



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ**

Χρήση PCM στη παθητική ηλιακή θέρμανση κτιρίων

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΡΑΠΤΗ ΠΗΝΕΛΟΠΗ**



**Επίβλεψη:
Καθηγητής Κίμωνας Α.Αντωνόπουλος**

**ΑΘΗΝΑ
ΙΟΥΛΙΟΣ 2010**

Από την θέση αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου και επιβλέποντα της εργασίας αυτής κ.Κίμωνα Α.Αντωνόπουλο για την πολύτιμη βοήθειά και τη συνεργασία του, καθώς και τις συναδέλφους μου , Ορφανού Ελένη και Πατρικίου Ελένη για την απεριόριστη βοήθεια και συμπαράσταση που έδειξαν όλο αυτό το χρονικό διάστημα...

Αφιερωμένο στην οικογένεια μου, για όλα όσα μου έχει προσφέρει...

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Η κατανάλωση ενέργειας στα κτίρια μπορεί να διαιρεθεί στις εξής 4

κατηγορίες :

1. Ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται για τις ηλεκτρικές συσκευές του σπιτιού.
2. Ενέργεια που χρησιμοποιείται για την θέρμανση του νερού .
3. Ενέργεια που χρησιμοποιείται για την θέρμανση του χώρου.
4. Ενέργεια που χρησιμοποιείται για την ψύξη του χώρου.

Από τα παραπάνω μόνο το ηλεκτρικό ρεύμα πρέπει να παρέχεται χωρίς διακοπές.Οι εφαρμογές που παρέχουν θέρμανση δεν χρειάζεται να τροφοδοτούνται άμεσα με ενέργεια αφού οι διακυμάνσεις επιτρέπονται και επομένως μπορούν να συμβιβαστούν με την μεταβαλλόμενη φύση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Επιπλέον, ένα πολύ μεγάλο ποσοστό του ενεργειακού προϋπολογισμού κάθε οικίας, το οποίο αγγίζει το 55,2%, προέρχεται από την θέρμανση-ψύξη του χώρου και την θέρμανση του νερού.Δοθέντος του γεγονότος ότι η ενέργεια που καταναλώνεται από τις οικίες αντιστοιχεί στο 20% της ενέργειας που καταναλώνεται παγκοσμίως, η αποθήκευση θερμικής ενέργειας θα μπορούσε να καλύψει την κυμαινόμενη ζήτηση σε ποσοστό 10%.

Όπως κατανοούμε λοιπόν και από τα παραπάνω, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και η αυξανόμενη ενεργειακή απόδοση διδραματίζουν τον κυρίαρχο ρόλο των ενεργειακών πολιτικών.Και οι δύο αυτοί παράγοντες είναι πολύ σημαντικοί για τον περιορισμό, όσο αυτό είναι δυνατόν, των κλιματικών αλλαγών του πλανήτη αλλά και προκειμένου να μειώσουμε την εξάρτησή μας από οποιασδήποτε μορφής καύσιμα,γεγονός μείζονος σημασίας ειδικά για τις χώρες με ελάχιστα ή καθόλου ενεργειακά αποθέματα.

Η διαθεσιμότητα ορισμένων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ,όπως της αιολικής ή της ηλιακής είναι ασυνεχής,ενώ πολύ συχνά η τελευταία δεν συμπίπτει με την ζήτηση.Ακόμα, πολλές φορές παράγεται περισσότερη ενέργεια από όση απαιτείται ή και το αντίθετο, οπότε η μόνη λύση στο πρόβλημα αυτό φαίνεται να είναι η αποθήκευση της ενέργειας.

Οι διακυμάνσεις που αναφέρονται παραπάνω αντίστοιχούν κυρίως σε χώρες με πολύ θερμό ή ψυχρό κλίμα, αφού μεγάλα ποσά ενέργειας σπαταλώνται για την ψύξη και την θέρμανση αντίστοιχα των κτιρίων.Αυτό, οδηγεί και στην διαφορετική κοστολόγησή της, ανάλογα προς την ζήτηση, οπότε η αποθήκευση της θερμικής ενέργειας θα μπορούσε να οδηγήσει και σε σημαντικά οικονομικά οφέλη.

Μια οικονομική και αποδοτική τεχνολογία που θα χρησιμοποιείται προκειμένου να αποθηκεύονται μεγάλα ποσά θέρμανσης ή ψύξης σε καθορισμένο όγκο, βρίσκεται υπό μελέτη εδώ και πολύ καιρό. Η αποθήκευση της θερμικής ενέργειας έχει τον κυρίαρχο ρόλο στην εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια, η οποία συνδέεται άμεσα με την αποθήκευση θερμότητας υπό λανθάνουσα μορφή στα κατασκευαστικά προϊόντα. Εφαρμογές οι οποίες αποθηκεύουν θερμότητα κατά την διάρκεια της μέγιστης παραγωγής φορτίου και την αποδίδουν κατά την διάρκεια της περιορισμένης παραγωγής φορτίου αποτελούν τα υλικά αλλαγής φάσης.

Κεφάλαιο 2

Υλικά αλλαγής φάσης και η αρχή λειτουργίας τους

2.1 Υλικά αλλαγής φάσης

Τα υλικά αλλαγής φάσης ή PCM (phase changing materials) έχουν την δυνατότητα να μειώσουν τις ημερήσιες διακυμάνεις της θερμοκρασίας δωματίου περιορίζοντας τις μέγιστες τιμές που αυτή δύναται να λαμβάνει λόγω των ακραίων μεταβολών της εξωτερικής θερμοκρασίας. Γενικότερα, τα PCM μπορούν να περιορίζουν τα φορτία ψύξης ή θέρμανσης, να παράγουν αποθέματα ενέργειας για τον καταναλωτή και επομένως μειώνουν σημαντικά την αναγκαιότητα για δημιουργία νέων ηλεκτρικών σταθμών παραγωγής ενέργειας προκειμένου να καλυφθεί η ζήτηση σε ώρες αιχμής.

Ως γνωστόν, οι παράγοντες που επηρεάζουν την θερμοκρασία του αέρα στο εσωτερικό ενός κτιρίου είναι πολλοί. Σε αυτούς συμπεριλαμβάνονται οι κλιματικές συνθήκες, όπως η εξωτερική θερμοκρασία, η ταχύτητα του αέρα και η ηλιακή ακτινοβολία, οι θερμοφυσικές ιδιότητες του κτιρίου και των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν, όπως το πάχος του τοίχου, ο χώρος που καταλαμβάνουν τα παράθυρα, η θερμική αγωγιμότητα και η ειδική θερμότητα του υλικού του τοίχου, κ.α., οι εσωτερικές πηγές θερμότητας, ο αριθμός των αλλαγών του αέρα ανά ώρα και άλλες βοηθητικές εφαρμογές θέρμανσης και ψύξης.

Για ευκολία χρησιμοποιούνται δύο παράμετροι, οι I_{win} και I_{sum} για την μελέτη των επιπτώσεων των θερμοφυσικών ιδιοτήτων των διαφόρων υλικών στον βαθμό της θερμικής άνεσης [1]. Πιο αναλυτικά :

$$I_{sum} = \int (t_{in} - t_H) dt \quad t_{in} > t_H \quad (1)$$

$$I_{win} = \int (t_L - t_{in}) dt \quad t_{in} < t_L \quad (2)$$

όπου t_{in} η εσωτερική θερμοκρασία του χώρου, t_H η θερμοκρασία το καλοκαίρι και t_L θερμοκρασία το χειμώνα

Οι δύο αυτές παράμετροι περιγράφουν το βαθμό δυσφορίας σε ένα κτίριο το χειμώνα και το καλοκαίρι και ονομάζονται «ενσωματωμένος βαθμός δυσφορίας» για την εσωτερική θερμοκρασία το καλοκαίρι, I_{sum} , και «ενσωματωμένος βαθμός δυσφορίας» για την εσωτερική θερμοκρασία το χειμώνα, I_{win} .

Εάν υπάρξουν κάποια υλικά των οποίων τα ρc_p και k λαμβάνουν τέτοιες τιμές ώστε να ικανοποιείται η συνθήκη $I_{sum} = I_{win} = 0$, τότε θα θεωρήσουμε αυτά τα υλικά ως ιδανικά κατασκευαστικά υλικά. Αυτό σημαίνει ότι η εσωτερική θερμοκρασία θα βρίσκεται σε επίπεδα που προκαλούν θερμική άνεση όλο το χρόνο, χωρίς να υπάρχει η ανάγκη για βοηθητική θέρμανση-ψύξη.

Στην πραγματικότητα, είναι πολύ δύσκολο να βρεθούν τέτοιου είδους υλικά, με υψηλή τιμή ρc_p . Τα PCM μπορούν να παρέχουν υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης λανθάνουσας μορφής θερμότητας σε σχετικά μικρό εύρος θερμοκρασιών, οι οποίες συναντώνται συχνά στα κτίρια.

Πιο αναλυτικά, τα PCM είναι μίγματα που λιώνουν και στερεοποιούνται σε καθορισμένη θερμοκρασία και είναι ως εκ τούτου ικανά να αποθηκεύουν και να αποδίδουν μεγάλα ποσά ενέργειας. Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας μέσω της διαδικασίας αλλαγής φάσης ενός υλικού, υπό σταθερή θερμοκρασία, ονομάζεται λανθάνουσα θερμότητα. Όταν ένα PCM υπόκειται σε αλλαγή φάσης απαιτείται ένα πολύ μεγάλο ποσό ενέργειας, το οποίο μπορεί να παρέχει η αποθήκευση θερμότητας σε λανθάνουσα μορφή, καθώς κύριο

χαρακτηριστικό της είναι η μεταφορά πολύ μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας συγκριτικά με την αισθητή θερμότητα.

Είναι συνήθως φιλικά προς το περιβάλλον άλατα ή οργανικές ενώσεις που αποθηκεύουν και αποδίδουν λανθάνουσα θερμότητα με την αλλαγή των χημικών τους δεσμών. Η τελευταία παρατηρείται λόγω της αλλαγής φάσης που αυτά υφίστανται και έρχεται σε αντίθεση με την αλλαγή φάσης την οποία υφίστανται υλικά που αποθηκεύουν αισθητή θερμότητα και αλλάζουν δομή μηχανικά, όπως το νερό.



Εικόνα 1 : Η αλλαγή φάσης του νερού, [2]

Πιο συγκεκριμένα, εάν θέλω να θερμάνω ένα PCM από μια θερμοκρασία T_i σε μια θερμοκρασία T_f , τότε η αισθητή θερμότητα που αποθηκεύεται (χωρίς να έχει πραγματοποιηθεί αλλαγή φάσης) είναι:

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m \times Cp \times dT$$

(3)

Ενώ η θερμότητα που αποθηκεύεται σε ένα PCM, το οποίο θερμαίνεται από την T_i , που είναι μικρότερη της θερμοκρασίας τήξης T_m , στην T_f , που είναι μεγαλύτερη από την T_m είναι:

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} m \times Cp \times dT + m \times \Delta h + \int_{T_m}^{T_f} m \times Cp \times dT \quad (4)$$

Όπου ο όρος $m \Delta h$ εκφράζει την λανθάνουσα θερμότητα.

2.2 Η αρχή λειτουργίας τους

Τα υλικά αλλαγής φάσης είναι ,λοιπόν,στερεά σε θερμοκρασία δωματίου αλλά ρευστοποιούνται όταν αυξηθεί η θερμοκρασία αποθηκεύοντας ή απορροφώντας θερμότητα και ως εκ τούτου ψύχοντας τον χώρο .Αντιθέτως, όταν η θερμοκρασία μειώνεται το υλικό στερεοποιείται και αποδίδει την θερμότητα που είχε θερμαίνοντας έτσι τον χώρο.Επομένως, με την ενσωμάτωσή τους στους τοίχους των κτιρίων απορροφούν την θερμότητα από το θερμότερο περιβάλλον, καθυστερούν την θέρμανση του εσωτερικού ψύχοντας το κτίριο την ημέρα και θερμαίνοντας το την νύχτα, αποδίδοντάς την στο ψυχρότερο πλέον περιβάλλον.

Τα PCM για χρήση σε κτίρια,εφαρμογή η οποία θα αποτελέσει και αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας,αναφέρεται ότι θα πρέπει να έχουν την δυνατότητα αποθήκευσης περίπου 30 cal/gr και την δυνατότητα να λιώνουν και να στερεοποιούνται.Μάλιστα,η επιθυμητή θερμοκρασία τήξης είναι πάνω από τους 25 C ή 77 F. Επιπλέον θα πρέπει να είναι διαθέσιμο σε επαρκείς ποσότητες, ώστε οι παραγωγοί να μπορούν να το ενσωματώσουν με ευκολία στα καθιερωμένα οικοδομικά υλικά.

Άλλος τομέας στον οποίο μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα PCM είναι στα συστήματα θέρμανσης του νερού,στα συστήματα θέρμανσης που έχουν αέρα για μέσο ή και στα συστήματα κλιματισμού όπου τα PCM θα χρησιμεύουν για την αποτελεσματική αποθήκευση θερμότητας ή ψύχους.Ακόμα, εφαρμογή μπορούν να βρουν στα φορητά containers, όπου επιβάλλεται η διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας ή ακόμα και σε είδη ρουχισμού.

Εδώ κρίνεται σκόπιμο να επεξηγηθεί ο λόγος για τον οποίο επιλέξαμε την αλλαγή φάσης από στερεό σε υγρό και αντίστροφα,και όχι κάποια άλλη.Οι αλλαγές φάσης από στερεό σε στερεό παρουσιάζουν συγκριτικά χαμηλή λανθάνουσα θερμότητα ενώ η μεταβολή του όγκου του υλικού είναι μικρή.Στις αλλαγές φάσης από στερεό σε υγρό η λανθάνουσα θερμότητα είναι σχετικά υψηλή αλλά ο όγκος μεταβάλλεται κατά 10% περίπου .Η αλλαγή φάσης από στερεό σε

αέριο και από υγρό σε αέριο παρουσιάζουν την υψηλότερη λανθάνουσα θερμότητα, όμως συνδέονται και με σημαντικές μεταβολές στον όγκο.Επομένως, καταλήγουμε στην συμβιβαστική λύση χρήσης PCM, το οποίο θα αλλάζει απο την στερεή στην υγρή φάση και αντίστροφα, εφαρμογή ευρέως χρησιμοποιούμενη .Η λανθάνουσα θερμότητα αυξάνει αρκετά τα ποσά θερμότητας που αποθηκεύονται ενώ η μεταβολή του όγκου αντιμετωπίζεται εύκολα.

Κεφάλαιο 3

Χρήση των PCM στα κτίρια

3.1 Πως προέκυψε η ιδέα χρήσης των PCM στα κτίρια

Η βασική ιδέα χρήσης των PCM δεν είναι καινούρια. Στην πραγματικότητα είχε αρχικά είχε εμφανιστεί περίπου το 1940, οπότε έγινε και η πρώτη εφαρμογή όπως έχει αναφερθεί επίσημα. Όμως, οι αποτυχημένες προσπάθειες ενσωμάτωσης των PCM σε

κατασκευαστικά υλικά είχαν αποτελέσει ανασταλτικό παράγοντα στην ευρεία χρήση τους.

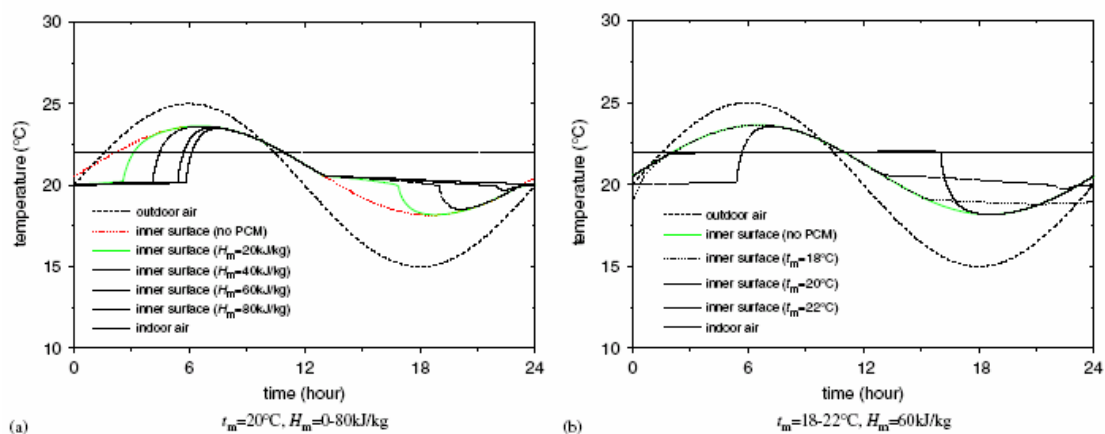
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα PCM έχουν την δυνατότητα να αποθηκεύουν πολύ μεγαλύτερες ποσότητες θερμικής ενέργειας ανά μονάδα μάζας σε σχέση με τα συνηθισμένα οικοδομικά υλικά, σε μορφή λανθάνουσας και όχι αισθητής θερμότητας. Ακόμα, συγκρίνοντας την ποσότητα της μάζας που απαιτείται για την αποθήκευση της ενέργειας σε ένα κτίριο κατασκευασμένο από τούβλα ή τσιμέντο με την αντίστοιχη ποσότητα όταν χρησιμοποιείται PCM προκύπτει ότι η δεύτερη είναι ελάχιστη.

Επιπλέον, μεγάλα συστήματα άμεσου κέρδους με ακατάλληλη την θερμική μάζα του κτιρίου μπορεί να οδηγήσουν σε υπερθέρμανση αυτού κατά τη διάρκεια της ημέρας και επομένως στην αύξηση της ανάγκης για αερισμό του δωματίου και στη μείωση της χρηστικής αξίας των θερμικών κερδών. Τοίχοι από βαριές πέτρες ή τούβλα χρησιμοποιούνταν παραδοσιακά ως στοιχεία παθητικής αποθήκευσης, τα οποία όμως δεν σταθεροποιούσαν αποτελεσματικά τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις κυρίως λόγω της περιορισμένης θερμικής τους ικανότητας. Έτσι, η χρήση της λανθάνουσας θερμότητας από την αλλαγή φάσης των PCM παρουσιάστηκε ως μια πολύ ελκυστική ιδέα για εφαρμογές παθητικών συστημάτων θέρμανσης καθώς η ογκομετρική πυκνότητα αποθήκευσης είναι συγκριτικά μεγαλύτερη και η αλλαγή φάσης είναι ισοθερμική, παρέχοντας έτσι ένα πολύ καλό μέσο για την ρύθμιση της θερμοκρασίας.

3.2 Παράγοντες για την αξιολόγηση της θερμικής συμπεριφοράς των τοίχων

3.2.1. Παράγοντες ϕ και f

Οι Asan και Sancaktar [3], ερεύνησαν τις επιπτώσεις των θερμοφυσικών ιδιοτήτων ενός κοινού τοίχου στην «χρονική καθυστέρηση» ϕ και στον «παράγοντα ελάττωσης» f . Τα ϕ και f περιγράφουν την αλλαγή του μήκους κύματος και του πλάτους των κυμάτων θέρμανσης που διαδίδονται από την εξωτερική στην εσωτερική επιφάνεια του τοίχου, $f=A_{in}/A_{out}$ και $\phi=\phi_{lag}$. Η συνδυασμένη επίδραση της θερμικής ικανότητας και της θερμικής αγωγιμότητας στα ϕ και f υπολογίστηκε για ποικίλα κατασκευαστικά υλικά. Για τα υλικά κατασκευής τοίχων με σταθερές θερμοφυσικές ιδιότητες, η μεταβολή της θερμοκρασίας της εσωτερικής επιφάνειας είναι όμοια με αυτή της εξωτερικής θερμοκρασίας με γραμμικές ιδιότητες, και επομένως η μεταφορά θερμότητας και οι οριακές συνθήκες είναι γραμμικές συναρτήσεις. Από την άλλη, για τα PCMs η μεταβολή της θερμοκρασίας της εσωτερικής επιφάνειας δείχνει να μην έχει γραμμικά χαρακτηριστικά. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας ενός τοίχου με PCM για διάφορες θερμότητες τήξης H_m και θερμοκρασίες τήξης t_m .



Εικόνα 2 : Η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας ενός τοίχου με PCM για διάφορες θερμότητες τήξης H_m και θερμοκρασίες τήξης t_m .

Η εξωτερική θερμοκρασία θεωρείται ότι μεταβάλλεται ημιτονοειδώς από τους 15-25° C ενώ η εσωτερική θεωρείται σταθερή και ίση με 22° C. Το

πάχος του τοίχου έχει θεωρηθεί 2 cm και η θερμική του αγωγιμότητα ίση με 0.2 W/(m °C).

Φαίνεται, λοιπόν, από το διάγραμμα ότι οι H_m και t_m μπορούν να διατηρήσουν την θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας σε μία επιθυμητή τιμή, κοντά στην θερμοκρασία τήξης του PCM, για ορισμένο χρονικό διάστημα, το οποίο ορίζεται ως η «καθυστέρηση του PCM». Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι οι εξισώσεις της μεταφοράς θερμότητας δεν είναι γραμμικές εφόσον η θερμική ικανότητα του PCM μεταβάλλεται με την θερμοκρασία. Για ένα συγκεκριμένο κτίριο και για καθορισμένες κλιματολογικές συνθήκες, η καθυστέρηση του PCM επηρεάζεται από τις θερμοφυσικές ιδιότητες του τοίχου που περιλαμβάνει το PCM. Εάν η καθυστέρηση αυτή είναι αρκετά μεγάλη και με κατάλληλη θερμοκρασία τήξης, η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα μπορεί να διατηρηθεί σε επίπεδα θερμικής άνεσης.

3.2.2 Παράγοντες a , b , Δt [4]

Διάφορες μελέτες έχουν διεξαχθεί, μία από τις οποίες είναι και η παραπάνω, στις οποίες ο «παράγοντας ελάττωσης» f και η «χρονική καθυστέρηση» ϕ χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της θερμικής συμπεριφοράς των τοίχων με σταθερές θερμοφυσικές ιδιότητες. Προκειμένου, λοιπόν, να αναλύσουμε περαιτέρω και να αξιολογήσουμε την θερμική συμπεριφορά των τοίχων και των πατωμάτων που περιέχουν PCM, νέες παράμετροι εισάγονται σε αυτή την μελέτη, ' a ', ' b ' και Δt .

3.2.2.1. Παρουσίαση των παραγόντων ' a ', ' b ' και Δt .

Η λειτουργική εξωτερική θερμοκρασία μπορεί να θεωρηθεί ότι δίνεται από τον τύπο:

$$T'_{out} = T_{out} + q_{r,out}/h_{w,out}$$

(5)

Εάν αμελήσουμε την θερμική ικανότητα του τοίχου, τότε ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας δίδεται από τον τύπο:

$$U' = \frac{1}{(1/h_{w,in}) + (L/k) + (1/h_{w,out})} \quad (6)$$

Και η ροή θερμότητας της εσωτερικής επιφάνειας από τον τύπο :

$$q'_w = (T'_{out} - T_{in})U' = \frac{(T'_{out} - T_{in})}{(1/h_{w,in}) + (L/k) + (1/h_{w,out})} \quad (7)$$

Εάν η θερμική ικανότητα του τοίχου δεν μπορεί να αμεληθεί, τότε ο συντελεστής μετάδοσης της θερμότητας και η ροή της θερμότητας είναι αντιστοίχα U και q_w αντίστοιχα. Έτσι, ο συντελεστής μεταβολής της επιφανειακής ροής θερμότητας α ορίζεται ως εξής:

$$\alpha = \frac{q_w}{q'_w} = \frac{U}{U'}$$

(8)

Εάν $\alpha < 1$, τότε η ροή θερμότητας από το PCM μπορεί να αυξήσει την θερμική αντίσταση των εξωτερικών τοίχων και να μειώσει την κατανάλωση της ενέργειας που χρησιμοποιούνται για λογους ψύξης ή θέρμανσης στα κτίρια.

Οι εσωτερικοί τοίχοι φορτίζονται ($q_w < 0$) και αποφορτίζονται ($q_w > 0$) προκειμένου να περιορίσουν τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις στο εσωτερικό ενός δωματίου. Όταν $q_w < 0$, η εσωτερική θερμοκρασία T_{in} είναι υψηλότερη από την θερμοκρασία που δημιουργεί την αίσθηση της άνεσης, και όταν $q_w > 0$ η T_{in} είναι χαμηλότερη από την θερμοκρασία άνεσης.

Η αναλογία για την αποθήκευση θερμότητας στους εσωτερικούς τοίχους, συμβολίζεται με 'b' και δίδεται από τον τύπο:

$$b = \frac{\int_0^{\tau} (q_w(\tau) - q_{in}) d\tau}{\rho H_m L} \quad (9)$$

και παρουσιάζει τον λόγο της αποθηκευμένης ή της απορριπτόμενης θερμότητας συγκριτικά προς την συνολική θερμική ικανότητα της επιφάνειας του τοίχου.

Ακόμα, η περίοδος αλλαγής φάσης Δt , ορίζεται ως η περίοδος από την έναρξη ως την λήξη της διαδικασίας τήξης – ψύξης του PCM. Εάν το PCM έχει την δυνατότητα να περιορίσει την κατανάλωση

ενέργειας ενός κτιρίου ή να αυξήσει την θερμική άνεσή του, τότε η κατά τον δυνατόν μεγαλύτερη περίοδος αλλαγής φάσης είναι πιο αποδοτική τόσο για την εξοικονόμηση ενέργειας όσο και για να καταστήσει τον εσωτερικό χώρο πιο άνετο.

3.2.2.2 Μελέτη και αποτελέσματα

Η θερμική συμπεριφορά ενός πάνελ με PCM μελετήθηκε τόσο με θεωρητική ανάλυση όσο και με αριθμητική προσομοίωση. Εισήχθησαν οι παράμετροι α και ΔT , οι οποίοι εξετάστηκαν και σε συνδυασμό με την ροή θερμότητας q_w χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της θερμικής συμπεριφοράς των PCM πάνελ. Τα συμπεράσματα στα οποία κατέληξαν είναι τα εξής:

- Εάν $\alpha < 1$, τότε ο εξωτερικός τοίχος μπορεί να αποθηκεύσει θερμότητα ψύξης ή και θέρμανσης. Ο εσωτερικός τοίχος, από την άλλη, μπορεί να αποθηκεύσει ενέργεια όταν η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα είναι πιο υψηλή από από την θερμοκρασία άνεσης και να την αποβάλει όταν η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα θα είναι χαμηλότερη. Όσο μεγαλύτερη είναι η περίοδος αλλαγής φάσης, όπως ήδη αναφέρθηκε, τόσο πιο αποδοτική είναι η εξοικονόμηση της ενέργειας και τόσο πιο άνετο το περιβάλλον στο εσωτερικό του δωματίου.
- Οι επιδράσεις του εξωτερικού τοίχου στην εξοικονόμηση ενέργειας βελτιώνονται με την αύξηση του H_m και την μείωση του k . Ακόμα, η διανομή της q_w μεταβάλλεται όταν αλλάζει η T_m , όμως η τιμή της πρέπει να κυμαίνεται σε καθορισμένο εύρος προκειμένου να ισχύει ότι $\alpha < 1$ κατά την διάρκεια ολόκληρης της διαδικασίας τήξης.
- Για τον εσωτερικό τοίχο του PCM πάνελ, εάν το PCM μπορεί να λιώσει και να στερεοποιηθεί τελείως κατά την διάρκεια του κύκλου τήξης-στερεοποίησης, τότε είναι δυνατή η περαιτέρω εξοικονόμηση ενέργειας με την αύξηση του

H_m . Ακόμα, η διανομή της q_w αλλάζει με την μεταβολή των k - T_m , των οποίων οι τιμές πρέπει να επιλεγούν προσεκτικά ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή. Εάν το PCM δεν μπορεί να λιώσει και να στερεοποιηθεί πλήρως, η θερμότητα τήξης H_m δεν χρειάζεται να αυξηθεί. Εάν το πάχος του εσωτερικού τοίχου είναι ικανοποιητικά μικρό ώστε να ισχύει ότι $s \ll k/h_{w,in}$, τότε η T_m θα πρέπει να είναι υψηλότερη από την μέση εσωτερική θερμοκρασία.

Κεφάλαιο 4

Κατηγορίες και κριτήρια των PCM

4.1 Κατηγορίες των PCM [5]

Σε μία γενικότερη βάση τα υλικά αλλαγής φάσης, που μεταβαίνουν από την στερεή στη υγρή φάση και αντίστροφα, χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες τα οργανικά, τα ανόργανα και τα ευτηκτικά μίγματα. Συνήθη οργανικά PCM είναι οι παραφίνες, τα μικροκρυσταλλικά κεριά, τα λιπαρά οξέα, οι εστέρες, οι αλκοόλες

λιπαρών οξέων ή και μίγματα αυτών, με κύριο εκπρόσωπο τις παραφίνες, ενώ συνήθη ανόργανα PCM αποτελούν τα ένυδρα άλατα.

Τα ευτηκτικά μίγματα αποτελούνται από την σύνθεση δύο ή και περισσότερων συστατικών που λιώνουν και στερεοποιούνται ταυτόχρονα. Τα μίγματα αυτά μπορούν να είναι συνδυασμός οργανικού PCM-οργανικού PCM, οργανικού PCM –ανόργανου PCM και ανόργανου PCM -ανόργανου PCM.

Στα πλεονεκτήματα των οργανικών PCM συγκαταλλέγεται το ότι τα περισσότερα είναι μη διαβρωτικά, υπάρχει μικρή πιθανότητα ρύπανσης του νερού καθώς και αμελητέα εμφάνιση του φαινομένου “supercooling”, το οποίο οδηγεί στην μείωση της θερμοκρασίας κρυστάλλωσης και επομένως σε περιορισμό της λανθάνουσας θερμότητας που αποδίδεται σε σχέση με την συνήθη ή την απόδοσή της σε μεγαλύτερο θερμοκρασιακό εύρος. Επιπλέον παρέχουν χημική και θερμική σταθερότητα, χαμηλό κόστος αγοράς σε σχέση με τις άλλες κατηγορίες PCM και η παραγωγή τους γίνεται για ποικίλες εμπορικές εφαρμογές. Από την άλλη πλευρά, στα πλεονεκτήματα των ανόργανων PCM συγκαταλλέγεται η μεγαλύτερη τιμή της λανθάνουσας θερμότητας υγροποίησης, συγκριτικά με τα οργανικά, η μη αναφλεξιμότητά τους και η υψηλότερη πυκνότητά τους και πάλι συγκριτικά με τα οργανικά.

Τα μειονεκτήματα των οργανικών PCM είναι όπως ήδη αναφέρθηκε η χαμηλότερη θερμότητα υγροποίησης, ο χαμηλότερος συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας και η χαμηλότερη πυκνότητα σε σχέση με τα μη οργανικά, καθώς και το ότι είναι αναφλέξιμα σε χαμηλές θερμοκρασίες. Στα μειονεκτήματα των ανόργανων PCM συμπεριλαμβάνεται το ότι είναι διαβρωτικά, ότι είναι συνήθως η εμφάνιση του φαινομένου “supercooling”, ότι είναι πιθανή η δημιουργία ιζήματος λόγω του διαχωρισμού των φάσεων, η αβέβαιη θερμική σταθερότητα στις κυκλικές φορτίσεις, το αυξημένο κόστος αγοράς τους σε σχέση με τα οργανικά και τέλος, το ότι αποτελούν υδροσκοπικά υλικά με αποτέλεσμα τον πιθανό εκφυλισμό των ιδιοτήτων τους σε βάθος

χρόνου όταν είναι εκτεθειμένα σε περιβάλλον με υψηλά ποσοστά υγρασίας.

Από τα οργανικά μίγματα οι αλκάνες θεωρούνται πολλά υποσχόμενοι υποψήφιοι για χρήση ως PCM αφού μπορούν να ενσωματωθούν σε συνήθη κατασκευαστικά υλικά αν και οι καθαρές αλκάνες δεν διατίθενται σε λογική τιμή.

Τα ένυδρα άλατα, που όπως έχει ήδη αναφερθεί ανήκουν στα ανόργανα PCM, αποτελούν πολύ ελκυστικά υλικά για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας λόγω της υψηλής ογκομετρικής πυκνότητας, χρήσιμα για την αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας με σχετικά υψηλή θερμική αγωγιμότητα και σε λογική τιμή συγκρινόμενα με τις παραφίνες. Συνηθισμένο ένυδρο άλας είναι το άλας του Glauber $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, το οποίο περιέχει 44% Na_2SO_4 και 56% H_2O με θερμοότητα τήξης $32,4^\circ\text{C}$ και λανθάνουσα θερμοότητα 254 KJ/Kg . Η επιλογή ενός τέτοιου υλικού για PCM σε συγκεκριμένη εφαρμογή θα έπρεπε να βασίζεται στις θερμοδυναμικές, κινητικές και χημικές του ιδιότητες. Για εφαρμογές σε χαμηλές θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 0°C έως 99°C , τα ένυδρα άλατα θα ήταν η καλύτερη επιλογή λόγω της διαθσιμότητάς τους σε μικρότερα θερμοκρασιακά εύρη με λογική ειδική θερμική ικανότητα της τάξης των $133,4\text{ cal}/^\circ\text{C mol}$, θερμική αγωγιμότητα $0,987\text{ W/m K}$, πυκνότητα 1552 kg/m^3 στην στερή κατάσταση και θερμοκρασία αλλαγής φάσης κυμαινόμενη από 35°C - 39°C .

Οι παραφίνες είναι μίγματα, που σε θερμοκρασία δωματίου έχουν την μορφή κεριού. Χημικά είναι υδρογονάνθρακες με αλκάνες: $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$. Το σημείο τήξης τους αυξάνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός των ατόμων του C και μάλιστα για θερμοκρασίες τήξης που κυμαίνονται από 18 έως 90°C , ο αριθμός των ατόμων ποικίλει από 16 έως 50 .

Η πλειοψηφία των οργανικών PCM που όμως δεν είναι παραφίνες είναι οξείδια. Χαρακτηρίζονται από τον χημική τύπο $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$ και το σημείο τήξης τους είναι κοντά σε αυτό των παραφινών. Το μειονέκτημά τους είναι ότι είναι τοξικά και πιο ακριβά από τις παραφίνες.

4.2 Διαδικασία επιλογής και τα κριτήρια που πρέπει να πληρούν τα PCM.

