



HAL
open science

Production d'Eau chaude Solaire adaptée à la Rénovation énergétique grâce à une approche innovante de l'intégration du stockage au capteur.

Gilles Fraisse, Matthieu Cosnier, Cedric Paulus, Shihe Xin, Cédric Poyet,
Nicolas Tixier, Marc Marsano

► To cite this version:

Gilles Fraisse, Matthieu Cosnier, Cedric Paulus, Shihe Xin, Cédric Poyet, et al.. Production d'Eau chaude Solaire adaptée à la Rénovation énergétique grâce à une approche innovante de l'intégration du stockage au capteur. . [Rapport de recherche] LOCIE; CETHIL; CSTB; CEA; INES; CRESSON; TECNISUN; TECHSET. 2013. hal-00993850

HAL Id: hal-00993850

<https://hal.science/hal-00993850v1>

Submitted on 25 Jul 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Gilles Fraisse (LOCIE, responsable scientifique)
avec Matthieu Cosnier (CSTB), Cedric Paulus (CEA-INES), Shihe Xin (CETHIL),
Cédric Poyet (TECNISUN), Nicolas Tixier (CRESSON), Marc Marsano (TECHSET)

Projet ANR-09-HABISOL-012-01

RENEAUSOL

Production d'Eau chaude Solaire adaptée à la Rénovation énergétique grâce à
une approche innovante de l'intégration du stockage au capteur

Programme HABISOL 2009

| | | |
|-------|--|----|
| A.1 | Introduction | 1 |
| A.2 | Approche scientifique et technique | 2 |
| A.2.1 | Conception du prototype | 2 |
| A.2.2 | Approche théorique | 6 |
| A.2.3 | Approche expérimentale | 12 |
| A.3 | Résultats obtenus et Analyse..... | 17 |
| A.4 | Conclusion générale | 26 |

A.1 INTRODUCTION

Le secteur de la rénovation énergétique est promis à un essor important compte tenu de son fort potentiel d'économies d'énergie comparativement aux bâtiments neufs en raison du faible taux de renouvellement du parc immobilier. Si l'intégration des énergies renouvelables dans le neuf ne pose pas de problème, l'essor du solaire thermique dans le marché de la rénovation énergétique est en revanche limité par des contraintes de mise en œuvre récurrentes liées à la mise en place du stockage. C'est la raison pour laquelle, nous avons développé un concept nouveau de Capteur Solaire Intégrant le Stockage (CSIS), avec appoint séparé. La conception du CSIS est en rupture technologique avec les systèmes monoblocs traditionnels pour trois raisons. D'une part, le flux solaire est injecté en partie basse du stockage qui est entièrement isolé afin de réduire les déperditions et limiter les risques de gel. D'autre part, la cavité située à l'arrière du capteur est parallélépipédique afin de satisfaire des critères esthétiques et structurels (stockage invisible, capteur intégré au bâti). Enfin, la cavité n'est pas sous pression (échangeur sanitaire intégré).

A.2 APPROCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

A.2.1 CONCEPTION DU PROTOTYPE

- **Cahier des charges**

Dans une installation de production d'eau chaude sanitaire, le CSIS participe au chauffage partiel ou total de l'eau en provenance du réseau. Il vient s'intercaler entre l'arrivée d'eau froide du réseau et le système de production existant. Il forme un ensemble monobloc, sans appoint intégré, fonctionnant de manière passive avec passage de l'eau sanitaire dans un échangeur traversant le stockage. Le fonctionnement est simple : l'eau froide du réseau traverse le CSIS pour puiser le maximum d'énergie solaire disponible avant d'irriguer le système d'appoint pour atteindre la température de consigne souhaitée. Le cahier des charges a été réalisé à partir d'une analyse fonctionnelle. Les fonctions principales (FP) et les fonctions contraintes (FC) du CSIS sont décrites dans le tableau suivant :

| | | |
|-----------|----|--|
| FP | 1 | Produire de l'eau chaude sanitaire à partir de l'énergie solaire |
| | 2 | Fonctionner de façon passive et autonome. |
| FC | 1 | Présenter des performances énergétiques comparables aux systèmes classiques. |
| | 2 | Etre monobloc |
| | 3 | S'intégrer à l'installation hydraulique existante |
| | 4 | Poids, inclinaison et résistance mécanique de la charpente. |
| | 5 | Résister aux contraintes climatiques thermiques : gel et surchauffe |
| | 6 | Résister aux contraintes climatiques mécaniques : neige, vent, UV, grêle |
| | 7 | Contrainte visuelle architecturale, esthétique. |
| | 8 | Etre étanche à l'eau de pluie |
| | 9 | Sécurité Sanitaire. |
| | 10 | Coût du produit. |
| | 11 | Coût de mise en œuvre. Réduction grâce à une facilité de mise en œuvre. |
| | 12 | Etre compact et peu encombrant. |
| | 13 | Durée de vie. |
| | 14 | Déstockage nocturne |
| | 15 | Participer à l'isolation de l'enveloppe du bâtiment |
| | 16 | Résister à la pression du réseau pour l'échangeur |

Tableau 1 : Les fonctions principales (FP) et les fonctions contraintes (FC) du CSIS

- **Intégration structurelle et architecturale au bâti**

Le projet visant à développer des panneaux solaires thermiques principalement pour l'habitat individuel existant amène à poser la question de l'intégration architecturale des modules pour des toitures « standards ». Nous avons procédé pour cela en quatre étapes.

Etape 1 : *Etat des lieux bibliographiques et recherche de projets de référence*

Etape 2 : *Evaluation des capacités structurelles des charpentes habituelles des maisons individuelles à accepter les modules en encastrement, en semi-encastrement ou en relief, à en supporter les charges, et à envisager les problèmes de manutentions sans grutage quant à leur pose.*

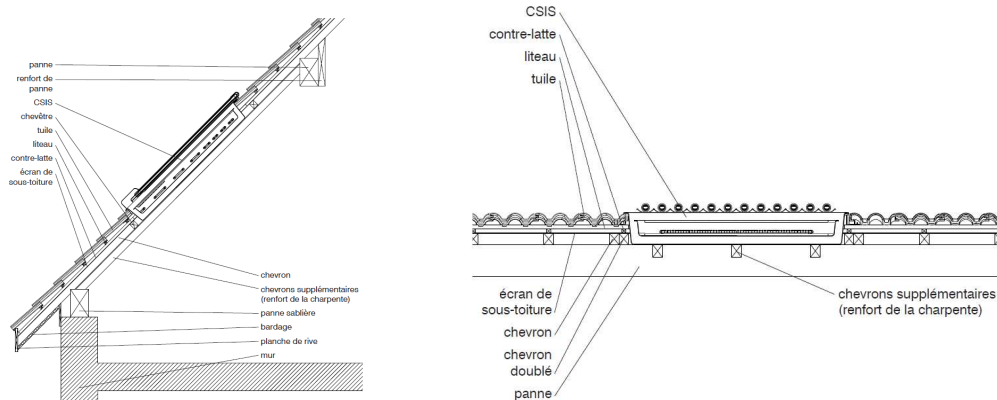


Figure 1 : Schéma de principe de renfort d'une charpente pour l'installation d'un CSIS incorporé dans l'épaisseur de la toiture

Nous avons fait appel pour cette partie à différentes entreprises de charpente et à un bureau d'étude structure bois afin d'être au plus près des situations qu'ils rencontrent fréquemment.

En résumé :

- Le poids d'un panneau (80 et 100 kg, réservoir vide) est à la limite maximum pour une pause manuelle sur toiture sans moyen de levage (grue, etc.). Il semble intéressant alors pour une mise en œuvre manuelle des panneaux de diminuer la charge en manutention par une séparation possible des éléments ou d'arriver à diminuer le poids à vide des panneaux.
- Le poids chargé d'un panneau (entre 230 et 250 kg, réservoir plein) nécessite un renfort de la charpente si celle-ci a été dimensionnée selon les normes de charge minimum ; ceci dans le cas d'une pause en surimposition autant que pour une pause intégrée en toiture. Un ensemble de schémas expliquant les renforts possibles a été réalisé. Ils montrent en coupe les principes à appliquer sur une charpente traditionnelle. Ces renforts lorsque les panneaux sont posés en encastrement ne posent aucun problème particulier.

Etape 3 : Recherche de différents aménagements et transformations possibles de la toiture pour coupler l'installation de panneaux solaires à une amélioration de l'habitabilité des volumes sous toiture.

L'idée générique est « *qu'un objet serve aussi à autre chose que ce à quoi il sert* ». La perception de cette transformation est alors perçue différemment si elle correspond à un ensemble d'éléments qui ne sont pas uniquement techniques mais touchent aussi aux usages et au contrôle des ambiances ; à savoir dans le cas d'une intervention en toiture : agrandir un espace sous toiture pour le rendre habitable, offrir une vue, améliorer les entrées solaires en hiver et s'en protéger en été, permettre une ventilation transversale et permettre une ouverture même en cas de pluie.

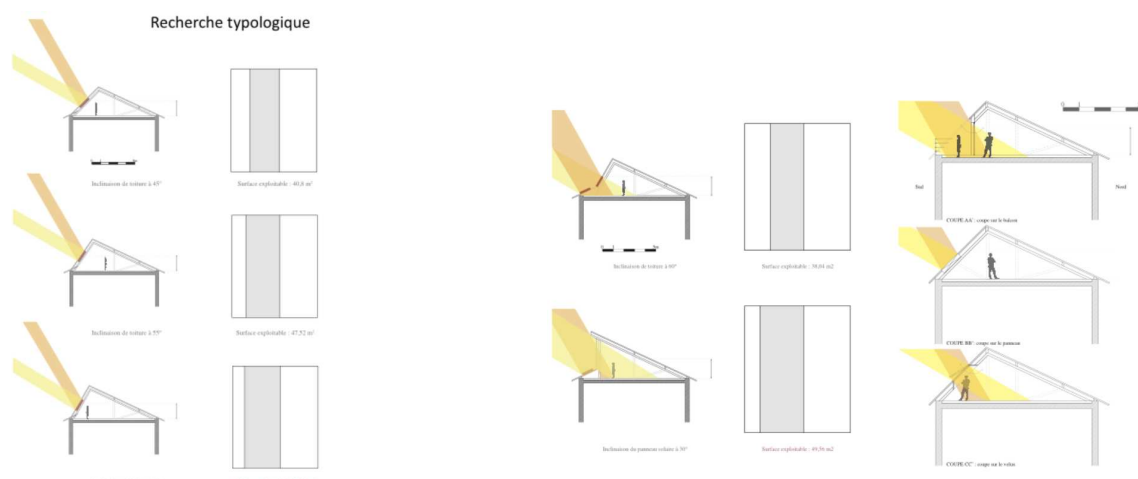


Figure 2 : Exemples de recherche typologique

Etape 4 : Simulation sur un projet existant d'une des transformations possible. Projet d'agrandissement de l'espace sous toiture offrant les qualités suivantes :

- Inclinaison des panneaux solaires plus favorable à une moyenne annuelle d'ensoleillement, grâce à une amélioration forte de la captation hivernale
- Agrandissement de l'espace sous toiture à 1m80
- Réalisation d'un mini-balcon
- Réalisation d'une ouverture de type baie vitrée permettant une vue directe sur le paysage (contrairement aux fenêtres de toit), un éclairage naturel de qualité et des apports solaires directs hivernaux importants ; tout en empêchant les entrées solaires en été grâce à la forme en dépassée de la nouvelle toiture.



Figure 3 : Situation avant et après rénovation
(nouveau volume créé et intégration du CSIS)

- **Matériaux (isolant et polymères)**

Le choix des matériaux d'isolation de la cuve s'est fait selon une étude multicritère visant à assurer le minimum de pertes thermiques, pour un poids, un encombrement et un coût minimal dans des conditions de températures élevées.

Ainsi, un travail préliminaire a permis de faire un premier choix dans les solutions envisageables initialement. Celui-ci s'est porté soit sur une isolation de 6 cm d'épaisseur à base de mousse polyuréthane rigide de conductivité thermique 22 mW/m.K (95 €), soit sur une isolation de 3 cm à base de silice placée sous un vide de 10 hPa (75€ matériaux seuls). Si cette dernière solution semble être de loin la meilleure, elle pose des problèmes en terme de durabilité puisqu'il convient alors d'être en mesure de maintenir constant ce niveau de vide. La première solution a donc été choisie.

Par la suite, des simulations numériques ont été réalisées dans le but d'évaluer les risques de gel possibles d'après les critères de la norme 12976-2 annexe C. La solution à base de PUR ne permet pas d'éviter les risques de gel pour un climat très restrictif (Pays Bas), par contre pour un climat plus doux, le gel peut être évité. L'ajout d'une couche d'un super-isolant de type mat fibreux d'aérogel permet alors de minimiser fortement ces risques pour un surcoût de 80€.

En parallèle, une évaluation expérimentale des risques de dégradations aux températures élevées sur les produits retenus a été effectuée afin de s'assurer que les principales caractéristiques (géométrie et conductivité thermique) restent constantes. Des échantillons ont été soumis à des cycles de température variant entre 23°C et 100°C. Après 138 cycles, un seul échantillon de mousse polyuréthane témoigne d'une dégradation physique : le film protecteur s'est décollé et un fort fluage est apparu. Malgré cela, sa résistance thermique n'a diminué que de 6%, un taux trop faible pour être significatif compte tenu des incertitudes de mesure.

Pour ce qui est des matériaux constituant la cuve, dans une version industrielle, un matériau polymère est certainement le plus adapté de sorte de limiter le poids du CSIS et réduire son

coût de fabrication. Une étude approfondie des différents types de procédés de fabrication existants et des matériaux disponibles sur la base de critères mécaniques, thermiques et surtout économiques a alors conduit au choix d'un **matériau polypropylène** et d'un process de fabrication de type **rotomoulage ou thermoformage**. Pour ce qui est du prototype réalisé dans le projet, le choix s'est porté sur un matériau composite permettant de réaliser des formes proches de la version industrielle sans nécessiter d'investissement lourd lié au procédé de fabrication.

