

Du soleil dans votre ballon

GILLES COZIAN *, CHRISTOPHE MARY **

Sensibiliser les élèves à l'utilisation de l'énergie solaire pour fabriquer de l'énergie électrique est aisé : un panneau photovoltaïque, un régulateur et une batterie sont faciles à mettre en œuvre. En revanche, pour réaliser une installation complète de chauffe-eau solaire, il est souhaitable de faire appel à la modélisation.

Comme nous l'évoquions dans un article précédent¹, l'un des participants de notre journée de formation avait soulevé le problème de la modélisation d'un chauffe-eau solaire individuel afin de multiplier les exemples exploitables avec les élèves.

La modélisation est une étape du développement d'un projet d'ingénierie. Le référentiel des sciences de l'ingénieur de la série S place la modélisation comme une compétence à acquérir par les élèves au cours de leur formation. En STI2D, l'analyse de système est au cœur du référentiel concernant l'enseignement transversal comme celui de spécialité. La modélisation devient donc un outil permettant d'appréhender un système, voire de valider le projet industriel : le chauffe-eau solaire se prête particulièrement bien à l'exercice.

Pourquoi s'intéresser au chauffe-eau solaire ?

La production d'énergie est sans doute un problème majeur que l'humanité aura à résoudre dans les années futures. La limite du stock d'énergie fossile et l'impact de son utilisation sur le climat en font une énergie du passé. La modification des sources d'énergie primaires doit se faire sans impacter autant que possible notre confort au quotidien. La première source d'énergie est bien sûr celle provenant du soleil.

Le Grenelle 1 de l'environnement dont est issue la réglementation thermique 2012 (RT 2012) impose une consommation d'énergie primaire inférieure à 50 kWh/(m²·an). L'utilisation de l'énergie solaire est l'un des moyens pour y parvenir.

L'idée de chauffer l'eau sanitaire grâce au soleil n'est pas nouvelle. Elle existe depuis l'Antiquité par chauffage direct. Elle est aussi utilisée de nos jours

MOTS-CLÉS

énergie renouvelable, thermique, simulation

de manière très simple dans les « douches solaires » que l'on trouve en général au rayon « camping » des grandes surfaces.

Nous ne nous plaçons évidemment pas dans ce cas, puisque, dans une installation fixe, la réglementation impose certaines contraintes pour éviter le développement de bactéries comme les légionnelles². Ceci impose généralement une température de l'eau contenue dans le ballon supérieure à 65 °C.

Modélisation d'un chauffe-eau solaire sanitaire

La première étude que l'on doit faire est une étude climatologique. En effet, selon la région du monde et même de France, l'ensoleillement annuel est variable. Dans le cas de la France, nous pouvons nous appuyer sur le *Guide technique du chauffe-eau solaire individuel* de l'Ademe (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie)¹. La carte fait apparaître quatre zones climatiques, avec globalement un ensoleillement croissant du nord au sud du pays.

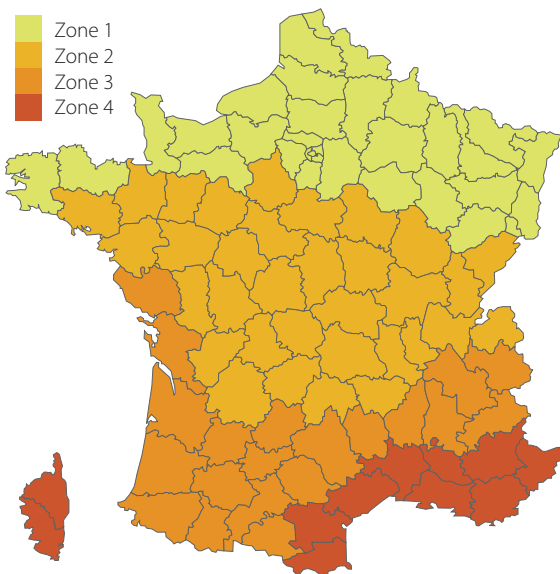
Le guide de l'Ademe nous conseille également sur la taille des capteurs (panneaux solaires) et le volume du ballon à utiliser selon la zone climatique où l'on se trouve et le nombre d'occupants du logement².

