

Modélisation, implémentation et validation d'un modèle général de ballon ECS

Jean Noël¹, Julien Heintz¹, Mickael Albaric²

¹ CETIAT – Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques
CETIAT, : 20, Av des Arts, 69621 Villeurbanne,
jean.noel@cetiat.fr, julien.heintz@cetiat.fr

² INES RDI – Institut National de l'Energie Solaire
Savoie Technolac, BP 332, 50, Av du Lac Lemans, 73377 Le Bourget du Lac,
mickael.albaric@cea.fr

RESUME. Cet article présente le modèle de ballon ECS développé par le CETIAT pour son logiciel BOOST. Il décrit la modélisation employée, avec les améliorations apportées par rapport aux modèles classiques, et présente 3 cas de comparaisons calculs/expériences.

MOTS-CLÉS : simulation, thermique, ballon.

ABSTRACT. This paper presents the water tank model developed by CETIAT for its software BOOST. It describes the modeling, with its improvement compared to classical models, and it presents 3 cases of comparison between simulation and experimentation.

KEYWORDS : thermal, simulation, tank.

1. INTRODUCTION

Le CETIAT développe des modèles de systèmes pour la simulation d'appareils multifonctions dans le domaine du bâtiment, et s'intéresse tout particulièrement à la chaîne de production/stockage/utilisation d'eau chaude sanitaire (ECS). La pièce maîtresse de cette chaîne est le ballon de stockage dont le modèle doit être précis et simple à utiliser. C'est pourquoi le CETIAT a développé son propre modèle, en améliorant les modèles existants en fonction de l'expérience capitalisée sur ce type d'appareils. De plus, pour répondre à la grande diversité des ballons commerciaux, ce modèle permet le traitement d'un nombre quelconque de piquages, d'échangeurs et de résistances électriques.

Cet article présente sa modélisation et son intégration dans logiciel BOOST du CETIAT.

Le logiciel BOOST fonctionne selon un schéma blocs-connexions, dont les blocs (« modules ») sont les équivalents des TYPES de TRNSYS, dont il s'inspire. Son point fort est son environnement complet : un gestionnaire de schéma, une interface graphique pour les saisies, un éditeur syntaxique avec un compilateur C, et un traceur de courbes. Pour l'instant peu utilisé à l'extérieur du CETIAT, il présente également des fonctionnalités de calculs par la méthode de Monte-Carlo (Désenfant *et al.*, 2007).

2. MODELISATION D'UN BALLON ECS

2.1. LES PHENOMENES PHYSIQUES INTERVENANT DANS UN BALLON ECS

Un ballon ECS se compose habituellement d'une enveloppe isolée assimilable à un cylindre, de plusieurs piquages (entrées/sorties de liquides), de un ou plusieurs échangeurs et de une ou plusieurs résistances électriques. Chacun de ces éléments peut être associé à une sonde de température.

Les phénomènes intervenant dans un ballon sont les suivants (Wehbe-Romitti, 1999) :

- apports thermiques liés au transfert de chaleur entre un échangeur et l'eau du ballon, ou apport par une résistance électrique,
- déplacement de la masse d'eau (effet « piston ») dû aux entrées/sorties de liquide,
- échanges diffusifs entre les zones chaudes et froides de l'eau du ballon.

2.2. LES DIFFERENTS MODELES DE BALLON ECS

Les différents modèles de ballon sont le modèle de stockage brassé (une seule température), le modèle à volumes variables, le modèle zonal (Blandin *et al.*, 2007) et le modèle multicouches. Certains (Johannes, 2005, et Blandin *et al.*, 2007) rajoutent également les modèles CFD («Computational Fluid Dynamic»), mais leur complexité interdit leur utilisation pour des simulations annuelles.

Le modèle zonal divise le ballon selon un maillage 2D pour une meilleure prise en compte des recirculations induites par les ajouts de liquide. Mais l'avantage d'un maillage plus fin est compensé par l'inconvénient de devoir définir a priori les débits entre zones.

