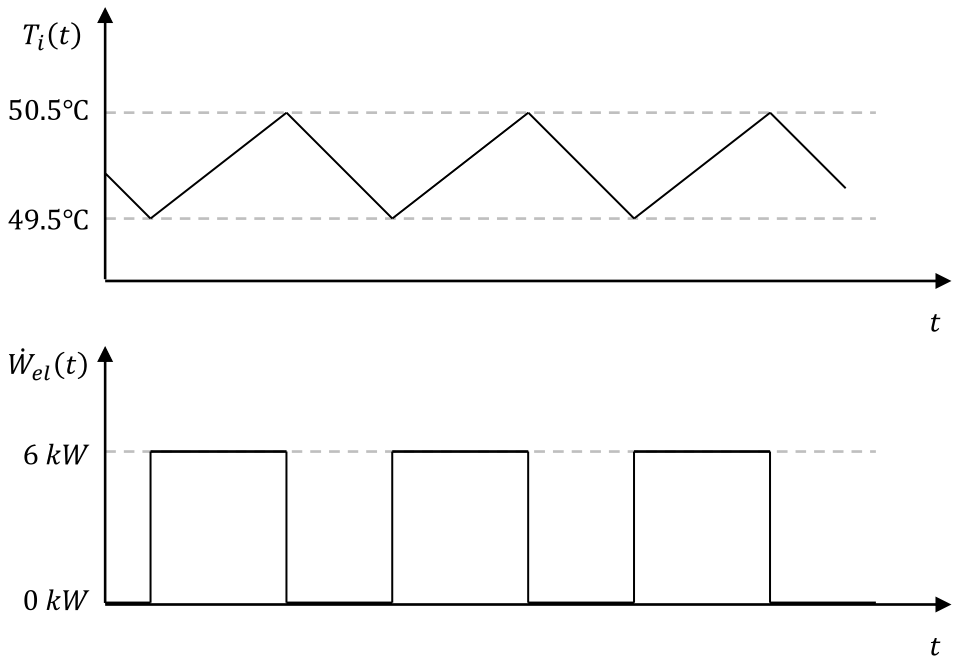
(c'est-à-dire que la température de l'eau diminue lentement)

Ou, si le chauffage est en marche , $\dot{W}_{el} = 6000\ W$, et :

$$\frac{dT_i(t)}{dt} \approx 0.00036\ \frac{°C}{s}$$

(c'est-à-dire que la température de l'eau augmente lentement)

Supposons maintenant que le thermostat fonctionne de manière à maintenir la température près du point de consigne. Il allume le chauffage lorsque la température est inférieure à 49,5°C et l'éteint lorsque la température atteint 50,5°C. Sur cette base, le chauffage passera d'un état à l'autre pour maintenir la température de l'eau proche de 50°C. Les figures ci-dessous illustrent ce fonctionnement de base. Notez que le graphique du bas indique la consommation d'énergie du système (au fil du temps) si l'on intègre la surface sous la courbe.



Nous pouvons maintenant utiliser cette méthode pour simuler la consommation d'énergie du système sur une période donnée. Il pourrait s'agir de faire varier la température de l'air extérieur (par exemple, toutes les heures, tous les jours). Cette question est abordée dans la section suivante.

A part :

Il est à noter que de nombreux appareils fonctionnent par cycles marche-arrêt pour répondre à une charge. La plupart des chaudières domestiques fonctionnent à l'aide d'un brûleur marche-arrêt. La plupart des réfrigérateurs font tourner leurs compresseurs.

(Fin de l'aparté)

3. Simulation par la méthode d'Euler

En reprenant l'exemple de la section précédente, une option simple pour créer notre simulation consiste à utiliser la "méthode d'Euler". Dans cette méthode, le taux de changement initial de la variable simulée est estimé et utilisé pour prédire la valeur de cette variable après une certaine période (c'est-à-dire un pas de temps). Ce processus est ensuite répété pour les pas de temps suivants.

Pas de temps = $\Delta t = t_{new} - t_{old}$

Variable simulée = $T_i(t)$, température interne du réservoir (température de l'eau)

Méthode d'Euler :

$$\frac{\Delta T_i}{\Delta t} = \frac{T_i(t_{new}) - T_i(t_{old})}{\Delta t} \approx \frac{dT_i(t_{old})}{dt}$$

$$T_i(t_{new}) \approx T_i(t_{old}) + \left[\frac{dT_i(t_{old})}{dt}\right] \cdot \Delta t$$

Effectuons un exemple de calcul pour un seul pas de temps. Nous utiliserons les valeurs de la section précédente avec quelques informations supplémentaires :

Utiliser $\Delta t = 60\ s$ ← Choix arbitraire. (Nous pourrons essayer d'autres valeurs plus tard.)

Contrôle du chauffage : Définir : $T_{lo} = 49.5°C$, $T_{hi} = 50.5°C$
Activé si $T_i < T_{lo}$ au début du pas de temps en cours.
Désactiver si $T_i > T_{hi}$ au début du pas de temps actuel.
Sinon, maintenir le même mode marche/arrêt.
Supposons que l'état reste inchangé au cours d'un pas de temps.

Condition initiale, t = 0 s : $T_i = 50°C$
$T_o = 0°C$
$\dot{W}_{el} = 0\ W$ ← sélection arbitraire
(Le chauffage est éteint.)