Η διαδικασία επιλογής PCM είναι πολύ σημαντική και γίνεται ανάλογα με την περιοχή και την εφαρμογή χρήσης τους. Ένα από τα πιο βασικά κριτήρια αποτελεί το σημείο αλλαγής φάσης του υλικού του PCM, του οποίου η προσαρμοστικότητα είναι αναγκαία. Έτσι, η διαδικασία της επιλογής θα πρέπει να ξεκινάει από μέτρηση του σημείου τήξης και της θερμότητας που αποδίδεται, και ως εκ τούτου από τον υπολογισμό του ευθηκτικού σημείου.

Το σημείο τήξης ενός υλικού PCM θα πρέπει οπωσδήποτε να βρίσκεται μέσα στο εύρος των θερμοκρασιών αυτών που προκαλούν θερμική άνεση. Για δεδομένες κλιματικές συνθήκες και δεδομένα κτίρια, εάν η θερμοκρασία τήξης είναι πολύ υψηλή, η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που αποθηκεύεται από το PCM θα είναι πολύ χαμηλή κατά την διάρκεια της ημέρας, ενώ εάν η θερμοκρασία τήξης είναι πολύ χαμηλή θα είναι δύσκολο να διατηρηθεί η εσωτερική θερμοκρασία σε ανεκτά επίπεδα την νύχτα. Η ακριβής τιμή της θερμοκρασίας τήξης θα πρέπει να επιλέγεται σύμφωνα με τις εκάστοτε συνθήκες, όπως το είδος του κτιρίου και το κλίμα. Η ανάλυση των Peirro et al. [6] πάνω στους τοίχους με PCM για ένα σπίτι με παθητική θέρμανση, αναφέρει ότι η βέλτιστη αποθήκευση θερμότητας κατά την διάρκεια της ημέρας συμβαίνει για θερμοκρασία τήξης 1-3 °C πάνω από την μέση θερμοκρασία δωματίου. Ο Neepel [7], εξέτασε την θερμική δυναμική μίας γυψοσανίδας με ενσωματωμένα λιπαρά οξέα και παραφίνες, και κατέληξε στο ότι η μέγιστη αποθήκευση ενέργειας κατά την διάρκεια της ημέρας προκύπτει για PCM με θερμοκρασία τήξης κοντά στην μέση θερμοκρασία θερμικής άνεσης του δωματίου. Για πάνελ ενσωματωμένο στον «φάκελο» του κτιρίου η βέλτιστη τιμή της θερμοκρασίας τήξης εξαρτάται και από την εξωτερική θερμοκρασία και την θερμική αντίσταση του τοίχου.

Η υψηλή τιμή της λανθάνουσας θερμότητας που αποθηκεύεται ανά μονάδα μάζας είναι απαραίτητη ώστε με μικρότερη ποσότητα PCM να αποδίδεται καθορισμένο ποσό θερμότητας, ενώ εξίσου απαραίτητη είναι και η υψηλή τιμή της ειδικής θερμότητας. Η τελευταία προσφέρει επιπλέον αποθήκευση θερμότητας με την μορφή της αισθητής θερμότητας και συμβάλλει και στην αποφυγή του φαινομένου “supercooling”. Ακόμα, απαιτείται η υψηλή τιμή της θερμικής αγωγιμότητας ώστε η θερμοκρασιακή κλίση για την φόρτιση του PCM να είναι μικρή, και υψηλή πυκνότητα του υλικού ώστε να περιορίζεται ο όγκος του που χρησιμοποιείται.

Άλλα κριτήρια για την επιλογή του κατάλληλου PCM, το οποίο θα εφαρμοσθεί σε κτίρια είναι να είναι οικονομικό και απλό, να έχει καλές ιδιότητες κρυσταλλοποίησης ώστε να αποφεύγεται κατά το δυνατόν η εμφάνιση του φαινομένου “supercooling”, να έχει σταθερές θερμικές και χημικές ιδιότητες, για να αποφεύγεται το ενδεχόμενο της χημικής του αποσύνθεσης, γεγονός που θα σηματοδοτήσει και το τέλος της ζωής του υλικού, να είναι μη τοξικό, μη αναφλέξιμο και μη εκρηκτικό. Τέλος, η μακροχρόνια δοκιμή του σε πειράματα κρίνεται απαραίτητη.

Σε ότι αφορά στην μη αναφλεξιμότητα του PCM, οι Salyer και Sircar [8] παρουσίασαν ένα δοκίμιο πάνω στην αντίδραση των PCM στη φωτιά και τόνισαν την πιθανότητα προσθήκης ουσιών που ονομάζονται fire-retardants και οι οποίες βελτιώνουν την αντίδραση του υλικού σε περίπτωση πυρκαγιάς. Οι Banu et al. [9], πραγματοποίησαν δοκιμές αναφλεξιμότητας σε γυψοσανίδες, οι οποίες ήταν διαποτισμένες με περίπου 24% οργανικό PCM και οι οποίες έδειξαν ότι οι γυψοσανίδες δεν πληρούν όλες τις προϋποθέσεις σχετικά με το ενδεχόμενο έναρξης φωτιάς. Όμως, ανέφεραν την πιθανότητα μείωσης της αναφλεξιμότητας της γυψοσανίδας που αποθηκεύει θερμότητα με την ενσωμάτωση των fire-retardants.

Τα βασικά χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει ένα υλικό αλλαγής φάσης συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα [10]:

Πίνακας 1:

Θερμικές ιδιότητες	Φυσικές ιδιότητες	Χημικές Ιδιότητες	Οικονομικοί παράγοντες
Θερμοκρασία αλλαγής φάσης στο επιθυμητό εύρος λειτουργίας	Υψηλή τιμή της πυκνότητας	Χημική σταθερότητα	Διαθέσιμα σε μεγάλες ποσότητες
Υψηλή τιμή λανθάνουσας θερμότητας ανά μονάδα μάζας	Μικρή μεταβολή της πυκνότητας κατά την αλλαγή φάσης	Μή εμφάνιση χημικής αποσύνθεσης	Οικονομικά
Υψηλή τιμή ειδικής θερμότητας	Μικρή ή και καθόλου εμφάνιση του φαινομένου "supercooling"	Συμβατότητα με τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευσή τους	
Υψηλή τιμή αγωγιμότητας τόσο στην στερεή όσο και		Μή δηλητηριώδη, μή αναφλέξιμα, μή εκρηκτικά	

στην υγρή φάση			
-------------------	--	--	--

Η γενικότερη επίδραση της αποθήκευσης θερμότητας με PCM οφείλει να αξιολογείται στην εκάστοτε εφαρμογή λαμβάνοντας πάντα υπ' όψη το κλίμα , την κατασκευή και την λειτουργία του κτιρίου.Επιπλέον,αναφέρεται ότι οι βασικές αρχές σχεδιαμού των κτιρίων που χρησιμοποιούν την αισθητή θερμότητα για θέρμανση,παραμένουν οι ίδιες αν αντί για αυτήν χρησιμοποιηθεί η λανθάνουσα μορφή θερμότητας μέσω των PCM, όπως για παράδειγμα η μόνωση και η θέση που αυτή τοποθετείται ή η απαιτούμενη θερμική μάζα.

Κεφάλαιο 5

Ενεργητικά και Παθητικά Συστήματα[11]

Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με την εφαρμογή των PCM στα κτίρια ως παθητικά συστήματα τόσο για θέρμανση όσο και για ψύξη.Εδώ κρίνεται απαραίτητο να γίνει ο διαχωρισμός ανάμεσα στα ενεργητικά και στα παθητικά συστήματα.

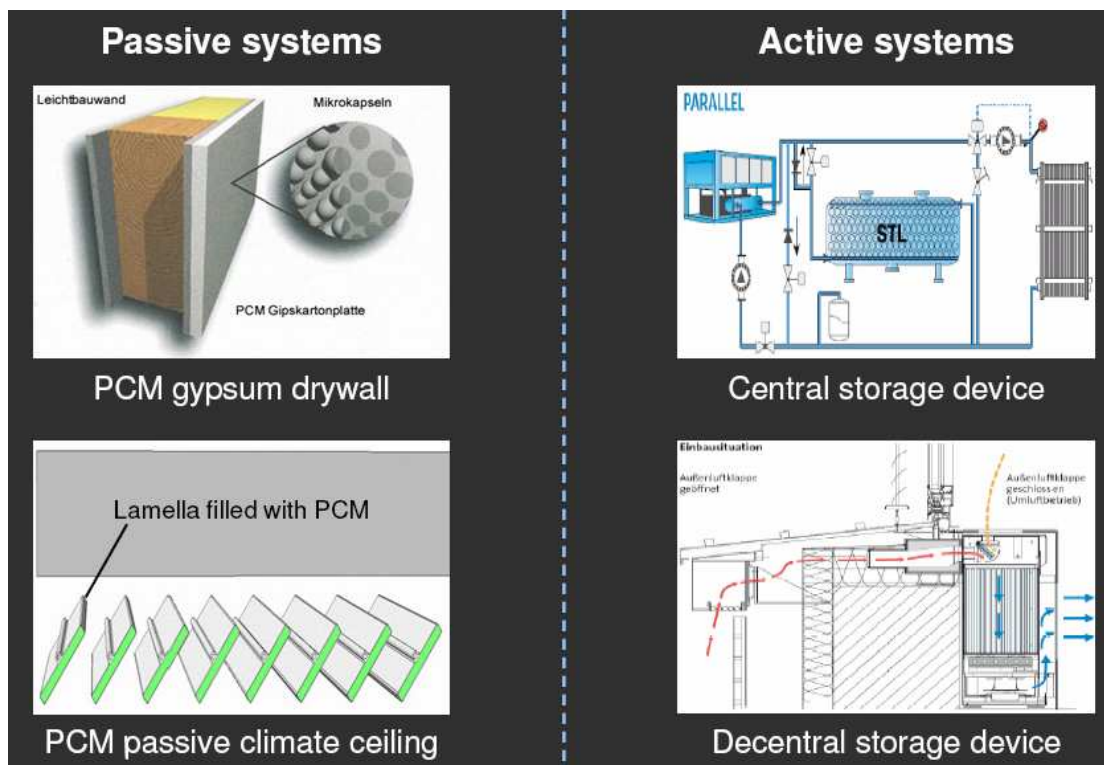
Για την θέρμανση και την ψύξη ενός χώρου με την χρήση της ηλιακής ενέργειας, η τελευταία χρειάζεται να συλλεχθεί, να αποθηκευτεί και να διανεμηθεί κατάλληλα στον χώρο.Στα ενεργητικά συστήματα θέρμανσης-ψύξης, η ηλιακή ενέργεια συλλέγεται χρησιμοποιώντας κάποιου είδους συλλάκτες, για παράδειγμα δεξαμενές νερού.Νερό αποθηκευμένο σε πλαστικό , σε fibreglass, το οποίο χρησιμοποιείται ως μονωτικό υλικό, είναι κατασκευασμένο από άμμο και ανόργανα συστατικά και συνήθως υποκαθιστά με ασφάλεια τον ασβέστη, ή σε αστάλινες δεξαμενές που είναι "glass-lined" αποτελεί το τυπικό μέσο θερμικής αποθήκευσης σε ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού, το οποίο διαχωρίζεται από το υπόλοιπο κτίριο με μόνωση.Η ηλιακή ενέργεια

που αποθηκεύεται στην μονάδα αποθήκευσης μπορεί να βρίσκεται σε μορφή αισθητής ή και λανθάνουσας θερμότητας και η ενέργεια διανέμεται στο χώρο χρησιμοποιώντας ηλεκτρικές βάνες, ανεμιστήρες ή και άλλα μέσα.

Από την άλλη στα παθητικά συστήματα θέρμανσης-ψύξης,η συλλογή, αποθήκευση και διανομή της ενέργειας γίνεται με φυσικά μέσα και γενικότερα, δεν χρησιμοποιείται καθόλου μηχανική ή ηλεκτρική ιχύς ή ηλεκτρονικός έλεγχος.Σε αυτά τα συστήματα, στοιχεία του κτιρίου όπως οι τοίχοι, η οροφή, τα παράθυρα επιλέγονται και τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να συμμετέχουν στην συλλογή, αποθήκευση, μεταφορά και διανομή της θερμικής ενέργειας.Τόσο τα στοιχεία του κτιρίου, όπως είναι τα κατασκευαστικά του υλικά (πέτρες, τούβλα, τσιμέντο, νερό, μόνωση και άλλα) και οι διάφορες θερμικές διεργασίες όπως η θερμική ακτινοβολία, η φυσική και η εξαναγκασμένη συναγωγή, η αγωγή, η εξάτμιση και άλλα, συνδιάζονται ποικιλοτρόπως ανάλογα με τις ιδιαίτερες ανάγκες του κάθε κτιρίου, οι οποίες εξαρτώνται και πάλι από το κλίμα της περιοχής και το σκοπό κατασκευής του.Τα κατασκευαστικά υλικά,δηλαδή τα τούβλα, οι πέτρες, το τσιμέντο, το PCM και άλλα, βοηθούν στην αποθήκευση σεβαστών ποσοτήτων ενέργειας και στην χρονική καθυστέρηση και μείωση της έντασης του κύματος θερμότητας.Κατά την διάρκεια της ημέρας, η θερμότητα αποθηκεύεται σε αυτά τα υλικά και αποδίδεται κατά τη διάρκεια της νύχτας, όταν είναι πιο απαραίτητη.

Τα συστήματα αποθήκευσης για παθητικής μορφής θερμότητα περιλαμβάνουν το άμεσο και το έμμεσο κέρδος.Στο άμεσο κέρδος, η θερμότητα λαμβάνεται μέσω ενός παραθύρου, ενός τοίχου ή ενός γυαλιού με νότιο προσανατολισμό, μέσω του πατώματος ή και μέσω αντικειμένων λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας.Έτσι, η περιοχή του κτιρίου που θερμαίνεται τείνει να υπερθερμανθεί. Επιπλέον, οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις είναι συνήθως υψηλότερες από αυτές που δίνουν την αίσθηση της θερμικής άνεσης στον άνθρωπο.Μία αποτελεσματική μέθοδος για την μείωση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων είναι η

εισαγωγή ενός τοίχου αποθήκευσης θερμότητας ανάμεσα στην άμεση ηλιακή ακτινοβολία και στο κτίριο. Αυτό αποτελεί το έμμεσο κέρδος. Παθητικά συστήματα έμμεσου κέρδους είναι για παράδειγμα ο τοίχος trombe και ο τοίχος νερού.



Εικόνα 3: Παραδείγματα ενεργητικών-παθητικών συστημάτων

Γενικότερα, η εφαρμογή των PCM σε παθητικά συστήματα υπερέχει των συστημάτων που χρησιμοποιούν αισθητή θερμότητα κυρίως λόγω της μικρότερης μάζας και όγκου του απαιτούμενου συστήματος, της ποσότητας ενέργειας που αποθηκεύεται σε μια σχετικά στεθερή θερμοκρασία και των μικρότερων απωλειών θερμότητας προς το περιβάλλον συγκριτικά με τα συνιθισμένα συστήματα.

Κεφάλαιο 6

Ορισμένες εφαρμογές PCM στα κτίρια , ως συστήματα παθητικής αποθήκευσης ,[12] και [13]

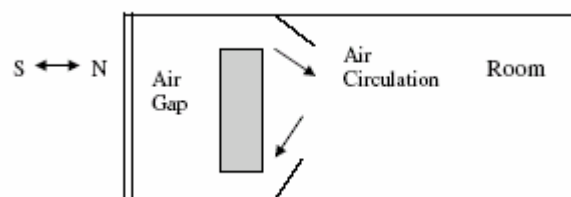
Τρεις είναι οι κύριοι τρόποι για χρήση PCM στα κτίρια για θέρμανση-ψύξη:

- 1.Τοποθέτηση των PCM στους τοίχους των κτιρίων.
- 2.Τοποθέτηση των PCM σε στοιχεία των κτιρίων διαφορετικά από τους τοίχους.
- 3.Τοποθέτηση των PCM σε θερμές και ψυχρές μονάδες αποθήκευσης.

Τα πρώτα δυο αναφέρονται σε παθητικά συστήματα, όπου η θέρμανση και η ψύξη που αποθηκεύονται αποδίδονται αυτόματα όταν η εσωτερική ή η εξωτερική θερμοκρασία αυξάνεται ή μειώνεται κάτω από το σημείο τήξης.Το τρίτο είναι ένα ενεργητικό σύστημα, όπου η αποθηκευμένη θερμότητα ή ψύξη βρίσκεται μέσα σε κάλυμμα, θερμικά μονωμένο από το κτίριο με μόνωση.Έτσι, η θερμότητα ή η ψύξη χρησιμοποιείται μόνο όταν αυτό απαιτείται και όχι αυτόματα.

6.1Τοίχος trombe με PCM [12]

Ο τοίχος trombe αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα περίπτωσης με έμμεσο θερμικό κέρδος. Αποτελείται από ένα συνηθισμένο αλλά παχύ τοίχο στην νότια πλευρά του κτιρίου, με ένα γυάλινο ή πλαστικό κάλυμμα τοποθετημένο σε απόσταση περίπου τεσσάρων ιντσών από τον τοίχο. Θερμότητα από τον ήλιο αποθηκεύεται στον χώρο ανάμεσα στον τοίχο και στο κάλυμμα, ενώ η το μαύρο χρώμα της εξωτερικής επιφάνειας του τοίχου που απορροφά επίσης θερμότητα, την αποθηκεύει στην μάζα του τοίχου. Θερμότητα διανέμεται από τον τοίχο trombe στο κτίριο για αρκετές ώρες. Όταν η θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου πέσει κάτω από την θερμοκρασία του τοίχου, τότε θερμότητα αρχίζει να μεταδίδεται με ακτινοβολία στον χώρο και πιθανές απώλειες μπορούν να ελεγχθούν με την προσθήκη μιάς μονωτικής κουρτίνας, η οποία θα είναι κλειστή το βράδυ, ανάμεσα στο κάλυμμα και στον τοίχο. Ο παραδοσιακός τοίχος trombe βασιζόταν στην αισθητής μορφής θερμότητα, αλλά προκειμένου να αυξήσουμε την αποθήκευσή της ανα μονάδα μάζας, ο τοίχος trombe με PCM αποτελεί μία ελκυστική ιδέα. Έτσι, ένας τοίχος που περιέχει PCM κατασκευάζεται στην νότια πλευρά του κτιρίου, ο οποίος θα θερμαίνεται από την ηλιακή ακτινοβολία κατά την διάρκεια της ημέρας, τήκοντας το PCM, και αποδίδοντας την απορροφώμενη θερμότητα το βράδυ προς θέρμανση του κτιρίου. Για δεδομένη ποσότητα θερμότητας που θέλουμε να αποθηκεύσουμε, οι μονάδες αλλαγής φάσης απαιτούν λιγότερο χώρο από τους τοίχους με νερό ή από τους παραδοσιακούς τοίχους trombe, και είναι και πολύ ελαφρύτεροι. Συνήθως, ως PCM σε τοίχους trombe χρησιμοποιούνται ένυδρα άλατα και υδρογονάνθρακες. Ένα σχηματικό διάγραμμα τοίχου trombe, με PCM παρουσιάζεται παρακάτω:



Εικόνα 4 : Σχηματικό διάγραμμα τοίχου trombe με PCM

Ο Bourdeau [14] ερεύνησε δύο τοίχους παθητικής αποθήκευσης θερμότητας που χρησιμοποιούσαν calcium chloride hexahydrate, με σημείο τήξης 29°C. Κατέληξε ότι ένας τοίχος πάχους 8.1 cm με PCM παρουσιάζει ελαφρώς καλύτερη συμπεριφορά από έναν κλασσικό τοίχο πάχους 40 cm.

Οι Buddhi και Sharma [15] μέτρησαν το κατά πόσο μεταφέρεται ηλιακή ακτινοβολία μέσω ενός υλικού αλλαγής φάσης για διαφορετικές θερμοκρασίες και πάχη. Ως PCM επιλέχθηκε stearic acid, και κατέληξε στο ότι στο PCM η ηλιακή ακτινοβολία μεταφέρεται πολύ πιο γρήγορα σε σχέση με το γυαλί για το ίδιο πάχος και μάλιστα πρότεινε μια καινούρια εφαρμογή, την εισαγωγή τους σε τοίχους παράθυρα, ως διαφανές μονωτικό υλικό.

6.2 Παραθυρόφυλλο με PCM [12]

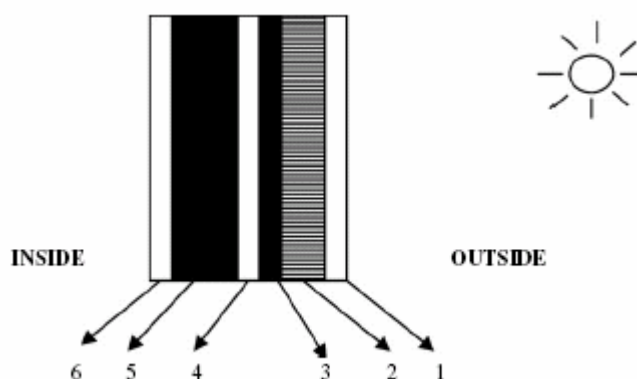
Σε αυτή την εφαρμογή, παραθυρόφυλλο που περιέχει PCM τοποθετείται έξω από επιφάνειες παραθύρων. Κατά την διάρκεια της ημέρας είναι ανοιχτά προς το περιβάλλον, η εξωτερική του πλευρά εκτίθεται σε ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται θερμότητα και το PCM λιώνει. Την νύχτα, κλείνουμε το παραθυρόφυλλο, ανοίγουμε το παράθυρο και θέρμανση από το PCM εισέρχεται λόγω ακτινοβολίας στον χώρο. Οι Buddhi et al. [16], ερεύνησαν την θερμική συμπεριφορά ενός δοκιμαστικού δωματίου διαστάσεων 1 m x 1 m x 1 m, με και χωρίς υλικό αλλαγής φάσης. Ως υλικό αποθήκευσης της λανθάνουσας μορφής θερμότητας χρησιμοποιήθηκε το CG lauric acid, και βρέθηκε ότι η ικανότητα θερμικής αποθήκευσης του δωματίου αυξήθηκε κατά 4°C για 4-5 ώρες, όταν χρησιμοποιείται νύχτα, χάρη στην παρουσία του PCM.

6.3 Τοίχος συλλογής ηλιακής θερμότητας για αερισμό του κτιρίου [13]

Όπως είναι γνωστό ένας τοίχος PCM έχει την δυνατότητα να αιχμαλωτίζει μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει

στους τοίχους και στην οροφή του κτιρίου.Εξ αιτίας της μεγάλης θερμικής τους μάζας μπορούν να ελαχιστοποιούν τις επιπτώσεις των διακυμάνσεων της εξωτερικής θερμοκρασίας στο εσωτερικό του κτιρίου.Επιπλέον, είναι πολύ αποτελεσματικός στην μετατόπιση του φορτίου σε περιόδους μικρότερης ζήτησης. Οι Arkar και Medved[17] σχεδίασαν και εξέτασαν ένα σύστημα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας (LTHS) για τον αερισμό ενός κτιρίου.Οι σφαιρικές κάψουλες πολυαιθυλένης τοποθετήθηκαν σε ένα κανάλι του συστήματος αερισμού του κτιρίου και λειτούργησαν ως ένα πορώδες μέσο αποθήκευσης και απορρόφησης.Η θερμότητα που απορροφήθηκε χρησιμοποιήθηκε για να προθερμάνει τον αέρα που εισέρχεται στο κτίριο.

Ο «ηλιακός τοίχος» είναι μία άλλη εφαρμογή για την θερμική αποθήκευση με PCM.Σε αυτή την περίπτωση η ακτινοβολία που προσπίπτει στον τοίχο απορροφάται από το PCM και «θάβεται» στον τοίχο. Οι Strifith και Novak [18] κατασκεύασαν έναν πειραματικό τοίχο, ο οποίος περιείχε μαύρο κερί παραφίνης ως PCM.Η αποθηκευμένη θερμότητα χρησιμοποιήθηκε για την θέρμανση και τον αερισμό του κτιρίου και τα αποτελέσματα, σύμφωνα με τους ερευνητές, ήταν πολλά υποσχόμενα. Ο τοίχος αποτελείται από έξι κυρίως μέρη όπως φαίνεται κα στο σχήμα που δίδεται παρακάτω.



Εικόνα 5 :Στοιχεία του PCM «ηλιακού τοίχου».

Η ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος περνάει μέσα από το τζάμι με το διαφανές μονωτικό υλικό(1,2), το οποίο εμποδίζει την συναγωγή

και την μεταφορά την θερμότητας με ακτινοβολία.Στη συνέχεια το PCM (3), το οποίο βρίσκεται σε μία διαφανή πλαστική θήκη από polycarbonate, απορροφά και αποθηκεύει την ενέργεια , κυρίως ως λανθάνουσα θερμότητα.Ο αέρας για τον αερισμό του κτιρίου θερμαίνεται στο κανάλι (4) και οδηγείται στο δωμάτιο, ενώ η μόνωση και ο γύψος (5) και (6) αντίστοιχα αποτελούν δεδομένα στοιχεία.

Ο «ηλιακός τοίχος» παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλα συστήματα.Κατ'αρχήν, η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε λανθάνουσα θερμότητα με τόσο υψηλή αποδοτικότητα οφείλεται στην απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας κατ'ευθείαν από το PCM μέσω του διαφανούς πλαστικού τζαμιού, το οποίο ταυτόχρονα λειτουργεί και ως μονωτικό, εμποδίζοντας τις απώλειες συναγωγής και ακτινοβολίας προς το περιβάλλον.Επιπλέον, οι απώλειες λόγω της αγωγής στο δωμάτιο επίσης μειώνονται στην επιφάνεια του τοίχου.

6.4Γυψοσανίδα με ενσωματωμένο PCM [13]

Η γυψοσανίδα με PCM ή το πάνελ είναι ένας εξαιρετικά ενδιαφέρων τύπος υλικού, με ενσωματωμένο υλικό αποθήκευσης θερμότητας, για κατασκευή κτιρίου.Κατά την διάρκεια των περασμένων 20 έτων, πολλά είδη καψουλών μεγάλων διαστάσεων βγήκαν στο εμπόριο τόσο για ενεργητικά όσο και για παθητικά συστήματα, συμπεριλαμβανομένου του άμεσου κέρδους.Παρ'όλα αυτά, η επιφάνεια των περισσότερων εμπορικών προϊόντων που είναι αποθηκευμένα σε μορφή κάψουλας, δεν ήταν ικανή να μεταδώσει την θερμότητα στο κτίριο ύστερα από την τήξη του PCM από την άμεση ηλιακή ακτινοβολία, γι αυτό και έχουν διεξαχθεί πολλές έρευνες, οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω.

Γυψοσανίδες με PCM θα μπορούσαν να αντικαταστήσουν στις παραδοσιακές γυψοσανίδες κατά την διάρκεια της κατασκευής ή και της ανακαίνισης ενός κτιρίου.Έτσι, θα παρέχουν στο κτίριο την θερμική αποθήκευση, η οποία θα διανέμεται σε όλη του την έκταση, ενισχύοντας

το παθητικό σύστημα και περιορίζοντας τα απαιτούμενα μέγιστα ηλεκτρικά φορτία για θέρμανση-ψύξη.

Οι Peirro et al.[6] θεώρησαν μία γυψοσανίδα με ενσωματωμένο PCM ως μέσο αποθήκευσης σε μία ελαφριά κατασκευή κατοικίας έκτασης 120 m² με καλή μόνωση και μία μεγάλη έκταση της νότιας επιφάνειας κατασκευασμένη από γυαλί, στο Madison, Wisconsin. Το κτίριο μπορούσε να εξοικονομήσει μέχρι 3 GJ το χρόνο ή αλλιώς το 15 % του ετήσιου ενεργειακού κόστους. Επιπλέον, κατέληξαν στο ότι η βέλτιστη αποθήκευση ενέργειας προκύπτει όταν το PCM έχει θερμοκρασία τήξης περίπου 1-3 °C πάνω από την μέση θερμοκρασία του δωματίου.

Οι Stefau και Feustel[19], ερεύνησαν την χρήση διπλής γυψοσανίδας με PCM για την περαιτέρω αύξηση της αποθηκευτικής ικανότητας ενός κτιρίου, ώστε οι θερμοκρασίες του δωματίου να διατηρηθούν πιο κοντά στα ανώτερα όρια θεμικής άνεσης, χωρίς τη χρήση μηχανικής ψύξης. Τα αποτελέσματα από την προσομοίωση μίας οικίας με υψηλά εσωτερικά φορτία και δεδομένες καιρικές συνθήκες για την περιοχή Sunnynale, California έδειξαν σημαντική πτώση της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα, όταν η θερμότητα αποθηκεύεται στο PCM των γυψοσανίδων. Αν και οι προσομοιώσεις έχουν δείξει τα πιθανά οφέλη από την χρήση των PCM στους τοίχους, οι ερευνητές κατάληξαν στο ότι ψύξη του «φακέλου» του κτιρίου μέσω της κίνησης του αέρα στον χώρο, αποτελεί έναν μη αποδοτικό τρόπο μεταφοράς της θερμότητας. Η κίνηση του αέρα κοντά στους τοίχους, η οποία καθορίζει και την ποσότητα της θερμότητας που μεταφέρεται, είναι σχετικά μικρή. Κυρίως σε περιόδους όπου η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι σχετικά υψηλή και την νύχτα, θα ήταν αποδοτική η εξαναγκασμένη παροχή αέρα κατά μήκος των επιφανειών των τοίχων για να διευκολύνει την ανταλλαγή θερμότητας. Η μειωμένη ικανότητα απόρριψης του αέρα που χρησιμοποιείται για ψύξη το καλοκαίρι, απαιτεί είτε αύξηση της αποθηκευτικής ικανότητας είτε μείωση του ποσού της θερμότητας που αποθηκεύεται.

Ο Neeper [7] έχει εξετάσει την δυναμική μιάς γυψοσανίδας με ενσωματωμένα fatty acids και paraffin waxes ως PCM που υπόκεινται στην ημερίσια θερμοκρασιακή διακύμανση του δωματίου, χωρίς όμως να προσπίτει άμεσα σε αυτά ηλιακή ακτινοβολία. Η παρατήρηση που έγινε από τον συγγραφέα είναι ότι η μέγιστη τιμή της ημερίσιας αποθηκευμένης ενέργειας προκύπτει όταν η τιμή της θερμοκρασίας τήξης του PCM σε κάψουλες πλησιάζει την μέση τιμή της θερμοκρασίας που δημιουργεί την αίσθηση της άνεσης. Μάλιστα, η ημερήσια αποθηκευμένη ενέργεια μειώνεται όταν η αλλαγή φάσης πραγματοποιηθεί σε ένα εύρος θερμοκρασιών.

Οι προσομοιώσεις των «ενεργειακών» κτιρίων βοηθούν στην εκτίμηση των διάφορων εφαρμογών των PCM για λόγους αποθήκευσης θερμότητας στα κτίρια. Έτσι, το Fraunhofer Institute, Germany προσομοίωσε την θερμική συμπεριφορά των στοιχείων κτιρίου, προκειμένου να συγκρίνει την δυναμική απόδοση των διαφόρων ειδών τοίχων, που περιείχαν ποικίλα PCM. Η βάση τους είναι ένα μοντέλο, που εξετάζει την αλλαγή φάσης και είναι εμπειρικά επικυρωμένο από μετρήσεις σε δείγματα τοίχων, διαστάσεων 0.5X 0.5 m². Ερεύνησαν την επίδραση που έχουν τα PCM ως συνάρτηση του θερμοκρασιακού εύρους της αλλαγής φάσης, της ποσότητας του PCM και της κατασκευής και χρήσης του κτιρίου. Με την βοήθεια θερμογράφων, φάνηκε ποσοτικά η επίδραση του PCM στα κατασκευαστικά υλικά, δηλαδή σε τέσσερα δείγματα τοίχων με διαφορετική ποσότητα PCM εμσωνατωμένη στο καθένα, τα οποία είχαν θερμανθεί σε ένα φούρνο και στη συνέχεια παρακολουθούνταν η ψύξη τους. Η ποικιλία στις τιμές της θερμοκρασίας με τον χρόνο αποδεικνύει την επίδραση των PCM. Όσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα του PCM τόσο περισσότερο διαρκεί η αποβολή της θερμότητας που έχουν απορροφήσει. Επομένως, σε συγκεκριμένο θερμοκρασιακό εύρος, η θερμική μάζα ενός στοιχείου του κτιρίου μπορεί να αυξηθεί σημαντικά λόγω της διαδικασίας αλλαγής φάσης, ώστε η θερμική άνεση που συνδέεται με τις βαριές κατασκευές

των κτιρίων να μπορεί να προσεγγισθεί και από κατασκευαστικά υλικά για πιο ελαφριές κατασκευές.

Οι Kissock et al [20], έχουν παρουσιάσει τα αποτελέσματα της πειραματικής μελέτης τους πάνω στην θερμική συμπεριφορά γυψοσανίδων, οι οποίες έχουν απορροφήσει 30% κατά βάρος εμπορική παραφίνη. Στις προσομοιώσεις που έκαναν, η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία του γύρω χώρου και οι εσωτερικές θερμοκρασίες στα κελιά των δοκιμών παρακολουθούνταν συνεχόμενα για 14 ημέρες. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέγιστη θερμοκρασία κατά την διάρκεια αλλαγής φάσης στο δοκιμαστικό κελί με PCM ήταν σχεδόν 10 μικρότερη από την αντίστοιχη στο κελί αναφοράς τις θερμές ημέρες.

Όμως, οι γυψοσανίδες με PCM παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα. Η κατάλληλη μεταβατική θερμοκρασία διαφέρει ανάλογα με το κλίμα της εκάστοτε περιοχής, ενώ το να επιτύχεις την σωστή θερμοκρασία γίνεται διπλά δύσκολο σε περιοχές που έχουν ανάγκη τόσο από θέρμανση όσο και από κλιματισμό. Άλλα ζητήματα που προκύπτουν είναι η διάβρωση, η αναφλεξιμότητά τους και άλλα παραδοσιακά θέματα που αφορούν στην εφαρμογή τους, όπως η δυνατότητα να βαφτεί ο τοίχος.