Le modèle à volumes variables (TYPE 38 de TRNSYS par exemple) fait varier la taille des mailles en fonction des variables du problème.

Le modèle multicouches à épaisseur de couche constante est celui retenu.

Il s'appuie sur une stratification de la température d'eau, par découpage du volume en strates horizontales à température constante.

Les flux d'énergie sont évalués aux interfaces de ces strates et les apports d'énergie par le ou les échangeurs (ou par la ou les résistances électriques) sont vus comme des termes sources.

Les flux d'énergie verticaux entre strates sont reliés à des phénomènes convectifs de mouvement de l'eau en bloc (liés à l'ajout et au retrait d'eau) et à des phénomènes diffusifs.

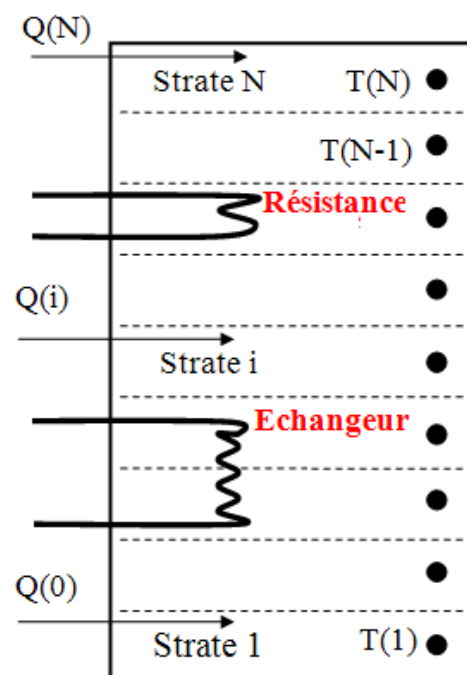


Fig. 1 : schéma de modélisation d'un ballon

2.3. LE MODELE DE BALLON BAL10 INTEGRE AU LOGICIEL BOOST DU CETIAT

La modélisation repose sur une équation de convection/diffusion, que l'on retrouve dans les modèles récents, complété par un algorithme de suppression des gradients inverses.

2.3.1. L'équation de convection/diffusion

L'équation générale à traiter est celle d'un problème de convection/diffusion/production où v et λ représentent la vitesse et le coefficient de diffusion :

$$\rho.C.\frac{dT}{dt} = -v.\frac{dT}{dx} + \lambda.\frac{d^2T}{dx^2} \quad [1]$$

Etant donné le découpage en strates, on utilise une approche « volumes finis » et on raisonne directement sur les variables liées aux cellules, ici les strates. L'évolution de la température d'une strate est alors traitée par l'équation suivante, où $V(i)$ représente le volume de la strate i :

$$\rho.C.V(i).\frac{dT(i)}{dt} = L(i) + [F(i) - F(i-1)] \quad [2]$$

Le terme de production L prend en compte à la fois les flux d'énergie dus aux apports de masse de liquide par les entrées, les apports de chaleur (échangeurs, etc.) et les pertes sur le pourtour de la strate (pertes avec l'extérieur).

Le terme F représente les échanges par déplacement et diffusion. La diffusion prend en compte des transferts que l'on ne sait pas bien modéliser mais qui visent à homogénéiser la température du ballon en l'absence de tout apport de masse et de chaleur.

Dans un premier temps, la constante de conductivité effective $\lambda_{\text{effective}}$ est prise constante (diffusion laminaire ou par convection entre strates voisines). Ultérieurement elle pourra être rendue fonction des débits pour éventuellement prendre en compte un phénomène de mélange lié aux « jets » entrants/sortants.

2.3.2. L'homogénéisation des températures ou refroidissement libre

Le mélange par diffusion concerne le rééquilibrage des températures en l'absence de mouvement du liquide. Il agit par diffusion de la température dans le liquide et aussi le long de la paroi métallique du ballon.