Nous avons choisi un lieu, Brest, en zone climatique 1, avec une habitation pour trois personnes. Ceci nous amène à choisir un ballon dont le volume est compris entre 250 et 400 litres (on suppose sans appoint électrique) et une surface de panneaux comprise entre 3 et 5,5 m². Nous optons finalement pour deux panneaux de 1,9 m² et pour un ballon de 300 litres.

Le capteur solaire est situé sur le toit de l'habitation. Il y a deux échangeurs thermiques : le premier, situé dans le capteur, permet au fluide caloporteur en circulation forcée de récupérer une partie de l'énergie rayonnée du soleil ; il la restitue à l'eau du ballon grâce à un second échangeur situé dans ce dernier³. La température de l'eau du ballon est contrôlée par un régulateur qui assure un débit variable du fluide caloporteur en agissant sur la pompe de circulation.

* Professeur de sciences appliquées en STS Électrotechnique au lycée Vauban de Brest (29).

** Professeur de SII, ingénierie électrique en STS Électrotechnique au lycée Vauban de Brest (29).



1 Carte des zones climatiques en France

Hypothèses pour la modélisation

Il est très difficile de tenir compte de tous les paramètres physiques influant sur le comportement du système; il est donc nécessaire de faire des hypothèses et de négliger certains éléments dont on suppose l'influence faible.

Ces hypothèses amènent évidemment des différences entre le comportement réel du système et la simulation issue de la modélisation. On néglige ainsi les échanges radiatifs dans le capteur, les échanges thermiques par conduction (la température du cylindre

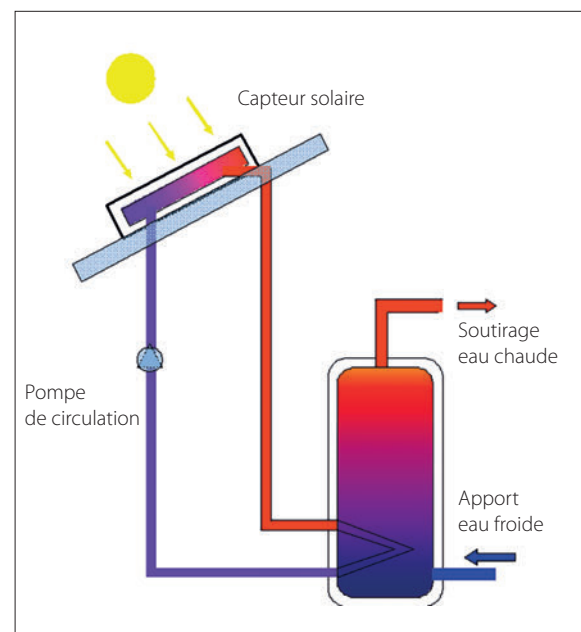
1. « Le puits canadien, une simulation qui ne manque pas d'air », *Technologie*, n° 204, septembre-octobre 2016, p. 36-42.

2. Selon l'extrait de l'arrêté du 30 novembre 2005 modifiant l'arrêté du 23 juin 1978 relatif aux installations fixes destinées au chauffage et à l'alimentation en eau chaude sanitaire des bâtiments d'habitation, des locaux de travail ou des locaux recevant du public : « Lorsque le volume entre le point de mise en distribution et le point de puisage le plus éloigné est supérieur à 3 litres, la température de l'eau doit être supérieure ou égale à 50 °C en tout point du système de distribution. »

	Nombre d'occupants			
	1 ou 2	3 ou 4	5 ou 6	7 et plus
Volume du ballon solaire ^a (litres)	100 à 150	150 à 250	250 à 350	350 à 500
Volume total du ballon ^b (litres)	100 à 250	250 à 400	400 à 550	550 à 650
Zones climatiques (voir cartes)	Surface des capteurs (m ²)			
1	2 à 3	3 à 5,5	4 à 7	5 à 7
2	2 à 3	2,5 à 4,5	3,5 à 6,5	4,5 à 7
3	2 à 2,5	2 à 4	3 à 5,5	3,5 à 7
4	2 à 2,5	2 à 3,5	2,5 à 4,5	3,5 à 6