6.5 Μπλόκ τσιμέντου με ενσωματωμένο PCM [13]

Οι Hawes et al [21], παρουσίασαν την θερμική συμπεριφορά ποικίλων PCM σε διάφορους τύπους τσιμεντένιων τοίχων. Η παρουσίαση αυτή κάλυψε την επίδραση της αλκαλικότητας του τσιμέντου, της θερμοκρασίας, τον χρόνο εμβαπτισμού και την «αποδυνάμωση» της δυνατότητας απορρόφησης του PCM κατά την διαδικασία της ενσωμάτωσης. Εξέτασαν τους μηχανισμούς απορρόφησης και ίδρυσαν μία μέθοδο ανάπτυξης και χρήσης των σταθερών απορρόφησης του PCM στο τσιμέντο, για να επιτύχουν την διάχυση της ζητούμενης ποσότητας PCM και επομένως την απαιτούμενη θερμική ικανότητα αποθήκευσης. Οι επιπτώσεις της αλλαγής του τσιμέντου και των βελτιωμένων τεχνικών ενσωμάτωσης έχουν αυξήσει την θερμική αποθήκευση κατά 300% περίπου.

Οι πιο πολλά υποσχόμενες τεχνικές κάλυψης των PCM έχουν μελετηθεί από τους Salyer et al.[22], και εφαρμοσθεί σε solite ρηχά μπλόκ τσιμέντου. Αυτές είναι η εμφύσηση των PCM σε πορώδη υλικά, η απορρόφηση του PCM από διαχωρισμένη και ειδική silica και ο διασκορπισμός PCM σε πολυμερικά κιβώτια. Οι συγγραφείς έχουν τονίσει ότι το PCM σε μορφή melt-mix, PCM/silica dry powder ή και PCM/HDPE (cross-linked pellets of high density polyethylene), όταν τοποθετούνται στο ρηχό-κεντρικό χώρο των μπλόκ τσιμέντου, μπορούν να φιλοξενήσουν μεγάλες ποσότητες PCM και αντίστοιχα πολύ μεγάλες ποσότητες θερμότητας προς αποθήκευση.

Ο Chahroudi [23], έχει ερευνήσει την πιθανή εφαρμογή των υλικών thermocrete. Το thermocrete είναι ένα αποθηκευτικό μέσο το οποίο συνδυάζει ένα κατάλληλο PCM με ένα πλέγμα τσιμέντου προκειμένου να επιτευχθεί μια σχεδόν ισοθερμική αποθήκευση. Τα μπλόκ από thermocrete έχουν αναλυθεί σε βάθος σε ότι αφορά τους τρόπους λειτουργίας, τις επιδόσεις και την εξοικονόμηση ενέργειας σε ποικίλες εφαρμογές. Τα υλικά αποθήκευσης ενέργειας με thermocrete κατασκευάζονται από τον συνδυασμό των PCM με τσιμέντο για την παραγωγή υλικών αποθήκευσης ενέργειας χαμηλού κόστους με δομικές και θερμοστατικές ιδιότητες.

Οι Lee et al.[24], μελέτησαν και παρουσίασαν τα αποτελέσματα μακροσκελών δοκιμών που συγκρίνουν την συμπεριφορά, σε ότι αφορά στην θερμική αποθήκευση, των συνηθισμένων μπλόκ τσιμέντου με αυτά που έχουν ενσωματωμένους δύο τύπους από PCM, το BS και την εμπορική παραφίνη -P. Δύο τύποι μπλόκ μελετήθηκαν και συγκρίθηκαν, το συνηθισμένο μπλόκ από τσιμέντο που παράγεται στο Portland, και το "autoclaved" μπλόκ, που αποτελείται από το ίδιο τσιμέντο αλλά έχει επιπλέον πυρίτιο. Η ενσωμάτωση επιτεύχθηκε με την εμφύσηση του θερμού μπλόκ τσιμέντου σε λουτρό λιωμένου PCM ώσπου να απορροφηθεί η απαιτούμενη ποσότητα PCM, περίπου 3.9-8.6%. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα μπλόκ τσιμέντου είναι ικανά να αποθηκεύουν την λανθάνουσα και την αισθητή θερμότητα του

ενσωματωμένου PCM καθώς και την αισθητή θερμότητα του τσιμέντου. Έτσι, επιτρέπεται η μετατόπιση των θερμικών και ψυκτικών φορτίων από τις ώρες αιχμής.

Οι Hadjiena et al. [25], έχουν εφαρμόσει την ίδια τεχνική ενσωμάτωσης για το τσιμέντο αλλά με sodium thiosulphate pentahydrate ($\text{Na}_2 \text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5 \text{H}_2 \text{O}$) ως PCM.

Χρησιμοποίησαν πορώδεις τσιμέντο και κατάφεραν να γεμίσουν τους περισσότερους πόρους του τσιμέντου σε ποσοστό περίπου 60%. Έτσι κατέληξαν στο ότι η μεγάλη περιοχή απορρόφησης του autoclaved πορώδους τσιμέντου λειτουργεί ως ένα πολύ καλό υποστηρικτικό πλέγμα για το $\text{Na}_2 \text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5 \text{H}_2 \text{O}$, που βελτιώνει την δομική του σταθερότητα κατά την διάρκεια των θερμικών φορτίσεων. Μία τέτοιου είδους μικροενσωμάτωση σε κάψουλες μπορεί να αποδειχθεί εξαιρετικά αποτελεσματική, αφού η ενσωμάτωση του PCM γίνεται με έναν σχετικά οικονομικό τρόπο και περιορίζονται τα προβλήματα που συνδέονται με την χρήση των ένυδρων αλάτων, όπως το φαινόμενο “supercooling”.

6.6 PCM ενσωματωμένο σε ξύλο-ελαφύ τσιμέντο[13]

Το ξύλο-ελαφρύ τσιμέντο είναι ένα μίγμα από τσιμέντο, κομμάτια ξύλου ή σκόνη από πριόνι, το οποίο δεν πρέπει να ξεπερνάει το 15% κατά βάρος, νερό και άλλες προσθήκες. Αυτό το μίγμα μπορεί να εφαρμοσθεί για την κατασκευή εσωτερικών και εξωτερικών τοίχων. Για ενσωμάτωση σε ξύλο-ελαφρύ τσιμέντο, δύο είδη PCM, το Rubitherm GR40, 1-3mm και το GR50, 0.2-0.6mm εξετάστηκαν από τους Mehling et al. [26]. Αποδείχτηκε ότι τα PCM μπορούν να συνδυαστούν με ξύλο-ελαφρύ τσιμέντο και ότι οι μηχανικές τους ιδιότητες δεν φαίνεται να μεταβάλλονται σημαντικά. Μάλιστα, ανέφεραν τα εξής προτερήματα:

- Θερμική αγωγιμότητα : λ ανάμεσα 0.15 και 0.75 W/mK
- Ηχομόνωση
- Μηχανικές ιδιότητες: πυκνότητα ανάμεσα στα 600 και 1700 kg/m³

- Θερμική ικανότητα c_p ανάμεσα 0.39-0.48 kJ/kg K για $\rho=1300$ kg/m³
- Πυκνότητα 60-70% της τιμής του καθαρού τσιμέντου(0.67 kL/kg K για $\rho=2400$ kg/m³)

Η ενσωμάτωση του PCM παρουσιάζει δύο βασικά προτερήματα, πρώτον αυξάνει την θερμική ικανότητα αποθήκευσης και δεύτερον οτι οδηγεί στην κατασκευή πιο ελαφριών και πιο λεπτών στοιχείων με βελτιωμένη θερμική συμπεριφορά.

6.7Θερμικά αυξημένος σκελετός τοίχου με PCM[13]

Οι Meng Zhang et al.[27], παρουσίασαν την ανάπτυξη ενός θερμικά αυξημένου σκελετού τοίχου, ο οποίος μειώνει τα μέγιστα της ζήτησης κλιματισμού σε κατοικίσιμα κτίρια.Ένας σκελετός τοίχου που περιέχει υψηλή κρυσταλλική παραφίνη ως PCM, μέσω μακροενσωμάτωσης σε κάψουλες είναι αυτός που αναπτύχθηκε, κατασκευάστηκε και αξιολογήθηκε.Αυτός ο πρώτοτυπος τοίχος ονομάστηκε phase change frame wall (PCFW), και τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν οτι ο PCFW μειώνει τα μέγιστα φορτία θερμορροής από τον τοίχο κατά 38%.Σε κτιριακές εφαρμογές, αυτό θα μπορούσε να μεταφραστεί σε χαμηλότερα φορτία κλιματισμού που απαιτούνται από τους τοίχους και τα ταβάνια, σε μετατόπιση μέρους του θερμικού φορτίου σε άλλες ώρες της ημέρας και στην σχετικά σταθερή εσωτερική θερμοκρασία του χώρου.Το χειμώνα, θερμότητα από τον εξοπλισμό-πηγή μπορεί να αποθηκεύεται στο PCFW, η οποία αργότερα θα αποδίδεται προς θέρμανση του σπιτιού, μειώνοντας έτσι τις φορτίσεις του εξοπλισμού, και επομένως αυξάνοντας την αποδοτικότητά του και τον χρόνο ζωής του.

Κεφάλαιο 7

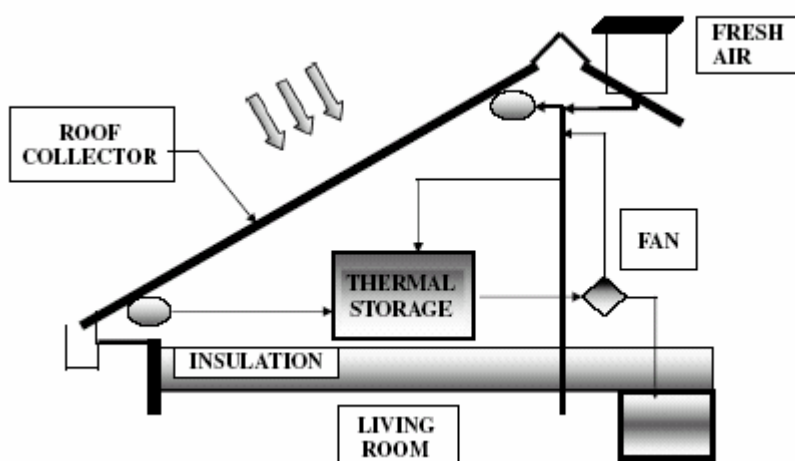
PCM σε συστήματα θέρμανσης του χώρου, ψύξης του χώρου και σε συνδυασμό των παραπάνω

7.1 PCM σε συστήματα θέρμανσης του χώρου [28]

7.1.1 Σύστημα θέρμανσης χώρου ενσωματωμένο στην οροφή

Το πανεπιστήμιο της βόρειας Αυστραλίας (UniSA)[29], έχει αναπτύξει ένα σύστημα αποθήκευσης της ηλιακής θερμότητας, το οποίο είναι ενσωματωμένο στην οροφή, και το οποίο χρησιμοποιεί μεταλλικά φύλλα οροφής με αυλακώσεις ως ηλιακό συλλέκτη για την θέρμανση του αέρα. Μία μονάδα θερμικής αποθήκευσης PCM χρησιμοποιείται για την αποθήκευση της θερμότητας την ημέρα, ώστε αυτή να μπορεί να διανεμηθεί κατά τη διάρκεια της νύχτας, οπότε και δεν υπάρχει ηλιοφάνεια.

Το σύστημα αυτό λειτουργεί με τρεις διαφορετικούς τρόπους. Όσο έχει ηλιοφάνεια και όταν απαιτείται θέρμανση, ο αέρας περνάει μέσα από τον συλλέκτη και ως εκ τούτου μέσα στο σπίτι. Όταν δεν απαιτείται θέρμανση, ο αέρας περνάει από την «θερμική αποθήκευση», λιώνει το PCM φορτίζοντάς το έτσι για μελλοντική χρήση. Όταν δεν υπάρχει ηλιοφάνεια, ο αέρας του δωματίου περνάει από την «θερμική αποθήκευση», ζεσταίνεται και μετά ωθείται στο σπίτι. Επαρκή ποσά καθαρού αέρα εισάγονται όταν το σύστημα ηλιακής θέρμανσης διανέμει θερμότητα στον χώρο, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 6 : Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος ηλιακής θέρμανσης

Οι συγγραφείς αναφέρουν τα εξής προτερήματα του συστήματος αυτού:

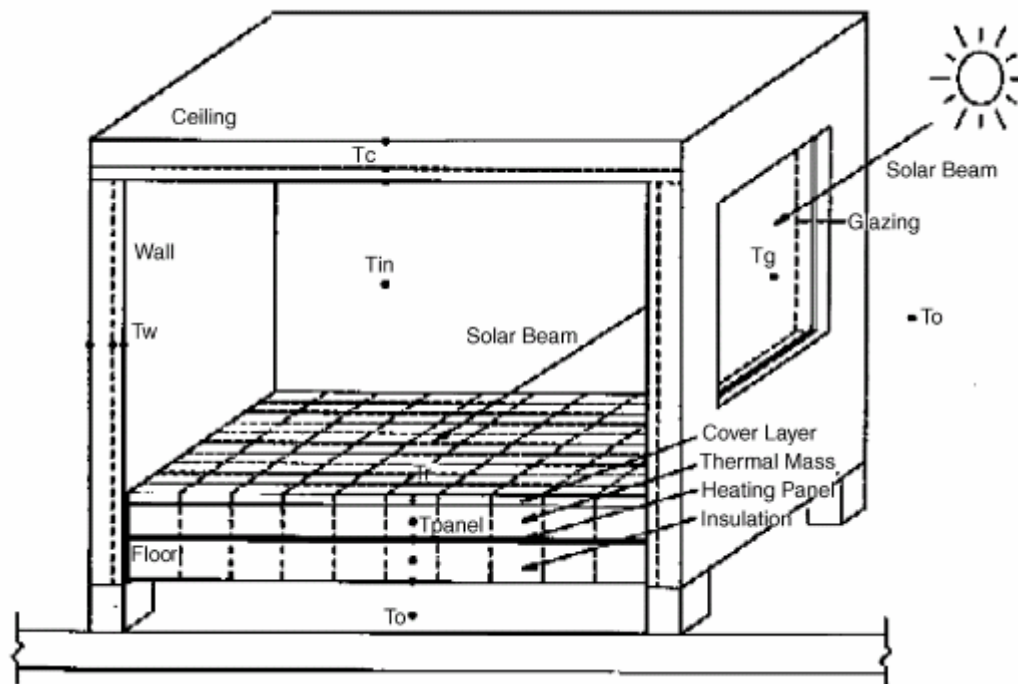
- Οι επιδράσεις της αισθητής θερμότητας γίνονται εμφανείς στις αρχικές περιόδους τόσο της τήξης όσο και της ψύξης. Για την περίπτωση της θέρμανσης αυτό σημαίνει ότι σημαντική αύξηση της θερμότητας κατά την αρχική περίοδο διανομής του αέρα στον χώρο, γεγονός που συμβάλλει στην αύξηση της θερμικής άνεσης.
- Η υψηλότερη θερμοκρασία του εισερχόμενου αέρα στο σύστημα αυξάνει τους ρυθμούς μεταφοράς της θερμότητας και μειώνει τον χρόνο τήξης. Αντίθετα, κατά την διάρκεια της ψύξης η χαμηλότερη θερμοκρασία του εισερχόμενου αέρα αυξάνει την μεταφορά θερμότητας και μειώνει τον χρόνο ψύξης.
- Η υψηλότερη ροή αέρα αυξάνει τον ρυθμό μεταφοράς θερμότητας και μειώνει τον χρόνο τήξης, αυξάνοντας όμως την θερμοκρασία του αέρα εξόδου από το σύστημα (και άρα εισόδου στο δωμάτιο). Για την ψύξη, ο υψηλότερος ρυθμός ροής του αέρα αυξάνει την μεταφορά θερμότητας και μειώνει τον χρόνο ψύξης, μειώνοντας όμως και την θερμοκρασία του αέρα εξόδου από το σύστημα.

7.1.2. Σύστημα θέρμανσης βασισμένο στον αέρα

Οι Morrison, Abdel Khalik[33], μελέτησαν την συμπεριφορά ενός ηλιακού συστήματος θέρμανσης βασισμένο στον αέρα, χρησιμοποιώντας σαν μονάδα αποθήκευσης υλικό αλλαγής φάσης. Οι βασικοί στόχοι της εργασίας τους ήταν αφενός να καθορίσουν τις επιπτώσεις της λανθάνουσας μορφής θερμότητας και της θερμοκρασίας τήξης της του PCM στο σύστημα ηλιακής θέρμανσης που είναι βασισμένο στον αέρα και αφετέρου να αναπτύξουν ένα εμπειρικό μοντέλο για τις πιο χαρακτηριστικές μονάδες PCM. Κατέληξαν στο ότι το PCM θα έπρεπε να επιλεγεί με βάση το σημείο τήξης του και την λανθάνουσα θερμότητά του και επίσης στο ότι το σύστημα αυτό, που βασίζεται στον αέρα, και χρησιμοποιεί ως PCM sodium sulfate decahydrate καταλαμβάνει αρκετά μικρό όγκο για την αποθήκευση της θερμότητας.

7.1.3. Θέρμανση στο πατώμα

Το πατώμα είναι ένα εξίσου σημαντικό σημείο ενός κτιρίου και επομένως δοκιμάστηκε και η χρήση αυτού για την θέρμανση και την ψύξη. Οι Ahtienities και Chen,[34] ερεύνησαν την σύντομη μεταφορά θερμότητας στα συστήματα θέρμανσης του πατώματος. Η μελέτη τους επικεντρώθηκε στην επιρροή του καλύμματος και της ηλιακής ακτινοβολίας στην θερμοκρασιακή κατανομή του πατώματος και στην κατανάλωση ενέργειας. Περιοχές καλυμμένες ολόκληρες ή και μερικώς από χαλί, λήφθηκαν υπ' όψη, όπως επίσης και περιοχές με ξύλινη επικάλυψη του τσιμέντου ή του μίγματος γύψου-τσιμέντου. Πειραματικά αποτελέσματα και αποτελέσματα από προσομοιώσεις για ένα εξωτερικό δωμάτιο δοκιμών, αποκαλύπτουν ότι η ορζόντια ακτινοβολία μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της θερμοκρασίας της περιοχής του πατώματος που φωτίζεται κατά 8°C περισσότερο σε σχέση με αυτή που βρίσκεται υπό σκιά. Η μερική κάλυψη δε του πατώματος με χαλί, αυξάνει την θερμοκρασιακή διαφορά του πατώματος στους 15°C όταν απορροφάται ηλιακή ακτινοβολία. Η ηλιακή ακτινοβολία που αποθηκεύεται στην θερμική μάζα του πατώματος αποδείχτηκε ότι μειώνει την κατανάλωση ενέργειας για θερμότητα κατά 30% περίπου, ενώ η αύξηση της θερμικής μάζας από 5 cm σε 10 cm δεν έδειξε να οδηγεί σε περεταίρω εξοικονόμηση ενέργειας. Παρακάτω δίνεται η σχηματική αναπαράσταση του δωματίου δοκιμών.



Εικόνα 7 : Σχηματική αναπαράσταση του δωματίου δοκιμών

7.1.4 Σανίδες στο ταβάνι

Ένα σύστημα θέρμανσης του χώρου που περιλαμβάνει PCM στο κενό που έχει το ταβάνι, αναπτύχθηκε από τους Guthertz και Schiller[35]. Ηλιακοί ανακλαστές χρησιμοποιούνταν για να αναγκάζουν την ηλιακή ακτινοβολία να εισέρχεται μέσα από τα παράθυρα και να προσπίπτει στο PCM. Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του συστήματος ήταν ότι επέτρεπε σε μία μεγάλη περιοχή να αποθηκεύει θερμότητα χωρίς να είναι αναγκαίος ο μεγάλος όγκος αποθηκευτικού μέσου που θα απαιτούνταν με την αποθήκευση αισθητής θερμότητας. Αποδείχτηκε ότι η χρήση ενός τέτοιου συστήματος έχει την δυναμική να ανακτήσει το 17-36% της θερμότητας που χάθηκε από τα αρχικά κέρδη

7.2 PCM σε συστήματα ψύξης του χώρου [28]

Τα συστήματα ψύξης του χώρου που περιλαμβάνουν και PCM έχουν αναπτυχθεί με βάση την εξής αρχή: να αποθηκεύουν ψύξη από τον αέρα του περιβάλλοντος κατά την διάρκεια της νύχτας και να την

αποδίδουν στο εσωτερικό του χώρου κατά την διάρκεια της ημέρας. Ο Hed [30], έχει ερευνήσει αυτόν τον τύπο συστήματος για κτίρια, στα οποία γίνεται υπερπαραγωγή θερμότητας την ημέρα, όπως για παράδειγμα σχολία, γραφεία και εμπορικά κέντρα. Το «κλιματιστικό» με PCM χρησιμοποιεί ένα 24° C PCM που βρίσκεται μέσα σε κάψουλες, σε αλουμινένια θυλάκια, τα οποία τοποθετεί σε έναν εναλλάκτη της θερμότητας του αέρα. Το PCM παγώνει το βράδυ, όταν κρύος εξωτερικός αέρας αφήνεται να εισέλθει μέσα στο κτίριο και μέσα στο PCM και ο ψυχρός αέρας αποδίδεται στο εσωτερικό του κτιρίου κατά την διάρκεια της ημέρας. Κάθε κτίριο που εξετάστηκε είχε διαφορετική θερμική αδράνεια, ελαφρύ, μεσαίου βάρους ή βαρύ, και η προσομοίωσή τους έγινε χρησιμοποιώντας ξεχωριστή μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων για το καθένα. Επιπλέον, τα κλιματικά δεδομένα, η θερμοκρασία του αέρα και η ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντια επιφάνεια είχαν μετρηθεί κατά την διάρκεια του καλοκαιριού 2002 στην περιοχή Gayle στην Σουηδία. Η έρευνα έδειξε ότι η χρήση PCM έχει σημαντικές επιπτώσεις στην μέγιστη εσωτερική θερμοκρασία ημέρας. Οι θερμοκρασίες των θερμών καλοκαιρινών ημερών θα είναι υψηλότερες σε ένα κτίριο με χαμηλότερη θερμική αδράνεια, όμως αποδείχτηκε ότι με την εισαγωγή του PCM είναι δυνατή η αλλαγή της θερμικής αδράνειας του κτιρίου. Οι προσομοιώσεις δείχνουν ότι για ένα κτίριο ελαφριάς κατασκευής η ποσότητα που απαιτείται είναι περίπου 3-4 kg/m² επιφάνεια πατώματος, ενώ για να επιτύχουμε το ίδιο αποτέλεσμα χρησιμοποιώντας τσιμέντο θα χρειαζόματαν περίπου 10 φορές πεισσότερη μάζα. Η επίδραση που έχει το PCM, όταν λειτουργεί ως κλιματιστικό, σε ένα κτίριο ελαφριάς κατασκευής είναι όμοια με αυτή με αυτή που έχει σε ένα κτίριο με υψηλή θερμική αδράνεια. Ο αριθμός των ωρών κατά την διάρκεια των οποίων οι θερμοκρασίες ξεπερνούν το επιθυμητό επίπεδο, μειώνονται σημαντικά, με την εισαγωγή του PCM.

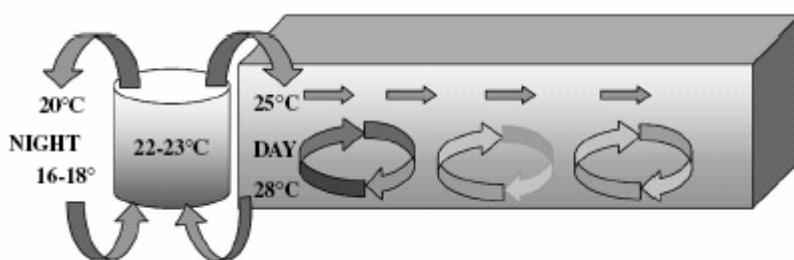
Ένα τέτοιο σύστημα το οποίο είναι αυτή την στιγμή εμπορικά διαθέσιμο είναι το Cool Deck. Μία εφαρμογή του που έγινε στο Stevenage Borough Council, έξω από το Λονδίνο, απέδειξε ότι αυτότο

προϊόν είναι ένας οικονομικός τρόπος κλιματισμού, με μειώσεις στην εσωτερική θερμοκρασία την καλοκαιρινή περίοδο κατά 3-4° C. Η κατανάλωση ενέργειας είναι μικρή, με την ενέργεια που καταναλώνεται από τον ανεμιστήρα να είναι το 5% της συνολικής ενέργειας που εισέρχεται στο κτίριο για τον κλιματισμό του. Το ελάχιστο πάχος του ταβανιού και του πατώματος είναι 200 mm, ενώ το PCM που χρησιμοποιείται είναι ένα ένυδρο άλας με θερμοκρασία τήξης ανάμεσα στους 20-24° C.

Από τις εφαρμογές που υπάρχουν για αποθήκευση ψυχρού αέρα, η αποθήκευση του βραδινού ψυχρού αέρα για κλιματιστική χρήση κατά την διάρκεια της ημέρας φαίνεται να είναι η πιο ελκυστική. Έχει την δυναμική, όχι μόνο να μειώσει την κατανάλωση της ενέργειας αλλά και να την ελαχιστοποιήσει συγκριτικά με την παρούσα κατάσταση, καθώς θα απομείνει να καταναλώνουμε ενέργεια μόνο για την λειτουργία του ανεμιστήρα. Εφόσον, λοιπόν, δεν θα υπάρχει καθόλου η ανάγκη ενέργειας για δημιουργία ψύξης, θα ονομάζουμε αυτή τη μορφή κλιματισμού «free cooling».

7.2.1 Free cooling

Η μορφή κλιματισμού, γνωστή και με το όνομα «Free cooling», ερευνήθηκε στο University of Zaragoza/Spain από τους Zalba [31]. Ο στόχος της έρευνας αυτής ήταν να σχεδιαστεί και να κατασκευαστεί μία πειραματική εγκατάσταση για την μελέτη των PCM με θερμοκρασία τήξης μεταξύ των 20 °C και 25 °C, όπως φαίνεται στην εικόνα που δίδεται.

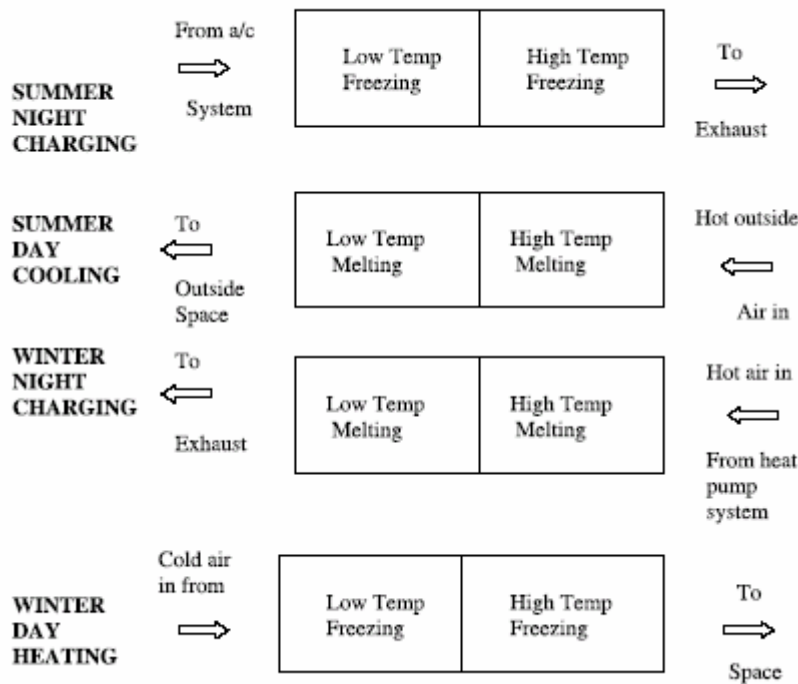


Εικόνα 8 : Η ιδέα του free cooling.

Αυτό το θερμοκρασιακό εύρος φαίνεται να είναι το πιο κατάλληλο για το free cooling καθώς οι θερμοκρασίες του περιβάλλοντος την νύχτα συνήθως πέφτουν κάτω από τους 20-25 °C, επομένως είναι αρκετά χαμηλές ώστε να ψύχουν τον αέρα στα κτίρια. Η εγκατάσταση του free cooling για να αποθηκεύει το κρύο κατά την διάρκεια της νύχτας και να το αποδίδει την ημέρα, απαιτεί κλίματα, όπου η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στην ημέρα και την νύχτα τους καλοκαιρινούς μήνες, να είναι μεγαλύτερη από 15° C.

7.3 PCM σε συνδυασμένο σύστημα θέρμανσης –ψύξης [28]

Το Sustainable Energy Centre στη UniSA [32], άρχισε να ασχολείται με τα PCM στην μέση της δεκαετίας του 1990, με την ανάπτυξη μίας μονάδας αποθήκευσης, η οποία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και για θέρμανση και για ψύξη του χώρου. Η φόρτιση της μονάδας τη νύχτα και η χρήση της την ημέρα, κατά την διάρκεια και των θερμότερων και των ψυχρότερων εποχών για ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας που αποτελείται από δύο διαφορετικά PCM, που είναι ενσωματωμένα σε ένα σύστημα αντιστρεπτού κύκλου, χρησιμοποιεί ενέργεια που δεν παράγεται τις ώρες αιχμής. Καθώς ο αέρας ωθείται στο σύστημα, υπόκειται σε μία διαδικασία θέρμανσης ή ψύξης δύο βημάτων. Πρώτα περνάει από το ένα PCM και μετά από το δεύτερο, όπως φαίνεται από την παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 9 : Φόρτιση κατά την διάρκεια της νύχτας και χρήση κατά την διάρκεια της ημέρας, για θερμότερες και ψυχρότερες περιόδους.

Το σημείο τήξης-στερεοποίησης του πρώτου υλικού είναι κάτω από την θερμοκρασία που δημιουργεί την αίσθηση της άνεσης, ενώ το δεύτερο, έχει σημείο τήξης-στερεοποίησης πάνω από αυτή την θερμοκρασία. Κατά την διάρκεια του χειμώνα, η ροή του αέρα καθορίζεται έτσι ώστε το σύστημα να αποθηκεύει θερμότητα τη νύχτα (με την τήξη και των δύο υλικών) και να αποδίδει την θερμότητα σε μία θερμοκρασία πάνω από τις συνθήκες άνεσης κατά τη διάρκεια της ημέρας. Το καλοκαίρι, η κατεύθυνση της ροής του αέρα αντιστρέφεται και το σύστημα αποθηκεύει ψυχρή ενέργεια τη νύχτα και αποδίδει τον ψυχρό αέρα κάτω από την θερμοκρασία άνεσης την ημέρα.

Το ποσοστό της μείωσης για την απαιτούμενη ικανότητα του κλιματιστικού και οι ποσότητες των θερμών και ψυχρών φορτίων που μεταφέρονται στις περιόδους χαμηλής ζήτησης, αναφέρθηκαν από αυτούς χρησιμοποιώντας ένα υπολογιστικό μοντέλο για το σύστημα αποθήκευσης. Μάλιστα, το τελευταίο έχει την δυνατότητα να υπολογίζει και το ετήσιο κέρδος από την εξοικονόμηση ενέργειας. Χρησιμοποιώντας ένα σύστημα αποθήκευσης θερμότητας που περιέχει δύο διαφορετικά

PCM μπορεί να μειώσει την απαιτούμενη ικανότητα και το αρχικό κόστος του κλιματιστικού για μία κατοικία. Μπορεί, επίσης, να μετατοπίσει μία ποσότητα από τα φορτία θέρμανσης και ψύξης στις ώρες που δεν είναι αιχμής, οπότε και η τιμή του ρεύματος είναι χαμηλότερη. Οι υπολογισμοί για ένα τυπικό σπίτι στην Αδελαΐδα έδειξαν ότι το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας αποτελούμενο από 100 kg 29°C PCM και από 80 kg 18°C PCM μείωσαν το ονομαστικό ποσοστό του φορτίου που απαιτείται στο 50% του συνολικού φορτίου. Επιπλέον, το ετήσιο ηλεκτρικό κόστος μειώθηκε κατά 32% εξ αιτίας της μετατόπισης του φορτίου σε ώρες χαμηλής ζήτησης.

Κεφάλαιο 8

Μικρο-Μακρο ενσωμάτωση και διαφορετικές μορφές ενσωμάτωσης PCM στα παραδοσιακά κατασκευαστικά υλικά

8.1 Μικρο-μακροενσωμάτωση

Η καινοτομία σε ότι αφορά στην εφαρμογή των PCM στα κτίρια επιτεύχθηκε όταν σκέφτηκαν να ενσωματώσουν τα υλικά αλλαγής φάσης στα παραδοσιακά κατασκευαστικά υλικά. Τα προηγούμενα 20

χρόνια πολλές μορφές ενσωμάτωσης μεγάλων ποσοτήτων PCM σε κάψουλες έκαναν την εμφάνισή τους στην αγορά απευθυνόμενα τόσο σε ενεργητικά όσο και σε παθητικά συστήματα αποθήκευσης ηλιακής ενέργειας. Όμως, η συνολική επιφάνεια των περισσότερων καψουλών που περιέχουν PCM δεν ήταν επαρκής ώστε να μεταδοθεί η θερμότητα στο κτίριο ύστερα από την διαδικασία τήξης του PCM. Από την άλλη, οι τοίχοι και το ταβάνι αποτελούν μεγάλες επιφάνειες που είναι επαρκείς για την μεταφορά παθητικής μορφής θερμότητας σχεδόν σε όλες τις ζώνες ενός κτιρίου. Έτσι γεννήθηκε η ιδέα του εμποτισμού γύψινων πάνελ ή και άλλων κατασκευαστικών υλικών με υλικά αλλαγής φάσης. Το PCM πρέπει να ενσωματωθεί, λοιπόν, σε κάψουλες έτσι ώστε να μην επηρεάζει την σωστή λειτουργία των παραδοσιακών υλικών κατασκευής. Παλαιότερα πειράματα όπου χρησιμοποιούνταν μεγάλος όγκος υλικού PCM ή η μακροενσωμάτωση σε κάψουλες, κρίθηκαν αποτυχημένα εξ' αιτίας της χαμηλής αγωγιμότητας που παρουσίαζε το υλικό αλλαγής φάσης. Αυτό γιατί την ώρα της ανάκτησης της θερμότητας από την υγρή φάση το PCM στερεοποιούνταν γύρω από τις άκρες εμποδίζοντας την αποτελεσματική μεταφορά θερμότητας.

Κριτήρια που πρέπει να πληρούν τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση των PCM.

Εφόσον έχει επιλεγεί ένα συγκεκριμένο PCM με βάση το θερμοκρασιακό εύρος της εφαρμογής, οι επόμενοι πολύ σημαντικοί παράγοντες που πρέπει να λάβουμε υπ όψη είναι:

1. Η γεωμετρία του καλύμματος του PCM
2. Οι θερμικές και γεωμετρικές παράμετροι του καλύμματος για δεδομένη ποσότητα PCM.