La conductivité effective est donnée par Newton (voir aussi Cruickshank, 2009), qui propose de déterminer la conductivité effective par l'association en parallèle de deux résistances, l'une qui correspond au transfert par l'eau et l'autre au transfert par le métal de la paroi. Cela donne alors approximativement la formule 3, où D est le diamètre interne du ballon et e l'épaisseur du métal. Cette formulation produit les résultats les plus proches de l'expérimental dans le cas du refroidissement libre.

$$\lambda_{\text{effective}} = \lambda_{\text{eau}} + \frac{8.e}{D}.\lambda_{\text{métal}} \quad [3]$$

Cette formulation est également suggérée dans le modèle de de-stratification du TYPE 60 de TRNSYS.

2.3.3. L'algorithme de suppression des gradients inverses

Dans un article de 1982, Pissavin propose un modèle de ballon très sophistiqué, sur une géométrie classique de ballon vertical à un échangeur, avec soutirage. Les points intéressants concernent les transferts convectifs instantanés (suppression des gradients inverses, algorithme de transferts convectifs instantanés qui a été intégré au modèle BAL10) et la fonction de mélange au niveau des piquages (cette fonction de mélange semble efficace mais reste compliquée, et n'est pas reprise dans le modèle BAL10).

3. LES TESTS DE COMPARAISON AVEC L'EXPERIMENTAL

3.1. TEST DE REFROIDISSEMENT LIBRE

PISSAVIN a testé ses intéressants modèles sur plusieurs résultats expérimentaux, dont l'un de refroidissement libre. Les conditions sont reprises dans le tableau 1. La diffusion effective provient d'une conductivité de l'eau de 0.6 W/m/K et une conductivité de l'acier de 26 W/m/K. Le pas en temps est de 15 min et le nombre de strates est de 56.

Caractéristiques	Valeur	Unité
Volume V	209	litre
Diamètre interne D	0.488	m
Epaisseur e de la paroi métallique	3.5	mm
Conductance thermique supérieure	1.75	W/m ² .K
Conductance thermique verticale	0.9	W/m ² .K
Conductance thermique inférieure	3.25	W/m ² .K
Constante de diffusion	2.05	W/m.K
Température initiale du ballon	81	°C
Température extérieure	21	°C

Tableau 1 : caractéristiques du ballon de test en refroidissement libre

L'eau de la partie supérieure du ballon a été chauffée au préalable. Au temps initial, un profil vertical de température a été ainsi imposé (« BOOST T(0) », trait plein bleu).

La température est tracée selon l'axe vertical du ballon), de bas en haut (résultats expérimentaux en pointillés, pour différents temps au cours du refroidissement libre, 6h, 12h, 24h, 2j, 5j, 10j).

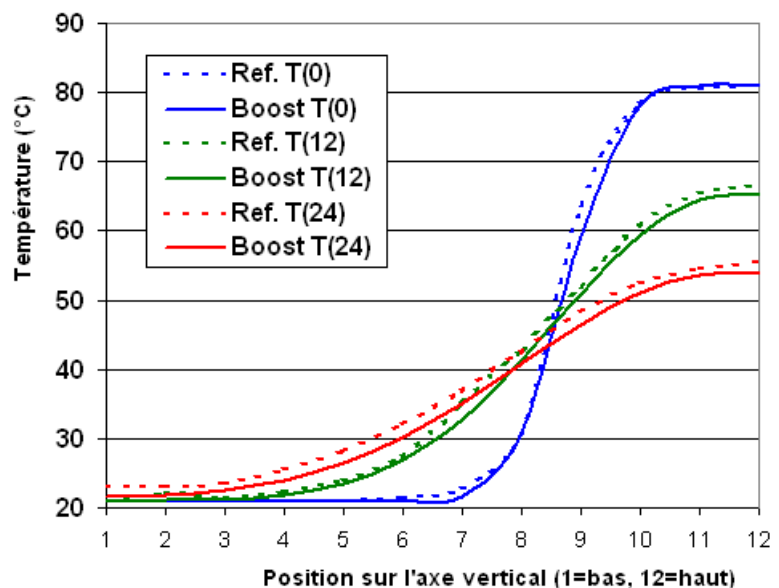


Fig. 2 : profils de température en refroidissement libre

On observe un comportement globalement identique entre calcul et expérience.