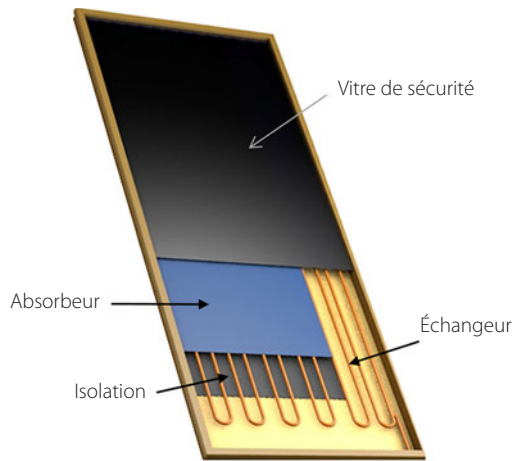
a : pour un chauffe-eau solaire sans appoint
 b : pour un chauffe-eau solaire avec appoint

2 Critères pour le dimensionnement du chauffe-eau solaire



3 Synoptique de l'installation

de cuivre est donc celle du fluide caloporteur), les pertes à l'arrière du capteur, les pertes au niveau du fluide caloporteur à l'extérieur du ballon, l'influence du vent (la température de l'air est uniforme sur toute la surface du capteur). Par ailleurs, on suppose la température homogène à la surface de l'absorbeur **4**.



4 Écorché du capteur solaire

Dans le ballon, la convection naturelle amène l'eau chaude vers le haut ; on négligera ce phénomène relativement lent et on considèrera la température du ballon uniforme sur toute sa hauteur. On notera cependant que le phénomène de convection naturelle à l'intérieur du ballon améliore l'échange thermique, puisque l'eau la plus froide se trouve en bas du ballon, c'est-à-dire au niveau de l'échangeur.

On négligera enfin l'effet thermique du matériau constituant le tube de l'échangeur et l'on considèrera que l'échange a lieu directement entre le fluide et l'eau du ballon.

Mise en équation du système

Les grandeurs d'entrée, de sortie et d'influence sont résumées dans la figure 5.

Grandeurs de sortie : nous observerons la température de l'eau dans le ballon et la puissance transmise à l'eau du ballon.

Grandeurs d'entrée : il s'agit de l'irradiance solaire, exprimée en W/m^2 .

Grandeurs d'influence : deux températures interviennent sur les performances du système, à savoir la température extérieure et la température du local dans lequel se trouve le ballon.

Grandeurs intermédiaires : on notera T_{fs} la température du fluide à la sortie du capteur qui est aussi celle à l'entrée du ballon, puisque l'on a négligé les pertes du fluide caloporteur en dehors du ballon. On

La convection naturelle à l'intérieur du ballon améliore l'échange thermique

notera T_{fe} la température du fluide à l'entrée du capteur, qui est aussi celle en sortie du ballon. Enfin, la température moyenne du fluide sera nommée T_{fm} .

Le système étant en équilibre, la puissance fournie au fluide caloporteur par le rayonnement solaire est égale à celle que cède le fluide à l'eau du ballon.

Mise en équation du rendement du capteur et de la puissance fournie au fluide caloporteur

La norme EN 12975 permet de calculer simplement le rendement du panneau solaire à l'aide de la relation suivante :

$$\eta = \eta_0 - a_1 \cdot \left(\frac{T_{fm} - T_{ext}}{\phi} \right) - a_2 \cdot \left(\frac{T_{fm}^2 - T_{ext}^2}{\phi} \right)$$

avec :

ϕ , l'irradiance reçue en $W \cdot m^{-2}$

$T_{fm} = \frac{T_{fs} + T_{fe}}{2}$, la température moyenne du fluide caloporteur

T_{fs} , la température du fluide caloporteur à la sortie du capteur solaire

T_{fe} , la température du fluide caloporteur à l'entrée du capteur solaire

T_{ext} , la température extérieure.

La puissance fournie au fluide caloporteur peut alors s'écrire :

$$P = S(\eta_0 \cdot \phi - a_1 (T_{fm} - T_{ext}) - a_2 (T_{fm}^2 - T_{ext}^2)) \quad (1)$$

où S est la surface du capteur³.