Κάθε ένας από αυτούς τους παράγοντες έχει άμεση επίδραση στα χαρακτηριστικά της μεταφοράς θερμότητας από το PCM και επηρεάζει εξ' ολοκλήρου τον χρόνο τήξης και την απόδοση του υλικού αλλαγής φάσης.

Προκειμένου να διασφαλιστεί η μακροχρόνια απόδοση κάθε συστήματος που περιέχει PCM, το μέγεθος και το σχήμα του καλύμματος του PCM θα πρέπει να ανταποκρίνεται στο χρόνο τήξης του PCM καθώς και στην ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην περιοχή που πρόκειται να τοποθετηθεί το υλικό αλλαγής φάσης. Συνήθως, τα PCM τοποθετούνται σε μακρύς και λεπτούς σωλήνες, σε κυλινδρικά ή και παραλληλόγραμμα καλύμματα.

8.1.1 Μικροενσωμάτωση

Με την “μικροενσωμάτωση” σε κάψουλες, όμως, οι διαστάσεις είναι τόσο μικρές, που τα φαινόμενα αποφεύγονται. Η μικροενσωμάτωση αναφέρεται σε τεχνικές στις οποίες ένας μεγάλος αριθμός μικρών τεμαχίων PCM περιέχονται σε ένα σφραγισμένο και συνεχές πλέγμα. Η ακαμψία αυτού του πλέγματος αναγκάζει ολόκληρη την μεταφορά θερμότητας να γίνεται με αγωγή. Αυτό μπορεί να μειώνει σημαντικά τον βαθμό στον οποίο γίνεται μεταφορά θερμότητας, κυρίως κατά την διαδικασία φόρτισης του PCM. Άλλα προτερήματα της μεθόδου αυτής είναι ότι εμποδίζεται η διαρροή του υλικού, όπως επίσης το ότι ο συνδυασμός των μεγάλων επιφανειών του τοίχου με του μικρού όγκου καψουλών οδηγεί σε ταχύτερη απορρόφηση και απομάκρυνση της θερμότητας. Συγκεκριμένα, η διάμετρος της μικροκάψουλας είναι περίπου 5μm, πάχος μικρότερο από το μισό πάχος της ανθρώπινης τρίχας.



Εικόνα 10: Παράδειγμα μικροενσωμάτωσης

8.1.2 Χρήση μικροενσωματωμένου PCM σε κάψουλες ,σε τοίχους από τσιμέντο για μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας.[36]

Ο βασικός σκοπός αυτής της έρευνας είναι η παρουσίαση της πιθανότητας χρήσης μικροενσωματωμένου PCM σε κάψουλες σε τοίχους από τσιμέντο για την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας για λόγους κλιματισμού, χωρίς όμως να χαθεί κανένα από τα αρχικά χαρακτηριστικά του τσιμέντου.

8.1.2.1 Η διάταξη του πειράματος

Το πείραμα αποτελείται από δύο πανομοιότυπα δωμάτια από τσιμέντο, κατασκευασμένα το ένα με το παραδοσιακό τσιμέντο και το άλλο με το τροποποιημένο τσιμέντο, το οποίο ονομάζεται Morcon.

Το υλικό αλλαγής φάσης που χρησιμοποιήθηκε ήταν το εμπορικό μικροενσωματωμένο PCM σε κάψουλες, που ονομάζεται Micronal, από την BASF, και έχει θερμοκρασία τήξης στους 26 °C, και ενθαλπία αλλαγής φάσης

110 kJ/kg. Η ανάμιξη και εισαγωγή του στο τσιμέντο αναπτύχθηκε κατά το μοντέλο MORCON στο οποίο εξετάστηκαν η μηχανική του αντοχή και η θερμική του συμπεριφορά. Έτσι βρέθηκε ότι αντέχει σε δυνάμεις πίεσης μεγαλύτερες από 25 Μρα και σε δυνάμεις τάσης μεγαλύτερες από 6 Μρα, ύστερα από 28 ημέρες δικομών. Επομένως, το τσιμέντο αυτό πληρεί τις προϋποθέσεις για χρήση του σε κατασκευές.

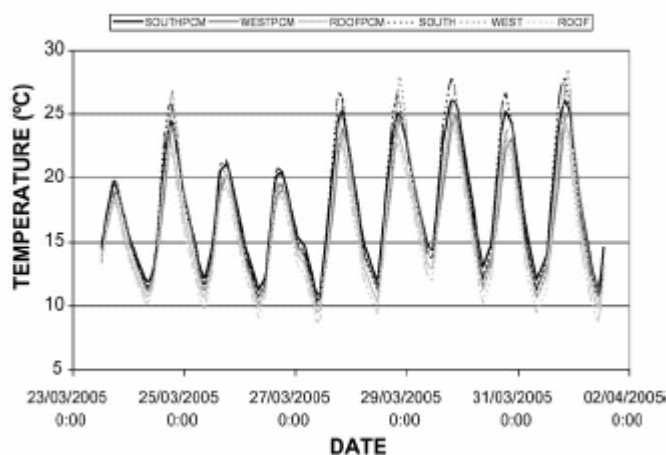
Τα δωμάτια δοκιμών όπως ήδη αναφέρεται είναι πανομοιότυπα, και αποτελούνται από έξι πάνελ τσιμέντου. Το ένα δωμάτιο περιέχει περίπου 5% κατά βάρος υλικό αλλαγής φάσης αναμεμιγμένο με το τσιμέντο και τοποθετημένο σε τρία πάνελ, στο νότιο και δυτικό τοίχο και στην οροφή. Οι διαστάσεις των δωματίων είναι 2 m x 2 m x 3 m, τα πάνελ έχουν πάχος 0.12 cm, ενώ τα παράθυρα έχουν ως εξής: ένα παράθυρο

με ανατολικό και ένα με δυτικό προσανατολισμό διαστάσεων 1.7 m x 0.6 m, τέσσερα παράθυρα στο νότο με διαστάσεις 0.75 m x 0.4 m και η πόρτα που βρίσκεται στο βόρειο τοίχο. Επιπλέον, τονίζεται ότι τα δωμάτια δεν είναι μονωμένα προκειμένου να μελετηθεί αποκλειστικά η επίδραση του υλικού αλλαγής φάσης.

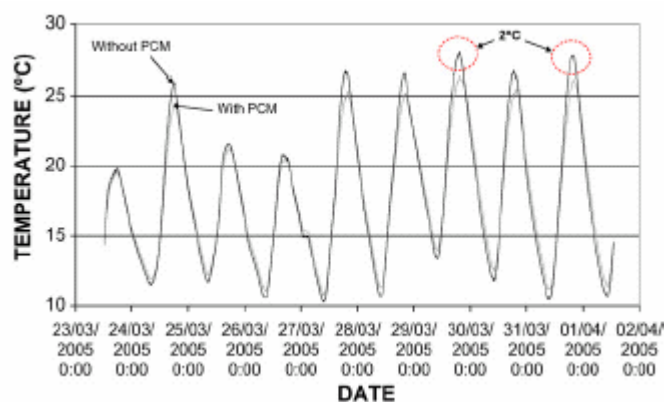
Αισθητήρες θερμότητας τοποθετήθηκαν σε κάθε τοίχο, στην μέση του δωματίου σε ύψη 1.2 m και 2.0 m και ένας αισθητήρας της ροής θερμότητας τοποθετήθηκε στο εσωτερικό του νότιου πάνελ. Ακόμα, ένας μετεωρολογικός σταθμός εγκαταστάθηκε κοντά ώστε να μετράται η θερμοκρασία και η ταχύτητα του ανέμου και ένας αισθητήρας της ακτινοβολίας τοποθετήθηκε στην κορυφή κάθε δωματίου για την μέτρηση της τελευταίας αλλά και τον εντοπισμό τοιχόν σκιών. Φυσικά όλα τα παραπάνω όργανα συνδέονται με το κατάλληλο λογισμικό για επεξεργασία.

8.1.2.2 Αποτελέσματα των μετρήσεων

Τα πρώτα αποτελέσματα λήφθηκαν κατά την περίοδο 23 Μαρτίου με 1 Απριλίου, και παρουσιάζεται στο ένα διάγραμμα η θερμοκρασία του νότιου και του δυτικού τοίχου και της οροφής για τα δύο δωμάτια, ενώ στο επόμενο παρουσιάζεται η θερμοκρασία του νότιου τοίχου. Σε αυτό παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία του δωματίου χωρίς το PCM είναι υψηλότερη κατά 2°C το μεσημέρι συγκριτικά με το δωμάτιο με το PCM, που σημαίνει ότι το PCM επιδρά σαν μόνωση στον τοίχο.

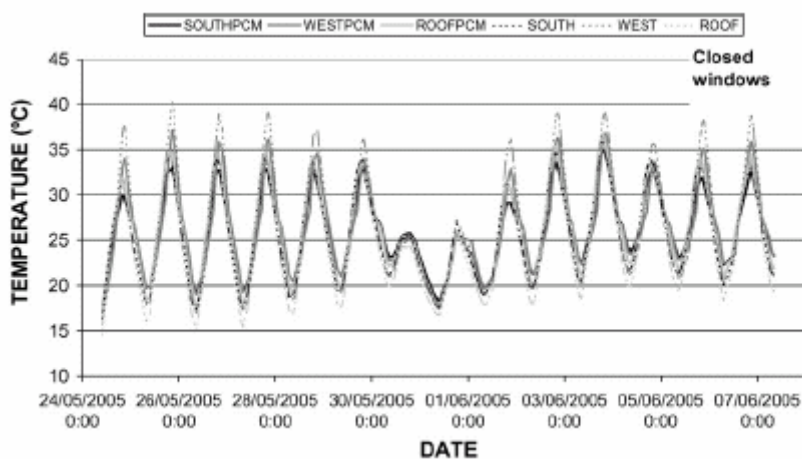


Εικόνα 11 : Η κατανομή της θερμοκρασίας στους τρεις τοίχους και για τα δύο δωμάτια.



Εικόνα 12 : Η κατανομή της θερμοκρασίας του νότιου τοίχου και για τα δύο δωμάτια.

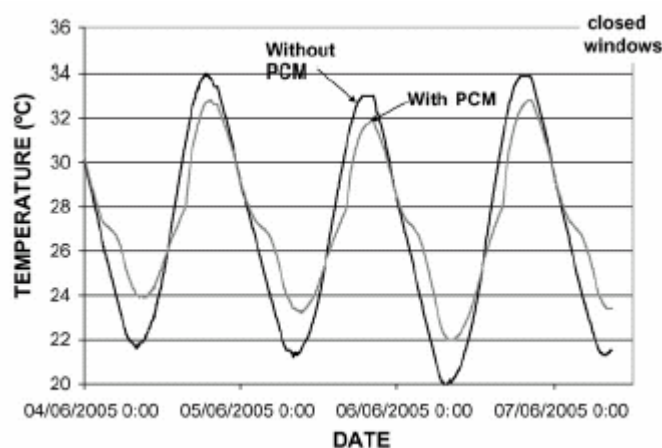
Τα πρώτα πειράματα έγιναν έχοντας τα παράθυρα κλειστά. Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων που διήρκησαν δύο εβδομάδες για το δωμάτιο που περιέχει το υλικό αλλαγής φάσης.



Εικόνα 13 : Θερμοκρασία των τοίχων του δωματίου με PCM κατά την διάρκεια των 2 εβδομάδων , με κλειστά τα παράθυρα.

Όπως φαίνεται, οι διαφορές ανάμεσα στα δύο δωμάτια είναι σημαντικές, γεγονός που αποδεικνύει την χρησιμότητα των PCM.

Για καλύτερη ανάλυση των αποτελεσμάτων παρουσιάζονται οι μετρήσεις των θερμοκρασιών του νότιου τοίχου για δύο ημέρες και τα πιο σημαντικά σημεία είναι τα εξής:



Εικόνα 14 : Λεπτομερέστερη παρουσίαση της θερμοκρασίας του νότιου τοίχου, όταν τα παράθυρα είναι κλειστά.

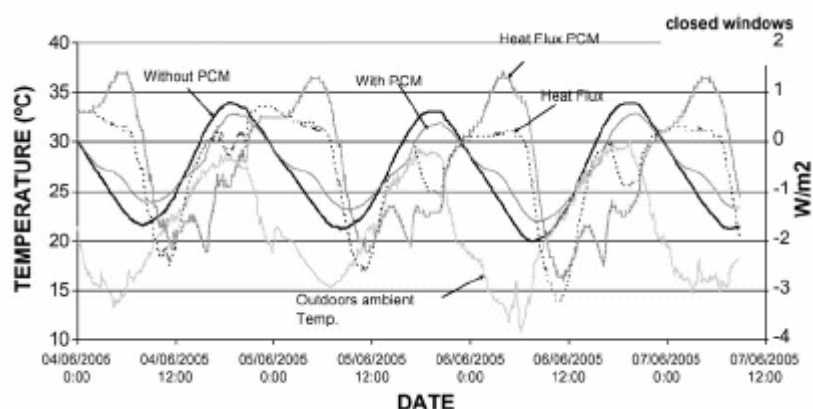
- Πρώτον, το δωμάτιο χωρίς το PCM εμφανίζει μέγιστη θερμοκρασία υψηλότερη κατά 1°C από το αντίστοιχο χωρίς το PCM, και ελάχιστη θερμοκρασία 2 °C χαμηλότερη.
- Δεύτερον, η μέγιστη θερμοκρασία στον τοίχο με το PCM εμφανίζεται δύο ώρες αργότερα συγκριτικά με αυτόν χωρίς PCM, δηλαδή η θερμική αδράνεια του πρώτου τοίχου είναι υψηλότερη.
- Τρίτον, αυτή η θερμική αδράνεια εμφανίζεται ξανά το απόγευμα εξαιτίας της στερεοποίησης του PCM αλλά και νωρίς το πρωί λόγω της τήξης αυτού.

Οι επιδράσεις της θερμικής αδράνειας είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσες για κτίρια, στα οποία συνυπάρχει πολύς κόσμος, όπως τα γραφεία. Μιά καθυστέρηση της τάξης των 2 ωρών στο κύμα θερμότητας θα μπορούσε να μειώσει σημαντικά την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για κλιματισμό.

Από τις μετρήσεις του μετεωρολογικού σταθμού, προκύπτει ότι όταν η εξωτερική θερμοκρασία έλαβε την μέγιστη τιμή της, τους 32°C, ο

δυτικός τοίχος του δωματίου χωρίς το PCM είχε θερμοκρασία 39 °C ενώ ο ίδιος τοίχος του δωματίου με το PCM είχε θερμοκρασία μόλις 36 °C.Ανάλογη θερμοκρασιακή διαφορά παρατηρήθηκε και στις ελάχιστες θερμοκρασίες .

Μιά άλλη σημαντική παράμετρος που μετράται είναι η ροή της θερμότητας στον νότιο τοίχο.Οι μετρήσεις της παρουσιάζονται στο επόμενο διάγραμμα.



Εικόνα 15 : Σύγκριση ανάμεσα στις θερμοκρασίες των δύο δωματίων , την εξωτερική τους θερμοκρασία και την ροή θερμότητας με κλειστά τα παράθυρα.

Όπως αναμεινόταν, η ροή θερμότητας παρουσιάζει την ίδια τάση και στα δύο δωμάτια, όταν το PCM δεν βρίσκεται στη διαδικασία αλλαγής φάσης, είτε κατά την διάρκεια της τήξης είτε της στερεοποίησης, αλλά πολύ διαφορετική όταν αλλάζει φάση. Πιο αναλυτικά, η ροή θερμότητας αυξάνεται το πρωί, όταν οι τοίχοι των δωματίων θερμαίνονται, αλλά μόλις το PCM φτάσει στην θερμοκρασία τήξης του, η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή και η ροή θερμότητας μειώνεται δραστικά, για να αυξηθεί εκ νέου μετά το τέλος της αλλαγής φάσης. Ακόμα, η ροή θερμότητας μειώνεται και πάλι όταν οι τοίχοι φτάσουν στην μέγιστη θερμοκρασία τους και αυξάνεται όταν αρχίσουν να ψύχονται. Όμως, όταν ο τοίχος που περιέχει το PCM φτάσει στην θερμοκρασία τήξης του, τότε η ροή θερμότητας αυξάνεται κατά πολύ σε αυτό τον τοίχο σε σχέση με τον άλλο, ενώ μετά το τέλος της

διαδικασίας αλλαγής φάσης η ροή θερμότητας μειώνεται ομοίως και στους δύο τοίχους.

Τα παραπάνω πειράματα επαναλήφθηκαν διτηρώντας σταθερές όλες τις παραμέτρους, και έχοντας ανοιχτά είτε τα παράθυρα του νότιου τοίχου, είτε ανοίγοντας και κλείνοντας όλα τα παράθυρα.

Συγκρίνοντας τις θερμοκρασίες και στις τρεις περιπτώσεις μπορούμε να δούμε ότι όταν είχαμε τα παράθυρα κλειστά, οι πρωινές θερμοκρασίες ήταν περίπου οι ίδιες και για τα δύο δωμάτια, κάτι που όμως δεν συνέβαινε και το απόγευμα κατά την ψύξη του PCM. Η βασική διαφορά είναι ότι όταν τα παράθυρα είναι ανοιχτά η θερμική αδράνεια λόγω της στερεοποίησης του PCM δεν είναι τόσο εμφανής και επομένως η συμπεριφορά του χρήστη παίζει πολύ σημαντικό ρόλο σε ότι αφορά στην αποτελεσματικότητα του υλικού αλλαγής φάσης. Τέλος, η συμπεριφορά της ροής θερμότητας στον νότιο τοίχο ακολουθεί το ίδιο ύψος και επομένως για όλες τις περιπτώσεις ισχύουν τα ίδια σχόλια που έχουν γίνει παραπάνω.

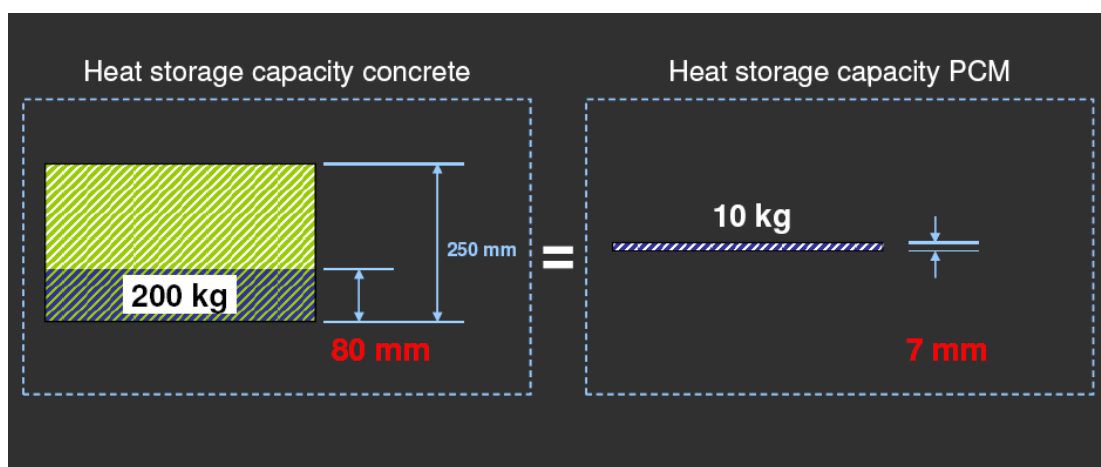
8.1.3. Μακροενσωμάτωση

Στην μακροενσωμάτωση το PCM τοποθετείται σε κάψουλες, κυλινδρικής ή σφαιρικής μορφής, οι οποίες με την σειρά τους ενσωματώνονται στην αποθηκευτική δεξαμενή. Προκειμένου να εξασφαλίσουμε ικανοποιητική ανταλλαγή θερμότητας ανάμεσα στο περιβάλλοντα χώρο του μέσου μεταφοράς θερμότητας και του PCM, οι κάψουλες θα πρέπει να έχουν υψηλή αναλογία επιφάνειας και όγκου, δηλαδή να μεταφέρονται μεγάλα ποσά θερμότητας σε μια περιοχή ανά μονάδα όγκου. Βέβαια, αυτό σημαίνει ότι οι κάψουλες θα πρέπει να είναι κατά κανόνα όσο το δυνατόν μικρότερες σε μέγεθος, το οποίο όμως επηρεάζει σημαντικά το κόστος τους.

Τα προτερήματα της χρήσης μίας τέτοιας μεθόδου είναι η σχετικά απλή διαδικασία ενσωμάτωσης του PCM σε μία υπάρχουσα δεξαμενή αποθήκευσης καθώς επίσης και η δυνατότητα χρήσης PCM με διαφορετικά σημεία τήξης σε μία μόνο δεξαμενή.

8.1.4.Μειονεκτήματα μικρο-μάκρο ενσωμάτωσης

Και οι δύο μέθοδοι ενσωμάτωσης PCM με μορφή κάψουλας στο τσιμέντο, μικρο και μάκρο ενσωμάτωση έχουν τα μειονεκτήματά τους. Η ενσωμάτωση σε κάψουλες πλαστικές ή μεταλλικές είναι ακριβή αλλά ασφαλής, καθώς το PCM θεωρείται ως ένα από τα συστατικά του μίγματος που απαρτίζει το τσιμέντο, μην επεμβαίνοντας έτσι στις ιδιότητες που είχε πριν αναμιχθεί με το PCM. Η μικροενσωμάτωση μέσω του εμποτισμού του PCM σε φρέσκο τσιμέντο αν και είναι πολύ αποτελεσματική μπορεί να επηρεάσει την μηχανική αντοχή του τσιμέντου. Η παραπάνω εφαρμογή παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον κυρίως για τις ελαφριές κατασκευές, αφού μια στρώση από σκυρόδεμα το οποίο περιέχει PCM, πάχους 1,5 παρουσιάζει την ίδια θερμική συμπεριφορά με τοίχο κατασκευασμένο από τσιμέντο ή από τούβλα. Αυτό σημαίνει ότι θα μπορούμε πλέον να επωφεληθούμε από τα προτερήματα των ελαφρών κατασκευών ενώ παράλληλα θα αποθηκεύαμε θερμότητα.



Εικόνα 16 : Εφαρμογή των PCM σε ελαφριές κατασκευές

8.2 Μαζική αποθήκευση

Η μαζική αποθήκευση για PCM είναι μια δεξαμενή ανταλλαγής θερμότητας που μοιάζει σε κατασκευή με τις ήδη υπάρχουσες κατασκευές που χρησιμοποιούνται για την ενεργειακή αποθήκευση, αλλά με κάποιες ουσιαστικές διαφορές. Το μοναδικό χαρακτηριστικό αυτών των μεγάλων συστημάτων αποθήκευσης PCM είναι η ανάγκη για πιο έντονη μεταφορά θερμότητας συγκριτικά με αυτή των συστημάτων χωρίς PCM, εξ αιτίας του γεγονότος ότι η πυκνότητα θερμικής αποθήκευσης του PCM είναι υψηλότερη σε σχέση με άλλα μέσα. Η περιοχή όπου συντελείται η μεταφορά θερμότητας αν και μικρή απαιτεί ένα μεγάλο ρυθμό θερμικού κέρδους ή απόδοσης.

8.3 Άμεση ενσωμάτωση

Αυτή πρέπει να είναι η πιο οικονομική μέθοδος ενσωμάτωσης που υπάρχει μιάς και χρησιμοποιείται πολύ λίγος επιπλέον εξοπλισμός. Υγρό PCM ή PCM σε πούδρα προστίθενται και ανακατεύονται με τα κατασκευαστικά υλικά, όπως είναι ο γύψος και το τσιμέντο, κατά την παραγωγή. Ένα παράδειγμα της μεθόδου αυτής είναι μία πειραματική γυψοσανίδα κατασκευασμένη με άμεση ενσωμάτωση 21-22% εμπορικού grade butyl stearate (BS) κατά το στάδιο ανάμιξης στην παραγωγή παραδισιακού γύψου [37].

8.4 Εμβάπτιση

Σε αυτή την μέθοδο, το πορώδες κατασκευαστικό υλικό, δηλαδή η γυψοσανίδα, το τούβλο ή το μπλόκ τσιμέντου, βυθίζεται σε ζεστό και λιωμένο PCM, το οποίο απορροφάται από τους πόρους μέσω της τριχοειδούς δράσης. Στη συνέχεια, το πορώδες υλικό απομακρύνεται από το υγρό PCM, αφήνεται να κρυώσει και το PCM παραμένει στους πόρους του κατασκευαστικού υλικού. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι καθιστά εύκολη την μετατροπή ενός απλού πάνελ, σε πάνελ με PCM, όπως ζητείται, εφόσον η εμβάπτιση μπορεί να πραγματοποιηθεί πρακτικά οποιαδήποτε ώρα και σε οποιοδήποτε σημείο. Οι Hawes και Feldman [38], εξέτασαν τους μηχανισμούς

απορρόφησης και καθιέρωσαν ένα μέσο ανάπτυξης και χρησιμοποιώντας σταθεροποιητές απορρόφησης του PCM στο τσιμέντο πέτυχαν την διάχυση της επιθυμητής ποσότητας PCM.

8.5 Σανίδα με ελάσματα PCM

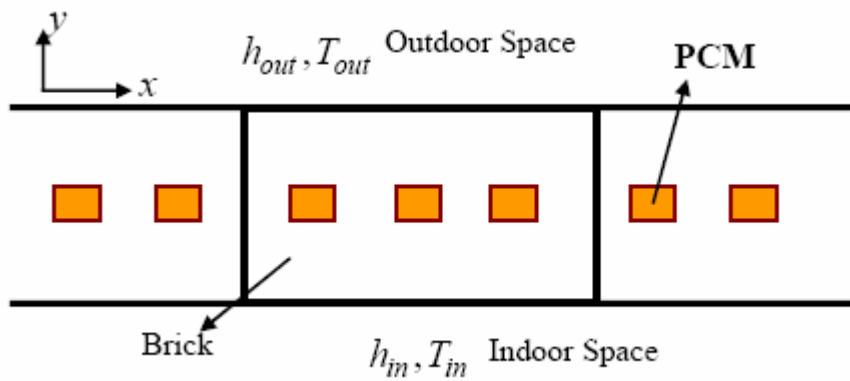
Το PCM μπορεί επίσης να παραχθεί σε έλασμα, σε μία μοναδική στρώση και να χρησιμοποιηθεί ως στοιχείο του «φακέλου» του κτιρίου. Οι Darkwa Kim [39], πραγματοποίησαν πειραματικές και αριθμητικές μελέτες πάνω στην συμπεριφορά βιομηχανικών δειγμάτων με ελάσματα και με πάνελ που περιείχαν αναμεμιγμένο με τυχαίο τρόπο PCM και κατέληξαν στα ακόλουθα:

1. Το σύστημα με τα ελάσματα πέτυχε μείωση 17% στον χρόνο που απαιτείται για την αποβολή της θερμότητας.
2. Παρατηρήθηκε αύξηση 20-50% στη ροή θερμότητας από το σύστημα με τα ελάσματα.
3. Μία αύξηση 7-18% παρατηρήθηκε και στο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας και πάλι από το σύστημα με τα ελάσματα.

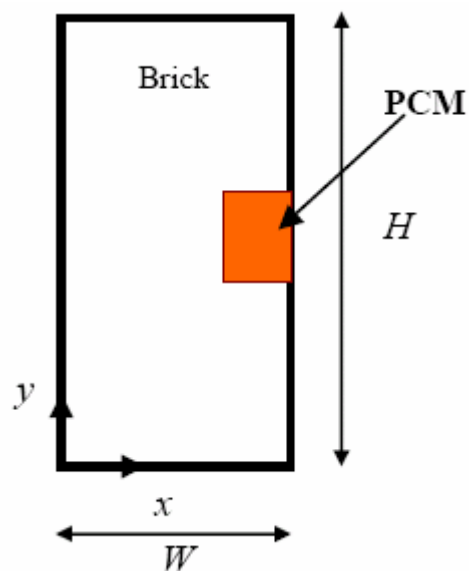
Συνολικά, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το πάνελ με τα ελάσματα PCM παρουσιάζει καλύτερη θερμική συμπεριφορά.

8.6 Ενσωμάτωση σε τούβλο –πειράματα στην Τεχεράνη

Μια άλλη ιδέα θα ήταν η ενσωμάτωση υλικού αλλαγής φάσης μέσα σε τούβλα. Σε σχετικά πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στην Τεχεράνη[40] προέκυψε ύστερα από σύγκριση του κλασσικού τούβλου με ένα που περιέχει ενσωματωμένο PCM, ότι η μέγιστη εισροή θερμότητας μπορεί να περιοριστεί σε ένα ποσοστό 32,8% , ανάλογα πάντα και με την ποιότητα του PCM. Ένας ακόμη παράγοντας που επιδρά στην θερμική αποδοτικότητα του τούβλου με ενσωματωμένο PCM είναι η θέση που τοποθετείται το τελευταίο. Από την έρευνα προέκυψε ότι το PCM παρουσιάζει μεγαλύτερη αποδοτικότητα όταν είναι τοποθετημένο στην εξωτερική πλευρά του τοίχου.



Εικόνα 17 : Σχηματική αναπαράσταση τούβλου με PCM

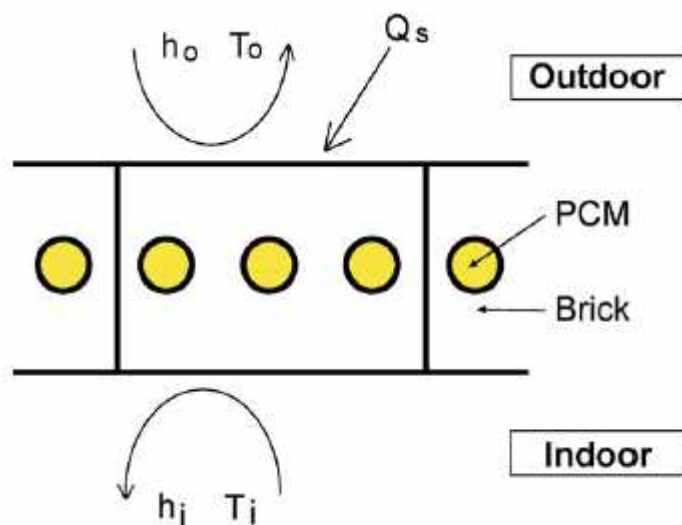


Εικόνα 18 : Θέση του PCM μέσα στο τούβλο

8.7 Ενσωμάτωση PCM σε τούβλο σε κυλινδρικές τρύπες-πειράματα στο Κουβέιτ

Υπάρχουν όμως και άλλα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο Κουβέιτ [41] , τα οποία αφορούν την θερμική ανάλυση των

τούβλων που χρησιμοποιούνται σε οικοδομές και περιέχουν υλικό αλλαγής φάσης, σε κυλινδρικές τρύπες στο εσωτερικό τους.



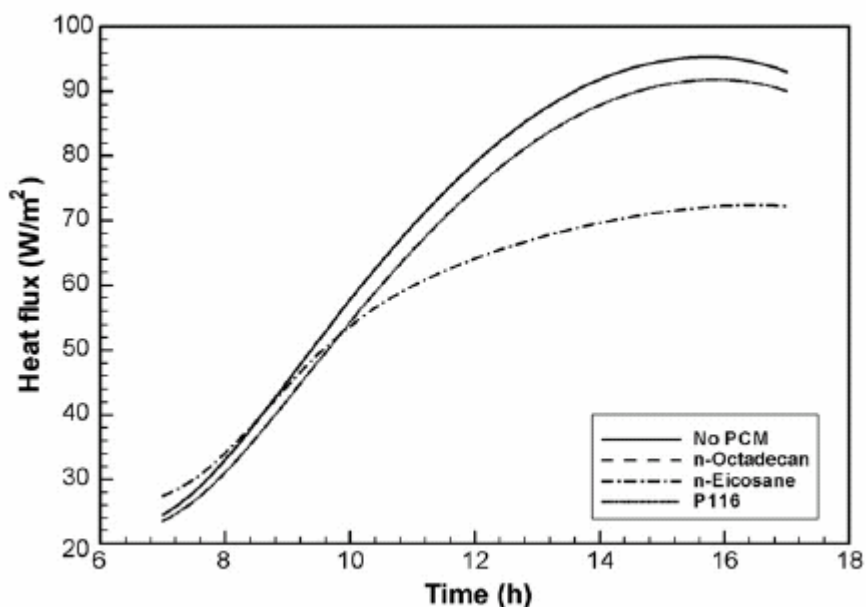
Εικόνα 19: Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος τούβλου-PCM.

Οι τοίχοι που μελετήθηκαν αποτελούνταν από οριζόντια τούβλα διαστάσεων 0.25 m Χ0.15 mΧ0.15 m, με κυλινδρικές τρύπες στο εσωτερικό τους διαμέτρου 0.03 m. Τέσσερις διαφορετικές υποθέσεις είναι αυτές που εξετάζονται, τούβλα με ένα, δύο και τρεις κυλίνδρους με PCM καθώς και τούβλα χωρίς PCM. Η εξωτερική επιφάνεια των τοίχων υπόκειται σε ηλιακή ακτινοβολία για καθορισμένο χρονικό διάστημα και σε επιβαλλόμενες οριακές συνθήκες συναγωγής, ενώ η εσωτερική επιφάνεια υπόκειται σε ανεξάρτητες από τον χρόνο οριακές συνθήκες συναγωγής. Ακόμα, τρεις διαφορετικοί τύποι παραφινών εξετάζονται ως υποψήφια PCM : n-octadecane, n-eicosane και P-116, των οποίων η θερμοκρασία τήξης κυμαίνεται μέσα στα όρια λειτουργίας του συστήματος του τοίχου με τούβλα- PCM.

8.7.1 Τύπος PCM

Σε ότι αφορά στα αποτελέσματα για τον καλύτερο τύπο PCM, το οποίο αναφέρεται ότι τοποθετήθηκε στο κέντρο του τούβλου, παρατηρήθηκε από τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις στο τοίχο με τούβλα χωρίς PCM, ότι η θερμοκρασία των τούβλων κυμαινόταν ανάμεσα στους 25.7 και στους 55.6, σύμφωνα και με το σχήμα που

δίδεται. Από την άλλη, η θερμοκρασία τήξης του n-octadecane είναι πολύ κοντά στο κατώτατο όριο της θερμοκρασίας λειτουργίας του συστήματος, η αντίστοιχη θερμοκρασία του P-116 πλησιάζει το ανώτατο όριο, ενώ του n-eicosane είναι περίπου στο μέσο του θερμοκρασιακού ορίου.



