

Modélisation sur TRNSYS d'un réservoir d'eau chaude sanitaire et comparaison avec des mesures expérimentales

Célia Térache¹, Radu Zmeureanu² et François Laurencelle³

¹Génie Énergétique et Environnement, INSA de Lyon, France

²Centre for Zero Energy Building Studies,

Department of Building, Civil and Environmental Engineering,

Faculty of Engineering and Computer Science,

Concordia University, Montréal, Québec, Canada

³Laboratoire des Technologies de l'Énergie (LTE) d'Hydro-Québec,
Shawinigan, Québec, Canada

Abstract

Le but de cet article est d'explorer l'influence de la valeur du débit de mélange par inversion et de la hauteur d'entrée d'eau froide sur la consommation journalière d'électricité et le profil vertical de température dans un réservoir d'eau chaude sanitaire. L'étude du comportement thermique du réservoir est délicate car les mouvements d'eau existants dans les trois dimensions du réservoir sont complexes. Le modèle de réservoir (Type 534) intégré à la librairie TESS du logiciel de simulation TRNSYS ne fournit que la valeur de la température moyenne dans chaque nœud. En revanche, le modèle Type 534 est un bon outil d'évaluation des consommations d'électricité de chauffage d'un réservoir d'eau chaude régulé en température. Le bilan d'énergie global sur le réservoir est estimé avec une erreur de seulement 0,6% par rapport aux mesures.

1 Introduction

Le système combi solaire collecte l'énergie solaire afin de chauffer des réservoirs d'eau, utilisés de manière combinée pour le chauffage et pour l'eau chaude sanitaire d'un bâtiment. D'habitude il est composé d'un ou deux réservoirs d'eau et de trois boucles principales : la boucle du fluide caloporteur, la boucle fermée du circuit de chauffage et la boucle ouverte d'eau chaude sanitaire. Chaque réservoir comporte un système auxiliaire de chauffage électrique afin de maintenir les températures de consigne de chauffage et d'eau chaude sanitaire.

Un phénomène de stratification thermique est observable au sein du réservoir non agité, lorsqu'il existe un gradient de température significatif entre le haut et le bas du réservoir. De plus, un autre phénomène, l'inversion thermique, apparaît lorsque l'eau froide du bas du réservoir se réchauffe au contact de l'échangeur, et voit sa température dépasser celle de l'eau des couches supérieures. Des mouvements naturels de mélange s'instaurent alors dans le réservoir sous l'effet de la différence de densité des couches d'eau.

L'analyse de phénomènes thermiques dans un réservoir de stockage a fait l'objet de nombreuses études. Les modèles numériques basés sur la mécanique de fluides (CFD) permettent l'analyse des phénomènes en régime transitoire en trois dimensions (Yaici et al. 2013). Cependant le temps de réponse de ce type de modèles est très long pour les applications reliées à la conception ou l'analyse du système combi solaire, où l'intégration de plusieurs équipements est simulée sur une année avec des pas temps de quelques minutes.

Pour des raisons pratiques, des modèles plus simples ont été développés. Par exemple, Bernier and Bouthillier (1995) ont développé un modèle numérique unidimensionnel en régime transitoire pour prédire la température de sortie de l'eau chaude du réservoir et la consommation d'électricité en fonction du profil journalier de consommation d'eau domesti-

que. Atabaki (2001) a présenté une revue bibliographique des modèles reliés à la stratification thermique dans les réservoirs de stockage d'eau. Il a conclu que les modèles dans la littérature ont deux principales faiblesses : (1) la distribution de la chaleur dans le réservoir pendant l'activation des éléments chauffants n'est pas bien caractérisée et (2) l'évolution en fonction du temps de la région de l'entrée de l'eau froide n'est pas bien définie. Il a observé que la position du tuyau d'entrée dans le réservoir peut influencer la formation initiale de la région stratifiée. Atabaki et Bernier (2001) ont déterminé expérimentalement la corrélation entre la hauteur de la zone de mélange initiale en bas du réservoir et le nombre de Richardson d'entrée, qui ensuite a été validé (Atabaki et Bernier 2005).

L'utilisateur du logiciel TRNSYS (Klein et al. 2010), qui est très utilisé pour l'analyse de systèmes solaires parmi d'autres nombreuses applications, peut faire appel à quelques modèles pour la simulation de réservoir de stockage d'eau. Allard et al. (2011) ont comparé les résultats de cinq modèles (appelés Types) avec des mesures expérimentales. Les modèles suivants ont été comparés : Type 4, Type 38 et Type 60 (disponibles dans la bibliothèque standard de TRNSYS), Type 340 (distribué par Transsolar en Allemagne) et Type 534 (disponible dans la bibliothèque de TESS). Le Type 534 est finalement recommandé par Allard et al. (2011) comme le meilleur compromis parmi les cinq modèles.

C'est pourquoi cette étude porte sur le Type 534. L'objectif a été (1) d'explorer l'influence de divers paramètres, tel que le débit de mélange par inversion ou la hauteur de l'arrivée d'eau, sur le modèle du réservoir d'eau et (2) de comparer la consommation simulée d'électricité journalière pour chauffer le réservoir avec des données expérimentales.

2 Mesures expérimentales

Description du banc d'essai

Les mesures expérimentales ont été obtenues par la collaboration du Laboratoire des Technologies de l'Énergie (L.T.E.) de l'Institut de recherche d'Hydro-Québec. L'expérience a eu lieu à Shawinigan, Québec, pendant quatre jours consécutifs du 25 au 28 août 2009. Le réservoir d'eau chaude de 270 L, d'une hauteur de 1,40 m et de diamètre d'environ 0,5 m, est équipé de deux résistances chauffantes de 4.2 kW chacune, ainsi que de deux thermostats. L'entrée d'eau, en provenance du réseau de ville, se fait par la face supérieure du réservoir dans une conduite fermée jusqu'en bas du réservoir, alors que la sortie d'eau chaude s'effectue directement par le haut. Toutes les mesures réalisées sur l'installation sont récoltées avec un pas de temps de 5 minutes. Dix thermocouples de type T sont installés sur la surface extérieure de la paroi du réservoir (Figure 1), sur une zone sans isolant, et donnent une approximation du profil vertical de température à l'intérieur du réservoir. De plus, un thermocouple est placé dans la conduite d'arrivée d'eau froide en amont du réservoir. Cette mesure peut être contaminée par la température ambiante dans le local où se trouve le chauffe-eau. Cette conduite étant ensuite immergée dans l'eau, elle agit comme un échangeur thermique et voit sa température augmenter légèrement jusqu'au réel point d'entrée dans le réservoir. Enfin, un wattmètre mesure pour chaque pas de temps la puissance électrique moyenne, et par intégration on obtient l'énergie électrique consommée par l'une ou l'autre des résistances de chauffage auxiliaire. Le système de contrôle ne permet pas aux deux résistances de fonctionner simultanément. Enfin, un compteur d'eau mesure le volume d'eau renouvelé pendant chaque pas de temps de 5 minutes.