Calculs pour le premier pas de temps

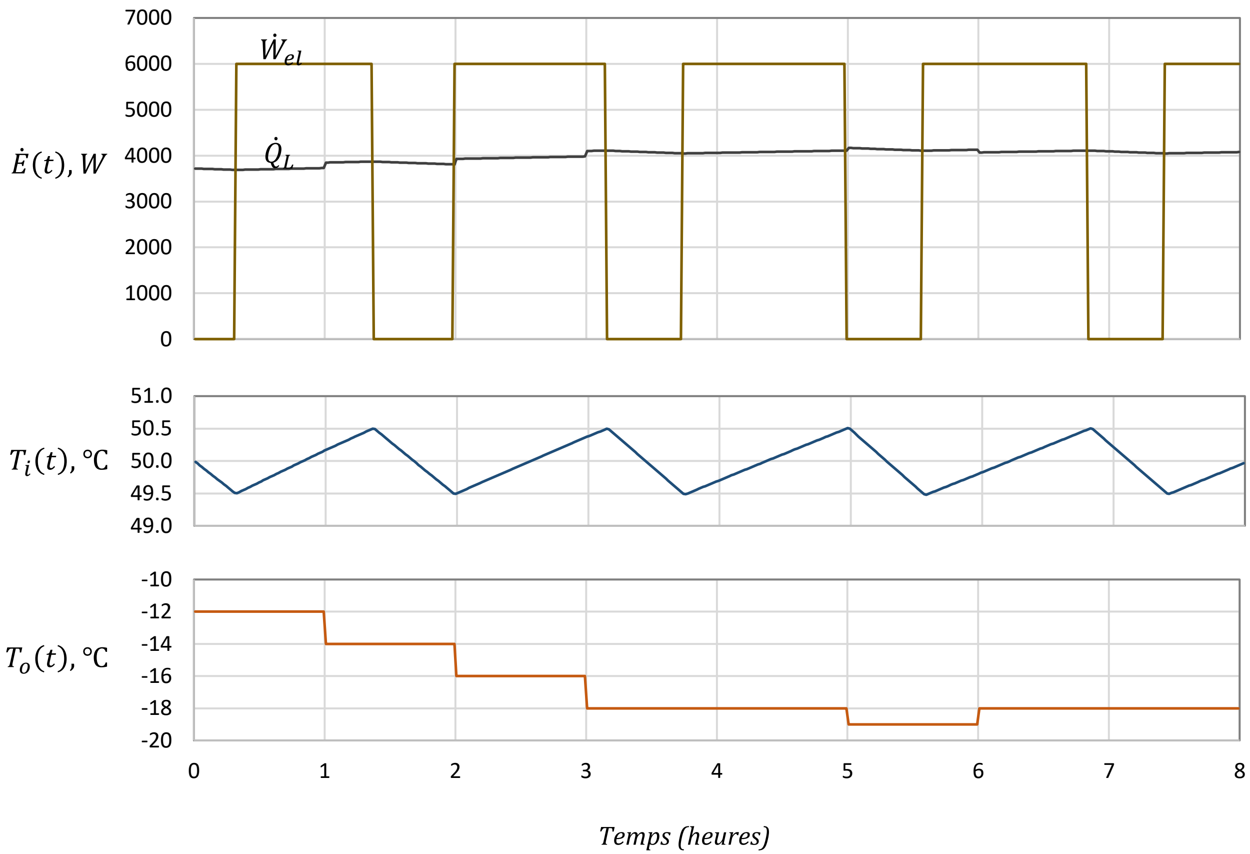
$$t_{old} = 0\ s, \qquad t_{new} = t_{old} + \Delta t = 60\ s$$

$$\frac{dT(t_{old})}{dt} = -0.00036\ \frac{°C}{s}$$

$$T(t_{new}) = T(t_{old}) + \left[\frac{dT(t_{old})}{dt}\right] \cdot \Delta t = 50°C + \left[-0.00036\ \frac{°C}{s}\right] \cdot (60\ s) = 49.978°C$$

Ainsi, le modèle prévoit une température du réservoir de 49,976°C à la fin du premier pas de temps.

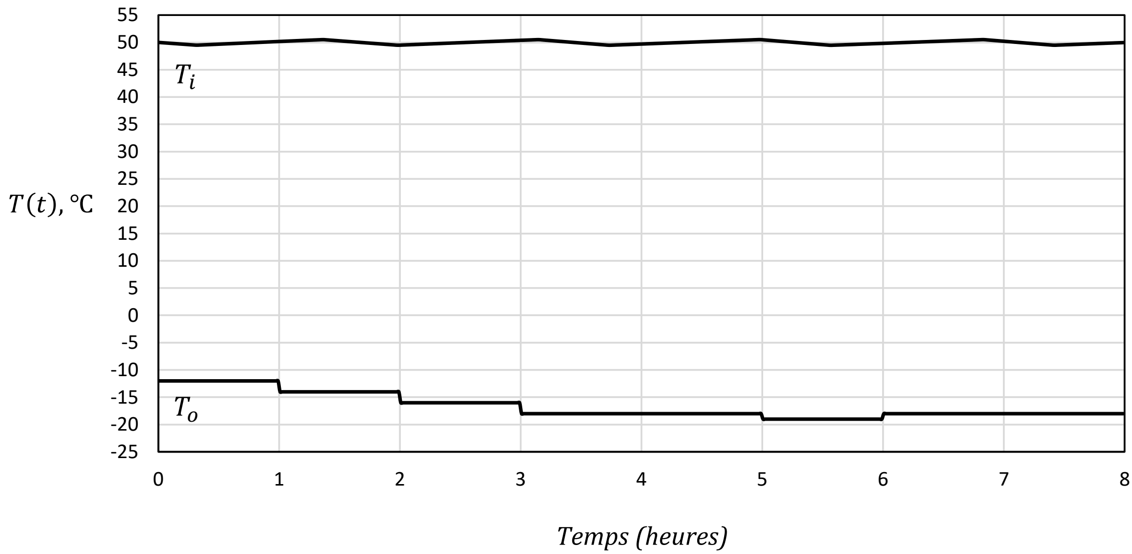
Le même processus peut maintenant être répété pour des pas de temps supplémentaires. Cela pourrait inclure la mise à jour de la température extérieure à certains intervalles souhaités. La figure ci-dessous donne un exemple de résultats pour une période simulée de huit heures, en utilisant et en actualisant la température extérieure toutes les heures.



