



UNIVERSITÉ
DE GENÈVE

CENTRE UNIVERSITAIRE D'ÉTUDE
DES PROBLÈMES DE L'ÉNERGIE

Déphaseur thermique Optimisation et prototype intégré

Pierre Hollmuller, Bernard Lachal

Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie (CUEPE)
Université de Genève – Switzerland

Sous mandat de
Office fédéral de l'énergie
Programme de recherche énergétique
Projet 45914 / Contrat 151414
Rapport final

2006

1. RÉSUMÉ

L'objet de cette étude est la mise en oeuvre d'un nouveau concept de stockage thermique, qui permet de retarder l'oscillation météo portée par un flux d'air, pour permettre de faire coïncider offre et demande de frais. En complément à une première étude, également financée par l'Office fédéral de l'énergie, cette étude a pour but de :

- Étendre le développement des prototypes à une géométrie en "tubes" (structure de stockage empilée perpendiculairement au flux d'air), en particulier pour l'utilisation de l'eau comme matériau de stockage.
- Caractériser (pour les systèmes à plaque et les systèmes à tube) le lien entre précision de mise en œuvre, inhomogénéité du flux d'air et amortissement du signal.
- Déterminer dans quelle direction poussée le développement d'un produit industriel (projet CTI ou équivalent).

Cette étude a permis de réaliser les travaux suivants :

- La construction d'un nouveau prototype, adapté aux contraintes du stockage en eau et amélioré au niveau de la gestion du flux d'air.
- Le développement d'un système expérimental et la mesure en laboratoire du stockage / déphasage en eau, susceptible de réduire la taille du stock.
- Une série de tests complémentaires avec plaques de ciment de grande dimension, permettant une mise en œuvre simplifiée.
- L'adaptation de l'outil d'analyse et de modélisation simplifié, pour la prise en compte de stockage en tubes, ainsi que pour la modélisation horaire sur une année complète.
- La mise en place d'une collaboration privilégiée pour la simulation CFD, afin de mieux comprendre les enjeux liés à l'écoulement d'air dans le stock (notamment l'échange convectif et les inhomogénéités de flux).
- La prises de contact et la mise en place de collaborations au niveau national et international, d'une part pour étudier l'intégration du déphasage dans le bâtiment et le système technique, d'autre part en vue de développer un produit industriel.

Ces travaux se soldent par les conclusions suivantes :

- L'étude du stockage / déphasage en eau s'est avérée extrêmement concluante, le déphasage de 12h pouvant être atteint avec un stock de 0.6 m³ par 100 m³/h d'air, ce qui correspond à 40% de réduction par rapport au stockage en ciment ou terre cuite. La transmission du signal se situe parmi les plus hautes valeurs observées jusqu'ici. Ainsi, même pour une vitesse aussi faible que 100 m³/h.m² (2.8 cm/s à vide), la transmission reste supérieure à 60%. Cette filière nécessiterait d'être développée en collaboration avec l'industrie, dans le but de mettre à disposition un système clé en main.
- Dans la mesure où des plaques de grande dimension se trouvent dans le commerce, le stockage en plaques de ciment reste une option intéressante pour une mise en œuvre locale. A ce sujet, les tests complémentaires entrepris dans cette étude doivent encore être affinés et complétés, ce qui se fera dans le cadre de la préparation du projet pilote et démonstration des Recyclables.
- Afin de mieux comprendre les enjeux liés à l'écoulement d'air dans le stock, nous avons mis en place une collaboration avec le Groupe de compétences en mécanique des fluides et procédés énergétiques (CMEFE) de la Haute Ecole de Genève. Les premiers résultats de simulation CFD sont cohérents avec les mesures et avec le modèle thermique simplifié. La suite des travaux, financés par le fonds SIGNER et la Réserve stratégique de la HES-SO, permettra de caractériser plus avant l'échange convectif et les inhomogénéités de flux.
- Globalement, en préliminaire à un développement industriel, ce complément d'étude a permis :
 - de compléter des lacunes scientifiques concernant le phénomène de déphasage thermique contrôlé.
 - de faire le pont avec la mise en place d'un premier projet pilote et démonstration ainsi qu'avec l'étude du potentiel d'intégration dans le bâtiment.
 - de mettre en place une série de collaborations pour la suite des développements.

2. BUTS DU PROJET

Contexte

Partout en Europe, la pointe de demande d'électricité due à la climatisation est en augmentation. Pour limiter le développement de cette pointe, on dispose déjà de nombreuses solutions basées sur des mesures architecturales (réduction des gains solaires, masse thermique) et sur des mesures techniques comme la ventilation naturelle ou des systèmes de rafraîchissement passifs. Une limite importante de ces derniers est que la puissance de froid délivrée n'est pas toujours en phase avec la demande du bâtiment.

Objet

Nous proposons ici l'utilisation d'un nouveau concept de stockage qui permet de déphasier à loisir une onde de température pour permettre de faire coïncider offre et demande de froid. Mis en évidence par le CUEPE, le déphasage contrôlé d'une onde thermique portée par un flux d'air est un phénomène prometteur pour le rafraîchissement à très faible consommation électrique : en retardant le pic de fraîcheur nocturne de 8-12 heures, quasiment sans l'amortir, ce dernier redevient disponible au milieu de la journée (Fig. 1).

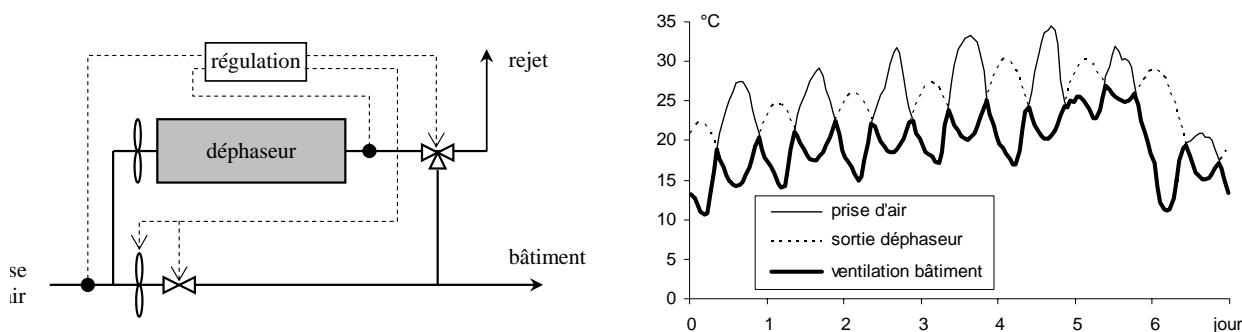


Figure 1 : Schéma de principe pour l'intégration du déphasageur dans l'installation de ventilation.

