

**Mise à l'essai de systèmes de chauffage de l'eau  
et de réservoir d'eau chaude Ekoterm**

Jørn Stene  
Reidar Tellebon

SINTEF Energiforskning AS  
Juin 2005

[www.energy.sintef.no](http://www.energy.sintef.no)

SINTEF		<b>RAPPORT TECHNIQUE</b>		
SINTEF Energiforskning AS		AFFAIRE/TÂCHE		
Adresse postale : 7465 Trondheim		<b>EKOTERM - mise à l'essai de systèmes de chauffage de l'eau et de réservoir d'eau chaude</b>		
Adresse visiteurs : Sem Sælands vei 11		RESPONSABLES DU DOSSIER :		
Téléphone : 73 59 72 00		Jørn Stene, Reidar Tellebon, Rune Lillethun Hoggen		
Télécopie : 73 59 72 50		DONNEUR(S) D'ORDRE :		
www.energy.sintef.no		Borup Gruppen Holding A/S, Danemark		
N° de société : NO 939 350 675 MVA				
N° DE RAPPORT TR F6141	DATE 14.05.2005	RÉF. DONNEUR D'ORDRE : Jack Agerskov	N° DE PROJET 16X003 40	
CODE D'ARCHIVAGE ÉLECTRONIQUE : 050511151513		CHEF DE PROJET (NOM, SIGNATURE) Jørn Stene	DEGRÉ DE CONFIDENTIALITÉ : Confidentiel	
N ISBN 82-594-2849-0	TYPE DE RAPPORT	DIRECTEUR DE RECHERCHE (NOM, SIGNATURE) Inge R. Gran	NOMBRE DE COPIES	PAGES 21
DÉPARTEMENT Processus énergétiques		ADRESSE VISITEURS Kolbjørn Hejes vei 1 D	TÉLÉCOPIE LOCALE 73 59 39 50	
RÉSULTAT (résumé)				
<p>Des mesures de la puissance calorifique et du degré d'efficacité thermique ont été effectuées sur deux systèmes électriques de chauffage de l'eau de la marque Ekoterm, les appareils <i>Ekoterm 3F1</i> (15 kW, 400 V, triphasé) et <i>Ekoterm 1F1</i> (7 kW, 230 V, monophasé). On a également mesuré la baisse de température (déperdition de chaleur) et calculé le coefficient moyen de conductivité thermique (valeur U) pour un réservoir d'eau chaude de 200 litres de type <i>Ekoterm 3F1200V</i>.</p> <p>L'appareil <i>Ekoterm 3F1</i> a été testé à des températures d'entrée/sortie de l'eau d'environ 60/40 et 40/30 °C pour l'échangeur thermique à plaques, et pour des puissances calorifiques d'environ 5, 10 et 15 kW. La durée affectée à chaque test était de 30 minutes environ. Le modèle <i>Ekoterm 1F1</i> a également été testé à des températures d'entrée/sortie de l'eau d'environ 60/40 et 40/30 °C au niveau de l'échangeur de thermique à plaques, et pour des puissances calorifiques d'environ 3,5 et 7 kW. Chaque test a également été réalisé pendant approximativement 30 minutes. Sur le modèle <i>Ekoterm 3F1200V</i>, l'essai portant sur le réservoir d'eau chaude a été effectué à partir d'une température initiale d'environ 65 °C et d'une température ambiante moyenne d'environ 20 °C. Les mesures ont été effectuées sur une période de 24 heures.</p> <p>La précision de l'appareillage de mesure utilisé lors de ces tests était conforme aux prescriptions de la norme EN 14511 (CEN), qui est appliquée pour les pompes à chaleur /1/.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Le degré d'efficacité thermique de l'appareil <i>Ekoterm 3F1</i> (15 kW) s'est avéré situé entre 96,7 et 98,7 %, avec une marge d'incertitude calculée de l'ordre de 1,7 à 2,2 %.</li> <li>• Le degré d'efficacité thermique de l'appareil <i>Ekoterm 3F1</i> (7 kW) était compris 97,2 et 98,6 %, avec une marge d'incertitude calculée de 1,7 à 2,2 %.</li> <li>• Il est apparu que le niveau de la température lors de la production de chaleur, c'est-à-dire les températures d'entrée et de sortie de l'échangeur thermique à plaques, n'avaient qu'une influence mineure sur le degré d'efficacité thermique de l'unité Ekoterm (compte tenu de la marge d'incertitude liée au banc d'essai).</li> </ul>				

- L'on a constaté que la puissance calorifique calibrée (3,5 à 7 kW et 5 à 15 kW) n'avait qu'une influence mineure sur le degré d'efficacité thermique de l'unité Ekoterm (compte tenu de la marge d'incertitude liée au banc d'essai).
- Le niveau de température lors de la production de chaleur, c'est-à-dire les températures d'entrée et de sortie de l'échangeur thermique à plaques, ont révélé leur influence déterminante sur la puissance calorifique calibrée.
- Pour le modèle *Ekoterm 3F1200V*, la baisse de température du réservoir d'eau chaude pendant la durée du test n'était que de 0,35 °C environ par heure. Ceci correspond à un coefficient moyen de conductivité thermique (valeur U) d'environ 0,45 W/(m<sup>2</sup>K) pour le réservoir.

