

Annexe 2: Simulation du système complet et calibrage sur les mesures

Table des matières:

A2. Simulation du système complet et calibrage sur les mesures	p. A2.1
A2.1 Modèle de pont capteur et dégivreur	p. A2.1
A2.2 Modèle de simulation pour le système complet	p. A2.5
A2.2.1 Schéma de principe	p. A2.5
A2.2.2 Variables météorologiques	p. A2.7
A2.2.3 Régulation du système	p. A2.9
A2.3 Comparaison simulation - mesure	p A2.9
A2.3.1 Performances thermiques mesurées et procédure de calibration	p A2.9
A2.3.2 Sensibilité des performances du système aux principaux paramètres de simulation	p A2.13
A2.3.3 Paramètres de simulation calibrés et performances thermiques simulées	p A2.14
A2.4 Conclusion	p A2.16
Références	p A2.17

A2. Simulation du système complet et calibrage sur les mesures

A2.1 Modèle de pont capteur et dégivreur

Le modèle de calcul utilisé pour simuler le comportement thermique du pont capteur et dégivreur est le modèle TRNSYS standard pour la simulation d'un bâtiment. Il s'agit du TYPE 56 (Klein et al., 2005), développé par TRANSSOLAR. Le pont est simulé comme une dalle active, en utilisant explicitement le formalisme développé par Koschenz et Dorrer (1996). Ce formalisme permet de ramener le problème bi-dimensionnel du transfert thermique entre les tubes et le béton à un problème à une dimension. Ainsi, le champ de température dans le plan des tubes est réduit à une température moyenne équivalente T_m . Dans la figure A2.1, une coupe du pont, dont l'épaisseur totale est d_1+d_2 , est montrée. La surface extérieure (surface supérieure) de la partie supérieure correspond à la surface de la chaussée du pont, tandis que la surface extérieure (surface inférieure) de la partie inférieure correspond au dessous du pont. Le plan dans lequel se trouvent les tubes est à la profondeur d_1 depuis la face supérieure et d_2 depuis la face inférieure. La résistance R permet de calculer le transfert de chaleur du fluide circulant dans les tubes à température T_f à la zone fictive à température T_m . La température de cette zone fictive correspond à la température moyenne équivalente du pont dans le plan des tubes.

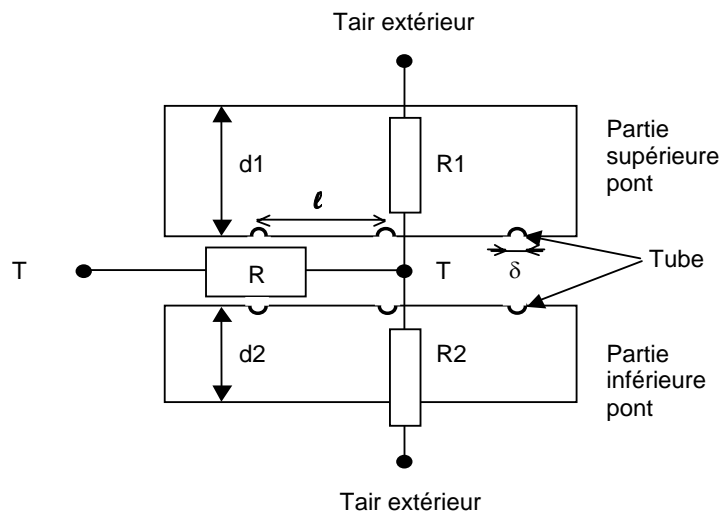


Figure A2.1 Coupe transversale du pont. Le plan des tubes (serpentins dans la chaussée) est représenté par la température moyenne équivalente T_m . Elle permet de ramener le calcul des transferts de chaleur entre les tubes et les surfaces supérieure et inférieure du pont à un problème à une dimension.

- d_1+d_2 : épaisseur totale du pont [m] ;
- d_1 : profondeur des tubes depuis la face supérieure du pont (chaussée) [m] ;
- d_2 : profondeur des tubes depuis la face inférieure du pont [m] ;
- ℓ : espacement des tubes [m] ;
- δ : diamètre extérieur des tubes [m] ;
- T_m : température moyenne équivalente du pont dans le plan des tubes [$^{\circ}\text{C}$] ;

T_f : température du fluide circulant dans les tubes [$^{\circ}\text{C}$] ;
 $T_{\text{air extérieur}}$: température de l'air extérieur [$^{\circ}\text{C}$] ;
 R : résistance thermique entre T_f et T_m [$\text{K}/(\text{W}/\text{m}^2)$] ;
 R_1 : résistance thermique de la partie supérieure du pont [$\text{K}/(\text{W}/\text{m}^2)$] ;
 R_2 : résistance thermique de la partie inférieure du pont [$\text{K}/(\text{W}/\text{m}^2)$] ;

L'expression de la résistance thermique R est donnée par la relation A2.1, qui est la somme de trois composantes : la résistance de contact fluide - paroi intérieure des tubes, résistance des tubes de la paroi intérieure à la paroi extérieure et la résistance effective de la paroi extérieure des tubes à la zone fictive à température T_m . Les résistances thermiques se rapportent à la surface dans laquelle se trouvent les serpentins, soit la surface de la chaussée du pont.

$$R = \left(\frac{\ell}{\pi \lambda_f \text{Nu}} + \frac{\ell}{2 \pi \lambda_p} \ln \left(\frac{\delta}{\delta_{pi}} \right) + R' \right) \quad (\text{A2.1})$$

Avec λ_f : conductivité thermique du fluide [W/mK] ;
 Nu : nombre de Nusselt, dépend du régime d'écoulement [-];
 λ_p : conductivité thermique de la paroi du tube [W/mK] ;
 δ_{pi} : diamètre intérieur du tube [m] ;
 T_f : température du fluide dans les tubes [$^{\circ}\text{C}$] ;
 R' : résistance thermique entre la température de surface de la paroi extérieure des tubes et T_m [$\text{K}/(\text{W}/\text{m}^2)$] ;

Koschenz et Dorrer (1996) donnent une expression pour R' (cf. relation A2.2), si les conditions (A2.3) et (A2.4) sont remplies :

$$R' = \frac{\ell}{2 \pi \lambda} \ln \left(\frac{\ell}{\delta \pi} \right) \quad (\text{A2.2})$$

$$\text{si } d_i / \ell > 0.3, \quad i = 1 \text{ et } 2 \quad (\text{A2.3})$$

$$\text{si } \delta / \ell < 0.2 \quad (\text{A2.4})$$

Avec λ : conductivité thermique du matériau dans lequel sont noyés les tubes [W/mK] ;