Mis en évidence dans le cadre d'une thèse sur les échangeurs air/sol, le déphasage contrôlé d'une onde thermique portée par un flux d'air a donné lieu à une importante étude théorique et expérimentale, déjà financée par l'Office fédéral de l'énergie (projet 45914 / contrat 85974). Au terme de cette étude, nous pouvions tirer le bilan suivant :

- La possibilité de déphaser complètement (d'une demi période) une onde thermique portée par un flux d'air, sans quasiment l'amortir, a été confirmée aussi bien théoriquement qu'expérimentalement. Il n'a par ailleurs pas été trouvé trace dans la bibliographie d'une description ou même d'une mention de ce phénomène.
- L'application la plus immédiate est le déphasage de l'onde journalière de température, pour obtenir de jour la température qu'il faisait la nuit d'avant, donnant accès ainsi à un important potentiel de rafraîchissement des bâtiments en période estivale. Le déphasage de l'onde thermique annuelle est théoriquement possible, mais nécessite des volumes et des longueurs trop importants pour constituer une demande susceptible de faire démarrer ces dispositifs.
- L'analyse théorique a montré que :
 - A la base, le phénomène de déphasage à transmission élevée est simple : il s'agit de freiner le déphasage naturel porté par la vitesse du flux d'air en le mettant en contact avec une capacité calorifique (stock) plus élevée (effet piston).
 - Cela requiert un très bon échange convectif, ainsi qu'une géométrie en couches minces.
 - L'obstacle potentiellement le plus important est lié à une éventuelle inhomogénéité du flux, à mettre en relation avec une inhomogénéité dans la géométrie. Une première tentative de modélisation simplifiée indique des pertes de signal importantes liées à ce phénomène.
- Un ensemble de prototypes ont été construits et intensivement utilisés afin de mieux cerner et quantifier les paramètres fondamentaux intervenant dans le phénomène, en insistant sur les deux paramètres limitants : l'échange convectif et l'inhomogénéité du flux. La comparaison entre mesures et modèles a été très concluante et prouve une grande maîtrise des phénomènes en jeu. Seule

l'inhomogénéité du flux possède encore quelques zones d'ombre mais sa maîtrise encore partielle n'empêche pas des réalisations pratiques tout à fait fonctionnelles.

- Parmi ceux-ci, le stockage en plaques de terre cuite donne des résultats satisfaisants (pour l'oscillation 24 h : 70% de transmission pour un déphasage de 8h), pour un coût de mise en œuvre intéressant (~ 500 Fr le m³ de matériau de stockage). En se basant sur ce prototype, il serait ainsi actuellement déjà possible de mettre en place et tester *in situ* un système pilote fournissant 1-2 kW de fraîcheur pour 100-200 m² de surface habitable, avec un COP supérieur à 100.

Pistes de développements

Pour faire suite à cette première étude, quatre pistes de développement de cette technique novatrice ont été mises en évidence :

- En complément aux connaissances acquises, la caractérisation de géométries et matériaux de stockage pas encore testés jusqu'ici (en particulier en structures verticales et avec de l'eau), pouvant s'avérer plus performant que la géométrie en plaque et dans des matériaux solides (réduction de taille du stockage), ainsi qu'une étude plus fine du problème d'homogénéité du flux d'air et des contraintes qui le lie à la précision de mise en œuvre.
- En aval du système, la mise en place de règles de dimensionnement en relation avec l'enveloppe du bâtiment et les gains internes (problèmes de pointes), la détermination du potentiel en synergie avec d'autres systèmes de rafraîchissement (air conditionné, night-cooling, evaporative cooling) et l'étude de sensibilité aux variations climatiques (canicules).
- En parallèle, la mise en œuvre d'un premier projet pilote et démonstration, permettant de vérifier le comportement du déphaseur en situation réelle.
- Dans la suite du développement, la mise en place, en collaboration avec des professionnels de la ventilation et des matériaux, d'un kit « clé en main » pouvant s'intégrer dans un système de ventilation classique.

Ce projet se focalise sur la première de ces pistes. Les deuxièmes et troisième pistes font l'objet de projets séparés (cf. plus loin), alors que le développement d'un produit industriel aura lieu en un deuxième temps.

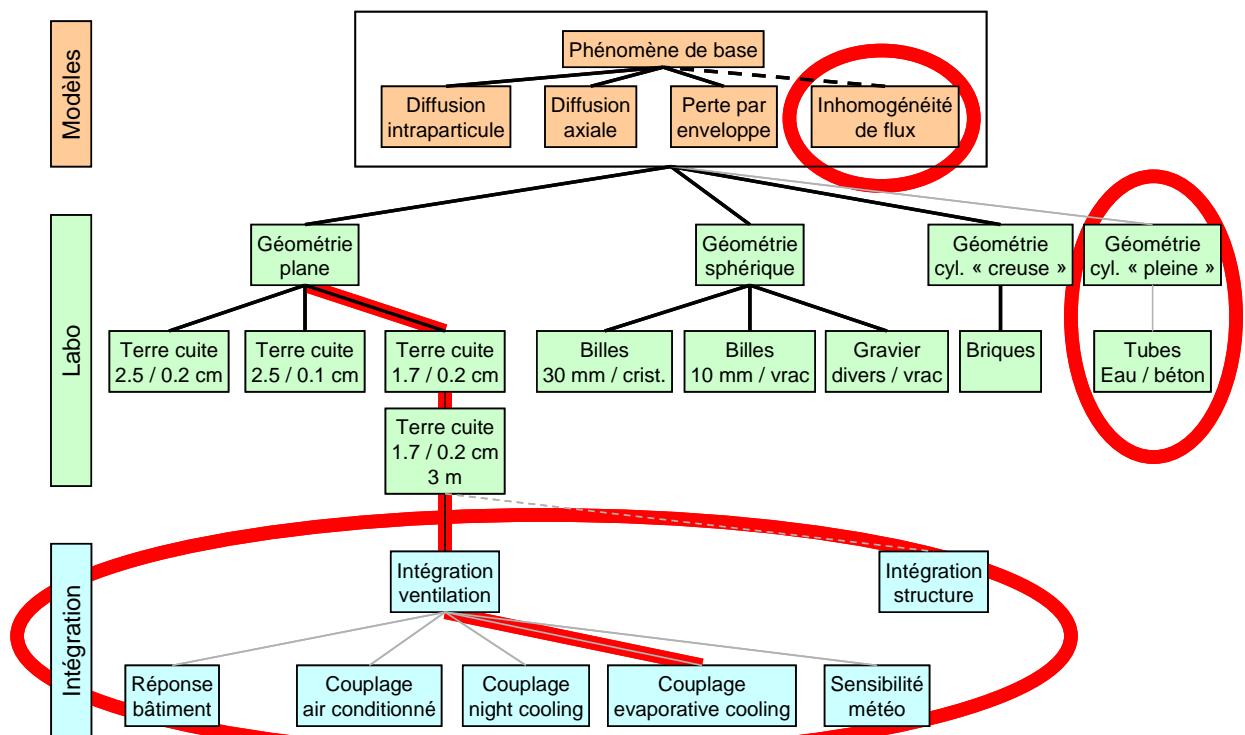


Figure 2 : Vue synoptique de l'état de l'art et des pistes de développement à poursuivre (en rouge).

Buts

En complément à l'étude précédente et en amont d'un développement industriel, ce projet adresse la première des pistes susmentionnées. Les buts spécifiques sont les suivants :

- Étendre le développement de prototypes à une géométrie en "tubes" (structures verticales), en particulier pour du stockage en eau, afin d'en dégager le potentiel énergétique et les contraintes financières.
- Caractériser le lien entre précision de mise en œuvre, inhomogénéité du flux d'air et amortissement du signal.
- Déterminer dans quelle direction poussée le développement d'un produit industriel.

3. TRAVAUX EFFECTUÉS ET RESULTATS ACQUIS

3.1. Tests de laboratoire

Développement d'un nouveau caisson de test

Etant donné le caractère scientifique du prototype de laboratoire (détermination des paramètres de base du phénomène, en absence d'effets perturbateurs), il s'est avéré nécessaire de développer un nouveau caisson de test qui garantisse à la fois :

- Une étanchéité maximale, étant donné les très faibles débits d'air traités.
- Une isolation thermique latérale autant que possible exempte de ponts thermiques.
- Une adhérence optimale entre les matériaux de remplissage (stockage) et l'isolation latérale (enveloppe), afin d'éviter tout court-circuit aédraulique.
- Un système de mesure intégré, perturbant le moins possible l'homogénéité du flux d'air.