- **Description du prototype**

Le prototype CSIS prévu initialement avec la société TECNISUN est composé d'une cuve de 150 litres, de dimensions 1554 x 1334 x 79mm. Il est présenté sur la figure 4.

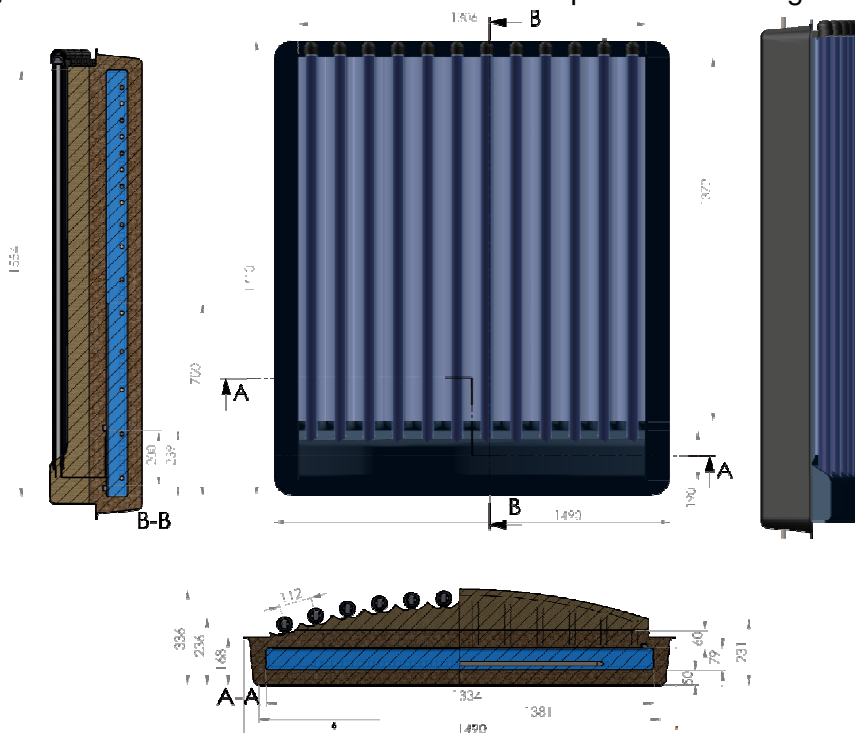


Figure 4 : Le prototype lors de sa conception

Le capteur du CSIS est composé de 12 tubes en verre sous vide de diamètre 47 mm et de longueur 1500 mm maintenus sur l'enveloppe à l'aide de bouchons de fixation. A l'intérieur de chaque tube est insérée une ailette de diamètre 33 mm et de longueur 1450 mm maintenant le tube collecteur en place. Sous l'ensemble des tubes, une plaque souple réfléchive d'une superficie d'environ 1,9 m² serait fixée au moyen d'adhésif sur l'enveloppe du CSIS. Le matriçage de l'enveloppe devra avoir une forme courbée pour favoriser l'écoulement des eaux et rediriger le rayonnement solaire sur les tubes.

Le prototype réalisé diffère légèrement suite à la liquidation judiciaire de notre partenaire industriel TECNISUN. Le CSIS est composé principalement de quatre parties :

- Le bas du CSIS comprenant le capot inférieur (résine), l'isolant et le châssis,
- La cuve à eau (résine) intégrant l'échangeur ECS, la boîte à eau (échangeur solaire), les sondes de température et la plaque de stratification (**isolée**),
- Le haut du CSIS comprenant le capot supérieur (résine), l'isolation, le capteur thermique et les deux petits modules photovoltaïques,
- Le circuit solaire comprenant le vase d'expansion, le débitmètre, la soupape de sécurité et le circuit de vidange

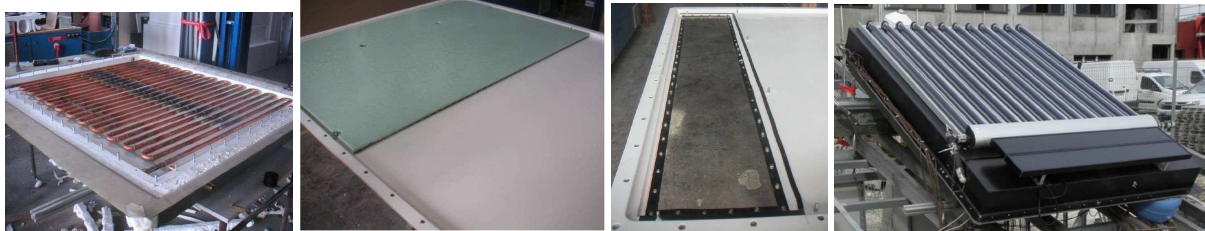


Figure 5 : Description du prototype (l'échangeur, la plaque de stratification, la boîte à eau, le prototype complet en phase de test)

A.2.2 APPROCHE THEORIQUE

• Modélisation de la cavité

Pour connaître les champs de vitesse et de température, des modèles CFD (*Computational Fluid Dynamics*) sont utilisés. Les équations de conservation résolues sont la masse, la quantité de mouvement et l'énergie. Concernant la turbulence, il existe plusieurs types de modèles et approximations numériques pour l'étude des écoulements et transferts de chaleur. Nous avons retenu les modèles RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*) qui offrent des précisions satisfaisantes pour des temps de calcul réduits.

Le logiciel utilisé pour réaliser les simulations numériques CFD est ANSYS-CFX. Ce code est basé sur la méthode des volumes finis. Dans le cas des études bidimensionnelles, le logiciel travaille avec un maillage tridimensionnel non structuré comportant un seul élément dans le plan d'étude. Nous avons essayé de nous approcher au maximum des conditions aux limites réelles du CSIS. La figure 6 met en évidence ces conditions aux limites, ainsi que les conditions initiales au démarrage de la simulation.

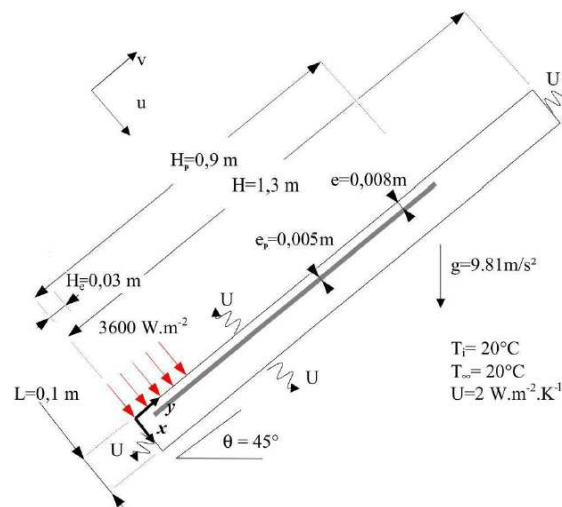


Figure 6 : Schéma de la cavité avec les conditions aux limites considérées pour les simulations numériques

Les propriétés thermiques de la plaque de stratification correspondent au plexiglas :

- Conductivité thermique : $0,19 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- Capacité thermique : $1470 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- Densité : 1119 kg/m^3

L'étude de sensibilité du maillage porte sur le suivi de la variation de certaines variables en fonction du nombre de mailles. Avec un raffinement successif du maillage, nous arrivons à un point où, même si nous continuons à raffiner le maillage, il n'y a pas de changement significatif dans les paramètres que nous avons choisis comme témoins. Dans ce cas, nous pouvons conclure que le maillage $M(n-1)$ a une capacité de réponse semblable à $M(n)$, donc le maillage $M(n-1)$ est choisi. La figure 7 a-g indique les maillages que nous avons étudiés. Pour les cas transitoires, le pas de temps est également un facteur à analyser.

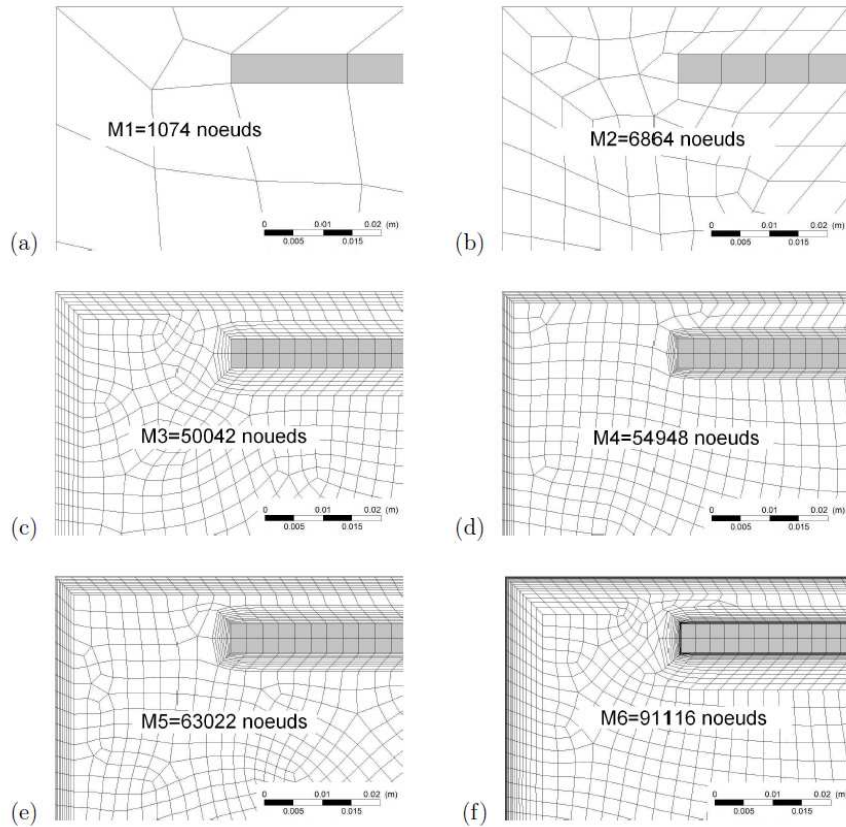


Figure 7 : Zoom à l'entrée du canal pour les différents maillages relatif à l'étude de sensibilité

Concernant le modèle numérique avec plaque et canal de 8mm, le choix du modèle de turbulence est fait en s'appuyant sur les données expérimentales (PIV) : $Ra^*_H \sim 10^{15}$ (hauteur de la cavité) et $Ra^*_m \sim 10^{11}$ (hauteur de la zone chauffée). Ces valeurs indiquent que le système se trouve entre les régimes turbulent et transitoire. Nous avons comparé trois modèles de turbulence : k- ϵ , k- ω et SST. Le modèle laminaire a été également choisi pour voir sa capacité à décrire les phénomènes dans la cavité.

- **Modélisation du caloduc capillaire**

Le fluide à utiliser doit répondre à des critères de mise en œuvre, d'acceptabilité pour un usage domestique, et rendre les contraintes sur les composants compatibles avec les matériaux disponibles. Il est donc nécessaire de comparer les fluides sur les critères de performances. Pour une étude de faisabilité nous nous limiterons à une étude préliminaire permettant d'identifier le fluide le plus favorable intrinsèquement. Une première relation permet de quantifier le rapport pression capillaire sur gravité :

$$\frac{P_c}{\Delta P_g} = \frac{2\sigma / r_{eff}}{\rho g H} \quad C = \frac{\sigma}{\rho g}$$

Une deuxième relation quantifie la pression capillaire par rapport aux pertes de pression visqueuse pour une section de mèche donnée et une puissance thermique transmise.

$$\frac{P_c}{\Delta P_{visqueux}} = \frac{2\sigma / r_{eff}}{\mu / K UL_c}$$

$$U = \frac{Pth}{\rho_l H_{vl}} S_p$$

La combinaison des relations donne un critère de mérite : $C_m = \frac{\sigma \rho_l H_{vl}}{\mu}$

Compte tenu des performances attendues, l'eau est le candidat de référence pour l'application dans une plage de température comprise entre 0 et 250°C.