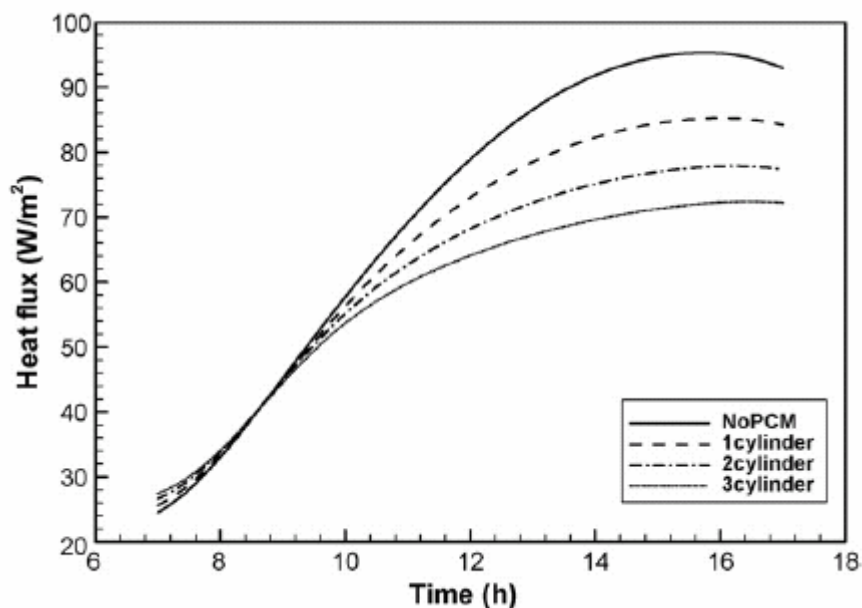
Εικόνα 20 : Ροή θερμότητας στην εσωτερική επιφάνεια του τοίχου για τους διάφορους τύπους PCM.

Το διάγραμμα δείχνει ότι τα P-116 και n-octadecane είναι αναποτελεσματικά στην μείωση της ροής θερμότητας στο εσωτερικό του χώρου γιατί, η υψηλή θερμοκρασία τήξης του πρώτου το αναγκάζει να βρίσκεται στην στερεή μορφή του όλη την ώρα ενώ η χαμηλή θερμοκρασία τήξης του δεύτερου το αναγκάζει να βρίσκεται στην υγρή του φάση όλη την ώρα. Έτσι, το τούβλο αδυνατεί να εκμεταλλευτεί την υψηλή τιμή της λανθάνουσας θερμότητάς τους για να μειώσει την ροή θερμότητας στον εσωτερικό χώρο. Από την άλλη πλευρά, με την χρήση της n-octadecane ο ρυθμός αλλαγής της ροής θερμότητας μειώνεται ουσιαστικά από από τις 10 το πρωί ως τις 5 το απόγευμα, με το μέγιστο ποσοστό της μείωσης αυτής να φτάνει το 24,2%. Επιπλέον, αναφέρεται ότι η διαφορά ανάμεσα στα διάφορα είδη PCM είναι αμελητέα κατά τη

χρονική περίοδο 7-10 το πρωί , καθώς η θερμοκρασία των τούβλων παραμένει κάτω από την θερμοκρασία τήξης του PCM.

8.7.2 Ποσότητα PCM

Όπως είναι αναμεινόμενο, η επιθυμητή ποσότητα PCM είναι η μικρότερη δυνατή, όχι μόνο από οικονομικής άποψης αλλά και για να διατηρηθούν, κατά το δυνατόν, αμετάβλητες οι ιδιότητες του τούβλου. Εξετάζονται και πάλι οι περιπτώσεις τούβλων με ένα, δύο και τρεις κυλίνδρους, οι οποίοι τοποθετούνται στην κεντρική γραμμή του τούβλου καθώς και η περίπτωση του τούβλου χωρίς PCM.



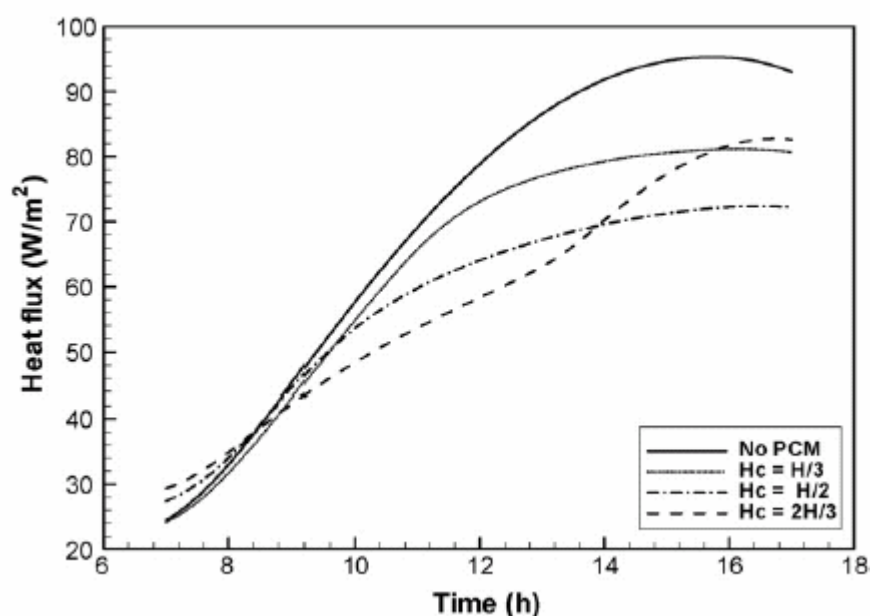
Εικόνα 21: Η ροή θερμότητας στην εσωτερική επιφάνεια για τον διαφορετικό αριθμό κυλίνδρων.

Το παραπάνω διάγραμμα, το οποίο παρουσιάζει την ροή θερμότητας για τις 4 παραπάνω περιπτώσεις, δείχνει ότι με χρήση ενός

κυλίνδρου η ροή θερμότητας μειώνεται κατά περίπου 11.5%, μς δυο κατά 17,9% ενώ με τρεις κατά 24.2%.

8.7.3 Η θέση που τοποθετείται το PCM στο τούβλο

Το PCM μετακινείται από την κεντρική γραμμή του τούβλου, για τις ανάγκες του πειράματος, σε θέσεις κοντά στο εσωτερικό και στο εξωτερικό της επιφάνειας του τοίχου, σε απόσταση $1/3$ και $2/3$. Η εσωτερική και η εξωτερική επιφάνεια δεν προτιμώνται για την τοποθέτηση των κυλίνδρων που θα περιέχουν το PCM καθώς, αυτό θα μπορούσε να επηρεάσει τις μηχανικές ιδιότητες του τούβλου.



Εικόνα 22 : Η ροή θερμότητας στην εσωτερική επιφάνεια για τις διαφορετικές θέσεις των κυλίνδρων με PCM.

Από το παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε ότι η θερμική απόδοση της περίπτωσης με την κεντρική γραμμή είναι καλύτερη συγκριτικά με αυτή που πλησιάζει την εσωτερική επιφάνεια. Αντίθετα, η περίπτωση που πλησιάζει την εξωτερική επιφάνεια παρουσιάζει αρχικά καλύτερη απόδοση από την περίπτωση της κεντρικής γραμμής ως τις 2 το μεσημέρι. Μετά από αυτή την ώρα, η ροή θερμότητας αυξάνεται πολύ γρήγορα. Όταν βρίσκεται κοντά στην εξωτερική επιφάνεια, το PCM υπόκειται σε μεγαλύτερη ροή θερμότητας από το εξωτερικό περιβάλλον,

συγκριτικά με τις άλλες περιπτώσεις, οδηγώντας έτσι σε ένα πολύ γρήγορο ρυθμό τήξης. Η απότομη αλλαγή στην ροή θερμότητας στις 2 το μεσημέρι σημαίνει ότι το PCM έχει λιώσει τελείως. Εντέλει, η συνολική μείωση της ροής θερμότητας για την περίπτωση κοντά στην εξωτερική και στην εσωτερική επιφάνεια αντίστοιχα είναι 17.49% και 10.16%, ενώ για την περίπτωση της κεντρικής γραμμής είναι 17.55%. Όμως, η τοποθέτηση του PCM κατά μήκος της κεντρικής γραμμής έχει την καλύτερη απόδοση τόσο από πλευράς αποτελεσματικότητας όσο και από την πλευρά της διατήρησης των μηχανικών ιδιοτήτων των τούβλων.

8.8 Επίλογος

Κλείνοντας αυτό το κεφάλαιο, οφείλουμε να τονίσουμε για μία ακόμη φορά ότι σημαντικό κριτήριο σχετικά με την αποθήκευση θερμικής ενέργειας σε PCM είναι η αναγκαιότητα αποφόρτισης της αποθηκευμένης ενέργειας. Όταν η θερμική ενέργεια αποθηκεύεται για μικρό χρονικό διάστημα, η ενέργεια που αποδίδεται πρέπει να είναι σχετικά υψηλή συγκριτικά με τον όγκο αποθήκευσης. Αυτό απαιτεί καθορισμένες συνθήκες σε ότι αφορά στο μέγεθος των καψουλών που περιέχουν PCM ή την θερμική αγωγιμότητα του PCM. Αντίθετα, όταν η θερμική ενέργεια αποθηκεύεται για μεγάλα χρονικά διαστήματα, η μέγιστη απαιτούμενη ενέργεια αποφόρτισης είναι συνήθως χαμηλότερη από τον σχετικά μεγάλο όγκο αποθήκευσης. Σε αυτή την περίπτωση ίσως να είναι επαρκείς μεγάλες κάψουλες ενώ η αγωγιμότητα του PCM θα παίζει πολύ μικρό ρόλο.

Κεφάλαιο 9

Μέθοδοι για την μέτρηση της θερμικής αποθηκευτικής ικανότητας

Προκειμένου να καθορίσουμε την ειδική και την λανθάνουσα θερμότητα των υλικών, χρησιμοποιείται μια ποικιλία μεθόδων όπως η DTA (differential thermal analysis) ή η DSC (differential scanning calorimetry).

9.1 DSC

Πιο συγκεκριμένα, και σε ότι αφορά στην μέθοδο DSC, αυτή αποτελεί ένα όργανο με την βοήθεια του οποίου μετράται η θερμική ικανότητα μικρών δειγμάτων υλικού. Μάλιστα, το μέρος του οργάνου που χρησιμοποιείται για την συγκράτηση του δείγματος έχει διάμετρο και ύψος μόλις 0,00635m. Για τα υλικά αλλαγής φάσης η DSC υπολογίζει τις καμπύλες τήξης και στερεοποίησης και τις συνδεδεμένες με αυτές τιμές της λανθάνουσας θερμότητας. Η αρχή λειτουργίας της είναι η διατήρηση της θερμοκρασιακής ισορροπίας ανάμεσα στο υπό δοκιμή

δείγμα και στο δείγμα αναφοράς καθώς το τελευταίο θερμαίνεται και ψύχεται με σταθερό ρυθμό. Η περίσσεια θερμότητας που απορροφάται ή απορρίπτεται από το υπό δοκιμή δείγμα καταγράφεται σαν συνάρτηση του χρόνου. Η ολοκλήρωση αυτών των τιμών δίνει τις ακριβείς μετρήσεις της ολικής θερμότητας μετάβασης ανάμεσα στις δύο θερμοκρασίες.

9.2 Πειραματική μελέτη για την αξιοπιστία της μεθόδου DSC

Αυτές οι μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί πολύ και είναι επίσης πολύ ακριβείς όμως για να πραγματοποιήσουν την μέτρηση χρησιμοποιούν δείγματα του υλικού προς δοκιμή που είναι πολύ μικρών διαστάσεων (μm). Όμως, όταν πρόκειται για την αξιολόγηση αυτών των υλικών για εμπορική χρήση, μία μέθοδος θα χρησιμοποιούνταν ένα μεγαλύτερο δείγμα θα μπορούσε να παρέχει επιπρόσθετες πληροφορίες για την σταθερότητα του προϊόντος σε μακροχρόνια βάση. Γενικότερα, πιστεύεται ότι ένα μικρό δείγμα που λαμβάνεται από ένα δοκιμαστικό υλικό και από ένα σύστημα προς εξέταση, μπορεί να μην αποδόσει πλήρως τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του υλικού αυτού υπό κανονικές διαστάσεις. Κατά την διάρκεια μακροχρόνιων δοκιμών, όταν το υλικό υπόκειται σε ένα μεγάλο αριθμό κύκλων τήξης-στερεοποίησης, τα δείγματα υλικού αλλαγής φάσης μεγάλων διαστάσεων ενδέχεται να εμφανίσουν είτε κάποιες βυθίσεις είτε να στερεοποιηθούν σε στρώσεις, που σημαίνει ότι δεν είναι απόλυτα ομογενή. Στα δείγματα μεγάλων διαστάσεων η χρήση μίας μη παρεμβατικής μεθόδου δοκιμών για την και τον καθορισμό της θερμότητας τήξης της ειδικής θερμότητας είναι απαραίτητη.

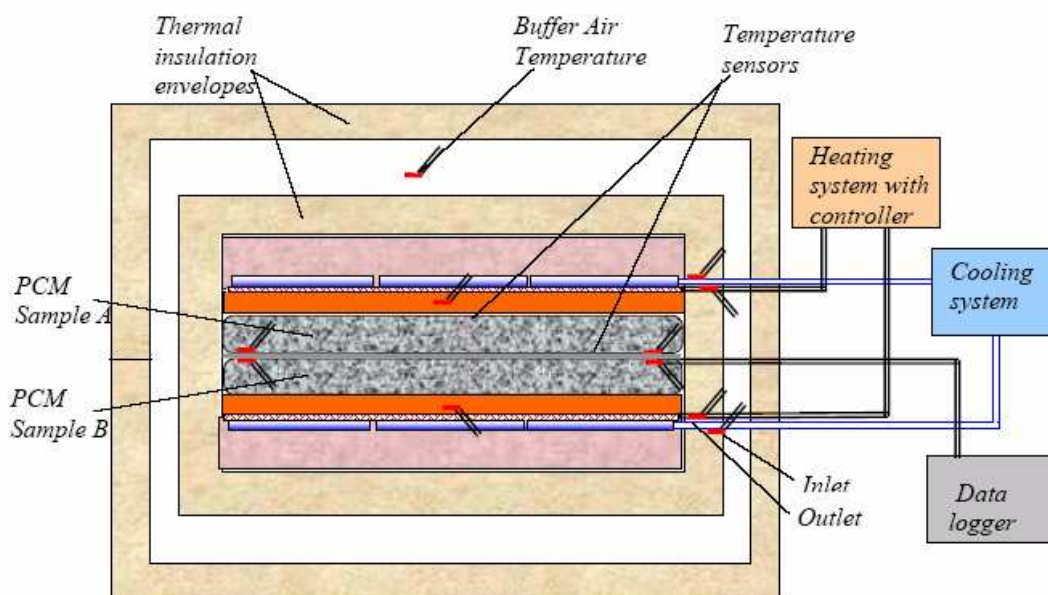
9.3 Μέθοδος “T-history”

Μία πολύ ενδιαφέρουσα και απλή σχετικά μέθοδος, που αναπτύχθηκε πρόσφατα, είναι η γνωστή μέθοδος “T-history”, για τον καθορισμό της ειδικής θερμότητας και της θερμικής αγωγιμότητας, η οποία προτάθηκε από τον Zhang το 1998. Σε αυτή την μέθοδο οι

καμπύλες που παρουσιάζουν την σχέση θερμοκρασίας –χρόνου των υπό δοκιμή δειγμάτων PCM χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τις θερμοφυσικές τους ιδιότητες.Μάλιστα, προκειμένου να αυξηθεί η ακρίβεια της μεθόδου αυτής, έχει τροποποιηθεί περαιτέρω από τους Zhang,Jiang (1999), Hong et al.(2004) ,,Marin et al.(2003,2005).Παρ' όλα αυτά, αν και θεωρείται απλή σαν μέθοδος ,είναι αρκετά χρονοβόρα και δημιουργεί κάποια προβλήματα όταν εφαρμόζεται σε αξιολόγηση που περιλαμβάνει πολλούς κύκλους φόρτισης.Ένα συγκεκριμένο πρόβλημα είναι ο καθορισμός των ορίων της περιόδου αλλαγής φάσης (η έναρξη και η λήξη), που είναι κρίσιμος για τον ακριβή καθορισμό της θερμότητας τήξης.

9.4 Μέθοδος ‘double cell’

Μία ακόμα μέθοδος που έχει αναπτυχθεί [42] για την μελέτη της μακροχρόνιας συμπεριφοράς των PCM που εφαρμόζονται για αποθήκευση θερμότητας, ονομάζεται ‘double cell’.



Εικόνα 23 : Μέθοδος “double-cell”

Η τελευταία έχει δημιουργηθεί για μακροχρόνιες δοκιμές των PCM, είναι μία μέθοδος θερμιδικού τύπου που επιτρέπει την μέτρηση και

σύγκριση της θερμικής αποθηκευτικής ικανότητας σε πολλούς κύκλους .Η στρατηγική των δοκιμών με βασίζεται στην εναλλακτική συμμετρική θέρμανση και ψύξη κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες ενός σχετικά μεγάλου δείγματος PCM (1-2kg) που βρίσκεται τοποθετημένο στο εσωτερικό ενός πολύ καλά μονωμένου καλύμματος.Αν και δεν θεωρείται τόσο ακριβής σαν μέθοδος καθορισμού της θερμικής αποθηκευτικής ικανότητας των μικρών δειγμάτων, πιστεύεται ότι παρέχουν καλές πληροφορίες για τους ερευνητές και τους κατασκευαστές εμπορικών ή και μαγαλύτερης κλίμακας προϊόντων που επιθυμούν να εξετάσουν την συνολική συμπεριφορά της θερμικής αποθηκευτικής ικανότητας των δειγμάτων μεγάλων διατάσεων σε ένα μεγάλο αριθμό κύκλων.

Κεφάλαιο 10

Προγράμματα για την προσομοίωση των εφαρμογών των κτιρίων σε υπολογιστή [44]

Την τελευταία δεκαετία η ενσωμάτωση των PCM σε τοίχους κτιρίων έχει αποκτήσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και αρκετές έρευνες διεξάγονται την παρούσα χρονική στιγμή.Για κάθε εφαρμογή, η πιο ικανοποιητική θερμοκρασία τήξης ενός PCM, το ποσοστό του PCM που ανμιγνύεται με τα παραδοσιακά κατασκευαστικά υλικά ή η θέση ενός πάνελ με PCM μέσα στο κτίριο εξαρτάται από την χρήση του και από τα αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά του.Η βελτιστοποίηση αυτών των παραμέτρων είναι θεμελιώδης για να υπολογίσουμε τις πιθανότητες επιτυχίας ενσωμάτωσης του PCM. Όπως και με πολλές άλλες τεχνολογίες, η επιτυχία του προϊόντος εξαρτάται περισσότερο από τον τρόπο που

αυτές χρησιμοποιούνται παρά από το ίδιο το προϊόν.Οι βελτιώσεις στην θερμική συμπεριφορά των κτιρίων χάρη στην ενσωμάτωση των PCM εξαρτάται από το κλίμα, τον σχεδιασμό και τον προσανατολισμό της κατασκευής και την λειτουργία του κτιρίου αλλά και από το ποσό και τον τύπο του PCM .Παρ' όλα αυτά, αυτές οι μελέτες απαιτούν μια πλήρη προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς του χώρου.

Σήμερα, υπάρχουν ποικίλα εμπορικά προγράμματα για την θερμική προσομοίωση των κτιρίων, όπως οι EnergyPlus, TRNSYS15, ESP-r, RADCOOL, DOE-2, IDA-ICE3, HVACSim, CLIM2000 και πολλά άλλα.

Αν και οι δυνατότητες που έχουν αυτά τα προγράμματα είναι πολλές, καμία από αυτές δεν επιτρέπει την άμεση προσομοίωση της προσθήκης PCM σε ένα τοίχο ή παράθυρο.Παρ' όλα αυτά συμπεριλαμβάνουν αλγορίθμους για να προσομοιώνουν ενεργητικούς τοίχους με σωλήνες που περιέχουν υγρό το οποίο κυκλοφορεί μέσα σε αυτό.

Ταυτόχρονα, πολλά είναι τα διαθέσιμα αναλυτικά μοντέλα για τα στοιχεία ενός κτιρίου με PCM, όμως πολύ λίγοι είναι αυτοί που έχουν ερευνήσει τις επιπτώσεις της εφαρμογής PCM σε ένα κτίριο χρησιμοποιώντας προγράμματα για την θερμική προσομοίωση ολόκληρου του κτιρίου.Οι Peirro et al.[6] ήταν από τους πρώτους που ασχολήθηκαν με την χρήση των PCM σε τοίχους για βραχυχρόνια αποθήκευση σε κτίριο που έχει προσομοιωθεί.Στην έρευνά τους όλες οι επιφάνειες με νότιο προσανατολισμό, που έχουν άμεσο ηλιακό κέρδος, εξαιρουμένου του πατώματος, θεωρήθηκαν καλυμμένα με PCM.Οι ενεργειακές εξισώσεις που προσομοιάζουν την κατάσταση αναλύθηκαν από τον κώδικα FHOUSE,[45].Εξ' αιτίας κάποιων υπολογιστικών περιορισμών, η επίδραση της λανθάνουσας μορφής θερμότητας του PCM υπολογίστηκε για μια συγκεκριμένη τιμή θερμικής ικανότητας.Η μελέτη των Feustel και Stetiu [19], για την ενσωμάτωση PCM σε γύψινα πάνελ, χρησιμοποιείται μια συνάρτηση για την ειδική θερμότητα προκειμένου να εφαρμοστεί στο πρόγραμμα RADCOOL [53]. Η δημοσίευση από τους

Jokisalo et al.[46],αφορά σε ένα μοντέλο τσιμεντένιου τοίχου που περιέχει PCM με μακροενσωμάτωση σε κάψουλες, που είναι σωλήνες γεμάτοι με ένυδρο άλας, χρησιμοποιεί ένα μαθηματικό μοντέλο που συμπεριλαμβάνεται στο TRNSYS14.2[47], που προσομοιώνει την συμπεριφορά ενός και μόνο δωματίου.Αυτοί οι αλγόριθμοι δεν μπορούν να ενσωματωθούν εύκολα σε προσομοιώσεις πιο σύνθετων κτιρίων με πολλές ζώνες.Η δημοσίευση των Scossig et al.[48], αφορά PCM μικροενσωματωμένα σε κάψουλες και αναμεμιγμένα με γύψο για εφαρμογή σε εσωτερικούς τοίχους.Οι συγγραφείς κατάφεραν να υπολογίσουν τις μη γραμμικές θερμικές ιδιότητες των κατασκευαστικών υλικών σε περιβάλλον προσομοίωσης ESP-r [49].

Εδώ, γίνεται μιά αναφορά για το λογισμικό ESP-r, στο οποίο τα PCM μοντελοποιούνται κάνοντας χρήση της ιδέας “special materials” (Kelly 1998).Τα special materials χρησιμοποιήθηκαν από το λογισμικό ESP-r ως μέσο μοντελοποίησης των ενεργητικών στοιχείων ενός κτιρίου, τα οποία έχουν τη δυνατότητα να αλλάζουν τις θερμοφυσικές τους ιδιότητες ως αντίδραση σε μία εξωτερική διέγερση.Οι συναρτήσεις των special materials στο ESP-r μπορούν να εφαρμοσθούν σε ένα συγκεκριμένο κόμβο μιάς κατασκευής με πολλά στρώματα, ο οποίος τότε υπόκειται σε μελέτη των θερμο-φυσικών του ιδιοτήτων για μεγάλο χρονικό διάστημα.[50].

Ο βασικός σκοπός αυτών των λογισμικών δεν είναι η ανάπτυξη ενός αυστηρού μοντέλου για τον τοίχο, το οποίο θα εξηγεί την θερμική του συμπεριφορά.Απεναντίας, ο στόχος είναι η δημιουργία ενός εργαλείου, αφού χαρακτηριστούν εκ των προετέρων τα κατασκευαστικά υλικά πλήρως στο εργαστήριο, που θα επιτρέπει την ανάλυση της επίδρασης που έχουν τα PCM στο σύνολο του κτιρίου.Στα πλαίσια αυτού του γενικότερου στόχου, το εκάστοτε λογισμικό θα πρέπει να :

- Επιτρέπει τον εγκλεισμό των PCM σε τοίχους, ταβάνια ή και στο πάτωμα.

- Παρέχει την δυνατότητα άμεσου προσδιορισμού της θερμικής συμπεριφοράς των PCM, εφόσον έχουν προσδιορισθεί πλήρως στο εργαστήριο.
- Επιτρέπει την μεταβολή των χαρακτηριστικών των υλικών που περιέχουν PCM , τα οποία τοποθετούνται σε διαφορετικά σημεία του κτιρίου όταν αλλάζει το υλικό αλλαγής φάσης ή η ποσότητα αυτού.

Συγκριτικές μελέτες για την αποδοτικότητα των PCM που εφαρμόζονται σε πάνελ, για την ενσωμάτωσή τους σε τοίχους κτιρίων

11.1 Θερμική ανάλυση ενός δωματίου άμεσου κέρδους με πλάκες PCM καθορισμένου σχήματος,(shape stabilized PCM plates-SSPCM) [51]

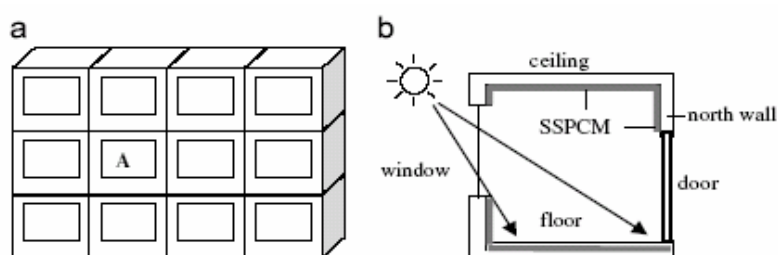
Τα περισσότερα PCM ενσωματώνονται στα παραδοσιακά κατασκευαστικά υλικά με κάποιον από τους τρόπους που περιγράφονται παραπάνω. Όμως, τον τελευταίο καιρό ένα καινούριο συνθετικό PCM έχει τραβήξει την προσοχή των ερευνητών, το ονομαζόμενο shape-stabilised PCM ή SSPCM. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η μορφή αυτής της πλάκας PCM. Αποτελείται από παραφίνη, που αποτελεί και το υλικό το οποίο διχέεται, και από υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένη (HDPE) ή άλλα υλικά τα οποία λειτουργούν ως υποστηρικτικά υλικά. Εφόσον το ποσοστό της παραφίνης που μπορεί να ενσωματωθεί είναι περίπου 80%, τότε η συνολική ηλιακή ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί είναι συγκρίσιμη με την αντίστοιχη των παραδοσιακών PCM. Όσο η θερμοκρασία λειτουργίας βρίσκεται κάτω από το σημείο τήξης του υποστηρικτικού υλικού, το συνθετικό υλικό μπορεί να διατηρεί το σχήμα του όσο το PCM αλλάζει φάση από στερεή σε υγρή. Αυτό μειώνει τις πιθανότητες διαρροής του PCM και είναι δυνατή η χρήση του σε κτίρια για αποθήκευση της θερμότητας, χωρίς να απαιτείται ενσωμάτωση σε κάψουλες.

Όπως έχει τονισθεί από τους Ibanez *et al.* [52], η βελτίωση της θερμικής συμπεριφοράς ενός κτιρίου χάρη στην ενσωμάτωση PCM δεν εξαρτάται μόνο από το κλίμα, την κατασκευή και τον προσανατολισμό της κατασκευής αλλά και από την ποσότητα και το είδος του PCM. Οι επιδράσεις των SSPCM σε κτίρια που αποτελούν παθητικά συστήματα άμεσου κέρδους δεν έχουν μελετηθεί σε βάθος και χρειάζονται σίγουρα βελτιστοποίηση, γι αυτό και παρουσιάζεται η παρακάτω μελέτη που είναι μία αριθμητική ανάλυση πάνω στις θερμικές επιδράσεις των SSPCM στη

Θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα, για ένα δωμάτιο άμεσου κέρδους το χειμώνα.

11.1.1 Περιγραφή του δωματίου δοκιμών και των κλιματικών συνθηκών

Για την προσομοίωση θεωρήθηκε ένα τυπικό δωμάτιο νότιου προσανατολισμού σε ένα πολυώροφο κτίριο στο Πεκίνο της Κίνας, το οποίο έχει μόνο ένα εξωτερικό τοίχο, τον νότιο, ενώ όλοι οι υπόλοιποι είναι εσωτερικοί, όπως φαίνεται στην εικόνα που δίδεται στη συνέχεια. Οι διαστάσεις του δωματίου ληφθηκαν ίσες προς 3m x3m X3m και όλες οι εσωτερικές επιφάνειες θεωρούνται όμοιες, γεγονός βολικό για την σύγκριση των επιδράσεων της θέσης του SSPCM στην θερμική συμπεριφορά του κτιρίου. Ακόμα, υπάρχει ένα παράθυρο με διπλό τζάμι, διαστάσεων 2m x1.5 m στον νότιο τοίχο και μία ξύλινη πόρτα διαστάσεων 0.9 m x2m στο βόρειο τοίχο, που γειτνιάζει με άλλο δωμάτιο ή με διάδρομο. Οι πλάκες SSPCM μπορούν να προσκολληθούν στις εσωτερικές επιφάνειες των τεσσάρων τοίχων και του ταβανιού ή μπορούν να αποτελέσουν μία στρώση του πατώματος. Οι θερμοφυσικές ιδιότητες των SSPCM αλλά και των υλικών του φακέλου του κτιρίου δίδονται σε πίνακα, και το εύρος της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης θεωρείται ότι είναι 1°C.

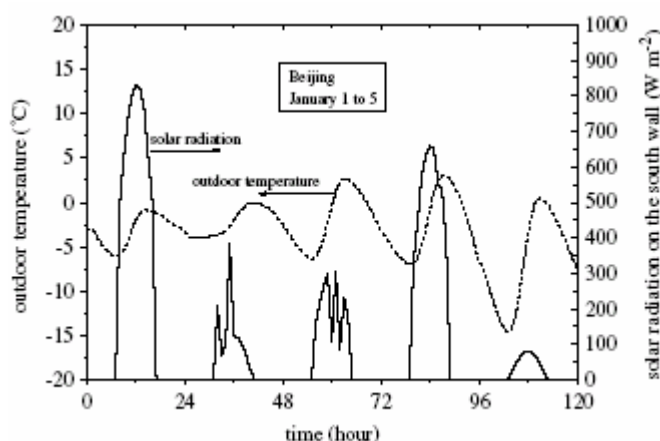


Εικόνα 24: Σχέδιο του δωματίου προς προσομοίωση (a) τοποθεσία του δωματίου στο κτίριο και (b) προφίλ του δωματίου με SSPCM.

Πίνακας 2 : Υλικά του «φακέλου» του κτιρίου και οι θερμοφυσικές τους ιδιότητες.

Envelope materials and their thermophysical properties				
Materials	ρ (kg m^{-3})	c_p ($\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)	k ($\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)	U ($\text{W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)
SSPCM	850	1.0	0.2	–
Hollow brick	1400	1.05	0.58	–
Reinforced concrete	2500	0.92	1.74	–
Insulation (EPS)	30	1.38	0.042	–
Wood board	500	2.5	0.14	–
Window	–	–	–	3.01
Door	–	–	–	0.875

Οι υπολογισμοί έγιναν από τις 15 Οκτώβρη ως τις 15 Μαρτίου του επόμενου έτους καλύπτοντας έτσι όλη την θερμή περίοδο και η ωριαία μεταβολή της εξωτερικής θερμοκρασίας και της ηλιακής ακτινοβολίας του νότιου τοίχου δίδονται στο διάγραμμα:



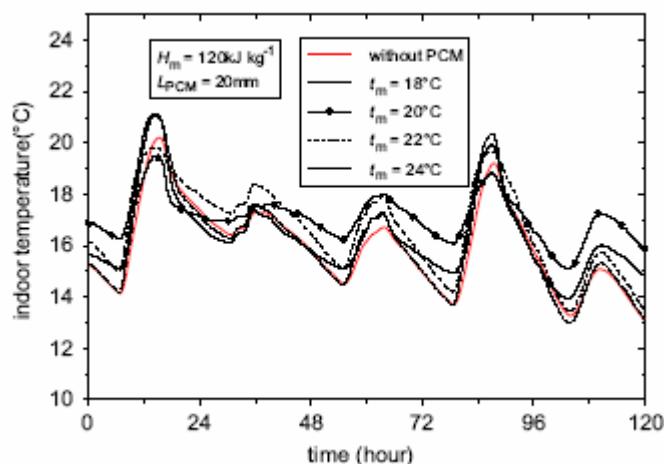
Εικόνα 25 : Ωριαία μεταβολή της εξωτερικής θερμοκρασίας και της ηλιακής ακτινοβολίας του νότιου τοίχου.

11.1.2 Αποτελέσματα της έρευνας

11.1.2.1 Θερμοκρασία τήξης και θερμότητα διάχυσης

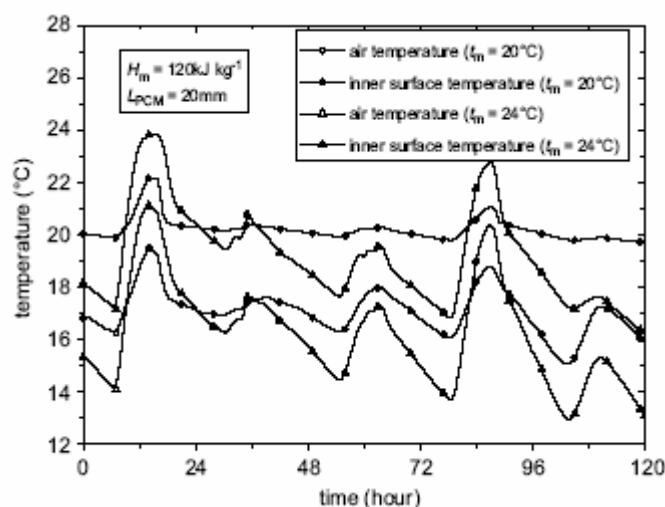
Ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την θερμική συμπεριφορά ενός SSPCM κτιρίου είναι η θερμοκρασία τήξης του PCM, t_m , η οποία πρέπει να βρίσκεται μέσα στο επιθυμητό εύρος. Με την χρήση πλακών SSPCM προσκολλημένων σε όλες τις επιφάνειες και των τεσσάρων τοίχων, στο ταβάνι και στην κατασκευή του πατώματος, η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα μπορεί να υπολογισθεί με

διαφορετικά σημεία τήξης του PCM. Το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την περίοδο 1-5 Ιανουαρίου.