#### MOTS-CLÉS

MOTS RELEVÉS PAR SINTEF	Système de chauffage électrique	Mise à l'essai
	Réservoir d'eau chaude	Degré d'effet et perte de chaleur

## SOMMAIRE

Page

1	RÉSUMÉ
2	INTRODUCTION
3	BANC D'ESSAI - MÉTHODES EXPÉRIMENTALES
3,1	MISE À L'ESSAI DES SYSTÈMES ÉLECTRIQUES DE CHAUFFAGE DE L'EAU EKOTERM
3.1.1	Banc d'essai
3.1.2	Procédure d'essai
3.1.3	Conditions de réalisation des tests
3.1.4	Appareils de mesure utilisés
3.1.5	Incertitude des valeurs obtenues par calcul
3.2	MISE À L'ESSAI DU RÉSERVOIR D'EAU CHAUDE EKOTERM
3.2.1	Banc d'essai
3.2.2	Procédure d'essai
3.2.3	Conditions de réalisation des tests
3.2.4	Appareils de mesure utilisés
3.2.5	Incertitude des valeurs obtenues par calcul
4	RÉSULTATS DES MESURES
4.1	MISE À L'ESSAI DES SYSTÈMES ÉLECTRIQUES DE CHAUFFAGE DE L'EAU EKOTERM
4.1.1	Méthode de calcul
4.1.2	Capacité calorifique mesurée et degré d'efficacité
4.1.3	Discussion - conclusion
4.2	MISE À L'ESSAI DU RÉSERVOIR D'EAU CHAUDE EKOTERM
4.2.1	Méthode de calcul
4.2.2	Baisse de température mesurée
4.2.3	Valeur U et flux thermique calculés pour le réservoir
5	RÉFÉRENCES
6	ANNEXE A - MARGE D'INCERTITUDE
6.1	GÉNÉRALITÉS RELATIVES À L'ANALYSE DE LA PROPAGATION DES ERREURS
6.2	MARGE D'INCERTITUDE APPLICABLE À LA PUISSANCE CALORIFIQUE GÉNÉRÉE
6.3	MARGE D'INCERTITUDE APPLICABLE AU DEGRÉ D'EFFICACITÉ THERMIQUE
7	ANNEXE B – EXEMPLE DE SORTIE IMPRIMÉE DES DONNÉES DE MESURE (1F1, 40/30 °C, env. 3,5 KW)

# 1 RÉSUMÉ

Des mesures de la puissance calorifique et du degré d'efficacité thermique ont été effectuées sur deux systèmes électriques de chauffage d'eau de la marque Ekoterm, les appareils *Ekoterm 3F1* (15 kW, 400 V, triphasé) et *Ekoterm 1F1* (7 kW, 230 V, monophasé). On a également mesuré la baisse de température (déperdition de chaleur) et calculé le coefficient moyen de conductivité thermique (valeur U) pour un réservoir d'eau chaude de 200 litres de type *Ekoterm 3F1200V*.

L'appareil *Ekoterm 3F1* a été testé à des températures d'entrée/sortie de l'eau d'environ 60/40 et 40/30 °C au niveau de l'échangeur thermique à plaques, et pour une puissance calorifique d'environ 5, 10 et 15 kW. Chaque test a duré approximativement 30 minutes. Le modèle *Ekoterm 1F1* a été testé à des températures d'entrée/sortie de l'eau d'environ 60/40 et 40/30 °C au niveau de l'échangeur thermique à plaques, et pour des puissances calorifiques d'environ 3,5 et 7 kW. La durée affectée à chaque test était également de 30 minutes environ. Sur le modèle *Ekoterm 3F1200V*, le test du réservoir d'eau chaude a été réalisé à partir d'une température initiale d'environ 65 °C et d'une température ambiante moyenne d'environ 20 °C. Les mesures ont été effectuées sur une période de 24 heures.

La précision de l'appareillage de mesure utilisé lors de ces tests était conforme aux prescriptions de la norme EN 14511 (CEN), qui est appliquée pour les pompes à chaleur /1/.

- Le degré d'efficacité thermique de l'appareil *Ekoterm 3F1* (15 kW) s'est avéré situé entre 96,7 et 98,7 %, avec une marge d'incertitude calculée de l'ordre de 1,7 à 2,2 %.
- Le degré d'efficacité thermique de l'appareil *Ekoterm 3F1* (7 kW) était compris entre 97,2 et 98,6 %, avec une marge d'incertitude calculée de 1,7 à 2,2 %.
- L'on a constaté que le niveau de la température lors de la production de chaleur, c'est-à-dire les températures d'entrée et de sortie de l'échangeur thermique à plaques, n'avaient qu'une influence mineure sur le degré d'efficacité thermique de l'unité Ekoterm.
- Il est apparu que la puissance calorifique calibrée (3,5 à 7 kW et 5 à 15 kW) n'avait qu'une influence mineure sur le degré d'efficacité thermique de l'unité Ekoterm.
- Le niveau de température lors de la production de chaleur, c'est-à-dire les températures d'entrée et de sortie de l'échangeur thermique à plaques, ont révélé leur influence déterminante sur la puissance calorifique calibrée.
- Pour le modèle *Ekoterm 3F1200V*, la baisse de température à l'intérieur du réservoir d'eau chaude s'est limitée à 0,35 °C environ par heure. Ceci correspond à un coefficient moyen de conductivité thermique (valeur U) d'environ 0,45 W/(m<sup>2</sup>K) pour le réservoir.