Incertitude de mesures

L'erreur systématique du thermocouple de Type T est de 1.0 à 1.17 K. L'incertitude de mesure de l'énergie électrique consommée d'après la documentation technique du Wattmètre est de 0.5 % de la pleine échelle.

Température d'entrée de l'eau

La température d'entrée d'eau mesurée sur un jour varie entre 16,3°C et 20,7°C, autour d'une valeur moyenne de 18,7°C.

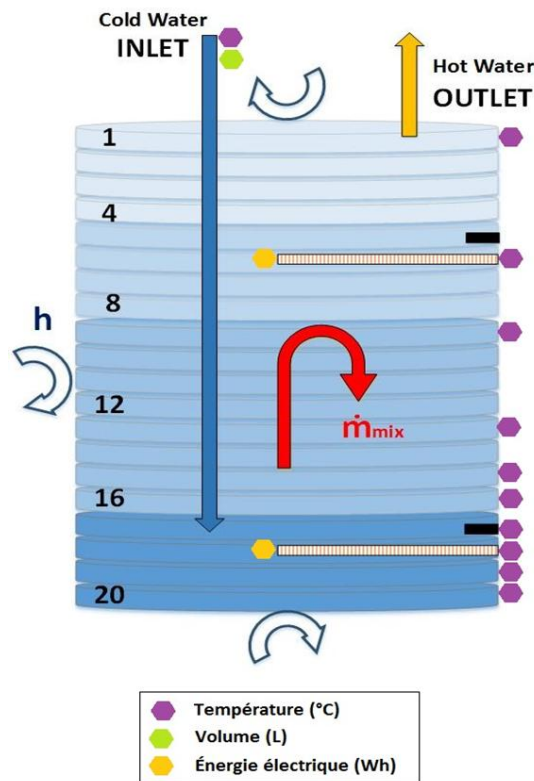


Figure 1 : Schématisation des points de mesures sur le réservoir d'eau chaude

Profil journalier de consommation d'eau domestique

Le tirage d'eau chaude est basé sur un profil de consommation d'eau résidentiel, d'environ 415 L par jour, ce qui correspond à un taux de 1,5 de renouvellement journalier du réservoir. Le débit choisi est assez élevé pour rendre influents les phénomènes d'inversion thermique. La mesure du volume total d'eau renouvelée pendant chaque pas de temps de cinq minutes a été convertie en débit instantané, qui est injecté dans le modèle à chaque pas de temps de simulation, soit à toutes les 10 secondes (Figure 2).

Profil de température mesuré

Figure 3 présente la variation des températures des couches (ou nœuds) 1 à 20 (indiquées T1 à T20), mesurées le 25 août 2009, ainsi que leurs barres d'incertitude respectives. Ce profil tracé sur trois heures peut être divisé en deux parties :

- La partie supérieure, comprenant les nœuds 1 à 14, est thermiquement très stable. En effet, les températures T1 à T13 sont quasiment constantes, leur écart-type est inférieur à 0,5 K ;
- La partie inférieure, comprenant les nœuds 15 à 20, est sensible aux perturbations d'entrée d'eau froide et à l'activation de la résistance de chauffage basse. L'ensemble des températures T16 à T20 subissent d'importantes variations à chaque renouvellement d'eau, avec un écart type allant de 2 à 5K.

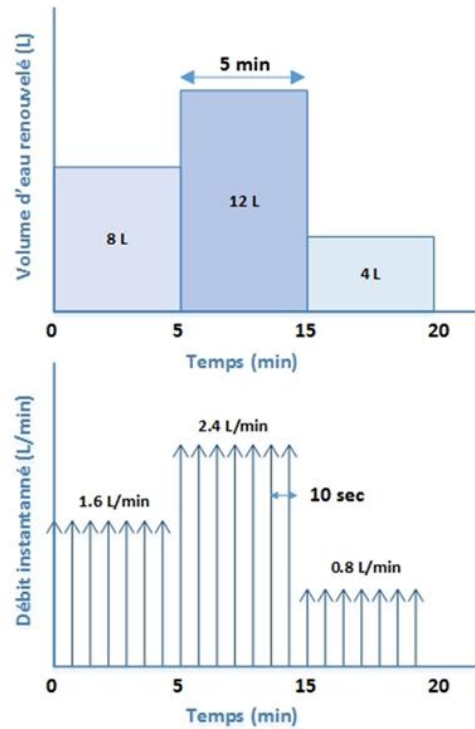


Figure 2: Profil de consommation d'eau chaude domestique

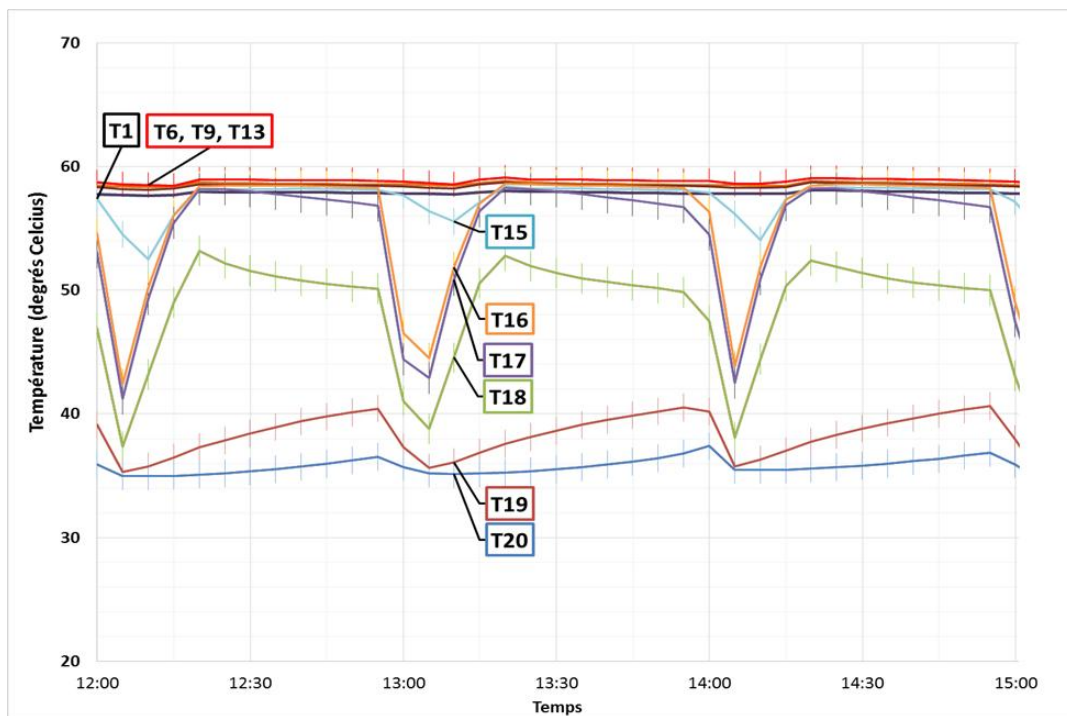


Figure 3: Mesures du 25 août 2009 - Valeurs moyennes des températures T1 à T20 et leur incertitude