Εικόνα 26 : Ωριαία μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας χρησιμοποιώντας διαφορετικές θερμοκρασίες τήξης του PCM .

Όπως φαίνεται, η βέλτιστη τιμή του t_m είναι περίπου στους 20°C για την δεδομένη εφαρμογή, η οποία κρατάει την ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία υψηλότερη από τα άλλα σημεία τήξης. Αυτό εξηγείται ως εξής : αν η θερμοκρασία τήξης ήταν πολύ υψηλή, η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που αποθηκεύεται από τις πλάκες SSPCM θα ήταν πολύ χαμηλή, ενώ αν η θερμοκρασία τήξης ήταν πολύ χαμηλή η προκύπτουσα θερμοκρασία του αέρα το βράδυ θα ήταν ακόμα χαμηλότερη. Αυτό γιατί το πάνελ με PCM όταν αλλάζει φάση από την υγρή στην στερεή, αποδίδει θερμότητα στον αέρα του δωματίου τη νύχτα. Προκειμένου να διατηρηθεί η διαδικασία μεταφοράς θερμότητας θα πρέπει να υπάρχει μια θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στην επιφάνεια του πάνελ με PCM και στον εσωτερικό αέρα. Έτσι, αν η θερμοκρασία τήξης που είναι σχεδόν ίση ή πλησιάζει την θερμοκρασία του εσωτερικού δωματίου, είναι πολύ χαμηλή, η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα θα προκύψει ακόμα χαμηλότερη, γεγονός που απολκινεί από το επίπεδο άνεσης.



Εικόνα 27 : Σύγκριση της ωριαίας εσωτερικής επιφανειακής θερμοκρασίας με την εσωτερική θερμοκρασία, χρησιμοποιώντας διαφορετικές θερμοκρασίες τήξης του PCM.

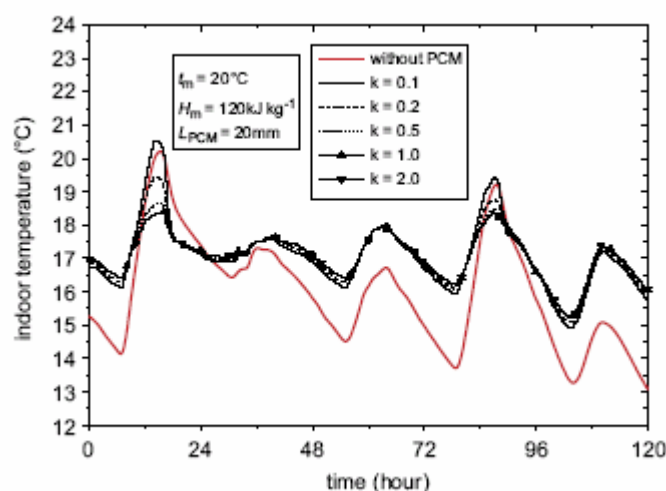
Στο παραπάνω διάγραμμα συγκρίνονται η ωριαία εσωτερική επιφανειακή θερμοκρασία με την εσωτερική θερμοκρασία χρησιμοποιώντας διαφορετικές θερμοκρασίες τήξης του PCM. Φαίνεται ότι για PCM με θερμοκρασία τήξης 20°C , η καμπύλη της εσωτερικής θερμοκρασίας είναι σχετικά οριζόντια και παραμένει στο σημείο αλλαγής φάσης για το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Επιπλέον, οι θερμοκρασίες του εσωτερικού αέρα είναι πάντα χαμηλότερες από τις θερμοκρασίες των εσωτερικών επιφανειών. Αυτό οφείλεται στις μεγάλες ποσότητες PCM που χρησιμοποιούνται καθώς και στις χαμηλές θερμοκρασίες του εξωτερικού περιβάλλοντος.

Προκειμένου να διατηρήσουμε, λοιπόν, την θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα σε επίπεδα θερμικής άνεσης για μεγάλο χρονικό διάστημα χωρίς φορτία θέρμανσης, η θερμότητα διάχυσης του PCM, H_m , θα πρέπει να είναι αρκετά υψηλή ώστε να διατηρήσει την εσωτερική επιφάνεια σε θερμοκρασία τήξης όλη την ημέρα. Το σχετικό διάγραμμα δείχνει ότι όταν η θερμότητα διάχυσης είναι υψηλότερη από 90 kJ/kg η εσωτερική θερμοκρασία σχεδόν δεν επηρεάζεται από αυτή. Αυτό μας

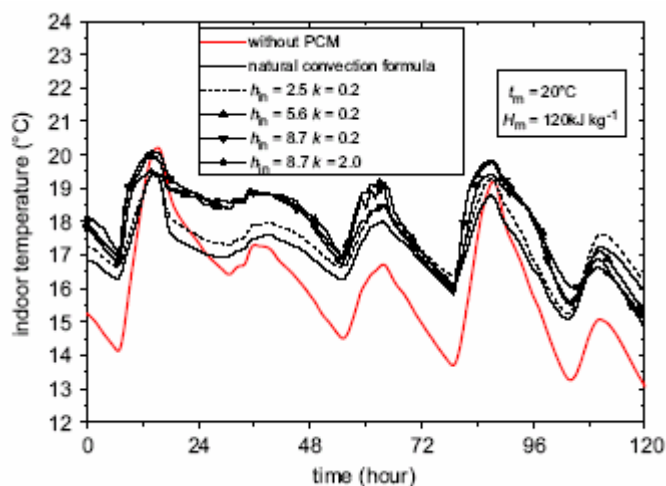
δείχνει ότι για να διατηρήσουμε το PCM στην περιοχή αλλαγής φάσης για μεγάλο διάστημα, η θερμότητα διάχυσης δεν θα πρέπει να είναι μικρότερη από 90 kJ/kg για την περίπτωση που συζητάμε.

11.1.2.2 SSPCM Θερμική αγωγιμότητα και συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής για την εσωτερική επιφάνεια

Σε αυτό το σημείο θα παρουσιάσουμε την επίδραση της εσωτερικής αγωγής των πλακών SSPCM και της συναγωγιμότητας της εσωτερικής επιφάνειας στην αποθήκευση θερμότητας. Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα, η θερμική αγωγιμότητα δεν έχει εμφανείς επιπτώσεις στην εσωτερική θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αποβολής της θερμότητας, αλλά επηρεάζει την εσωτερική θερμοκρασία κατά την διάρκεια της αποθήκευσης της θερμότητας. Από την άλλη, όταν η συναγωγιμότητα είναι μεγαλύτερη από 0.5 W/m °C, δεν εμφανίζεται να έχει καμία επιρροή ούτε στην διαδικασία φόρτισης ούτε στη διαδικασία αποβολής της θερμότητας.



Εικόνα 28 : Ωριαία εσωτερική θερμοκρασία για διάφορες θερμικές αγωγιμότητες του SSPCM.



Εικόνα 29 : Ωριαία εσωτερική θερμοκρασία για διάφορους συντελεστές συναγωγής.

Η παραπάνω εικόνα παρουσιάζει τις επιπτώσεις του συντελεστή συναγωγής της μεταφοράς θερμότητας ανάμεσα στην εσωτερική επιφάνεια και τον αέρα στην εσωτερική θερμοκρασία. Όσο υψηλότερος είναι αυτός ο συντελεστής τόσο περισσότερο βελτιώνεται το θερμοκρασιακό επίπεδο στο εσωτερικό του σπιτιού γιατί η αυξημένη συναγωγή αυξάνει την ανταλλαγή ενέργειας ανάμεσα στις πλάκες και τον αέρα. Επιπλέον, φαίνεται ότι οι $h_{in}=5.6 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ και $8.7 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ επηρεάζουν με τον ίδιο τρόπο την εσωτερική θερμοκρασία, ενώ για μία ακόμα φορά φαίνεται ότι η θερμική αγωγιμότητα δεν επηρεάζει εμφανώς την εσωτερική θερμοκρασία.

11.1.2.3 Θέση και πάχος των πλακών SSPCM

Προκειμένου να περιορίσουμε την ποσότητα του PCM που χρησιμοποιείται, και επομένως το κόστος παραγωγής των πλακών, η θέση και το πάχος της πλάκας SSPCM πρέπει να ληφθεί υπ όψη. Για να διευκολυνθεί η σύγκριση, η διαφορά ανάμεσα στην ελάχιστη θερμοκρασία της ημέρας με και χωρίς πλάκες SSPCM υπολογίζεται. Η μέση τιμή αυτών των διαφορών κατά την περίοδο των δοκιμών θεωρείται ότι θα δείξει την επίδραση της θέσης των πλακών. Ο πίνακας που ακολουθεί παρουσιάζει πολύ ενδιαφέροντα αποτελέσματα υπολογισμένα από αυτή την μελέτη. Φαίνεται ότι οι πλάκες SSPCM που

είναι τοποθετημένες στο νότιο τοίχο και στο πάτωμα δεν είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι ο νότιος τοίχος είναι ένας εξωτερικός τοίχος για τον οποίο η εσωτερική επιφανειακή θερμοκρασία είναι χαμηλότερη συγκριτικά με τους υπόλοιπους εσωτερικούς τοίχους, τον ανατολικό, τον δυτικό, τον βόρειο και το ταβάνι. Επιπλέον, η καθαρή επιφάνεια του νότιου τοίχου είναι μικρότερη εξ' αιτίας του μεγάλου παραθύρου που βρίσκεται σε αυτόν. Εξ' αιτίας αυτών των δύο, ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας από τις πλάκες SSPCM προς το εσωτερικό αέρα κατά την διάρκεια της νύχτας μειώθηκε. Για την περίπτωση του πατώματος, η θερμική αντίσταση των ξύλινων σανίδων και το στρώμα αέρα, μπορεί να οδηγούν σε χαμηλότερες τιμές θερμοκρασιακών διαφορών.

Πίνακας 3 : Μέση τιμή των θερμοκρασιακών διαφορών ανάμεσα στις ελάχιστες ημερήσιες θερμοκρασίες για διάφορες εναλλακτικές επιλογές.

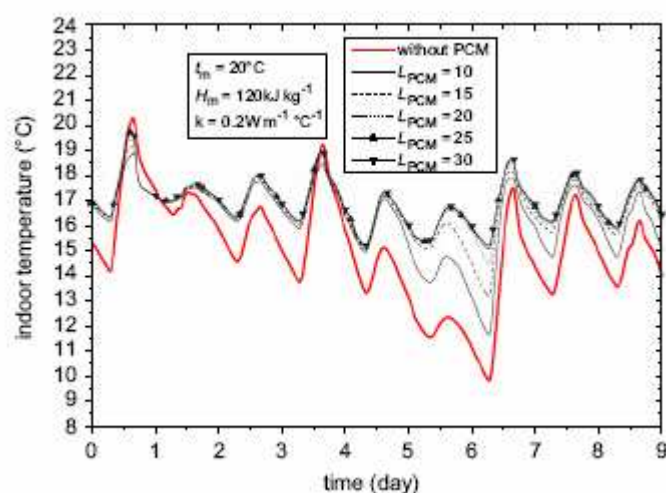
Average of the difference between minimum daily temperatures for several alternatives

Location	East	South	West	North	Ceiling	Floor
Δt	0.64	0.30	0.59	0.64	0.50	0.39
Location	SN	NW	SC	SF	EW	W($L_{PCM} = 40$)
Δt	0.99	1.26	0.86	0.66	1.26	0.68
Location	EWN	NWC	ESWNCF ($L_{PCM} = 10$)	ESWN	ESWNC	ESWNCF
Δt	1.64	1.57	1.89	1.76	1.97	2.08

Από τον ίδιο πίνακα φαίνεται επιπλέον ότι για την ίδια ποσότητα PCM μία λεπτή πλάκα SSPCM με μεγάλη επιφάνεια είναι προτιμότερη από από μία αντίστοιχη παχιά αλλά με μικρή επιφάνεια. Για παράδειγμα, εάν η πλάκα SSPCM είναι τοποθετημένη μόνο στην επιφάνεια του δυτικού τοίχου και έχει πάχος 40mm, η μέση διαφορά την ελάχιστης ημερήσιας θερμοκρασίας είναι $0.68^{\circ} C$, ενώ εάν τοποθετηθεί στην επιφάνεια και των δύο, του ανατολικού και του δυτικού τοίχου και έχει πάχος 20 mm, τότε η μέση διαφορά της ελάχιστης ημερήσιας θερμοκρασίας είναι $1.26^{\circ} C$. Το παραπάνω εξηγείται από το γεγονός ότι η μεγάλη επιφάνεια αυξάνει τον ρυθμό φορτίσης και

αποφόρτισης του PCM, κυρίως για πραγματικές συνθήκες χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας του PCM και για μικρό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής στην επιφάνεια.

Προκειμένου να καταλήξουμε στο ποιά ποσότητα SSPCM είναι κατάλληλη, οι επιδράσεις των διαφορετικών παχών των πλακών SSPCM, οι οποίες τοποθετούνται σε όλες τις εσωτερικές επιφάνειες του «φακέλου» του κτιρίου λαμβάνονται υπ' όψη. Έτσι, παρουσιάζεται το ακόλουθο διάγραμμα, το οποίο δείχνει την μεταβολή της ημερήσιας εσωτερικής θερμοκρασίας για διάφορα πάχη πλακών κατά την περίοδο 1-9 Ιανουαρίου.

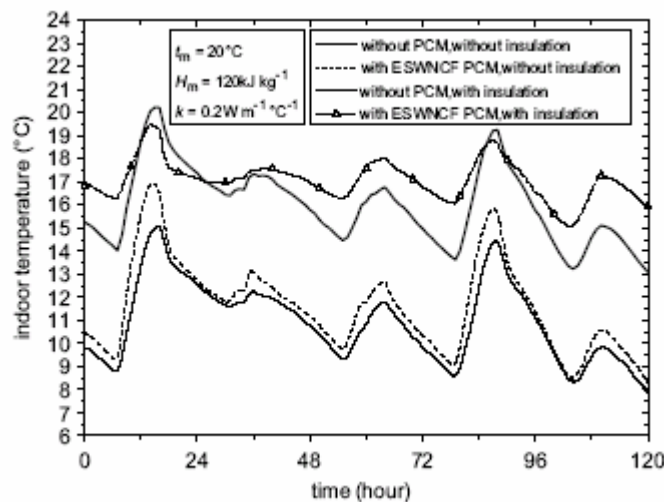


Εκόνα 30 : Ημερήσια εσωτερική θερμοκρασία για διάφορα πάχη πλακών SSPCM.

Όπως φαίνεται, τις πρώτες τέσσερις ημέρες δεν υπάρχουν εμφανείς διαφορές στην ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία για τα διάφορα πάχη των πλακών SSPCM. Όμως, τις πέντε τελευταίες ημέρες, όπου η θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος ολοένα έπεφτε, οι πλάκες SSPCM με πάχη 10 και 15 mm οδήγησαν σε σημαντική μείωση της εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα, συγκριτικά με τα λοιπά πάχη, κυρίως εξ αιτίας της μικρότερης ποσότητας θερμότητας που μπορούν να αποθηκεύσουν. Επιπλέον, καταλήγουμε στο ότι το πιο κατάλληλο πάχος για τις πλάκες SSPCM στην δεδομένη εφαρμογή είναι το $L_{PCM} = 20$ mm.

11.1.2.4 Εξωτερική θερμοκή μόνωση και το υλικό του πάνελ

Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει την ωριαία μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας με και χωρίς εξωτερική θερμοκή μόνωση, όταν η εσωτερική επιφάνεια καλύπτεται από πλάκες SSPCM, κατά την περίοδο 1-5 Ιανουαρίου.

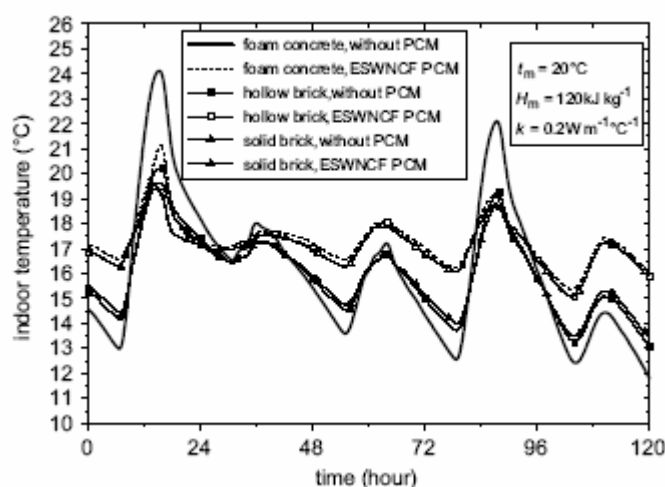


Εικόνα 31 : Ωριαία μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας με και χωρίς εξωτερική θερμοκή μόνωση, όταν η εσωτερική επιφάνεια καλύπτεται από πλάκες SSPCM.

Βλέπουμε, λοιπόν, ότι χωρίς εξωτερική θερμοκή μόνωση η εσωτερική θερμοκρασία του αέρα είναι σημαντικά χαμηλότερη από ότι αν υπήρχε εξωτερική μόνωση, ενώ οι πλάκες SSPCM όχι μόνο δεν σταθεροποιούν τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις αλλά τις οξύνουν και όλας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο τοίχος δεν είναι εξωτερικά μονωμένος και επομένως η εσωτερική θερμοκρασία κατά την διάρκεια αυτής της περιόδου είναι τόσο χαμηλή, ώστε η πλάκα με PCM να είναι στην απόλυτα στερεή της κατάσταση, χωρίς αλλαγή φάσης. Έτσι, λειτουργεί σαν υλικό μίας φάσης με χαμηλή θερμοκή αγωγιμότητα στην εσωτερική επιφάνεια. Από την άλλη, στην περίπτωση με την εξωτερική μόνωση, η πλάκα PCM λειτουργεί πολύ καλά. Πραγματικά αποθηκεύει θερμότητα κατά την διάρκεια της ημέρας και βελτιώνει το επίπεδο θερμοκής άνεσης

στον εωτερικό χώρο, πράγμα που επιβεβαιώνει την σημασία και τον ρόλο της εξωτερικής μόνωσης.

Το υλικό από το οποίο θεωρείται κατασκευασμένο το πάνελ στις παραπάνω μελέτες είναι τούβλο, κούφιο στο εσωτερικό του. Σε αυτό το σημείο, θα θεωρήσουμε ως τέτοια υλικά το συμπαγές τούβλο και το «αφρώδες» τσιμέντο προκειμένου να κατανοήσουμε τις επιδράσεις της πλάκας SSPCM σε εφαρμογές βαριών και ελαφριών κατασκευών.



Εικόνα 32 : Μεταβολή της ωριαίας εσωτερικής θερμοκρασίας για διάφορα υλικά των πάνελ, με πλάκες PCM στην εσωτερική τους επιφάνεια.

Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται η σύγκριση της ωριαίας εσωτερικής θερμοκρασίας για τα τρία κατασκευαστικά υλικά του πάνελ με και χωρίς πλάκες SSPCM. Τονίζεται ότι, χωρίς PCM το ελαφρύ υλικό των πάνελ, όπως είναι το «αφρώδες» τσιμέντο, οδηγεί σε υψηλότερη εσωτερική θερμοκρασιακή διακύμανση συγκριτικά με το πιο βαρύ υλικό, το συμπαγές τούβλο. Παρ' όλα αυτά, με τις πλάκες SSPCM προσκολλημένες στις εσωτερικές επιφάνειες του τοίχου, η διακύμανση της εσωτερικής θερμοκρασίας μειώνεται και για τα δύο κατασκευαστικά υλικά και δεν υπάρχει εμφανής διαφορά ανάμεσα στις ελάχιστες ημερήσιες θερμοκρασίες. Αυτό επιβεβαιώνει το γεγονός ότι οι πλάκες SSPCM είναι κατάλληλες για τις ελαφριές κατασκευές. Επιπλέον, η

ελάχιστη εσωτερική θερμοκρασία την νύχτα μπορεί να αυξηθεί κατά 3° C με αυτές τις πλάκες για το πάνελ από «αφρώδες» τσιμέντο.

11.2 Η αξιολόγηση του μικτού τύπου PCM –γύψου και των SSPCM σε κτίρια, όταν η θέρμανσή τους γίνεται παθητικά.[54]

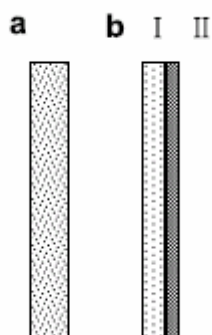
Βασικός σκοπός αυτής της μελέτης είναι η παρουσίαση της θερμικής συμπεριφοράς των SSPCM και του μικτού τύπου πάνελ από PCM-γύψο, που τοποθετούνται στις εσωτερικές επιφάνειες των τοίχων και στο ταβάνι ενός κτιρίου που αποτελεί παθητικό σύστημα άμεσου κέρδους κατά την χειμερινή περίοδο.

11.2.1 Περιγραφή του προβλήματος

Το δωμάτιο που εξετάζεται και σε αυτό το πείραμα είναι όμοιο με αυτό που περιγράφηκε και στο παραπάνω, δηλαδή, αποτελεί δωμάτιο ενός πολυόροφου κτιρίου με εκτεθειμένη μόνο την νότια του πρόσοψη στην ηλιακή ακτινοβολία, ενώ οι υπόλοιποι τοίχοι είναι εσωτερικοί. Οι διαστάσεις του είναι 3.9 m (μήκος) x 3.3 m (πλάτος) x 2.7 m (ύψος). Ακόμα, ο νότιος τοίχος είναι μονωμένος εξωτερικά με στρώση πάχους 60 mm από polystyrene (EPS) και έχει ένα παράθυρο διαστάσεων 2.1 m x 1.5 m. Η πόρτα βρίσκεται στο βόρειο τοίχο με διαστάσεις 0.9 m x 2 m η οποία συνορεύει με άλλο δωμάτιο ή με το διάδρομο και το πάτωμα είναι ένα τυπικό ξύλινο πάτωμα με ένα στρώμα αέρα. Το PCM, σε όποια μορφή και αν αυτό χρησιμοποιηθεί τοποθετείται ως επένδυση στους τέσσερις τοίχους και στο ταβάνι του δωματίου.

Στην εικόνα που δίδεται παρακάτω παρουσιάζονται οι δύο μορφές κάτω από τις οποίες ενσωματώνεται το PCM στο κτίριο. Το ένα είναι πάνελ πάχους 30 mm κατασκευασμένο από μία στρώση γύψου αναμεμιγμένο με 25% PCM κατά βάρος και το άλλο αποτελείται από δύο χωριστά στρώματα, ένα πάχους 19 mm από γύψο και άλλο ένα πάχους 11 mm από SSPCM, 80% κατά βάρος. Σε αυτό το σημείο πρέπει

να αναφερθεί ότι και τα δύο δείγματα περιέχουν την ίδια ποσότητα PCM και έχουν το ίδιο πάχος.



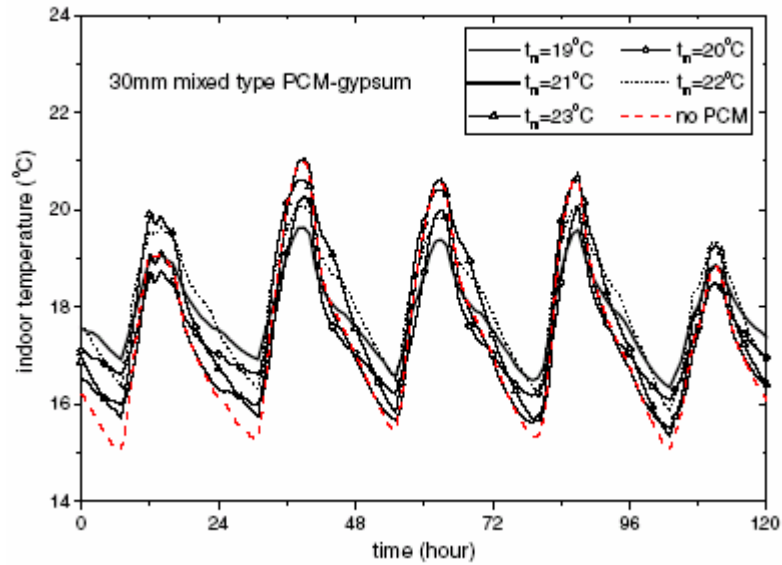
Εικόνα 33: Σχηματική αναπαράσταση των δύο τύπων PCM (a) μίξη PCM – γύψος πάχους 30 mm (b) γύψος 19 mm –SSPCM 11mm.

Η θερμότητα τήξης του PCM είναι 150 kJ/kg, το SSPCM αποτελείται από PCM με επιπλέον υλικό το HDPE, οι αλλαγές του εσωτερικού αέρα υπολογίζονται στις 1/h και η ποσότητα της θερμότητας που παράγεται από πηγές εντός του δωματίου περίπου 50 W .

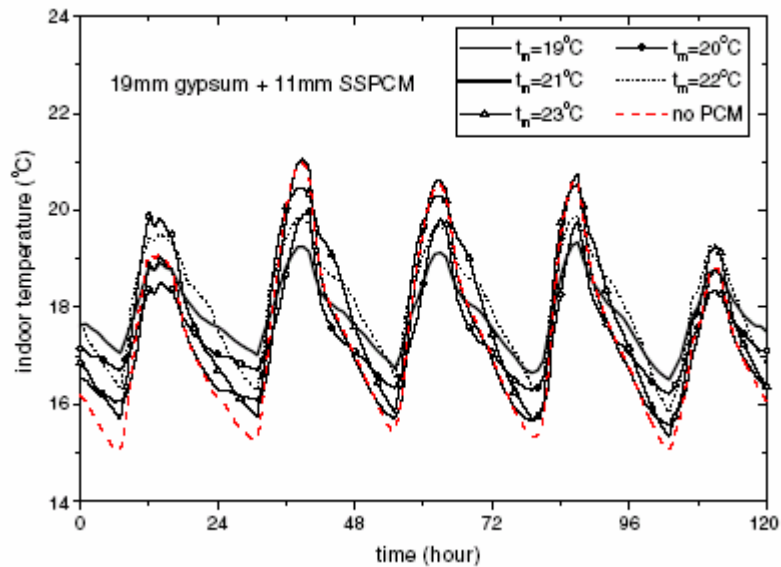
11.2.2 Αποτελέσματα της έρευνας

11.2.2.1 Η επίδραση της θερμοκρασίας τήξης και της ζώνης αλλαγής φάσης

Ως γνωστόν, ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την θερμική συμπεριφορά ενός κτιρίου το οποίο περιέχει PCM είναι η θερμοκρασία τήξης του τελευταίου. Από τα διαγράμματα που δίνονται βλέπουμε ότι η βέλτιστη τιμή της θερμοκρασίας αυτής είναι περίπου οι 21°C και για τις δύο συνθέσεις με PCM κάτω από τις συνθήκες που έχουν ήδη περιγραφεί, καθώς και η μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία διατηρείται υψηλότερα και οι θερμοκρασιακές δακυμάνσεις είναι μικρότερες σε σχέση με τα λοιπά σημεία τήξης.



Εικόνα 34 : Εσωτερική θερμοκρασία σε συνάρτηση προς την θερμοκρασία τήξης για την μίξη PCM-γύψου για την περίοδο 12-16 Νοεμβρίου.

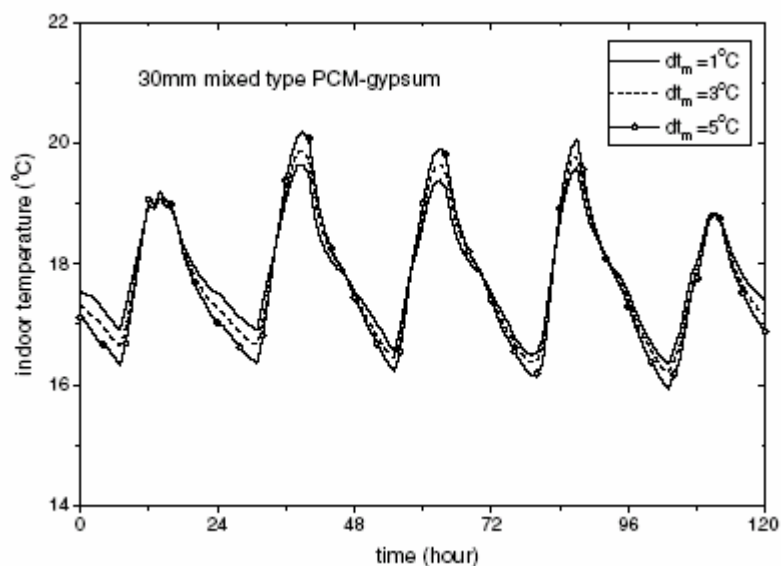


Εικόνα 35: Εσωτερική θερμοκρασία σε συνάρτηση προς την θερμοκρασία τήξης για το γύψο- SSPCM για την περίοδο 12-16 Νοεμβρίου.

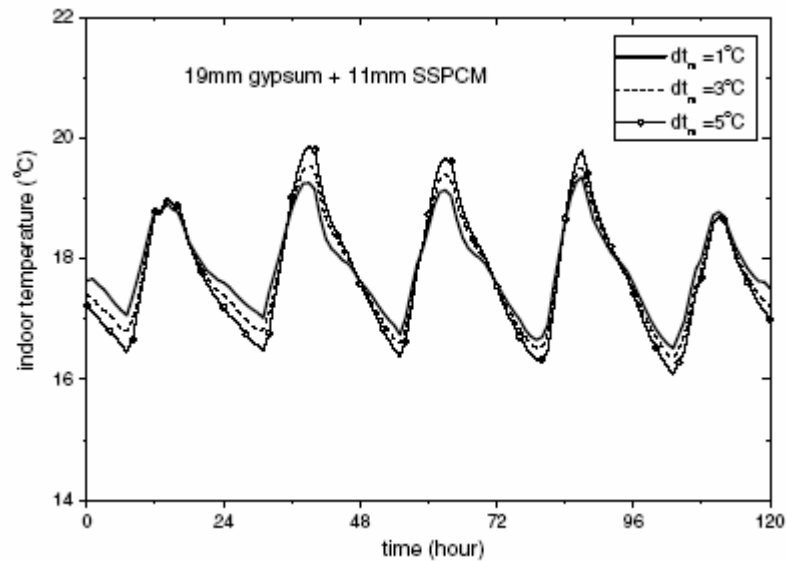
Αυτό συμβαίνει γιατί αν η θερμοκρασία τήξης ήταν πολύ υψηλή, τότε η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που θα αποθηκεύεται από το

εκάστοτε PCM θα είναι πολύ μικρή, ενώ εάν η θερμοκρασία τήξης είναι πολύ χαμηλή, η προκύπτουσα θερμοκρασία του αέρα θα είναι ακόμα χαμηλότερη τη νύχτα με αποτέλεσμα να απομακρυνόμαστε από τις συνθήκες θερμικής άνεσης.[55]

Η αλλαγή φάσης των PCM πραγματοποιείται συνήθως σε ένα θερμοκρασιακό εύρος και όχι σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία.Μάλιστα, τα δύο επόμενα διαγράμματα παρουσιάζουν την επίδραση της θερμοκρασιακής ζώνης αλλαγής φάσης και για τις δύο συνθέσεις των PCM.



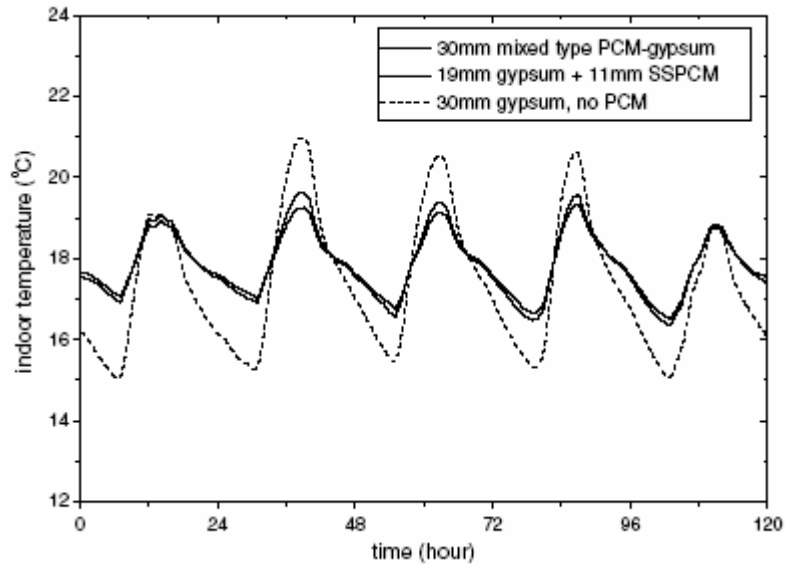
Εικόνα 36 : Εσωτερική θερμοκρασία συναρτήσει της ζώνης αλλαγής φάσης για την μίξη PCM-γύψου, την περίοδο 12 -16 Νοεμβρίου.



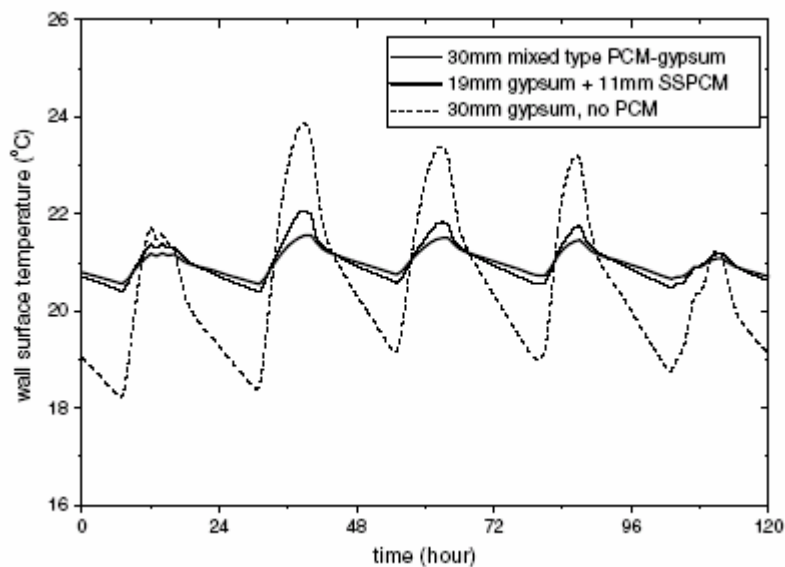
Εικόνα 37 : Εσωτερική θερμοκρασία συναρτήσει της ζώνης αλλαγής φάσης για τη σύνθεση γύψου- SSPCM την περίοδο 12 -16 Νοεμβρίου.