## 2 INTRODUCTION

Les systèmes électriques Ekoterm ([www.ekoterm.biz](http://www.ekoterm.biz)) sont utilisés pour le chauffage d'ambiance et la production d'eau chaude dans les immeubles et dans l'industrie. Ils sont constitués d'une tubulure en circuit fermé (système indirect), dans laquelle une pompe fait circuler de l'eau passant par une chaudière, puis par un échangeur thermique à plaques, qui transfère la chaleur au système de distribution de chaleur dont est équipé le bâtiment. La chaudière utilise le même principe de chauffage qu'une chaudière à électrodes : le courant est conduit d'une électrode à l'autre par l'eau dans laquelle celles-ci sont plongées. L'effet thermique est généré par la résistance électrique de l'eau. Le calibrage de la conductivité de l'eau, et par conséquent de la capacité de chauffage de la chaudière, s'effectue en ajoutant un sel à l'eau. Plus la concentration en sel est forte, meilleure est la conductivité de l'eau, et plus élevée est la puissance calorifique de la chaudière.

L'échangeur thermique à plaques compris dans le circuit indirect du dispositif Ekoterm est raccordé à un système de distribution de chaleur à eau, lui-même relié à un appareil de production d'eau chaude à double paroi (ou éventuellement à paroi simple et muni d'un serpentín) et à des éléments chauffants assurant le chauffage d'ambiance (tubulure de chauffage par le sol, radiateurs ou convecteurs).

Les dispositifs concurrents des systèmes Ekoterm sont, notamment, les éléments de chauffage électriques, les cassettes chauffantes, les chaudières à fuel ou à gaz, les chaudières à biomasse, les pompes à chaleur et les systèmes de chauffage à distance.

Le projet présenté ici portait sur la mise à l'essai des appareils de marque EKOTERM suivants :



**Ekoterm 3F1** – mesure du degré d'efficacité thermique ( $\eta_{\text{appareil}}$ )

- 15 kW
- 400 V, triphasé
- Sans réservoir d'eau chaude



**Ekoterm 1F1** – mesure du degré d'efficacité thermique ( $\eta_{\text{appareil}}$ )

- 7 kW
- 230 V, monophasé
- Sans réservoir d'eau chaude



**Ekoterm 3F1200V** – mesure de la perte à l'arrêt du réservoir

- Réservoir d'eau chaude de 200 litres avec serpentin
- Pas de mise à l'essai de l'unité de chauffage

L'appareil *Ekoterm 3F1* a été testé à des températures d'entrée/sortie de l'eau d'environ 60/40 et 40/30 °C au niveau de l'échangeur thermique à plaques, et pour une puissance calorifique d'environ 5, 10 et 15 kW, avec 6 points de contrôle au total. L'appareil *Ekoterm 1F1* a été testé à des températures d'entrée/sortie de l'eau d'environ 60/40 et 40/30 °C au niveau de l'échangeur thermique à plaques, et pour une puissance calorifique d'environ 3,5 et 7 kW, avec 4 points de contrôle au total. Le réservoir d'eau chaude du modèle *Ekoterm 3F1200V* a été testé avec une température initiale de l'eau de 65 °C, et le test s'est déroulé sur une période de 24 heures.

### 3 BANC D'ESSAI - MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

#### 3.1 MISE À L'ESSAI DES SYSTÈMES DE CHAUFFAGE DE L'EAU EKOTERM

##### 3.1.1 Banc d'essai

On a procédé à la construction d'un banc d'essai pour la mesure de la puissance calorifique générée et du degré d'efficacité thermique des appareils Ekoterm 3F1 et 1F1. L'échangeur thermique à plaques que renferment les appareils a été raccordé à un circuit d'eau ouvert comprenant un dispositif d'alimentation en eau provenant du réseau, une vanne mélangeuse (BV1) assurant l'introduction de l'eau chaude (préchauffage), une cassette électrique (préchauffage), une vanne de régulation (RV1) et un dispositif de mesure comprenant des capteurs thermiques (T), un débitmètre volumique (V) et un wattmètre (P). Les capteurs ont été raccordés à un module d'acquisition de données de type *Agilent 34970A*. La figure 3.1 montre un croquis de principe du banc d'essai.

*Agilent 34970A*

*T - Température*  
*V - Débit volumique*  
*P - Puissance électrique*  
 RV1  
 Cassette électrique  
 BV1  
*Eau du réseau*  
*Eau chaude*

*Figure 3.1 : Schéma de principe du banc d'essai utilisé pour les systèmes Ekoterm.*

##### 3.1.2 Procédure d'essai

La procédure d'essai appliquée était la suivante :

- Une fois l'appareil (3F1 ou 1F1) calibré pour la puissance calorifique voulue au moyen du programme de choix de température existant, on a procédé au réglage de la vanne de régulation RV1, de la température de sortie de l'eau provenant de la vanne mélangeuse BV1, et de la puissance transmise à la cassette électrique, afin d'obtenir, respectivement, la température d'entrée ( $t_i$ ) et la différence de température ( $\Delta t$ ) au niveau de l'échangeur thermique à plaques.
- Après un minimum de 15 minutes de fonctionnement stable avec les températures d'entrée et de sortie souhaitées (60/40 ou 40/30 °C), l'on a mesuré, toutes les 10 secondes, pendant une durée minimale de 30 minutes, la température d'entrée ( $t_i$ ), de sortie ( $t_r$ ), le débit volumique (V) et la puissance électrique transmise (P). Les valeurs moyennes relevées durant cet intervalle ont été utilisées lors du calcul de la puissance calorifique et de l'efficacité thermique (voir les équations figurant au chapitre 4.1).

