
Prototype d'un régénérateur

Le régénérateur, cœur du procédé AA-CAES, est l'équipement qui va subir les plus fortes contraintes mécaniques, thermiques, chimiques, aérauliques et hydrauliques. Sa paroi, est sans doute l'élément le plus sensible de tous les équipements constituant l'AA-CAES. Des températures élevées jusqu'à 600°C peuvent en effet régner dans le régénérateur. La roche hôte et le béton de soutènement étant incapables de les supporter, il est nécessaire alors de les isoler thermiquement. La paroi doit aussi résister aux contraintes mécaniques induites par la taille du régénérateur avec une pression pouvant atteindre 15 MPa et un risque de vieillissement prématuré provoqué par les chargements cycliques répétés. Cette paroi doit en plus garantir une étanchéité parfaite et être préservée pendant toute la durée d'exploitation sans possibilité d'intervention. Il sera en effet très délicat et onéreux d'intervenir dans le régénérateur une fois celui-ci rempli de réfractaire et mis en température et en pression.

Le chapitre 2 a été consacré à l'étude des différents matériaux qui entrent en jeu dans un régénérateur souterrain et à l'analyse de leur comportement dans la gamme de température et de pression considérée. Une campagne d'essai en laboratoire a été mise en œuvre pour caractériser les matériaux constituant le revêtement et une loi rhéologique de l'air humide à haute température et haute pression a été établie. Nous avons utilisé ces résultats dans le chapitre 3 dans un modèle numérique dans le but de dimensionner les revêtements des régénérateurs et d'étudier en détail le couplage thermo-hydro-mécanique dans le système de stockage ainsi que l'influence de chaque mécanisme de couplage sur la stabilité des ouvrages.

La complexité des problèmes abordés dans un régénérateur et les nombreuses hypothèses simplificatrices adoptées dans toutes les étapes d'étude et de recherche (laboratoire, modélisation et conception) nécessitent une validation expérimentale à une échelle réduite avant d'envisager la réalisation d'un site pilote à échelle industrielle. Dans ce cadre, un prototype d'un régénérateur combinant pression et température et représentant une paroi réelle a été construit dans le laboratoire LITEN du CEA à Grenoble. Trois éléments principaux ont été définis : les céramiques de stockage de la chaleur, les matériaux isolants et l'enveloppe de l'enceinte pour contenir la pression régnant dans celle-ci.

Ce chapitre est consacré à la description de ce prototype et aux essais réalisés pour valider le fonctionnement du régénérateur, les configurations de revêtements préconisées et les modélisations mises en œuvre.

4.1 Description du prototype d'essais

Le prototype représente un régénérateur à échelle réduite et a pour but principal de tester le comportement des revêtements préconisés face à des sollicitations cycliques en température et en pression, générées par un air sec ou humide. Il reproduit la vraie paroi du régénérateur, mais se limite à une zone active de céramiques d'un diamètre beaucoup plus faible (0,7 m). La configuration simulée se prête donc à un régénérateur aérien où la pression est reprise non pas par la roche, mais par une enceinte métallique d'épaisseur 3 cm capable de tenir une pression de 3 MPa dans un diamètre intérieur de 2,25 m (ce qui correspond à un TES moyenne pression).

4.1.1 Construction du prototype et préparation de l'expérimentation

La hauteur du prototype a été limitée à 2 m de manière à décrire le comportement en température d'une tranche donnée du régénérateur réel. Cette hauteur permet d'étudier les interactions avec la paroi en différents points en changeant les conditions d'entrée, mais n'offre pas la possibilité de reproduire l'empilage des matériaux et le gradient thermique tout au long du régénérateur.

Le choix du diamètre du prototype a été fixé de manière à simuler la séquence réelle du revêtement avec les trois caractéristiques principales décrites précédemment : l'isolation thermique moyennant une perte inférieure à 1 %, l'étanchéité du système et le refroidissement actif. Une épaisseur de 0,775 m est donc réservée pour tester les différents schémas de revêtements isolants sachant que l'étanchéité est assurée par l'enceinte métallique qui comprend un système de refroidissement actif sur sa face extérieure.

L'air est fourni par un compresseur qui délivre un débit de 540 Nm³/h (de l'ordre de 0,2 kg/s) à une pression allant jusqu'à 3 MPa. L'air passe ensuite par un système de chauffage équipé d'une résistance chauffante permettant de réguler la température à la valeur voulue. En phase de charge, l'air est acheminé par le haut de l'enceinte via un cône de répartition. La décharge se fait par le bas dans les mêmes conditions.

Ainsi, la boucle d'essais comprend un circuit d'air fourni par un compresseur, une vanne de régulation de débit, un système de chauffe électrique réglable, l'enceinte d'essais, un détendeur, un échangeur de refroidissement et une cheminée d'évacuation. Un système de contrôle commande est mis en place pour le pilotage automatique de la boucle et la réalisation des cycles thermiques. La Figure 4.1 montre des schémas et une photo du prototype avec tous ses composants.

Le programme d'essais prévoit de tester avec le prototype deux configurations de revêtements : la première correspond à un isolant unique constitué par une couche de briques poreuses de type RI30 sur une épaisseur de 0,69 m, et la seconde comprend une épaisseur de 0,2 m de matériau réfractaire dense (Monoguard, Y75LCC ou MS6) suivie de deux couches de briques poreuses de 0,46 m de type RI26. L'espace restant entre l'enceinte métallique et l'isolant est rempli d'un béton réfractaire.

En raison du retard accumulé par les procédures d'agrément et de conformité aux règles de sécurité (équipements sous pression, interrupteurs thermiques, système d'arrêt total de l'installation...), seule la première configuration de revêtement a pu être testée dans le cadre de cette thèse (Figure 4.2).

Les matériaux de stockage testés sont des céramiques structurées mis au point par Saint Gobain après les difficultés rencontrées avec les céramiques en vrac. Ils sont constitués des blocs parallélépipédiques percés pour assurer la circulation d'air. Comme le montre la Figure 4.3, les blocs sont séparés par des entretoises en céramique à chaque niveau dans le sens vertical ainsi que deux feuilles isolantes au centre de la colonne pour maîtriser les dilatations thermiques. Compte tenu de la

forme des blocs, l'espace les séparant de la paroi de l'enceinte est rempli par des billes en céramique dont les dimensions sont définies de manière à garantir un écoulement uniforme.

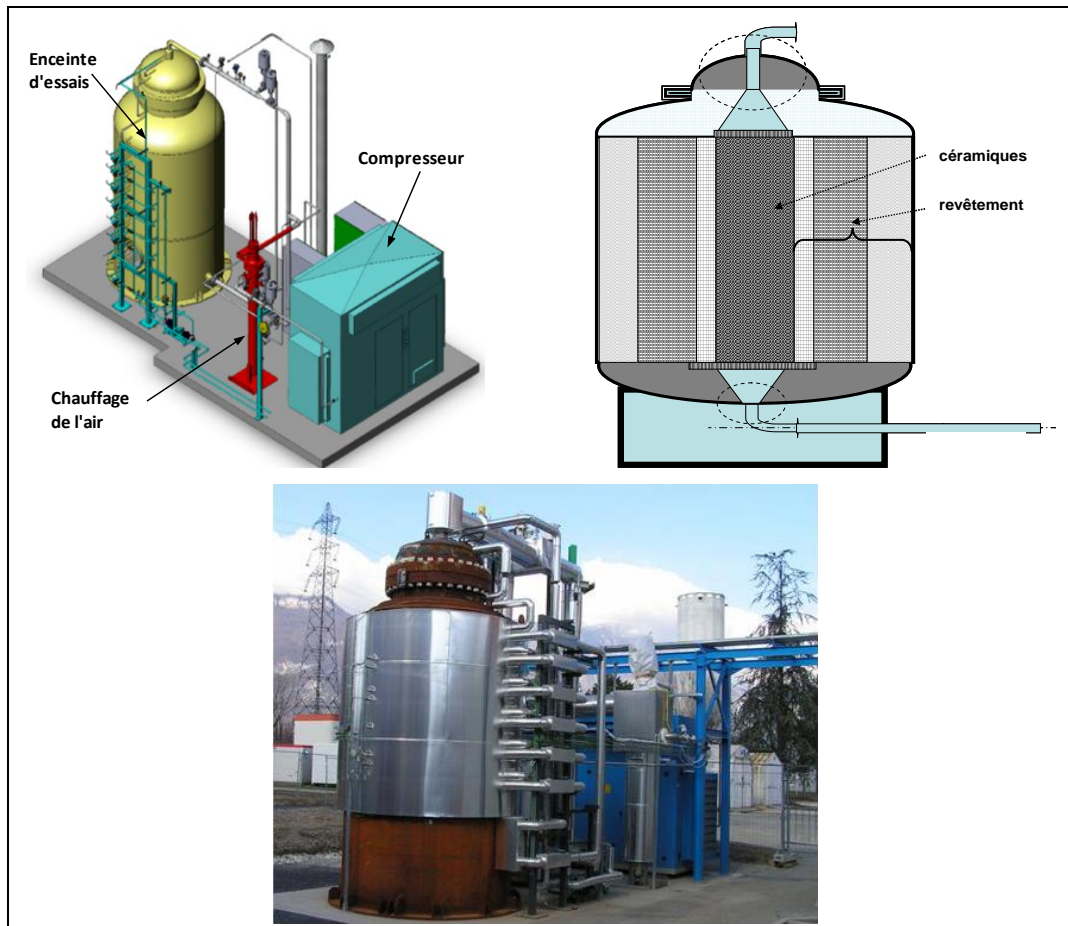


Figure 4.1 : Schémas et photo du prototype du régénérateur (CEA/LITEN)

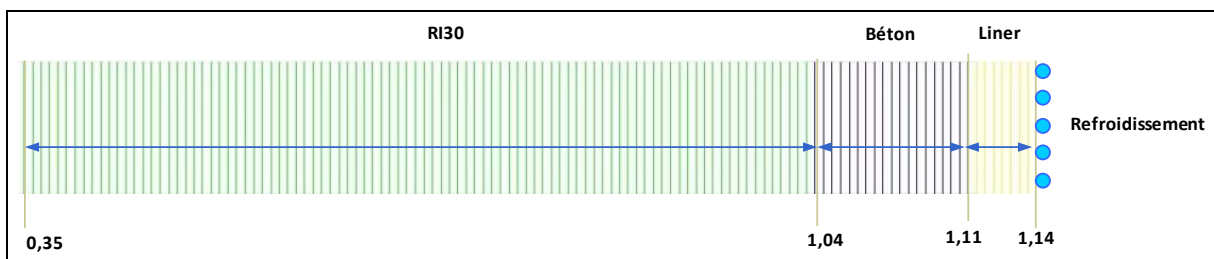


Figure 4.2 : Configuration de revêtement testée

Le matériau isolant est constitué de briques séparés par des joints dans les directions radiale, tangentielle et verticale. Les dimensions des briques et les caractéristiques des joints ont été déterminées de manière à garantir la stabilité et l'étanchéité du système. Ce point sera largement discuté dans le paragraphe suivant de ce chapitre.

Tout autour de la dernière rangée de briques RI30, une feuille de silicone de 10 mm est mise en place pour permettre un bon scellement avec l'anneau de béton coulé. Au sommet et à la base de l'enceinte, l'isolation thermique est assurée avec des matériaux isolants fibreux (Isofrax, laine de verre) ou sous forme de béton réfractaire. La Figure 4.5 donne un plan détaillé de l'intérieur de l'enceinte et la Figure 4.4 montre des photos des différentes étapes de la préparation de l'expérimentation avec un schéma de revêtement utilisant des briques RI30.

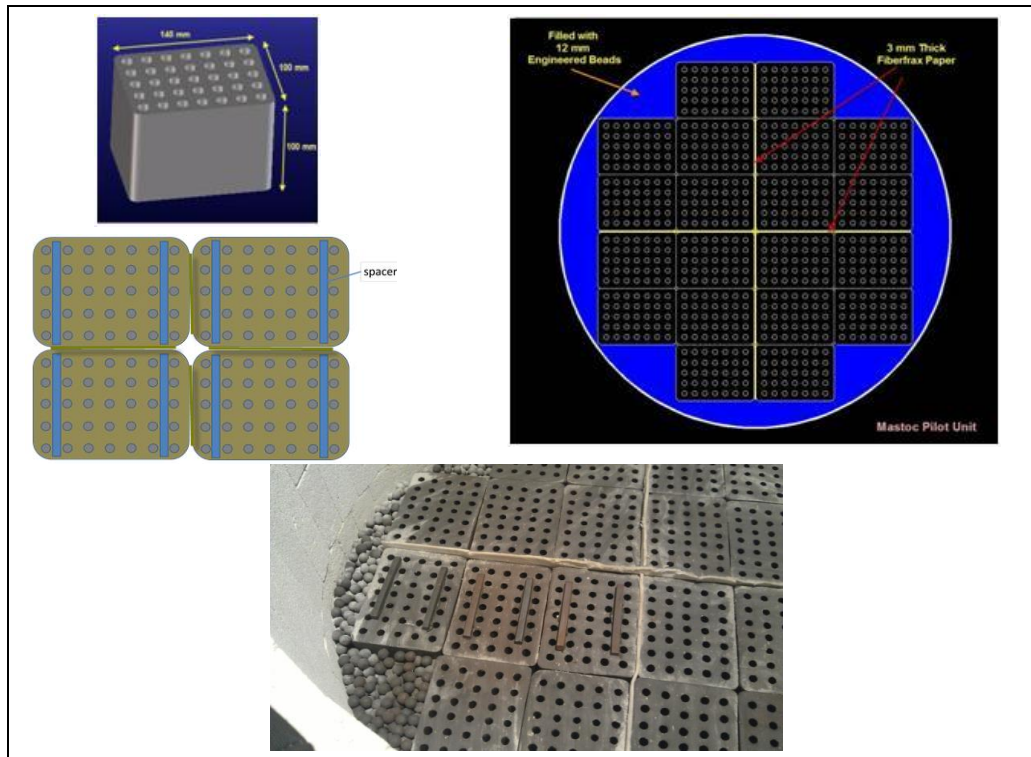
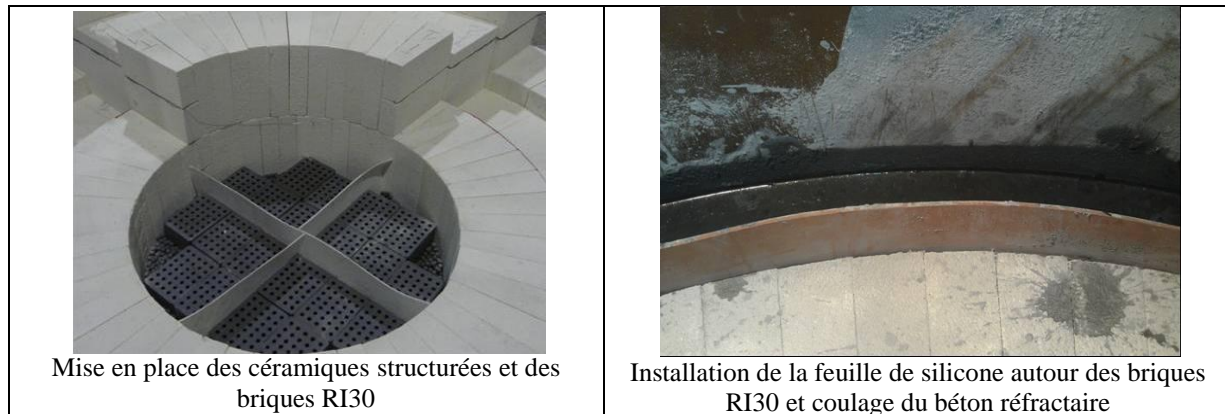


Figure 4.3 : Céramiques structurées et dispositions de mise en place dans l'enceinte (Saint Gobain)



Mise en place des céramiques structurées et des briques RI30

Installation de la feuille de silicone autour des briques RI30 et coulage du béton réfractaire



Figure 4.4 : Etapes de préparation de l'enceinte pour les essais (CEA/LITEN)

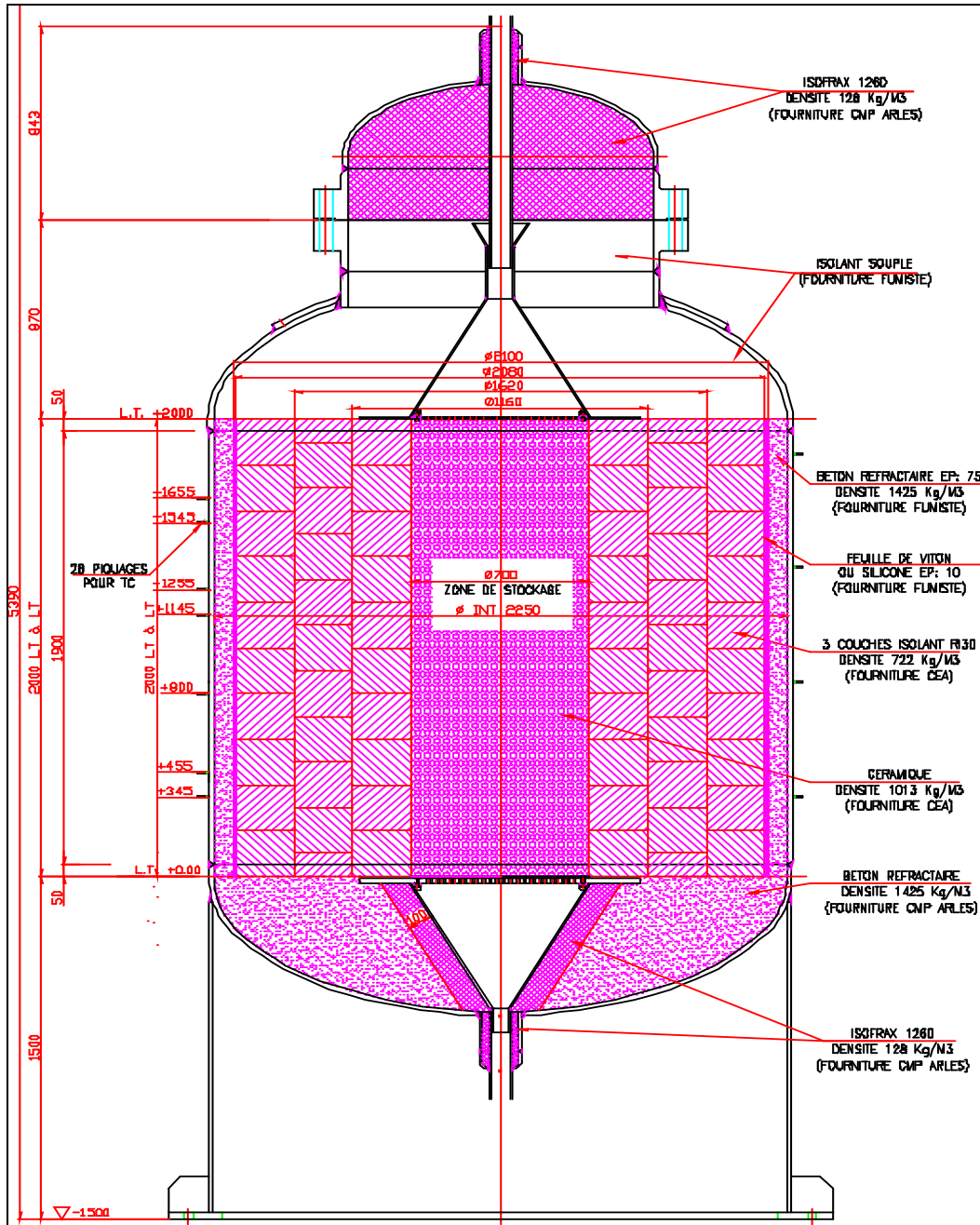


Figure 4.5 : Plan détaillé de l'intérieur de l'enceinte (CEA/LITEN)

4.1.2 Instrumentation mise en œuvre

La maquette d'essais a été instrumentée pour mesurer la pression, le débit et la température à différentes positions. Un système d'acquisition permet le traitement en continu des informations fournies par les capteurs.