3 Modélisation du réservoir d'eau

Présentation du Type 534

L'élément central du modèle est le Type 534, représentant le réservoir cylindrique vertical de stockage d'eau chaude. Le volume d'eau du réservoir est divisé en N couches horizontales de

même volume appelées nœuds. Ses dimensions ainsi que diverses propriétés sont modifiables par l'utilisateur. Le réservoir est muni dans notre cas d'un port entrée/sortie couplée, c'est-à-dire que pour maintenir constant le volume dans le réservoir, le volume d'eau entrant est toujours égal au volume d'eau extrait. L'entrée d'eau froide est située en bas du réservoir, alors que la sortie d'eau chaude est au sommet, au nœud numéro 1 (Figure 1). Il y a deux résistances électriques servant de chauffage auxiliaire, qui régulent le réservoir en température par un système Tout Ou Rien via deux thermostats haut et bas.

Les données de sortie fournies par le Type 534 sont les températures à chaque nœud, l'énergie électrique utilisée et le pourcentage d'erreur du bilan énergétique du réservoir à chaque pas de temps.

Pour obtenir dix températures simulées, aux mêmes positions que les dix températures mesurées, il est nécessaire de diviser le volume du réservoir en au moins 20 nœuds de même taille, c'est-à-dire que chaque nœud a une hauteur maximale de 7 cm. Le pas de temps de simulation a été choisi égal à 10 secondes pour ne pas perturber le modèle lors de grands tirages d'eau à 20 L/min ; le pas de temps de simulation doit être inférieur au temps que met une couche d'eau à se renouveler entièrement dans un nœud de 13.5 L soit un pas de temps inférieur à $13.5 \text{ L} / (20 \text{ L}/60 \text{ secondes}) = 40.5 \text{ secondes}$. Il serait donc possible de mener la même étude avec des pas de temps allant jusqu'à 40 secondes au maximum.

La valeur du coefficient d'échange convectif avec le milieu extérieur est issue de l'étude par (Allard et al. 2011) et équivaut aux pertes thermiques à travers 1,5 cm d'isolant classique pour ballon d'eau chaude.

Paramètres de forte influence pour la simulation

Avant même de commencer la comparaison entre les valeurs mesurées et les résultats de la simulation, cette section présente les paramètres choisis pour analyser la sensibilité du modèle Type 534. La table 1 présente les scénarios 4 à 10 qui diffèrent seulement par les valeurs de paramètres choisis. Les scénarios préliminaires 1 à 3 ne sont pas présentés dans cet article.

- ***Débit massique de mélange par inversion.*** Lorsque la température de l'une des couches d'eau du réservoir dépasse la température de la couche directement au-dessus, par l'activation d'une résistance chauffante ou l'arrivée d'une perturbation d'eau froide, le système devient instable. Les couches d'eau de différente masse volumique se déplacent par gravité jusqu'à ce que l'équilibre thermique naturel soit rétabli. Ce phénomène d'inversion thermique n'existe donc qu'en régime transitoire, pendant un temps limité. C'est le débit massique de mélange par inversion qui détermine à quelle vitesse les deux couches consécutives vont se mêler pour uniformiser leur température. Ce débit est un paramètre de la simulation, le même pour tout les nœuds et indépendamment du débit d'eau ou du niveau d'inversion thermique ; ce paramètre doit être défini par l'utilisateur au début de la simulation.
- ***Température de consigne.*** Afin d'obtenir un profil de température simulé proche de celui mesuré, les températures de consigne du thermostat haut (nœuds 5-6) et du thermostat bas (nœud 17-18) ont été fixées à des valeurs proches de la température moyenne mesurée de ces couches respectives (Table 1). Les bandes mortes, positionnées de manière centrée par rapport à la température de consigne, ont été choisies de manière à ce que les profils de température et les consommations électriques journalières concordent avec l'expérience.
- ***Nœud d'entrée d'eau froide.*** À chaque tirage d'eau chaude sanitaire au sommet du réservoir, le renouvellement en eau froide est une perturbation thermique majeure du système. C'est pourquoi la position de l'arrivée d'eau est déterminante pour le réservoir. Nous avons considéré deux cas, à cause de l'incertitude sur la position exacte de l'entrée du jet d'eau froide sortant du conduit d'alimentation : entrée au nœud 17 et au

nœud 20. Si l'on souhaitait entrer dans le détail de l'arrivée d'eau, il faudrait étudier les échanges thermiques préalables sur la conduite, l'orientation de la conduite par rapport au réservoir ainsi que les turbulences qu'elle engendre avec un modèle différent du Type 534.

- **Isolation sur la face inférieure du réservoir.** Afin de diminuer le niveau de température dans le bas du réservoir et l'accorder avec les mesures, la valeur du coefficient d'échange thermique sur la face inférieure du réservoir a été modifiée de $3.78 \text{ W/m}^2.\text{K}$ (isolation forte, scénario 8) à $10 \text{ W/m}^2.\text{K}$ (isolation faible, scénario 10).

Table 1 : Paramètres retenus pour chaque scénario de la simulation TRNSYS.

Scénario	4	5	6	7	8	9	10
<u>Température de consigne</u>							
Thermostat haut (°C)	60	58	60	58	58	58	58
Bande morte (°C)	2	2	2	2	2	2	2
Thermostat bas (°C)	60	48	60	56	56	56	56
Bande morte (°C)	10	12	10	10	10	5	10
<u>Coefficient d'échanges thermiques U</u>							
Face inférieure (kJ/hr.m2.K)	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	10	10
Face latérale du nœud (kJ/hr.m2.K)	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78
Face latérale nœud n°20 (kJ/hr.m2.K)	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	10	10
<u>Puissance de chauffage électrique (kW)</u>							
Nœud d'entrée d'eau froide	3.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
	17	17	17	17	20	20	20

Profil de température simulé

La Figure 4 présente le profil des températures T1 à T20 obtenues avec le scénario 10 sur trois heures. On note que le profil de température simulé diffère de celui mesuré (voir Figure 3) :

- Les couches 6 et 18 où se trouvent les résistances électriques haute et basse subissent d'importantes variations de température lors de l'activation du chauffage. Elles dépassent la température de consigne haute, ce qui n'est pas le cas dans l'expérience.
- Les températures T19 à T20 en bas du réservoir oscillent entre 35°C et 53°C selon que de l'eau froide entre dans le réservoir ou que la résistance de chauffage basse se mette en marche. Dans l'expérience, le bas du réservoir, stabilisé entre 30°C et 40°C , a une inertie plus importante.