### 3.1.3 Conditions de réalisation des tests

Le degré d'efficacité thermique des appareils Ekoterm a été mesuré pour différents niveaux de température côté eau (programme de choix de la température) et différentes puissances thermiques. Les conditions de réalisation des tests en ce qui concerne les températures d'entrée et de sortie de l'eau au niveau de l'échangeur thermique à plaques, la puissance calorifique des appareils et la quantité d'eau en circulation passant par l'échangeur thermique sont celles spécifiées au tableau 3.1 :

*Tableau 3.1 : Matrice d'essai – Puissance d'essai, température d'entrée et de sortie et débit volumique côté eau.*

<b>EKOTERM 3F1 – max. 15 kW env.</b>			<b>EKOTERM 1F1 – max. 7 kW env.</b>	
5 kW	10 kW	15 kW	3,5 kW	7 kW
env. 60/40 °C env. 3,6 l/min	env. 60/40 °C env. 7,2 l/min	env. 60/40 °C env. 10,8 l/min	env. 60/40 °C env. 2,5 l/min	env. 60/40 °C env. 5,0 l/min
env. 40/30 °C env. 7,2 l/min	env. 40/30 °C env. 14,4 l/min	env. 40/30 °C env. 21,6 l/min	env. 40/30 °C env. 5,0 l/min	env. 40/30 °C env. 10,1 l/min

Durant la réalisation des mesures, la température ambiante variait entre 20 et 21 °C.

Une température d'entrée/de sortie de 60/40 °C au niveau de l'échangeur thermique à plaques des systèmes Ekoterm correspond à un contexte d'utilisation où l'appareil dessert à la fois une installation de chauffage (chauffage par le sol ou radiateurs) et un dispositif de production d'eau chaude. 40/30 °C correspond à une utilisation du système pour le chauffage uniquement (chauffage par le sol). Il était prévu à l'origine d'effectuer des mesures pour une température d'entrée et de sortie de 40/35 °C : cette plage thermique a été revue à la baisse de manière à ce que les quantités d'eau soient plus aisées à traiter, et afin de réduire la marge d'incertitude des mesures thermiques.

### 3.1.4 Appareils de mesure utilisés

Il n'existe pas de normes d'essais pour les dispositifs de chauffage de l'eau, qui stipulent, entre autres, des exigences concernant les marges d'incertitudes tolérables. Aussi avons-nous pris pour référence en la matière les exigences contenues dans la norme EN 14511 /1/, qui est utilisée pour la mise à l'essai des pompes à chaleur. Le tableau 3.2 livre une vue d'ensemble des appareils de mesure utilisés et des marges d'incertitude applicables aux températures de l'eau relevées à l'entrée et à la sortie de l'échangeur thermique à plaques, au débit volumique à travers l'échangeur et à la puissance électrique transmise. Les capteurs ont été raccordés à un module d'acquisition de données de type Agilent 34970A.

Tableau 3.2 : Appareils de mesure utilisés dans le banc d'essai des systèmes de chauffage de l'eau Ekoterm

Valeur mesurée	Type	Marque / modèle	Plage de mesure	Incertitude relative des mesures	Incertitude absolue des mesures
Température	Pt-100	Tempcontrol	-260 à +100 °C	*	±0,085°C <sup>1)</sup>
Débit volumique	Turbine	Turbine GPI, modèle S0501 KF2389	3,8 à 37, l/min	±1% de la valeur mesurée <sup>2)</sup>	±0,021 à 0,216 l/min
Puissance électrique	Wattmètre	Hioki Clamp on Power Hitester, modèles 3161 et 3166	3 à 900 kW (60 plages)	±1,0% de la valeur mesurée	15 à 75 W

1) Les capteurs de température ont été calibrés pour mesurer la différence de température, ce procédé permettant de réduire la marge d'incertitude. Pour éviter les fuites de chaleur, la tubulure en amont et en aval du point de mesure a été isolée au moyen d'une épaisseur de 20 mm de caoutchouc cellulaire.

2) Le signal émis par le mesureur à turbine a été calibré et corrigé par le biais d'une mesure de poids précise du flux d'eau et à l'aide d'un chronomètre. Il en résulte que la marge d'incertitude réelle est moins élevée que la valeur maximale indiquée par le fabricant. La marge d'incertitude réelle est donc meilleure que le chiffre indiqué de ±1%.

### 3.1.5 Incertitude des valeurs obtenues par calcul

La marge d'incertitude concernant le calcul de la puissance calorifique et du degré d'efficacité thermique des appareils Ekoterm est déterminée selon les équations A.5 et A.7, *Annexe A - Incertitude des mesures*. Le tableau 3.3 livre une vue d'ensemble des marges d'incertitude absolue et relative calculées pour la puissance calorifique (Q) et le degré d'efficacité thermique ( $\eta$ ), pour différentes valeurs de puissance calorifique (5 et 15 kW) et différents programmes de température (60/40 et 40/30 °C).