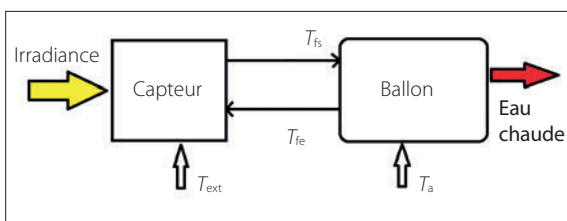
Lorsque la température de l'eau du ballon augmente, l'échange entre le fluide caloporteur et l'eau diminue, ce qui a pour effet d'augmenter la température moyenne du fluide, de diminuer ainsi le rendement du capteur et la puissance fournie par le rayonnement à ce fluide. Le système trouve ainsi un équilibre.

A contrario, lorsque la température de l'eau du ballon diminue, lors d'un soutirage d'eau chaude, l'échange entre le fluide et l'eau augmente, ce qui a pour effet de diminuer la température moyenne du fluide et donc d'augmenter la puissance fournie par le rayonnement à ce fluide.

Équation thermique du ballon

La puissance reçue par l'eau du ballon s'écrit :

$$P = m_{eau} \cdot C_{eau} \frac{dT}{dt} + \frac{T - T_a}{R_{th}}$$



5 Grandeurs d'entrée, de sortie et d'influence

3. Dans le cadre de cette relation, η_0 représente le rendement du capteur sans pertes vers le milieu extérieur (comme si le capteur était à la température ambiante extérieure), a_1 et a_2 décrivent les pertes thermiques dues au fait que le capteur est plus chaud que la température ambiante extérieure.

Ces valeurs sont généralement données dans les documents techniques des constructeurs.

avec :

R_{th} , la résistance thermique d'échange du ballon avec le milieu ambiant

T_a , la température ambiante autour du ballon

m_{eau} , la masse d'eau du ballon

C_{eau} , la capacité thermique de l'eau du ballon.

La première partie de cette équation, c'est-à-dire

$m_{eau} \cdot C_{eau} \frac{dT}{dt}$, élève la température de l'eau; la

seconde partie $\frac{T - T_a}{R_{th}}$ compense les échanges

thermiques entre l'eau du ballon et l'air ambiant du local où est situé ce ballon.

La mise en forme de cette équation donne :

$$\tau \cdot \frac{dT}{dt} + T = P \cdot R_{th} + T_a$$

avec $\tau = m_{eau} \cdot C_{eau} \cdot R_{th}$

Si l'on s'intéresse à $\Delta T = T - T_a$, différence de température entre l'eau du ballon et la température

ambiante, et en remarquant que $\frac{d(\Delta T)}{dt} = \frac{dT}{dt}$, il

vient : $\tau \cdot \frac{d(\Delta T)}{dt} + \Delta T = P \cdot R_{th}$.

Soit, en utilisant la transformée de Laplace :

$$\Delta T(p) (1 + \tau p) = P(p) \cdot R_{th} \quad (2)$$

Échange thermique entre le fluide caloporteur et l'eau du ballon

L'étude est identique à celle effectuée pour le puits canadien (voir *Technologie* n° 204). Il s'agit d'un transfert de type convectif.

Le résultat qui dépend de la longueur l du tuyau d'échange est :

$$T_{fe} = T + (T_{fs} - T) \cdot e^{-A} \text{ avec } A = \frac{h \cdot 2\pi R}{\rho_f \cdot q_f \cdot C_f} \quad (3)$$

avec :

T_{fe} , la température du fluide caloporteur à la sortie du ballon ou à l'entrée du capteur

T_{fs} , la température du fluide caloporteur à l'entrée du ballon ou à la sortie du capteur

ρ_f , la masse volumique du fluide caloporteur

q_f , le débit volumique du fluide caloporteur

C_f , la capacité thermique massique du fluide caloporteur

h , le coefficient de transfert convectif.

La difficulté consiste en la détermination de h ; il est traité en fin d'article.

Cette différence de température entre la sortie et l'entrée du ballon permet de calculer la puissance que le fluide caloporteur transmet à l'eau du ballon :

$$P = \rho_f q_f C_f (T_{fs} - T_{fe}) \quad (4)$$


Cette puissance est bien positive, puisque la température d'entrée du ballon (T_{fs}) est supérieure à celle de sortie (T_{fe}).