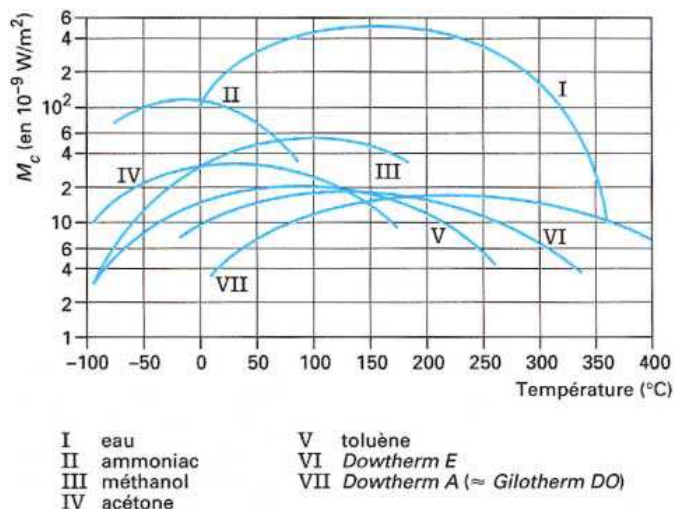


Figure 8 : Critère de mérite de fluides standards

Dans la suite, les calculs de faisabilité seront réalisés en prenant l'eau. La condition mécanique de fonctionnement du caloduc d'un point de vue hydraulique est :

$$Pc > \rho_l gL \sin(\Theta) + \int_0^L \frac{\mu_l}{K} U(h) dh + \int_0^L \frac{dp_v}{dh} dh$$

La relation liant la perte de pression liée au déplacement du fluide dans un poreux est :

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{A(1-\varepsilon)^2 U \mu}{\varepsilon^3 d^2} + \frac{B(1-\varepsilon) U \rho}{\varepsilon^3 d}$$

Les coefficients A et B dépendent de la topologie du milieu poreux. Le premier terme traduit les effets visqueux alors que le second traduit les effets inertiels. Dans notre cas, avec de l'eau comme fluide caloporteur et pour une taille de pore de quelque μm , seul le terme visqueux est à prendre en compte. Dans ce cas, la perméabilité du poreux est :

$$K = \frac{1}{A} \frac{\varepsilon^3 d^2}{(1-\varepsilon)^2}$$

Pour vaincre la gravité dans les conditions énoncées avec de l'eau sans transfert d'énergie donc sans perte de charge dans le capillaire, la gamme de diamètre de pore obtenue est $12\mu m < r_{eff} < 40\mu m$. Lorsque la perte de charge est prise en compte, le diamètre de pore décroît. La porosité ε est un facteur primordial pour obtenir un milieu poreux adapté car il joue un rôle déterminant sur la perméabilité du matériau. Des calculs réalisés (Tableau 2) avec un $r_{eff} = 10\mu m$ permettent de déterminer la gamme de porosité répondant aux besoins pour diverses conditions de fonctionnement dans la gamme spécifiée. Le calcul est fait pour un caloduc de 16mm de rayon extérieur de mèche et un canal vapeur de 10mm, ce qui conduit à une vitesse vapeur max autour de 1m/s. Les conditions thermiques ne sont pas prises en compte, le caloduc est considéré comme étant uniformément à 100°C.

| 'Longueur / puissance | 0,95m / 98W | | 1,05m / 109W | | 1,15m / 119W | | 1,25m / 129W | | 1,35m / 140W | | 1,45m / 150W | |
|-----------------------|------------------|-----|------------------|-----|------------------|-----|------------------|-----|------------------|-----|------------------|-----|
| Inclinaison en degrés | K m ² | ε | K m ² | ε | K m ² | ε | K m ² | ε | K m ² | ε | K m ² | ε |
| 15 | 5,8E-12 | 66% | 8,0E-12 | 69% | 1,1E-11 | 72% | 1,4E-11 | 75% | 1,9E-11 | 77% | 2,4E-11 | 79% |
| 30 | 7,6E-12 | 69% | 1,1E-11 | 72% | 1,6E-11 | 75% | 2,2E-11 | 78% | 3,0E-11 | 80% | 4,1E-11 | 83% |
| 45 | 1,0E-11 | 72% | 1,6E-11 | 76% | 2,5E-11 | 79% | 4,0E-11 | 82% | 6,5E-11 | 85% | 1,1E-10 | 88% |

Tableau 2 : Porosité et perméabilité requises en fonction de l'inclinaison et de la longueur

Ce tableau est destiné à cerner les gammes de porosité et de perméabilité qu'il faut viser pour la mèche d'un caloduc. On constate que les porosités sont très importantes, même pour les cas favorables et que le matériau qui doit constituer la mèche capillaire doit avoir des caractéristiques très contraignantes. Différents types de poreux sont utilisés dans les caloducs pour constituer les mèches capillaires. Nous avons recherché dans plusieurs types de poreux (frittés, mousses, toiles) des solutions satisfaisants les spécifications requises sans trouver de solutions.

- **Modélisation de l'échange relatif au circuit d'eau chaude sanitaire**

Un outil de calcul de la température de sortie d'eau chaude sanitaire (ECS) de la cuve a été développé pour évaluer les différentes répartitions de tubes et calculer la température d'ECS pour les cycles 2 et 3 du mandat Européen. Le modèle permet de prendre en compte un apport solaire dans la journée mais, ne sachant pas comment distribuer cet apport en termes de températures dans la cuve, il n'a pas été fait de calcul avec cette option.

Les caractéristiques de la cuve sont les suivantes : 1.26m (hauteur), 1.45m (largeur) et 0.08m (profondeur). L'échangeur ECS est constitué de 18 tubes de diamètre 20mm traversant horizontalement la cuve, soit une longueur d'échange de 18 x 1.45m.

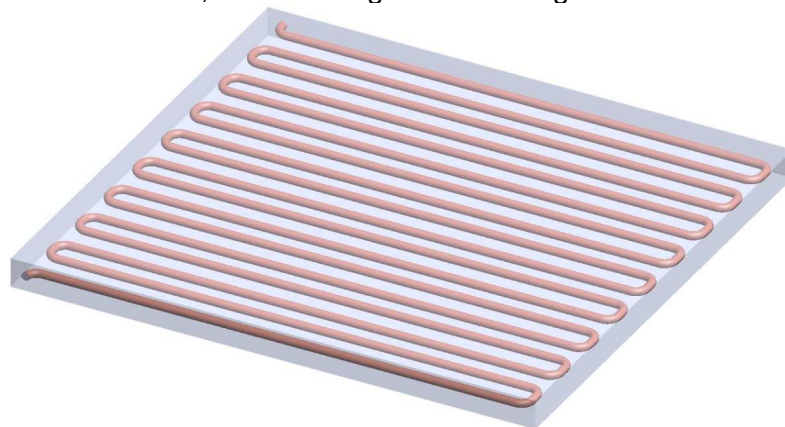


Figure 9 : L'échangeur ECS au sein de la cuve.

Pour le calcul de l'échange entre les tubes et l'eau en convection naturelle, le coefficient d'échange $h_{cuve/tube} = 500 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ a été considéré par simplification. Ce coefficient d'échange a été obtenu par calcul CFD avec le logiciel Flow Simulation dans la configuration du dispositif. Le résultat obtenu a été comparé et s'avère proche de celui obtenu avec la corrélation de Churchill & Chu qui est basée sur des essais dans une configuration proche de celle qui nous occupe :

$$Nu = \left[0.60 + 0.387 \left\{ \frac{Ra}{\left[1 + (0.559 / Pr)^{9/16} \right]^{6/9}} \right\}^{1/6} \right]$$

Le coefficient d'échange à l'intérieur du tube est donné par la corrélation de Colburn :

$$Nu_{tube/ecs} = 0.0243 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

- **Modélisation de l'échangeur capteur / cuve**

Le transfert thermique entre le circuit du capteur solaire et la cuve de stockage se fait par une boîte à eau munie de chicanes.



Figure 10 : L'échangeur capteur / cuve (boîte à eau)

Les caractéristiques de l'échangeur : largeur (0.192m), longueur (1.24m), hauteur (0.5cm), 9 passages, 1 circuit, section de passage ($8.44 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$), Volume (0,94litre), Diamètre hydraulique ($7.71 \cdot 10^{-3} \text{ m}$), vitesse : 0.20m/s, Reynolds (4386)

La corrélation de Gnielinski est utilisée pour le nombre de Nusselt. L'impact de la longueur droite des canaux est pris en compte par un facteur multiplicatif.

$$Nu = 0.012(Re^{0.87} - 280) Pr^{0.4} \left(1 + \frac{di}{L}\right)^{0.66}$$

Le calcul de dimensionnement de l'échangeur part de l'hypothèse que la mise en place de la convection naturelle dans la lame d'eau circulant sur la face de l'échangeur coté cuve est effective.

- **Modélisation du prototype**

Un modèle simplifié du CSIS a été développé sous TRNSYS à partir du schéma de principe du CSIS :

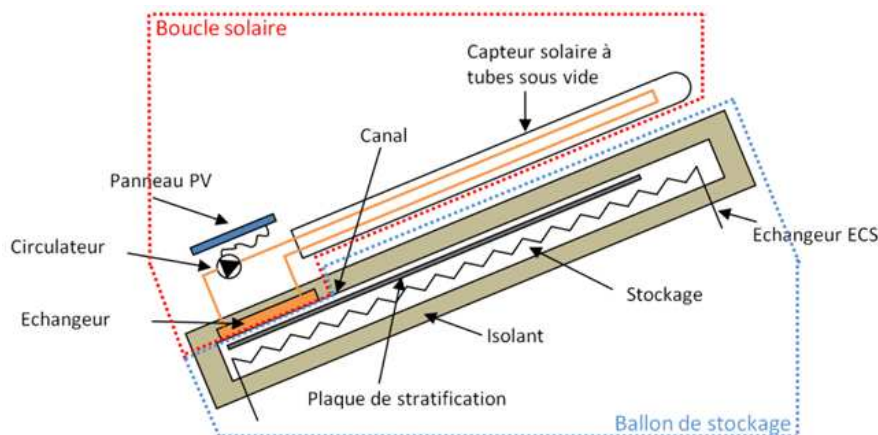


Figure 11 : Schéma de principe du CSIS

Le CSIS regroupe plusieurs composants qui sont modélisés. Certains modèles sont disponibles dans la bibliothèque TRNSYS.

- Capteur solaire à tube sous-vide

Le modèle de capteur solaire utilisé est basé sur le modèle détaillé dans la norme NF EN 12975-2. Il correspond au type 832.

- Echangeur solaire

L'échangeur solaire est réalisé à partir d'une boîte à eau dont la surface inférieure est en contact avec le stockage. Le fluide solaire circule à travers la boîte à eau équipée de chicanes. Les équations permettant de modéliser l'échangeur solaire sont les suivantes :

$$P_{ech_solaire} = UA \cdot \left(\frac{T_{ech_ch} + T_{ech_fr}}{2} - T_{stock_bas} \right)$$

$$P_{ech_solaire} = \dot{m}_{ech_sol} \cdot c_{p_fl} \cdot (T_{ech_ch} - T_{ech_fr})$$

- Stockage et échangeur ECS

Le stockage développé est basé sur le type 541 de la librairie TESS. Il a été modifié afin de correspondre à notre configuration avec plaque. La première étape permettant d'adapter ce modèle a été de permettre l'utilisation des deux types de soutirage (direct et indirect). L'idée est de coupler le type-541 modifié à un modèle analytique de canal. La figure 12 représente la cavité avec la plaque, où nous pouvons observer le sens de circulation du fluide, l'arrivée du flux de chaleur concentré en partie basse et l'isolant présent tout autour de la cavité. Concernant le type-541 modifié, nous pouvons observer que le modèle de canal sera couplé de manière externe au type-541, en définissant un type spécifique pour le canal.

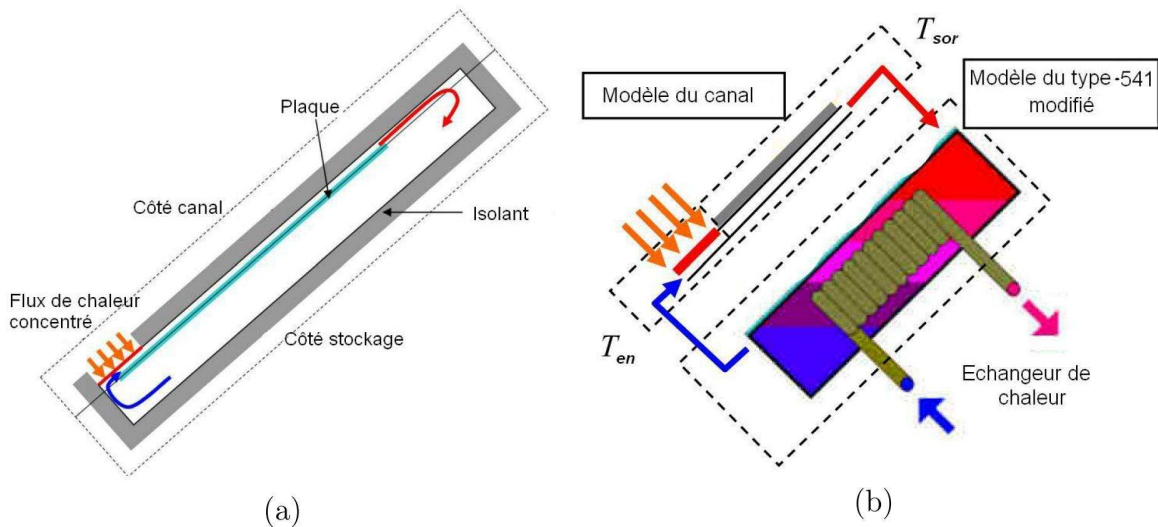


Figure 12 : (a) Schéma de la cavité avec la plaque de stratification. (b) Schéma du type-541 modifié couplé au canal.

- Canal et plaque de stratification

Le canal est divisé en deux régions. La première région, située en partie basse, constitue la zone chauffée, avec une hauteur de 0.2m ; la deuxième région, située en partie haute, est la zone de refroidissement, avec une hauteur 0.7m. La zone chauffée est constituée d'un apport de chaleur sur la face supérieure, et elle échange avec le stockage dans la partie inférieure. La zone de refroidissement échange avec l'environnement sur la face supérieure et avec le stockage sur la face inférieure.