La relation (A2.1) permet d'avoir une relation entre la température locale du fluide $T_f(x)$ et la température moyenne équivalente du pont dans le plan des tubes T_m . En supposant que T_m est constant dans tout le plan des tubes, on peut écrire une relation pour la puissance transférée du fluide au pont (cf. relation A2.5) :

$$q(x) = \frac{1}{R} (T_f(x) - T_m) \quad (\text{A2.5})$$

$q(x)$: puissance thermique transférée du fluide au pont [W/m^2] ;

La puissance thermique transférée par les tubes provient de la capacité thermique du fluide. Ceci permet d'écrire une équation différentielle pour la puissance transférée par le fluide en fonction du chemin parcouru (cf. relation A2.6) :

$$q(x) N \ell dx = -m_f A C_f dT_f(x) \quad (A2.6)$$

ℓ : espacement des tubes dans la chaussée du pont (rappel) [m] ;

L : longueur d'un tube dans le pont [m] ;

N : nombre de tubes connectés en parallèle dans le pont [-] ;

A : surface du pont équipée avec des tubes ; $A = N \cdot L \cdot \ell$ [m^2] ;

m_f : débit massique spécifique du fluide caloporteur dans le pont [$kg/(s m^2)$] ;

$m_f = M_f/A$ (M_f : débit massique total dans le pont [kg/s]) ;

C_f : chaleur spécifique du fluide caloporteur [J/kgK] ;

En combinant (A2.5) dans (A2.6) et en intégrant le long du chemin parcouru, de $x=0$ à $x=L$, on obtient une expression pour la température de sortie du fluide T_{fout} (cf. relation A2.7).

$$T_{fout} = T_m + (T_{fin} - T_m) \exp\left(-\frac{1}{R m_f C_f}\right) \quad (A2.7)$$

$T_{fin} = T_f(x=0)$ température d'entrée du fluide dans le pont [$^{\circ}C$] ;

$T_{fout} = T_f(x=L)$ température de sortie du fluide du pont [$^{\circ}C$] ;

La puissance thermique Q échangée par le fluide dans le pont est calculée par la relation (A2.8).

$$Q = m_f A C_f (T_{fin} - T_{fout}) \quad (A2.8)$$

Q : puissance thermique échangée par le fluide circulant dans le pont [W] ;

Avec le modèle de bâtiment TYPE56, on définit donc une zone fictive dont la température est T_m , la température moyenne équivalente du pont dans le plan des tubes. La frontière de la zone est définie par deux murs de même surface, correspondant aux parties supérieure et inférieure du pont. Le transfert de chaleur vers le haut est calculé par conduction à travers les couches des matériaux qui recouvrent les tubes (mur supérieur), et de la même manière vers le bas. La capacité thermique du pont est donc prise en compte par le modèle TYPE56. Comme le processus de transfert de chaleur dans le pont est purement diffusif, le modèle de bâtiment est utilisé en supprimant les pertes par ventilation. Un coefficient de transfert convectif arbitrairement grand est défini dans la zone, de sorte que la température de l'air de la zone soit égale à la température des surfaces intérieures des murs. La température de la zone, T_m , est définie comme variable de sortie du TYPE56, ce qui permet, avec les relations (A2.7) et (A2.8), de calculer la puissance thermique transférée par le fluide (le TYPE294 a été créé pour faire ce calcul). Cette puissance est ensuite retournée comme variable d'entrée au TYPE56, qui la traite comme des gains convectifs dans la zone concernée. A chaque pas de temps, le programme TRNSYS réitère les calculs jusqu'à ce qu'une solution soit obtenue.

Les caractéristiques du pont sont énumérées dans la table A2.1. Elles sont tirées de Hopkirk et al., 1994.

Surface chauffée du pont côté lac	760 m ²
Surface chauffée du pont côté montagne	540 m ²
Diamètre extérieurs des tubes	26.9 mm
Matériau des tubes	Chrome-nickel
Espacement moyen des tubes	25 cm
Longueur moyenne d'un tube	32 m
Nombre total de tubes	160 -
Couches formant le pont (de haut en bas)	
asphalte, épaisseur	50 mm
couche contenant les tubes	80 mm
dalle en béton armée	400 mm
isolation (polistyrol)	100 mm

Table A2.1 Principales caractéristiques du pont.

Un seul pont est simulé. Les paramètres de simulation sont donnés dans la table A2.2 et la figure A2.2 (valeurs calibrées).

Surface chauffée du pont	1'300 m ²
Débit total fluide caloporteur	41 m ³ /h
Débit par m ² de pont	32 litre/m ² h
Résistance thermique R (fluide – pont)	0.03 K/(W/m ²) *
Absorption solaire de la chaussée	0.7
Coefficient de transfert convectif chaussée	10 W/m ² K (constant)

* valeur calibrée, environ 20% plus basse (meilleur échange) que le calcul avec les formules ci-dessus

Table A2.2 Principales caractéristiques du pont.

Le coefficient de transfert convectif de la chaussée ne contient pas les transferts par radiation, qui sont calculés séparément avec la température radiative équivalente du ciel et une émissivité de 1.