*Tableau 3.3 : Incertitude absolue calculée [W] et incertitude relative [%] concernant la puissance calorifique (Q) et le degré d'efficacité thermique ( $\eta$ ) des appareils Ekoterm.*

<b>Marge d'incertitude</b>	<b>5kW - 60/40 °C</b>	<b>5 kW - 40/30 °C</b>	<b>15 kW - 60/40 °C</b>	<b>15 kW - 40/30 °C</b>
Absolute – $\delta Q$ [W]	66	99	197	296
Relative – $\delta Q$ [%]	1,3	2,0	1,3	2,0
Absolute – $\delta \eta$ [-]	0,0173	0,0245	0,0173	0,0245
Relative – $\delta \eta$ [%]	1,7	2,2	1,7	2,2

Le tableau 3.3 montre que l'incertitude des valeurs calculées pour la performance calorifique et le degré d'efficacité thermique des appareils Ekoterm se situe, respectivement, dans les plages  $\pm 1,3-2,0$  % et  $\pm 1,7-2,2$  %.

## 3.2 MISE À L'ESSAI DU RÉSERVOIR D'EAU CHAUDE

### 3.2.1 Banc d'essai

Nous avons conçu un banc d'essai pour mesurer la déperdition de chaleur émise par le réservoir d'eau chaude du système 3F1200V. Le réservoir a été raccordé à un circuit d'eau fermé avec une alimentation en eau du réseau, une cassette électrique (préchauffage), une vanne de régulation (RV1) et des capteurs thermiques (T) implantés à l'entrée et à la sortie du réservoir. Au centre du réservoir, une tige raccordée à neuf thermo-éléments séparés par des intervalles d'environ 90 mm a été montée pour la mesure des températures de l'eau, tandis que deux thermo-éléments ont été utilisés pour la mesure de la température ambiante à proximité des parties supérieure et inférieure du réservoir. Les thermo-éléments ont été raccordés à un module d'acquisition de données de type *Fluke Hydra 2625*. La figure 3.2 montre un schéma de principe du banc d'essai.

*Fluke Hydra 2625*  
*T* Température  
 RV1  
 Eau réseau  
 Cassette électrique  
 Système de chauffage de l'eau Ekoterm  
 3F1

*Figure 3.2 : Schéma de principe du banc d'essai utilisé pour le réservoir d'eau chaude Ekoterm (3F1200V).*

### 3.2.2 Procédure d'essai

La procédure d'essai appliquée était la suivante :

- L'eau provenant du réseau de distribution a été préchauffée à la température voulue à l'aide de la cassette électrique, et mise en circulation dans le réservoir jusqu'à ce que l'on obtienne une différence maximale entre la température d'entrée et de sortie de 0,1 K.
- On a ensuite arrêté la circulation de l'eau, et mesuré sa température, ainsi que celle de l'air ambiant à proximité des parties supérieure et inférieure du réservoir, toutes les 15 minutes pendant une période de 24 heures. La baisse de température relevée à l'intérieur du réservoir a été utilisée pour calculer la valeur U moyenne [W/m<sup>2</sup>K].

### 3.2.3 Conditions de réalisation des tests

Les mesures de températures ont été effectuées à partir d'une température initiale de l'eau de 65 °C environ. Ceci correspond à un niveau de température courant pour les systèmes de chauffage de l'eau faisant appel à des éléments de chauffage électriques. La température ambiante moyenne durant la réalisation des tests était de 20 °C environ.

### 3.2.4 Appareils de mesure utilisés

Des éléments Pt-100 ont été utilisés pour mesurer les températures à l'intérieur et à l'extérieur du réservoir pendant la phase de chargement. La marge d'incertitude correspondant à ces éléments est de ±0,085°C (cf. tableau 3.2).

Les mesures de température à l'intérieur du réservoir ont été effectuées par des thermo-éléments de type T (Cu/K). Les thermo-éléments ont d'abord été calibrés par référence à un bain de glace, avant d'être raccordés au module d'acquisition de données *Fluke Hydra 2625*. Ce module est doté d'un point zéro interne extrêmement précis (élément Pt-100). La marge d'incertitude des thermo-éléments, dans cette disposition, était de  $\pm 0,2$  °C.

### **3.2.5 Incertitude des valeurs obtenues par calcul**

Les mesures de températures ont été utilisées pour calculer le coefficient moyen de conductivité du réservoir (valeur U) [W/m<sup>2</sup>K] et le flux thermique [W/m<sup>2</sup>]. Voir par ailleurs le chapitre 4.2.

## 4 RÉSULTATS DES MESURES

### 4.1 MISE À L'ESSAI DES SYSTÈMES ÉLECTRIQUES DE CHAUFFAGE DE L'EAU EKOTERM

#### 4.1.1 Méthode de calcul

La puissance calorifique moyenne produite par l'échangeur thermique à plaques des appareils Ekoterm [en W] pendant la durée affectée aux mesures (30 minutes au minimum - enregistrement des données toutes les 10 secondes) a été calculée comme suit :

(4.1)

$V$  représentant le débit volumique mesuré au travers de l'échangeur thermique à plaques [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],  $t_e$  et  $t_s$ , respectivement, les températures d'entrée et de sortie de l'échangeur thermique à plaques [en °C], tandis que  $\rho$  et  $c_p$  représentent la densité [en  $\text{kg}/\text{m}^3$ ] et la capacité calorifique spécifique [en  $\text{J}/(\text{kgK})$ ] de l'eau au niveau de température concerné /3/.