3.2. TEST DE REGENERATION

Le test suivant est basé sur la configuration de Wehbe-Romitti (2000) dans une série d'expérimentations réalisées au CETIAT. Il s'agit d'une régénération, c'est-à-dire d'un réchauffage de l'eau initialement froide au moyen de l'échangeur.

Le tableau 2 donne les conditions de calcul. Le pas en temps est de 60 s et le nombre de strates de 64. La diffusion effective (2.5 W/m.K) est réglée pour avoir la même position sur le graphe des températures des positions relatives les plus basses

Caractéristiques	Valeur	Unité
Volume V	80	litre
Diamètre interne D	0.397	m
Constante de refroidissement	0.43	Wh/24h.l.K
Température d'eau froide	10	°C
Position échangeur	0.147	m
Hauteur échangeur	0.324	m
Facteur d'échange échangeur HS	475	W/°C
Température initiale du ballon	10	°C
Température extérieure	10	°C

Tableau 2 : caractéristiques du ballon de test

La figure 3 donne les profils verticaux de température, de bas en haut, pour des temps de 5, 15 et 30 minutes.

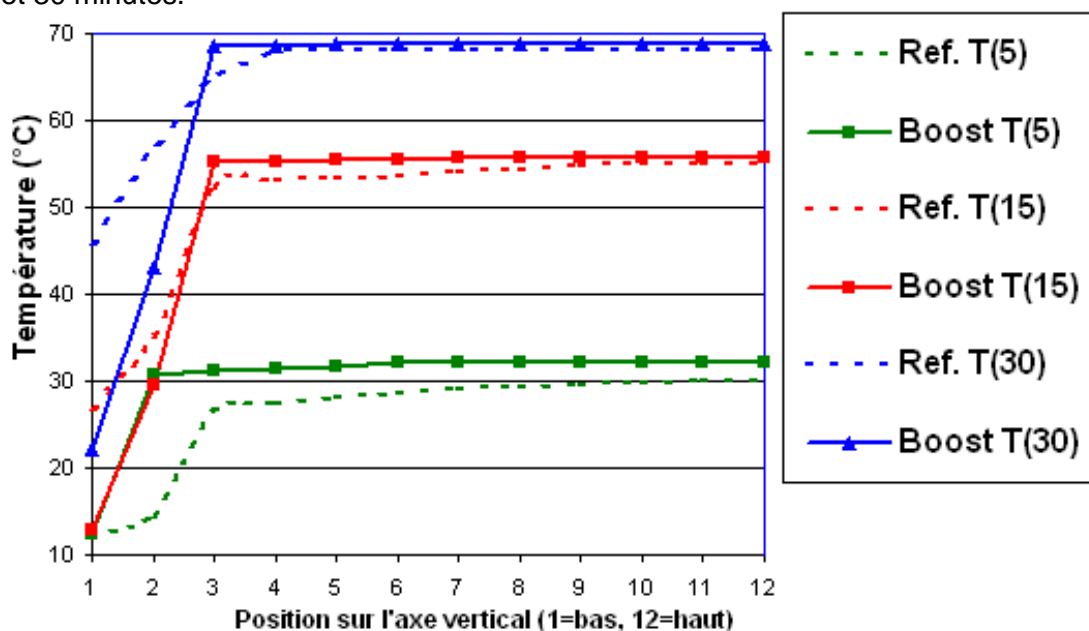


Figure 3 : profils de température en phase de régénération

Ce test fait intervenir l'algorithme de suppression des gradients inverses et permet donc de vérifier sa bonne adéquation avec la réalité.

On constate globalement les mêmes comportements, avec des écarts plus importants sur les zones situées sous l'échangeur, mais cette zone est toujours difficile à traiter pour des raisons d'inhomogénéité dans la répartition des serpentins dans cette zone.