En tout, 162 thermocouples, disposés sur 4 orientations et 9 niveaux de hauteur, ont été installés dans les blocs de céramique et les briques de l'isolant RI30. La Figure 4.6 donne l'emplacement de ces thermocouples dans l'enceinte, et la Figure 4.7 montre la gestion des câbles et leur acheminement vers la centrale d'acquisition.

Prototype d'un régénérateur

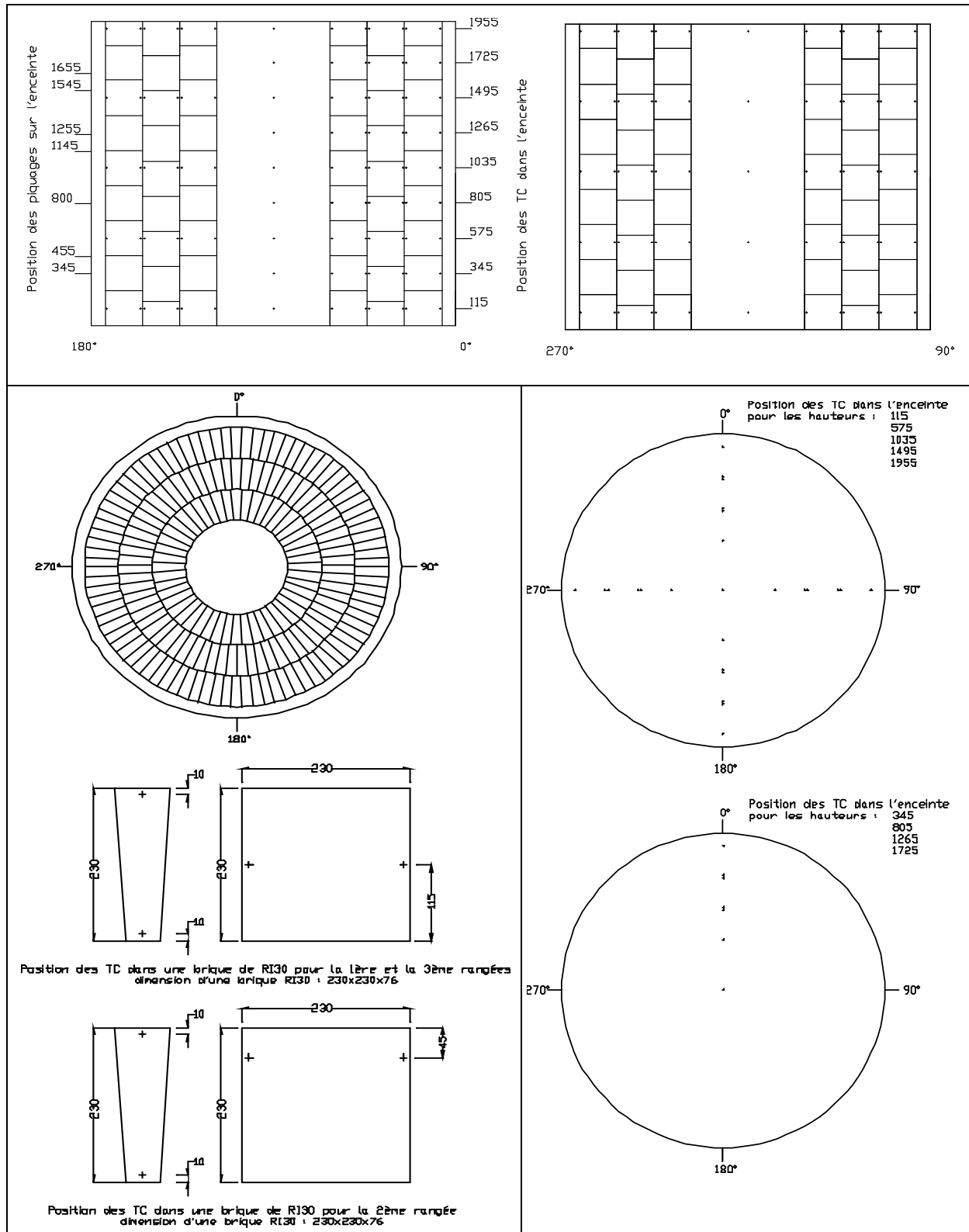


Figure 4.6 : Emplacement des thermocouples dans l'enceinte (CEA/LITEN).



Figure 4.7 : Gestion des instruments de mesure vers la centrale d'acquisition (CEA/LITEN)

4.2 Paramètres de l'expérimentation

4.2.1 Définition des sollicitations thermiques

Le chargement appliqué aux parois du revêtement est inspiré des sollicitations envisagées pour les régénérateurs. Le chargement le plus critique en température correspond au régénérateur unique opérant à 8 MPa et associé à 4 cavités LRC (le cycle est défini avec une compression de 5 h et 2 décharges de 2 x 4 h). Le plus grand écart de température se situe à 20 m de profondeur du sommet du TES (Figure 4.8).

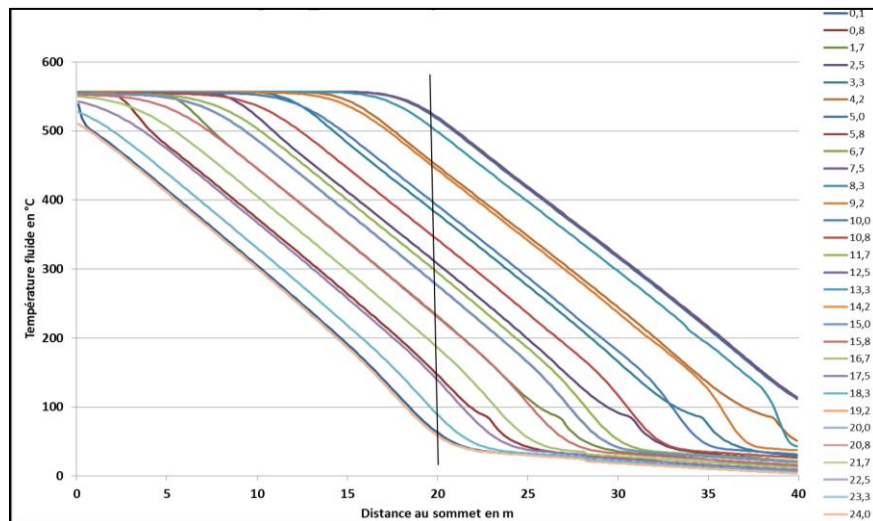


Figure 4.8 : Chargement thermique en fonction de la hauteur et le temps dans le TES unique

Le chargement choisi au niveau de la maquette est montré en pointillés dans la Figure 4.9. C'est le même chargement appliqué à une profondeur de 20 m dans le TES mais en éliminant la pause entre les temps 12 heures et 15 heures dans le but de rendre le chargement plus critique.

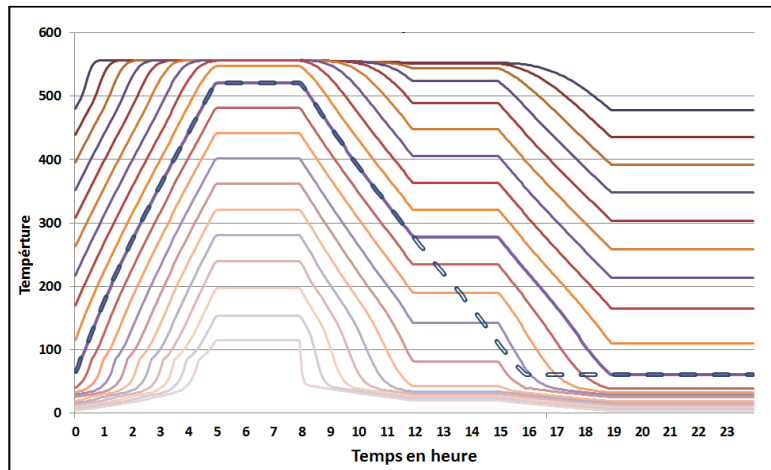


Figure 4.9 : Chargement en fonction du temps et la hauteur (pas de 2m).

La vitesse avec laquelle la température croît est un facteur très important à étudier. En effet, en montant très vite à partir de la température ambiante, des contraintes de traction peuvent être induites et ainsi endommager les matériaux qui ne supportent pas une telle vitesse. En revanche, une montée très lente est très favorable à la stabilité mais très couteuse en temps. Une optimisation de ce paramètre est donc nécessaire. Ce paramètre a été étudié en tenant compte du critère imposé pour la stabilité des céramiques (vitesse inférieure à 2,5 °C/min) et les résultats des simulations thermomécaniques ont montré qu'une montée pendant 1 jour est la plus optimale.

L'historique de température retenu se compose d'une phase d'initialisation comprenant une montée en 1 jour de la température ambiante à la température de 520 °C puis le cycle quotidien. Ce dernier débute par une pause de 3 h, une décharge à la température de 50 °C pendant 8 h, une nouvelle pause de 8 h et enfin une compression à la température maximale de 520 °C pendant 5 h (Figure 4.10). L'essai consiste à répéter ce cycle pendant une quinzaine de journées. En ce qui concerne la pression, il s'agit d'effectuer une montée jusqu'à la valeur maximale de 3 MPa en un jour, puis de maintenir cette pression constante jusqu'à la fin du cyclage.

Comme le montre le Tableau 4.1, le programme expérimental envisagé consiste à tester deux schémas de revêtement. Pour chaque schéma, deux conditions de sollicitations sont prévues : un cyclage avec de l'air sec pendant 15 jours et un cyclage avec de l'air humide pendant 10 jours.

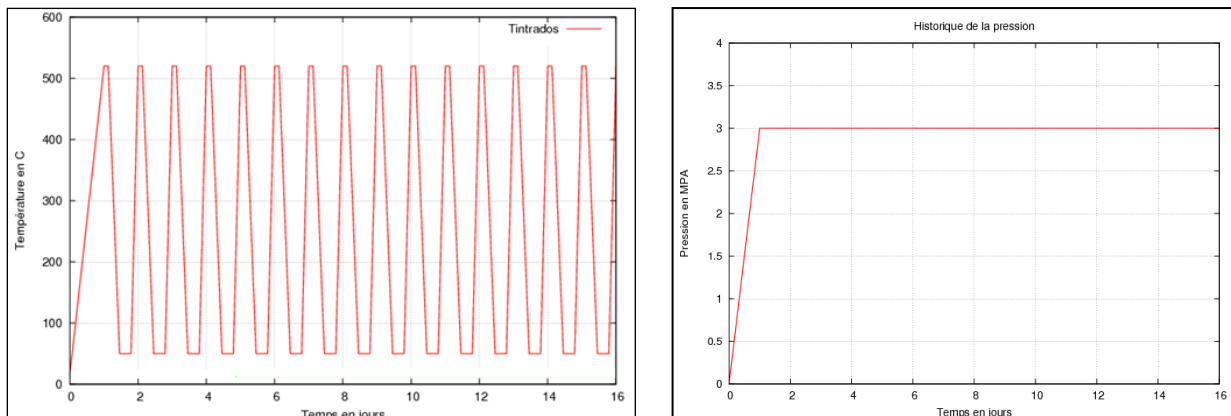


Figure 4.10 : Chargement en température et en pression envisagé pour les essais

Tableau 4.1: Programme expérimental pour tester les deux configurations de revêtement (CEA/LITEN)

Phase		Nombre cycles	Durée cycle	Durée Phase		Total
				Heure	Jour	
Initialisation de la température		1	168	1.2	0.1	
1 ^{er} schéma de revêtement	air sec 520/50	15	24	15.0	0.5	
	transition	1	24	1.0	0.1	
	air humide 520/50	10	24	10.0	0.4	
	Total					1.1
Refroidissement		1	48	2.0	0.1	
désassemblage/réassemblage						2
Initialisation de la température		1	168	1.0	0.1	
2 ^{ème} schéma de revêtement	air sec	15	24	15.0	0.5	
	transition	1	24	1.0	0.1	
	air humide	10	24	10.0	0.4	
	Total					1.1
Refroidissement		1	48	2.0	0.1	
désassemblage						0.5
Total						4.9

4.2.2 Dimensionnement des briques isolantes

La taille d'une brique est un paramètre très dimensionnant : de grandes briques peuvent se rompre par le développement de contraintes thermomécaniques de traction au cœur même du matériau ; en revanche, de petites briques sont très coûteuses d'un point de vue économique car cela nécessite la conception d'un moule spécifique avec une fabrication très limitée en nombre.

Le paramètre mécanique le plus déterminant dans la définition des dimensions d'une brique face à des sollicitations thermiques est le module d'élasticité, les coefficients de dilatation thermique linéiques des matériaux étudiés sont tous de même ordre de grandeur. Ainsi, Les dimensions de la brique seront d'autant plus petites que le module d'élasticité est élevé. Le travail de dimensionnement a été fait pour les différentes briques envisagées dans les schémas de revêtements : les briques RI30 et RI26 et les briques Y75LCC et MS6. Pour mieux illustrer le principe de calcul, seule la configuration faisant appel à un isolant dense et à forte rigidité est présentée ici (brique MS6 de 20 cm d'épaisseur).

Les briques étant séparées par des joints pour permettre la dilatation thermique, le dimensionnement doit aussi définir les caractéristiques de ces joints : épaisseur, rigidité et éventuellement nature du matériau de remplissage.

Une modélisation thermomécanique en 3D a été mise en œuvre pour déterminer les dimensions de chaque type de briques isolantes. Le modèle représente un quart d'une brique et comprend 2 plans de symétrie, les joints étant considérés comme des surface libres. La zone modélisée est montrée dans la Figure 4.11.

Le chargement thermique appliqué à l'intrados de la brique est celui généré à la paroi du revêtement du prototype. Le chargement appliqué à l'extrados de la brique est déduit d'un calcul

thermomécanique 1D sur le prototype avec le second schéma de revêtement envisagé : une première rangée de briques MS6 d'épaisseur 20 cm suivie de deux rangées de briques RI26 de 46 cm, d'un béton réfractaire de 10 cm et enfin de l'enceinte métallique de 3 cm. Ainsi, ces deux sollicitations thermiques sont appliquées comme conditions aux limites sur le quart de brique MS6 modélisé. La Figure 4.12 montre l'historique de ces deux sollicitations.

Concernant les autres parois de la brique, elles sont considérées adiabatiques. Cette hypothèse est cohérente car le flux thermique est radial et il n'y a pas de gradients thermiques verticaux et orthoradial importants.

La brique MS6 envisagée présentait les dimensions suivantes : une épaisseur radiale de 20 cm, une hauteur de 23 cm et une épaisseur tangentielle de 5,3 cm. La simulation thermomécanique a montré que les contraintes de traction développées dans le sens vertical étaient trop fortes et qu'il était nécessaire de réduire cette dimension (Figure 4.13). L'étude paramétrique effectuée a montré qu'une hauteur de l'ordre de 7,5 cm permettait de réduire l'amplitude de cette contrainte de traction et d'obtenir un facteur de sécurité suffisant par rapport à la résistance du matériau. La Figure 4.14 montre les résultats de la simulation correspondant à cette hauteur, et la Figure 4.15, le détail du second schéma de revêtement avec des briques MS6 dont les dimensions ont été définies à partir de ce dimensionnement et des conditions techniques de fabrication.

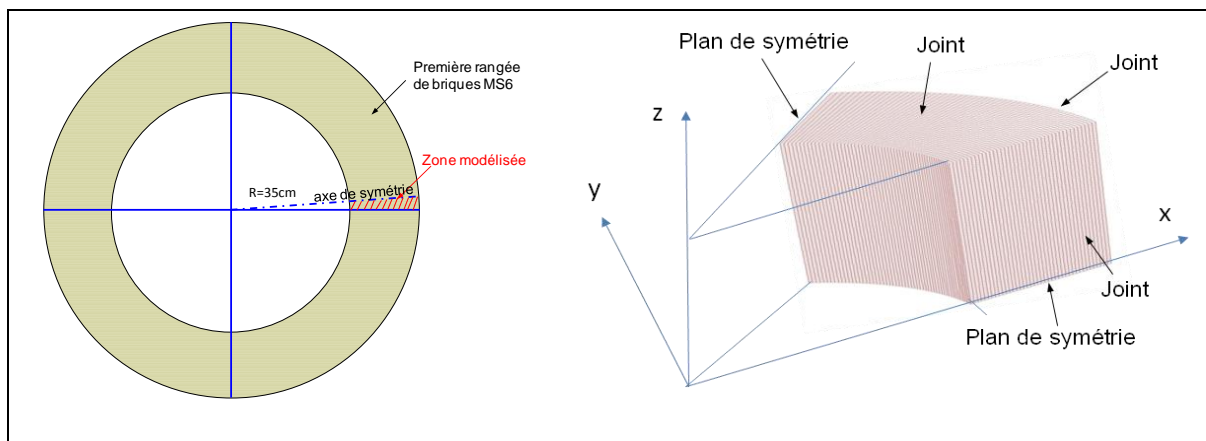


Figure 4.11 : Quart de brique modélisé en 3D

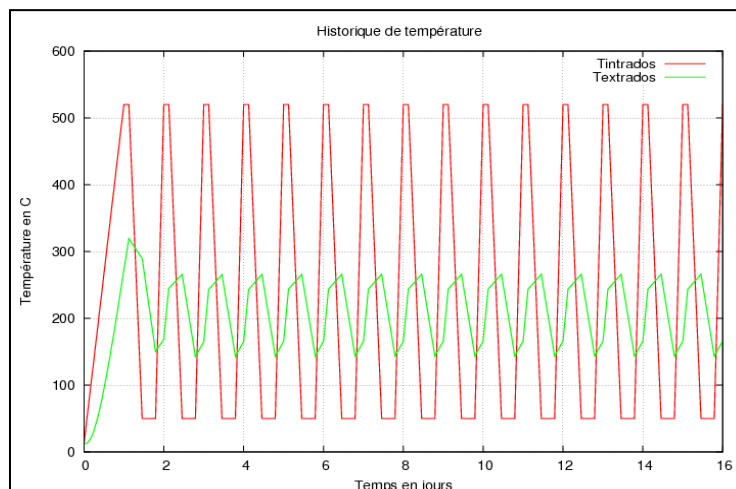


Figure 4.12 : Historiques de température appliqués à l'intradós et à l'extradós de la brique MS6

Prototype d'un régénérateur

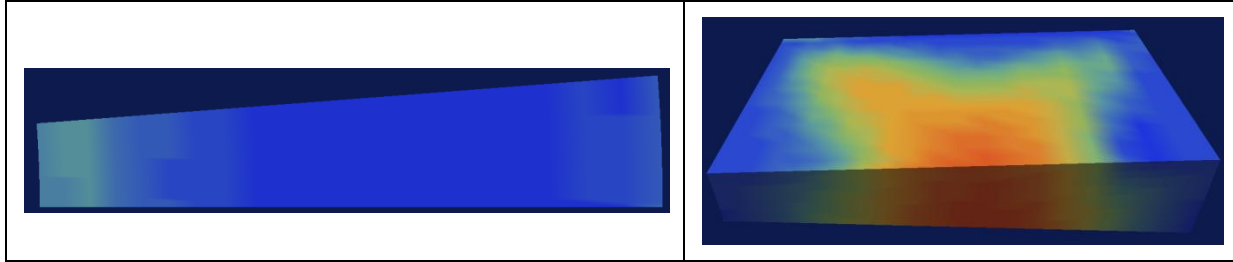


Figure 4.13 : Contrainte de traction dans la brique à la date la plus critique de 16 jours ($\sigma_{max}=4.6$ MPa)