Le degré d'efficacité thermique des appareils Ekoterm pendant la durée affectée aux mesures (30 minutes au minimum - enregistrement des données toutes les 10 secondes) a été calculé comme suit :

(4.2)

$Q$  représentant la puissance calorifique émise par l'échangeur thermique à plaques [en W] dans les conditions de fonctionnement définies, et  $P$  la puissance électrique transmise [en W]. La différence entre la puissance électrique transmise et la puissance calorifique produite par l'échangeur thermique à plaques est due, à la fois, à la déperdition à l'intérieur de la chaudière, à la nécessaire affectation d'une partie de la puissance électrique au fonctionnement de la pompe de circulation, et à la perte de chaleur aux alentours de l'appareil.

#### 4.1.2 Capacité calorifique mesurée et degré d'efficacité

Le tableau 4.1 donne une vue d'ensemble des mesures de capacité calorifique et des valeurs d'efficacité thermique calculées pour les appareils Ekoterm pour différents niveaux de température et pour une puissance calorifique donnée. Voir aussi à l'Annexe B un exemple de sortie imprimée montrant les résultats obtenus à l'issue de l'une des séries de mesure (1F1, 40/30 °C, 3,5 kW env.).

Tableau 4.1 : Niveau de température moyen pendant la durée du test, puissance calorifique effective moyenne ( $Q$ ), moyenne de la puissance électrique transmise ( $P$ ) et valeur calculée pour le degré d'efficacité thermique ( $\eta$ ) des appareils Ekoterm.

EKOTERM 3F1 – max. 15 kW env.			EKOTERM 1F1 – max. 7 kW env.	
60,7/40,6 °C Q = 5,61 kW P = 5,76 kW $\eta = 0,973$	60,1/39,8 °C Q = 10,31 kW P = 10,47 kW $\eta = 0,985$	60,8/40,4 °C Q = 13,77 kW P = 14,26 kW $\eta = 0,966$	60,1/40,2 °C Q = 3,57 kW P = 3,67 kW $\eta = 0,973$	59,0/38,9 °C Q = 6,90 kW P = 7,03 kW $\eta = 0,982$
40,2/30,6 °C Q = 4,25 kW P = 4,32 kW $\eta = 0,985$	40,0/30,5 °C Q = 9,91 kW P = 10,05 kW $\eta = 0,986$	39,7/30,2 °C Q = 12,55 kW*) P = 12,98 kW $\eta = 0,967$	40,5/30,0 °C Q = 3,07 kW P = 3,13 kW $\eta = 0,981$	40,0/30,2 °C Q = 6,13 kW P = 6,22 kW $\eta = 0,986$

\*) Puissance calorifique générée légèrement inférieure à ce qui était prévu dans la matrice de test, cette différence n'ayant toutefois aucune incidence sur le degré d'efficacité mesuré.

### 4.1.3 Discussion - conclusion

Il est apparu que la puissance calorifique calibrée des appareils Ekoterm dépendait fortement du niveau de température paramétré pour la production de chaleur. Par exemple, le modèle Ekoterm 3F1 a été calibré à environ 15 kW pour des températures d'entrée et de sortie de l'échangeur thermique de 60/40 °C. Lorsque l'on a abaissé la température à 40/30 °C, la puissance thermique émise est descendue à 10 kW environ. Dans ces conditions, le calibrage des appareils a nécessité beaucoup d'attention et de temps, et la performance calorifique diffère légèrement, pour cette raison, de la matrice d'essai initiale. Ceci s'avère néanmoins sans incidence sur la validité des résultats de tests, puisqu'ils montrent clairement que le degré d'efficacité thermique reste presque constant en dépit des variations de performances calorifiques. Les conclusions suivantes peuvent donc être formulées sur la base du tableau 4.1 et des expériences qui ont été tirées des essais effectués :

- Le degré d'efficacité thermique de l'appareil *Ekoterm 3F1* (15 kW) était situé entre 96,7 et 98,7 %, avec une marge d'incertitude calculée de l'ordre de 1,7 à 2,2 %.
- Le degré d'efficacité thermique de l'appareil *Ekoterm 3F1* (7 kW) était compris entre 97,2 et 98,6 %, avec une marge d'incertitude calculée de 1,7 à 2,2 %.
- Il est apparu que le niveau de la température lors de la production de chaleur, c'est-à-dire les températures d'entrée et de sortie de l'échangeur thermique à plaques, n'avaient qu'une influence minimale sur le degré d'efficacité thermique de l'unité Ekoterm (compte tenu de la marge d'incertitude liée au banc d'essai).
- La puissance calorifique calibrée (3,5 à 7 kW et 5 à 15 kW) s'est avérée n'avoir qu'une incidence mineure sur le degré d'efficacité thermique des appareils Ekoterm (compte tenu de la marge d'incertitude liée au banc d'essai).
- Le niveau de température lors de la production de chaleur, c'est-à-dire les températures d'entrée et de sortie de l'échangeur thermique à plaques, ont révélé leur influence déterminante sur la puissance calorifique calibrée.