Afin d'atténuer ces différences, certains paramètres ont été modifiés d'un scénario à l'autre : (1) le débit massique de mélange par inversion thermique, (2) la position de l'entrée d'eau dans le réservoir et (3) l'isolation thermique du réservoir. L'impact de chaque paramètre sur la simulation est donc étudié par la suite.

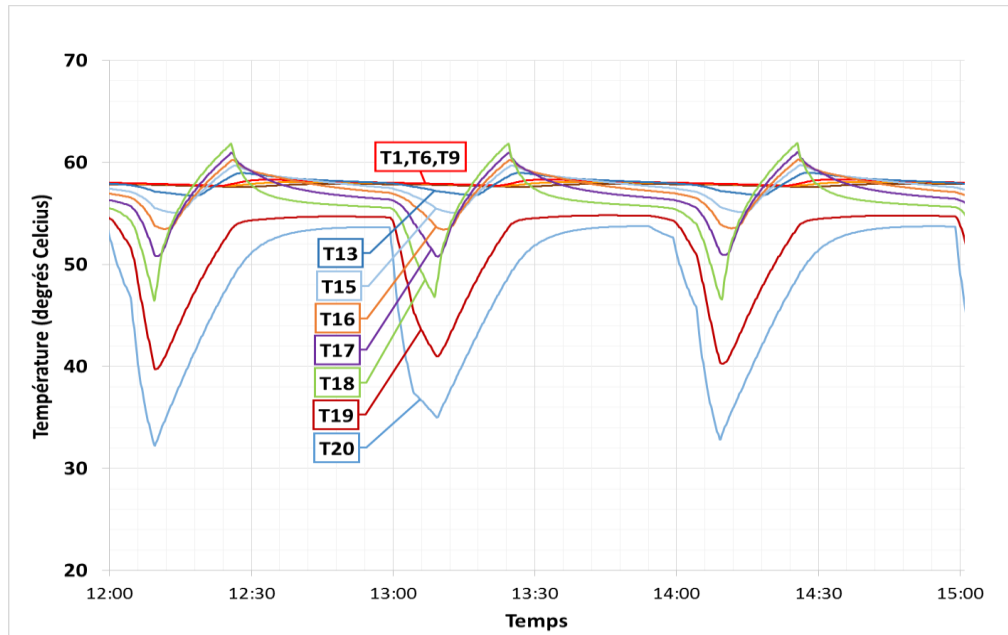


Figure 4: Profil de température T1 à T20 simulé sur trois heures pour un débit de mélange par inversion = 2000 kg/h (scénario 10)

4. Comparaison entre la simulation et l'expérience

Influence des paramètres. Lors d'un tirage d'eau, les couches les plus basses du réservoir voient leur température chuter brutalement avec l'arrivée d'eau froide. La Figure 5 présente cette situation pour un débit de mélange nul, simulée pour le scénario 8, c'est-à-dire avec l'entrée d'eau froide au nœud 17, et la Figure 6 pour un débit de mélange de 2000 kg/h.

Dès lors que la température du thermostat au nœud 17 sort de la bande morte, la résistance chauffante basse se met en marche au nœud 18 et la température T18 de cette couche dépasse rapidement les températures des couches supérieures T16 et T17 (Figure 5). C'est alors que l'inversion thermique opère et selon le débit de mélange choisi, l'équilibre thermique entre ces couches sera rétabli plus ou moins vite. Opter pour un débit de mélange de 2000 kg/h permet donc de limiter la hausse de température au nœud 18 en transférant la chaleur vers les nœuds 16 et 17 situés au-dessus. Le choix d'une valeur non nulle pour le débit de mélange est une première étape essentielle pour faire concorder la simulation aux mesures.

Afin de déterminer quelle valeur du débit de mélange choisir, on étudie le profil de température pour un nœud donné en fonction de la valeur du débit de mélange. La Figure 7 présente les profils simulés obtenus au nœud 17 pour des débits de mélange de 0, 1000 et 2000 kg/h, ainsi que les profils mesurés aux mêmes nœuds avec leur incertitude. La Figure 8 montre les profils simulés et mesurés au nœud 18. A chaque nœud, on remarque que tous les profils ayant un débit de mélange non nul se superposent. Seule la simulation au débit de mélange nul se différencie. Il n'existe donc pas de différence significative entre un débit de mélange de 1000 kg/h et de 2000 kg/h, dès lors que celui-ci est non nul.

D'autre part, au nœud 17, les températures simulées concordent avec les mesures en régime permanent, lorsque la température est stabilisée. Cependant, le régime transitoire lors d'une arrivée d'eau froide est moins bien modélisé. Au nœud 18, les températures simulées sont nettement supérieures aux températures mesurées, avec une différence de 12-15°C. C'est pourquoi par la suite on s'intéresse à la position d'entrée d'eau froide.

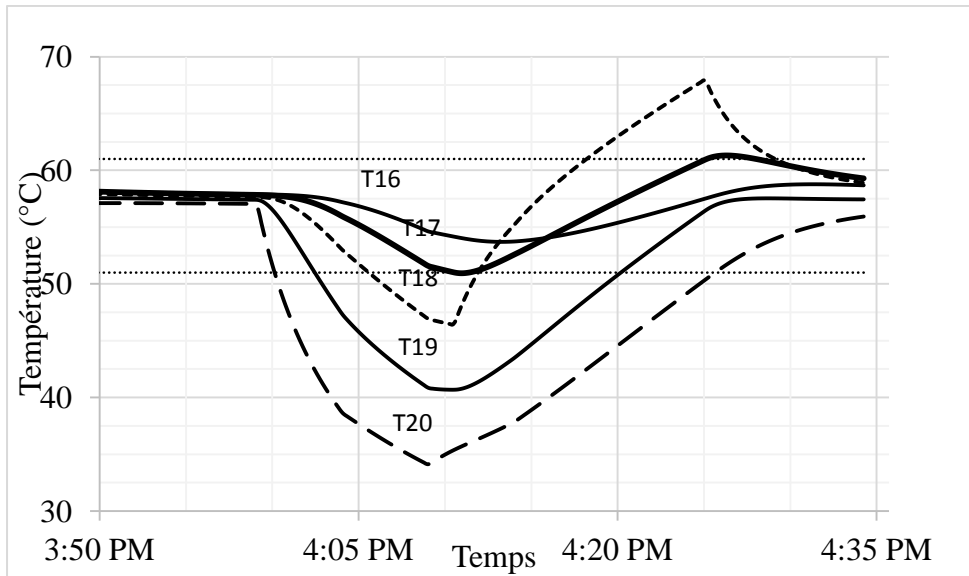


Figure 5 : Évolution des températures en bas du réservoir pendant un tirage d'eau avec le débit de mélange par inversion nul – Scénario 8