Détermination de la température de sortie du ballon du fluide caloporteur

Les principales relations d'échange thermique ayant été déterminées, il reste pour simplifier le modèle à déterminer la température du fluide caloporteur à la sortie du ballon. Celle-ci dépend de la température de l'eau du ballon et de la puissance thermique cédée à cette eau par le fluide. Pour cela, il suffira de manipuler les équations (3) et (4) pour obtenir :

$$T_{fe} = T + \left(\frac{P \cdot e^{-A}}{(1 - e^{-A}) \rho_f \cdot q_f C_f} \right) \quad (5)$$

Modélisation du système

Il est maintenant possible d'établir un schéma bloc à partir des équations (1), (2), (4) et (5) .

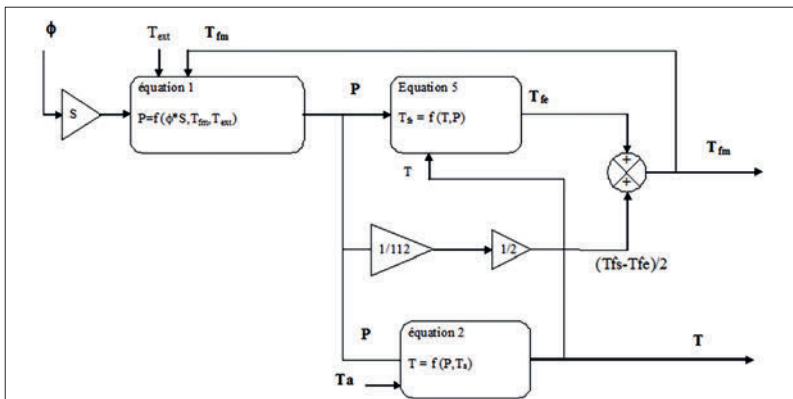
Données numériques

Capteur		
Aire d'absorption capteur	m ²	1,9
Débit nominal	l/h	100
Coefficient de conversion		0,785
a_1	W·m ² ·K ⁻¹	3,72
a_2	W·m ² ·K ⁻²	0,012

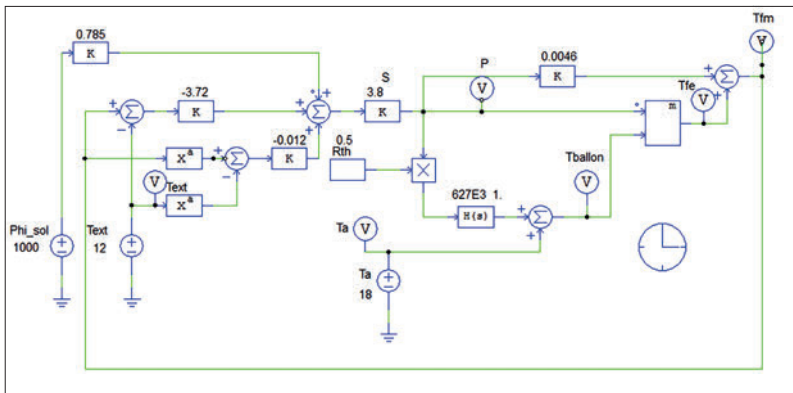
Ballon		
Volume	l	300
Surface échangeur	m ²	1,65
Diamètre échangeur	pouce	1

Autres valeurs numériques

Fluide caloporteur (eau glycolée)	
Masse volumique	$\rho_f = 1\,032 \text{ kg/m}^3$
Capacité thermique massique	$C_f = 3\,746 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$
Viscosité dynamique	$\mu_f = 7,39 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{s}$
Conductivité thermique	$\lambda_f = 0,490 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
Capacité thermique massique de l'eau	$C_{eau} = 4\,185 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$



6 Schéma bloc



7 Modèle PSIM3

Valeurs numériques déduites des données

La valeur de A, qui dépend du coefficient de transfert convectif calculé, est égale à 0,063 m⁻¹.

La longueur d'échange peut être calculée d'après les données du ballon (surface de l'échangeur et diamètre de l'échangeur) : l = 27,6 m.

V est la vitesse moyenne du fluide dans la canalisation; avec un débit donné de 100 l/h, V = 0,055 m/s.

Les ballons actuels, du fait de leur isolation, donnent un coefficient de pertes thermiques pour une capacité de 300 litres voisine de 2 W/K, soit une résistance thermique R_{th} voisine de 0,5 K/W.

Application numérique

Dans tous les cas, on a P en watts et les températures en °C. Le modèle PSIM est donné en figure 7.