Pour les huit heures, les résultats de la simulation indiquent une perte totale de chaleur ≈32 kWh et une consommation totale d'électricité ≈ 32 kWh.

4. Simulation par hypothèse "quasi-stable

Examinons à nouveau les résultats de la simulation de huit heures de la section précédente. Si nous reportons les températures intérieure et extérieure sur le même graphique, nous constatons que la variation de la température intérieure sur une heure peut être considérée comme "modeste".

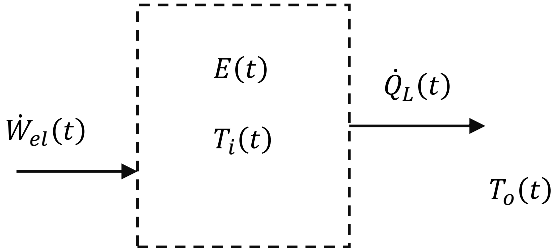


Si nous nous intéressons à la consommation d'énergie du système sur une période raisonnablement longue plutôt qu'aux détails spécifiques du fonctionnement momentané de l'équipement, il peut être raisonnable de considérer la légère variation de T_i comme négligeable et d'appliquer une procédure de modélisation plus simple. Si nous considérons la variation comme négligeable, nous disons essentiellement que $T_i \approx 50°\text{C} = constant$, et une bonne estimation de la différence de température moyenne (à travers la paroi du réservoir) pour une heure donnée est $T_i - T_o = 50°\text{C} - T_0$, où T_0 est la température horaire de l'air extérieur.

Lorsqu'on utilise un logiciel de simulation énergétique pour un bâtiment entier, il est courant d'estimer la consommation d'énergie pour une année entière et d'effectuer cette évaluation heure par heure (c.-à-d. Δt = 1 heure). Pour l'instant, considérons donc un pas de temps d'une heure comme notre approche prévue. Si nous souhaitons simuler une année, la simulation comprendra 8760 pas de temps, soit 365 jours x 24 heures/jour.

Considérons la période d'une heure pendant laquelle la température intérieure de l'environnement chauffé est maintenue à peu près stable, c'est-à-dire que la température à la fin de l'heure est à peu près la même qu'au début. Cela sera vrai si l'énergie transférée hors du CV est équilibrée par la quantité transférée à l'intérieur.

Reprenons notre modèle de réservoir simple :



Équation de l'équilibre E :

$$\frac{dE(t)}{dt} = \dot{W}_{el}(t) - \dot{Q}_L(t)$$

Intégrer l'équation du bilan énergétique sur une période d'une heure :

$$\int_{1hr} \frac{dE(t)}{dt} \cdot dt = \int_{1hr} \dot{W}_{el}(t) \cdot dt - \int_{1hr} \dot{Q}_L(t) \cdot dt$$

Si le changement d'énergie (c'est-à-dire de température) du CV est négligeable au cours de l'heure, le terme sur la gauche est approximativement nul.

$$\int_{1hr} \frac{dE(t)}{dt} \cdot dt \approx 0$$

C'est le cas si les deux termes de la droite sont approximativement égaux l'un à l'autre :

$$\int_{1hr} \dot{W}_{el}(t) \cdot dt \approx \int_{1hr} \dot{Q}_L(t) \cdot dt$$

Dans la dernière équation, l'ordonnée à gauche est l'énergie électrique totale fournie au CV pendant l'heure, et l'abscisse à droite est la perte de chaleur totale pendant cette période.

$$W_{el,1hr} = \int_{1hr} \dot{W}_{el}(t) \cdot dt$$

$$Q_{L,1hr} = \int_{1hr} \dot{Q}_L(t) \cdot dt$$

Pour simplifier, on peut dire que le système de chauffage, de ventilation et de climatisation est capable de fournir un rendement correspondant à la charge moyenne : *Nous supposons que le système CVC est capable de fournir un rendement à un taux moyen dans le temps qui correspond à la charge moyenne (c.-à-d. évaluée sur une heure).* Cela peut être vrai si 1) la capacité des systèmes CVC est suffisante pour répondre à la charge, et 2) le système CVC a une capacité de contrôle suffisante pour moduler sa production au taux moyen requis.

Il faut comprendre que la puissance du système CVC ne correspond pas nécessairement à la charge à chaque instant. Cependant, en modulant (cycle) sa production, l'équipement maintient une condition approximativement stable - ou "quasi stable" - dans le CV.

Examinons maintenant la simulation d'une heure pour le système de réservoir chauffé à l'aide de l'approche quasi-stationnaire. Nous allons modéliser l'heure 1 de la simulation précédente où la température extérieure horaire est de -12 °C.