Όπως φαίνεται, η μικρότερη ζώνη αλλαγής φάσης, του 1°C , μειώνει περισσότερο τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις και βελτιώνει τις συνθήκες θερμικής άνεσης στο δωμάτιο και για τις δύο συνθέσεις του PCM. Μία πιά ευρεία ζώνη αλλαγής φάσης έχει την δυνατότητα να αποθηκεύει μικρότερη ποσότητα ενέργειας και επομένως η θερμική απόδοση του PCM είναι χειρότερη.

11.2.2.2 Σύγκριση ανάμεσα στα δύο είδη σύνθεσης του PCM



Εικόνα 38 : Εσωτερική θερμοκρασία και για τις δύο συνθέσεις του PCM κατά την περίοδο 12-16 Νοεμβρίου.



Εικόνα 39 : Επιφανειακή θερμοκρασία του τοίχου και για τις δύο συνθέσεις του PCM κατά την περίοδο 12-16 Νοεμβρίου.

Οι παραπάνω εικόνες συγκρίνουν την επίρδραση που έχει κάθε σύνθεση PCM στην εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου και στην επιφανειακή θερμοκρασία του τοίχου. Για την εσωτερική θερμοκρασία παρατηρούμε ότι και με την μίξη PCM-γύψου και με το γύψο-SSPCM η θερμοκρασιακή διακύμανση του δωματίου μειώνεται κατά 46% και 56% αντίστοιχα και

επομένως αυξάνεται η θερμική άνεση. Αν και οι δύο συνθέσεις περιέχουν την ίδια ποσότητα PCM, βλέπουμε ότι οι πλάκες SSPCM έχουν καλύτερη απόδοση σε σχέση με το γύψο-PCM χάρη στην μικρότερη θερμική αντίσταση και στην σχετικά υψηλότερη αποθηκευτική ικανότητα ανά μονάδα πάχους. Σε όμοια συμπεράσματα καταλήγουμε και από την μελέτη της επιφανειακής θερμοκρασιακής κατανομής στους τοίχους. Μάλιστα, η καμπύλη της μεταβολής της θερμοκρασίας είναι πιο επίπεδη για την περίπτωση των πλακών SSPCM, με θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης $20.5^{\circ}\text{C} - 21.5^{\circ}\text{C}$, το οποίο είναι υψηλότερο για την περίπτωση PCM-γύψου. Αυτό σημαίνει ότι οι πλάκες SSPCM αποθηκεύουν και αναπληρώνουν καλύτερα τη θερμότητα στο συγκεκριμένο θερμοκρασιακό εύρος.

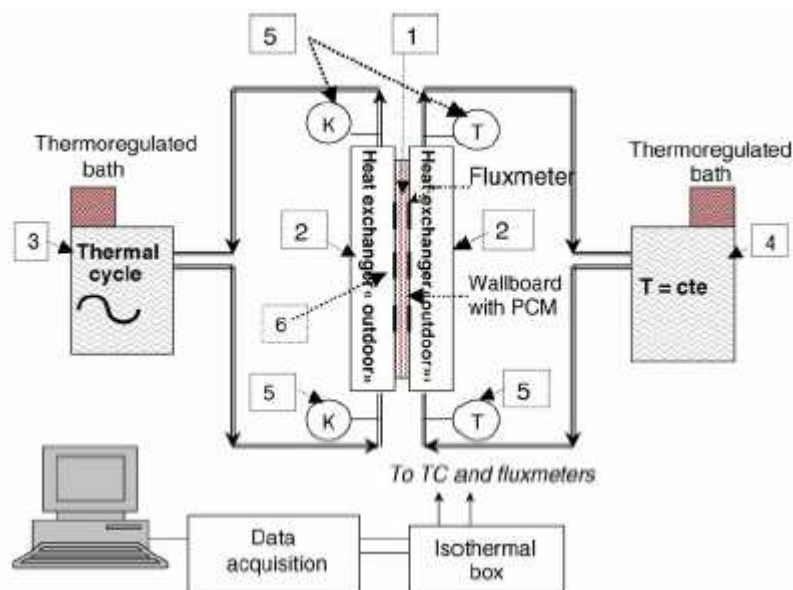
Για να γίνει πιο κατανοητό το παραπάνω, δίδεται και η ροή θερμότητας κατά την διάρκεια της νύχτας, όταν δηλαδή το PCM αποδίδει την αποθηκευμένη σε αυτό θερμότητα. Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι οι πλάκες SSPCM ανταποκρίνονται γρηγορότερα και παρουσιάζουν μεγαλύτερη ροή θερμότητας σε σχέση με το μίγμα γύψου-PCM, και επομένως βοηθούν στην σταθεροποίηση της θερμοκρασίας του δωματίου.

11.3 Συγκριτική μελέτη απλού πάνελ, πάνελ με ενσωματωμένη παραφίνη, πάνελ με ενσωματωμένο polyethylene glycol (peg 600) και PVC με ενσωματωμένο polyethylene glycol (peg 600)

Προκειμένου να εξετασθούν τα λεπτά πάνελ και κυρίως η ικανότητά τους να αποθηκεύουν θερμότητα και να μειώνουν τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, πραγματοποιήθηκαν πειράματα στην Γαλλία από τα παμεπιστήμια Centre Scientifique et Technique du Batiment και Universite Joseph Fourier [56].

Σε αυτή την εφαρμογή η θερμοκρασία σε κάθε πλευρά του πάνελ μπορεί είτε να «επιβάλλεται» από εναλλάκτες θερμότητας, είτε αυτό μπορεί να συμβαίνει στην μία πλευρά με την δεύτερη να έρχεται σε

επαφή με τον περιβάλλοντα αέρα. Ένα σκίτσο της πειραματικής διάταξης παρουσιάζεται παρακάτω:



Εικόνα 40 : Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης

Το πάνελ, όπως φαίνεται, είναι τοποθετημένο ανάμεσα και πολύ κοντά σε δύο εναλλάκτες θερμότητας, και «τροφοδοτείται» από δύο ροές νερού των οποίων η θερμοκρασία ρυθμίζεται μέσω ενός προγράμματος. Επιπλέον, ανάμεσα στο πάνελ και σε κάθε εναλλάκτη θερμότητας έχουν τοποθετηθεί πέντε μετρητές ροής θερμότητας με πέντε θερμομέτρα thermocouples. Έτσι, τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω αποτελούν τον μέσο όρο των μετρήσεων από τις πέντε αυτές συσκευές.

Όπως αναφέρεται και στον τίτλο, οι τέσσερις διαφορετικές κατηγορίες πάνελ που εξετάζονται είναι :

- Ένα πάνελ αναφοράς, χωρίς υλικό αλλαγής φάσης
- Ένα πάνελ με εμσωματωμένη παραφίνη, σε πολύ μικρές διαστάσεις
- Ένα πάνελ με polyethylene glycol (PEG 600)
- Ένα πάνελ από PVC με polyethylene glycol (PEG 600)

ενώ, τα υλικά αλλαγής φάσης επιλέχθηκαν έτσι ώστε το εύρος της θερμοκρασίας τήξης τους να είναι κοντά, με την παραφίνη να

έχει θερμοκρασία τήξης στους 26°C και το PEG 600 από τους 20°C -25°C .

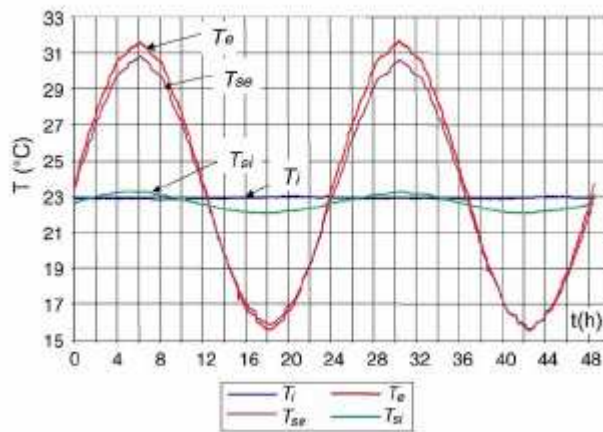
11.3.1 Οριακές συνθήκες

Οι ροές του νερού συντηρούνταν αρκετά υψηλά ώστε να διατηρούνται σταθερές οι θερμοκρασίες των τοίχων και ως εκ τούτου των εναλλακτών θερμότητας. Αυτό, άλλωστε, επιβεβαιώθηκε από την μέτρηση της διαφοράς θερμοκρασίας ανάμεσα στα ρεύματα εισόδου και εξόδου του νερού, η οποία ήταν λιγότερη από

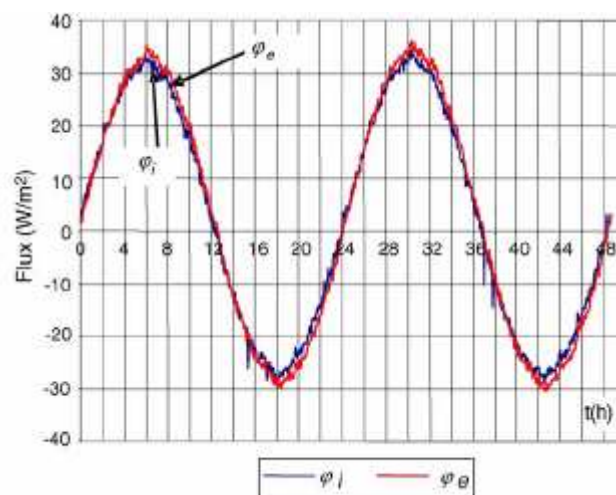
0.2°C . Ακόμα, η θερμοκρασία στο ένα ρεύμα νερού μεταβαλλόταν ημιτονοειδώς, προκειμένου να «επιβάλλει» συγκεκριμένη θερμοκρασία στην μία πλευρά του πάνελ, η οποία και θα ονομάζεται εξωτερική πλευρά και θα συμβολίζεται με το γράμμα e . Στην άλλη πλευρά του πάνελ είτε «επιβάλλεται» μία σταθερή θερμοκρασία, περίπου 23°C . ή η θερμοκρασία της καθορίζεται από φυσική συναγωγή, αφού απομακρυνθεί ο εναλλάκτης θερμότητας.

11.3.2 Θερμικός κύκλος του πάνελ αναφοράς

Σε αυτό το πάνελ, όπως αναφέρεται και παραπάνω, η θερμοκρασία στην μία του πλευρά μεταβάλλεται ημιτονοειδώς ενώ στην άλλη διατηρείται σταθερή στους 23°C . Στην εικόνα που δίδεται παρακάτω φαίνονται οι μεταβολές της θερμοκρασίας του νερού T_e , της εξωτερικής επιφάνειας του πάνελ T_{se} , και της εσωτερικής επιφάνειας του πάνελ T_{si} , ενώ η θερμοκρασία του νερού στην άλλη πλευρά διατηρείται σταθερή και ίση προς T_i .



Εικόνα 41 : Μεταβολές της θερμοκρασίας στον θερμικό κύκλο του πάνελ αναφοράς.

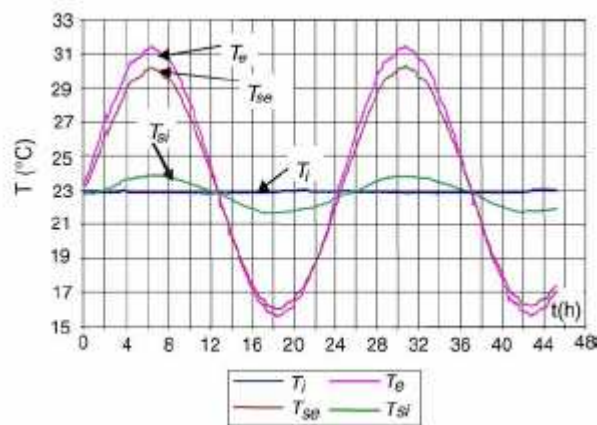


Εικόνα 42 : Μεταβολές της ροής θερμότητας στο θερμικό κύκλο του πάνελ αναφοράς.

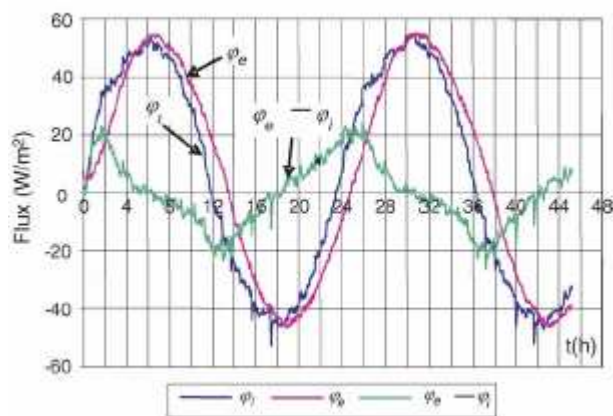
Η μεταβολή της ροής θερμότητας ϕ_e θεωρείται θετική όταν εισέρχεται στο πάνελ από την εξωτερική πλευρά, και η ϕ_i θεωρείται θετική όταν εγκαταλείπει το πάνελ από την εσωτερική του πλευρά, ενώ δεν παρατηρείται χρονική υστέρηση ανάμεσα στις δύο ροές.

11.3.3 Θερμικός κύκλος του πάνελ με ενσωματωμένη παραφίνη, σε πολύ μικρές διατάσεις

Ύστερα από εξέταση της συγκεκριμένης περίπτωσης, καταλήγουμε στο ότι δεν υπάρχουν ιδιαίτερες διαφορές στις καμπύλες της θερμοκρασίας με την προσθήκη του PCM, κάτι που όμως δεν συμβαίνει και με τις καμπύλες ροής θερμότητας.



Εικόνα 43 : Μεταβολές της θερμοκρασίας στον θερμικό κύκλο του πάνελ με παραφίνη.



Εικόνα 44: Μεταβολές της ροής θερμότητας στον θερμικό κύκλο του πάνελ με παραφίνη.

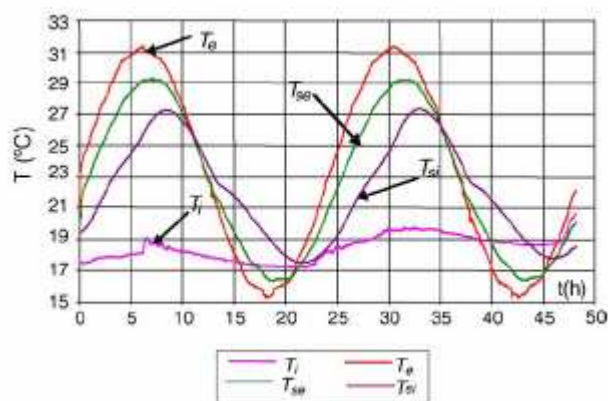
Εάν ϕ_e είναι η εξωτερική ροή θερμότητας, η οποία είναι θετική όταν η θερμότητα εισέρχεται στο πάνελ, η ημιτονοειδής μορφή της είναι εμφανής. Η εσωτερική ροή θερμότητας, από την άλλη, είναι έχει

ελαφρώς διαφορετική μορφή, ενώ παρατηρείται μια μικρή χρονική υστέρηση.

Με την αναπαράσταση σε διάγραμμα της διαφοράς $\varphi_e - \varphi_i$ μπορεί να εκτιμηθεί αποθήκευση θερμότητας. Σε περίπτωση που η διαφορά είναι θετική τότε θερμότητα αποθηκεύεται και θερμότητα αποδίδεται όταν αυτή είναι αρνητική. Παρ' όλα αυτά, εάν υπολογίσουμε το ποσό της θερμότητας που αποθηκεύεται και αποδίδεται κατά τη διάρκεια μιας περιόδου, μέσω της εμβαδομέτρησης, θα δούμε ότι η τιμή της προκύπτει μικρότερη από την αποθηκευτική ικανότητα του υλικού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ολόκληρο το μίγμα του πάνελ μαζί με την παραφίνη δεν επιτρέπει την εύκολη μεταφορά θερμότητας από την μία πλευρά στην άλλη.

11.3.4 Θερμικός κύκλος πάνελ με ενσωματωμένο PEG 600

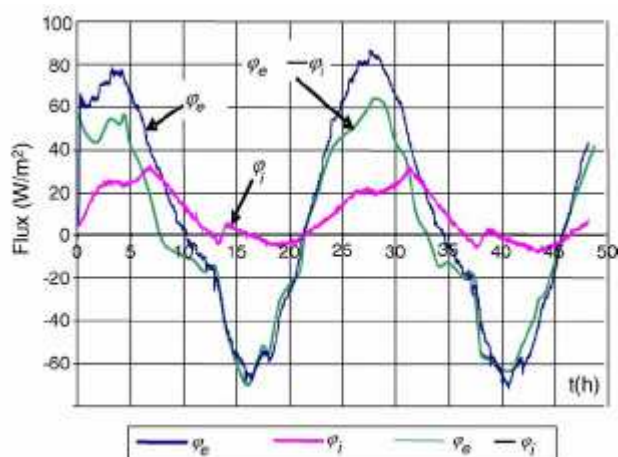
Παρ' όλο που το συγκεκριμένο PCM έχει μεγάλο σχετικά εύρος θερμοκρασιών αλλαγής φάσης, περίπου 5, επιλέχτηκε για την εφαρμογή αυτή εξ αιτίας του χαμηλού του κόστους και της διαθεσιμότητάς του.



Εικόνα 45 : Μεταβολές της θερμοκρασίας στον θερμικό κύκλο πάνελ με ενσωματωμένο PEG600.

Όπως φαίνεται και από το παραπάνω σχήμα, η εσωτερική θερμοκρασία του ρεύματος νερού T_i , παρουσιάζει μικρές διακυμάνσεις, ενώ η εσωτερική θερμοκρασία της επιφάνειας T_{si} αν και περιοδική δεν είναι πλέον ημιτονοειδής και έχει σημεία καμπής, τα οποία δείχνουν ξεκάθαρα την παρουσία της αλλαγής φάσης καθώς και την αποθήκευση

θερμότητας που συνδέεται με αυτή. Επιπλέον, παρατηρείται μια χρονική υστέρηση της τάξης των 2.5 ωρών και μία σημαντική μείωση της απόστασης μεταξύ των μεγίστων των T_e και T_{si} , πράγμα που δείχνει την επίδραση του PCM.

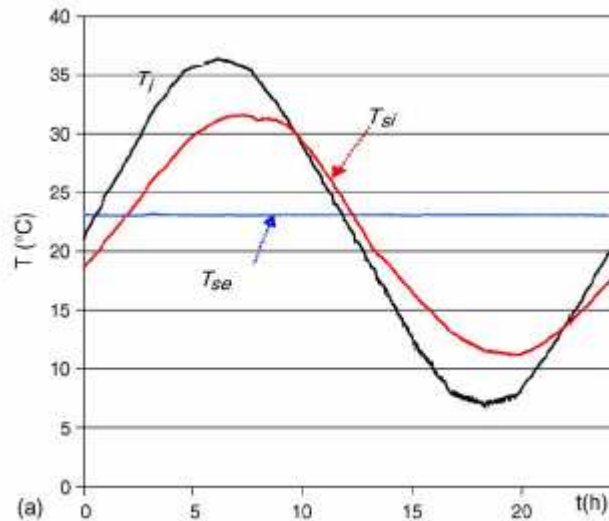


Εικόνα 46 : Μεταβολές της ροής θερμότητας στον θερμικό κύκλο του πάνελ με ενσωματωμένο PEG 600 .

Σε ότι αφορά στην ροή θερμότητας, αυτή παρουσιάζεται στο παραπάνω σχήμα. Με την χάραξη του διαγράμματος ϕ_e - ϕ_i και τον υπολογισμό του εμβαδού της περιοχής που αυτό καλύπτει, γίνεται εμφανής η σημαντική ποσότητα θερμότητας που αποθηκεύεται σε ολόκληρο το πάνελ.

11.3.5 Θερμικός κύκλος PVC πάνελ με ενσωματωμένο PEG 600

Από την μελέτη της εφαρμογής αυτής παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία της επιφάνειας T_{si} εμφανίζει μεγαλύτερη περίοδο συγκριτικά με την θερμοκρασία T_i , κάτι που απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 47: Μεταβολή της θερμοκρασίας στον θερμικό κύκλο PVC πάνελ με ενσωματωμένο PEG 600.

11.3.6 Επίλογος

Τελειώνοντας, αναφέρεται ότι διεξάχθηκαν πολλά πειράματα με εξοπλισμό κατασκευασμένο αποκλειστικά για αυτού του είδους τα πάνελ. Καταλήξαμε ότι τα πάνελ με ενσωματωμένη παραφίνη ή με PEG 600 δεν ήταν τα καταλληλότερα για τις εφαρμογές σε κτίρια, ενώ PVC πάνελ με ενσωματωμένο PEG 600 έδειξαν ότι έχουν πιο συμβατές ιδιότητες. Ακόμα, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι αν και τα παραπάνω υλικά δοκιμάστηκαν για πάνω από 400 θερμικούς κύκλους, δεν παρατηρήθηκε καμία χειροτέρευση των ιδιοτήτων των υλικών.

Κεφάλαιο 12

Μελέτες για πάνελ τοποθετημένα σε τοίχο

12.1 Μελέτη για το ιδανικό πάχος πάνελ με ενσωματωμένο PCM

Η μελέτη που παρουσιάζεται παρακάτω [57] είναι μία διαδικασία βελτιστοποίησης για την αύξηση της αποθηκευτικής ικανότητας χρησιμοποιώντας την μικρότερη δυνατή ποσότητα PCM. Υπάρχουν δύο αντικρουόμενες απόψεις σε ότι αφορά την χρήση των πάνελ με PCM στα κτίρια. Όταν το πάχος γίνεται επαρκώς μικρό τότε το πάνελ με PCM λειτουργεί σχεδόν ισοθεμικά και η διαδικασία αποθήκευσης της ενέργειας ενεργοποιείται μόνο λόγω των θερμοκρασιακών μεταβολών. Έτσι, σε αυτή την περίπτωση όσο μεγαλύτερο είναι το πάνελ τόσο πιο σημαντική είναι η αποθηκευτική ικανότητα, η οποία είναι ανάλογη του όγκου του υλικού αλλαγής φάσης. Λαμβάνοντας ως δεδομένο ότι η μεταφορά θερμότητας στα κτίρια γίνεται προς όλες τις κατευθύνσεις, η ενέργεια που αποθηκεύεται στα PCM είναι ανάλογη του πάχους του τοίχου. Όταν το πάχος είναι μεγάλο, ο χρόνος που απαιτείται για να διαπεράσει η θερμότητα το PCM είναι περισσότερος από 12 ώρες και ως εκ τούτου η διαδικασία αποθήκευσης δεν μπορεί να ολοκληρωθεί

σε μία μόνο ημέρα.Οι δύο παραπάνω αντικρουόμενες απόψεις καταδεικνύουν την ύπαρξη ενός βέλτιστου πάχους του πάνελ που περιέχει PCM.

Ύστερα από πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, παρατηρήθηκε ότι όταν το πάχος του πάνελ είναι μεγαλύτερο από το υπολογιζόμενο ως ιδανικό, δεν επηρεάζεται ολόκληρος ο τοίχος από την ροή της θερμότητας, και αφού μειώνεται η τελευταία μειώνεται και η αποθηκευτική του ικανότητα. Όταν το πάχος του πάνελ είναι αρκετά μεγάλο τότε η ροή θερμότητας δεν μπορεί να διαπεράσει τον τοίχο και τότε το PCM λειτουργεί σαν ημι-άπειρο υλικό.

Σε ότι αφορά στο πάχος της μόνωσης, αυτό δεν φαίνεται να επηρεάζει τη βέλτιστη τιμή του πάχους του πάνελ με PCM. Το παραπάνω γίνεται λόγω της περιορισμένης εισροής θερμότητας που μπορεί να περάσει από το εξωτερικό περιβάλλον στο μονωτικό υλικό. Για τον ίδιο ακριβώς λόγο το πάχος του τοίχου του PCM δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνεις της εξωτερικής θερμοκρασίας.

Από την επίδραση που έχει η αλλαγή φάσης στο πάχος του πάνελ με PCM προκύπτει ότι η βέλτιστη τιμή του κυμαίνεται από 9 mm έως 11.5 mm, ενώ από την επίδραση των μεταβολών της εσωτερικής θερμοκρασίας προκύπτει ότι η βέλτιστη τιμή του κυμαίνεται από 9 mm έως 15 mm.

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα που αφορούν στην ενέργεια που αποθηκεύεται σε ένα πάνελ με PCM κατά την διάρκεια μιας ημέρας πλήρους λειτουργίας του, καταλήγουμε στο ότι το βέλτιστο πάχος είναι 1 cm. Αυτό το 1 cm επιτρέπει τον διπλασιασμό της θερμικής αδράνειας του κτιρίου, εμποδίζοντας την υπερθέρμανσή του τις ζεστές ημέρες και αυξάνοντας την ελάχιστη θερμοκρασία του αέρα κατά την διάρκεια της νύχτας. Εν ολίγοις, περιορίζει τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις στο εσωτερικό των δωματίων.

12.2 Μια μελέτη των θερμικών χαρακτηριστικών των PCM σε γύψινα πάνελ για εφαρμογή στα κτίρια.[58]

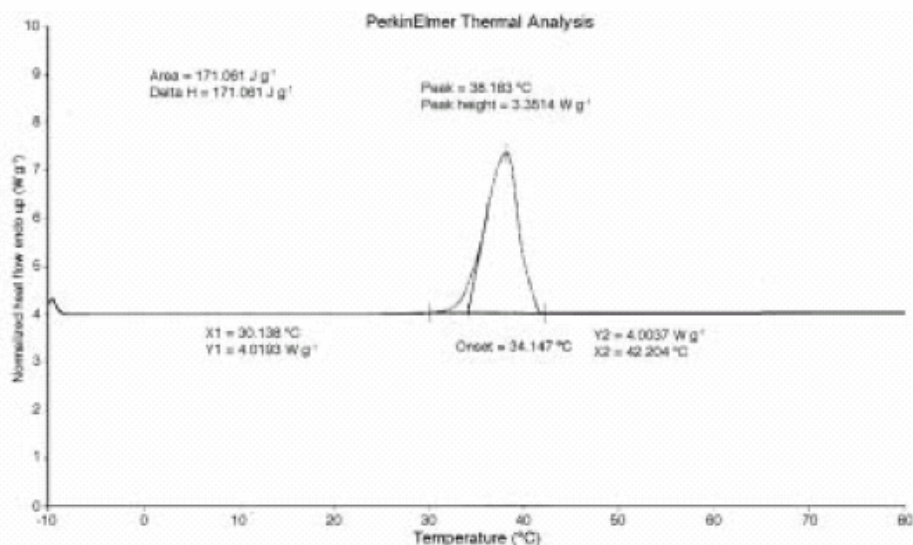
12.2.1 Περιγραφή της μελέτης

Στη συγκεκριμένη μελέτη, γίνεται απλά εμβαπτισμός γύψινων πάνελ σε ευκτικό μίγμα από lauric-stearic acids, το οποίο έχει τον ρόλο του PCM για περίπου μία ώρα στους 60°C. Οι θερμικές ιδιότητες του ευκτικού μίγματος, όπως το σημείο τήξης, το σημείο στερεοποίησης και η λανθάνουσα θερμότητα, έχουν ήδη καθορισθεί ενώ μετά την εμβάπτιση τα δείγματα απομακρύνονται και αφού στεγνώσουν αναλύονται τα θερμικά τους χαρακτηριστικά.

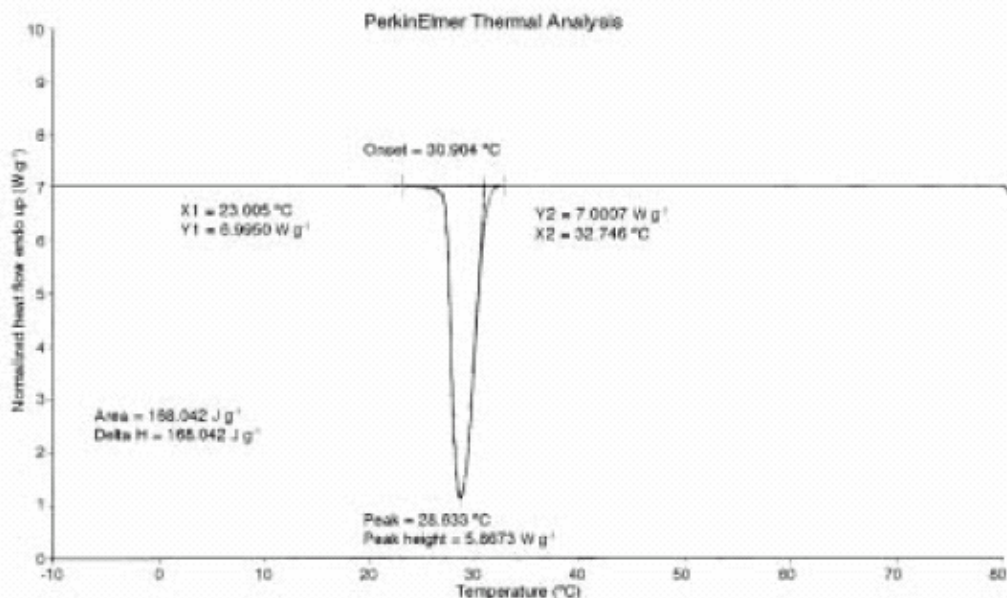
12.2.2 Αποτελέσματα

Η ανάλυση DSC του ευκτικού μίγματος του 'lauric stearic acids' έδειχνε μια αιχμηρή ακμή, χωρίς την ύπαρξη δεύτερης ή την ύπαρξη κοίλης από τους -10°C στους +80°C. Όπως φαίνεται από την εικόνα που παρουσιάζεται παρακάτω η θερμοκρασία τήξης, η λανθάνουσα θερμότητα και το θερμοκρασιακό εύρος τήξης του ευκτικού μίγματος είναι 34,1°C, 171,1 J g⁻¹, 30,1°C - 42,2°C αντίστοιχα. Το σημείο τήξης του ευκτικού μίγματος ήταν χαμηλότερο συγκριτικά με αυτό των απλών. Παρ'όλα αυτά η λανθάνουσα θερμότητα ήταν ήταν αρκετά υψηλή ώστε να είναι συγκρίσιμη με αυτή των λοιπών PCM, όπως είναι τα ένυδρα άλατα, και οι πολυακλοόλες, στα οποία είναι 100-250 J g⁻¹. Τα θερμικά χαρακτηριστικά της στερεοποίησης, όπως καθορίστηκαν από την ανάλυση DSC παρουσιάζονται στην δεύτερη εικόνα που δίδεται. Το σημείο στερεοποίησης εντοπίζεται στους 30,9°C, λανθάνουσα θερμότητα 168 J g⁻¹ και θερμοκρασιακό εύρος στερεοποίησης 32,7°C - 23°C. Οι θερμοκρασιακές μεταβάσεις ανάμεσα στην τήξη και στην στερεοποίηση ήταν 34,1°C και 30,9°C, που θεωρούνται πολύ κοντά η μία στην άλλη. Τέλος, η μετάβαση από τη στερεή στην υγρή φάση είναι αναστρέψιμη καθώς η θερμότητα που απορροφάται ως λανθάνουσα

Θερμότητα τήξης μπορεί να αποδοθεί ως θερμότητα στερεοποίησης, με μικρό θερμικό κόστος.



Εικόνα 48 : Χαρακτηριστικά ευθικτικού μίγματος κατά τη διάρκεια της τήξης



Εικόνα 49 : Χαρακτηριστικά ευθικτικού μίγματος κατά την διάρκεια της στερεοποίησης

Τελειώνοντας, αναφέρεται ότι όταν στο 'layric steatric acids', εμβαπτίζεται γύψινο πάνελ, τα θερμικά χαρακτηριστικά του μίγματος παρέμειναν πρακτικά αναλώσιμα, με μία αιχμηρή κορυφή και όχι άλλες διακυμάνσεις, ενώ στην πραγματικότητα, η εμβάπτιση αυτή δεν επηρέασε ούτε τα φυσικά χαρακτηριστικά των γύψινων πάνελ.

12.3 Αριθμητική και πειραματική ανάλυση πάνελ για προκατασκευασμένους τοίχους, που περιέχουν ανάμεσά τους PCM [59]

12.3.1 Τα είδη πάνελ που χρησιμοποιούνται

Σε αυτό το πείραμα εξετάζονται τέσσερα είδη πάνελ , όλα παραλλαγές της ίδιας βασικής τεχνολογίας, με βασικό στόχο την δημιουργία ενός πάνελ με PCM για προκατασκευασμένους τοίχους.Επιδιώκεται να έχει κατασκευαστική τεχνολογία και διαδικασία εγκατάστασης όμοια με αυτή των παραδοσιακών πάνελ, και να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ευρέως σε μεγάλες επιφάνειες ενώ παράλληλα να διατηρεί τα προτερήματα της εύκολης μεταφοράς και της εύκολης συναρμολόγησης.Οι στρώσεις από τις οποίες αποτελείται το πάνελ συήθως είναι οι εξής: ένα φύλλο μετάλλου ως εσωτερική στρώση,μία στρώση μονωτικού υλικού, και συγκεκριμένα πολυουρεθάνης, μία στρώση PCM με θερμοκρασία τήξης 32° C και ένα εξωτερικό φύλλο μετάλλου ως εξωτερική στρώση, όμοια με την αρχική.Σε δύο από τα τέσσερα πάνελ που εξετάστηκαν, εισήχθηκε ένα στρώμα αέρα.Τα ακριβή χαρακτηριστικά του κάθε πάνελ παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4: Τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε πάνελ που μελετάται.