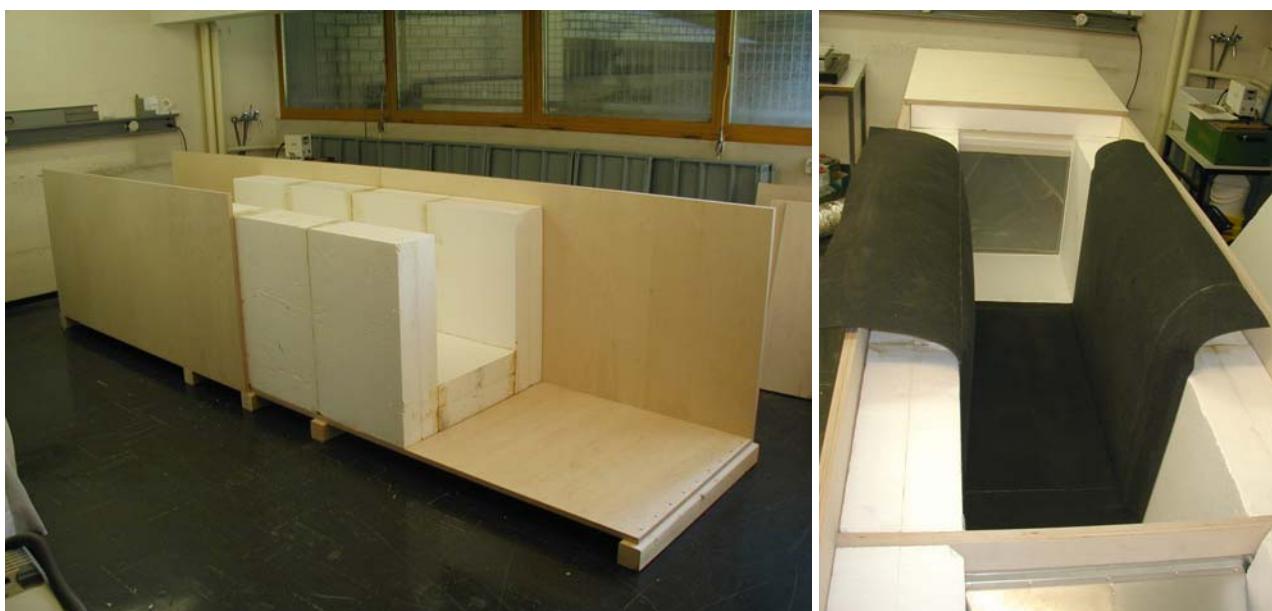


Figure 3 : Mise en oeuvre d'un nouveau caisson expérimental.

Comme pour le prototype précédent, la partie active (stockage) représente 0.25 m^3 (1 m de long sur une section carrée de 0.5 m d'arrête). Elle est complétée, à chaque extrémité, par une chambre de mesure de 0.5 m de long, ainsi que d'un cône de réduction / agrandissement permettant le couplage à de la tuyauterie de ventilation standard de 125 mm de diamètre. Le tout est englobé dans 25 cm d'isolation latérale, doublée d'un caisson en contreplaqué.

En vue de trouver des partenaires pour un projet pilote ainsi que pour un développement industriel, un certain soin a par ailleurs été apporté à la finition / robustesse de mise en œuvre.

Stockage en eau

Afin de tester le stockage en eau, nous avons développé un système expérimental constitué de tubes PVC (diamètre interne/externe de 15/16 mm) remplis d'eau (chaleur spécifique moyenne de 3320 kJ/K.m³) et écarteurs externes intégrés. L'empilement se fait de façon hexagonale (empilement en quinconce), soit sous sa forme la plus compacte (fraction de vide de 28.3% pour écartement entre tubes de 2 mm, 19.7% pour 1 mm).



Figure 4 : Mise en oeuvre du stockage en eau.

La méthode expérimentale est celle développée lors de l'étude précédente. D'une durée de 5 jours (+ 2 jours mise en route), les mesures sont effectuées pour différents débits d'air (situés entre 50 et 700 m³/h par m²), avec prise d'air à température relativement stable (laboratoire) et chauffage électrique à l'entrée du déphaseur (superposition de quatre sinus de fréquence 24, 12, 8 et 6 h, afin de calibrer le modèle analytique simultanément sur plusieurs fréquences).

L'analyse des mesures se fait en quatre étapes :

- Analyse par série de Fourier des mesures de température à l'entrée et à la sortie du déphaseur.
- Pour chaque fréquence, modélisation par modèle de Schuman (y compris effets de bord, importants dans le cas d'un caisson de section réduite tel que utilisé lors des essais avec billes en argile, mais négligeables ici).
- Calibration du modèle (détermination du débit effectif et de l'échange convectif effectif) par optimisation non-linéaire de l'erreur quadratique mesure / modèle (signal complet, composé de la somme de toutes les fréquences).
- Avec le modèle ainsi calibré, extrapolation à une longueur permettant le déphasage complet de la fréquence journalière (retard de 12 h).
- Avec le même modèle, suppression des pertes latérales (négligeables dans le cas présent, mais importantes dans le cas d'un caisson de section réduite, tel que cela était précédemment le cas pour l'étude du stockage en billes).

Comme pour toutes les expériences précédentes, la calibration modèle / mesure à partir de l'ensemble des fréquences (en particulier les quatre fréquence de base) s'avère excellente en ce qui concerne le déphasage (Fig. 5, bas). Cette façon de procéder surestime cependant légèrement la transmission modélisée, effet qui est renforcé par extrapolation à un déphasage de 12h (Fig. 5, haut), comme cela avait d'ailleurs déjà été le cas avec les plaques de terre cuite.