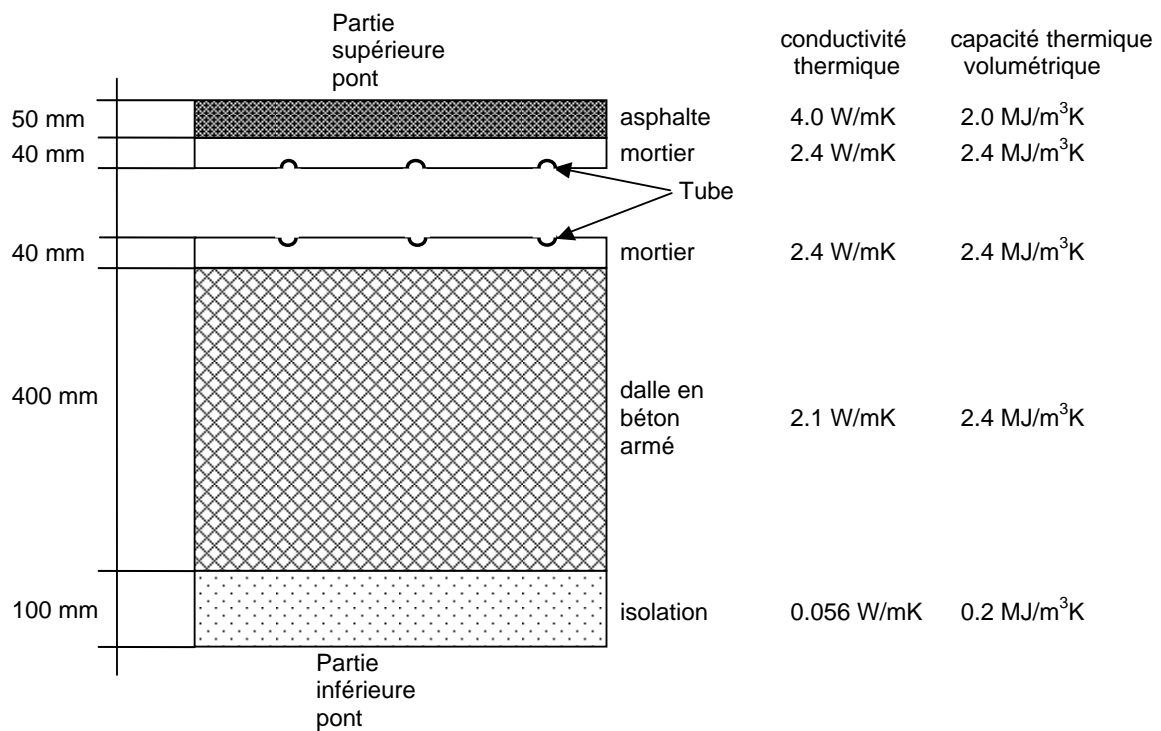


Figure A2.2 Coupe transversale du pont avec les couches définies par leur épaisseur et leurs propriétés thermiques pour la simulation du pont.

A2.2 Modèle de simulation pour le système complet

Le modèle de pont capteur – dégivreur est couplé au modèle de stockage diffusif calibré conformément au schéma de principe du système.

A2.2.1 Schéma de principe

Le schéma de principe de l'installation est montré de façon simplifiée dans la figure A2.3. Il est en réalité plus complexe (voir Hopkirk et al., 1994), même si cela n'a pas d'incidence sur le concept du système.

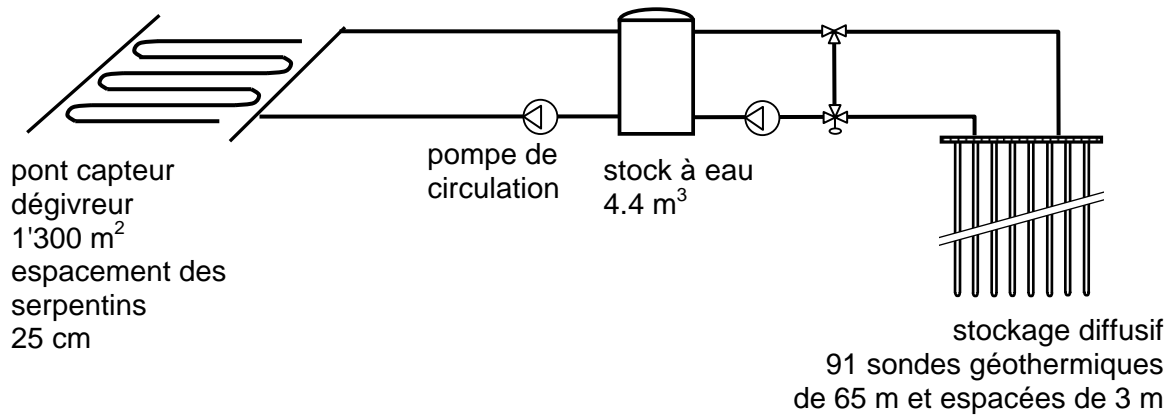


Figure A2.3 Schéma de principe simplifié de l'installation réalisée.

La vanne mélangeuse permet de limiter la température du fluide qui sort du stockage en période de déstockage et ainsi de contrôler la température « aller » dans les serpentins du pont en hiver lors du dégivrage. Elle ne « mélange pas » en été, lorsque le stockage diffusif est chargé. La température de consigne est définie en fonction de la température de l'air extérieure en fonction du graphique de la figure A2.4 (Sommer, 1999). Le dégivrage du pont n'a lieu que lorsque la température de l'air extérieur passe sous 4°C.

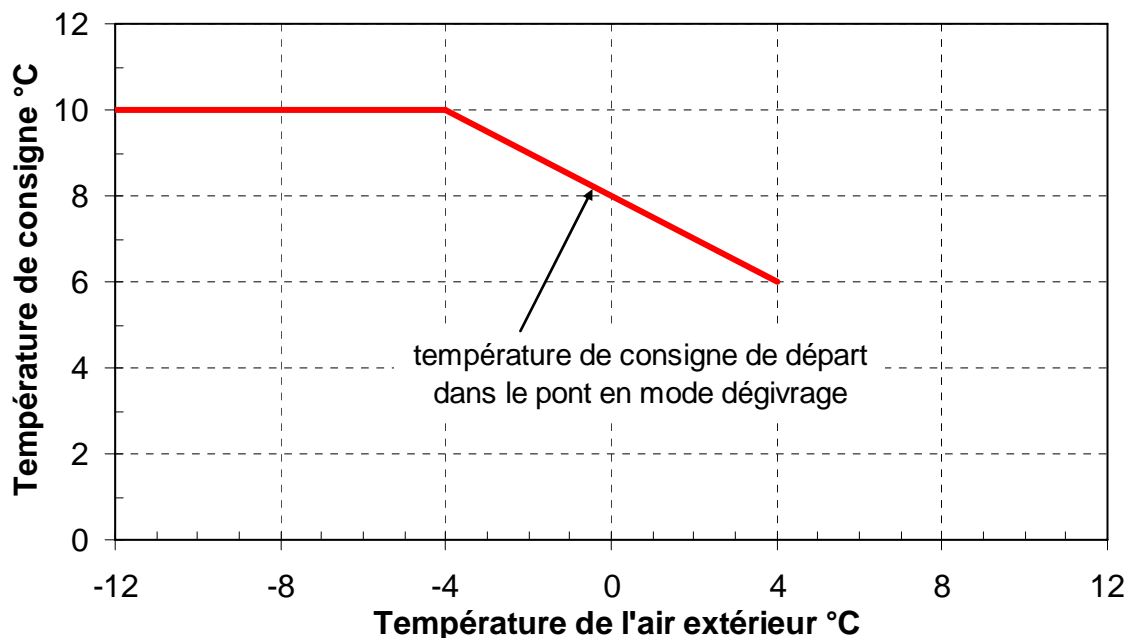


Figure A2.4 Température de consigne pour le fluide au départ du circuit des serpentins des ponts. Si la température de l'air extérieur est supérieure à 4°C, le fonctionnement du système en mode « dégivrage » est arrêté.