## 4.2 MISE À L'ESSAI DU RÉSERVOIR D'EAU CHAUDE EKOTERM

### 4.2.1 Méthode de calcul

La baisse de température intervenue à l'intérieur du réservoir pendant la durée des tests a été mesurée à l'aide de neuf thermo-éléments implantés à intervalles de 90 mm environ. Les thermo-éléments placés au plus haut et au plus bas étaient écartés d'environ 5 mm du sommet et du fond du réservoir. On a ainsi pu obtenir une image détaillée de l'évolution du gradient de température (des couches de températures) à l'intérieur du réservoir. Des mesures antérieures ont montré que le gradient radial à l'intérieur de réservoirs renfermant de l'eau à une température comprise entre 60 et 80 °C était inférieur à 0,2 K (soit négligeable) /3/.

L'ensemble des neuf capteurs thermiques mesurant la température d'un volume d'eau approximativement identique, la température moyenne à l'intérieur du réservoir a pu être calculée selon la formule :

$$(4.3)$$

On a calculé comme suit le coefficient moyen de conductivité du réservoir (valeur  $U$ ), sur la base de cette température moyenne de l'eau :

$$(4.4)$$

$U$  représentant le coefficient moyen de conductivité thermique du réservoir [en  $W/(m^2K)$ ],  $V$  le débit volumique total du réservoir [ $m^3$ ],  $A$  la surface extérieure du réservoir [en  $m^2$ ],  $\rho$  et  $c_p$ , respectivement, la densité [en  $kg/m^3$ ] et la capacité calorifique [en  $J/(kgK)$ ] de l'eau pour le niveau de température concerné, tandis que  $t_0$  (c'est-à-dire :  $t_{i-1}$ ) est la température initiale moyenne à l'intérieur du réservoir [ $^{\circ}C$ ],  $t_R$  la température ambiante [en  $^{\circ}C$ ] et  $n$  le nombre de paliers de temps pris en compte dans le calcul (96 pour une mesure effectuée toutes les 15 minutes pendant 24 heures).

On a pu calculer, sur la base de la valeur  $U$  moyenne, le flux moyen de chaleur du réservoir [en  $W/m^2$ ]

$$(4.5)$$

## 4.2.2 Baisse de température mesurée

Pour la mesure de la perte de chaleur à l'intérieur du réservoir d'eau chaude (3F1200V), la température initiale de l'eau était de  $65,2^{\circ}C$  ( $\pm 0,1^{\circ}C$ ), et la température moyenne de l'air pendant la période de mesure de 24 heures était de  $20,3^{\circ}C$ . La figure 4.1 montre l'évolution de la température moyenne de l'eau dans le réservoir au cours de la période de mesure.

/// légendes ///

Vanntemperatur = Température de l'eau

Tid [timer] = Durée [heures]

*Figure 4.1 : Température moyenne de l'eau mesurée dans le réservoir pour une température moyenne de l'air de  $20,3^{\circ}C$ .*

La température moyenne de l'eau dans le réservoir est descendue d'environ  $8,4^{\circ}K$  pendant la période de mesure, c'est-à-dire d'environ  $0,35^{\circ}K$  par heure (calcul effectué en appliquant l'équation 4.3). La baisse au cours de cette période était comprise entre  $0,4$  et  $0,3^{\circ}K$  par heure.

La figure 4.2 montre le gradient de température (l'étagement des couches de température) à l'intérieur du réservoir pendant la période de mesure de 24 heures. Les chiffres 0 et 1 correspondent respectivement au fond et au sommet du réservoir (position relative du capteur dans le réservoir).

Dans la partie supérieure du réservoir, ( $z=0,5-1,0$ ) la différence maximale de température au bout de 24 heures était d'environ  $0,7^{\circ}K$ , c'est-à-dire que le gradient de température était minimal. Dans la partie inférieure ( $z=0-0,5$ ), la différence de température mesurée s'est avérée nettement plus élevée :  $6,5^{\circ}K$  environ. Ce phénomène est dû au fait que la perte de chaleur au fond du réservoir est beaucoup plus importante, en raison de la présence de ponts thermiques – les passages de tuyaux et la pièce constituant le fond lui-même n'étant pas isolés.

*Figure 4.2 : Évolution des températures mesurées dans le fond du réservoir (gradient de température vertical) pour une température ambiante moyenne de 20,3°C durant la période de mesure – z montre la position relative des capteurs dans le réservoir (0= fond du réservoir, 1 = sommet du réservoir).*

**Position relative dans le réservoir, z [-]  
Température de l'eau [en °C]**

t = 0 heure  
t = 6 heures  
t = 12 heures  
t = 18 heures  
t = 24 heures

### **4.2.3 Valeur U et flux thermique calculés pour le réservoir**

Le coefficient de conductivité thermique (valeur U) du réservoir d'eau chaude a été calculé en appliquant l'équation 4.4, sur la base d'un volume d'eau de 200 litres et des données relevées sur l'ensemble de la période de mesure. Le résultat obtenu est le suivant :

$$U = \text{env. } 0,45 \text{ (W/m}^2\text{K)}$$

Le flux thermique moyen du réservoir a été calculé en appliquant l'équation 4.5, sur la base d'un volume d'eau de 200 litres, d'une température de l'eau de 60 °C et d'une température ambiante moyenne de 20,3 °C. Le résultat obtenu est le suivant :

$$q = \text{env. } 20 \text{ W/m}^2$$

Le réservoir d'eau chaude présentait une surface extérieure totale de 3 m<sup>2</sup>, c'est-à-dire que la perte totale de chaleur dans les conditions de fonctionnement définies était d'environ 60 W.