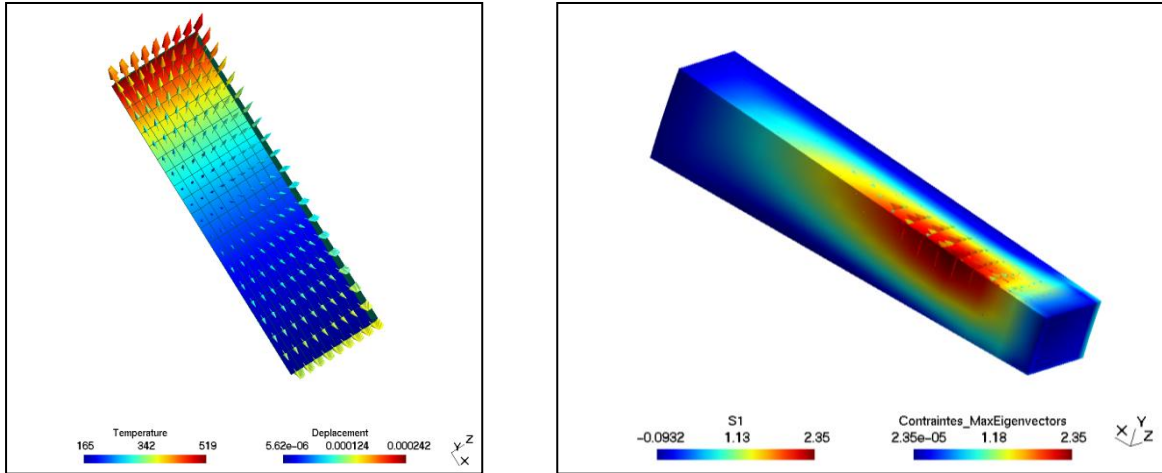


Figure 4.14 : Résultats de la simulation pour une brique de hauteur 7,5 cm (contrainte de traction maximale de 2,3 MPa à la date de 16 jours)

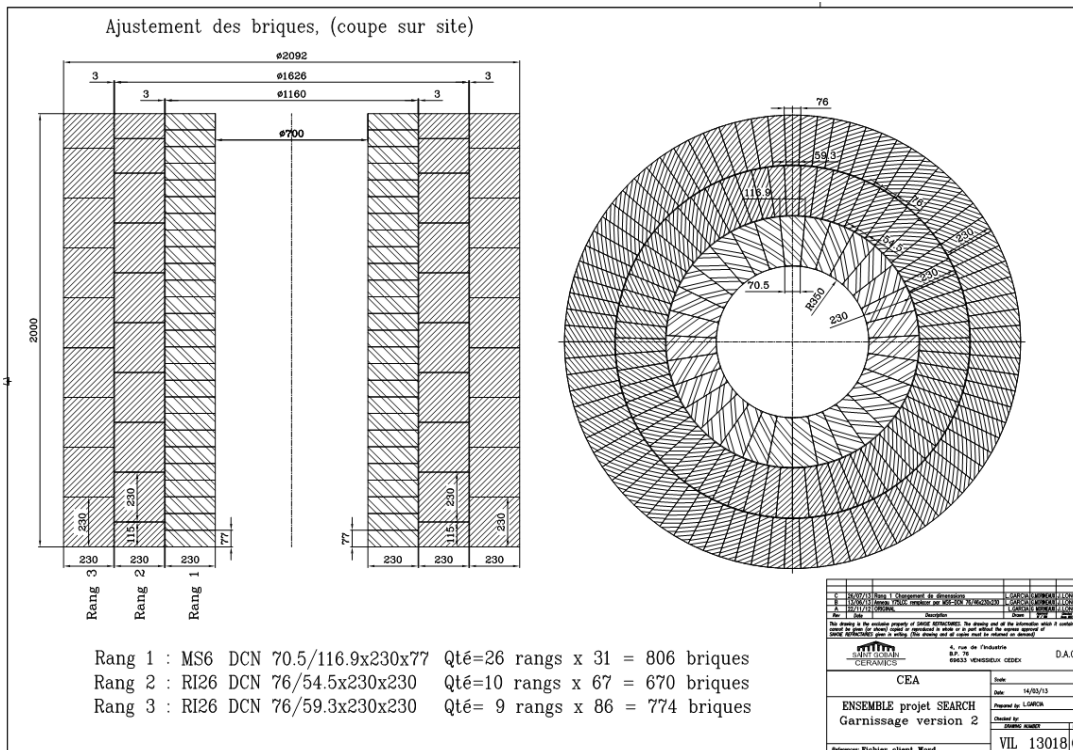


Figure 4.15 : Détail du second schéma de revêtement à tester avec des briques MS6 et RI26 (Saint Gobain)

4.2.3 Prise en compte des joints entre les briques

Le revêtement à tester dans le prototype est constitué par trois rangées de briques suivies par le béton réfractaire et l'enceinte métallique. Les briques isolantes sont séparées par des joints dans les trois directions radiale, orthoradiale et verticale. La prise en compte des joints dans un calcul de structure en 2D ou en 3D est une opération extrêmement couteuse en temps de calcul. Dans cette optique, nous avons effectué une modélisation avec l'hypothèse des déformations planes dans le but de comprendre le rôle des joints mécaniquement et de définir leurs caractéristiques. Dans une deuxième phase, des calculs en 2D axisymétriques ont permis d'analyser le rôle des joints d'un point de vue thermique et hydraulique et aussi de valider le modèle thermo-hydraulique développé.

Le modèle 2D en déformations planes ne permet pas de rendre compte des joints verticaux ainsi que d'un éventuel gradient thermique dans cette direction. Pour simplifier ce modèle, nous avons profité de la symétrie radiale pour ne prendre en compte que le 1/8ème de la structure comme le montre la Figure 4.16. Dans le cas de la configuration du revêtement faisant appel uniquement à des briques RI30 (schémas b et c de la figure), il aurait été aussi possible de réduire encore plus les limites du modèle, mais ce dernier a été aussi utilisé pour étudier les autres schémas de revêtement (en particulier le schéma a utilisant des briques denses). Les calculs sont réalisés à l'aide du logiciel du centre de Géosciences VIPLEF.

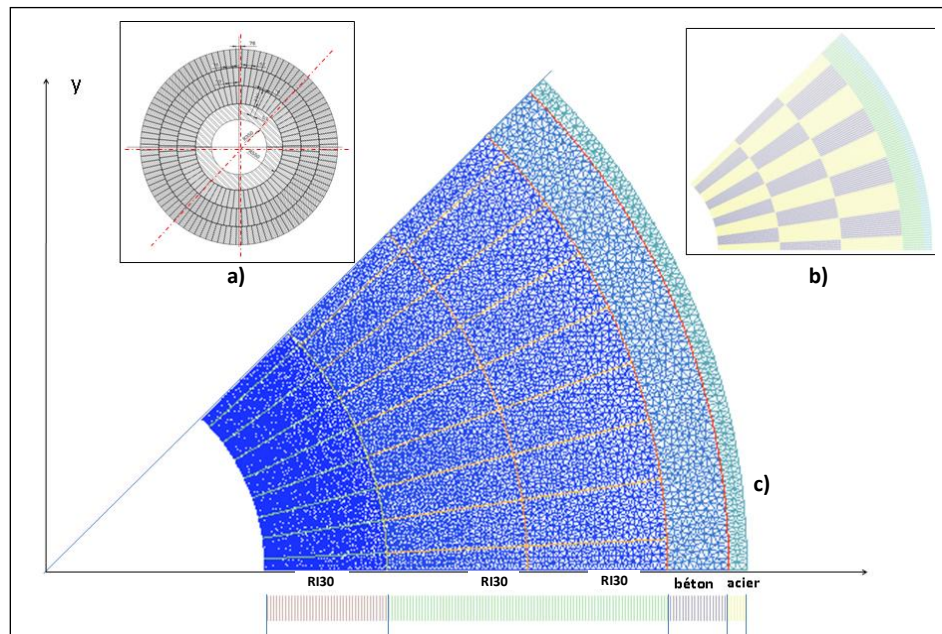


Figure 4.16 : Modèle 2D en déformations planes

Sous une compression normale, le rapprochement des deux faces d'un joint est non-linéaire, la contrainte normale suit une loi hyperbolique exprimée par l'équation suivante :

$$\sigma_n = \frac{k_{n0}V}{1 - \frac{V}{e}} \quad (4.87)$$

où k_{n0} est la rigidité normale initiale, e est la fermeture maximale du joint, elle correspond à l'asymptote de la loi hyperbolique et V correspond à la fermeture du joint. La Figure 4.16 montre une courbe typique du comportement normal du joint en compression.

Le comportement du joint au cisaillement suit une loi élastoplastique parfaite : la contrainte tangentielle croît proportionnellement au déplacement tangentiel avec une pente K_t (rigidité tangentielle) jusqu'à atteindre la valeur correspondant à la plastification du joint. Le critère de Mohr-Coulomb est utilisé pour définir le seuil de plastification en admettant une cohésion nulle.

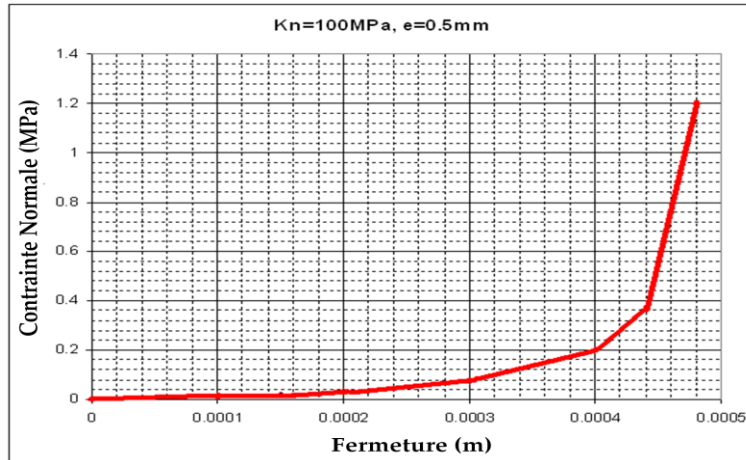


Figure 4.17 : Loi de comportement hyperbolique du joint en compression

Une hypothèse fondamentale est admise dans la modélisation 2D en déformations planes : les joints ne jouent aucun rôle dans le comportement thermique et hydraulique, leur rôle est d'assurer simplement la continuité des flux thermiques et hydrauliques. La Figure 4.18 montre le profil thermique dans le revêtement à différentes dates.

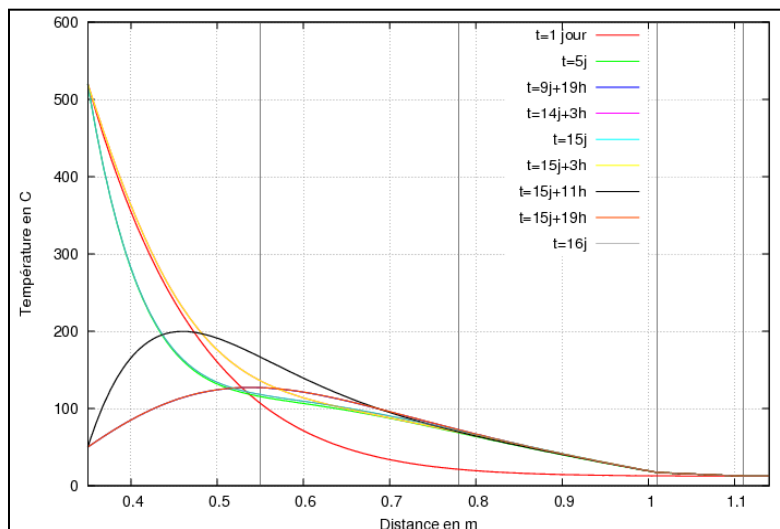


Figure 4.18 : Profils thermique dans le revêtement

Dans un premier temps, des simulations THM ont été effectuées en imposant une continuité entre les briques RI30. Les résultats obtenus mettent en évidence de fortes contraintes de traction et de compression qui peuvent entraîner la rupture du matériau.

Les calculs effectués en intégrant des joints entre les briques du RI30 et les autres composants du revêtement montrent clairement la réduction des contraintes de traction et de compression dans la direction orthoradiale. Ce résultat est dû aux joints qui libèrent la dilatation thermique des briques. Il est à noter que dans la direction perpendiculaire au plan 2D, les contraintes de compression sont importantes en raison de l'hypothèse des déformations planes qui imposent un déplacement nul dans cette direction.

Une étude paramétrique a été réalisée sur les propriétés des joints pour trouver les valeurs optimales pour l'expérimentation. Le Tableau 4.2 donne les propriétés retenues et la Figure 4.19 montre les profils de contraintes principales correspondant à ces valeurs. Ce sont surtout l'épaisseur et la rigidité normale qui ont été le plus examinés. Nous avons cherché à définir l'épaisseur minimale permettant de libérer les contraintes thermiques et de lui affecter par la suite la rigidité normale admissible. Les valeurs trouvées nous ont amenés à recommander de laisser les joints vides et de ne pas les remplir avec le ciment alumineux couramment utilisé dans ce type d'application.

Tableau 4.2 : Propriétés mécaniques des joints

K_{n0} (MPa/m)	e (mm)	K_t (MPa/m)	φ (°)
100	0,5	100	30

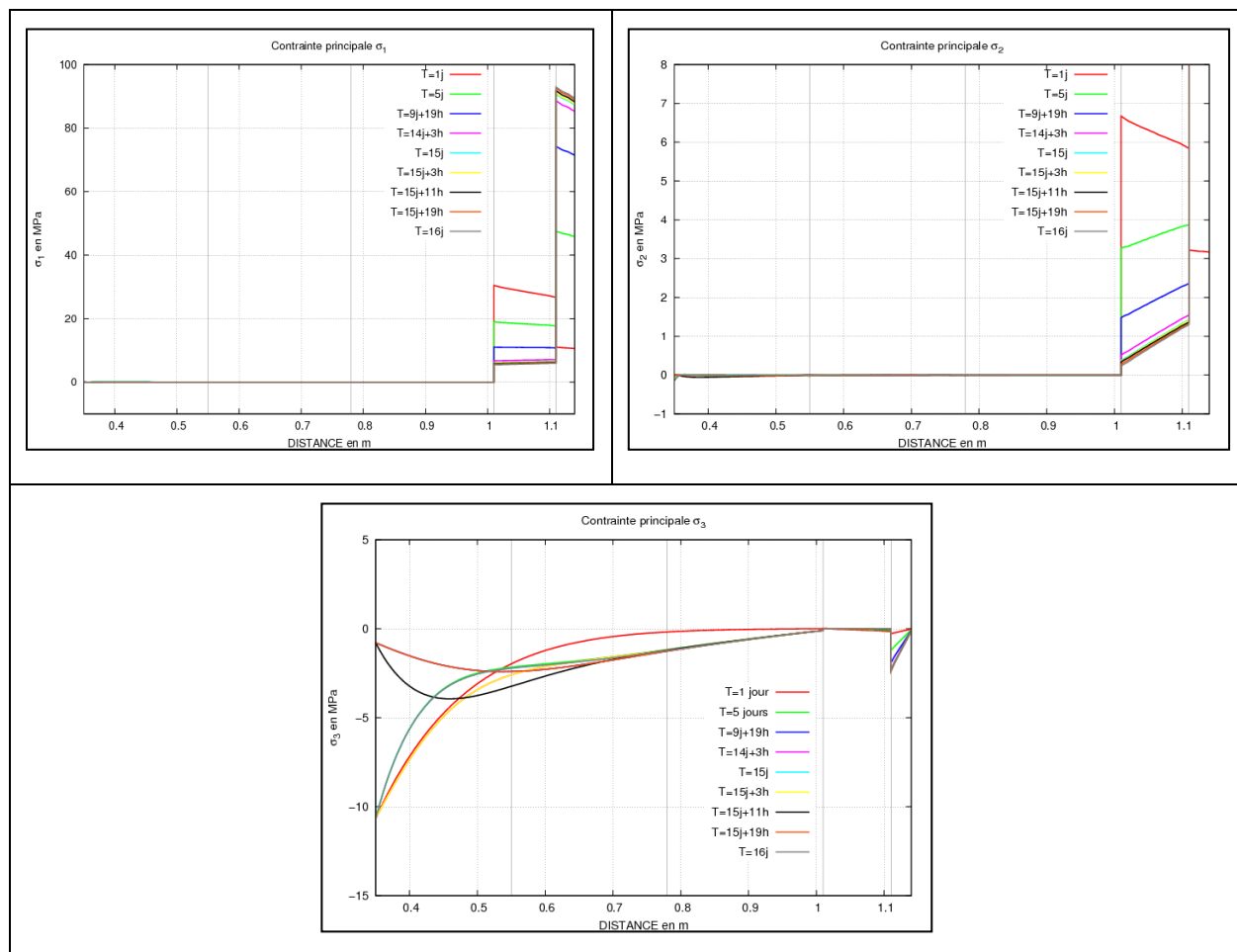


Figure 4.19 : Contraintes principales dans le revêtement avec les propriétés retenues des joints

Nous avons conduit par la suite des simulations en considérant le RI30 comme un seul bloc et en affectant un module de Young équivalent pour l'assemblage brique+joints. L'étude paramétrique a montré que le module qui donne les résultats les plus proches du modèle intégrant des joints est de 200 MPa (le module intrinsèque du matériau étant de 3500 MPa). Les résultats montrent aussi que les contraintes sont presque nulles dans l'isolant RI30 même dans la direction perpendiculaire au plan 2D (Figure 4.20). Ainsi, les joints permettent de libérer les contraintes thermiques et pour tenir compte de cet effet avec l'approche du milieu équivalent, il suffit de réduire suffisamment le module de Young du matériau.

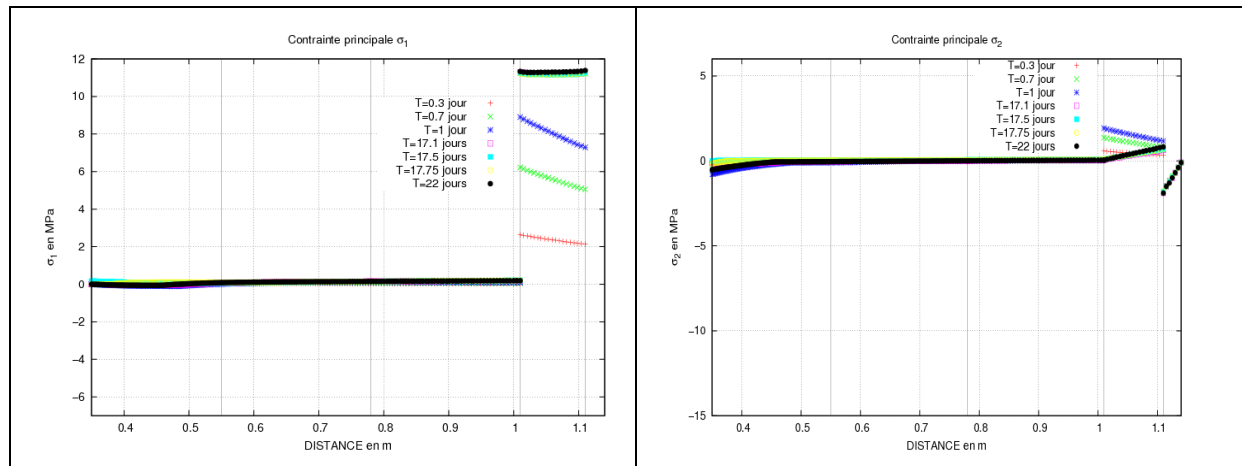


Figure 4.20 : Contraintes principales dans le revêtement avec l'approche du milieu équivalent

4.3 Essais sur le prototype

Plusieurs essais ont été réalisés sur le prototype. Les cycles réalisés comportent une montée en température et en pression, une phase de stabilisation puis une phase de décharge. Ils diffèrent par le temps de montée en température et en pression, la température et la pression maximales atteintes et le temps de stabilisation. Pour des raisons de sécurité, la température maximale atteinte est de 250°C et la pression maximale est aux alentours de 2,7 MPa.