Une différence importante pour la simulation du système est que les raccords hydrauliques du système réel sont faits de manière que seul la différence de débit entre le circuit du pont et le circuit du stockage diffusif traverse le stock à eau. La simulation du schéma de principe de la figure A2.3 implique que tout le débit traverse le haut ou le bas du stock à eau. Ceci ne pose pas de problème en été, car la température du fluide entrant dans le haut du stock à eau est toujours plus élevée que celle qui entre en bas. En revanche, en hiver la situation est inversée, ce qui signifie que le fluide plus chaud qui entre en bas est toujours entièrement mélangé au fluide plus froid qui entre en haut. En conséquence la température du fluide qui sort en haut pour décharger le stock diffusif est égale à la température du fluide qui sort en bas pour dégivrer le pont. Cela signifie que la température de fluide à la sortie du pont est plus basse que la température du fluide en entrée dans le stockage diffusif. Les mesures de températures montrent au contraire que ces deux températures sont très proches l'une de l'autre, et le mélange simulé dans le modèle n'a en réalité pas lieu.

D'autre part, comme les deux pompes de circulation fonctionnent pratiquement toujours simultanément, une seule pompe est simulée dans le modèle de l'installation. Le système effectivement simulé est montré dans la figure A2.5. Il est équivalent au système réel du point de vue des performances thermiques.

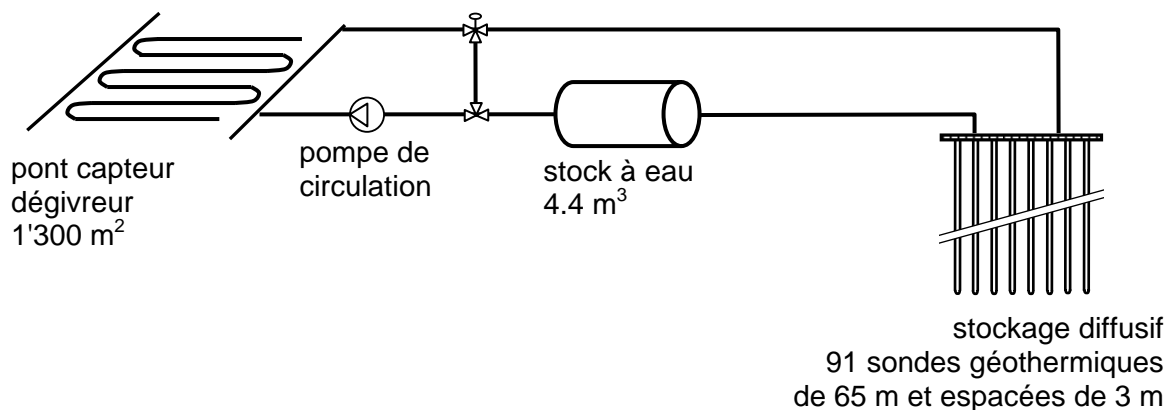


Figure A2.5 Schéma de principe simplifié de l'installation simulée.

Le stock à eau est simulé avec le modèle standard de tuyau, le TYPE31.

A2.2.2 Variables météorologiques

Le fichier météo est créé avec METEON 5.0 (Remund J. und Kunz S., 2003) et le format « user defined ». Les variables sélectionnées sont enregistrées en valeurs horaires. Chaque ligne contient les variables sélectionnées ci-dessous dans l'ordre suivant :

- heure de l'année (-)
- rayonnement global horizontal (W/m^2)
- rayonnement diffus horizontal (W/m^2)
- rayonnement global, plan incliné (W/m^2)
- rayonnement diffus, plan incliné (W/m^2)
- rayonnement direct, incidence normale (W/m^2)

- température de l'air (°C)
- humidité relative (%)
- point de rosée (°C)
- nébulosité (-)

Le plan incliné est le plan horizontal (azimut : 0° et inclinaison : 0°), mais calculé avec l'horizon lointain, déterminé par METEON avec les coordonnées du site :

- coordonnée suisse X : 627.869 km
- coordonnée suisse Y : 168.114 km
- altitude : 570 m
- latitude : 46.399°
- longitude : 7.482°

L'horizon a pour effet de réduire l'ensoleillement global horizontal annuel de 5%. La table A2.3 contient les valeurs mensuelles des principales variables météorologiques.

Mois	Ensoleillement global horizontal (sans effet horizon) (kWh/m ²)	Ensoleillement global horizontal (avec effet d'horizon) (kWh/m ²)	Température de l'air extérieur (°C)
Janvier	35	28	0.8
Février	54	47	1.0
Mars	95	89	4.3
Avril	115	113	7.1
Mai	151	149	11.5
Juin	155	154	14.5
Juillet	178	176	18.2
Août	149	147	17.9
Septembre	106	102	14.6
Octobre	69	63	10.1
Novembre	39	30	4.5
Décembre	29	20	2.2
Année	1'171	1'118	8.9

Table A2.3 Valeurs mensuelles d'ensoleillement et de température pour Serso (source METEON 5.0).

La nébulosité, le point de rosée, la température de l'air et les rayonnements global et diffus horizontaux sont utilisés par le TYPE69 pour calculer la température radiative équivalente du ciel. Cette dernière est nécessaire au calcul des échanges radiatifs entre la surface du pont et le ciel.

A2.2.3 Régulation du système

Le système peut fonctionner dans trois modes différents :

- mode « repos » : le système est à l'arrêt ;
- mode « captage » : le système est mis en marche pour collecter les gains solaires du pont et les stocker dans le stockage diffusif ;
- mode « dégivrage » : le système est mis en marche pour dégivrer le pont en le chauffant avec l'énergie thermique déstockée du stockage diffusif.

Deux contrôleurs ON/OFF (TYPE2) sont utilisés pour sélectionner les modes « captage » ou « dégivrage ».

Mode « captage » :

condition pour fonctionner dans ce mode : $T_{\text{air extérieur}} > 4^{\circ}\text{C}$

si $(T_m - T_{\text{bot-tank}}) > 10 \text{ K}$ alors pompe enclenchée

si $(T_m - T_{\text{bot-tank}}) < 4 \text{ K}$ alors pompe déclenchée

Mode « dégivrage » :

condition pour fonctionner dans ce mode : $T_{\text{air extérieur}} < 4^{\circ}\text{C}$

si $T_m < 3^{\circ}\text{C}$ alors pompe enclenchée

si $T_m > 4^{\circ}\text{C}$ alors pompe déclenchée

T_m : température du pont dans le plan des tubes [$^{\circ}\text{C}$] ;

$T_{\text{bot-tank}}$: température du fluide dans le stock à eau, au retour dans le pont (bas) [$^{\circ}\text{C}$] ;

$T_{\text{air extérieur}}$: température de l'air extérieur [$^{\circ}\text{C}$] ;

A2.3 Comparaison simulation - mesure

A2.3.1 Performances thermiques mesurées et procédure de calibration

La température du pont a été mesurée à plusieurs endroits dans le plan des tubes et complète les mesures de température du fluide caloporteur à l'aller et au retour des serpentins et les mesures des puissances thermiques échangées. Une synthèse des mesures est donnée dans la table A2.4 et les figures A2.6 et A2.7 pour 1998, et la table A2.5 et les figures A2.8 et A2.9 pour 1999.