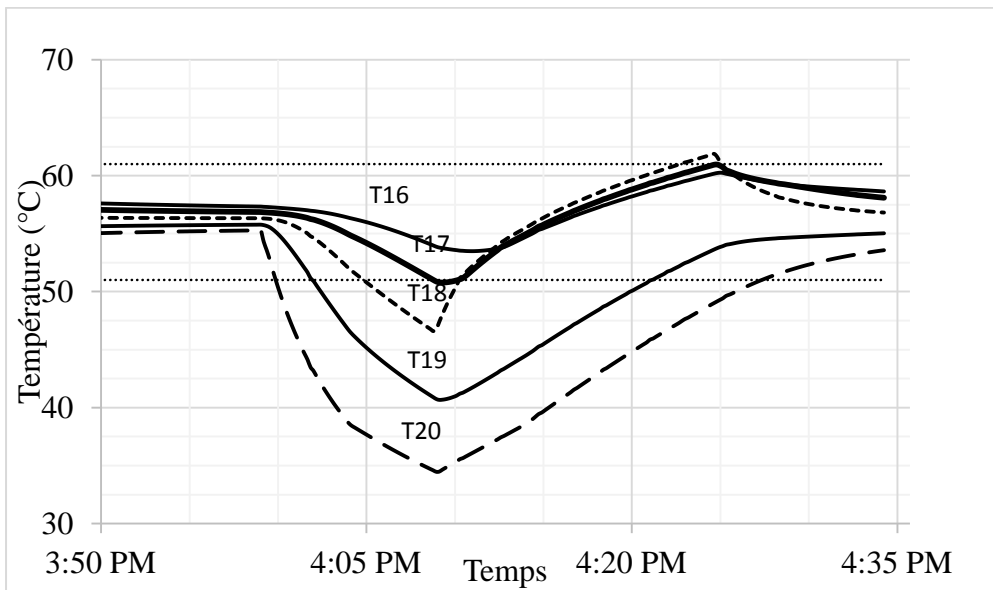


Figure 6 : Évolution des températures en bas du réservoir pendant un tirage d'eau avec le débit de mélange par inversion de 2000 kg/h – Scénario 8