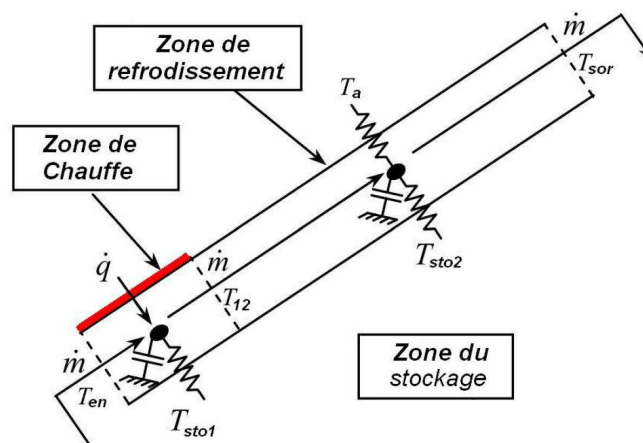


Figure 13 : Schéma électrique équivalent du canal

- o Gestion au fil du soleil

Sachant que la solution caloduc n'était pas envisageable, et pour garder l'idée du système autonome, le débit dans le circuit solaire est généré à partir d'un circulateur couplé directement à un petit panneau photovoltaïque. Le débit solaire est donc directement fonction de l'ensoleillement.

$$\begin{array}{ll} \dot{m}_{ech_sol} = 0 & \text{si } G < G_{seuil_bas} \\ \dot{m}_{ech_sol} = f(G) & \text{si } G_{seuil_bas} < G < G_{seuil_haut} \\ \dot{m}_{ech_sol} = \dot{m}_{sol_max} & \text{si } G > G_{seuil_haut} \end{array}$$

Nous pouvons approcher la fonction du débit entre les deux seuils ($\text{Débit} = f(G)$) :

$$\text{Débit} = a(G)^3 + b(G)^2 + c(G) + d$$

- **Approche réglementaire de la modélisation**

Parallèlement au modèle analogique global, un modèle très simplifié du CSIS a été développé. Il peut servir de base de départ pour une intégration dans les futures réglementations thermiques (pour l'instant les CSIS sont exclus de la RT 2012) et/ou pour l'utilisation dans des logiciels de dimensionnement. L'approche adoptée reprend celle de la méthode de calcul TH-BCE de la RT2012. Elle est basée sur une approche « orientée objet » dont le principe est de décrire chaque composant en termes de paramètres, d'entrées, et de sorties.

A.2.3 APPROCHE EXPERIMENTALE

- **Expérimentation PIV de la cavité**

La cavité étudiée possède les dimensions suivantes : 1,3m de hauteur, 0,3m de largeur et 0,1m d'épaisseur. La zone de chauffage est située en partie basse de la paroi supérieure et sa hauteur est de 0,2 m. Elle possède deux parois latérales considérées comme quasi adiabatiques. Une d'entre elles n'est pas pourvue de sondes de température car elle fonctionne comme une fenêtre optique pour la PIV (en anglais *Particle Image Velocimetry*). La deuxième sert de support pour les sondes de température dans la cavité, ainsi que pour le placement des sondes de température de surface pour la mesure des flux dans la paroi.

Des thermocouples sont positionnés dans la cavité centrale de mesure (figure 14) ; les deux autres étant des cavités de garde. Le système de chauffage de la cavité situé en partie basse est composé de deux plaques en acier inox de 0.2*0.6m, trois chaufferettes de 0.2*0.2m, deux fluxmètres de 0.1*0.1m et trois thermocouples. Les thermocouples donnent une mesure moyenne de la température de la plaque. Ils servent également d'indicateur pour le système de sécurité, car les chaufferettes présentent une contrainte de température : elles ne peuvent pas dépasser les 100°C. En connaissant les résistances des chaufferettes et la puissance injectée par la source électrique, et afin de mesurer le flux injecté dans la cavité, les deux fluxmètres ont été placés dans la partie arrière du système de chauffage permettant ainsi de mesurer le flux perdu.

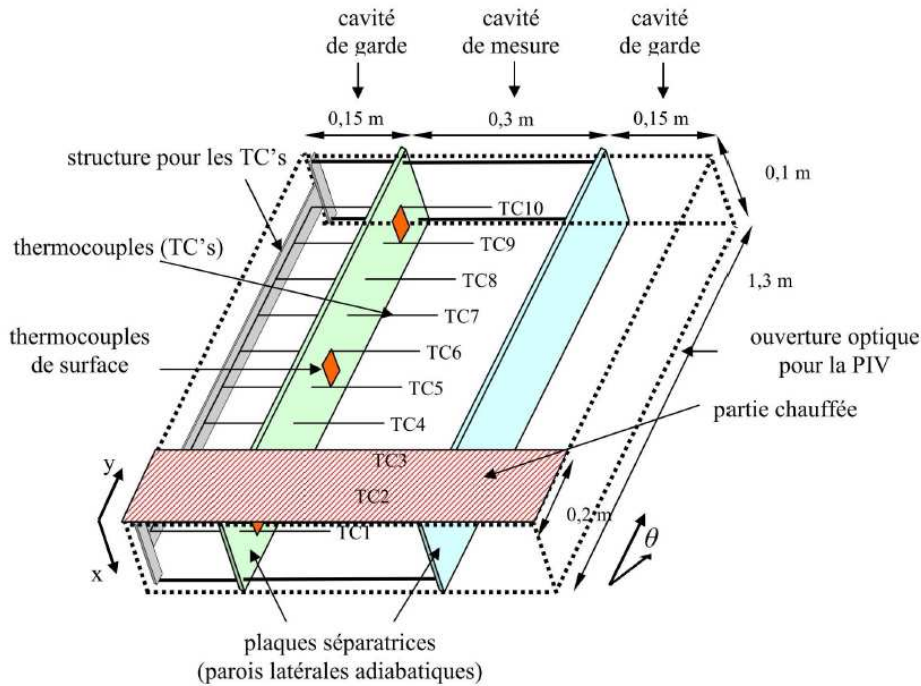


Figure 14 : Schéma du positionnement des sondes de température au sein des cavités

Rempli d'eau à pression atmosphérique, le dispositif expérimental peut pivoter à l'horizontal, permettant de faire varier l'angle d'inclinaison. Au cours de nos expériences, la cavité a été inclinée à 30°, 45° et 60° par rapport à l'axe horizontal. L'isolation des parois supérieure et inférieure des cavités a été faite avec du polystyrène extrudé d'une épaisseur de 50mm. Dans ce cas, nous avons une condition du troisième type, c'est-à-dire dans laquelle un coefficient d'échange est imposé entre la paroi et l'environnement extérieur à température constante. Nous avons une source chaude capable de fournir une densité de flux constant dont les valeurs ont été fixées à 1800W.m⁻², 3600W.m⁻² et 5400W.m⁻², ce qui donne les cas suivants (tableau 3) :

| Densité de flux (W.m ⁻²) | Angles d'inclinaison (θ) | | |
|--------------------------------------|--------------------------|--------|--------|
| | 30° | 45° | 60° |
| 1800 | A30P18 | A45P18 | A60P18 |
| 3600 | A30P36 | A45P36 | A60P36 |
| 5400 | A30P54 | A45P54 | A60P54 |

Tableau 3 : Les différents cas expérimentaux étudiés

La PIV a comme principe général l'éclairage d'un plan avec une nappe laser pulsée sur une durée très courte afin de capturer deux images successives de particules. Avec l'ensemencement du fluide, les traceurs diffusent la lumière qui est à son tour enregistrée par le capteur de la camera, du type CCD (*Charge-Coupled Device*) dans notre cas. L'analyse de ces images est basée sur une grille avec des fenêtres d'interrogation. Par des corrélations mathématiques appliquées à ces fenêtres, il est possible de calculer le déplacement moyen des particules. Le champ vectoriel est ensuite basé sur ces fenêtres, où chacune représente un vecteur.

Nous avons utilisé des centrales d'acquisition (AOIP-SA32), et une source d'alimentation (Agilent-N5771A). Pour les sondes de température à l'intérieur de la cavité, la précision de la mesure est de l'ordre de +/- 0,2°C. Les sondes de températures utilisées dans l'expérience sont des thermocouples de type K. Pour la mesure de température dans le plan central de la cavité, celui de la nappe laser, nous avons utilisé 10 sondes du fabricant Omega (TJ300-CPSS-IM050U-300). Ces sondes possèdent une tige de 300mm de longueur et 0,5mm de diamètre. Les sondes utilisent une des parois latérales pour leur positionnement au sein de la cavité.

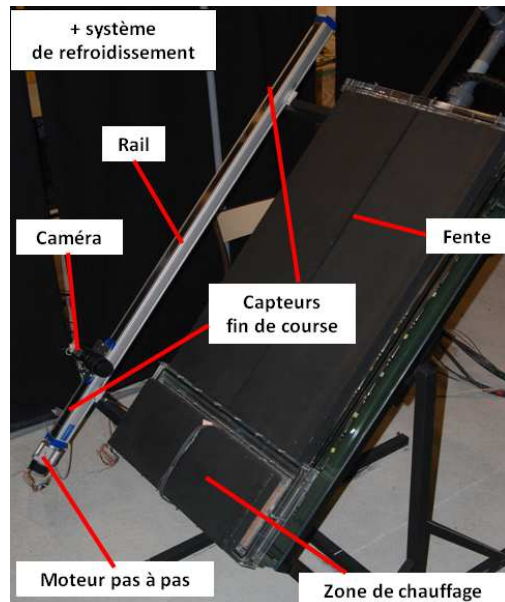
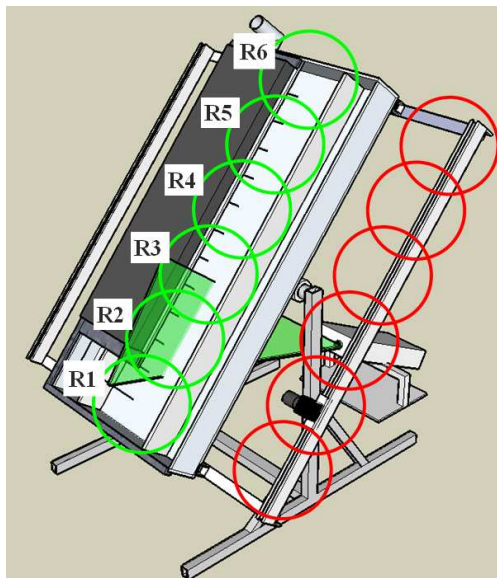


Figure 15 : Schéma des différentes positions du laser et de la caméra + photo du dispositif

• Caloducs

La solution caloduc à capillaire s'étant révélée non faisable, nous avons proposé d'étudier une solution utilisant un caloduc pulsé. Ce type de caloduc réalise un écoulement de liquide et de vapeur sous forme de bouchons dans un tube capillaire (figure 16). Le tube, constituant plusieurs boucles continues, couple une zone d'évaporation et une zone de condensation. La chaleur est transférée par les oscillations du fluide de travail selon la direction axiale ; ces oscillations étant créées par de rapides fluctuations de pression dues à la génération de bulles de vapeur dans la zone d'évaporation et à leur collapse dans la zone de condensation. Le fonctionnement est omnidirectionnel. Les caloducs pulsés peuvent dans certaines conditions fonctionner contre la gravité comme nous le souhaitons dans le projet RénEauSol, c'est-à-dire avec la zone évaporateur au-dessus de la zone condenseur.

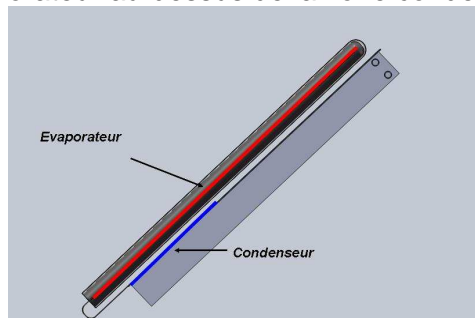
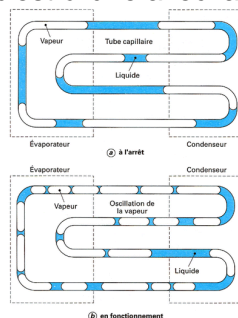


Figure 16 : Schéma d'un caloduc pulsé, configuration d'un caloduc pulsé

Dans le projet RénEauSol, la partie évaporateur des PHP sera insérée dans les tubes en verre, la partie condenseur sera soit sur le même plan, soit repliée, afin de minimiser la remontée capillaire, et améliorer l'intégration du dispositif avec le réservoir. La modélisation de ce type de caloduc étant très complexe, et pour le moment irréalisable, nous avons choisi une approche principalement expérimentale afin de valider ou non ce concept. Pour ce faire, nous avons développé un banc d'essai à échelle 1 (figure 17).

Nous avons fait varier plusieurs paramètres afin de vérifier le bon fonctionnement et les performances du caloduc pulsé : diamètre interne du capillaire (1,25/2 et 3mm), fluide (eau pure et n-heptane), puissance de chauffe (cordons chauffants électriques de 0 à 6kW), inclinaison et température du condenseur. Des capteurs de puissance sur les cordons chauffants, et de débit et température d'eau condenseur permettent d'accéder aux bilans de puissance injectée et récupérée sur le système. Des thermocouples permettent de vérifier l'homogénéité de température du caloduc.

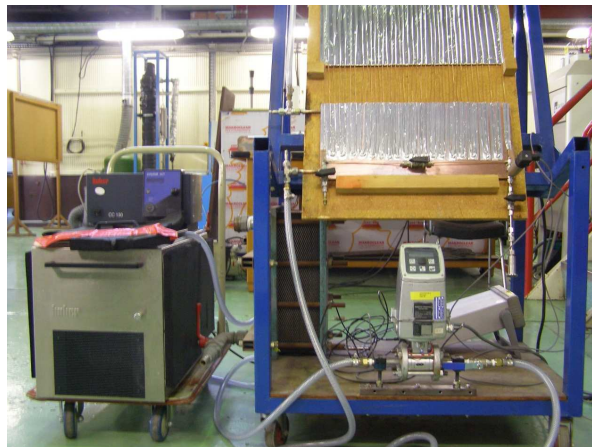
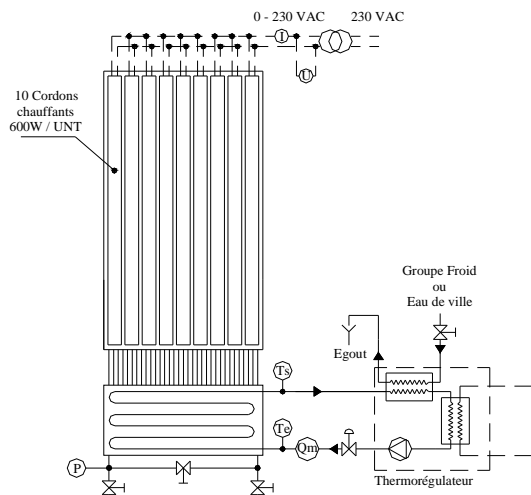


Figure 17 : Schéma du banc caloduc pulsé, et photo du banc caloduc pulsé

• Tests du CSIS Prototype

Le prototype de CSIS développé a été testé sur la plateforme d'essai du CEA INES afin de déterminer ses performances, de valider les choix effectués et d'alimenter les modèles développés. Plusieurs types d'essais ont été réalisés. Une première campagne a été réalisée en environnement artificiel grâce à l'utilisation d'un banc d'ensoleillement artificiel et d'un banc d'essai hydraulique. Les objectifs de ces essais sont de déterminer :

- les caractéristiques de la décharge du CSIS par l'échangeur ECS,
- les caractéristiques de la charge du CSIS par la récupération d'énergie solaire du capteur solaire, l'échange à l'eau de stockage et la stratification de la plaque,
- les performances thermiques globales du CSIS à partir de séquences d'essais issus de la norme ISO 9459-5.