Nous allons commencer par décrire l'ensemble des essais réalisés en expliquant les conditions opératoires de chaque essai, l'objectif recherché et les principaux résultats obtenus. Les essais sont traités tout d'abord au niveau des mesures de température pour vérifier leur pertinence, puis en analysant les résultats obtenus. Dans ce cadre, une modélisation numérique spécifique a été mise en œuvre pour aider à l'interprétation des phénomènes les plus marquants.

4.3.1 Présentations des essais réalisés

La campagne expérimentale comporte 7 séries d'essais. La première série a eu lieu au mois de juin 2013 et avait pour but de tester le comportement du prototype à basse température. Le chargement appliqué consistait à maintenir la pression constante et égale à 2,5 MPa et à faire monter la température de 20 à 100°C en 3 heures suivie d'une pause d'une heure et d'une décharge en 3 heures. Cet essai a mis en évidence les trois problèmes suivants : un échauffement de l'isolant, un fort gradient thermique dans les céramiques et un refroidissement de ces derniers pendant la phase de pause.

La deuxième série d'essais a été réalisée dans les mêmes conditions au mois d'août 2013 dans le but de vérifier les résultats obtenus et comprendre l'origine de l'échauffement de l'isolant. Cette série comportait 2 essais avec une injection de l'air chaud par le haut pour le premier, et par le bas pour le second. Les mêmes résultats ont été obtenus mais avec un échauffement de l'isolant moins prononcé lorsque l'injection de l'air chaud se faisait par le bas.

La troisième série d'essais a été effectuée au mois d'octobre 2013 avec une montée en température jusqu'à 200°C en 2 heures. Le but recherché était de comprendre les raisons du refroidissement des céramiques en effectuant une pause plus longue (2 heures). Les résultats obtenus étaient identiques aux essais précédents.

La quatrième série a été effectuée au mois de novembre 2013. La température est montée jusqu'à 200°C et la pression a atteint 2,7MPa. Le but de cette série d'essai est d'homogénéiser la température dans l'enceinte en injectant l'air pendant des longues périodes. L'injection de l'air chaud se faisait du haut sauf pour quelques essais où l'air a été injecté par le bas. Tous ces essais ont donné les mêmes résultats que précédemment. Une première hypothèse pour expliquer les phénomènes observés consiste à considérer qu'il y a un écoulement d'air dans la partie supérieure du revêtement. Cet écoulement réchauffe le revêtement par convection comme le montre Figure 4.21.

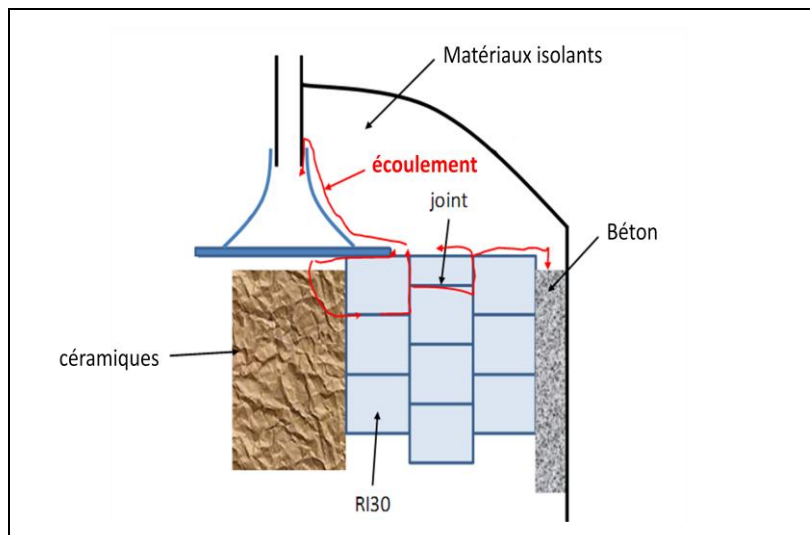


Figure 4.21 : Fuite probable en haut du prototype.

Dans le but de résoudre ce problème, un jointement au "blackite"¹ de la première et de la deuxième rangée des briques et un beurrage² de la face supérieure de l'isolant ont été effectués (Figure 4.22).

La cinquième série d'essais a été réalisée au mois de février 2014 pour vérifier l'hypothèse de fuite après le traitement effectué. La température et la pression étaient respectivement 200 °C et 1,05 MPa. L'isolant montait en température de façon peu différente de ce qui avait été observé avant la modification apportée et le problème d'échauffement persistait. En mars 2014, une sixième série d'essais a été effectuée dans le but de vérifier si l'humidité de l'air dans les céramiques affectait la chute de température pendant les heures de pause. Une mesure de ce paramètre a été donc réalisée à la sortie de l'air. Cette série avait aussi pour objectif de vérifier l'état d'endommagement de la structure en mettant en œuvre une mesure de traçage à l'hélium. Le chargement en température

¹ Le blackite est un ciment spécial utilisé pour remplir les joints entre les briques isolantes

² Le beurrage est effectué par un enduit spécial d'imperméabilisation

comprenait 5 cycles entre 50 et 200 °C avec une injection par le haut en 5 heures, suivie d'une pause d'une heure puis une décharge en 8 heures.

Le même chargement a été appliqué dans les mêmes conditions mais en injectant l'air par le bas. Les résultats montraient une absence d'humidité dans l'air et confirmaient ainsi que les céramiques étaient secs et que la chute de température n'était pas due à ce paramètre. Le traçage à l'hélium mettait en évidence une circulation d'air dans les briques isolantes.

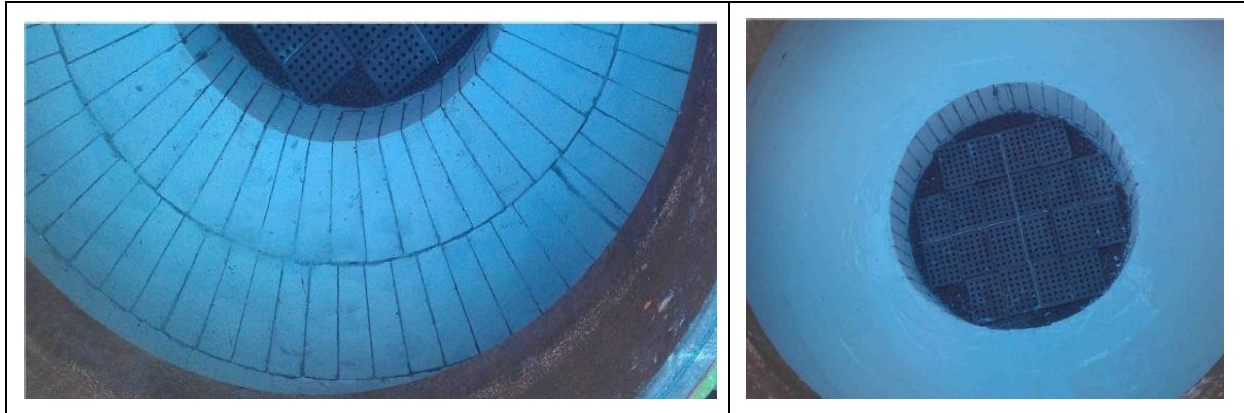


Figure 4.22 : Insertion du "blackite" entre la première et la deuxième rangée de briques (à gauche) et beurrage de la face supérieure de l'isolant (à droite, CEA/LITEN).

Au mois d'avril 2014, une dernière série d'essais a été effectuée dans les mêmes conditions de cyclage mais sans pause pour essayer de comprendre les raisons de la perte de température dans les céramiques. Les résultats obtenus n'ont pas permis malheureusement d'avancer dans l'explication de ce phénomène.

Outre les aspects administratifs liés à la conformité et à la mise en sécurité du prototype d'essais qui ont engendré un retard très significatif de la campagne d'essais, plusieurs problèmes techniques ont été rencontrés et ont aussi accentué ce retard. Nous citons à titre d'exemple la panne du compresseur liée à la présence d'eau dans l'huile du 2ème étage de compression. Ceci est dû, selon le constructeur, à la condensation de la vapeur de l'air comprimé liée au fonctionnement intermittent du compresseur. Un autre problème d'ordre informatique s'est produit suite à la perte de liaison avec l'acquisition de données consécutive à une mise à jour de Windows.

4.3.2 Analyse des mesures de température

L'interprétation de tous les essais réalisés est basée essentiellement sur les mesures des capteurs de température (thermocouples). Il est donc indispensable de commencer par analyser ces mesures pour s'assurer de leur validité et de la pertinence de leurs résultats.

Ces mesures sont prises au niveau de capteurs disposés suivant quatre directions dans l'espace comme cela a été expliqué dans la Figure 4.6. Nous avons établi une comparaison entre les mesures dans deux directions D1(Nord) et D2(Est) pour vérifier si le caractère axisymétrique est respecté. Cette comparaison est effectuée pour un essai de la série 4 jugée la plus représentative. Afin de simplifier cette démarche, le Tableau 4.3 récapitule le positionnement des capteurs et leurs références. La Figure 4.23 montre quelques comparaisons entre les mesures dans les 2 directions pour différents points du prototype en fonction de la température dans les céramiques (au cœur du prototype).

Tableau 4.3 : Positions et références des capteurs

Hauteur (m)	Rayon (m)					
	0,36	0,57	0,59	0,8	0,82	1,03
1,955	H1R1	H1R2	H1R3	H1R4	H1R5	H1R6
1,725	H2R1	H2R2	H2R3	H2R4	H2R5	H2R6
1,495	H3R1	H3R2	H3R3	H3R4	H3R5	H3R6
1,265	H4R1	H4R2	H4R3	H4R4	H4R5	H4R6
1,035	H5R1	H5R2	H5R3	H5R4	H5R5	H5R6
0,805	H6R1	H6R2	H6R3	H6R4	H6R5	H6R6
0,575	H7R1	H7R2	H7R3	H7R4	H7R5	H7R6
0,345	H8R1	H8R2	H8R3	H8R4 <td H8R5	H8R6	
0,115	H9R1	H9R2	H9R3	H9R4	H9R5	H9R6

Pour les deux capteurs H1R1, il existe un écart très significatif entre les mesures dans deux directions différentes, qui peut atteindre 60°C. Pour le capteur H1R2, les mesures sont proches dans les deux directions et l'écart maximal est égal à 10°C quand la température au cœur commence à chuter. Pour les capteurs H3R1 et H3R2, nous ne remarquons pas de différence significative. L'écart relatif entre les mesures des capteurs dans les différentes directions se situe généralement autour de 0.5% et peut atteindre ponctuellement les 50%. Ceci peut être dû à un dysfonctionnement de quelques capteurs. Ainsi, le caractère axisymétrique des mesures n'est pas respecté partout.

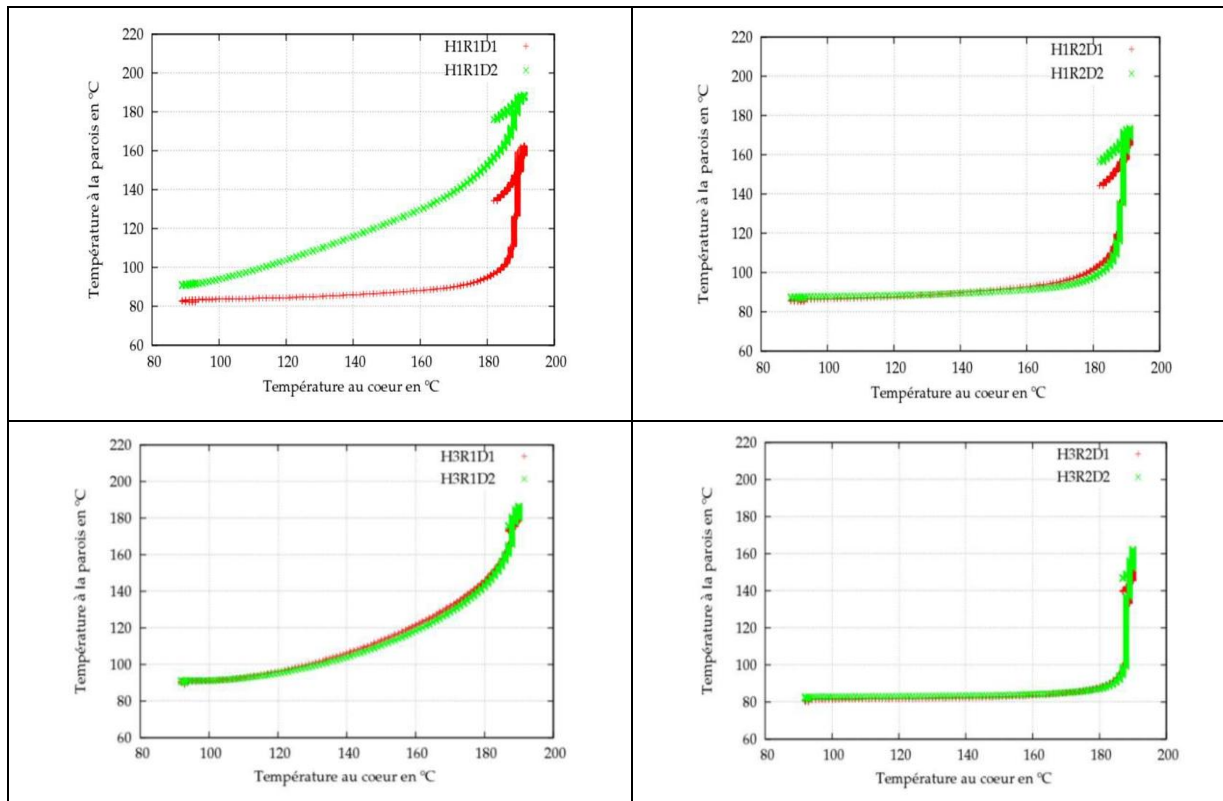


Figure 4.23 : Comparaison entre les mesures suivant deux directions à différentes positions du prototype

La Figure 4.24 montre les mesures des trois capteurs H1R1D1, H1R2D1 et H2R1D1 en fonction de la température au cœur. La valeur du capteur H2R1D1 est beaucoup plus importante que celle du capteur H1R1D1, sachant que le premier est plus haut et donc soumis à une température plus forte. De même, la température au niveau du capteur H1R2D1, qui est situé en aval de la première rangée, est plus grande que celle mesurée par le capteur H1R1D1, ce qui n'est pas évident vu que ce dernier se situe à la paroi et donc est censé être plus en contact avec l'air chaud.

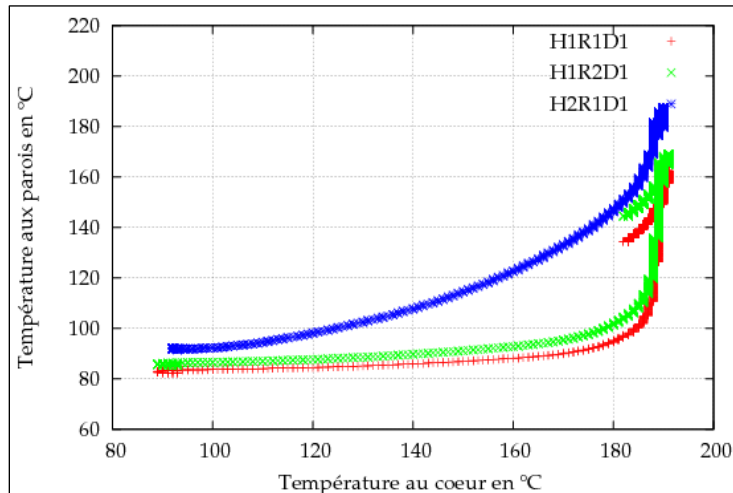


Figure 4.24 : Mesures des capteurs H1R1D1, H1R2D1 et H2R1D1 en fonction de la température au cœur.

L'analyse des mesures de température montre que certains capteurs (comme le H1R1D1) indiquaient des valeurs non cohérentes dans les deux sens horizontal et vertical. Ces mesures sont erronées et sont liées à des capteurs défectueux dont le nombre reste toutefois réduit par rapport au nombre total de thermocouples mis en place. Elles sont écartées dans l'analyse des résultats des essais.

En conclusion, nous considérons que les résultats obtenus sont fiables et que les problèmes mis en évidence par les différents essais sont réels et méritent d'être expliqués.

4.3.3 Analyse des phénomènes observés

Le phénomène le plus marquant qui ressort de tous les essais réalisés concerne l'échauffement des briques isolantes qui leur fait perdre leur rôle essentiel d'isolation. La Figure 4.25 montre le champ de température dans la maquette obtenu par les mesures des capteurs lors la cinquième série d'essais. Des températures très élevées sont remarquées dans la partie haute de la maquette. Ce phénomène est présent dans tous les essais effectués, et peut être dû à une circulation de l'air chaud entre les différentes briques de l'isolant RI30, ce qui peut causer un échauffement par convection. Cette température élevée s'est manifestée dans le bilan thermique où on observe une grande enthalpie au niveau de la première rangée d'isolant par rapport à l'enthalpie stockée dans le cœur (Figure 4.26).