$T_i = 50°\mathrm{C}$ (considérée comme quasi stable), $T_0 = -12°\mathrm{C}$

$$\dot{Q}_L = (60\ W/°\mathrm{C}) \cdot [50 - (-12)°\mathrm{C}] = 3720\ W$$

$$Q_{L,1hr} = \int_{1hr} \dot{Q}_L(t) \cdot dt = \dot{Q}_L(t) \cdot \Delta t = 3720\ W \cdot 1\ hr = 3720\ Wh = 3.72\ kWh$$

$$W_{el,1hr} = Q_{L,1hr} = \mathbf{3.72\ kWh}$$

Pour transférer un total de 3,72 kWh en une heure, le chauffage doit fonctionner à une puissance moyenne de 3,72 kW. Nous pouvons utiliser cette information pour déterminer la fraction de l'heure pendant laquelle le chauffage doit être actif.

$$\bar{\dot{W}}_{1hr} = \dot{W}_{el,on} \cdot f_{on} + \dot{W}_{el,off} \cdot (1 - f_{on})$$

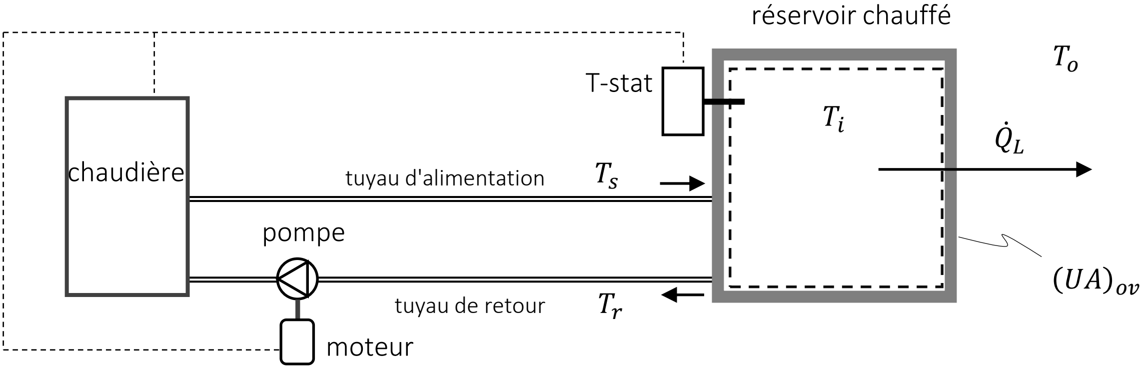
$$\dot{W}_{el,on} = 6\ kW, \qquad \dot{W}_{el,off} = 0\ kW$$

$$f_{on} = \frac{\bar{\dot{W}}_{1hr}}{\dot{W}_{el,on}} = \frac{3.72\ kW}{6\ kW} = 0.62 = \mathbf{62}\%$$

5. Conception d'un système de chauffage simple - Partie B

Nous allons maintenant modifier la conception du système de chauffage. Supposons que le dispositif de chauffage doive être situé à l'extérieur de l'environnement chauffé (c'est-à-dire qu'il ne doit pas être immergé dans l'environnement).

Supposons qu'une "chaudière électrique" soit utilisée pour le chauffage. Elle sera reliée au réservoir par des tuyaux "d'alimentation" et "de retour", et la circulation de l'eau entre la chaudière et le réservoir sera assurée par une pompe et un moteur.

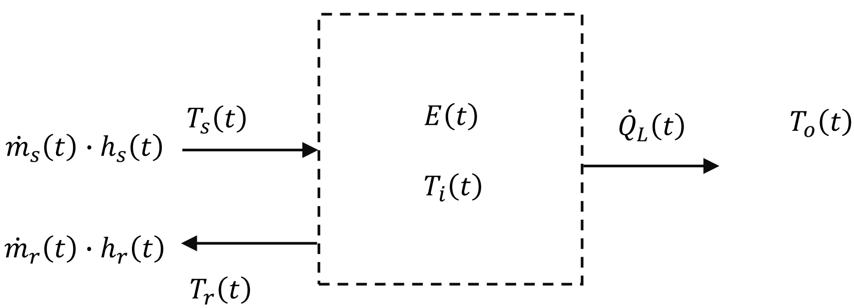


Dans la nouvelle conception, lorsque le réservoir a besoin de chaleur (d'après la lecture du thermostat), la chaudière et la pompe doivent toutes deux fonctionner. La chaudière chauffera l'eau qui lui est fournie et fournira de l'eau à température plus élevée au réservoir, assurant ainsi l'effet de chauffage. Notez que l'eau sortira du réservoir (et s'écoulera dans le tuyau de retour) à la température du réservoir mixte, T_i.

Pour cette section, nous nous limiterons à l'évaluation du débit et de la température de l'eau à fournir au réservoir, et nous examinerons plus tard l'équipement de chauffage.

Nous supposerons que le débit est identique dans les tuyaux d'alimentation et de retour à l'adresse . Et si la densité de l'eau est à peu près constante, le débit volumétrique sera également le même dans les deux tuyaux (à $\dot{V}_s$). Cependant, il faut garder à l'esprit que le débit varie dans le temps au fur et à mesure que la pompe se met en marche et s'arrête.

Considérons un CV dessiné autour du réservoir :



L'équation générale du bilan énergétique est présentée ci-dessous. Veuillez noter que toutes les valeurs sont $f(t)$, mais que la notation n'a pas été indiquée.

$$\frac{dE}{dt} = \dot{m}_s \cdot h_s - \dot{m}_r \cdot h_r - \dot{Q}_L$$

Si nous imaginons avoir la capacité de forcer (c'est-à-dire de contrôler) le système à fonctionner de manière régulière :

$$\frac{dE}{dt} = 0$$

qui se produira lorsque :

$$\dot{m}_s \cdot h_s - \dot{m}_r \cdot h_r - \dot{Q}_L = 0$$

$$\rightarrow \quad \dot{Q}_L = \dot{m}_s (h_s - h_r)$$

Cette dernière équation est simplement l'équation du refroidissement constant d'un fluide. En supposant que l'eau puisse être considérée comme subissant un processus de refroidissement sensible lors de son passage dans le réservoir :

$$\dot{Q}_L \;=\; \dot{m}_s \cdot c_p \cdot (T_s - T_r) \;=\; \dot{V}_s \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_s - T_i)$$

Adoptant maintenant le point de vue d'un concepteur de systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation, nous pouvons utiliser cette équation pour déterminer comment forcer un état de fonctionnement stable (par exemple, une constante T_i).