La seconde campagne a pour objectif de tester la résistance du CSIS à des conditions « extrêmes » de fonctionnement. Les essais sont réalisés en environnement naturel. Les objectifs de ces essais sont de déterminer :

- la résistance du CSIS au phénomène de surchauffe estivale,
- la résistance du CSIS au gel.

○ Essai en environnement artificiel

Le prototype a été installé dans un premier temps sur le banc d'ensoleillement artificiel permettant de reproduire l'ensoleillement. Le couplage au banc d'essai hydraulique permet de reproduire les puisages d'eau chaude sanitaire.

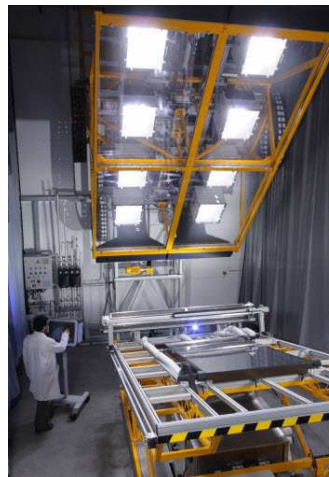


Figure 18 : Banc d'essai hydraulique et banc d'ensoleillement artificiel

Le banc d'essai hydraulique est composé de deux modules de 25 kW permettant de charger et décharger le stockage. Les modules hydrauliques permettent de réguler en dynamique la température (-10°C à +180°C) et le débit (60 kg/h à 2000 kg/h). Le banc d'ensoleillement artificiel permet de tester des capteurs solaires. Les caractéristiques sont les suivantes :

- Dimensions d'essai maxi du capteur : 2m x 3m (largeur x hauteur)
- 8 lampes reproduisant un spectre très proche de celui du soleil, incluant un ciel froid
- Inclinaison : 0° à 90°
- Puissance ensoleillement : 500 à 1100 W/m²

Le schéma de principe du montage est le suivant :

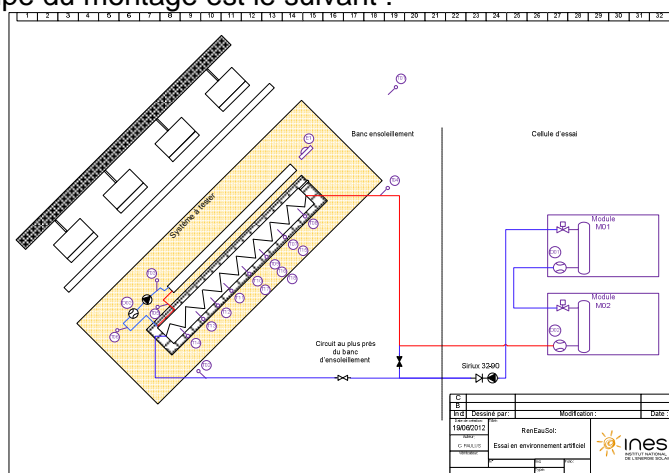


Figure 19 : Schéma de principe du montage en environnement artificiel

o Essai en environnement naturel

Le prototype du CSIS est installé sur la plateforme d'essai en ensoleillement naturel du CEA INES et monté sur un châssis inclinable. L'essai consiste à laisser le prototype en environnement naturel sans effectuer de puisages d'ECS afin de tester son comportement en période de fort ensoleillement d'une part (tenue en surchauffe), et en période de froid intense (tenue au gel). La photo suivante montre le prototype sur son support, l'armoire électrique avec le système d'acquisition ainsi que le pyranomètre pour la mesure de l'ensoleillement.



Figure 20 : Le prototype installé en environnement extérieur

A.3 RESULTATS OBTENUS ET ANALYSE

Dans un premier temps nous avons validé le modèle numérique CFD avec les résultats obtenus expérimentalement (PIV). Nous avons ensuite réalisé une étude paramétrique afin de définir les conditions permettant d'obtenir une stratification satisfaisante au cours de la charge. Enfin, un modèle global du CSIS a été réalisé avec l'analogie électrique. Il nous a permis d'évaluer les performances annuelles du CSIS.

- **Etude expérimentale (PIV)**

Nous avons étudié expérimentalement une cavité de grand rapport de forme ($H/ep=13$), inclinée selon trois angles différents (30° , 45° et 60°) et chauffée en partie basse avec trois valeurs de densité de flux imposée (1800 , 3600 et 5400 W.m^{-2}). L'expérience se déroule dans des conditions transitoires et nous avons limité la durée de mesure à 4h.

- La cavité sans plaque de stratification :

Nous avons montré que le comportement de la couche limite le long de la zone chauffée peut être considéré en régime permanent. Une corrélation corrigée pour le profil de vitesse de la couche limite a été proposée. Elle a été validée sachant qu'elle mérite des études plus approfondies pour être généralisable (prise en compte du rapport de forme de la cavité).

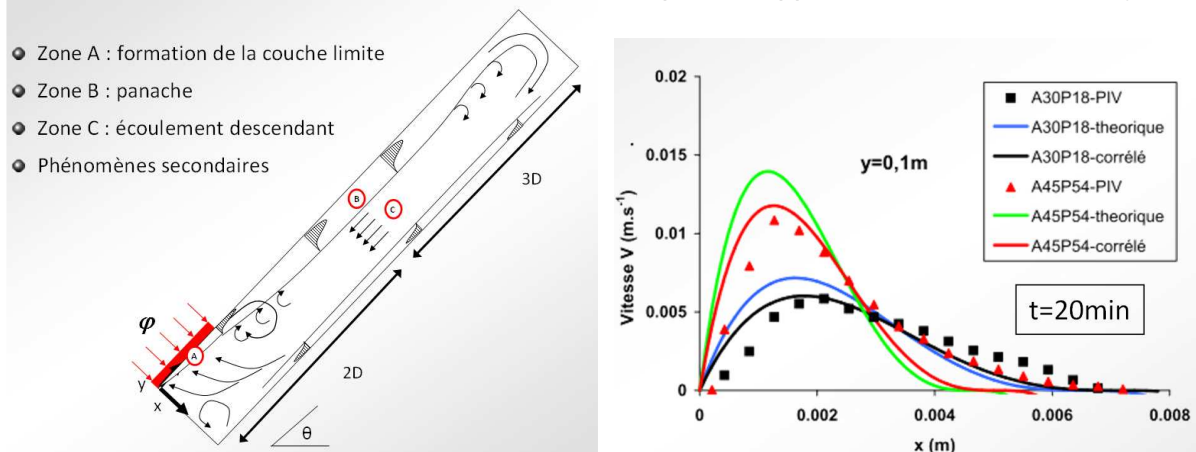


Figure 21 : Les différents phénomènes observés au sein de la cavité (figure de gauche) et les profils de vitesse liés à la couche limite au niveau de la zone chauffée (comparaison expérimentation et théorie sans/avec correction)

De manière globale, la cavité a présenté une zone bidimensionnelle en partie basse et tridimensionnelle en partie haute. La taille de la zone tridimensionnelle dépend du nombre de Rayleigh et augmente au cours du temps. Quant au panache, il est bien visible en partie basse mais est perturbé par l'écoulement descendant. La figure 22 montre les bilans massiques sans (écoulement 3D au dessus de la région R3) et avec plaque de stratification (écoulement 2D).

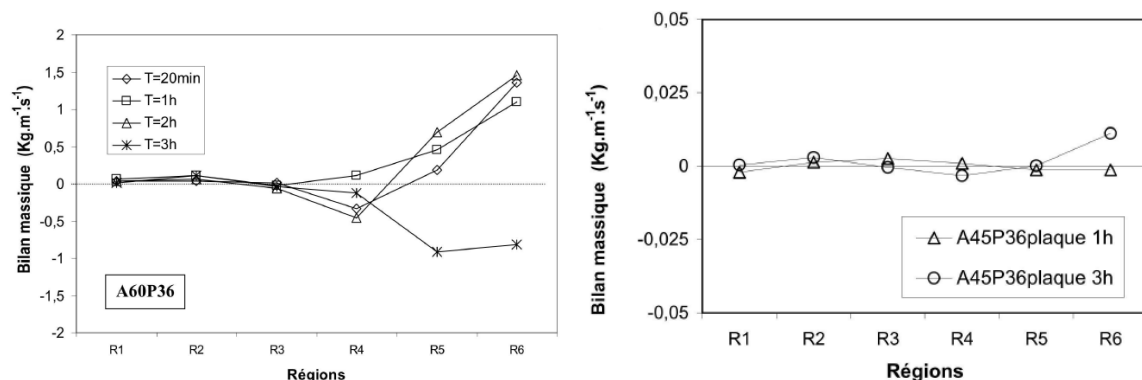


Figure 22 : Bilan massique dans la direction y, au centre de chaque région de mesure (sans et avec plaque de stratification)

L'évolution de la température dans la cavité est linéaire dans le temps. Le facteur de stratification dans la cavité n'est pas satisfaisant (moyenne de l'ordre de 0.18) et les meilleurs résultats ont été obtenus à une inclinaison de 30°. Pour A30P18, le facteur de stratification moyen est de 0,39 et le ΔT maximum dans la cavité est de 2,7°C. Ces résultats nous prouvent le besoin d'un dispositif favorisant la stratification au sein de la cavité.

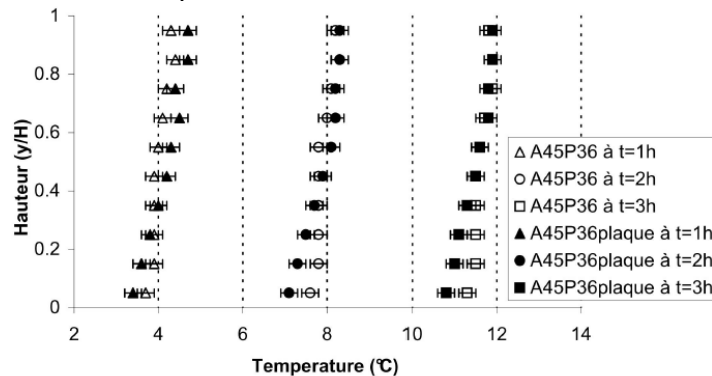


Figure 23 : Faible stratification au sein de la cavité sans/avec plaque (différence de température $T_i - T_{initial}$ au sein de la cavité pour les cas A45P36 et A45P36plaque)

o La cavité avec plaque de stratification :

Nous avons étudié une plaque de stratification pour un cas où l'angle était de 45° et la puissance injectée de 3600 W/m². Si la plaque n'a pas provoqué de perte de charge importante pour réduire la vitesse et ainsi améliorer la stratification (nombre de Richardson plus élevé), le simple fait qu'elle sépare l'écoulement ascendant de celui descendant a permis l'augmentation de la zone bidimensionnelle. Cette diminution de la zone tridimensionnelle nous a permis d'envisager un modèle numérique bidimensionnel pour l'étude détaillée de la plaque de stratification.

• **Etude numérique de la plaque de stratification (CFD)**

Nous avons testé trois modèles de turbulence RANS et le modèle Laminaire, avec 6 maillages de différentes résolutions. De manière générale, les modèles ont donné des bons résultats par rapport à l'expérimentation PIV, en ce qui concerne la distribution de température au sein de la cavité ainsi que pour l'énergie cumulée.

Les modèles ont présenté des différences significatives quant au calcul de la vitesse au sein du canal, surtout entre le modèle laminaire et les autres. Pour la représentation du panache, le modèle laminaire ne s'est pas montré suffisamment précis pour décrire les structures au sein de la cavité.

Le modèle k- ω a présenté une bonne description des phénomènes proches des parois, mais les structures au centre de la cavité, principalement en sortie du canal, n'ont pas été bien décrites en comparaison à l'évolution du panache en sortie de canal et aux valeurs de vorticités. Le modèle SST a été le plus performant par rapport aux différents paramètres étudiés. La couche froide de la paroi basse de la cavité, x=0,1m n'a été prévue par aucun des modèles.

Afin de diminuer les vitesses au sein de la cavité, nous avons créé une perte de charge linéaire au niveau de la plaque de stratification, avec la diminution de l'épaisseur du canal. L'intérêt de l'augmentation de la perte de charge est limité par le transfert thermique entre le canal et la cavité, car avec l'augmentation de la température du canal, la couche limite entre la plaque et la cavité devient importante jusqu'à brasser le fluide au sein de la cavité, comme s'il n'y avait pas de plaque.

Une isolation de la plaque a été étudiée afin de diminuer cet effet. Le facteur de stratification a un optimum pour chaque épaisseur de canal à différentes conductivités thermiques de

plaque. Dans nos cas, l'optimum est atteint pour une épaisseur de 2mm. En ce qui concerne la différence de température maximale au sein de la cavité, nous avons réussi à avoir des différences de l'ordre de 10 °C, avec une épaisseur de thermocline de l'ordre de 0,2m pour un canal de 1mm. Nous avons vu que cette amélioration dans la cavité est suivie d'une augmentation des pertes vers l'extérieur et de l'augmentation de la température de la plaque chaude. L'étude globale du système doit permettre de savoir si l'augmentation des pertes vers l'extérieur et la diminution du rendement du capteur va être compensée par l'amélioration thermique liée à la stratification de la cavité.