Mesures de 1998	Température moyenne du fluide en mode « captage » (°C)	Energie solaire stockée dans le stockage diffusif (kWh)	Température moyenne du fluide en mode « dégivrage » (°C)	Energie thermique déstockée pour dégivrer les ponts (kWh)
Janvier	-	-	7.1	23'780
Février	-	-	7.0	22'300
Mars	13.9	880	6.8	5'490
Avril	15.2	4'430	6.9	200
Mai	17.6	19'140	-	-
Juin	18.8	35'060	-	-
Juillet	20.1	27'840	-	-
Août	21.5	9'210	-	-
Septembre	-	-	-	-
Octobre	-	-	-	-
Novembre	-	-	7.2	17'960
Décembre	-	-	6.7	30'270
Année	19.0	96'560	7.1	100'000
Durée de marche annuelle	560 heures		1'050 heures	

Table A2.4 Valeurs mensuelles des mesures effectuées en 1998 relatives aux ponts pour l'installation Serso.

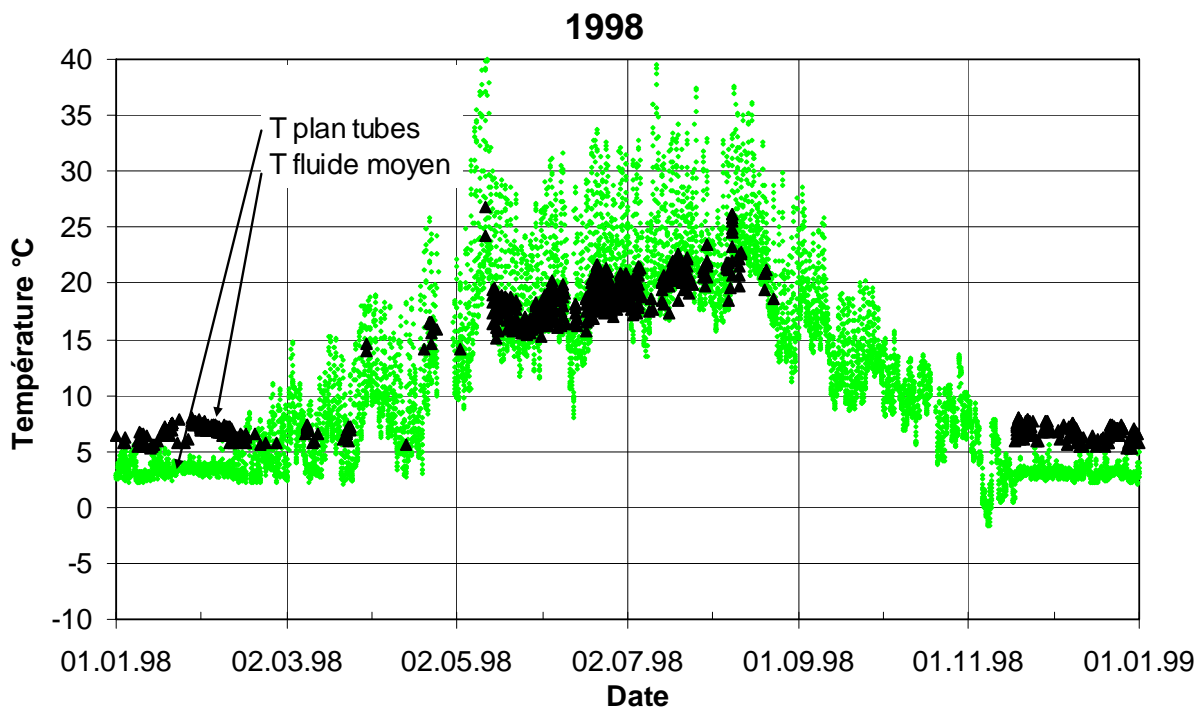


Figure A2.6 Valeurs horaires des mesures de température effectuées en 1998 relatives aux ponts pour l'installation Serso.

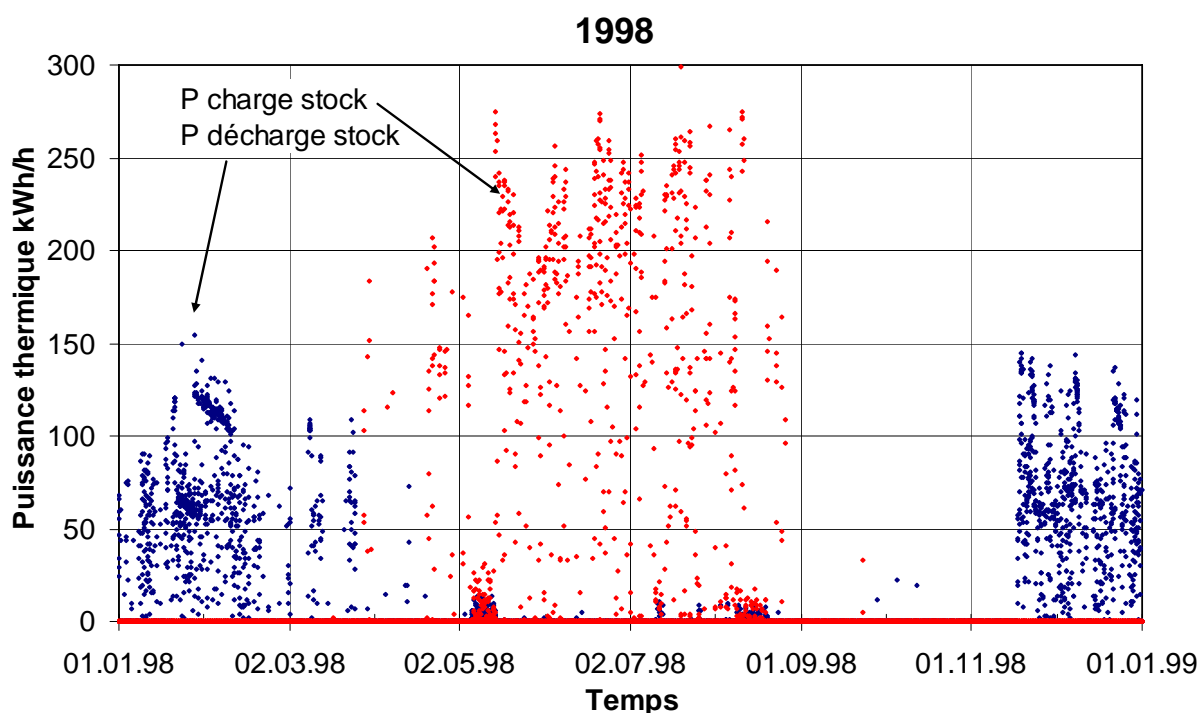


Figure A2.7 Valeurs horaires des mesures des puissances thermiques effectuées en 1998 relatives aux ponts pour l'installation Serso.