L'effet de chauffage sur le réservoir sera assuré par la combinaison de la température de l'eau d'entrée et de son débit . Examinons un exemple de scénario et déterminons les valeurs appropriées pour ces deux paramètres.

Réservoir UA: $(UA)_{ov} = 60 \ W/°\mathrm{C}$

Point de consigne du chauffage : $\approx 50°\mathrm{C}$

T_o gamme : -20 à 35°C

Au plus froid prévu T_o:

$$\dot{Q}_L = (UA)_{ov} \cdot (T_i - T_o) = (60 \ W/°\mathrm{C})(50 - (-20)°\mathrm{C}) = 4200 \, W$$

Pour compenser la perte de chaleur à -20°C, nous devons fournir un effet de chauffage de 4200 W. Il est acceptable de concevoir le système de manière à ce qu'il puisse fournir un effet de chauffage supérieur (c.-à-d. si une capacité de contrôle suffisante est fournie), mais nous ne devrions probablement pas fournir une capacité inférieure à 4200 W.

Équation du bilan énergétique en régime permanent pour le réservoir :

$$\dot{Q}_L = \dot{V}_s \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_s - T_i)$$

$\dot{Q}_L = 4200 \, W$

$\rho \cdot c_p \approx 4200 \ \dfrac{J}{L \cdot °\mathrm{C}}$

$T_i = 50°\mathrm{C}$

Toutes les valeurs de l'équation sont connues, à l'exception de $\boldsymbol{\dot{V}_s}$ et $\boldsymbol{T_s}$. Du point de vue de la conception, nous pouvons choisir la valeur de l'une d'entre elles, puis résoudre l'équation pour l'autre. Choisissons T_s et résolvons ensuite l'équation pour $\dot{V}_s$.

Le choix de T_s est arbitraire dans certaines limites. Il est certain qu'elle doit être supérieure à la température du réservoir (50°C). Et pour éviter de faire bouillir l'eau, sa température doit être inférieure à 100°C (en supposant que la pression absolue de l'eau est ≈ 1 atm).

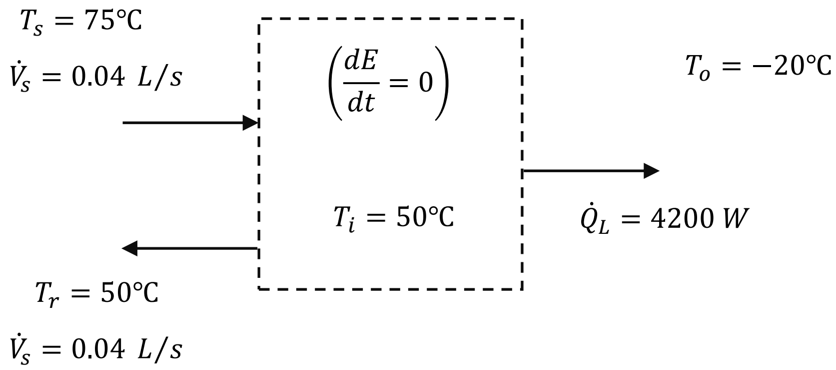
Pour l'instant, choisissons arbitrairement une valeur à mi-chemin entre 50 °C et 100 °C. (Remarque : plus tard, nous pourrons envisager d'autres valeurs possibles, si nous le souhaitons).

$$T_s = \mathbf{75°C} \qquad \leftarrow \text{décision de conception}$$

C'est le cas maintenant :

$$\dot{V}_s = \frac{\dot{Q}_L}{\rho \cdot c_p \cdot (T_s - T_i)} = \frac{4200\ \frac{J}{s}}{\left(4200\ \frac{J}{L \cdot °C}\right) \cdot (\mathbf{75} - 50°C)} \ = \ \mathbf{0.04\ \mathit{L/s}}$$

Le diagramme ci-dessous résume ces conditions de conception :



Nous pouvons maintenant voir le "travail" du système de chauffage pour les conditions de conception. Il doit prélever de l'eau dans le réservoir au débit et à la température indiqués et la renvoyer dans le réservoir à la température plus élevée choisie.

À prendre en considération : Comment les valeurs de conception changeraient-elles si le réservoir était mieux isolé (par exemple UA = 30 W/°C) ?

Notez qu'il peut être acceptable d'augmenter $\dot{V}_s$ et/ou T_s par rapport aux valeurs déterminées. L'augmentation de l'une ou l'autre de ces valeurs augmenterait l'effet de chauffage fourni au réservoir, ce qui devrait être acceptable une fois que la commande sera ajoutée pour moduler la puissance moyenne.

L'effet de chauffage fourni par le système est :

$$\dot{Q}_H = \dot{V}_s \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_s - T_i)$$

Supposons que nous décidions de maintenir la température d'alimentation sélectionnée à 75°C, mais que nous augmentions le taux de circulation de l'eau à 0,05 L/s.

Lorsque le système de chauffage fonctionne, l'effet de chauffage fourni au réservoir est le suivant :

$$\dot{Q}_H = \left(0.05\frac{L}{s}\right) \cdot \left(4200\ \frac{J}{L \cdot \text{°C}}\right) \cdot (25\text{°C}) = 5250\ W$$

Pour une période où le taux moyen de perte de chaleur du réservoir est de 4 200 W, il devrait être facile de montrer que le système de chauffage doit maintenant fonctionner 80 % du temps (c'est-à-dire 4 200/5 250) de manière à ce que l'effet de chauffage moyen corresponde à la charge moyenne.