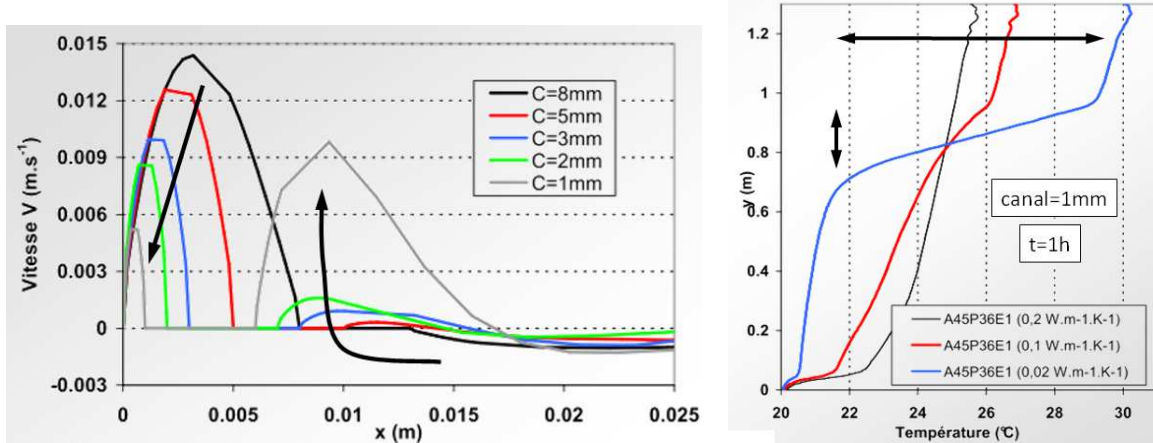


Figure 24 : Influence de l'épaisseur de canal lié à la plaque de stratification et de l'isolation thermique de la plaque

Pour l'étude du système global, nous avons considéré la présence d'un échangeur. Les simulations CFX montrent que la perte de charge engendrée par ce dernier ne représente pas de changement significatif sur la distribution de température.

- **Modélisation globale (analogie électrique)**

Nous avons modélisé et validé un modèle analogique par la modification d'un modèle déjà existant, le type-541 du logiciel TRNSYS.

- Canal divisé en deux zones

- zone chauffée
- zone de refroidissement

- Thermodiode

- Equations

- pertes de charges

$$\Delta P_{en} + \Delta P_{ca} + \Delta P_{sor} = \Delta P_{sto}$$

- bilan global

$$C_{ca1} \frac{dT_{ca1}}{dt} = \dot{q} A_{ca1} + \dot{m} c_{pen} (T_{en} - T_{12}) + U_{ca1/sto1} A_{ca1} (T_{sto1} - T_{ca1})$$

$$C_{ca2} \frac{dT_{ca2}}{dt} = \dot{m} c_{p12} (T_{12} - T_{sor}) + U_{ca2/Ta} A_{ca2} (T_a - T_{ca2}) + U_{ca2/sto2} A_{ca2} (T_{sto2} - T_{ca2})$$

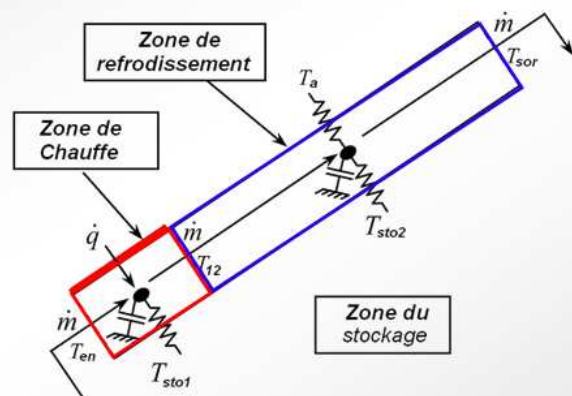
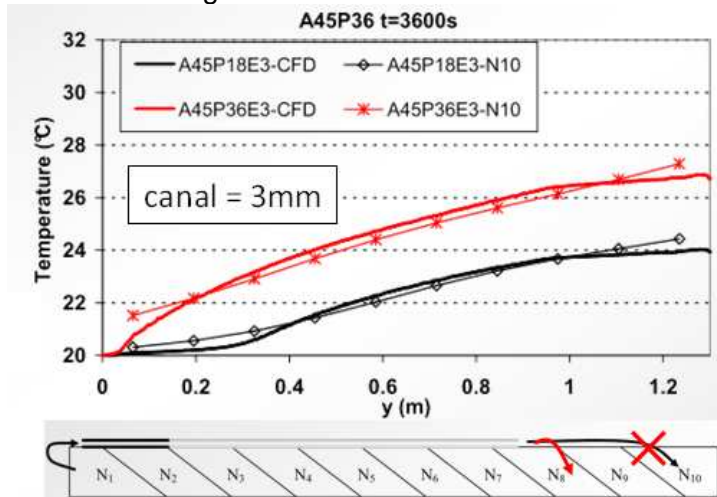


Figure 25 : Principe de modélisation du canal couplé au stockage (modèle : type 541 de TRNSYS)

Dans un premier temps, ce modèle a été validé par rapport aux données expérimentales d'une cavité avec un canal de 8mm et une épaisseur de cavité de 0,1m. Dans un second temps, il a été validé par rapport à une série de résultats numériques (CFD) pour lesquels

nous avons fait varier l'épaisseur du canal (3, 2 et 1mm), le volume de la cavité (100, 150 et 200 l), la densité de flux injectée (1800 et 3600W/m²) et l'angle d'inclinaison (30° et 45°). En prenant mieux en compte les nœuds de sortie du canal, le modèle modifié s'est avéré satisfaisant pour tous les cas de figure étudiés.



Une étude paramétrique sur l'échangeur d'eau chaude sanitaire a été menée. Les variables étudiées ont été la distribution de température dans le réservoir, la distribution de l'échangeur dans la hauteur du réservoir, la longueur de l'échangeur, les diamètres interne/externe du tube et le débit. Le réservoir parfaitement stratifié a donné de meilleurs rendements, et la distribution uniforme de l'échangeur a été la plus performante. L'augmentation de la longueur a amélioré le transfert (augmentation de la surface d'échange).

En revanche, l'augmentation du diamètre n'apporte pas d'avantage significatif, car avec l'augmentation du diamètre il y a une diminution du coefficient d'échange à l'intérieur du tube. Cependant, cette différence tend à s'accroître avec l'augmentation du débit. Enfin, la configuration retenue est celle avec une distribution uniforme dans la hauteur, une longueur de 30m et des diamètres interne/externe de 20 et 22mm.

o Résultats DNS

Les simulations CFD ont également été réalisées par DNS (*Direct Numerical Simulation*) 2D dans un premier temps pour un angle d'inclinaison de 45° et une densité de flux de 5400 W/m². Sans plaque de stratification, des structures tourbillonnaires désorganisées apparaissent et remplissent au fur et à mesure la cavité durant la phase initiale et restent présentes seulement en haut de la cavité plus tard. Avec la présence de la plaque, la dynamique de la phase initiale est modifiée : des structures tourbillonnaires ne sont produites qu'en haut de la cavité et s'étendent plus ou moins vers le bas. Le comportement à long terme reste similaire : elles sont présentes uniquement en haut de la cavité. Le fait que l'écoulement soit canalisé et ralenti induit un champ de température légèrement plus stratifié au sens moyenné. La plaque de stratification joue bien son rôle que l'on lui a attribué, à savoir améliorer la stratification dans la cavité. Les résultats numériques confirment l'observation expérimentale (et les simulations CFD avec modèles RANS) que la température sur les points expérimentaux évolue au sens moyenné, après la phase initiale d'une demi-heure environ, linéairement avec le temps. Notons que la présence de la plaque rend l'échange convectif plus efficace et induit une pente en temps légèrement plus faible.

En ce qui concerne l'angle d'inclinaison, les valeurs de 30° et 60° complètent l'étude réalisée avec 45°. La stratification diminue avec l'augmentation de l'angle : donc l'angle de 30° donne la meilleure stratification moyenne, mais il représente également la plus grande fluctuation de la stratification. Ceci est expliqué par la structure oscillante de l'écoulement observée à 30° en haut de la cavité. La conclusion intéressante est que la toiture moins inclinée est plus performante en matière de la stratification.

Etant donné que la température en haut de la cavité augmente de 8°C en une heure et que cette variation dépasse la limite des hypothèses de Boussinesq, la prise en compte de la variation des propriétés thermo-physiques en fonction de la température est devenue nécessaire. Nous avons choisi d'étudier l'influence de la variation de la viscosité et du coefficient de dilatation thermique sur les écoulements et le transfert par l'intermédiaire des lois empiriques. Celles-ci permettent de continuer avec le formalisme des équations de Boussinesq : la poussée d'Archimède est modulée par la loi de $\beta(T)$ et les équations de Helmholtz ne sont plus à coefficient constant. Les simulations menées montrent que la variation de la viscosité et du coefficient de dilatation thermique a peu d'influence sur le transfert et les écoulements à l'échelle d'une heure. Néanmoins, il est nécessaire de noter que les propriétés thermo-physiques constantes doivent être évaluées à la température initiale : par exemple, utiliser les propriétés thermo-physiques à 20°C pour une configuration avec la température initiale de 23°C peut entraîner 15% d'écart sur le transfert thermique.

- **Evaluation du prototype**
 - Résultats d'essai du prototype

L'ensemble des essais de charge ont mis en évidence un certain nombre de phénomènes et notamment la charge avec la plaque de stratification. Nous avons réalisé ces essais pour différentes inclinaisons et ensoleillements. Nous pouvons observer les effets de l'angle d'inclinaison et de la puissance injectée sur la différence de température entre le haut et le bas de la cuve.

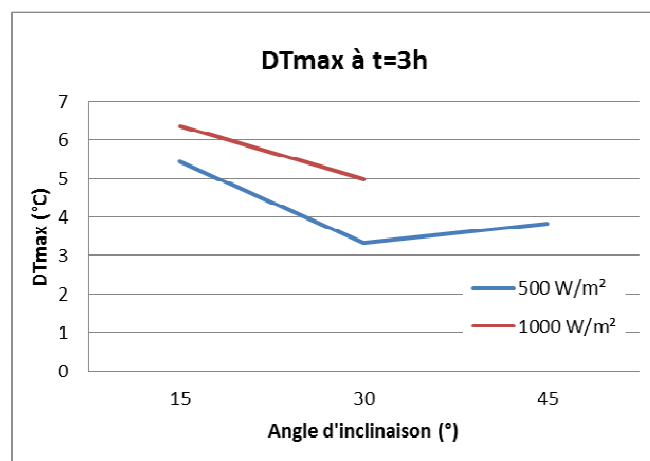


Figure 27 : Ecart de température entre le haut et le bas de la cavité (ΔT_{max}) en fonction de l'angle d'inclinaison

L'écart de température entre le haut et le bas de la cavité provient d'un équilibre entre la vitesse développée au sein du ballon et le coefficient d'échange au niveau de la boîte à eau. Dans le cas d'une faible inclinaison, nous avons un ΔT_{max} plus élevé du fait des faibles vitesses qui se développent au sein du ballon, ce qui favorise la stratification.

Puis différents essais de décharge ont été réalisés afin de valider le fonctionnement de l'échangeur de production d'eau chaude sanitaire.

La figure 28 illustre l'évolution de la température au sein de la cavité pour l'essai D9 (inclinaison 15°, température initiale du stock 60°C, débit de puisage 300kg/h). Au début du puisage, nous observons l'effet d'accumulation de l'échangeur. Durant les deux premières minutes, la température moyenne de soutirage est de 60,8°C pour un volume d'environ 10 litres. A 20 minutes de décharge, la température en partie haute du stockage est de 54°C et le volume soutiré est de 100 litres à une température moyenne de 51,9°C.

A titre de comparaison pour l'essai D2 (avec débit de 600 kg/h), l'effet d'accumulation de l'échangeur est de l'ordre de la minute. A 10 minutes le volume soutiré est de 100 litres et la température moyenne de 46,5°C, la température en partie haute est de 57°C.

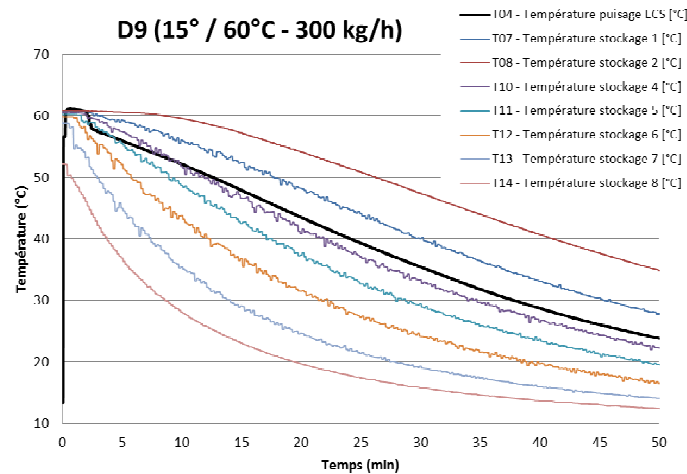


Figure 28 : Décharge D9 avec angle d'inclinaison de 15°, température initial de 60°C à débit de puisage constant de 300 kg/h

Afin d'évaluer la quantité d'énergie restituée par l'échangeur sanitaire, nous avons utilisé l'approche de la méthode VES40 qui permet d'évaluer le volume équivalent soutiré à 40°C pour les cas où la température de puisage est supérieure à 40°C. Le VES40 peut être calculé par l'expression :

$$VES40 = V_p \frac{(T_{p,m} - T_{e,f})}{(40 - T_{e,f})}$$

où V_p est le volume puisé en litres, $T_{p,m}$ est la température moyenne de puisage en (°C) et $T_{e,f}$ est la température d'eau froide à l'entrée de l'échangeur.