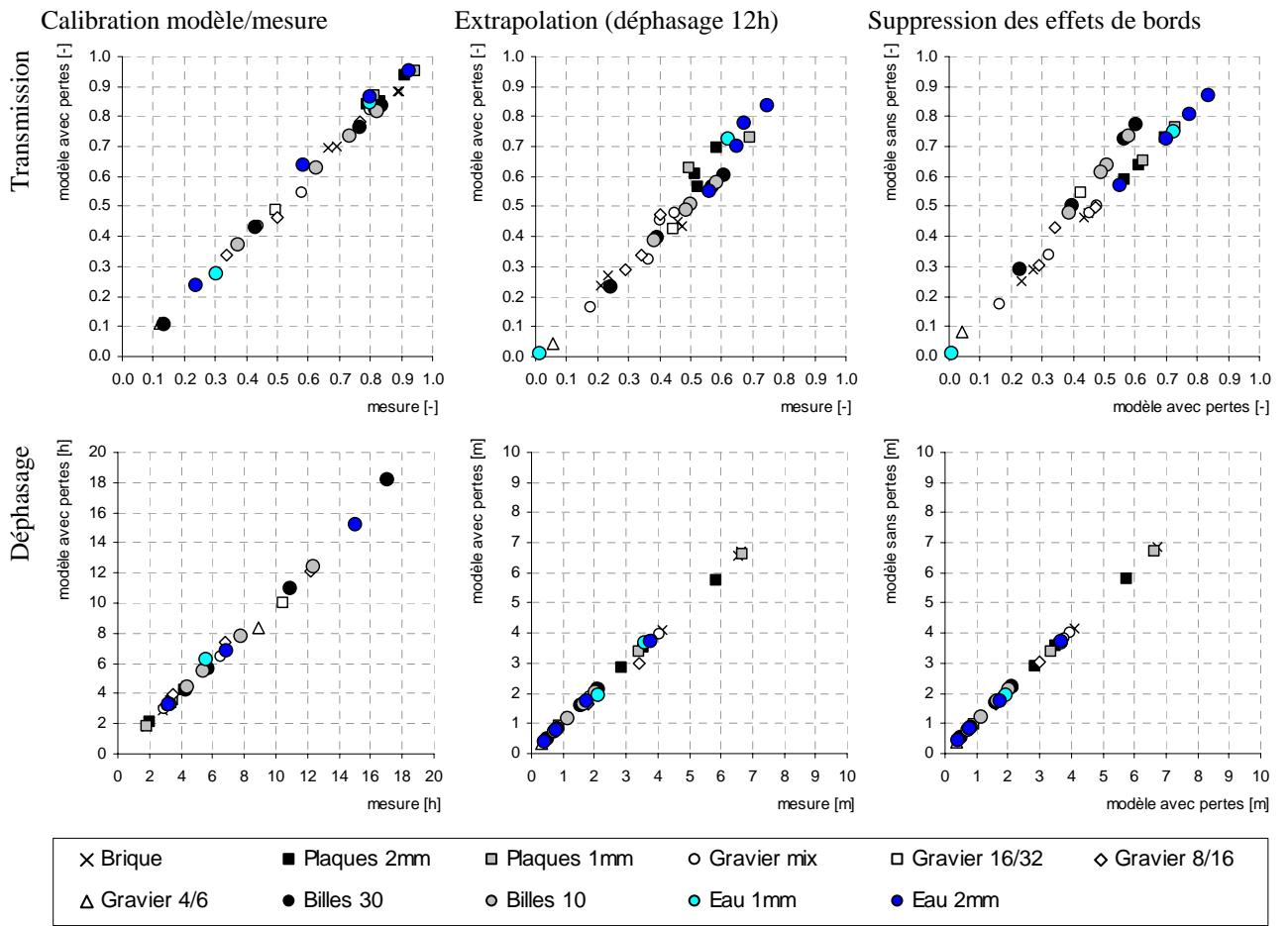


Figure 5 : Résultats mesure / modèle pour le stockage en eau, en comparaison avec les stockages étudiés lors du projet précédent.

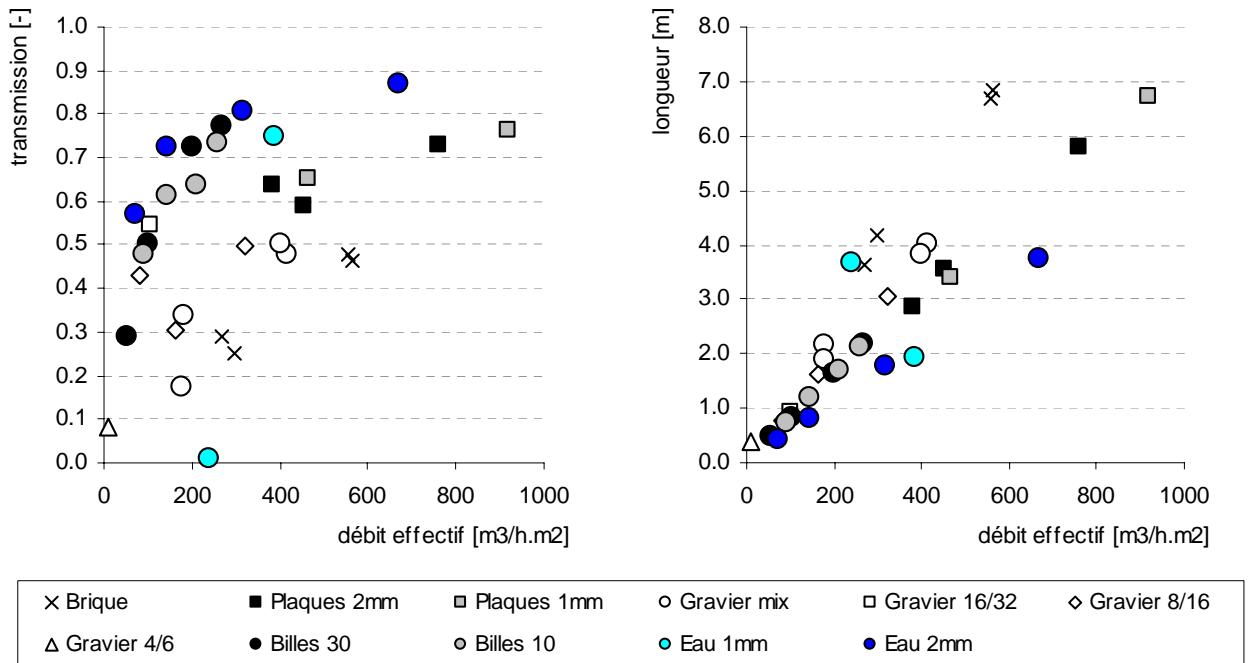


Figure 6 : Résultats finaux (modèle sans pertes latérales) pour le stockage en eau, en comparaison avec les stockages étudiés lors du projet précédent.

Nous obtenons finalement les résultats suivants (Fig. 6) :

- De façon générale, le stockage en eau confirme les espoirs : le déphasage de 12h est atteint avec un stock de 0.6 m^3 par $100 \text{ m}^3/\text{h}$ d'air, ce qui correspond à 40% de réduction par rapport au stockage en ciment ou terre cuite.
- La transmission du signal se situe parmi les plus hautes valeurs observées jusqu'ici. Ainsi, même pour une vitesse aussi faible que $100 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ (2.8 cm/s à vide), la transmission reste supérieure à 60%.
- En ce qui concerne les pertes de charge, les premiers tests avec un écartement entre tube de 1 mm se sont avérés catastrophiques : 140 Pa/m (équivalent à 270 Pa pour un déphasage complet) pour un débit de $390 \text{ m}^3/\text{h.m}$. Conformément à la théorie, le passage à un écartement de 2mm a permis de diviser ces pertes par 4 (cf. plus bas).

Par ailleurs, pour l'écartement de 2 mm, une comparaison avec les valeurs de la littérature (modèles de Zhukauskas, repris par Incropera et De Witt, Fundamentals of heat and mass transfer, 1990) donne les résultats suivants (Fig. 7) :

- Pour le facteur d'échange convectif air/tube, qui gouverne la thermique du phénomène et en particulier la transmission du signal, la mesure (calibration modèle / mesure) donne des valeurs environ deux fois plus faible que la littérature. Comme cela avait déjà été montré au cours de l'étude précédente, ceux-ci sont apparemment mal adaptés pour les régimes low-flow et à faible fraction de vide (comme ici, où nous travaillons avec un nombre de Reynolds situé entre 180 et 1650, alors que le modèle de Zhukauskas s'applique à un nombre de Reynolds compris entre 10^3 et 2×10^6).
- Pour les pertes de charge, qui déterminent la consommation électrique auxiliaire, nous avons par contre une excellente correspondance entre mesure (mesure directe) et littérature (le modèle de Zhukauskas s'appliquant cette fois-ci à un nombre de Reynolds compris entre 10^1 et 2×10^6).