4. VALIDATION SUR UN CAS EXPERIMENTAL COMPLET « BALLON » + « CAPTEUR SOLAIRE »

Cet essai a été réalisé sur le banc semi-virtuel de l'INES qui permet le pilotage de boucles hydrauliques chaud / froid pour la simulation de systèmes thermiques.

Pour l'évaluation des performances thermiques des systèmes solaires combinés (SSC), l'INES a défini une séquence d'essai de 12 jours, représentatifs d'un climat standard. Une séquence simplifiée de 6 jours a été utilisée, comportant 2 jours d'hiver, 2 de printemps et 2 d'été. Elle permet de tester le comportement global du système dans des conditions représentatives d'une année de fonctionnement. Le rayonnement global sur le plan du capteur et la température extérieure de la séquence sont donnés sur les figures 4 et 5.

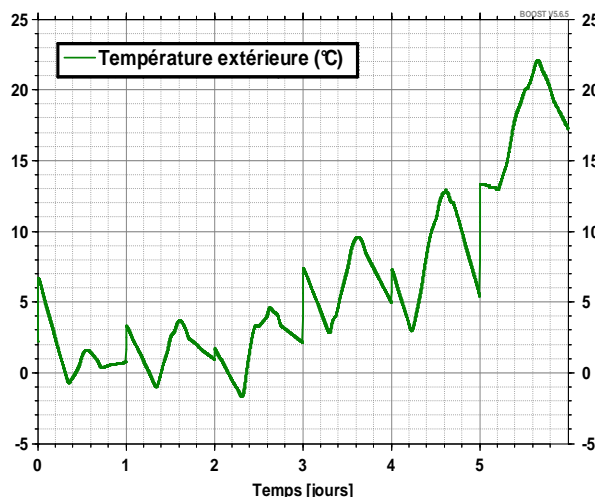


Fig. 4 : température extérieure

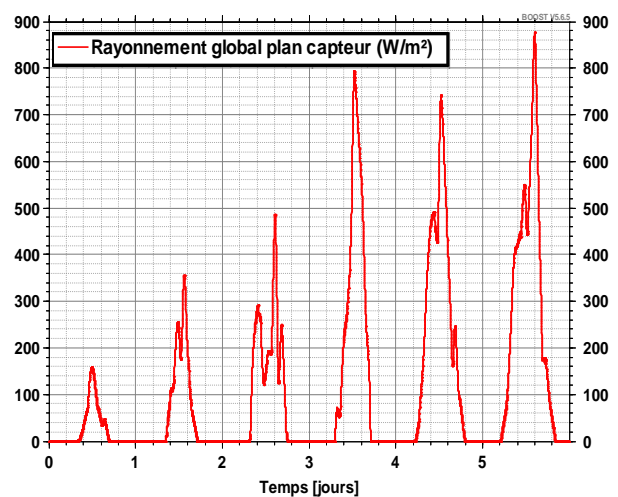


Fig. 5 : flux solaire sur l'horizontale

Le montage est illustré sur la figure 6 par le schéma blocs-connexions de la modélisation sous BOOST. Ce montage consiste essentiellement en un capteur solaire pour le réchauffage de l'eau du ballon par le biais d'un échangeur. Des puisages ECS ont été également effectués et sont des données d'entrée pour la simulation.