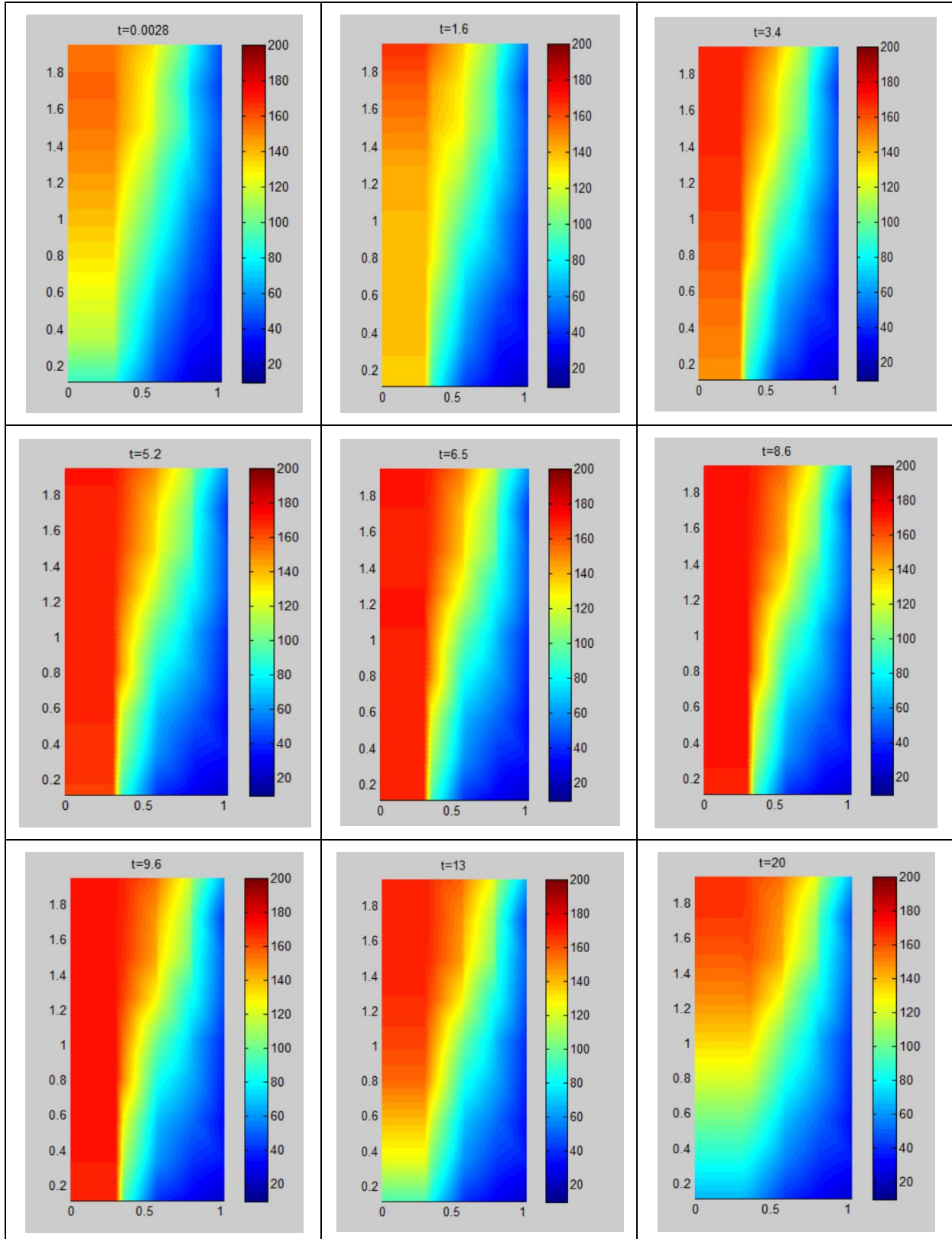


Figure 4.25: Température en fonction du temps et l'espace pour la cinquième série d'essais (en abscisse on donne en m le rayon à partir du centre de l'enceinte et en ordonnée, la hauteur)

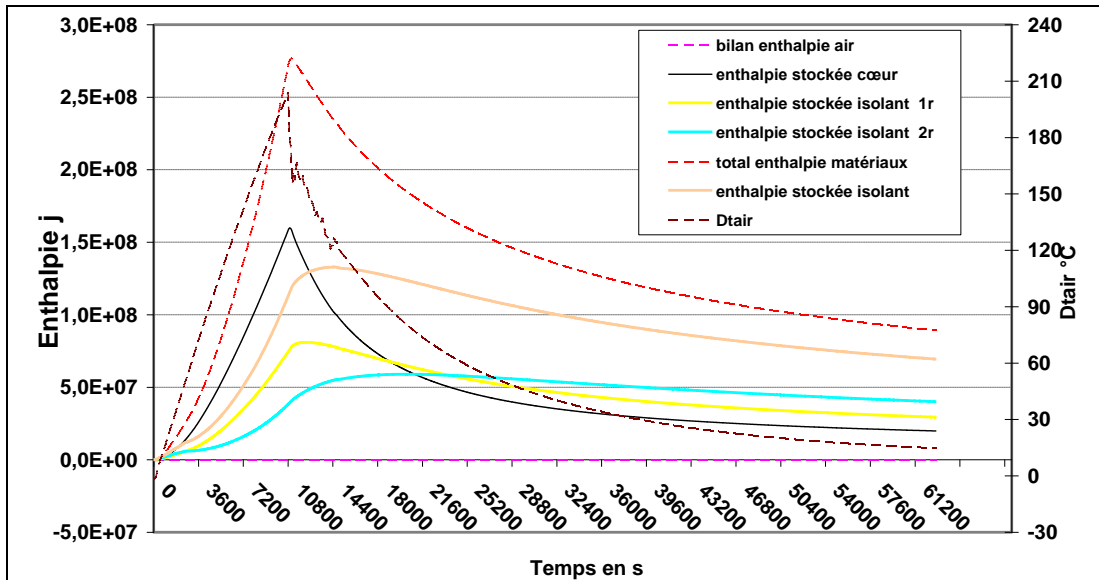


Figure 4.26 : Bilan d'enthalpie de la cinquième série d'essais (CEA/LITEN).

Les essais ont mis également en évidence un gradient de température suivant la hauteur de la maquette. Ce phénomène est dû vraisemblablement au caractère transitoire de l'expérience qui empêche une homogénéisation de la température dans les céramiques dans tous les essais effectués. En outre, la pression s'homogénéise rapidement avec un faible gradient de 2 mbar suivant la hauteur en raison de la perte de charge. La Figure 4.27 montre, pour la sixième série d'essais, la température dans différents points du prototype, la différence entre la température en haut et la température en bas, la pression et le débit. Le gradient de température entre le haut et le bas du prototype dans cette figure peut atteindre 120°C.

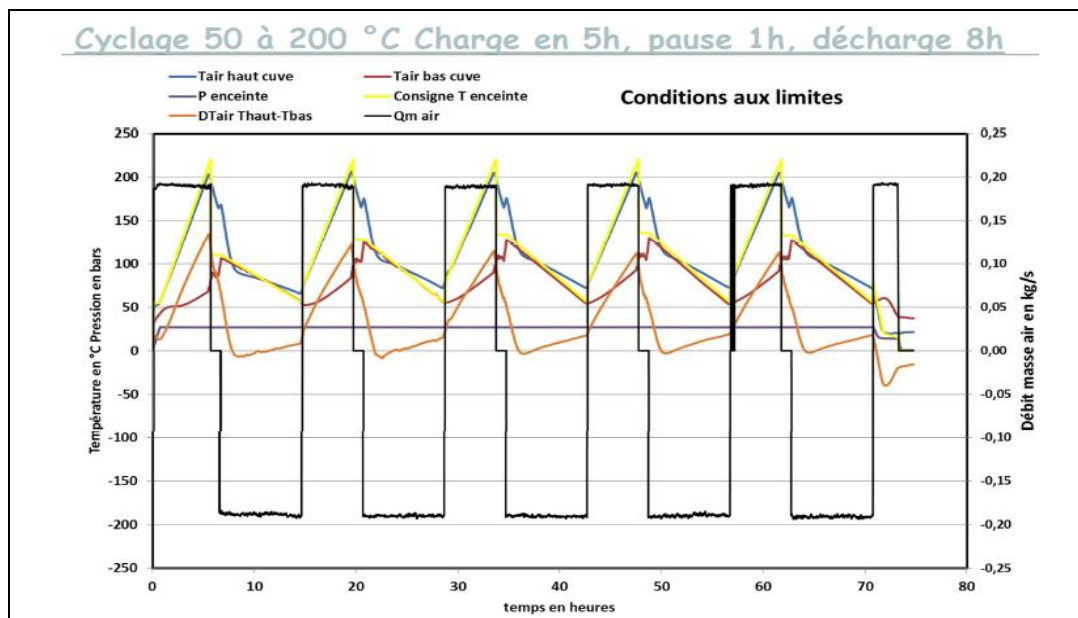


Figure 4.27 : Température dans différents points du prototype, différence entre la température en haut et la température en bas, pression et débit (CEA/LITEN).

Comme souligné ci-dessus, le même essai de cyclage a été effectué en injectant l'air chaud par le bas sans toutefois changer le résultat.

Le dernier phénomène remarqué pendant les essais est relatif aux céramiques qui n'arrivaient pas à stocker la chaleur pendant la phase de pause. Ce comportement résulte certainement de l'hypothèse extrême admise dans l'expérimentation et qui a consisté à conserver les dimensions réelles du revêtement du régénérateur industriel tout en réduisant considérablement le diamètre des céramiques au niveau du prototype (0,7 m par rapport à 18 ou 20 m). Ainsi, la chaleur stockée est rapidement absorbée par l'isolant après la moindre pause.

4.4 Modélisation numérique

Parmi les trois phénomènes qui ont été mis en évidence par les résultats de la campagne d'essais, c'est surtout le phénomène d'échauffement de l'isolant qui nous a le plus interpellés puisqu'il est directement lié au cœur de cette recherche. Afin d'essayer de le comprendre et d'expliquer les mécanismes à son origine, nous avons cherché à mettre en œuvre une modélisation numérique spécifique faisant appel à différentes hypothèses.

La modélisation a consisté à faire des simulations thermo-hydrauliques fortement couplées avec le logiciel d'éléments finis COMSOL. Elle a été réalisée en trois étapes. Dans un premier temps, les briques RI30 ont été assimilées à un milieu continu ayant les mêmes propriétés que le matériau isolant lui-même. Face à la difficulté de reproduire les mesures du prototype, des simulations basées sur l'approche du milieu discontinu ont été conduites en intégrant des joints entre les briques pour rendre compte d'un éventuel écoulement à travers ces éléments. Les résultats obtenus n'étant pas toujours cohérents avec les essais sur le prototype, une nouvelle série de simulations a été relancée avec l'approche du milieu continu, mais avec des hypothèses différentes notamment au niveau des propriétés hydrauliques des matériaux.

Les deux essais qui ont fait l'objet de la modélisation numérique sont ceux qui sont conduits avec la température la plus élevée dans la série 4 (température de 250°C dans les céramiques, pression de 1,3 MPa).

4.4.1 Modélisation avec l'approche du milieu continu

Nous avons utilisé un modèle 2D axisymétrique qui considère les briques isolantes comme un seul matériau continu avec des propriétés équivalentes. Ainsi, dans ce modèle, les écoulements éventuels qui pourraient se produire entre les joints de l'isolant sont négligés. Les propriétés de l'isolant sont fournies par le Tableau 4.4 et le modèle est présenté dans la Figure 4.28. Le chargement en température et en pression appliqué aux parois de l'isolant est présenté en Figure 4.29. Le chargement thermique consiste à imposer la température mesurée aux parois et à appliquer une interpolation linéaire entre les différents points. Un gradient de pression de 2 mbar suivant la hauteur est appliqué aux parois. Un flux thermique nul et un flux hydraulique nul sont appliqués sur les autres frontières du modèle. Il est à noter que ce premier modèle prend en compte tous les éléments d'un prototype pour examiner les écoulements qui pourraient s'y produire.

Tableau 4.4 : Propriétés des matériaux considérés dans le modèle

Propriété	RI30	Béton	Acier	Isolant souple
Perméabilité (m ²)	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹⁸	10 ⁻²⁵	10 ⁻⁸
Porosité	0,65	0,15	0,001	0,99
Conductivité thermique (W/m/k)	0,40	1,75	10	0,05
Masse volumique (Kg/m ³)	1159	2300	7800	125
Capacité thermique massique (J/Kg/k)	1100	1100	450	1100

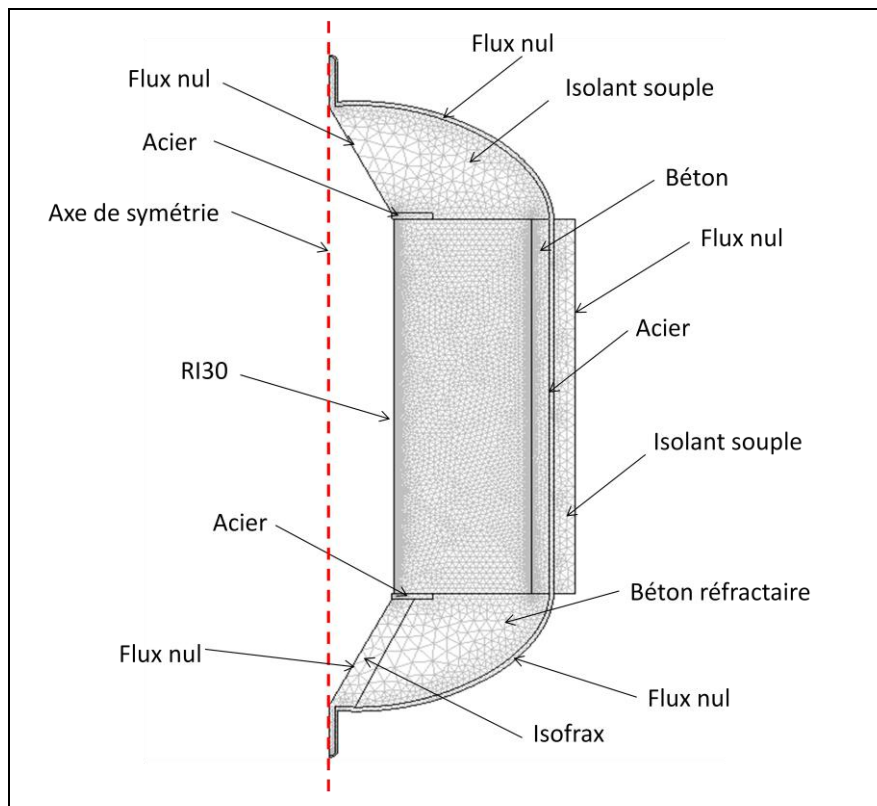


Figure 4.28 : Modèle complet en 2D axisymétrique du prototype

Les calculs numériques effectués avec ce modèle n'arrivent pas à reproduire les résultats des essais sur l'ensemble du prototype. Les résultats sont cohérents dans la partie basse du prototype. Par contre, dans la partie haute, on note une grande différence qui peut atteindre 80°C. La Figure 4.30 montre une comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats numériques.

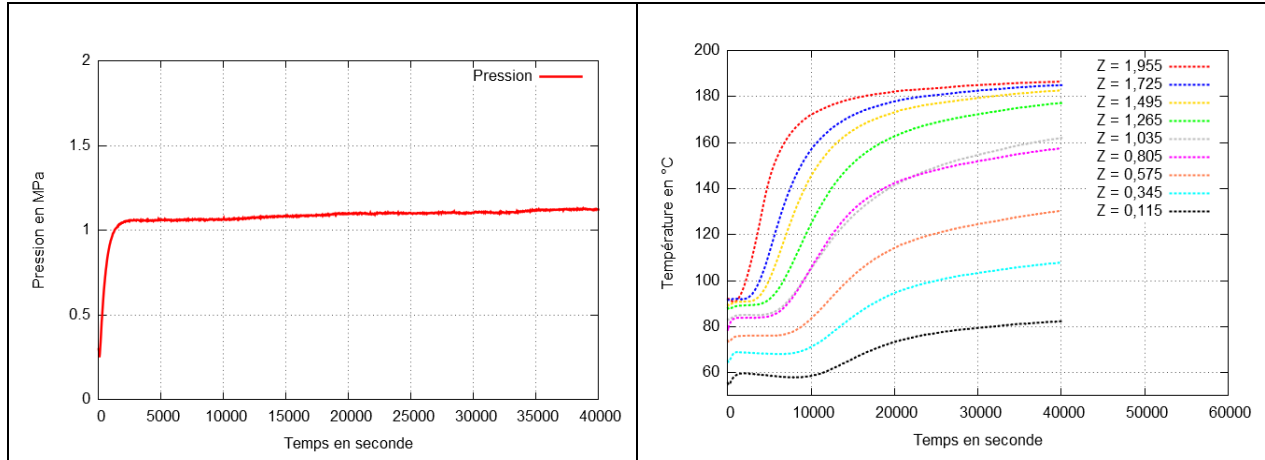


Figure 4.29 : Chargements hydraulique et thermique de l'essai 4 modélisé (premier chargement).

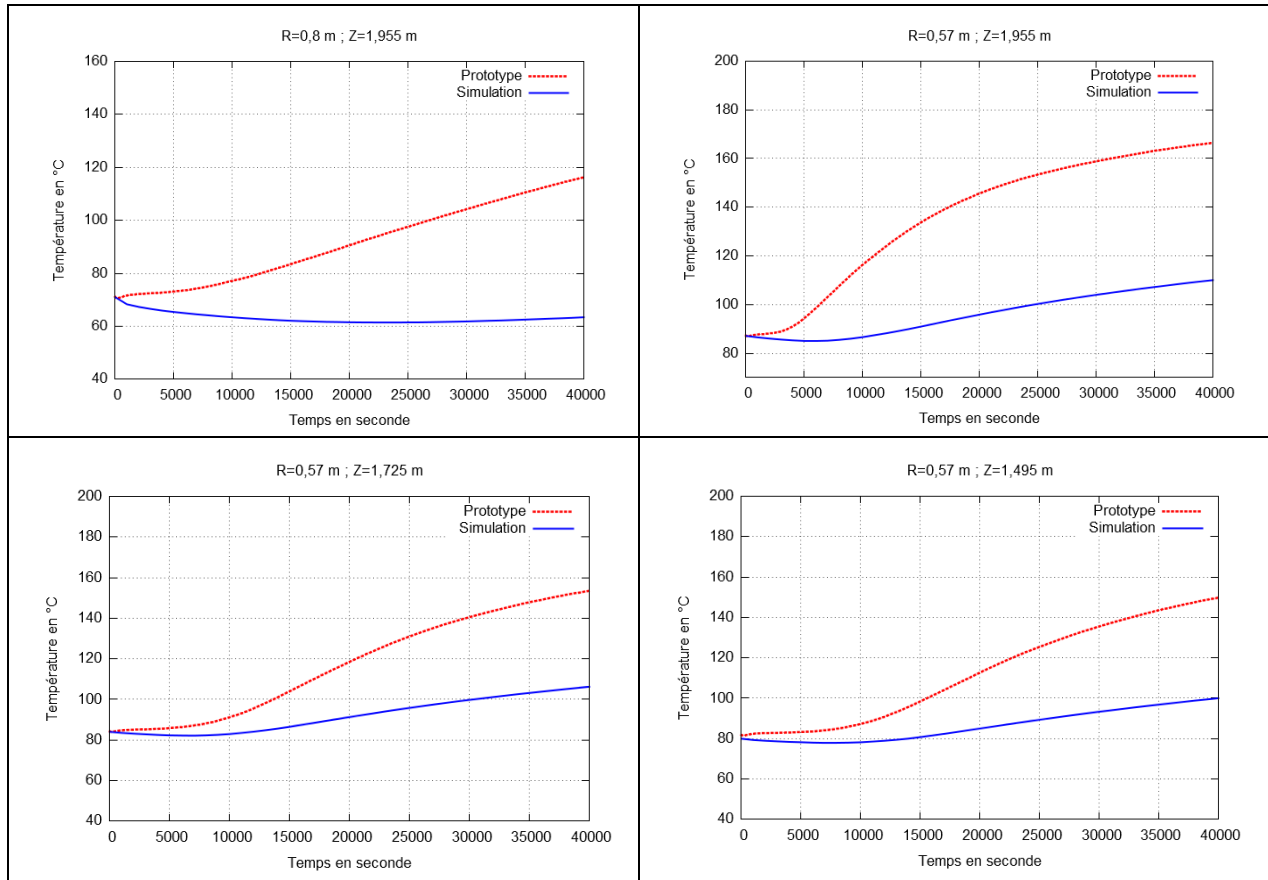


Figure 4.30 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats numériques pour différents points du prototype dans le cas de l'approche continue

4.4.2 Modélisation avec l'approche du milieu discontinu

Un nouveau modèle numérique simulant un éventuel écoulement de l'air dans les joints de l'isolant a été alors développé. Nous avons considéré que le joint peut être modélisé comme un milieu poreux de faible épaisseur (1 mm) et de grande perméabilité. Le maillage de ce type de modèle est un peu

délicat parce que l'utilisation d'éléments triangulaires conduit à un grand nombre de nœuds (> 300000) à cause de la très faible épaisseur des joints, ce qui augmente énormément le temps de calcul. Ce problème a été résolu en utilisant un maillage rectangulaire dans les joints et triangulaire dans l'isolant, ce qui a permis de réduire le nombre de nœuds à 100000. La Figure 4.31 montre les détails des 2 maillages au niveau de l'intersection de deux joints.