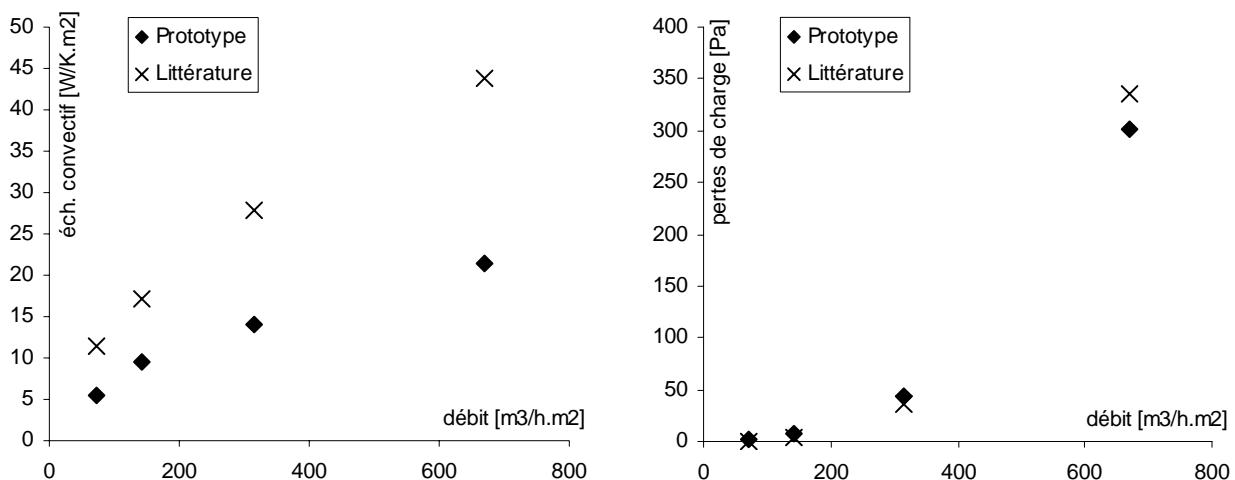


Figure 7 : Stockage en tubes, échange convectif et pertes de charges à déphasage complet, comparaison entre mesure et littérature.

Stockage en plaques de ciment

En parallèle au stockage en eau, il nous a semblé nécessaire de reconduire une série de tests avec des plaques de grande dimension, permettant une mise en œuvre simplifiée (une seule manipulation par couche, contrairement aux premiers tests, effectués avec des planelles d'environ 15 x 30 cm).

Notre choix s'est porté sur les plaques Aquapanel®, constituées de ciment et de perlite (chaleur spécifique d'environ 1600 kJ/K.m³), disponibles de façon standard sous les tailles suivantes :

- en épaisseurs de 12.5 (pour une largeur de 900 mm et des longueurs comprises entre 1200 et 2500 mm).
- en épaisseur de 22 et 33 mm (pour une largeur de 600 mm et une longueur de 900 mm).

Une première série de test a eu lieu avec des plaques d'épaisseur 22 mm et écartement 2 mm (fraction de vide de 8.3%).

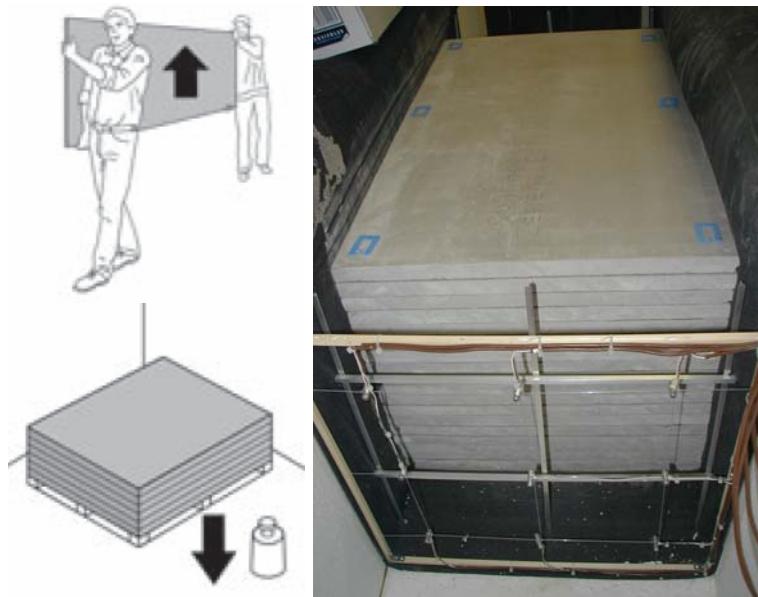


Figure 8 : Manutention et mise en œuvre des plaques de ciment Aquapanel®.

Les résultats préliminaires sont les suivants :

- Contrairement aux tests précédents, la calibration modèle / mesure à partir de l'ensemble de toutes les fréquences (en particulier les quatre fréquences de base) s'avère problématique. L'estimation de l'échange convectif, et de par la même la transmission de la fréquence 24 h, s'en trouve largement surestimée (Fig. 9).
- La transmission sans pertes latérales (Fig. 10), qui est obtenue via le modèle calibré, doit donc être manié avec une certaine prudence : si les valeurs paraissent en bon accord avec celles obtenues précédemment pour les plaques de petite dimension, elles surestiment en principe la réalité.

Ces résultats préliminaires nécessitent d'être réexaminés, ainsi que d'être complétés par des mesures avec des plaques plus fines. Cela sera fait au cours des semaines à venir, dans le cadre de la préparation du projet pilote et démonstration des Recyclables (cf. ci-dessous).