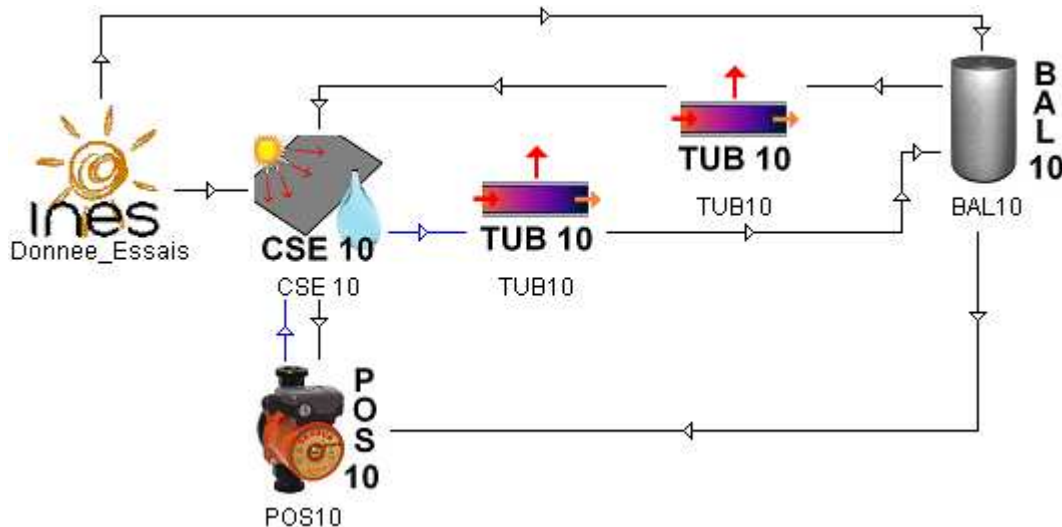


Figure 6 : schéma BOOST de l'assemblage des modules

Le module « Donnees_Essais » comporte les données des 6 jours de la séquence météo. Les deux modules TUB10 modélisent les canalisations avec déperdition thermique.

La figure 7 permet de comparer les profils de température d'entrée de l'échangeur solaire entre les essais et les simulations BOOST.