– Puissance en sortie du capteur fournie au fluide caloporteur, de l'équation (1)

$$P = (0,785 \cdot \phi - 3,722 (T_{fm} - T_{ext}) - 0,012 \cdot (T_{fm}^2 - T_{ext}^2)) \cdot 3,76$$

– Écart de température du fluide caloporteur, de l'équation (4)

$$\Delta T_f = T_{fs} - T_{fe} = \frac{P}{\rho_f \cdot q_f \cdot C_f} = \frac{P}{108}$$

– Température de l'eau du ballon, de l'équation (2)
 $T (1 + \tau p) = P \cdot R_{th} + T_a$, avec $\tau = 300 \times 4185 \times 0,5 = 627 \cdot 10^3 \text{ s}$

$$\Delta T = \frac{0,5 \cdot P}{(1 + 627 \cdot 10^3 \cdot p)}$$

– Température de sortie du fluide caloporteur du ballon, de l'équation (5)

$$T_{fe} = T + \frac{P}{292}$$

– Température moyenne du fluide caloporteur
 $T_{fm} = \frac{T_{fs} + T_{fe}}{2} = T_{fe} + \frac{\Delta T_{fs}}{2}$, soit $T_{fm} = T_{fe} + \frac{P}{216}$

Résultats de la modélisation

Nous avons réalisé une simulation du comportement du système. Les résultats sont fournis en figure 8.

Dans cette modélisation, l'hypothèse de départ, à savoir que la température dans le ballon soit homogène, amène à des performances moindres que celles du ballon réel; en effet, avec la stratification du ballon, l'eau se trouvant au niveau de l'échangeur est à une température moindre que la température moyenne dans le ballon : l'échange thermique est amélioré.

De plus, avec deux panneaux, soit une aire totale d'absorption de 3,9 m² et un ballon de 300 litres, nous nous sommes placés dans les recommandations basses de l'Ademe.

Nous voyons toutefois que le système est viable pour une ville du nord de la France. Même si les temps de chauffe sont plus longs qu'avec un système de chauffage classique au gaz ou électrique, ceci est compensé par la taille du ballon proposé par l'Ademe; en effet, pour un volume plus important, l'effet du soutirage de l'eau froide sera moindre.

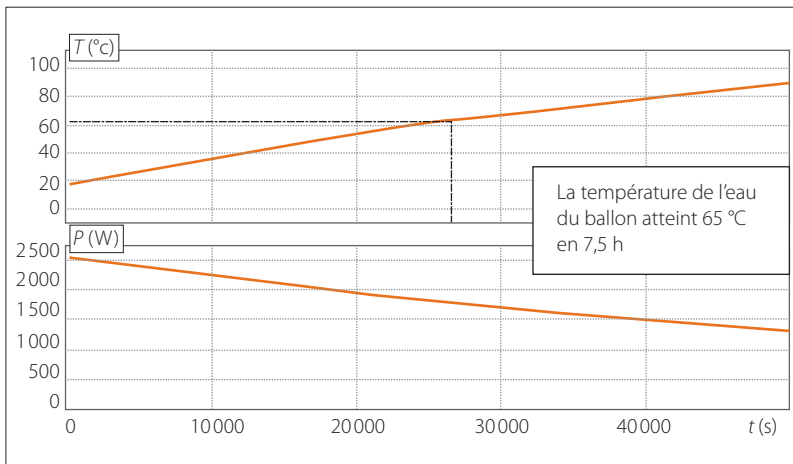
Pistes d'exploitation pédagogique possibles

Ce modèle peut être, bien sûr, inséré dans une étude plus globale d'une habitation, pour vérifier par exemple que la consommation énergétique ne dépasse pas 50 kWh/(m²·an).

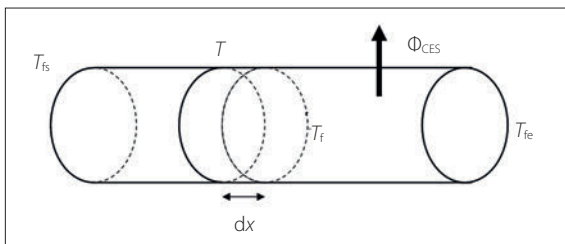
La puissance thermique fournie par le capteur solaire est modélisée par l'équation de son rendement. Il est donc possible de remplacer ce capteur photothermique par une pompe à chaleur, une chaudière à gaz, à fioul, etc. Cela nécessite de connaître l'expression de la puissance thermique fournie par l'échangeur du système considéré. Une fois P_{th} déterminée, le modèle du ballon (hors capteur) reste inchangé.