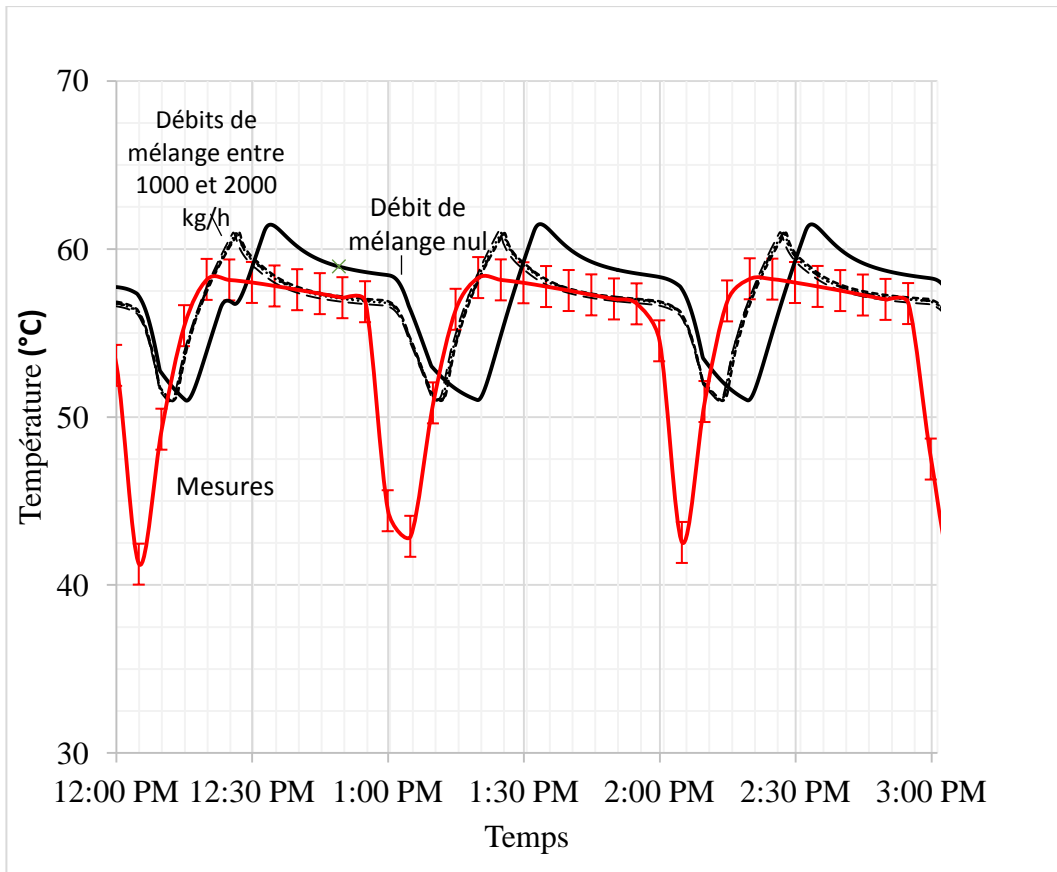


Figure 7 : Température mesurée et simulée au nœud 17 avec le scénario 8

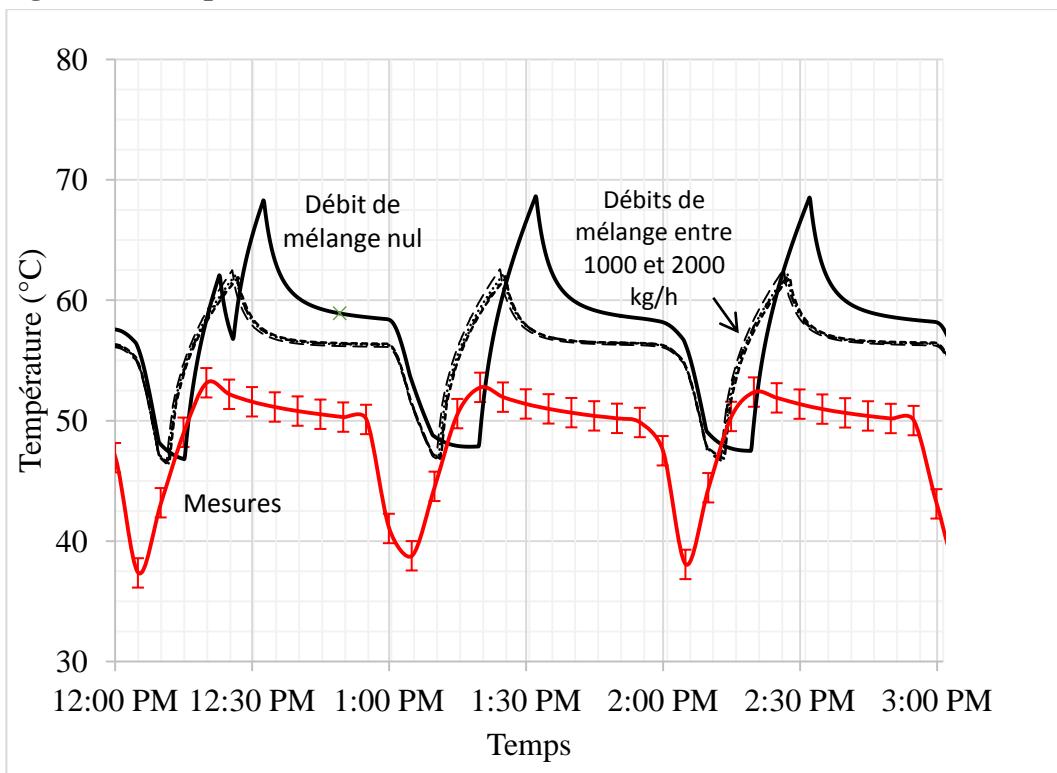


Figure 8 : Température mesurée et simulée au nœud 18 avec le scénario 8

Nœud d'entrée d'eau froide. L'expérience nous montre qu'une épaisse couche d'eau froide est continuellement présente au fond du réservoir. En effet, la température moyenne journalière mesurée au nœud 20 n'excède pas 36.5°C.

En positionnant l'entrée d'eau au nœud 17 dans le scénario 8, les températures dans le quart inférieur du réservoir sont surestimées, dépassant à certains instants les mesures d'une quinzaine de degrés, principalement au nœud 20 le plus froid. De plus, un phénomène d'inversion thermique apparaît car les couches inférieures (18, 19 et 20) ont une température plus élevée que celle de la couche 17 lors d'une entrée d'eau froide, ce qui ne semble pas être le cas dans l'expérience. Enfin, la couche 17 contenant le thermostat du chauffage auxiliaire bas est affectée par la baisse de température et la résistance de chauffage basse est mise en marche. Ainsi le bas du réservoir se déstratifie complètement à chaque renouvellement d'eau, et uniformise par inversion thermique sa température à un niveau trop élevé. L'entrée d'eau froide a donc été déplacée du nœud 17 (scénario 8) au nœud 20 (scénario 10).

Pour comparer ces deux situations, tous les autres paramètres restent fixes. Les figures 9 à 11 comparent le profil vertical de température mesuré et les profils verticaux de température simulés (entrée nœud 17 et entrée nœud 20), pour trois instants (3:30 h, 4:00 h et 4:05 h) pendant un renouvellement d'eau.

En positionnant l'entrée au nœud 20, le modèle prédit une chute de température significative dans le bas du réservoir lors du renouvellement d'eau. Ainsi, la température au nœud 20 atteint des valeurs proches de celles des mesures, autour de 35°C lors d'une arrivée d'eau froide. Cela limite les phénomènes d'inversion thermique et renforce la stratification du réservoir. Aussi, le nœud 17 (contenant le thermostat du chauffage auxiliaire bas) n'étant pas aussi froid, la résistance de chauffage basse fonctionne en moyenne moins longtemps que si l'entrée d'eau s'effectuait à ce nœud 17. La consommation d'électricité journalière est donc moindre lorsque le réservoir est fortement stratifié.

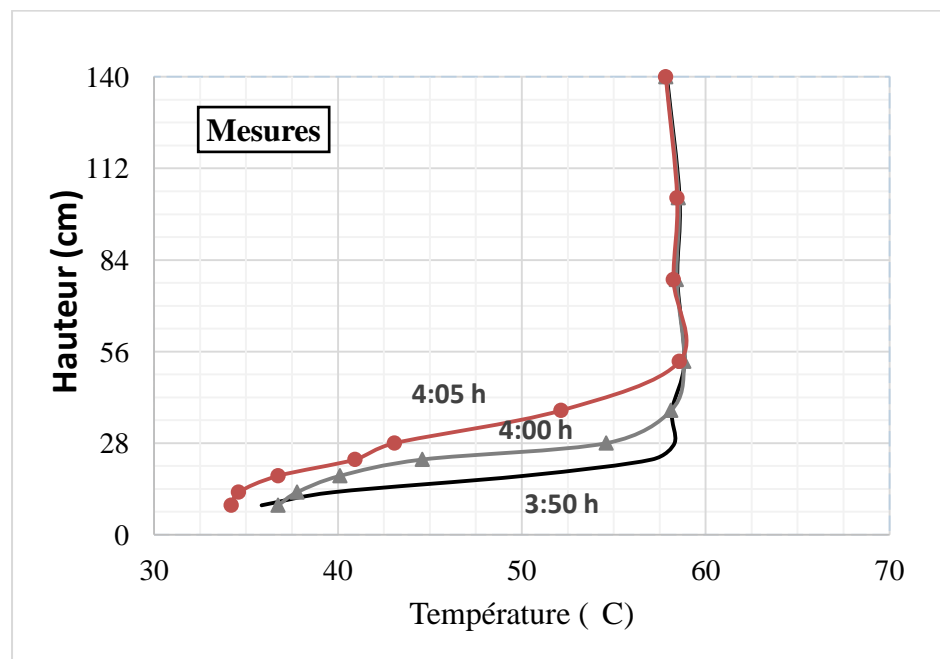


Figure 9 : Profil vertical mesuré de température du réservoir pendant un renouvellement d'eau