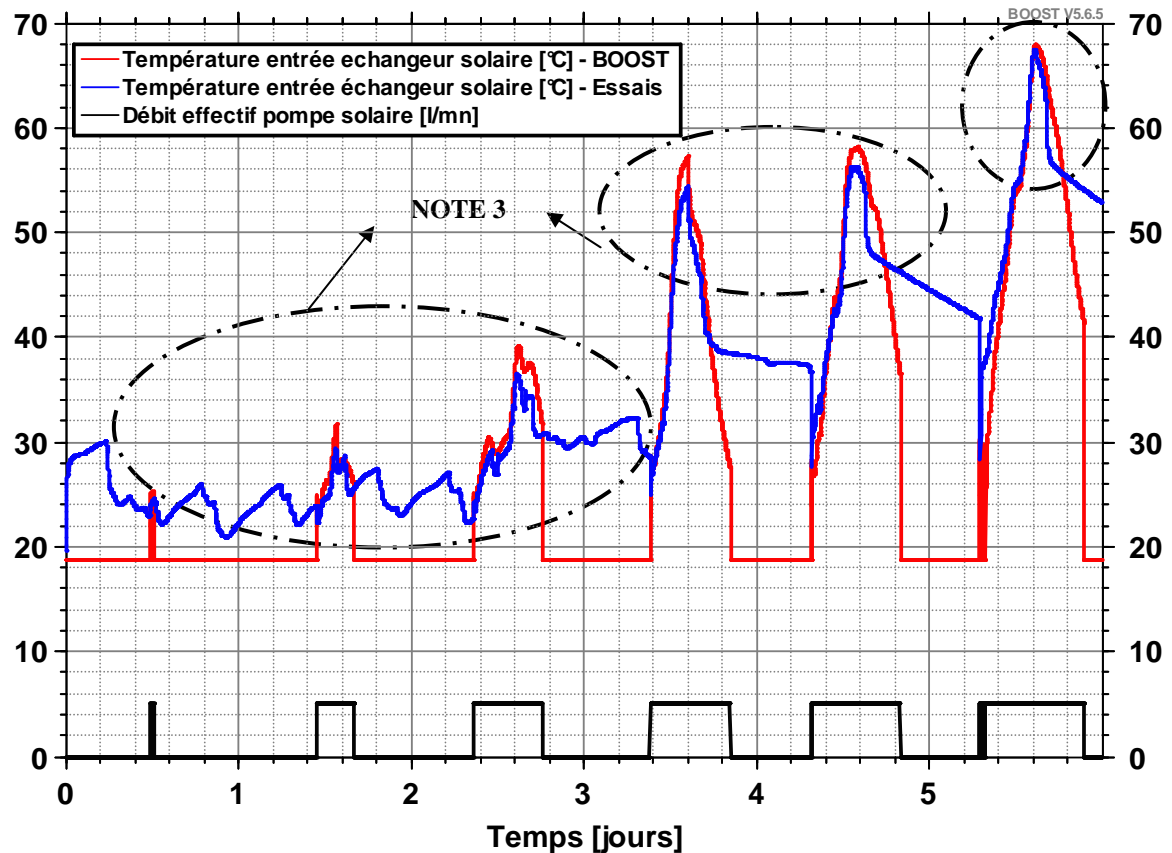


Fig. 7 : comparaison calculs/mesures sur le cas complet « ballon » + « capteur solaire »

Note 3 : les comparaisons calculs/mesures n'ont de sens que pendant les périodes de fonctionnement de la pompe solaire (courbe en noir sur la figure 7).

Le tableau 3 donne les comparaisons entre énergies mesurées au niveau de l'échangeur solaire et au niveau des puisages ECS.

	Energie cédée par l'échangeur solaire (kWh)	Energie des puisages ECS (kWh)
Mesures	28.61	34.22
Calculs	29.65	30.74
Ecart	- 3.6 %	10.2%

Tableau 3 : comparaisons des énergies entre calculs et essais

Les résultats sont globalement satisfaisants

A noter que si on ignore les pertes par les canalisations (prises en compte ici à travers les 2 modules TUB10), les écarts observés entre calculs et mesures sont bien plus importants.

5. CONCLUSION

Le développement d'un modèle de ballon ECS, implémenté dans le module « BAL10 » du logiciel BOOST, permet au CETIAT de disposer de l'un des modèles essentiels de la chaîne de production/stockage/dissipation d'eau chaude. Ce modèle a été voulu le plus complet possible et est maintenant très bien validé par rapport à l'expérimental.

Ce module de ballon « BAL10 », associé aux autres modules existants ou en cours de développement (pompe à chaleur, capteur solaire et photovoltaïque, chaudière « tout combustible », etc.), rend possible au CETIAT en 2010 la réalisation de nombreuses études pour ses ressortissants (« PAC en relève de chaudières », « simulation des systèmes solaires combinés », « simulation des chauffe-eau thermodynamiques », etc.).

6. BIBLIOGRAPHIE

- Blandin D., Krauss G., Bouia H., Riederer P et D. Caccavelli D. (2007) « Etude de la stratification dans les ballons d'eau chaude solaire », *Colloque interuniversitaire franco-québécois*, Montréal, Canada.
- Cruickshank C. A. (2009) "Evaluation of a Stratified Multi-Tank Thermal Storage for Solar Heating applications", Ph D Thesis, Queen's University, Ontario, Canada.
- Désenfant M., Fisher N., Blanquart B., Bédiat N. (2007) «Evaluation de l'incertitude en utilisant les simulations de Monte Carlo», *13ème Congrès International de Métrologie*, Lille, France
- Johannes K. (2005) "Optimisation des installations solaires collectives d'eau chaude sanitaire : application des techniques 'des faibles débits' et du 'stockage divisé'", Thèse de doctorat, Université de Savoie.
- Newton B. J. (1995), "Modeling of Solar Storage Tanks", Master's Thesis, University of Wisconsin-Madison.
- Pissavin P. (1982) "Modélisation du comportement dynamique d'un ballon de stockage solaire à échangeur interne », *Revue Générale de Thermique*, vol. n°246-247.
- TRNSYS V16, Documentation, Chapitre 5.
- Wehbe-Romitti Y. (1999) « Modélisation du comportement de ballons d'eau chaude sanitaire – validation expérimentale du logiciel », NTV 1999/229, CETIAT.
- Wehbe-Romitti Y. (2000) «Modélisation du comportement de ballons d'eau chaude sanitaire», NTV 2000/150, CETIAT