Mesures de 1999	Température moyenne du fluide en mode « captage » (°C)	Energie solaire stockée dans le stockage diffusif (kWh)	Température moyenne du fluide en mode « dégivrage » (°C)	Energie thermique déstockée pour dégivrer les ponts (kWh)
Janvier	-	-	6.5	30'570
Février	-	-	5.8	35'670
Mars	11.8	230	6.1	3'030
Avril	13.5	7'250	6.2	1'070
Mai	15.9	30'390	-	-
Juin	17.1	28'420	-	-
Juillet	18.5	30'820	-	-
Août	18.8	17'340	-	-
Septembre	16.8	970	-	-
Octobre	-	-	-	-
Novembre	-	-	7.2	20'920
Décembre	-	-	6.6	28'830
Année	17.2	115'420	6.4	120'090
Durée de marche annuelle		630 heures		1'320 heures

Table A2.5 Valeurs mensuelles des mesures effectuées en 1999 relatives aux ponts pour l'installation Serso.

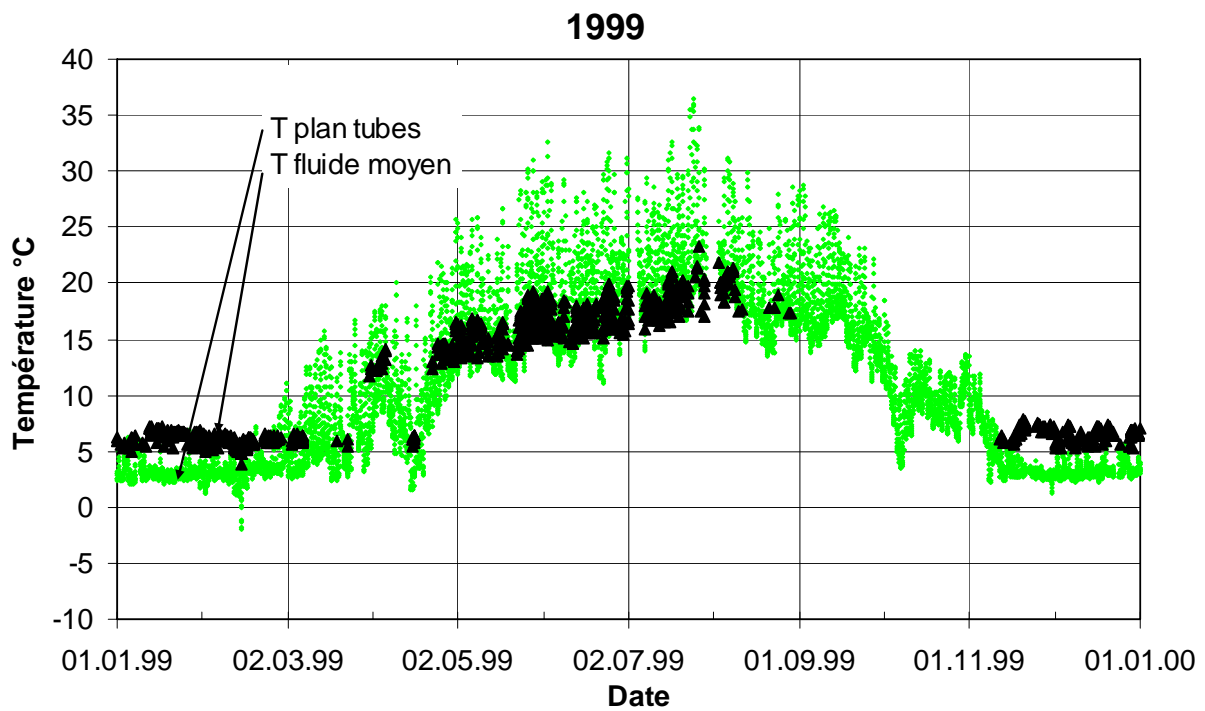


Figure A2.8 Valeurs horaires des mesures de température effectuées en 1999 relatives aux ponts pour l'installation Serso.