Les résultats du VES40 en fonction de l'inclinaison, illustrent le fait que le système avec une inclinaison plus élevée présente des meilleures performances au moment du puisage. Ces résultats ont été observés pour les cas avec un puisage simple, mais aussi pour les cas avec le puisage M324.

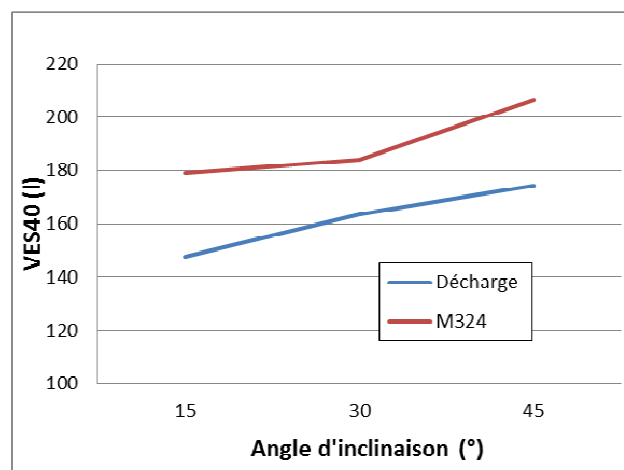


Figure 29 : VES40 en fonction de l'angle d'inclinaison du stockage

- Identification des paramètres du modèle analogique/numérique (TRNSYS)

Les essais de charge et de décharge ont permis d'identifier les paramètres du modèle analogique. Dans un premier temps, nous avons identifié le coefficient de pertes global du CSIS et obtenu une valeur de UA égale à 1,59 W/K. Nous avons ensuite déterminé les paramètres de l'échangeur ECS et de la cuve. Afin d'ajuster les courbes, nous avons dû intégrer l'inertie de l'enveloppe du stockage qui n'avait pas été identifiée initialement. Le procédé de fabrication utilisé a augmenté de façon considérable l'épaisseur de l'enveloppe pour des raisons de tenue mécanique, ce qui influence le comportement du stockage. Nous pouvons noter sur les courbes suivantes la bonne adéquation entre la température de

puisage expérimentale et numérique lorsque ce volume de stockage équivalent (V+) est pris en compte.

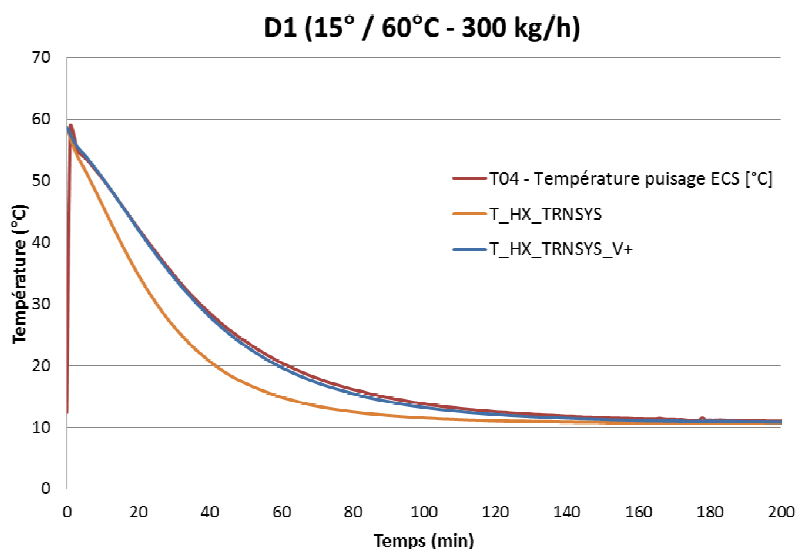


Figure 30 : Décharge D1, 15° d'inclinaison avec $T_{in i} = 60^{\circ}\text{C}$ et débit de 300 kg/h

Les paramètres du capteur et de l'échangeur boîte à eau ont également été identifiés à partir d'autres essais. Puis nous avons procédé à une validation de l'identification des paramètres à parti d'un essai couplé de charge et de décharge.

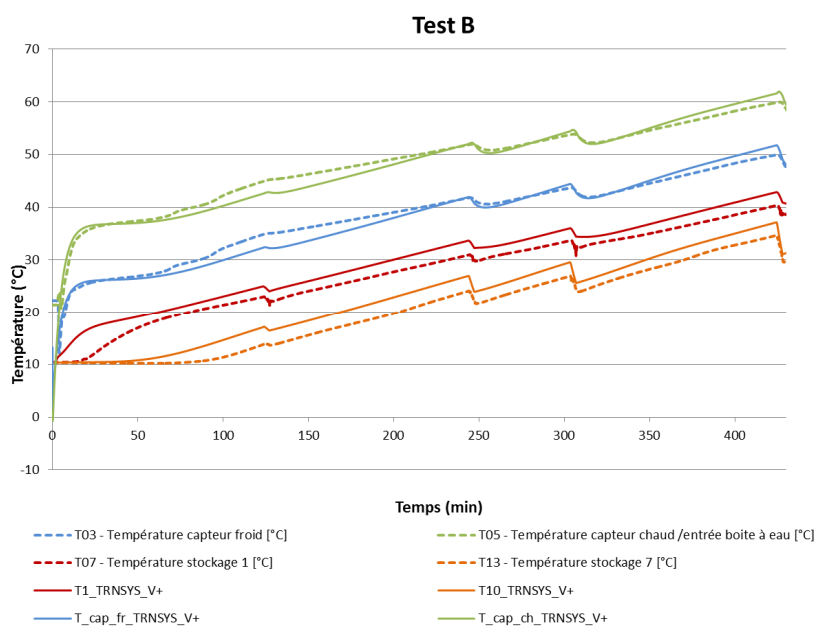


Figure 31 : Comparaison expérimental/TRNSYS du cas Test B ($E=1000\text{W/m}^2$)

Les essais combinés de charge et décharge ont montré une bonne adéquation expérimentale/numérique des températures au sein de la cuve et du capteur. Cependant, nous pouvons noter des bilans d'énergie qui peuvent présenter des écarts de 20% pour certains essais. Il est donc nécessaire d'améliorer la prise en compte de certains phénomènes et notamment la prise en compte de l'inertie de l'enveloppe (liée à la conception mécanique du proto) et un meilleur couplage entre l'expression du débit du circulateur et le coefficient d'échange de la boîte à eau.

o Simulation et performances annuelles du prototype

Nous avons ensuite intégré le modèle numérique de CSIS développé dans son environnement et réalisé des simulations annuelles à l'aide du logiciel TRNSYS. Le paramétrage du modèle est issu de l'identification des paramètres réalisée suite aux essais.

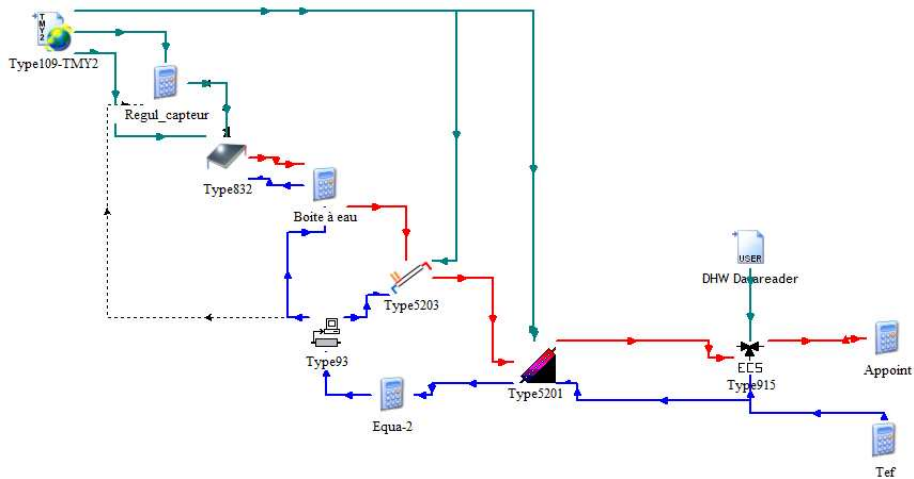


Figure 32 : Aperçu du Simulation Studio du CSIS modélisé sous TRNSYS

Les simulations ont été réalisées pour le climat de Chambéry avec un puisage d'eau chaude sanitaire de 200l/j à 45°C. Pour une inclinaison de 30°, le taux de couverture solaire des besoins d'ECS est de 37,8%.

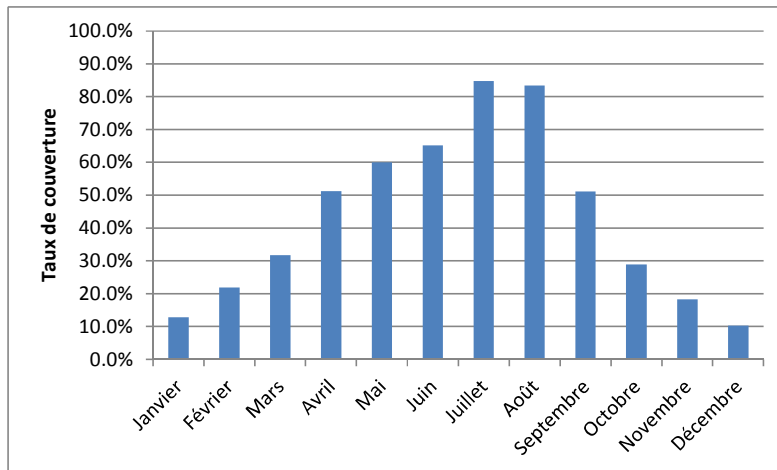


Figure 33 : Evolution du taux de couverture solaire des besoins d'ECS

Une étude de sensibilité sur l'inclinaison du CSIS a permis de montrer un optimum à 30° bien que l'influence reste mineure : maximum 1.2 point d'écart sur le taux de couverture.

| | Taux de couverture | | |
|---------------|--------------------|-------|-------|
| | 15° | 30° | 45° |
| Annuel | 36.6% | 37.8% | 37.3% |

Une étude complémentaire pour une inclinaison de 30° avec une surface de capteurs solaires et un volume de stockage augmenté de 50% abouti à un taux de couverture solaire des besoins de 48,1%.

| | Taux de couverture | |
|--------------|-------------------------|-------------------------|
| | 2 m ² / 1.5m | 3m ² / 2.25m |
| Total | 37.8% | 48.1% |

L'objectif d'atteindre environ 50 % de couverture solaire a donc été atteint. A titre de comparaison, nous avons fait varier l'épaisseur du canal. L'amélioration de la stratification par la réduction de l'épaisseur du canal conduit à une légère amélioration de la couverture solaire.

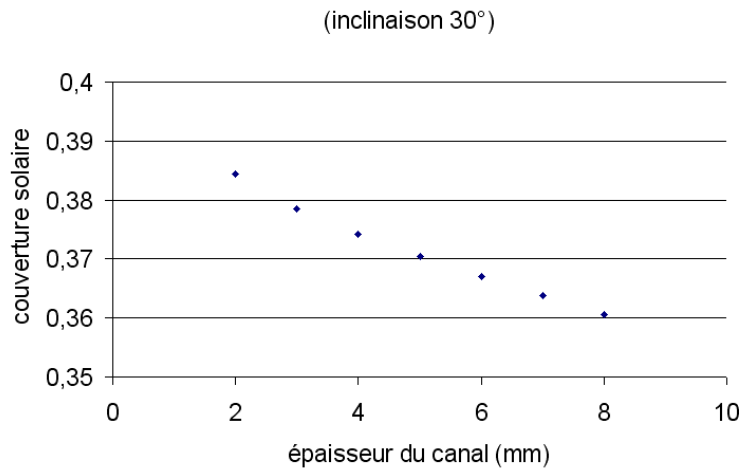


Figure 34 : Evolution du taux de couverture solaire en fonction de l'épaisseur du canal

A titre de comparaison, l'utilisation d'un ballon cylindrique (de même volume que le CSIS) dans un CESI classique (convection forcée) conduit à une couverture solaire de l'ordre de 50 % au lieu de 40 % environ avec le CSIS. La baisse de performance a été estimée pour 1/3 à l'effet de l'augmentation des déperditions du stockage (compacité, hors volume chauffé), et 2/3 à une combinaison entre « l'effet piston » forcément bénéfique dans le cas du stockage classique sous pression et surtout le manque de stratification dans le CSIS.

- **Résultats caloduc pulsé**

Nous avons d'abord réalisé des essais d'étalonnage pour chaque phase d'essai de caloducs pulsés sans fluide pour quantifier les fuites thermiques et la puissance transférée par conduction pure dans les capillaires. On représente sur la figure 35 à titre d'exemple pour l'essai de diamètre intérieur 2 mm la puissance électrique Pélec, ainsi que la puissance récupérée sur l'eau Peau en fonction de la température de la partie chaude, la différence entre les deux puissances représentant les pertes thermiques.

Par la suite, nous avons rempli en fluide et réalisé des essais en faisant varier les paramètres. A titre d'exemple, nous donnons sur la figure 36 les courbes de température et de puissance pour l'essai en eau et capillaire $d_i=3\text{mm}$, inclinaison $+60^\circ$.