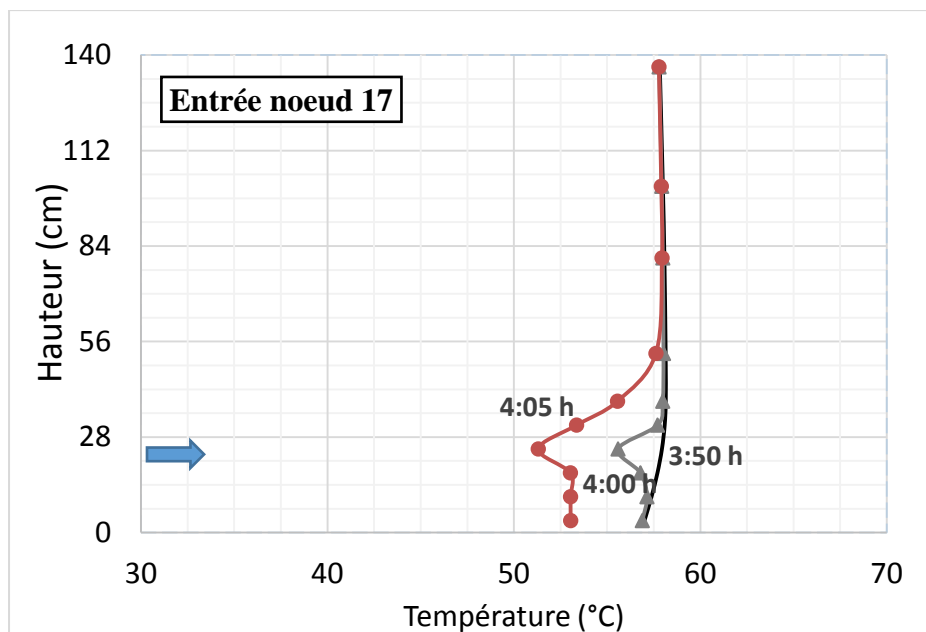


Figure 10 : Influence de l'entrée d'eau froide au nœud 17 (symbolisée par la flèche) sur le profil vertical simulé de température du réservoir pendant un renouvellement d'eau

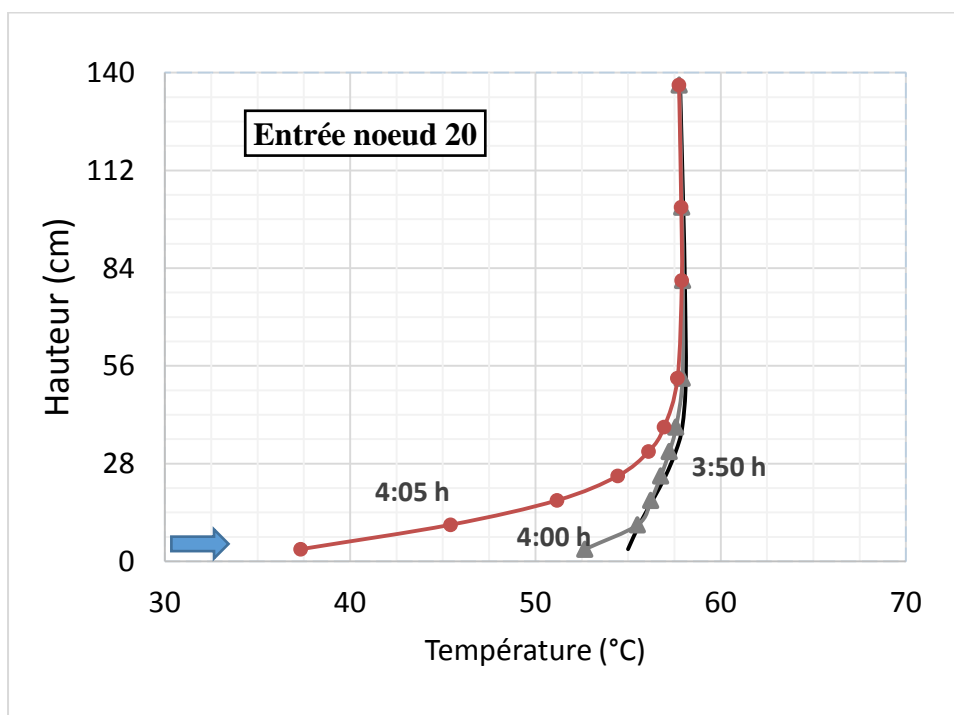


Figure 11 : Influence de l'entrée d'eau froide au nœud 20 (symbolisée par la flèche) sur le profil vertical simulé de température du réservoir pendant un renouvellement d'eau

Isolation sur la face inférieure du réservoir. La figure 12 compare le profil vertical de température mesuré avec les profils de température obtenus par simulation avec une faible isolation ou une forte isolation sur la face inférieure du réservoir. On ne note pas de différence significative entre les profils de températures simulés par les deux niveaux d'isolation.

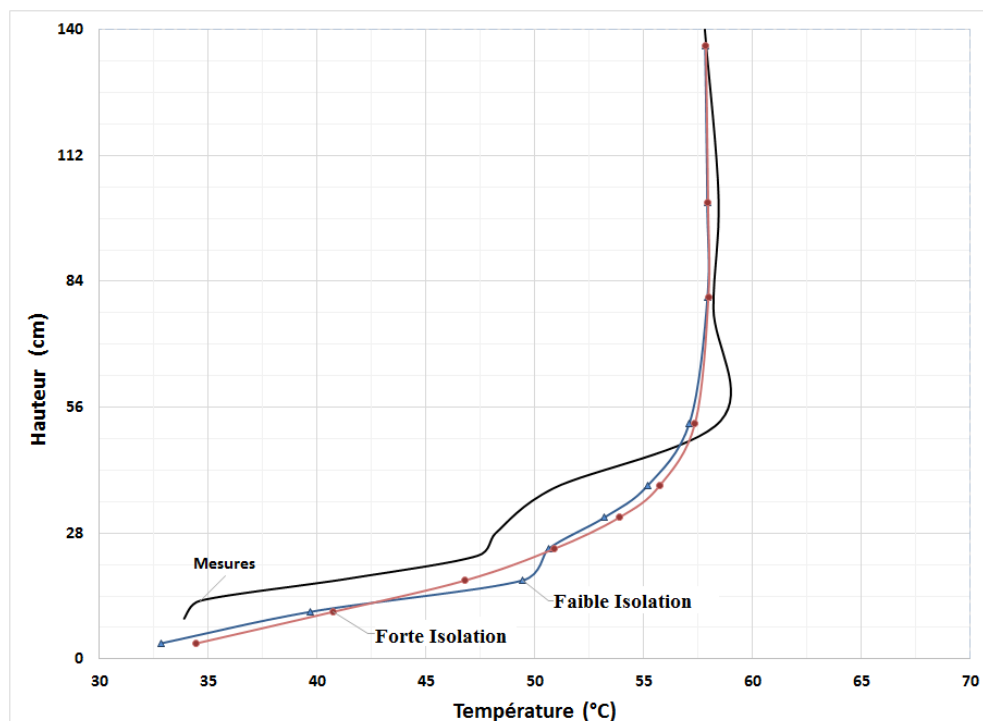


Figure 12 : Mesures et simulation des profils verticaux de température selon l'isolation (scénarios 8 et 10, débit de mélange 2000 kg/h)

Consommation électrique journalière. La consommation d'électricité simulée par chacun des modèles est comparée à la consommation d'électricité mesurée ($24,90 \pm 0,13$ kWh/jour) (Table 2). On observe une tendance vers l'augmentation de la consommation électrique quand la valeur du débit de mélange par inversion augmente : 24,5 à 24,77 (scénario 9) et 24,71 à 25,34 (scénario 10). Le scénario 8 présente de faibles variations autour de cette tendance.