6. Conception d'un système de chauffage simple - Partie C

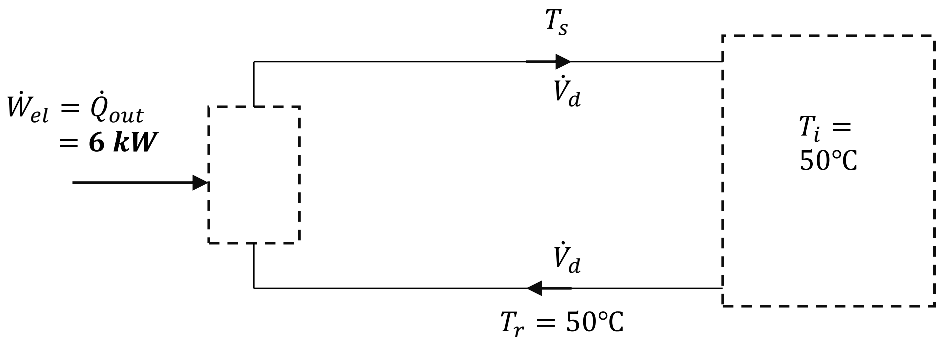
Passons maintenant au choix de la chaudière. Nous devons nous assurer qu'elle peut fournir au moins l'effet de chauffage prévu, bien que nous puissions souhaiter la surdimensionner pour assurer un facteur de sécurité.

Supposons que nous ayons décidé de choisir une chaudière dotée d'une simple commande "marche-arrêt" (c'est-à-dire que le chauffage/brûleur est soit entièrement en marche, soit entièrement à l'arrêt). Supposons également que les tailles disponibles soient de 3,0, 4,5 ou 6,0 kW de puissance calorifique (le coût de la chaudière augmentant avec la capacité). N'oublions pas non plus que la chaudière devra être équipée d'un câblage électrique d'une intensité suffisante, ce qui aura une incidence sur le choix de la chaudière.

Tailles de chaudières disponibles (240V) :

kW
3.0
4.5
6.0

Pour notre situation, la plus petite chaudière est clairement insuffisante. La chaudière de 4,5 kW pourrait être choisie si un facteur de sécurité modeste est acceptable. Mais, pour cette discussion, supposons que la chaudière de 6,0 kW soit choisie.



Nous devons maintenant revoir les choix de conception du système de circulation. Si nous conservons le débit initialement déterminé, $\dot{V}_d = 0.04\ L/s$, le bilan énergétique de la chaudière comme volume de contrôle permet de calculer la température de sortie de la chaudière en régime permanent :

$$\dot{Q}_{out} = \dot{V}_d \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_s - T_r)$$

$$T_s = \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{V}_d \cdot \rho \cdot c_p} + T_r = \frac{6000\ W}{\left(0.04\ \frac{L}{s}\right)\left(4200 \frac{J}{L \cdot °C}\right)} + 50°C = 35.7 + 50 = \mathbf{85.7}°C$$

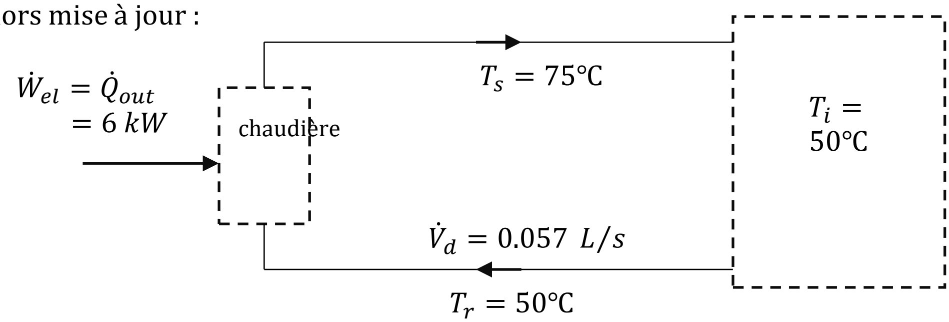
Si cette température semble acceptable, nous pouvons conserver le débit tel quel. Cependant, nous pourrions décider que cette température est "trop chaude" (par exemple pour des raisons de sécurité) et que nous préférons garder la température initialement sélectionnée (75°C) à la place. Dans ce cas, nous devons mettre à jour le calcul du débit pour fournir cette température à la sortie de la chaudière :

$$\dot{Q}_{out} = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_s - T_r)$$

$$\dot{V}_d = \frac{\dot{Q}_{out}}{\rho \cdot c_p \cdot (T_s - T_r)} = \frac{6000\ W}{\left(4200 \frac{J}{L \cdot °C}\right) \cdot (75 - 50°C)} \approx \mathbf{0.057\ \frac{L}{s}}$$