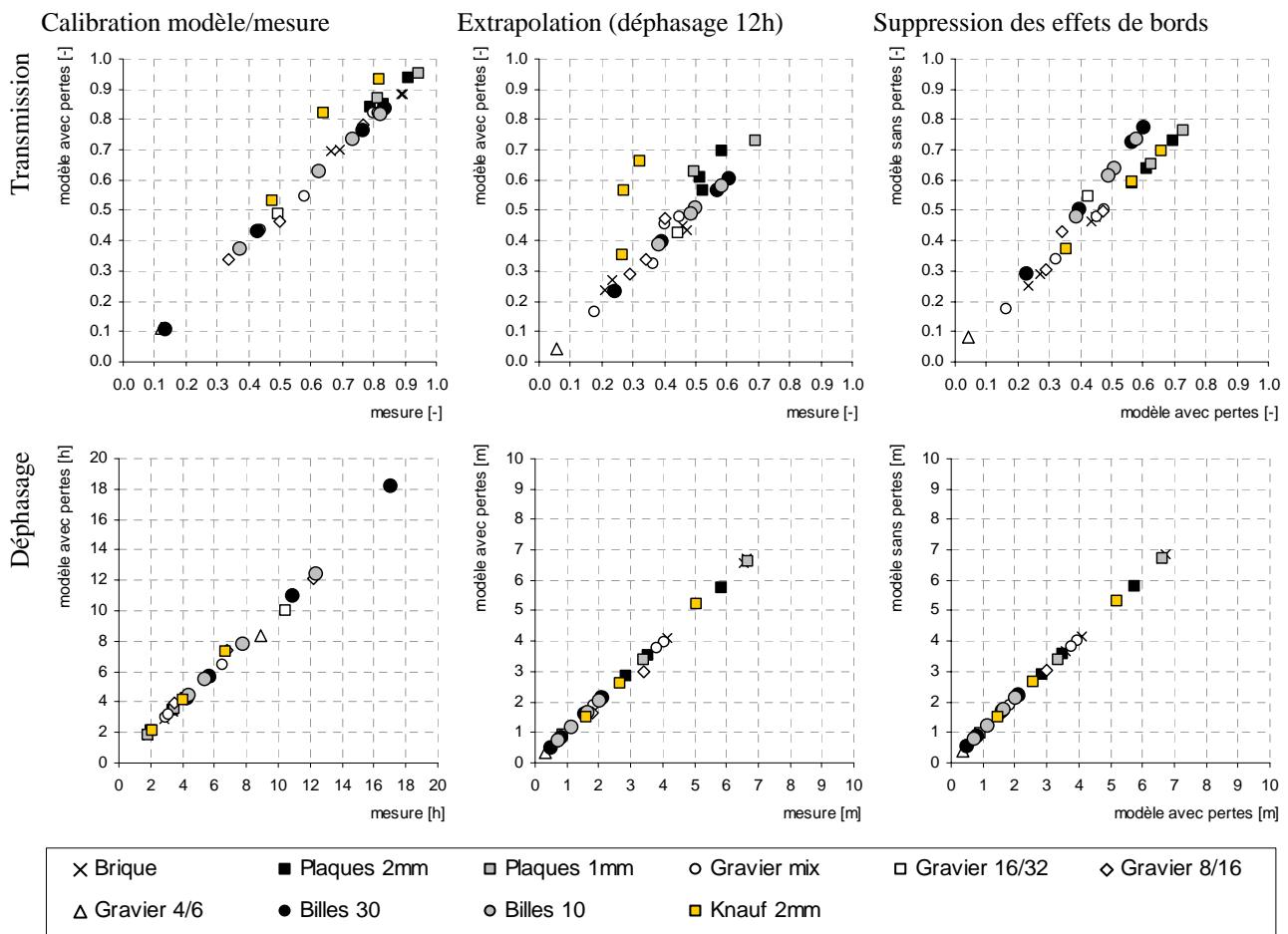


Figure 9 : Résultats mesure / modèle pour le stockage en plaques Aquapanel®, en comparaison avec les stockages étudiés lors du projet précédent.

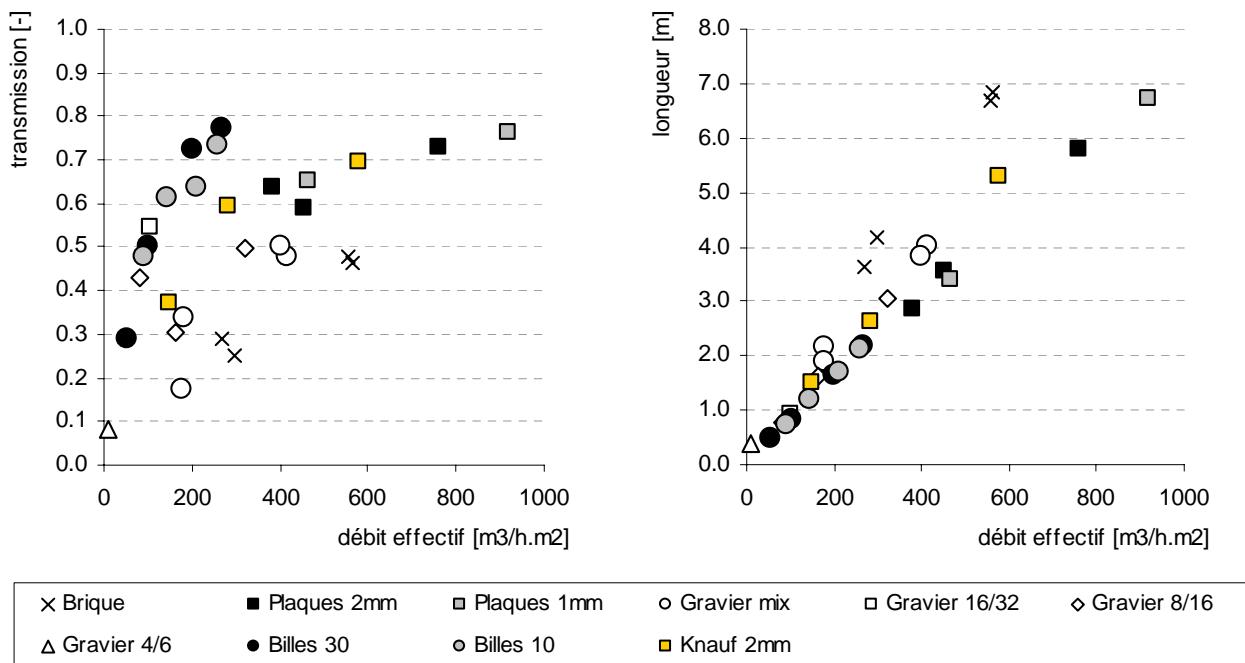


Figure 10 : Résultats finaux (modèle sans pertes latérales) pour le stockage en plaques Aquapanel®, en comparaison avec les stockages étudiés lors du projet précédent.

3.3. Modélisation

Modélisation thermique simplifiée (Schuman)

Nous avons profité de cette étude pour améliorer l'outil de modélisation développé précédemment (modèle de Schuman appliqué à un signal décomposé en série de Fourier). Les nouveaux développements sont :

- Introduction de la géométrie tubulaire (telle qu'utilisée pour le stockage en eau).
- Adaptation de l'outil pour une simulation horaire sur une année.

Modélisation CFD

Afin de mieux comprendre les enjeux liés à l'écoulement d'air dans le stock (notamment l'échange convectif et les inhomogénéités de flux), nous avons mis en place une collaboration avec le Professeur Patrick Haas du CMEFE (Groupe de compétences en mécanique des fluides et procédés énergétiques de la Haute Ecole de Genève), spécialiste de simulation CFD (Fluent).

La mise en place de la collaboration ainsi que la recherche de fonds complémentaires (voir le chapitre « collaborations » ci-dessous) n'ont pas permis de faire avancer cette étude au même rythme que les travaux décrits plus haut. L'étude est cependant en bonne voie et les résultats préliminaires sont encourageants.

Les travaux de modélisation effectués jusqu'ici (Fig. 11) concernent le stockage en structure tubulaire, organisée en quinconce, tel qu'utilisée pour le stockage en eau. Le maillage déstructuré lié à une telle géométrie nécessite un gros effort de mise en place géométrique du problème (pas de « copier – coller » d'un tube à l'autre), si bien qu'il a pour l'instant été limité à 20.4 cm de longueur (12 tubes).

Les premiers résultats (Fig. 12) concernent la comparaison entre les valeurs obtenues par :

- La modélisation CFD (pour un espace de 1mm entre tubes)
- Les mesures expérimentales (pour un espace de 1 et 2 mm)
- Les valeurs théoriques du modèle Schuman (pour un espace de 1 mm), pour diverses valeurs du coefficient d'échange convectif (valeurs moyennes effectives, y.c. diffusion et convection dans les tubes et l'eau)

Les valeurs examinées sont la longueur nécessaire à un déphasage complet (12h) et la transmission associée. Il s'agit toujours de valeurs extrapolées à partir des valeurs obtenues à longueur fixe (CFD : 0.204m, Mesures : 1m).

Globalement les résultats sont satisfaisants et cohérents :

Pour la transmission :

- Les valeurs de Fluent sont légèrement supérieures aux mesures, ce qui est compatible avec le fait qu'il s'agit d'une géométrie totalement régulière.
- Ces valeurs correspondent, pour Schuman, à un échange convectif de 10-20 W/K.m² (5 W/K.m² pour le débit le plus faible).