## 5 BIBLIOGRAPHIE

1. EN 14511-3, 2004: *Klimaaggregater, vannkjølende grupper og varmepumper med elektrisk drevne kompressorer for oppvarming og kjøling av rom* (Unités de climatisation, unités de refroidissement d'eau et pompes à chaleur avec compresseurs électriques pour chauffage et refroidissement d'ambiance. *Del 3. prøvningsmetoder* (Section 3. *Méthode de test*). Section 4. Uncertainties of measurements. ICS 23.120; 27.080.
2. Stene, J., 2004: *Residential CO<sub>2</sub> Heat Pump System for Combined Space Heating and Hot Water Heating*. Doctoral thesis at The Norwegian University of Technology and Science. ISBN 82-471-6316-0.
3. VDI Heat Atlas (VDI Wärme Atlas), 1993. *Properties of water*. VDI-verlag GmbH, Düsseldorf. ISBN 3-18-400915-7.

## 6 ANNEXE A - MARGE D'INCERTITUDE

### 6.1 GÉNÉRALITÉS RELATIVES À L'ANALYSE DE LA PROPAGATION DES ERREURS

$R$  représente une grandeur calculée, par le biais d'une équation donnée, à partir d'un ensemble de mesures, les valeurs  $X_i$  à  $X_n$  représentant les mesures/variables indépendantes.

$$R = R(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \quad (\text{A.1})$$

On trouve la marge d'incertitude absolue  $\delta R$  applicable à la valeur calculée de  $R$  au moyen de l'équation suivante, en tenant compte de l'incertitude applicable aux différentes mesures (analyse de propagation des erreurs) :

$$(\text{A.2})$$

$\delta X_i$  est la marge d'incertitude pour la mesure/variable  $X_i$ , tandis que la dérivée partielle  $\partial R / \partial X_i$  représente la sensibilité du résultat  $R$  par rapport à la mesure  $X_i$ . Chaque élément de l'équation ( $i=1$  à  $n$ ) représente la contribution des différentes mesures  $i$  à la marge d'incertitude totale ( $\delta R$ ).

L'incertitude relative  $aR$  du résultat calculé est défini de la façon suivante :

$$(\text{A.3})$$

### 6.2 MARGE D'INCERTITUDE APPLICABLE À LA PUISSANCE CALORIFIQUE GÉNÉRÉE

La puissance calorifique générée par l'échangeur thermique des appareils Ekoterm [en W] a été calculée comme suit :

$$(\text{A.4})$$

$V$  représentant le débit volumique à travers l'échangeur thermique à plaques [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],  $t_e$  et  $t_s$ , respectivement, les températures d'entrée et de sortie de l'échangeur thermique à plaques [en  $^\circ\text{C}$ ], tandis que  $\rho$  et  $c_p$  représentent la densité [en  $\text{kg}/\text{m}^3$ ] et la capacité calorifique spécifique [en  $\text{J}/(\text{kgK})$ ] de l'eau au niveau de température concerné.

La marge d'incertitude absolue pour la puissance calorifique produite a été calculée en appliquant l'équation A2. Le résultat obtenu est le suivant :

$$(\text{A.5})$$

### 6.3 MARGE D'INCERTITUDE APPLICABLE AU DEGRÉ D'EFFICACITÉ THERMIQUE

Le degré d'efficacité thermique des appareils Ekoterm a été calculé selon la formule :

(A.6)

$Q$  représentant la puissance calorifique générée par l'échangeur thermique de l'appareil Ekoterm [en W] et  $P$  la puissance électrique transmise à l'appareil, c'est-à-dire au système électrique de chauffage de l'eau et à la pompe de circulation [en W]. La marge d'incertitude absolue pour la puissance calorifique produite a été calculée en appliquant l'équation A.2 :

(A.7)

□ □

## **7 ANNEXE B – EXEMPLE DE SORTIE IMPRIMÉE DES DONNÉES DE MESURE (1F1, 40/30 °C, env. 3,5 KW)**

---

Explication des symboles

$\Delta T$	Différence moyenne de température de l'eau pour la période de mesure [K]
$c_p$	Capacité calorifique spécifique de l'eau pour la plage de température concernée [en kJ/(kgK)]
$\rho$	Densité de l'eau pour la plage de température concernée [en m <sup>3</sup> /kg]
$m$	Flux de masse moyen de l'eau pour la période de mesure [en kg/s] – obtenu à partir de la courbe calibrée et du poids de l'eau
$Q$	Puissance calorifique générée par l'échangeur thermique à plaques [en kW]
$P$	Puissance électrique transmise à l'appareil Ekoterm [en kW]
$\eta$	Degré d'efficacité calculé de l'appareil Ekoterm [-]