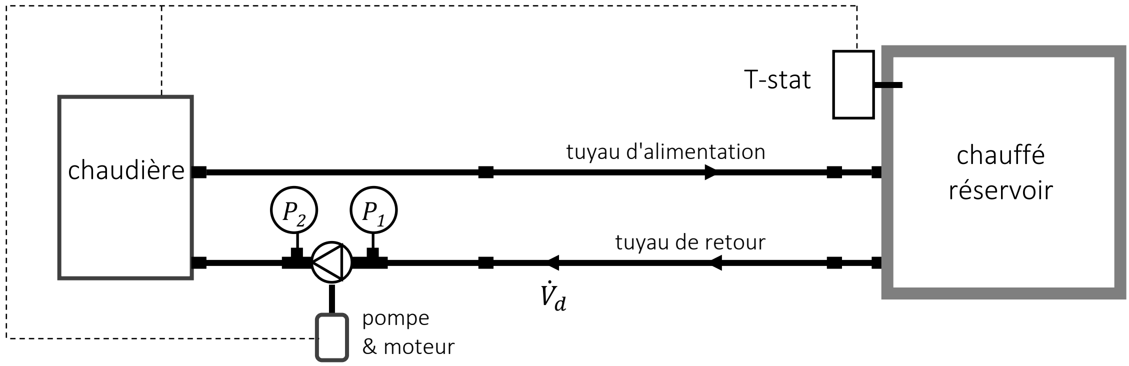
Si ce débit semble acceptable, nous pouvons le définir comme le débit de circulation prévu. (Remarque : nous pourrions essayer d'autres combinaisons de T_s et $\dot{V}_d$ si nous le souhaitions).

Supposons que le débit déterminé soit acceptable. La conception du système de chauffage est alors mise à jour :



À prendre en considération : Comment les valeurs de conception changeraient-elles si le réservoir était mieux isolé (par exemple UA = 30 W/°C) ?

L'étape suivante consiste à concevoir un système de tuyauterie capable de transporter le débit de circulation requis entre le réservoir et la chaudière. Il s'agit notamment de choisir une taille de tuyau appropriée (c'est-à-dire un diamètre) pour gérer le débit. Un itinéraire de tuyauterie entre la chaudière et le réservoir doit être choisi. Les raccords appropriés doivent être fournis, y compris les dispositions relatives à l'installation, au fonctionnement et à l'entretien du système.



Une fois que la conception initiale de la tuyauterie est terminée, un calcul de la perte de charge peut être effectué. Ce calcul fournira une estimation de ΔP qui doit être fournie par la pompe afin de surmonter les pertes par frottement du fluide qui se produisent lorsque $\dot{V}_d$ circule dans la boucle. Le calcul de ΔP définit en fait le "travail" de la pompe, c'est-à-dire la puissance du fluide = $\Delta P \cdot \dot{V}_d$.

Ensuite, en connaissant les exigences de pompage, il est possible de sélectionner une pompe. Les informations relatives aux performances de la pompe sélectionnée indiquent son rendement au point de fonctionnement prévu, η_p. La puissance d'entrée (c'est-à-dire la puissance de l'arbre) requise par la pompe est alors :

$$\dot{W}_{sh} = \frac{\Delta P \cdot \dot{V}_d}{\eta_p}$$

La pompe sera entraînée par un moteur électrique chargé de fournir une puissance de sortie à l'arbre, $\dot{W}_{sh}$. Le moteur peut alors être sélectionné et son rendement déterminé, η_m. La puissance électrique d'entrée requise par le moteur est la suivante :

$$\dot{W}_{el} = \frac{\dot{W}_{sh}}{\eta_m}$$

En fonction de la puissance requise par le moteur et des informations relatives à son alimentation (par exemple, la tension), il est possible de sélectionner le calibre du câble du moteur.

Il reste à faire en sorte que le thermostat contrôle le fonctionnement de la pompe et de la chaudière (p. ex., à l'aide d'un relais électrique). Dans ce cas, la commande pourrait être aussi simple que d'ordonner à la pompe et à la chaudière de se mettre en marche et de s'arrêter en même temps, c.-à-d. que lorsque la chaleur est requise, les deux dispositifs se mettent en marche et lorsque la chaleur n'est pas requise, ils s'arrêtent tous les deux.

À prendre en considération : Comment les valeurs de conception changeraient-elles si le réservoir était mieux isolé (par exemple UA = 30 W/°C) ?

Problèmes

1. En utilisant la feuille de calcul Excel fournie, reproduisez l'analyse de simulation présentée dans les sections 2 et 3. La simulation utilisera des pas de temps de 60 secondes sur une période de simulation de 8 heures. Les données météorologiques horaires sont fournies dans la feuille de calcul.

Tout a été mis en place dans la feuille de calcul, à l'exception de l'algorithme permettant de déterminer l'état de l'appareil de chauffage pour le "pas de temps actuel" (c'est-à-dire le pas de temps analysé). Vous devrez créer l'expression logique dans Excel pour déterminer si le chauffage doit être alimenté pour le pas de temps en cours. Pour le pas de temps 2éme (commençant à t = 60 s), cette expression doit être saisie dans la cellule O8 (en orange ci-dessous).

	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
1														
2		timestep	60	sec	<-- do not change									
3														
4														
5				To		Ti degC	heater	heater	Q_L	dT/dt	Ti degC		Q_L	W_el
6		t (s)	t (hr)	deg C		(start)	state	pwr W	W	(deg C/s)	(end)		MJ	MJ
7		0	0.000	-12		50.000000	0	0	3720.0	-0.000445	49.973308		0.22320	0.00000
8		60	0.017	-12		49.973308		0	3718.4	-0.000445	49.946627		0.22310	0.00000
9		120	0.033	-12										
10		180	0.050	-12										
11		240	0.067	-12										
12		300	0.083	-12										
13		360	0.100	-12										
14		420	0.117	-12										

Logique recommandée pour choisir l'état du chauffage pour le pas de temps en cours :

Régler le chauffage = marche si :