Pour la longueur :

- De façon générale, la coïncidence est raisonnable.
- Pour les hauts débits, les longueurs données par Fluent sont plus courtes que celles données par le modèle de Schuman avec échange convectif parfait, ce qui est contraire aux lois de la physique. Dans le cas de Fluent il s'agit cependant de valeurs extrapolées. Ainsi, pour le débit de 700 m³/h, la longueur de 4m extrapolée à partir d'une longueur de 0.204m est susceptible de contenir une marge d'erreur relativement importante !

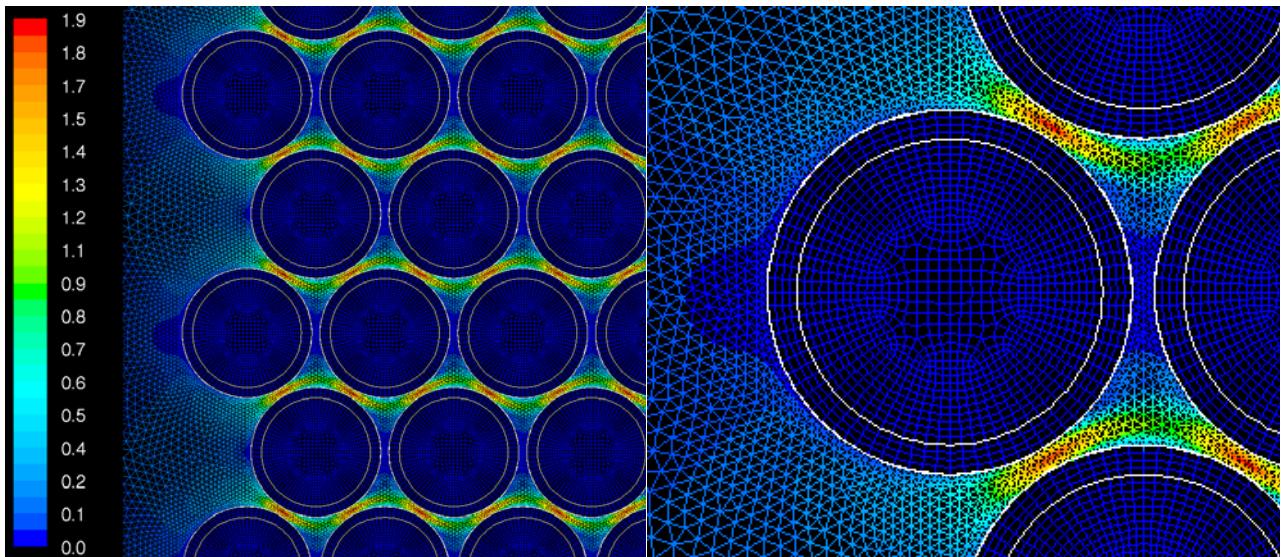


Figure 11 : Modélisation CFD pour stockage en structure tubulaire (maillage et champs de vitesse).

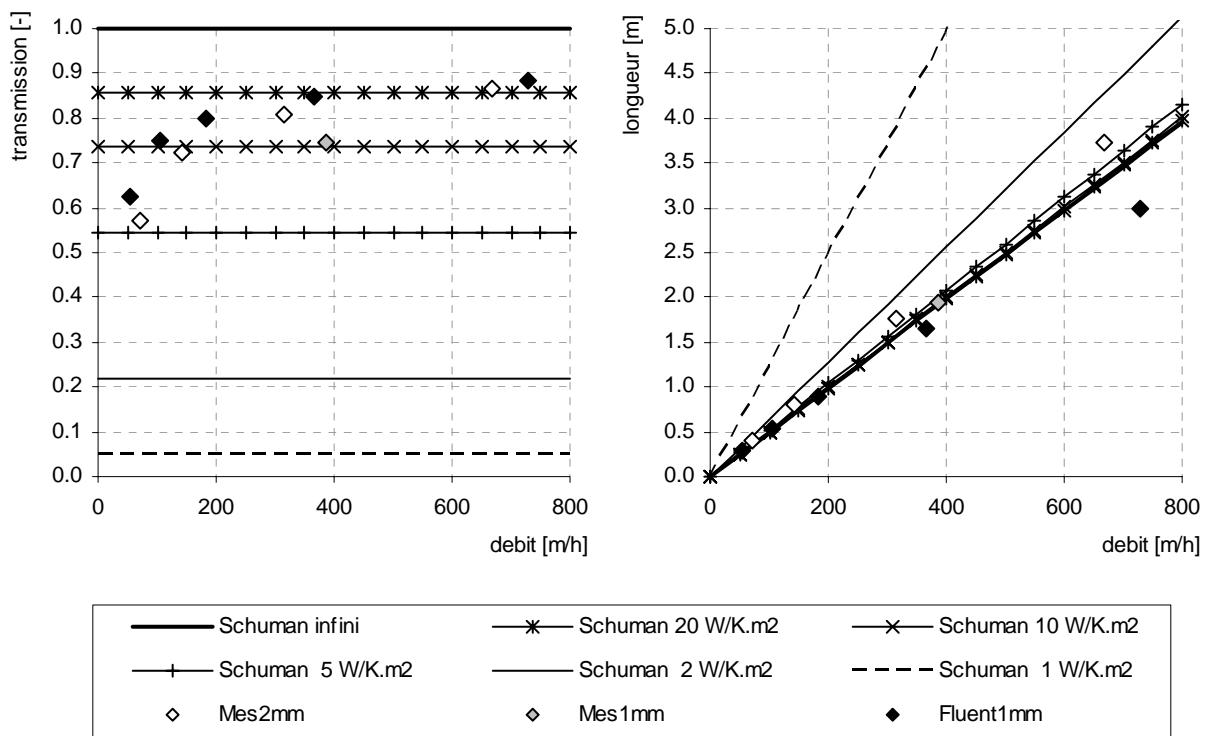


Figure 12 : Résultats comparés entre modélisation CFD, mesures expérimentales et valeurs théoriques du modèle de Schuman.

Dans la suite de cette étude, menée par le CMEFE en collaboration avec le CUEPE il s'agira :

- d'affiner et compléter les résultats pour le stockage tubulaire (notamment en ce qui concerne le facteur d'échange convectif ponctuel / moyen et les pertes de charges)
- de faire le même exercice pour un stockage en plaque, plus facile à mettre en œuvre et permettant ainsi plus de flexibilité (variation de l'écartement entre les plaques, géométries inhomogènes).