Table 2: Consommation d'électricité journalière simulée [kWh] et erreur relative [%]

Débit de mélange par inversion (kg/h)	Scénario 8	Scénario 9	Scénario 10
0	22.37	24.50	24.71
	-10.2	-1.6	-0.8
1000	22.35	n/a	24.76
	-10.2		-0.6
1500	22.51	n/a	24.84
	-9.6		-0.2
1800	22.74	n/a	24.97
	-8.7		0.3
2000	22.67	24.71	25.04
	-9.0	-0.8	0.6
3000	23.1	24.77	25.34
	-7.2	-0.5	1.8

Commentaires.

La position d'entrée d'eau froide dans le réservoir a une influence sur la consommation d'électricité journalière. En effet, avec un débit de mélange de 1800 kg/h, lorsque l'entrée se fait au nœud 17 (scénario 7), l'énergie de chauffage simulée sur un jour est de 22.88 kWh soit une erreur relative à la mesure de -8.1% alors qu'avec l'entrée d'eau au nœud 20 (scénario 8) l'énergie simulée est de 22.74 kWh et l'erreur relative vaut -8.7%. Le fait de garder le réservoir stratifié en limitant les phénomènes d'inversion thermique permet d'économiser de l'énergie de chauffage, même si cela représente moins de 1% de différence.

D'autre part, la consommation d'électricité en chauffage auxiliaire est plus réaliste dans la configuration d'isolation faible (scénario 10) que dans celle d'isolation forte (scénario 8). Par exemple, avec un débit de mélange de 2000 kg/h, la consommation d'électricité simulée sur un jour avec l'isolation faible est de 0,6 % supérieure à celle mesurée (25.05 kWh par rapport à $24,90 \pm 0,13$ kWh), c'est-à-dire quasiment égale à la mesure, alors qu'avec l'isolation forte, elle est de 9,0 % inférieure à la mesure (22.67 kWh). Cette configuration d'isolation faible est donc plus fidèle aux mesures sur le plan de la consommation électrique.

Il est possible d'utiliser ces résultats de la manière suivante :

- (a) l'énergie totale mesurée pour chauffer le volume d'eau dans le réservoir le 25 août 2009 est de 24,90 kWh ;
- (b) l'énergie nécessaire pour chauffer le volume d'eau renouvelé de la température d'arrivée d'eau au nœud 20 jusqu'à la température de sortie au nœud est de 21,36 kWh ;
- (3) les pertes de chaleur vers le milieu extérieur sont de 3,54 kWh.

On en déduit alors l'efficacité du système de chauffage d'environ 85 % et le flux de chaleur surfacique dissipé par pertes thermiques sur toutes les faces du réservoir et moyenné sur un jour d'environ $2 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

5 Conclusions

L'étude exacte et précise du comportement thermique du réservoir est délicate : en effet, les mouvements d'eau existants dans les trois dimensions du réservoir sont relativement complexes et le Type 534 (unidimensionnel) n'est capable de modéliser le champ de température que dans la direction verticale. De plus, la position des résistances chauffantes ou même de l'entrée d'eau créent de telles perturbations thermiques qu'il est peu probable que la température soit uniforme dans une section du volume à une certaine hauteur. Or le modèle du Type 534 ne nous fournit que la valeur de la température moyenne au centre de chaque nœud ce qui ne permet pas de connaître en détail la distribution de température dans la zone de mélange, approximativement en dessous du nœud 16. Ce résultat avait déjà été souligné dans l'étude d'Allard et al. (2011) : il est délicat de délimiter la zone de mélange dans le volume du réservoir et de connaître la distribution verticale de température dans cette zone.

La hauteur de l'arrivée d'eau et celles du thermostat et de l'élément du bas sont des paramètres qu'il est important de bien configurer car ils influencent l'épaisseur de la couche froide au bas du réservoir.

De plus, il est impératif de fixer le paramètre « débit de mélange par inversion thermique » à une valeur non nulle, autour de 1500 kg/h instantané dès qu'il y a inversion (pour le cas étudié).

D'autre part, les mesures nous permettent de calibrer le modèle dans les phases de régime permanent uniquement, car le régime transitoire est en général mal représenté : les niveaux de température ne sont pas corrects et souvent il existe un décalage temporel entre la

simulation et la mesure, probablement du à l'inertie des capteurs de mesure et du système lui-même.

La partie supérieure du réservoir (nœuds 1 à 16), où les températures sont globalement stables dans l'espace et dans le temps, est convenablement modélisée, ce qui n'est pas le cas au contraire de la partie inférieure (nœuds 17 à 20), instable dans le temps avec l'arrivée de perturbations périodiques et une forte stratification.

En revanche, le modèle TESS 534 est un bon outil d'évaluation des consommations d'électricité de chauffage d'un réservoir d'eau chaude régulé en température. Même sans la connaissance exacte des paramètres de régulation, les résultats des simulations sont réalistes et cohérents par rapport aux mesures. En effet, la simulation du bilan d'énergie global sur le système est correcte et l'erreur commise sur ce bilan est de 0,6% pour le scénario 10 avec un débit de mélange de 2000 kg/h. Le meilleur modèle adapté aux conditions de cette expérience est le scénario 10. Les conditions de la comparaison ont été clairement identifiées, par conséquent la validation s'applique seulement à ces conditions.

6 Références

- Allard, Y., Kummert, M., Bernier, M. & Moreau, A. 2011. Intermodel Comparison and Experimental Validation of Electrical Water Heater Models in TRNSYS. 12th International Building Performance Simulation Association Conference, p. 688-695.
- Atabaki, N. 2001. Etudes expérimentales et numériques sur le comportement thermique des chauffe-eau électriques. M.A.Sc. thesis, Ecole Polytechnique de Montréal, Département de génie mécanique.
- Atabaki, N., 2005. A Semi-Empirical Model for Residential Electric Hot Water Tanks. ASHRAE Transactions, Vol. 111, P.1.
- Atabaki, N. & Bernier, M. 2001. Détermination expérimentale des caractéristiques de la zone de mélange au bas d'un chauffe-eau électrique. Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois, Lyon.
- Bernier, M.A. & Bouthillier, P. 1995. Modélisation de la performance thermique des chauffe-eau électrique du type résidentiel, *Rapport Technique EPM/RT-95/06*, Département de Génie Mécanique, École Polytechnique de Montréal, mars 1995.
- Klein, S.A., et al. 2010. TRNSYS 17 User's manual, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison.
- Yaici, W., Ghorab, M., Entchev, E. & Hayden, S. 2013. Three-dimensional unsteady CFD simulations of a thermal storage tank performance for optimum design. *Applied Thermal Engineering* 60, 152-163.