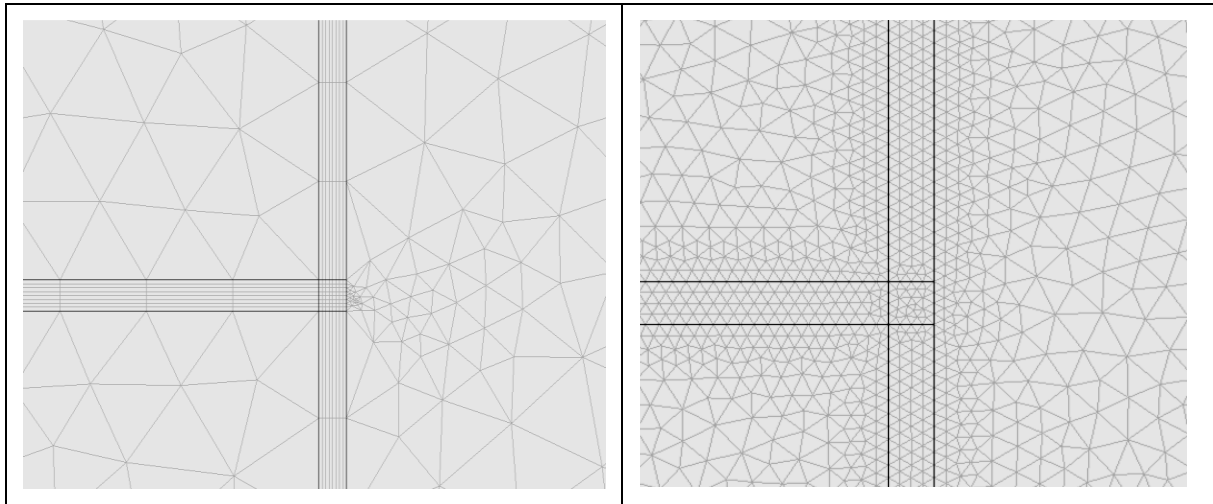


Figure 4.31 : Comparaison des maillages rectangulaire (à gauche) et triangulaire (à droite) des joints.

Le réseau de joints est considéré formé par un seul matériau avec une perméabilité plus grande que celle de l'isolant (10^{-8} m^2) et une porosité de 0,99 (matériau très poreux). Cette modélisation a causé un problème numérique en raison de la variation brusque de la perméabilité et de la porosité entre le joint et le matériau ainsi que la très faible épaisseur du joint. Pour pallier ce problème, nous avons considéré que la perméabilité et la porosité sont exprimées en fonction de l'espace dans le but d'avoir une transition linéaire de ces variables entre l'isolant et le joint comme le montre la Figure 4.32. Ainsi, le calcul ne présente plus de problèmes de stabilité numérique.

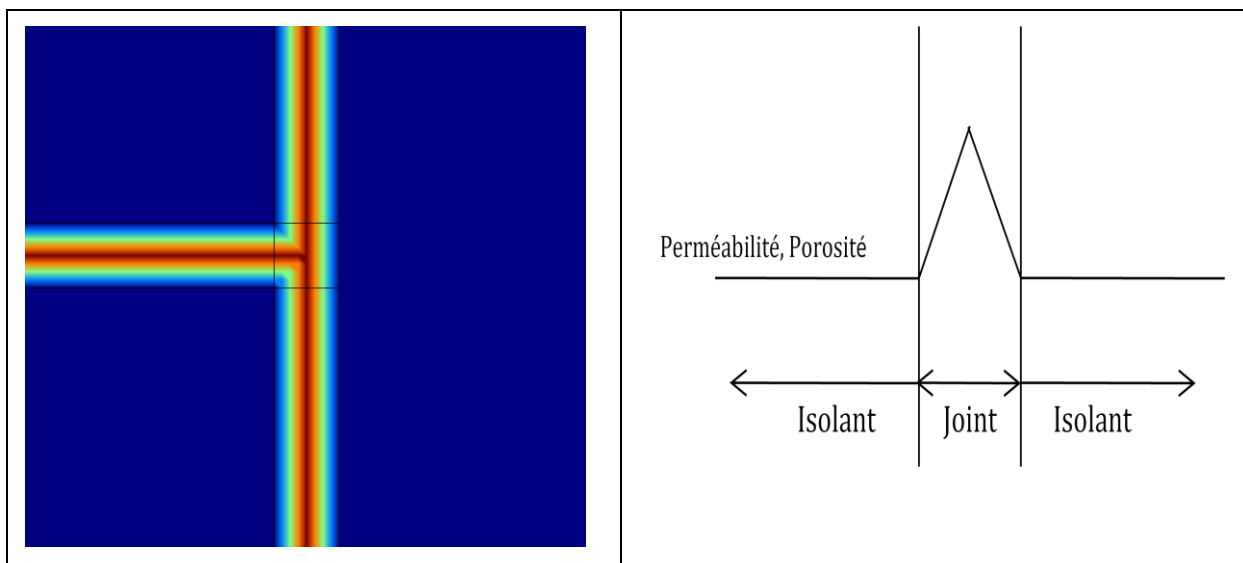


Figure 4.32 : Perméabilité et porosité dans les joints.

Les résultats de la modélisation mettent en évidence la présence d'un écoulement d'air au niveau des joints comme le montre la Figure 4.33. La vitesse maximale est au centre du joint où la perméabilité est la plus grande. Cependant, cet écoulement reste insuffisant pour reproduire le comportement obtenu expérimentalement.

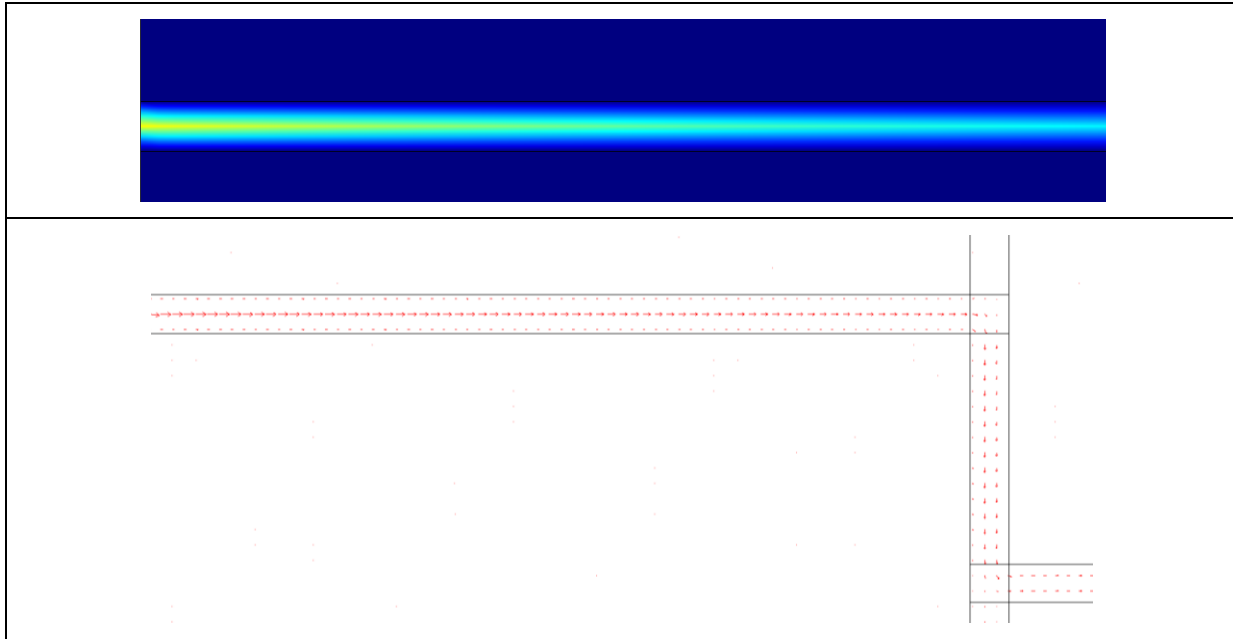


Figure 4.33 : Champ de vitesse dans les joints.

4.4.3 Influence de la perméabilité, du gradient de pression et de la viscosité

Les résultats présentés ci-dessus montrent une différence entre les simulations numériques et les mesures des essais. L'hypothèse d'un écoulement entre les joints qui serait à l'origine de l'échauffement de la partie haute du prototype n'est pas validée par le modèle numérique. Par ailleurs, lors du démontage du revêtement du prototype, nous n'avons observé aucun endommagement de l'isolant ni d'ouverture flagrante des joints séparant les briques (ouverture maximale constatée de l'ordre de 3 mm) qui pourrait modifier le régime d'écoulement dans le revêtement.

Ainsi, la seule hypothèse encore plausible pour expliquer les phénomènes observés est l'existence d'un écoulement dans l'isolant avec une vitesse significative. En effet, le flux de chaleur convectif est très influencé par la vitesse de l'air dans l'isolant, plus cette vitesse est grande plus ce flux est important. Les écoulements calculés au niveau des joints avec l'approche du milieu discontinu sont faibles et ne sont pas suffisants pour justifier les très hautes températures mesurées par les capteurs placés à 1 cm de profondeur dans les briques.

D'après la loi de Darcy décrite dans le chapitre 3, la vitesse d'écoulement est proportionnelle à la fois à la perméabilité et au gradient de pression et inversement proportionnelle à la viscosité dynamique de l'air. Dans la première simulation conduite avec l'approche du milieu continu, nous avons retenu la valeur de la perméabilité de l'isolant RI30 mesurée en laboratoire (10^{-11} m^2) et nous avons analysé les effets du gradient de pression et du mouvement induit par la gravité.

Par la suite, nous allons conduire une étude paramétrique pour étudier l'influence de la perméabilité de l'isolant et du gradient de pression qui est appliqué à sa paroi et de la viscosité dynamique de l'air.

4.4.3.1 Influence de la perméabilité sur le champ de température

Nous avons conduit 4 calculs avec 4 perméabilités différentes de l'isolant pour étudier l'effet de la perméabilité sur le champ de température dans le prototype. Les valeurs des perméabilités étudiées sont (en m^2): 10^{-11} , $5 \cdot 10^{-11}$, 10^{-10} et $5 \cdot 10^{-10}$. Le gradient de pression appliqué sur les parois est de 2 mbar et la viscosité de l'air est de $2 \cdot 10^{-5}$ Pa.s. La Figure 4.34 montre une comparaison entre les mesures du prototype et les résultats numériques obtenus. On remarque bien que plus la perméabilité est importante, plus la température est élevée (flux convectif). En effet, pour une perméabilité de l'isolant de $5 \cdot 10^{-10} m^2$, on observe des températures beaucoup plus élevées que celles mesurées dans le prototype et pour une perméabilité de $10^{-11} m^2$, les températures sont largement plus faibles. D'après les résultats, on constate que pour une perméabilité de $10^{-10} m^2$, on obtient les températures les plus proches des résultats expérimentaux.

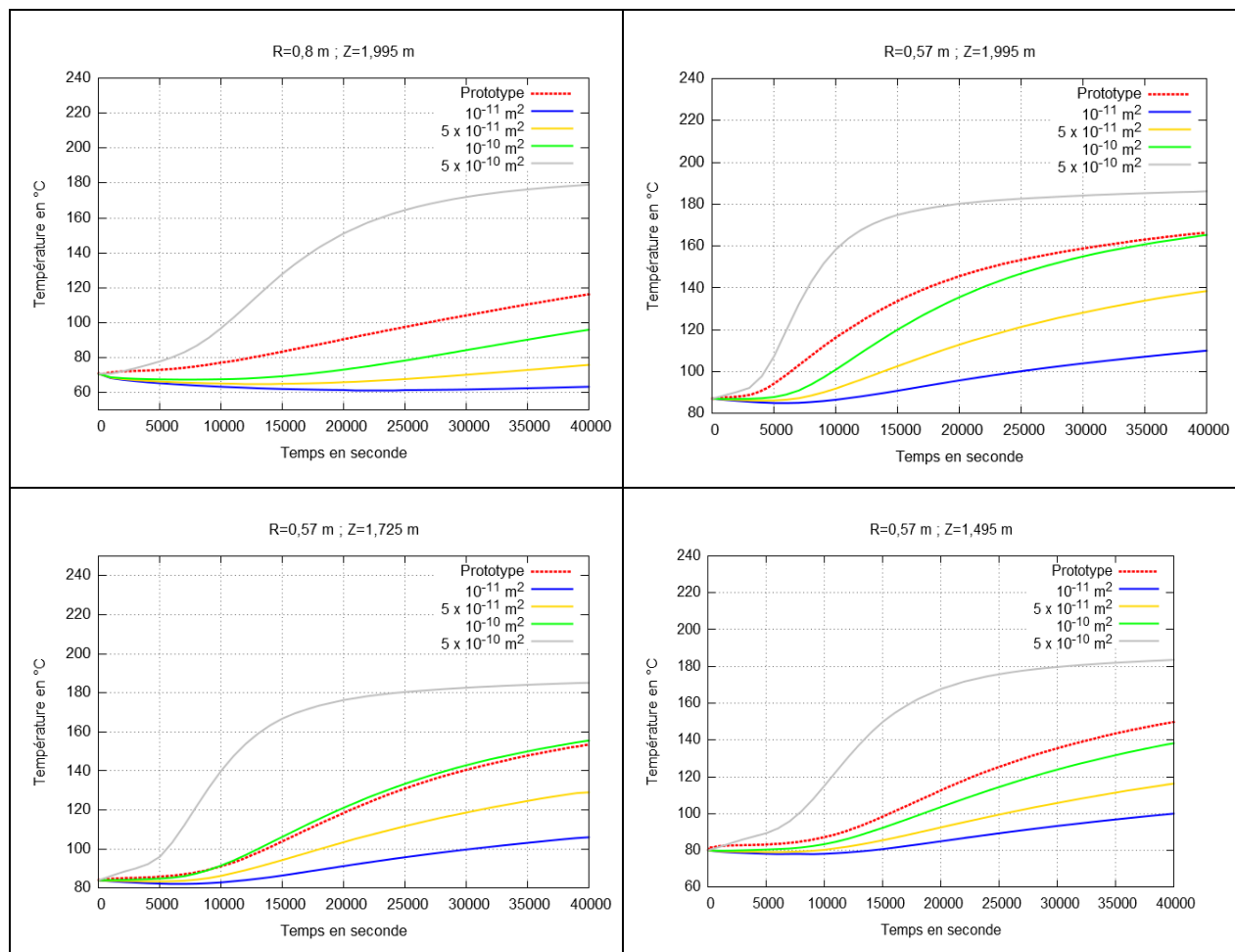


Figure 4.34 : Comparaison des résultats expérimentaux avec les résultats numériques pour différents valeurs de perméabilité de l'isolant.

4.4.3.2 Influence du gradient de pression sur le champ de température

De même que pour la perméabilité, nous avons effectué 4 calculs avec 4 valeurs différentes du gradient de pression appliqué sur la paroi. Les gradients sont (en mbar) : 0, 2, 4, 10 et 20. La perméabilité de l'isolant est de 10^{-11} m² et la viscosité dynamique de l'air est de 2.10^{-5} Pa.s. Les résultats montrent que plus le gradient de pression suivant la hauteur est grand, plus le phénomène de convection est important. Ainsi, pour un gradient de pression nul, les résultats numériques sont très éloignés des résultats expérimentaux. Nous constatons que pour un gradient de pression de 20 mbar, les résultats de la simulation sont proches des résultats expérimentaux. D'après la loi de Darcy, ces résultats sont attendus ; en effet, nous avons multiplié le gradient de pression par 10, ceci revient à multiplier les vitesses par 10. On a observé le même effet dans le paragraphe précédent lorsqu'on a multiplié la perméabilité par 10, et donc les vitesses par le même coefficient.

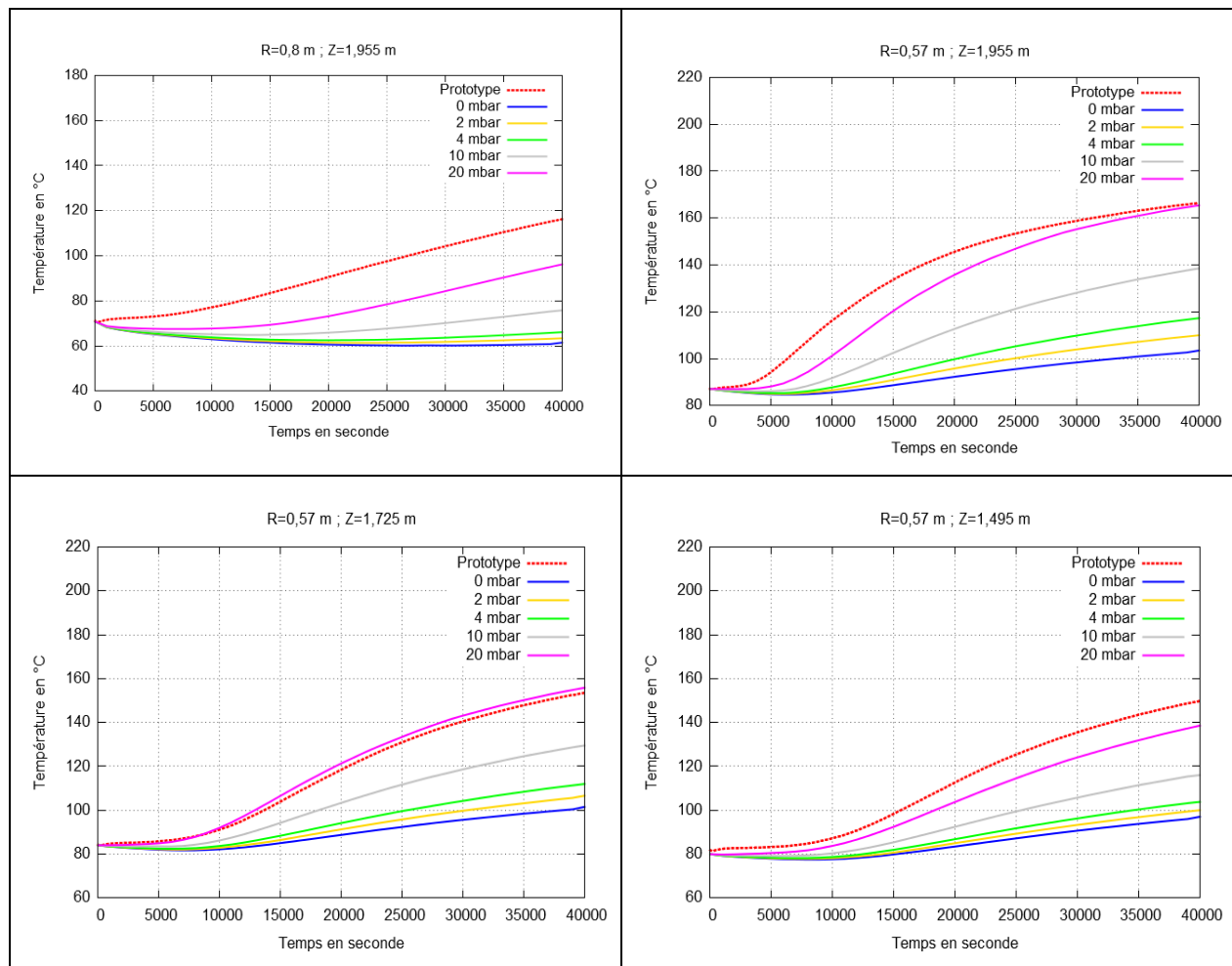


Figure 4.35 : Comparaison des résultats expérimentaux avec les résultats numériques pour différents valeurs du gradient de pression appliqués à la paroi de l'isolant

4.4.3.3 Influence de la viscosité dynamique de l'air sec sur le champ de température

Comme pour la perméabilité et pour le gradient de pression, nous avons effectué une étude paramétrique pour évaluer l'influence de la viscosité de l'air sec sur le champ de température dans le

prototype. Les 4 valeurs de viscosité étudiées sont (en Pa.s): $2 \cdot 10^{-5}$, $2,5 \cdot 10^{-5}$, $3 \cdot 10^{-5}$ et $3,5 \cdot 10^{-5}$. La perméabilité de l'isolant est de 10^{-11} m^2 et le gradient de pression est de 2 mbar. Les résultats de la Figure 4.36 montrent que la viscosité dynamique de l'air influence très peu le champ de température dans le prototype. Les résultats obtenus sont différents des mesures expérimentales à cause de la perméabilité de l'isolant égale à 10^{-11} m^2 .