[(le chauffage était éteint au cours du pas de temps précédent ET la température du réservoir au début du pas de temps actuel est inférieure à la température de déclenchement basse T)

ou

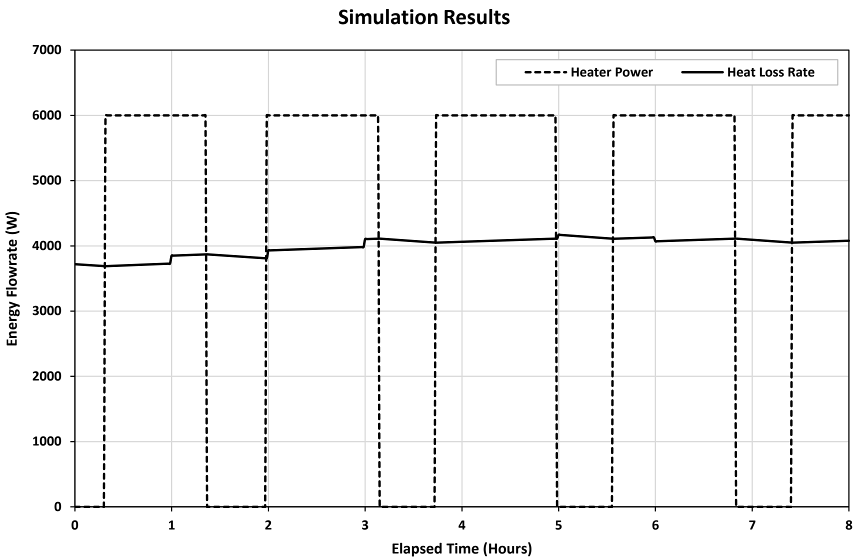
(le chauffage était allumé lors du pas de temps précédent ET la température du réservoir T au début du pas de temps actuel est inférieure à la température de déclenchement haute T)]

Dans le cas contraire, le chauffage est désactivé.

Si vous écrivez une expression correcte dans la cellule O8, vous devriez pouvoir copier-coller les calculs de la ligne 8 (colonnes N-V) pour remplir les lignes restantes de la simulation et l'algorithme de chauffage fonctionnera comme prévu.

Une fois que la simulation fonctionne correctement, le total des pertes de chaleur (MJ) et le total de l'énergie électrique utilisée (MJ) pour les 8 heures seront tous deux d'environ 115 MJ. Il s'agit de la somme des valeurs énergétiques des colonnes U et V.

Les résultats partiels de la simulation de 8 heures sont présentés dans le graphique de la page suivante. Notez que la "surface sous la courbe" correspond à l'énergie totale transférée.



2. Après avoir résolu le problème n° 1, essayez de modifier certains des paramètres de simulation (tels que la valeur de l'AU, la taille du chauffage, l'état initial du chauffage, etc.) pour vérifier l'impact sur le comportement simulé et la consommation d'énergie prévue.

3. Poursuivre la même analyse : Estimez manuellement la consommation d'électricité du système de réservoir pendant 8 heures en utilisant l'approche <u>quasi-stationnaire.</u> Les conditions météorologiques horaires utilisées dans la feuille de calcul sont également indiquées dans le tableau de droite. L'AU du réservoir est de 60 W/deg C, et le point de consigne de la T interne est de 50 deg C. [Réponse : ≈ 115 MJ].

Heure #	**T_o (deg C)**
1	-12
2	-14
3	-16
4	-18
5	-18
6	-19
7	-18
8	-18

4. Une chambre chauffée doit être maintenue à une température interne uniforme de 35°C. Le chauffage sera assuré par un dispositif de chauffage externe qui aspire le fluide de la chambre et le renvoie à 45°C.

Considérons une période où la température ambiante à l'extérieur de la chambre est de -10°C et où la perte de chaleur globale est de 2,5 kW. Pour les deux scénarios suivants, quelle est la vitesse minimale de circulation du fluide nécessaire pour fournir un effet de chauffage suffisant pour maintenir la température de la chambre à 35°C ?

A. La chambre est un réservoir. Le fluide est de l'eau avec $\rho c_p \approx 4.2\ kW/\left(\frac{L}{s}\cdot °\mathrm{C}\right)$.

B. La chambre est une pièce. Le fluide est de l'air avec $\rho c_p \approx 1.23\ W/\left(\frac{L}{s}\cdot °\mathrm{C}\right)$.

Solutions

1. Si vous êtes vraiment bloqué, demandez de l'aide à un membre de l'équipe enseignante.

2. N/A

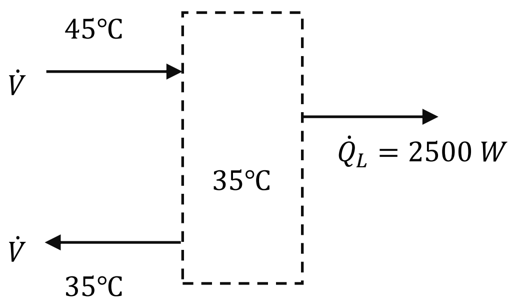
3. Si vous êtes vraiment bloqué, demandez de l'aide à un membre de l'équipe enseignante.

4. Traiter la chambre comme si elle subissait un refroidissement constant par fluide sensible :

$$\dot{V} = \frac{\dot{Q}_L}{\rho c_p \cdot (T_s - T_i)}$$

$$\dot{Q}_L = 2.5\ kW = 2500\ W$$

$$T_s - T_i = 45 - 35°\text{C} = 10°\text{C}$$



Scénario A :

$$\dot{V} = \frac{2.5\ kW}{4.2\ \ kW/\left(\frac{L}{s} \cdot °\text{C}\right) \cdot (10°\text{C})} \approx \mathbf{0.06\ \ L/s}$$

Scénario B :

$$\dot{V} = \frac{2500\ W}{1.23\ \ W/\left(\frac{L}{s} \cdot °\text{C}\right) \cdot (10°\text{C})} \approx \mathbf{203\ \ L/s}$$