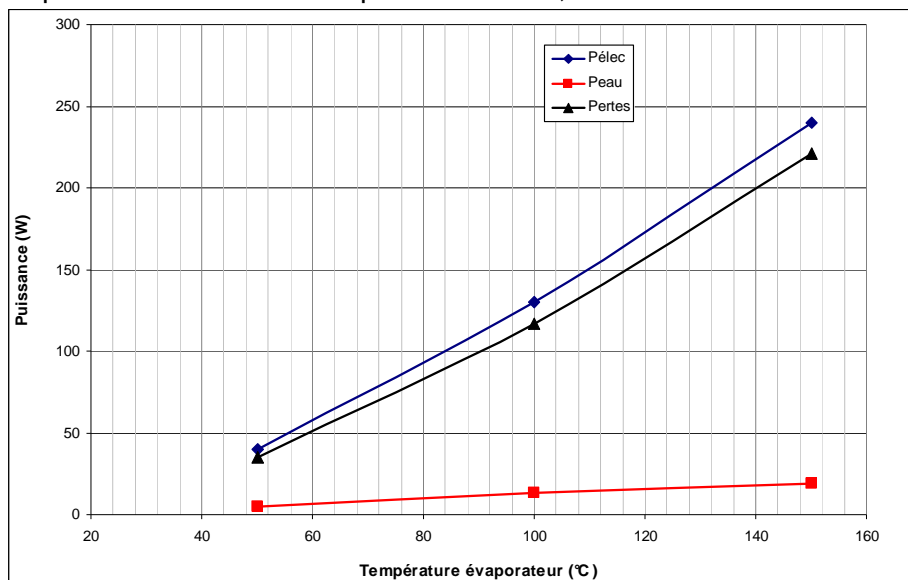


Figure 35 : Essais d'étalonnage section d'essai $d_i=2\text{mm}$

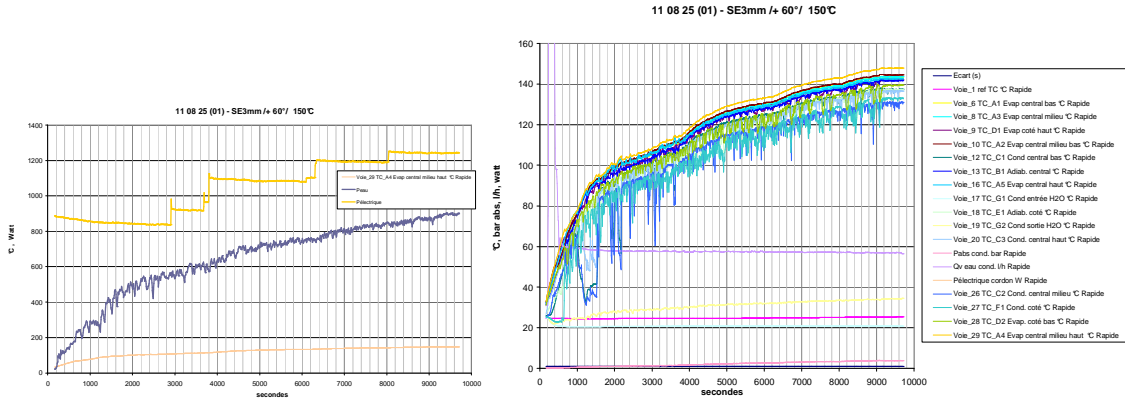


Figure 36 : Courbes de puissance et température

L'ensemble des essais et les performances obtenues sont donnés dans le tableau suivant :

| Fluide | Inclinaison | d=1,25mm | d=2mm | d=3mm |
|-----------|-------------|----------|---------|---------------|
| Eau | -60° | Non fct | Non fct | NA |
| Eau | -30° | Non fct | Non fct | Instable |
| Eau | 0° | Non fct | Non fct | 700W instable |
| Eau | +30° | Non fct | 880W | 900W |
| Eau | +60° | Non fct | NA | >850W |
| n-Heptane | -60° | NA | NA | Non fct |
| n-Heptane | 0° | NA | NA | Non fct |
| n-Heptane | +30° | NA | NA | 500W |
| n-Heptane | +60° | NA | NA | 450W |

Tableau 4 : Performances obtenues sur les caloducs pulsés

En conclusion :

- Nous avons réussi à faire fonctionner les caloducs pulsés remplis en eau en inclinaison positive, c'est-à-dire avec la zone chaude plus basse que la zone froide, ceci pour 2 et 3mm de diamètre intérieur. Le caloduc pulsé eau de 1,25 mm n'a jamais fonctionné.
- Le caloduc pulsé rempli en n-Heptane avec un diamètre de 3 mm a également fonctionné en inclinaison positive, quoique un peu moins bien que le caloduc rempli en eau. Le PHP qui a le mieux marché est celui en eau avec diamètre 3 mm.
- Tous les caloducs pulsés en inclinaison horizontale ou négative n'ont marché que de manière temporaire ou pas du tout.

La configuration du prototype RenEauSol souhaitée étant en inclinaison négative, nous pouvons conclure que nous ne sommes pas parvenu pour le moment à un fonctionnement satisfaisant des caloducs.

A.4 CONCLUSION GENERALE

L'approche multidisciplinaire du projet RénEauSol a été très intéressante pendant les différentes phases de conception, fabrication et caractérisation du prototype de CSIS puisque nous avons abordé différentes échelles (phénomènes sur des durées de quelques heures, prototype, performances annuelles) et confronté différents points de vue (financier, esthétique, technique, scientifique...).

Concernant les résultats technologiques obtenus à l'issue du projet RénEauSol, un point important concerne les caloducs. Il n'existe pas encore de solution permettant un

fonctionnement contre la gravité sur la hauteur du CSIS (1.2 m environ). Cela nous a conduit à modifier le prototype initialement prévu en utilisant une gestion au fil du soleil qui permet de conserver le fonctionnement « passif » du CSIS. Concernant l'intégration au bâti, elle est tout à fait possible comme l'a montré l'étude architecturale et structurelle. Un point technique très contraignant au début du projet était le risque de gel. Grâce à l'isolation élevée du stockage, nous avons pu l'éviter et en même temps limiter fortement les déperditions du stockage (faible compacité).

Un point difficile rencontré lors de la fabrication du prototype a certainement été les problèmes d'étanchéité de la cuve liés à notre volonté de réaliser un prototype évolutif (changement du type de plaque de stratification, instrumentation...). Cela a nécessité un travail plus long lors de la fabrication du prototype.

La surcharge liée au CSIS nécessite évidemment une modification de la charpente dans le cas d'une solution complètement intégrée. Un renfort de charpente quel que soit le mode d'intégration est nécessaire, allant d'un simple renforcement de chevron (semi-incorporé, posé sur chevrons) à la mise en place d'un faux arbalétrier entre des pannes, elles-mêmes renforcées (solution intégrée).

D'un point de vue scientifique, trois axes ont été considérés :

- **La compréhension des phénomènes de convection naturelle en cavité chauffée en partie basse et à haut rapport de forme.** Les expérimentations de type PIV ont mis en avant la faible stratification dans le cas sans plaque (structures 3D, vitesse finalement élevées conduisant à un brassage du stockage) et le rôle de la plaque de stratification (écoulement 2D dont l'avantage est de rendre possible l'utilisation de modèles moins pénalisants en temps de calcul pour le régime dynamique, la réduction de l'épaisseur du canal améliore la stratification uniquement si la plaque est isolée thermiquement). Un résultat extrêmement encourageant concerne les toutes dernières simulations CFD (thèse Marie Swiateck, LOCIE) réalisées en janvier 2013 qui ont permis d'identifier une configuration très simple améliorant considérablement la stratification. Les simulations CFD de type RANS ont été complétées par la DNS. Les conclusions générales de la DNS 2D, dont certaines ne sont qu'une confirmation des observations expérimentales sont les suivantes. Les structures tourbillonnaires en haut de la cavité sont responsables des fluctuations de la température et des écoulements. La plaque de stratification rend le transfert plus efficace et améliore la stratification. L'augmentation de l'angle d'inclinaison diminue la stratification, mais un petit angle induit de plus grandes fluctuations en température. La variation des propriétés thermo-physiques doit être considérée sur un temps long (> 1 heure), tandis que les propriétés thermo-physiques constantes doivent être calculées à la température initiale.
- **L'étude expérimentale et théorique des caloducs dans la configuration du CSIS.** Les caloducs à capillaires ne sont pas envisageables, tandis que les caloducs pulsés n'ont pas donné de résultats probants à l'issue du projet. Notons qu'il est tout à fait envisageable d'utiliser des caloducs « standards » si la cuve est intégrée à la toiture au dessus du capteur (avantage = suppression de la boucle solaire + intégration à la toiture plus simple compte tenu de l'épaisseur moins contraignante et de la masse répartie sur une surface plus grande).
- **La modélisation analogique globale du CSIS (TRNSYS)** permettant l'évaluation de ses performances annuelles. Le modèle développé a été validé grâce aux résultats expérimentaux obtenus à la fin du projet lors des tests sur le prototype.

D'un point de vue industriel, les cavités parallélépipédiques constituent une alternative permettant de faciliter l'intégration du stockage au bâtiment. C'est bien sûr le cas pour le CSIS, mais également dans le cas d'un stockage solaire rajouté à l'intérieur du bâtiment. La forme de la cuve nécessite une isolation renforcée du fait de la faible compacité (surface déperditive importante). Le fait d'utiliser une cuve en polymère à pression atmosphérique est clairement un gain financier sur l'investissement si le surcoût de l'échangeur n'est pas pénalisant. Le partenaire industriel ayant déposé le bilan au cours de la 2^{ème} année du projet,

nous n'avons pas pu quantifier précisément le coût d'un CSIS commercialisé. Les performances énergétiques obtenues sur le prototype sont prometteuses (40% de couverture solaire annuelle estimée par simulation pour une surface seulement de 2m² de capteur, et avec la configuration du prototype dont la stratification est faible). Par rapport, à un système classique (environ 50% de couverture solaire), la baisse de performance est due pour 1/3 aux déperditions (faible compacité), et pour environ 2/3 à la présence de l'échangeur (rendement échangeur, effet piston plus intéressant dans le cas classique lors d'un soutirage) et surtout au manque de stratification. Il serait intéressant de réaliser un test du prototype dans une nouvelle version (cf. figure 37 pour le gain de stratification envisageable) en situation réelle sur une année afin de déterminer les performances réelles (soutirages, influence de la toiture...).

Même si le projet RénEauSol s'est arrêté en décembre 2012, les travaux de recherche autour des thématiques scientifiques traitées continuent au moins sur deux axes :

- La thèse de Marie Swiatek a démarré en octobre 2012 au LOCIE (co-encadrants : G. Fraisse et M. Pailha). Ce travail sur la convection se fera en collaboration avec le CETHIL (Shihe Xin) et il s'inscrit entièrement dans le projet RenEauSol, même si elle a démarré en fin de projet. Il s'agit de poursuivre l'étude sur les échanges convectifs au sein d'une cavité chauffée en partie basse ; la thèse de Jérónimo Souza n'ayant pas permis expérimentalement d'une part de déterminer avec certitude si l'écoulement est turbulent ou non, et d'autre part d'améliorer sensiblement la stratification. Des résultats très encourageant ont déjà été obtenus sur l'amélioration de la stratification (Figure 37). Le nouveau dispositif de stratification retenu a l'avantage d'être très simple. Au niveau du CSIS, il va même être possible de s'affranchir des contraintes liées au fonctionnement contre la gravité des caloducs. Une prise de contacts avec des industriels est en cours pour valoriser ces résultats, et réaliser un nouveau prototype fonctionnant de manière totalement passive. On peut logiquement s'attendre à des couvertures solaires bien supérieures à celles du prototype, très certainement équivalentes aux CESI classiques. Par ailleurs, il sera très intéressant de connaître s'il existe un optimum entre la stratification et le rendement du capteur vis à vis des performances annuelles du CSIS.
- Concernant les caloducs, les essais de validation du fonctionnement de caloduc pulsé n'étant pas satisfaisants, d'autres paramètres de dimensionnement peuvent néanmoins permettre d'obtenir le fonctionnement désiré contre la gravité. Un programme de travail de mise au point d'un modèle de calcul de caloduc pulsé comprenant une partie modèle et une partie validation de modèle a ainsi commencé au CEA.

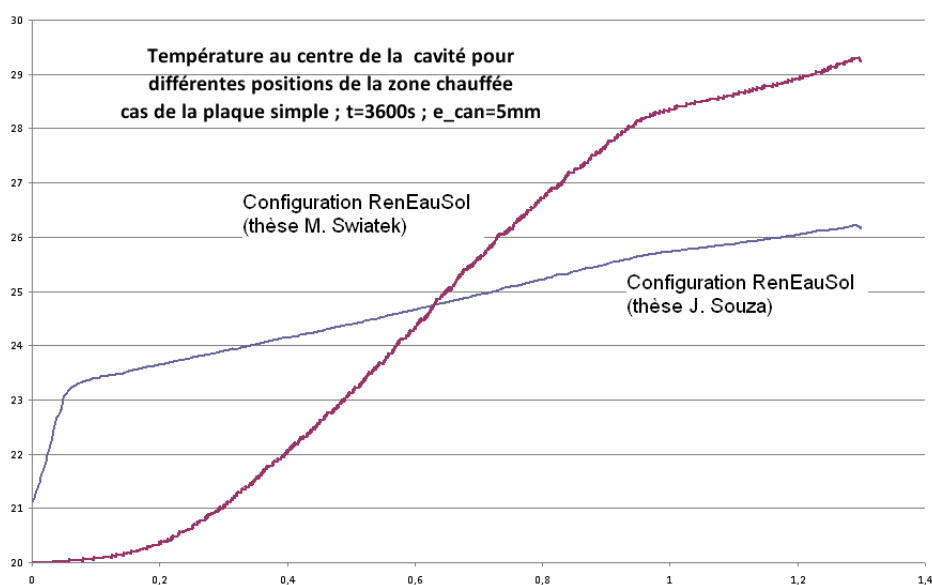


Figure 37 : Comparaison CFD de la répartition de température au sein de la cavité entre la configuration du prototype, et la nouvelle configuration (température / hauteur dans la cavité)