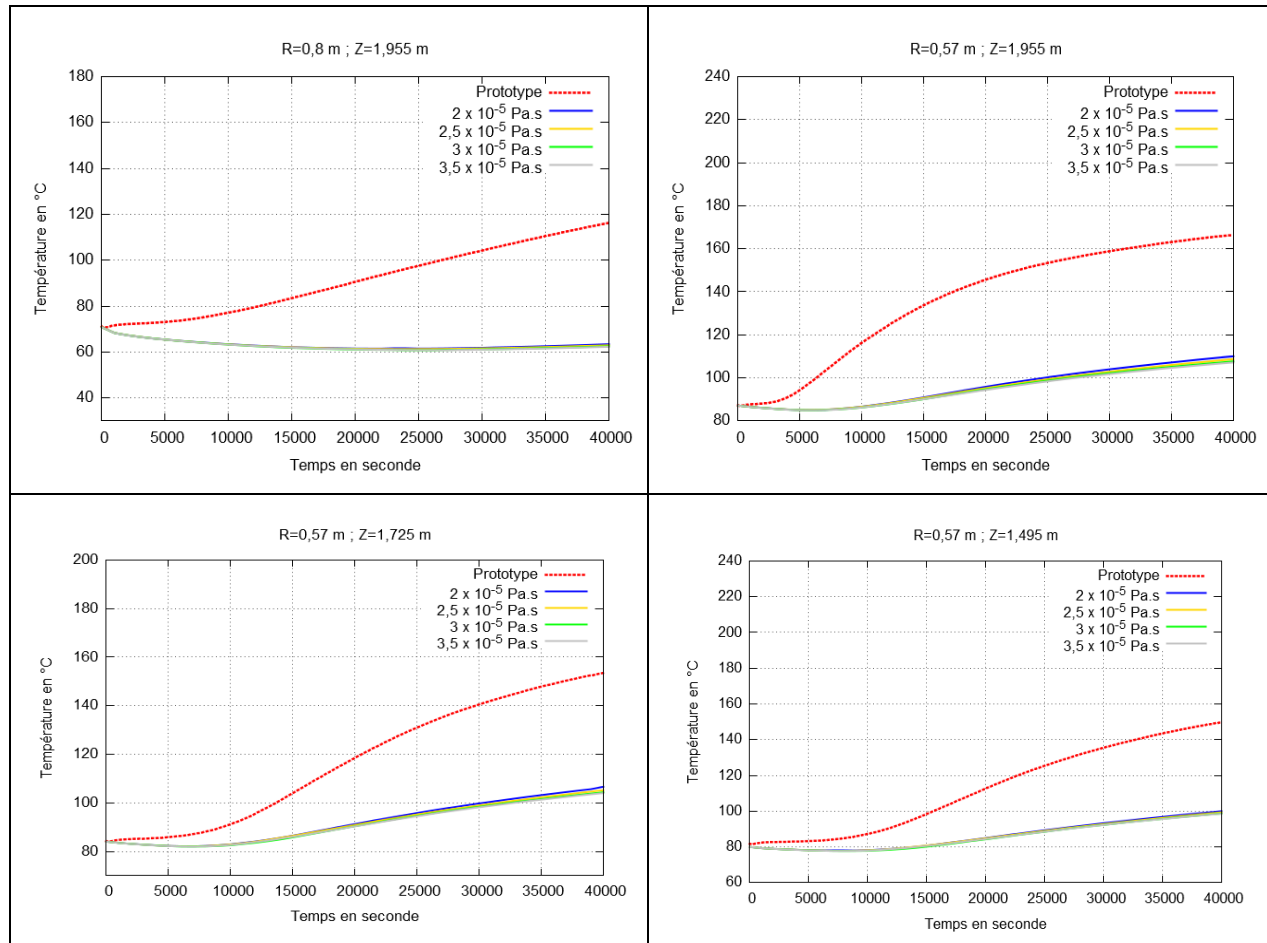


Figure 4.36 : Comparaison des résultats expérimentaux avec les résultats numériques pour différents valeurs de viscosité de l'air

4.4.3.4 Conclusion de l'étude paramétrique

L'étude paramétrique menée pour étudier l'effet de la perméabilité de l'isolant, du gradient de pression appliqué à la paroi de l'isolant et de la viscosité de l'air sur le champ de température dans le prototype a montré que le champ de température est influencé par la perméabilité et par le gradient de pression. Ainsi, une multiplication par dix de ces 2 paramètres peut changer significativement le champ de température dans le prototype. D'un autre côté, la viscosité de l'air n'a pas une marge d'influence importante.

Dans le chapitre 2, nous avons vu que les mesures de perméabilité sur le RI30 étaient difficiles et imprécises à cause de la grande rugosité et la grande porosité de ce matériau. Une multiplication de la perméabilité obtenue dans le chapitre 2 par dix semble admissible. Le gradient de pression mesuré

dans l'enceinte varie entre 1 et 4 mbar. Dans la suite nous allons considérer donc que la perméabilité de l'isolant est de 10^{-10} m^2 et que le gradient de pression appliqué aux parois est de 2 mbar et nous allons comparer les résultats numériques obtenus et expérimentaux.

4.4.4 Validation de la modélisation numérique par l'approche continue

On étudie dans ce qui suit les résultats de deux essais particuliers de la série 4 où de fortes températures ont été atteintes. Le premier chargement est décrit dans la Figure 4.29 et le deuxième est présenté dans la Figure 4.37.

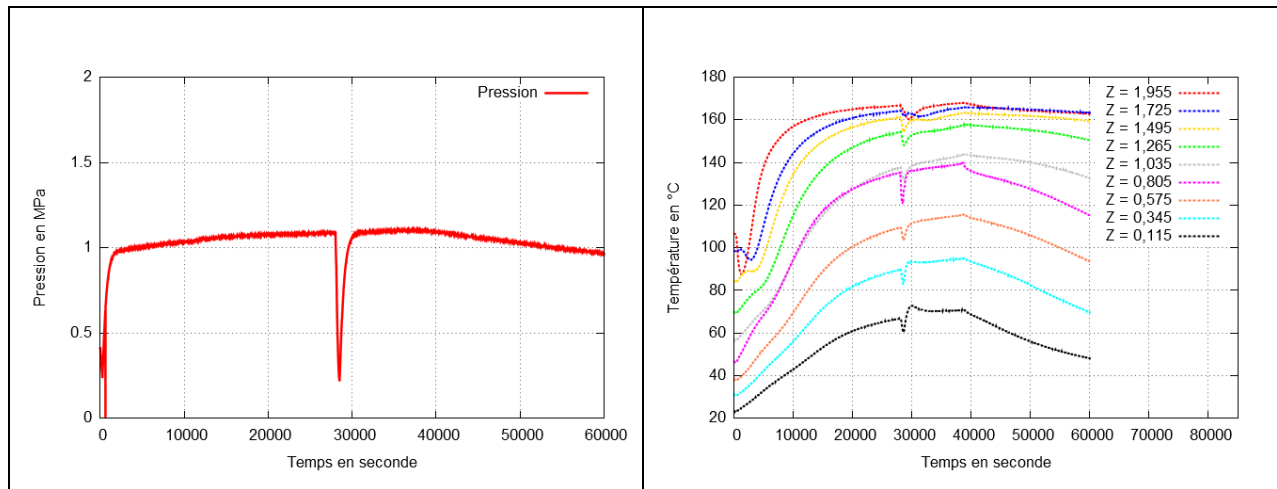
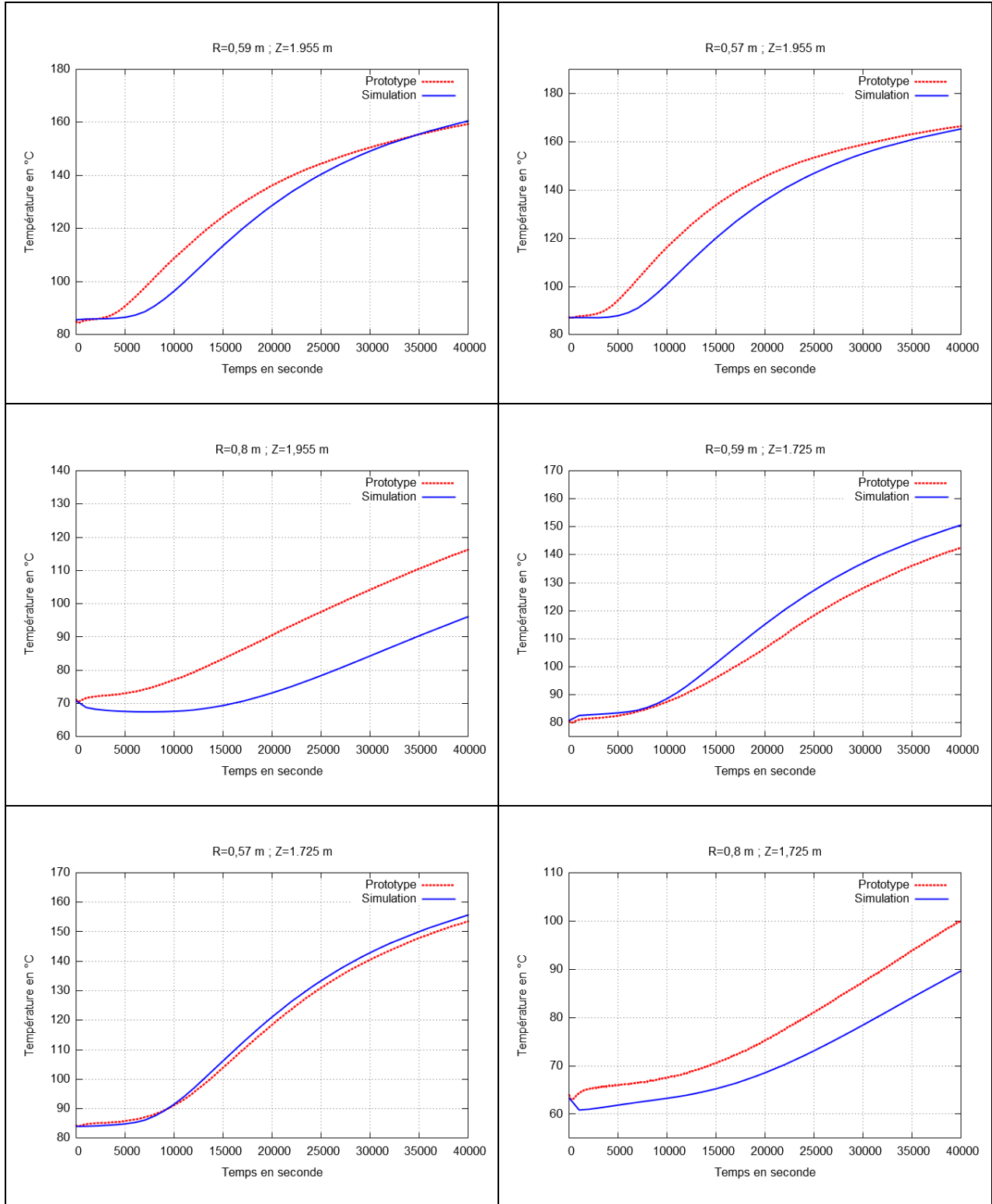


Figure 4.37: Chargements hydraulique et thermique de l'essai 4 modélisé (2^{ème} chargement).

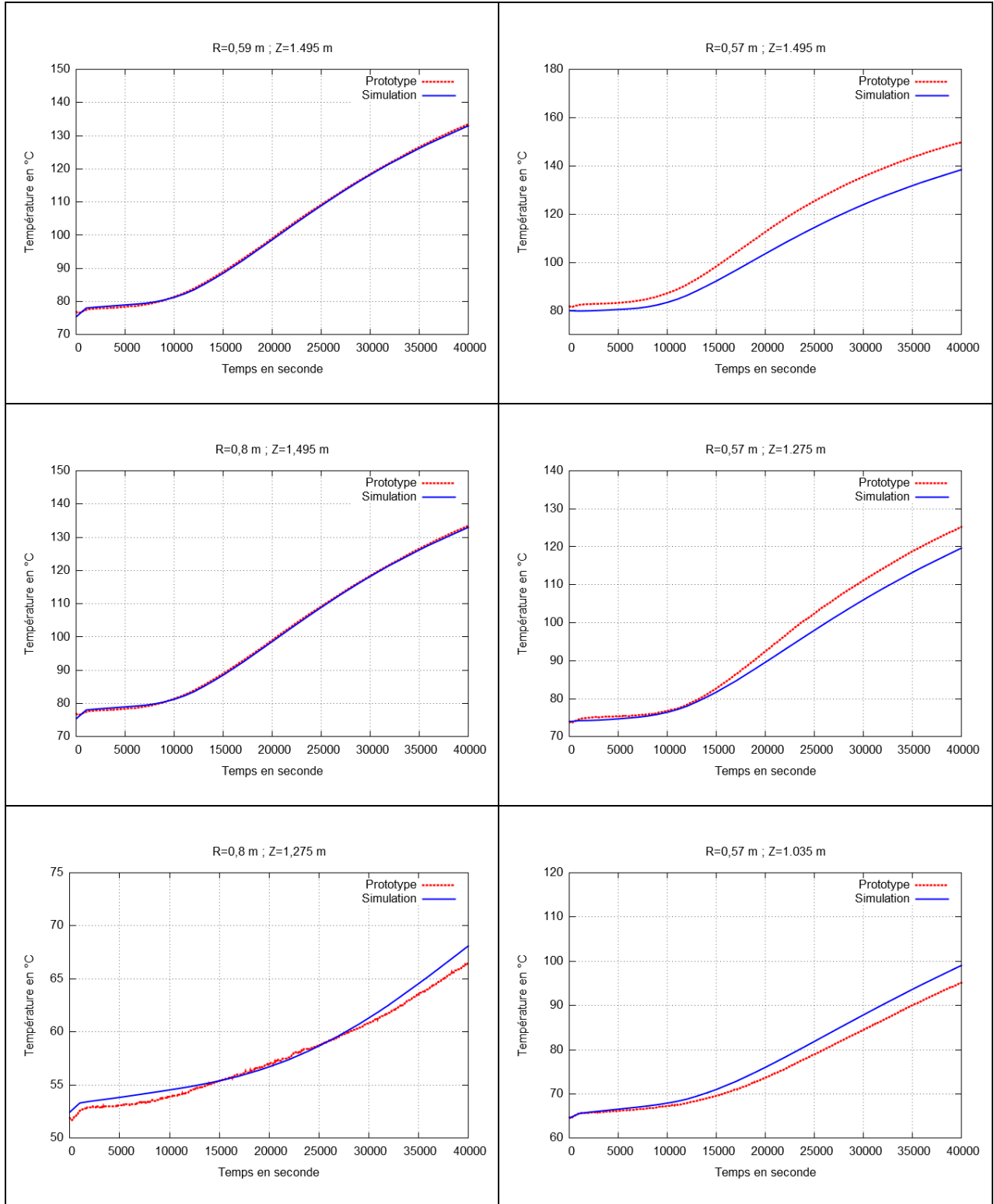
Les résultats du premier chargement de la série d'essais sont présentés dans la Figure 4.38. La différence relative entre les mesures expérimentales et les résultats des calculs varie entre 1 et 10 % dans la plupart des cas et atteint un maximum de 16 % dans certains cas comme pour le point de coordonnées (0,8 ; 1,955). Les points qui présentent un écart relatif supérieur à 10 % sont majoritairement situés sur des rayons supérieurs à 0,8m et à des hauteurs supérieures à 1,5 m. La Figure 4.40 montre la carte de température à l'instant $t = 40000$ secondes pour le premier chargement, les fortes températures sont bien visibles en haut du prototype.

Concernant le deuxième chargement, nous observons une chute rapide de la pression de 1,1 MPa jusqu'à 0,25 MPa entre les instants $t = 28000$ secondes et $t = 29500$ secondes. Cette chute de pression entraîne une diminution des vitesses et donc une diminution du flux convectif, ce qui fait diminuer la température dans le prototype. La Figure 4.39 montre une comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats numériques pour le deuxième chargement de la série 4. Cette comparaison permet de déduire qu'il existe un très bon accord entre les résultats numériques et les mesures expérimentales pour les points situés dans la première rangée de l'isolant ($R=0,57$ m et $R=0,59$ m). Des écarts relatifs qui peuvent atteindre 15% sont obtenus pour quelques points situés dans la deuxième rangée de l'isolant ($R=0,8$ m et $R=0,82$ m).