Il est possible aussi d'agir sur certains paramètres du modèle en modifiant :

– la taille des panneaux, en modifiant S sur le modèle;



8 Résultats de la modélisation



9 Échange thermique entre le fluide caloporteur et l'eau du ballon

- l'isolation du ballon (en paramétrant R_{th} et la constante de temps dans $H(s)$);
- la température extérieure.

Expression du flux thermique d'échange entre le fluide caloporteur et l'eau du ballon

Cet échange, noté Φ_{CES} , correspond à la puissance P fournie à l'eau du ballon. On néglige l'effet thermique de la paroi pour ne considérer que l'échange entre le fluide et l'eau. Il s'agit d'un flux d'échange convectif; le raisonnement est identique à celui déjà fait avec le puits canadien 9.

On peut donc écrire que pour un échange ayant lieu sur une surface dS de largeur dx :

$$\Phi_{CES} = h \cdot dS \cdot (T_f - T) = h \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot (T_f - T) \cdot dx$$

qui est le flux reçu par l'eau du ballon; il correspond à ce qui est fourni par le fluide caloporteur : $-r_f q_f C_f dT_f$.

Notons que pour le fluide caloporteur, au fur et à mesure de son cheminement dans le ballon, il cède son énergie et donc dT_f est négatif. Soit :

$$h \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot (T_f - T) \cdot dx = -\rho_f q_f C_f dT_f$$

La difficulté consiste à déterminer le coefficient de transfert convectif h . L'on traitera sa détermination un peu plus loin.

L'expression précédente nous donne :

$$\frac{dT_f}{T_f - T} = -\frac{h \cdot 2 \cdot \pi \cdot R}{\rho_f q_f C_f} \cdot dx, \text{ on notera } A = \frac{h \cdot 2 \cdot \pi \cdot R}{\rho_f q_f C_f}$$

Pour calculer la température de sortie du fluide en fonction de la température du ballon, il faut intégrer sur la longueur du tube l :

$$\int_{T_{fs}}^{T_{fe}} \frac{dT_f}{T_f - T} = -A \cdot \int_0^l dx$$

et donc

$$\left[\ln(T_f - T) \right]_{T_{fs}}^{T_{fe}} = -Al$$

$$\ln \left(\frac{T_{fe} - T}{T_{fs} - T} \right) = -Al$$

Soit, pour la température de sortie du ballon :

$$T_{fe} = T + (T_{fs} - T) \cdot e^{-Al}$$

Détermination du coefficient h de convection thermique entre le liquide caloporteur et le ballon

Cette détermination est sans doute la partie la plus difficile de la modélisation. Comme pour l'article sur le puits canadien, nous allons utiliser les grandeurs réduites pour déterminer ce coefficient h .

Tout d'abord, il faut caractériser l'écoulement du fluide caloporteur. Il se fait à l'aide du nombre de

$$\text{Reynolds } Re = \frac{\rho_f \cdot V \cdot D}{\mu_f} = 1950, \text{ soit un écoulement}$$

laminaire du fluide caloporteur.

Méthode de calcul de h

Pour un écoulement laminaire, il faut :

- déterminer le nombre de Prandtl :

$$Pr = \frac{C_f \cdot \mu_f}{\lambda_f} = 5,6$$

- déterminer le nombre de Nusselt :

$$Nu = 1,86 \left(\frac{L}{D \cdot Re \cdot Pr} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_p} \right)^{0,14} = 4,41$$

en considérant que le régime permanent s'est établi ($\mu = \mu_p$);

- déterminer enfin $h = \frac{\lambda_f \cdot Nu}{D} = 85 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. ■

POUR EN SAVOIR PLUS

M. Feidt, *Génie énergétique: du dimensionnement des composants au pilotage des systèmes*, Dunod, 2014.

Cours de l'école des Mines de Nancy : www.thermique55.com/principal/thermique.pdf

Cours de transferts de chaleur, université de Caen, Adil Ridha : www.math.unicaen.fr/~ridha/pdf/Chapt-6.pdf