4. COLLABORATION NATIONALE ET INTERNATIONALE

Ce projet est en lien direct avec les projets suivants :

- **Coolshift – Rafraîchissement de bâtiments par ventilation déphasée** (projet OFEN no 101339), exécuté par le CUEPE. En complément au projet de développement du déphaseur, il s'agit dans cette étude de déterminer le potentiel de rafraîchissement du déphaseur en relation avec le bâtiment, d'étudier la synergie avec d'autres systèmes de rafraîchissement, ainsi que de caractériser la sensibilité aux variations climatiques.
- **Recyclables** (projet SCANE, avec cofinancement de la Bourse du développement durable du Canton de Genève), exécuté par le CUEPE en partenariat avec le café Les Recyclables et le bureau Mino. Ce projet concerne l'étude et la mise en place d'un premier système pilote et démonstration, à Genève, en remplacement d'un système d'air conditionné.
- **Etude aérodynamique d'un déphaseur d'ondes thermiques** (Projet financé par le fonds SIGNER et la Réserve stratégique de la HES-SO), exécuté par le CMEFE (Groupe de compétences en mécanique des fluides et procédés énergétiques de la Haute Ecole de Genève), en collaboration avec le CUEPE et l'IGT (Institut de génie thermique de la Haute Ecole d'Ingénierie et de gestion du canton de Vaud). Cette étude, dont les résultats préliminaires ont été donnés plus haut, doit permettre de mieux comprendre les enjeux liés à l'écoulement d'air dans le stock (notamment l'échange convectif et les inhomogénéités de flux). Elle sera complétée par une étude de faisabilité de stockage / déphasage avec des matériaux à changement de phase.
- **Manuel pour le refroidissement de bâtiments par "geocooling" sur sondes géothermiques verticales** (projet OFEN no 101295), exécuté par la SUPSI. Ce projet, qui concerne le potentiel de rafraîchissement passif via sondes géothermiques (critères d'intégration, potentiel de refroidissement et règles simplifiées de dimensionnement), se développe en collaboration avec le projet Coolshift décrit ci-dessus.

Au niveau international, ce projet a été l'un des points d'ancre de la collaboration suivante :

- **Potential of buried pipes systems and derived techniques for passive cooling of buildings in Brazilian climates**, en collaboration avec le Laboratorio de eficiencia energetica nas edificações (LABEEE), Universidade federal de Santa Catarina (Brésil), avec co-financement de la Commission pour le partenariat scientifique avec les pays en développement (KFPE).

5. DIVERS

En prolongement du projet précédent, cette étude ainsi que les études complémentaires citées ci-dessus ont mené à un ensemble de publications scientifiques et de vulgarisation dont on trouvera référence en fin de document.

Notons également l'obtention des prix suivants :

- Prix du cinquantenaire des SIG, édition 2004, décerné à Jean-Marc Zgraggen pour son travail de diplôme en physique : Etude d'un lit de sphères pour le déphasage d'une onde thermique.
- Bourse du développement durable de l'Etat de Genève, édition 2005, décernée au café Les Recyclables pour la mise en place de trois actions liées au développement durable, dont le remplacement d'un système d'air conditionné par un déphaseur thermique pilote et démonstration.

6. CONCLUSIONS

Conformément aux buts, les travaux effectués dans le cadre de ce projet permettent de dresser le bilan suivant :

- L'étude du stockage / déphasage en eau s'est avéré extrêmement concluante, le déphasage de 12h pouvant être atteint avec un stock de 0.6 m^3 par $100 \text{ m}^3/\text{h}$ d'air, ce qui correspond à 40% de réduction par rapport au stockage en ciment ou terre cuite. La transmission du signal se situe parmi les plus hautes valeurs observées jusqu'ici. Ainsi, même pour une vitesse aussi faible que $100 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ (2.8 cm/s à vide), la transmission reste supérieure à 60%. Cette filière nécessiterait d'être

développée en collaboration avec l'industrie, dans le but de mettre à disposition un système clé en main.

- Dans la mesure où des plaques de grande dimension se trouvent dans le commerce, le stockage en plaques de ciment reste une option intéressante pour une mise en œuvre locale. A ce sujet, les tests complémentaires entrepris dans cette étude doivent encore être affinés et complétés, ce qui se fera dans le cadre de la préparation du projet pilote et démonstration des Recyclables.
- Afin de mieux comprendre les enjeux liés à l'écoulement d'air dans le stock, nous avons mis en place une collaboration le Groupe de compétences en mécanique des fluides et procédés énergétiques (CMEFE) de la Haute Ecole de Genève. Les premiers résultats de simulation CFD sont cohérents avec les mesures et avec le modèle thermique simplifié. La suite des travaux, financés par le fonds SIGNER et la Réserve stratégique de la HES-SO, permettra de caractériser plus avant l'échange convectif et les inhomogénéités de flux.
- Globalement, en préliminaire à un développement industriel, ce complément d'étude a permis :
 - de compléter des lacunes scientifiques concernant le phénomène de déphasage thermique contrôlé.
 - de faire le pont avec la mise en place d'un premier projet pilote et démonstration ainsi qu'avec l'étude du potentiel d'intégration dans le bâtiment.
 - de mettre en place une série de collaborations pour la suite des développements.

7. REMERCIEMENTS

Nous exprimons nos vifs remerciements à :

- Eric Pampaloni, au CUEPE, pour la mise en place et le suivi technique des tests en laboratoire.
- MM. Cornut et Février, à Knauf SA, pour la mise à disposition des plaques Aquapanel.

8. REFERENCES

Articles scientifiques

- Hollmuller P., Lachal B., Zgraggen J.-M. (2005) Rafraîchissement de bâtiments par déphasage thermique contrôlé, in : Conférence internationale Energie solaire et bâtiment, CISBAT 2005, Lausanne, 28-29 septembre 2005. Lausanne : Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, p. 317-322
- Hollmuller P., Lachal B., Zgraggen J.M. (2006) A new ventilation and thermal storage technique for passive cooling of buildings: thermal phase-shifting, in : PLEA 2006, 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, 6-8 September 2006, Geneva, Switzerland, Université de Genève, Vol. 1, p. 541-546.
- Hollmuller P., Lamberts R., Westphal F., Ordenes M., Carlo J. (2005) Potencial da ventilação inercial para resfriamento passivo em climas brasileiros, in : Encontro Nacional de Conforto do Ambiente Construído, ENCAC 2005, Maceió, 5 a 7 de Outubro de 2005. Maceio : Universidade Federal de Alagoas.
- Hollmuller P., Lamberts, R., Westphal F., Ordenes M., Carlo J. (2005) Potential of inertial ventilation for passive cooling in Brazilian climates, in : Proceedings of 1st International Conference on Passive and low Energy Cooling for the Built Environment (PALENC 2005), 19-21 May 2005, Santorini, Greece. Vol. 2., p. 1015-1020

Rapports scientifiques

- Hollmuller P., Lachal B., Zgraggen J.-M. (2004) Déphaseur thermique diffusif. Genève : CUEPE, Université de Genève.
- Hollmuller P., Carlo J., Ordenes M., Westphal F., Lamberts, R. (2006) Potential of buried pipes systems and derived techniques for passive cooling of buildings in Brazilian climates, Ed. by CUEPE, Université de Genève.

Mémoires

- Zgraggen J.-M. (2003) Etude d'un lit de sphères pour le déphasage d'une onde thermique, diplôme de physique, Faculté des sciences et Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie, Université de Genève.

Presse technique

- Batitech no 2-05, avril 2005. Le rafraîchissement de bâtiment par déphasage, J. Wellstein.
- Bau & Architektur no 2, mai 2005. Kälte durch Phasenverschiebung, J. Wellstein.
- Bulletin ElectroSuisse no 3, 2006. Kälte durch Phasenverschiebung, J. Wellstein.
- Technische Rundschau no3, 2006. Kälte durch Phasenverschiebung J. Wellstein.

Presse grand public

- Campus no 76, juin - septembre 2005. Fraîcheur nocturne sur le coup de midi, A. Voss.
- Tribune de Genève, 18-19 juin 2005. Quand la fraîcheur nocturne revient à midi, A.-M. Brouet.
- RSR1, émission « On en parle », 13 juillet 2005. Nouveau phénomène: le "confort d'été", G. Bigler.