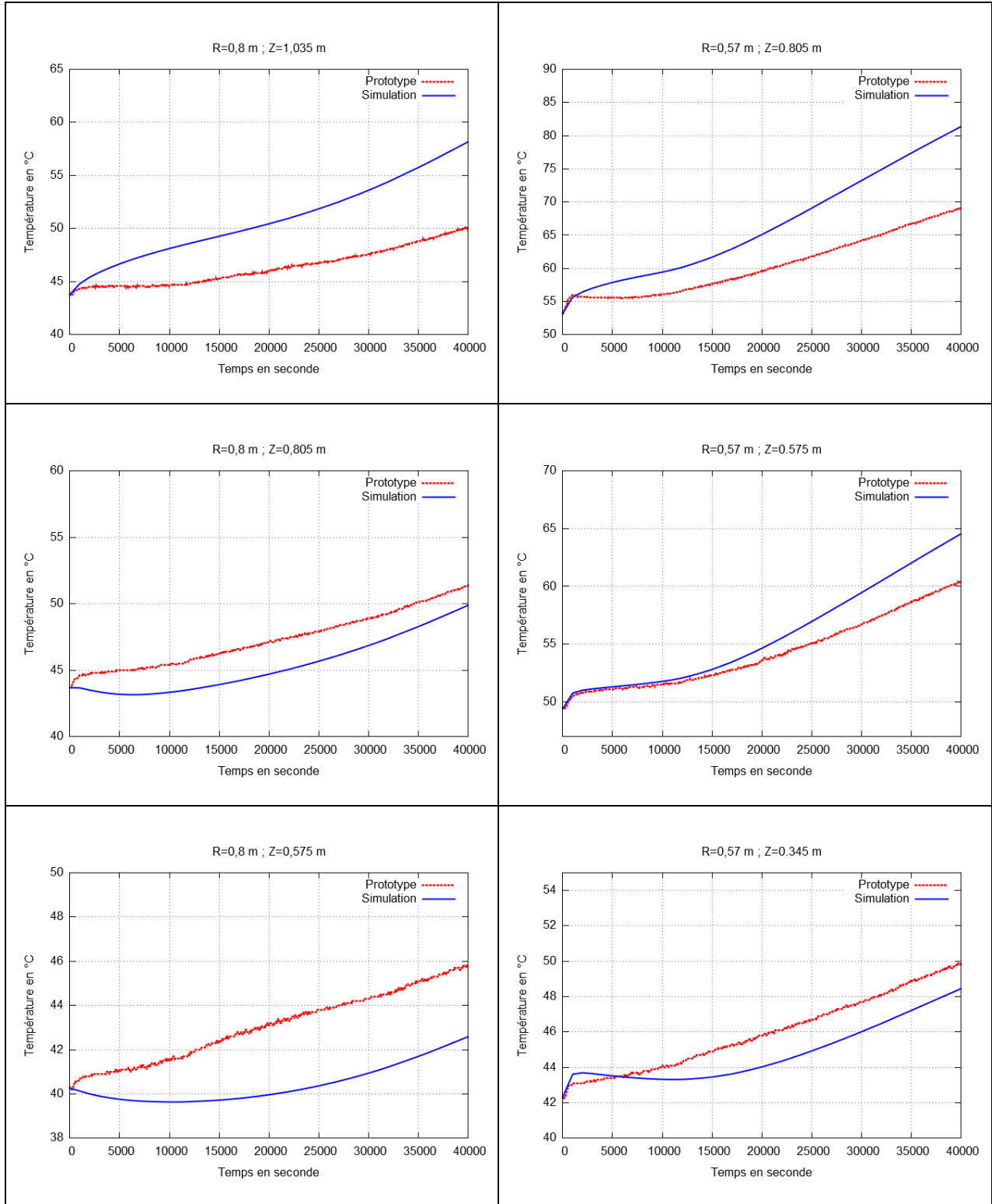
Prototype d'un régénérateur



Prototype d'un régénérateur



Prototype d'un régénérateur



Prototype d'un régénérateur

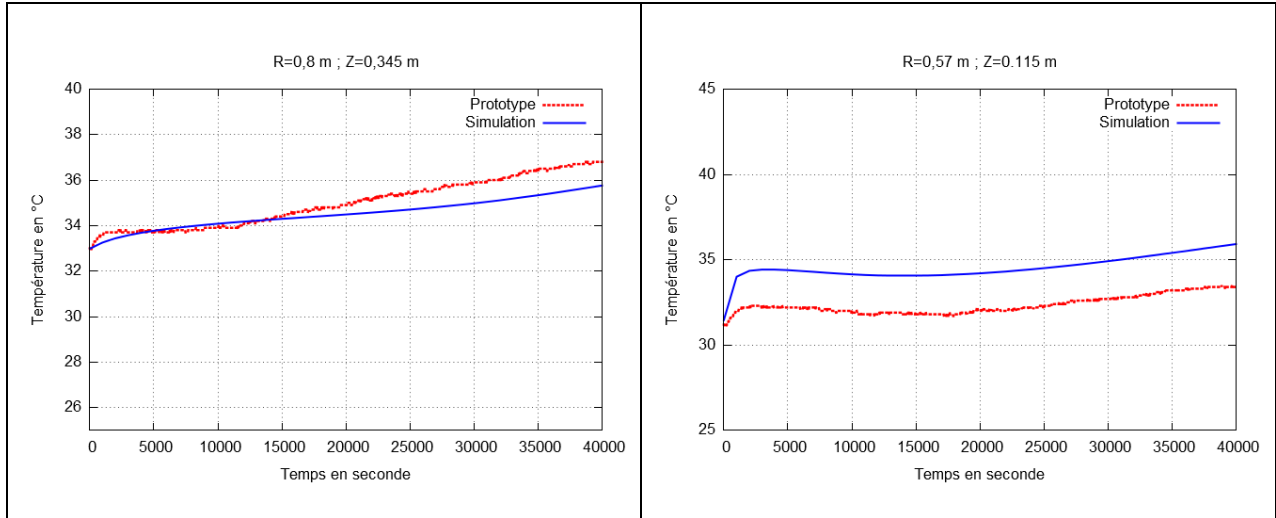
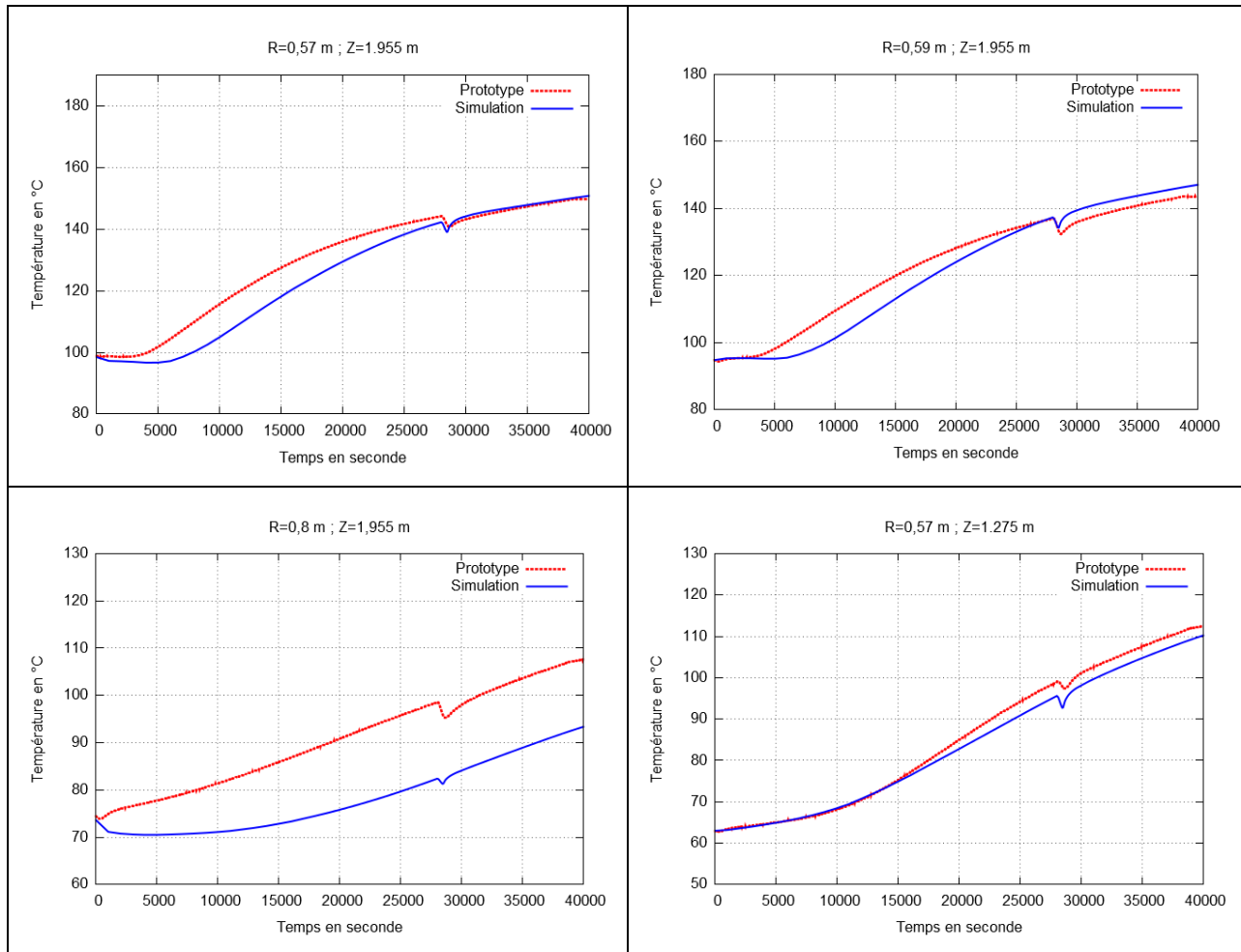


Figure 4.38 : comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats des simulations pour le premier chargement



Prototype d'un régénérateur

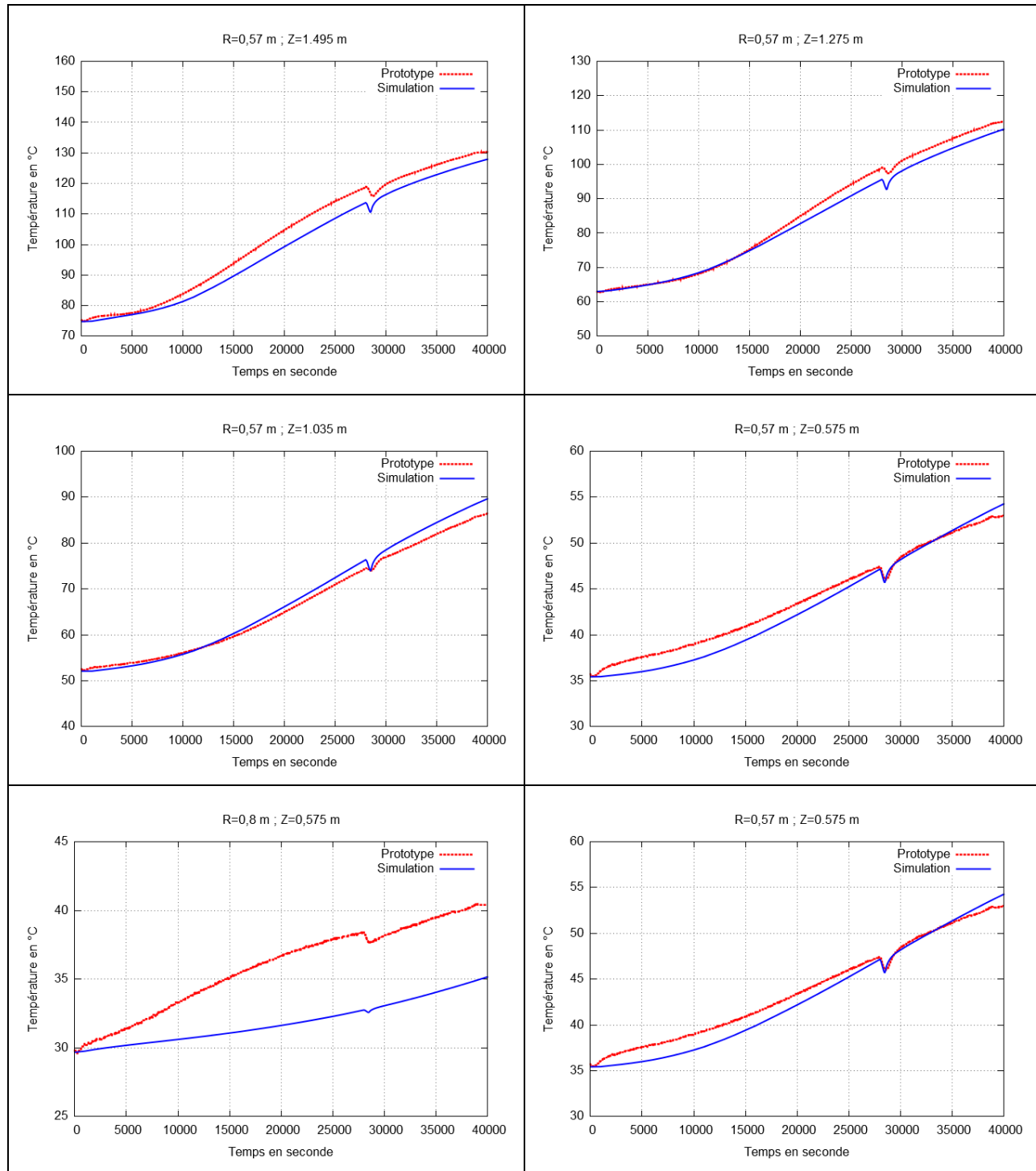


Figure 4.39 : Comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats des simulations pour le deuxième chargement.

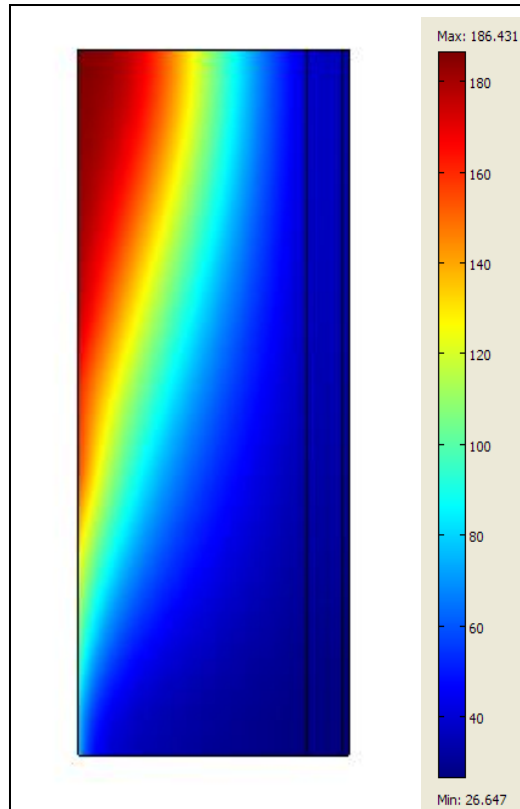


Figure 4.40 : Carte de température dans le prototype à $t = 40000$ seconde obtenue avec une perméabilité de l'isolant de 10^{-10} m^2 et un gradient de pression de 2 mbar.

Il est très difficile de caler les résultats numériques et les résultats expérimentaux pour tous les points du prototype pour les raisons suivantes :

- 1- L'incertitude sur la perméabilité de l'isolant à cause de sa forte rugosité et de sa forte porosité; ceci rend les mesures en laboratoire de cette propriété très difficiles.
- 2- L'incertitude sur la valeur du gradient de pression existant entre la pression de l'air à l'entrée et la pression de l'air à la sortie du prototype.
- 3- L'incertitude sur le chargement thermique appliqué aux parois, qui est dans notre cas une approximation de la réalité puisqu'on considère une interpolation linéaire entre les différentes mesures des capteurs, ce qui n'est pas nécessairement le cas.

Outre les phénomènes de convection décrits ci-dessus liés à la forte perméabilité de l'isolant de base envisagé pour le revêtement du TES (RI30) ainsi qu'au cyclage rapide en pression et en température, la tenue mécanique à haute température, comme cela a été signalé dans le chapitre 2, des échantillons de ce matériau, après un cyclage hydrostatique, est plus faible que celle des échantillons intacts. Ce résultat indique qu'un risque d'endommagement du matériau existe, surtout sur le long terme. C'est pour toutes ces raisons que nous considérons que les schémas de revêtement basés sur l'utilisation d'un isolant poreux au contact direct des matériaux actifs présentent des risques importants de convection et de durabilité qui mettent en cause la fonction essentielle requise d'isolation.

4.5 Conclusion

Le dimensionnement du revêtement d'un régénérateur a été réalisé en mettant en œuvre une campagne expérimentale dans le but de caractériser les principaux matériaux susceptibles d'être utilisés (chapitre 2) puis en développant une modélisation numérique couplée permettant de rendre compte des aspects thermique, hydraulique et mécanique du comportement (chapitre 3). Dans ces deux phases d'étude, de nombreuses hypothèses simplificatrices ont été adoptées. Il était donc nécessaire de valider le dimensionnement de ce revêtement et les hypothèses admises avec une expérimentation en laboratoire à échelle réduite avant d'envisager la réalisation d'un site pilote à échelle industrielle. C'est dans cette optique qu'un prototype de régénérateur représentant une paroi réelle a été construit dans le laboratoire du CEA/LITEN à Grenoble.

Le développement du prototype s'est effectué pendant cette thèse et a duré longtemps en raison notamment des normes réglementaires et sécuritaires à respecter. Cet élément constitue une donnée très instructive pour préparer la construction d'un régénérateur industriel.

Dans un souci de sécurité, les premiers essais, traités dans cette thèse, ont été réalisés à des températures faibles ou modérées. L'analyse des résultats de ces essais s'est appuyée essentiellement sur les mesures de température effectuées par des thermocouples placés dans les céramiques et dans l'isolant à différentes positions dans les deux sens horizontal et vertical.

Comme dans toute instrumentation mobilisant un grand nombre de capteurs de mesure travaillant dans des conditions difficiles de pression et de température, certains capteurs ont donné lieu à des mesures aberrantes suite à un dysfonctionnement ou une défaillance. Toutefois, ces mesures ponctuelles ne mettent pas en cause la crédibilité de l'instrumentation et les résultats obtenus.

Les résultats obtenus ont mis en évidence les trois phénomènes suivants : l'échauffement de l'isolant surtout dans la partie supérieure du prototype, la présence d'un fort gradient thermique dans les céramiques le long de la hauteur et enfin la perte de température toujours dans les céramiques après la moindre pause. C'est surtout le premier phénomène qui nous a le plus interpellés dans cette recherche car il met en question le schéma de revêtement préconisé et le rôle d'isolation attendu.

Une première hypothèse pour expliquer les phénomènes observés a consisté à considérer une fuite d'air à travers les joints et la partie supérieure de l'isolant qui cause un échauffement par convection. Un enduit spécial a été mis en place sur la surface supérieure des briques RI30 et du ciment de remplissage a été inséré entre les briques du premier rang. Ce traitement n'a pas conduit à des résultats différents et les trois phénomènes ont persisté. De même, les nombreux essais qui ont suivi et qui ont alterné l'injection de l'air chaud par le haut et par le bas ainsi qu'un chargement monotone et cyclique avec ou sans pause n'ont pas permis de résoudre les problèmes rencontrés. La modélisation numérique thermo-hydraulique du prototype en représentant les briques isolantes par un milieu continu et en leur affectant les propriétés mesurées en laboratoire n'a pas permis non plus de reproduire les résultats des essais et d'expliquer les phénomènes observés.

La seconde hypothèse formulée pour l'interprétation des essais reposait sur une circulation d'air dans les briques isolantes soit à travers les joints séparant ces briques soit à travers des fissures créées par endommagement de leur matériau au cours des différentes expérimentations. L'essai de traçage à l'hélium réalisé dans ce but a confirmé cette hypothèse, mais n'était pas en mesure de préciser si l'origine de la circulation est les joints existants ou une nouvelle fissuration induite. Les observations effectuées ultérieurement lors du démontage du revêtement du prototype après la fin des essais ont permis d'écarter l'hypothèse d'endommagement de l'isolant.

A ce stade, il s'est avéré nécessaire de mettre en œuvre une modélisation qui rend compte de la présence de joints pour essayer de comprendre les phénomènes observés. Un modèle numérique a alors été développé. Dans ce modèle, un joint est considéré comme un milieu poreux caractérisé par une très grande porosité et une très grande perméabilité. Les écoulements mis en évidence entre les briques restent très circonscrits même pour une épaisseur importante des joints, et par voie de conséquence, ce nouveau modèle n'a pu reproduire les résultats des essais.

La mise en place des briques isolantes et les sollicitations thermiques et mécaniques répétitives qu'elles subissent conduisent à une structure très difficile à caractériser d'un point de vue thermo-hydraulique. En particulier, les propriétés hydrauliques du matériau déterminées à l'échelle d'une éprouvette de dimensions réduites et celles des joints évaluées sommairement risquent de ne pas relater la situation réelle du prototype. Ceci nous a amené à effectuer une analyse de sensibilité avec l'approche du milieu continu pour étudier l'influence de la perméabilité du matériau et du gradient de pression et la corrélation qui existe entre ces deux paramètres. Nous avons constaté que pour un isolant de perméabilité dix fois supérieure à la valeur mesurée en laboratoire et un gradient de pression de même ordre de grandeur que la valeur mesurée sur le prototype, nous obtenons des résultats proches des résultats expérimentaux.

Nous retenons de cette analyse que le schéma de revêtement basé sur une structure constituée de briques isolantes poreuses séparées par des joints présente un risque d'étanchéité. Ce risque sera encore plus important dans un régénérateur industriel de grandes dimensions et subissant un cyclage en pression de grande amplitude. L'incertitude sur la durabilité mécanique et chimique de ces briques constitue aussi un facteur supplémentaire défavorable à l'utilisation de ce schéma de revêtement.

Il est donc primordial de prévoir l'étanchéité du système avant de procéder à l'isolation thermique. Ceci pourrait se faire en mettant en place un liner métallique tout de suite au début du revêtement comme cela est prévue pour la cavité LRC. Cependant, la nature du métal constitutif permettant de résister aux fortes températures appliquées et les dispositions constructives à prendre en compte pour lutter contre les dilatations thermiques doivent être soigneusement étudiées.

En ce qui concerne le fort gradient de température relevé dans les céramiques suivant la hauteur, il résulte vraisemblablement du caractère transitoire de l'expérience qui ne permettait pas l'homogénéisation de la température. Quant à la perte de température dans ces céramiques après les phases de pause, elle est due essentiellement à l'écart entre les dimensions dans le prototype de la paroi de revêtement, reproduite à échelle réelle, et la zone active, réduite avec un facteur de l'ordre de 25.