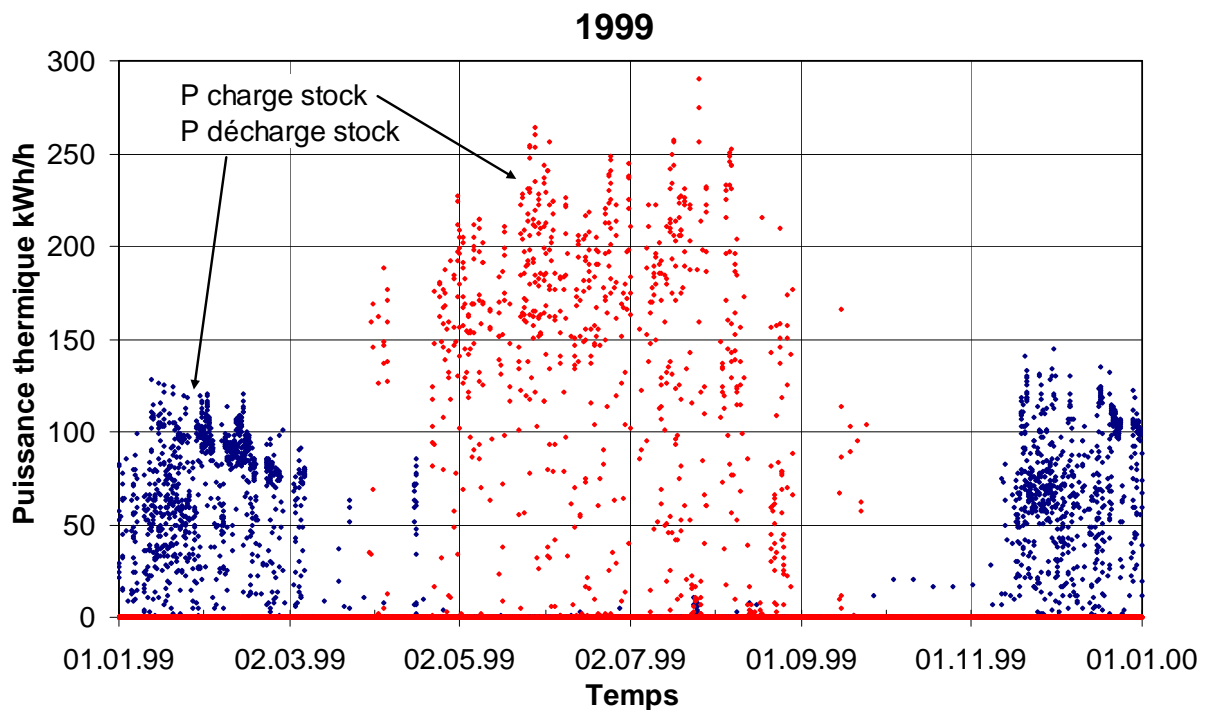


Figure A2.9 Valeurs horaires des mesures des puissances thermiques effectuées en 1999 relatives aux ponts pour l'installation Serso.

La procédure de calibration ne peut pas être effectuée sur le modèle de pont comme elle l'a été faite sur le modèle de stockage diffusif. Dans les mesures, il manque des variables météo comme la température radiative du ciel ou des mesures équivalentes. Il a été préféré de simuler le modèle complet du système en utilisant le modèle calibré du stockage diffusif, et en se basant sur une année météorologique typique générée avec Météonorm, qui permette de calculer de façon indépendante les pertes radiatives et les pertes convectives du pont.

A2.3.2 Sensibilité des performances du système aux principaux paramètres de simulation

Les paramètres du stockage ont déjà été calibrés et ne sont pas variés. Ce sont les principaux paramètres du pont et de la régulation du système qui sont variés dans des limites plausibles, de manière à ce qu'ils restent compatibles avec leur signification physique. Les paramètres calibrés sont :

- coefficient de transfert de chaleur convectif à la surface du pont $U_{\text{convection}}$ [W/(m²K)] (pour des raisons de simplification et de degré de calibration possible, une valeur constante est donnée au modèle) ;
- absorption de la chaussée au rayonnement solaire $\alpha_{\text{chaussée}}$ [-]
- conductivité thermique de la couche d'asphalte $\lambda_{\text{asphalte}}$ [W/(mK)]
- résistance thermique entre le fluide caloporteur et le pont dans le plan des tubes R [K/(W/m²)]
- différence de température pour l'enclenchement et le déclenchement du système dans le mode de fonctionnement « captage » (ON/OFF_{captage});

Les sensibilités aux paramètres calibrés de la quantité d'énergie annuelle stockée, de la quantité d'énergie annuelle déstockée et ainsi que des durées de fonctionnement correspondantes sont indiquées de façon qualitative dans la table A2.6. La sensibilité à la capacité thermique des circuits hydrauliques de l'installation est très faible.

Paramètre du système		Charge stockage diffusif		Durée de marche annuelle en charge	Décharge stockage diffusif		Durée de marche annuelle en décharge
		Energie annuelle	Puissance max.		Energie annuelle	Puissance max.	
$U_{\text{convection pont}}$	↓	↑	↑	↑	↓	↓	↓
$\alpha_{\text{chaussée}}$	↑	↑	↑	↑	↓	→	↓
$\lambda_{\text{asphalte}}$	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
résistance R	↓	↑	↑	→	↑	↑	↓
ON/OFF _{captage}	↑	↓	↑	↓	→	→	→

Table A2.6 Sensibilité des énergies annuelles transférées et des durées de fonctionnement du système aux paramètres calibrés

A2.3.3 Paramètres de simulation calibrés et performances thermiques simulées

Pont :

Dimension (surfaces de captage/dégivrage, couches de matériaux et propriétés thermiques) : figure A2.2 (p. A2.5) et table A2.2 (p. A2.4)

Stock à eau :

volume	4.4 m ³
facteur de perte thermique	0.6 W/(m ² K)
surface enveloppe stock	15 m ²
température ambiante	15 °C (constant)

Stockage diffusif :

voire annexe 1

Contrôle du système

température de consigne pour le dégivrage : voir figure A2.4 (p. A2.6)
 contrôle de modes de fonctionnement du système : voir section A2.2.3 (p. A2.9)

Les performances simulées avec les paramètres calibrés sont montrées dans la table A2.7 et les figures A2.10 et A2.11.

Simulation faite avec météo générée par METEON	Température moyenne du fluide en mode « captage » (°C)	Energie solaire stockée dans le stockage diffusif (kWh)	Température moyenne du fluide en mode « dégivrage » (°C)	Energie thermique déstockée pour dégivrer les ponts (kWh)
Janvier	-	-	6.9	37'720
Février	-	-	6.6	30'040
Mars	-	-	6.8	9'180
Avril	15.3	540	-	-
Mai	17.2	11'950	-	-
Juin	17.9	27'770	-	-
Juillet	19.6	43'290	-	-
Août	20.0	24'100	-	-
Septembre	19.5	5'360	-	-
Octobre	-	-	-	-
Novembre	-	-	7.2	12'310
Décembre	-	-	6.6	32'800
Année	19.0	113'010	6.8	122'050
Durée de marche annuelle	640 heures		1'330 heures	

Table A2.7 Valeurs mensuelles obtenues avec le modèle du système calibré.

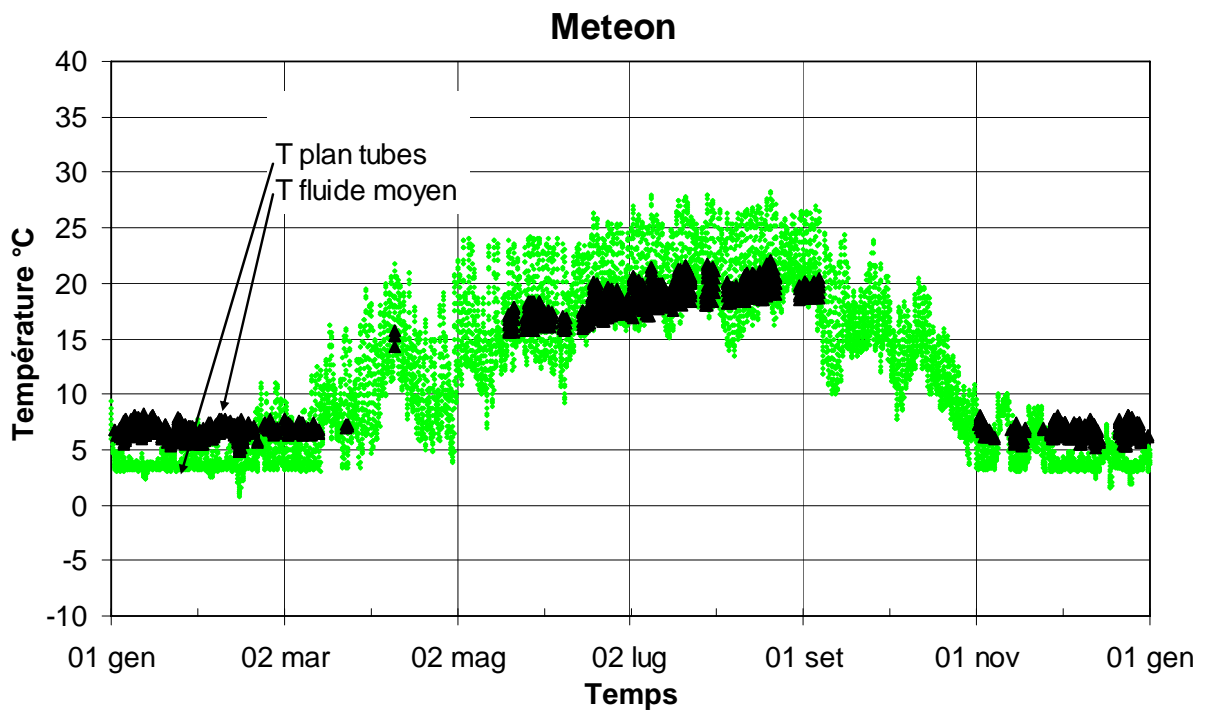


Figure A2.10 Valeurs horaires des températures simulées avec le modèle calibré du système Serso.

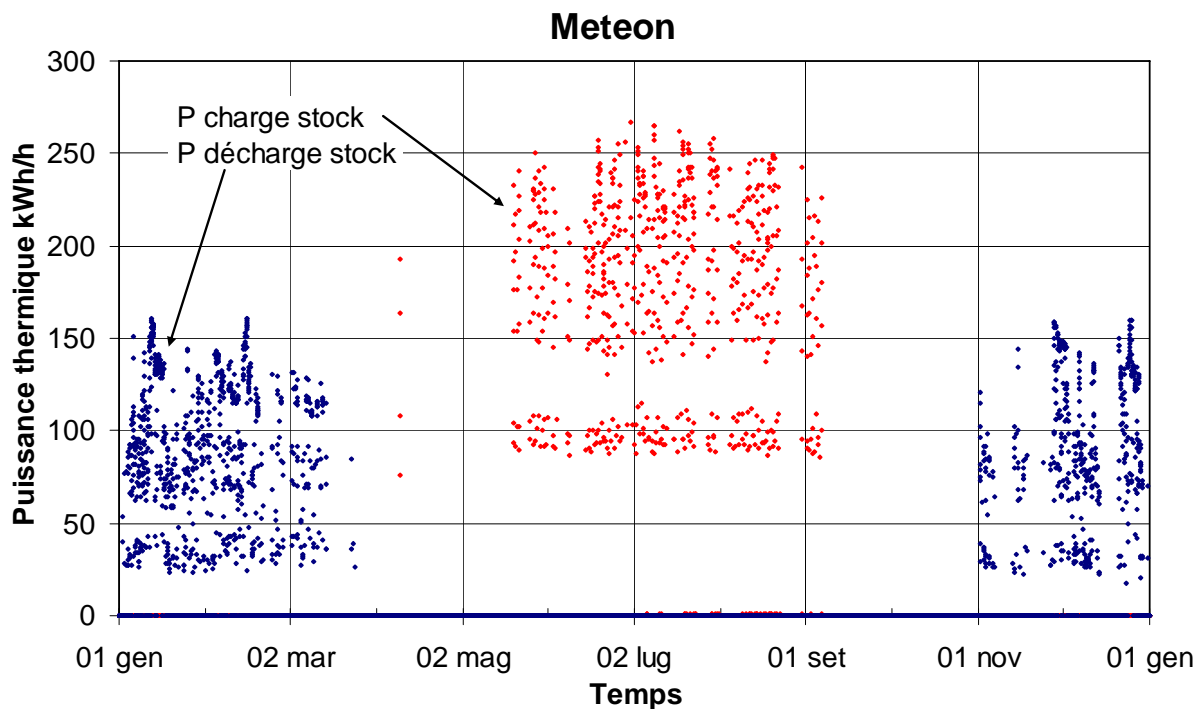


Figure A2.11 Valeurs horaires des puissances thermiques simulées avec le modèle calibré du système Serso.

A2.4 Conclusion

Bien que les processus d'échange thermique à la surface du pont dépendent de nombreux paramètres, le modèle de simulation tente de reproduire les principales caractéristiques thermiques de la façon la plus simple possible. Ainsi les précipitations ne sont pas prises en compte, de même que la fonte de la neige, ou encore l'effet du vent, du passage des voitures et de la convection naturelle sur le coefficient de transfert de chaleur convectif de la chaussée du pont. Toutefois les pertes thermiques de la chaussée par convection et radiation sont calculées de façon différente, la masse thermique du pont est prise en compte, de même que le transfert thermique entre le fluide et le pont par les serpentins. Le modèle du système complet permet ainsi de reproduire de façon satisfaisante aussi bien la dynamique à court terme que le bilan annuel du système.

Références

- Hopkirk R. J., Hess K., Eugster W. J. und Knobel P. (1994) Serso: Pilotprojekt zur Sonnenenergierückgewinnung aus Strassenoberflächen. Technischer Bericht, Bundesamt für Strassenbau und Tiefbauamt des Kantons Bern, Bern.
- Klein S. A. et al. (2005) TRNSYS. A Transient System Simulation Program. Version 15.3 Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA.
- Koschenz M. and Dorer V. (1996) Design of Air Systems with Concrete Slab Cooling. Roomvent'96, 5th International Conference on Air Distribution in Rooms, Yokohama, Japan.
- Remund J. und Kunz S. (2003) METEON Version 5.0. www.meteonorm.com
- Sommer M. (1999) Serso, Sonnenenergierückgewinnung aus Strassenoberflächen, Messkampagne und Simulation des saisonalen Erdspeichers. Zwischenbericht, Bundesamt für Energie, Bern.