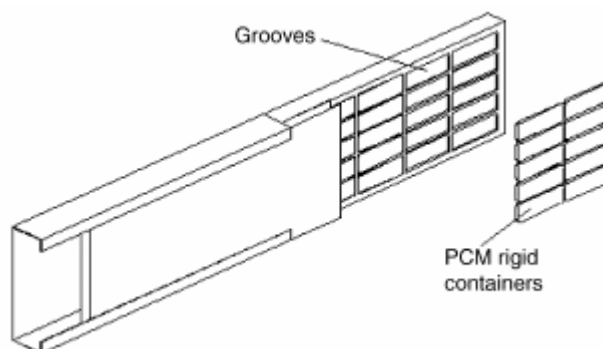
Stratifications of the panels

No.	Insulation thickness (m)	PCM thickness (m)	Air layer thickness (m)	Total thickness (m)
1	0.06	0.03	–	0.09
2	0.06	0.01	0.04	0.11
3	0.12	0.01	0.04	0.17
4	0.06	0.01	–	0.07

Η διαδικασία ενσωμάτωσης του PCM ανάμεσα στα πάνελ ακολουθεί τα εξής βήματα:

- Δημιουργούνται τρύπες στο στρώμα της μόνωσης
- Εισαγωγή του PCM σε πλαστικά και σταθερά καλύμματα στο εσωτερικό των τρυπών που αναφέρονται παραπάνω
- Εισαγωγή όλου του παραπάνω συστήματος σε μεταλλικό σκελετό

Μιά εικόνα της κατασκευής αυτής παρουσιάζεται παρακάτω, ενώ αναφέρεται ότι κάθε πάνελ έχει διαστάσεις 0.5 m x 1.0 m:



Εικόνα 50 : Η ενσωμάτωση του PCM στο πάνελ, για την περίπτωση που αφήνεται ένα στρώμα αέρα.

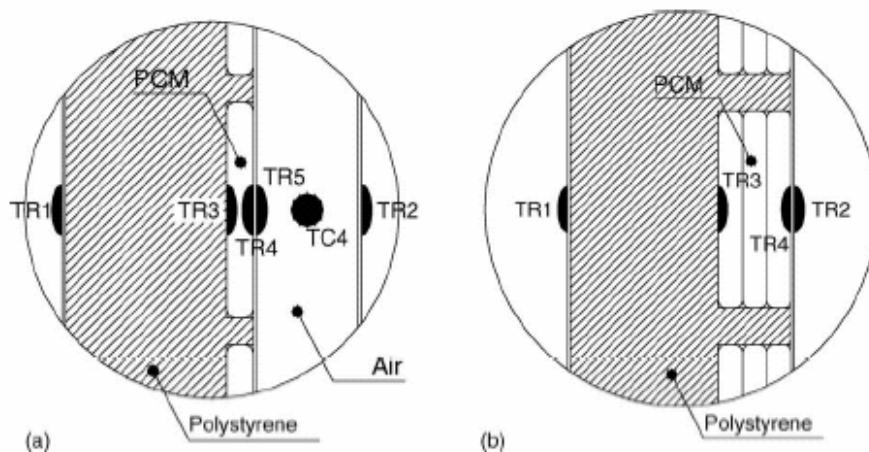
12.3.2.Πειραματικές δοκιμές

Χρησιμοποιώντας πειραματικό εξοπλισμό τα τέσσερα δοκιμαστικά πάνελ υπόκεινται σε σταθερές οριακές συνθήκες. Καθώς το δωμάτιο δοκιμών είναι εξοπλισμένο με σύστημα κλιματισμού ώστε να μπορεί να ελέγχει την θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα, οι δοκιμές έγιναν με την ακόλουθη διαδικασία:

- Ένα δείγμα τοποθετείται στο διαχωριστικό του δωματίου δοκιμών.

- Ένας προσομοιωτής της ηλιακής ακτινοβολίας τοποθετήθηκε σε απόσταση τέτοια ώστε να ακτινοβολείται η μία επιφάνεια του πάνελ με ομογενή και σταθερή ροή θερμότητας 1000W/m^2 .
- Συνθήκες του εσωτερικού και του εξωτερικού περιβάλλοντος αναπαράχθηκαν παράγοντας μιά ρεαλιστική ανάλυση της μεταφοράς θερμότητας που γίνεται μέσω της οροφής ενός κτιρίου.
- Οι πειραματικές δοκιμές έληξαν όταν η εσωτερική θερμοκρασία των πάνελ έφτασε τους 50°C .

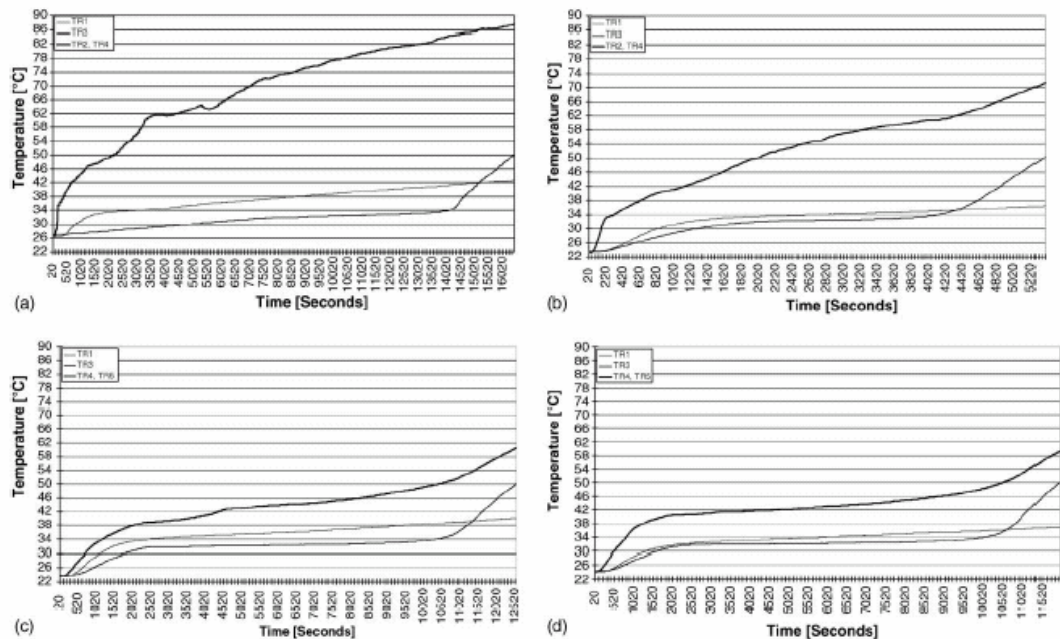
Η τιμή της θερμοκρασίας επιλέχθηκε προκειμένου να διατηρηθεί σταθερή μία παράμετρος σε όλα τα πάνελ υπό δοκιμή και επομένως να γίνει η σύγκριση ανάμεσά τους με βάση τον χρόνο που απαιτείται για να φτάσουν σε αυτό το θερμοκρασιακό όριο. Αυτός ο χρόνος, αντικατοπτρίζει και την ικανότητα του πάνελ να αντιμετωπίζει ισχυρή ηλιακή ακτινοβολία, που είναι υπεύθυνη για την υπερθέρμανση των στοιχείων ελαφίων κατασκευών , όπως είναι τα πάνελ.



Εικόνα 51 : (α) Η θέση των RTDs σε πάνελ με στρώμα αέρα (β) Η θέση των RTDs σε πάνελ χωρίς στρώμα αέρα

Τα διαγράμματα της επόμενης εικόνας παρουσιάζουν τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις των τεσσάρων πάνελ, όταν τα RTDs (Resistance Thermal Detectors), βρίσκονταν τοποθετημένα στην εσωτερική, στην εξωτερική και στο μέσο της επιφάνειας ανάμεσα στην

στρώση PCM και στην στρώση από πολυστερήνη, όπως φαίνονται από το παραπάνω σχήμα.



Εικόνα 52 : Θερμοκρασιακά διαγράμματα για (a) το πάνελ n.1 , (b) το πάνελ n.4, (c) το πάνελ n.2, (d) το πάνελ n.3

Το πρώτο πάνελ (εικόνα a)φαίνεται να απορροφά την ροή θερμότητας που έρχεται από το εξωτερικό, καθώς η θερμοκρασία του PCM διατηρείται σταθερή στους 32 °C, για χρονικό διάστημα περίπου 2 ωρών από τις 4.5 που διήρκεσαν συνολικά όλες οι δοκιμές. Για το τέταρτο πάνελ(εικόνα b), αυτά τα χρονικά διαστήματα είναι τελείως διαφορετικά, μιας και η θερμοκρασία του PCM διατηρείται σταθερή για διάστημα 0.5 της ώρας από την 1.5 ώρα που διήρκεσε συνολικά το πείραμα. Επομένως, είναι εμφανής η επίδραση του πάχους του PCM στην αντιμετώπιση της εξωτερικής ακτινοβολίας και στην μείωση της θερμοκρασίας της εσωτερικής επιφάνειας. Μπορούμε να συμπεράνουμε , λοιπόν, ότι μία στρώση PCM πάχους 3 cm είναι ικανή να αντιμετωπίσει την ηλιακή ακτινοβολία για αρκετό χρόνο.

Το PCM έχει την δυνατότητα να κρατάει την θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας ενός τοίχου σε χαμηλές τιμές, ακόμα και αν το πάνελ έχει σκούρο εξωτερικό χρώμα και μέτρια μόνωση.

Μία μέθοδος που μπορεί να διασφαλίσει την χαμηλή θερμοκρασία λόγω ακτινοβολίας είναι η προσθήκη μίας στρώσης αέρα, όπως άλλωστε φαίνεται και από τα σχετικά αποτελέσματα των πάνελ n.2 και n.3, όπου το πρώτο διατηρεί την εσωτερική του θερμοκρασία σε τιμές ακόμα και 3°C χαμηλότερες από το δεύτερο, προφανώς χάρη στην αύξηση του πάχους του στρώματος πολυστερήνης. Παρ' όλα αυτά, και τα δύο είναι ικανά να μπλοκάρουν την ενδιάμεση θερμοκρασία στους 32°C , πράγμα που συμβαίνει και με το πάνελ n.1.

Προφανώς, η τεχνολογική λύση που εφαρμόζεται σε κάθε περίπτωση εξαρτάται από το κλίμα στο οποίο αυτή θα λειτουργήσει και από την ανάγκη πλήρους αποφόρτισης της θερμότητας του PCM για να στερεοποιηθεί, η οποία γενικά προκύπτει κατά την διάρκεια της νύχτας.

Το πάχος του PCM που θα χρησιμοποιηθεί είναι συνάρτηση και της έντασης και της διάρκειας της ηλιακής ακτινοβολίας, ανάλογα και με το αν λειτουργεί σε οροφή ή σε κατακόρυφα πάνελ.

Συνδυάζοντας τις ικανότητες απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας από το PCM με τις μονωτικές ιδιότητες του στρώματος του αέρα, είναι δυνατή η διασφάλιση της καλής θερμικής απόδοσης σε πολλές περιπτώσεις που παρουσιάζουν ειδικά χαρακτηριστικά.

Γενικότερα, η παρουσία ενός στρώματος αέρα, μπορεί να αναβάλλει την έναρξη της διαδικασίας τήξης όσο η ακτινοβολία που προσπίπτει στην εξωτερική επιφάνεια των πάνελ δεν είναι πολύ δυνατή. Αργά το απόγευμα, όταν η θερμοκρασία του PCM είναι τουλάχιστον 32°C , μία παχιά μονωτική στρώση είναι απαραίτητη για την αποφυγή των υψηλών θερμοκρασιών στην εσωτερική επιφάνεια των πάνελ. Επιπλέον, βοηθά στην αποβολή της λανθάνουσας μορφής θερμότητας από το PCM προς το περιβάλλον, αποφεύγοντας έτσι και την αύξηση των θερμικών κερδών.

12.3.3 Αριθμητική ανάλυση

Η αριθμητική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με την δημιουργία ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων δύο διαστάσεων και αντιστοιχεί στην διαμόρφωση του πάνελ κατά μήκος του κάθετου άξονα συμμετρίας, δηλαδή στην θέση στην οποία η ροή θερμότητας κατά την τρίτη κατεύθυνση δεν λαμβάνεται υπόψη.

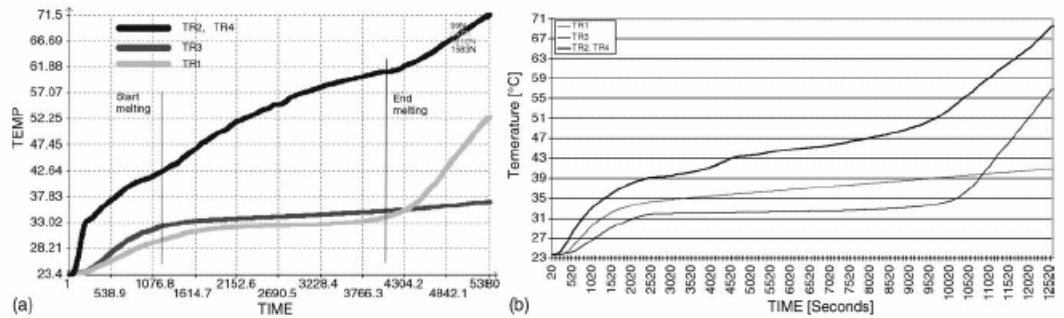
Η μελέτη, σαν συνάρτηση του εσωτερικού και εξωτερικού θερμοκρασιακού χρόνου λήφθηκε από την πειραματική ανάλυση, ενώ η ροή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας στην εξωτερική επιφάνεια των πάνελ, επιβλήθηκε ομοιόμορφα και έλαβε την τιμή των 1000 W/m^2 .

Οι ζώνες που απαρτίζουν τα πάνελ που μελετήθηκαν με την μέθοδο της αριθμητικής ανάλυσης είναι:

1. Το πάνελ n.4, με 0.0015 m παχύ μεταλλικό φύλλο, 0.06 m παχιά στρώση μόνωσης, 0.01 m παχιά στρώση PCM, 0.015 m παχύ μεταλλικό φύλλο.
2. Το πάνελ n. 2, με 0.0015 m παχύ μεταλλικό φύλλο, 0.06 m παχιά στρώση μόνωσης, 0.01 m παχιά στρώση PCM, 0.04 m παχιά στρώση αέρα, 0.015 m παχύ μεταλλικό φύλλο.

Η πρώτη προσομοίωση διήρκησε για μία ώρα και είκοσι λεπτά και η δεύτερη τρεις ώρες και είκοσιεννέα λεπτά.

Στο διάγραμμα που δίδεται, ως αποτέλεσμα της αριθμητικής αυτής ανάλυσης, παρουσιάζονται οι μετρήσεις των RTDs, όταν αυτά είναι τοποθετημένα στην εξωτερική, στην εσωτερική και στην ενδιάμεση επιφάνεια του PCM και της πολυστερήνης. Όπως παρατηρούμε, σε δύο θέσεις, κατά την διάρκεια της τήξης του PCM η θερμοκρασία στο εσωτερικό του όριο (TR3) παραμένει σταθερή, γιατί η ροή θερμότητας που εισέρχεται από το εξωτερικό περιβάλλον, απορροφάται πλήρως όσο το PCM τήκεται.



Εικόνα 53 : Κατανομή της θερμοκρασίας για τα πάνελ

(a) n. 4 και (b) n. 2

Με αυτό τον τρόπο επιβεβαιώνεται και με την αριθμητική μέθοδο η χρησιμότητα του PCM, το οποίο αποδεικνύει ότι μπορεί να διατηρήσει την εσωτερική θερμοκρασία του τοίχου σε μία σταθερή τιμή, όταν η εξωτερική αυξάνεται με ταχύ ρυθμό.

12.3.4 Σύγκριση ανάμεσα στα αποτελέσματα της πειραματικής και της αριθμητικής μεθόδου

Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε για τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν με την αριθμητική μέθοδο. Για το πάνελ n.4, το ποσοστό του λάθους που υπήρχε στην αριθμητική μέθοδο, υπολογιζόταν σε κάθε βήμα της μεθόδου αυτής συγκρίνοντάς το με την πειραματική μέθοδο, όταν τα RTDs ήταν τοποθετημένα στις θέσεις TR1, δηλαδή στην εσωτερική επιφάνεια, και στην TR3, δηλαδή στην διαχωριστική επιφάνεια ανάμεσα στο PCM και στην πολυστερήνη. Στην πρώτη περίπτωση, η μέση τιμή της μετατόπισης είναι περίπου 0.37%, με τυπική απόκλιση 0.24% και μέγιστο λάθος 1.07%, ενώ στην δεύτερη, η μέση τιμή της μετατόπισης είναι 0.70%, με τυπική απόκλιση 0.98% και μέγιστο σφάλμα ίσο προς 3.61%.

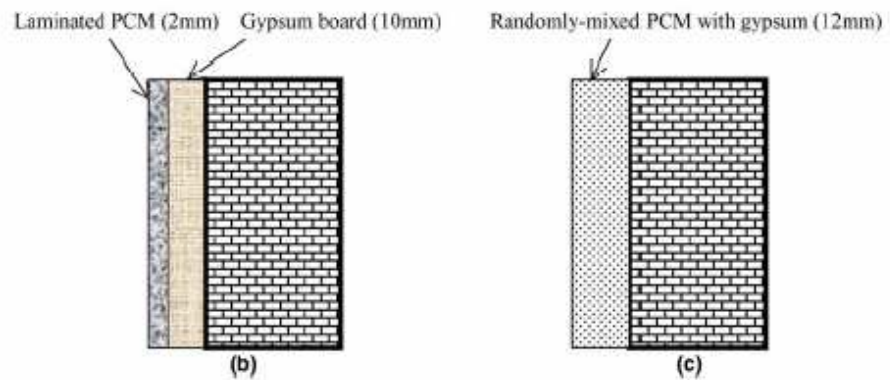
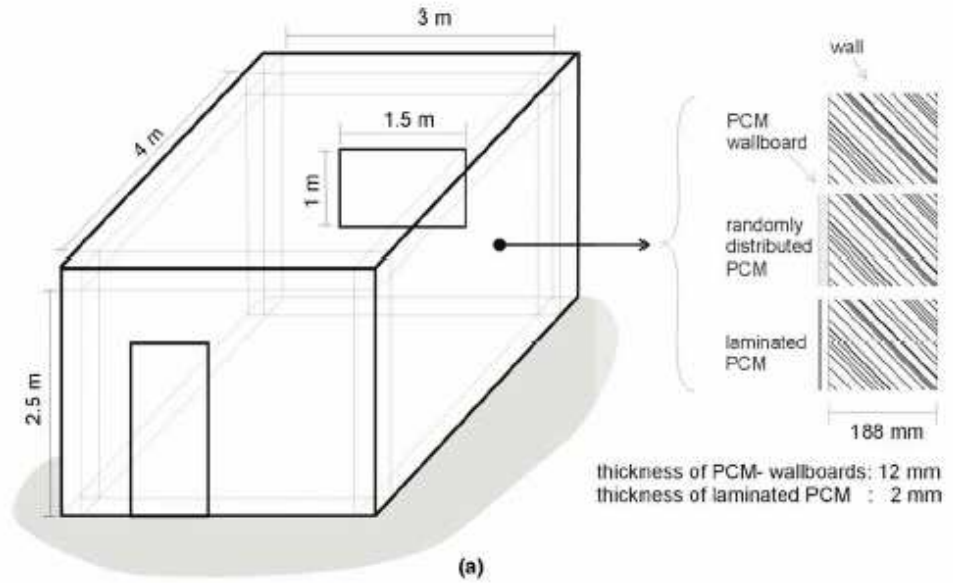
Λαμβάνοντας υπ όψη τις χαμηλές τιμές των τυπικών αποκλίσεων από το μέσο σφάλμα, καταλήγουμε στο ότι η αριθμητική μέθοδος είναι αξιόπιστη για την προσομοίωση του PCM με ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων δύο διαστάσεων, εάν υποθέσουμε ότι η αλλαγή φάσης πραγματοποιείται σε εύρος 1°C.

Για το πάνελ n.2 η μετατόπιση υπολογίστηκε σε τρεις επιφάνειες για κάθε χρονικό βήμα της αριθμητικής ανάλυσης, στην εσωτερική επιφάνεια TR1, στην επιφάνεια διαχωρισμού του PCM από την πολυστερήνη TR3 και ανάμεσα στο PCM και την στρώση του αέρα TR4. Τα λάθη που σχετίζονται με το μέγιστο ποσοστό λαμβάνουν τις τιμές 3.03%, 15.00% και 14.67 % αντίστοιχα. Παρατηρώντας την ακολουθία των πειραμάτων, τονίζεται ότι το μέγιστο ποσοστό εμφανίζεται κατά την διάρκεια της τελευταίας φάσης του πειράματος, δηλαδή όταν οι θερμοκρασίες των πάνελ αυξάνονται ραγδαία και ξεπερνούν το θερμοκρασιακό πεδίο που είναι κατάλληλο για ένα κατασκευαστικό στοιχείο. Η μέση τιμή των λαθών είναι 1.88%, 2.71% και 4.04% αντίστοιχα και η τυπική απόκλιση 0.95%, 4.67% και 4.72%. Βλέπουμε, λοιπόν, ότι και οι μέσες τιμές των λαθών και οι τυπικές αποκλίσεις είναι σχετικά σταθερές. Μόνο όταν η διαφορά ανάμεσα στις πειραματικές και στις αριθμητικές πληροφορίες ξεπερνάει το 10%, που συμβαίνει για την περίπτωση που το πάνελ έχει στρώση αέρα και στις μεγάλες θερμοκρασίες, το σφάλμα μπορεί να αποδοθεί κυρίως στον αλγόριθμο που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση του φαινομένου.

Τέλος, καταλήγουμε στο ότι και οι δύο περιπτώσεις μας δίνουν τις ζητούμενες πληροφορίες για τις θερμοκρασίες, και μάλιστα τα αποτελέσματα βρίσκονται σε συμφωνία μεταξύ τους.

12.4 Προσομοίωση γυψοσανίδας με PCM ενός κτιρίου, που λειτουργεί ως παθητικό σύστημα αποθήκευσης θερμότητας.[60]

Στην συγκεκριμένη μελέτη, θα παρουσιαστεί και θα συγκριθεί η απόδοση των παθητικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας σε δωμάτια που έχουν το υλικό αλλαγής φάσης είτε αναμεμιγμένο στα λοιπά κατασκευαστικά υλικά είτε τόποθετημένο ανάμεσα σε αυτά σε λεπτές στρώσεις. Το δωμάτιο που θα μελετηθεί έχει διαστάσεις 3 m x 4 m x 2.5 m ύψος και το παράθυρο στην νότια πλευρά του έχει διαστάσεις 1.5 m x 1 m. Σχηματικά παρουσιάζεται παρακάτω:



Εικόνα 54 : (α) Το δωμάτιο-μοντέλο (β)Σύστημα με PCM σε φύλλα
(γ)Σύστημα με PCM αναμεμιγμένο τυχαία σε κατασκευαστικό υλικό.

12.4.1 Θερμική προσομοίωση

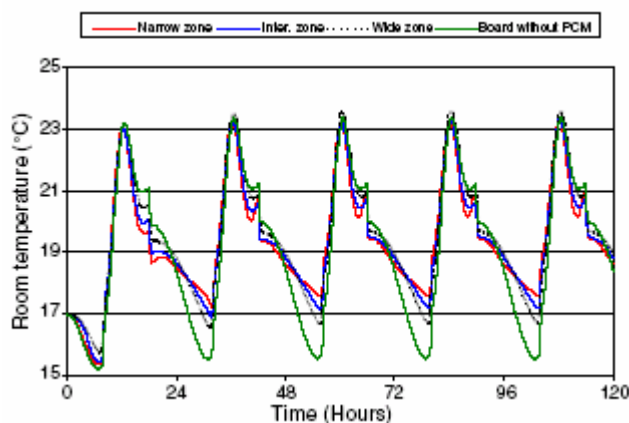
Η θερμική προσομοίωση του δωματίου έγινε αριθμητικά με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Σε αυτή την μελέτη το βήμα του πλέγματος είναι 2 mm και το χρονικό βήμα 60 sec. Οι βασικές υποθέσεις που έγιναν για την διαδικασία προσομοίωσης είναι οι ακόλουθες :

- Όλες οι θερμοφυσικές ιδιότητες, εκτός από την θερμική ικανότητα του PCM, θεωρούνται σταθερές.
- Δεν υπάρχει μεταφορά θερμότητας με συναγωγή στην υγρή φάση του PCM.
- Η μεταφορά θερμότητας από και προς το ταβάνι και το πάτωμα αμελούνται.

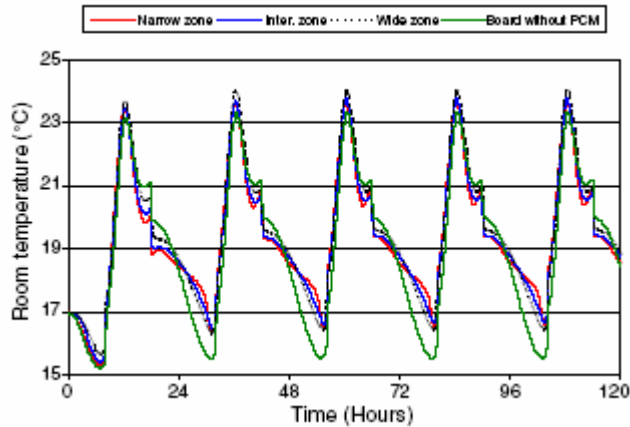
- Η θερμική ικανότητα του παραθύρου αμελείται.
- Η θερμότητα λόγω της ακτινοβολίας που προσπίπτει στην εξωτερική επιφάνεια του τοίχου επίσης αμελείται.

12.4.2 Αποτελέσματα

Εφόσον η μελέτη σχετίζεται με την δυνατότητα του PCM πάνελ να αποθηκεύει και να αποδίδει θερμότητα, η όλη ανάλυση θα επικεντρωθεί στον «παράγοντα θερμικής απόκρισης» και στον βαθμό στον οποίο οι μέγιστες και οι ελάχιστες θερμοκρασίες του δωματίου επηρεάζονται από παράγοντες όπως είναι η ζώνη αλλαγής φάσης και η δομή του υλικού αλλαγής φάσης. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται ξεκάθαρα ότι η συνολική θερμική συμπεριφορά του PCM, που είναι ενσωματωμένο υπό την μορφή του φύλλου στον τοίχο, είναι πολύ καλύτερη σε σχέση με την αντίστοιχη του PCM που έχει αναμιχθεί τυχαία με τα υπόλοιπα κατασκευαστικά υλικά κατά την διάρκεια της νύχτας. Ακόμα, μπορούσε ευκολότερα να σταθεροποιήσει την θερμοκρασία του δωματίου στις περιόδους που εμφανίζονταν τα μέγιστα φορτία.

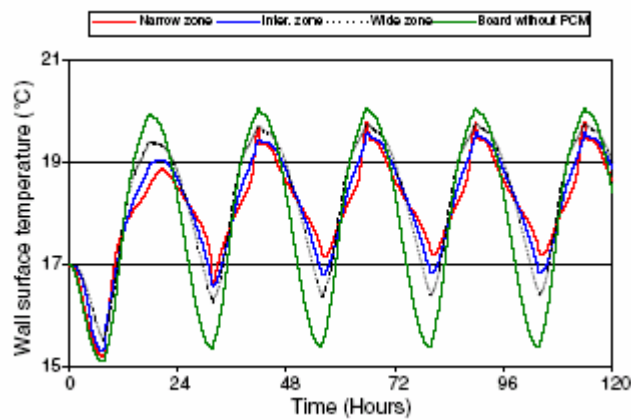


Εικόνα 55 : Οι ζώνες αλλαγής φάσης σε σχέση με την θερμοκρασία του δωματίου , για τον τοίχο με το PCM σε φύλλα.

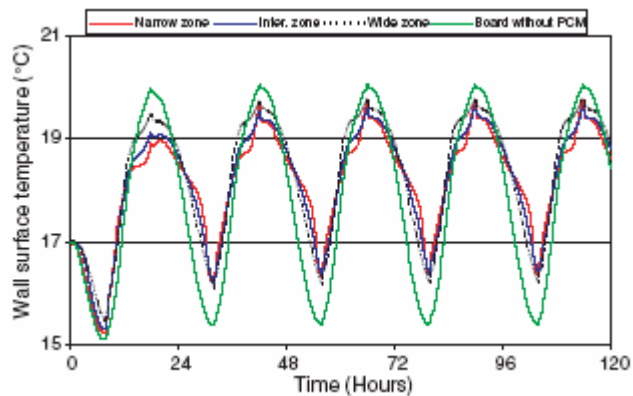


Εικόνα 56 : Οι ζώνες αλλαγής φάσης σε σχέση με την θερμοκρασία του δωματίου, για τον τοίχο με το PCM αναμεμιγμένο τυχαία με τα λοιπά κατασκευαστικά υλικά.

Όμοια είναι και η θερμική συμπεριφορά της επιφάνειας των τοίχων, όπως φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 57 : Οι ζώνες αλλαγής φάσης σε σχέση με την θερμοκρασία του δωματίου, για τον τοίχο με το PCM σε φύλλα.



Εικόνα 58 : Οι ζώνες αλλαγής φάσης σε σχέση με την θερμοκρασία του δωματίου, για τον τοίχο με το PCM αναμεμιγμένο τυχαία με τα λοιπά κατασκευαστικά υλικά.

Σε ότι αφορά στην επίδραση της ζώνης αλλαγής φάσης, βλέπουμε ότι η πιό στενή-narrow type- παρουσίασε την καλύτερη θερμική συμπεριφορά για την περίπτωση που το PCM είναι σε φύλλα, ενώ δεν παρουσιάστηκαν ιδιαίτερες διαφορές για την περίπτωση του τυχαία αναμεμιγμένου PCM στα κατασκευαστικά υλικά. Αυτό οφείλεται στο πολυδιάστατο φαινόμενο της μεταφοράς θερμότητας που παρατηρείται όταν το PCM είναι τυχαία αναμεμιγμένο στα κατασκευαστικά υλικά.

12.4.3 Συμπεράσματα

Το βασικό συμπέρασμα στο οποίο καταλήγουμε ύστερα από την παραπάνω μελέτη είναι ότι το πάνελ με το υλικό αλλαγής φάσης σε φύλλα και με την στενή ζώνη αλλαγής φάσης-narrow phase change zone-είναι πιό αποτελεσματικό στον περιορισμό της θερμοκρασίας κατά την διάρκεια της νύχτας σε ένα κτίριο με παθητικό σύστημα αποθήκευσης θερμότητας.

Άλλα συμπεράσματα είναι ότι το PCM τοποθετημένο υπό μορφή φύλλων παρουσιάζει καλύτερη θερμική συμπεριφορά από το τυχαία αναμεμιγμένο στα κατασκευαστικά υλικά, δηλαδή εκμεταλλεύεται

καλύτερα την λανθάνουσα θερμότητα που αποθηκεύει.Τέλος, το PCM τοποθετημένο υπό μορφή φύλλων αύξησε την ελάχιστη θερμοκρασία του δωματίου τη νύχτα 17 % περισσότερο από το τυχαία αναμεμιγμένο στα κατασκευαστικά υλικά.

12.5 Πειραματική μελέτη και αξιολόγηση της αποθήκευσης της λανθάνουσας μορφής θερμότητας σε πάνελ με υλικά αλλαγής φάσης

Όπως είναι γνωστό, με την αποθήκευση θερμότητας υπό λανθάνουσα μορφή μπορεί να επιτευχθεί υψηλότερη πυκνότητα ενεργειακής αποθήκευσης συγκριτικά με άλλες μεθόδους. Μια σχετικά μικρή ποσότητα υλικών που αποθηκεύουν θερμότητα υπό λανθάνουσα μορφή (LHS-latent heat storage) μπορεί να αυξήσει σημαντικά την θερμική ενέργεια. Σε σχέση με άλλες μεθόδους αποθήκευσης ενέργειας τα πλεονεκτήματα των LHS υλικών είναι ότι τόσο η αποθήκευση της θερμότητας όσο και η διανομή της προκύπτουν μέσα σε ένα στενό θερμοκρασιακό εύρος, το οποίο αντιστοιχεί στην θερμοκρασία αλλαγής φάσης και σε σημαντικά μικρότερη μεταβολή του όγκου πριν και μετά την διαδικασία αλλαγής φάσης. Έτσι, τα PCM, που αποτελούν ένα είδος LHS υλικού, λιώνουν και στερεοποιούνται σε ένα στενό θερμοκρασιακό εύρος, απορροφώντας και αποδίδοντας υψηλές τιμές θερμότητας, ιδιότητες πολύ σημαντικές για την μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας στα κτίρια.

Εξ αιτίας των παραπάνω πραγματοποιήθηκε μελέτη που αφορά στην λανθάνουσα μορφή θερμότητας που αποθηκεύεται σε πάνελ με ενσωματωμένο PCM, στα Tianjin University, Shenyang Jianzhu University και Nankai University στην Κίνα[61].

12.5.1 Λεπτομέρειες της πειραματικής διαδικασίας

Η μέτρηση της λανθάνουσας μορφής θερμότητας των πάνελ με PCM πραγματοποιήθηκε σε ένα δωμάτιο δοκιμών διαστάσεων 5m x 3.3m x 2.8m με ένα παράθυρο στον νότιο τοίχο διαστάσεων 1.5m x 1.5m και μία ξύλινη πόρτα στον βόρειο τοίχο διαστάσεων 1m x 2m. Τα πάνελ

που απάρτιζαν το παραδοσιακό δωμάτιο ήταν συνηθισμένα πάνελ από γύψο, ενώ τα πάνελ του δωματίου με PCM αποτελούνταν από γύψο εμποτισμένο με 82%CA (capric acid-18% LA (lauric acid), υλικά κατασκευασμένα από την εταιρία Shanghai Chemical Reagent Corporation, China Medicine Group. Τα δωμάτια θερμαινόταν από μία ηλεκτρική μεμβράνη 2040 W , που ήταν τοποθετημένη στο ταβάνι και πάνω από την οποία υπήρχε θερμομόνωση πάχους 40 mm. Ολόκληρο το δωμάτιο ήταν καλυμμένο με μόνωση πάχους 150 mm και ήταν εξοπλισμένο με έναν ανεμιστήρα για να αναμιγνύει τον αέρα του δωματίου και σταθεροποιεί την διανομή της θερμοκρασίας.

12.5.2 Αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας

12.5.2.1 Ανάλυση DSC

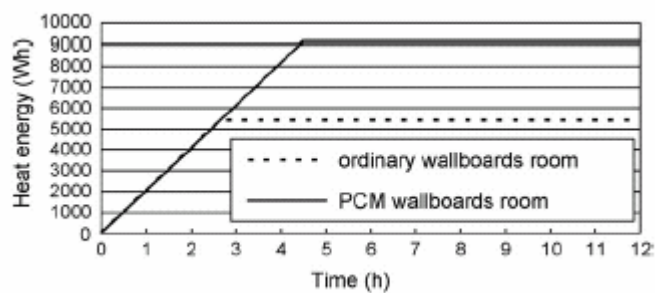
Αφού πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με την μέθοδο DSC , τα θερμικά χαρακτηριστικά τόσο του μίγματος CA-LA όσο και των πάνελ με PCM είναι τα ακόλουθα:

- Θερμοκρασία τήξης –στερεοποίησης του μίγματος CA-LA 20.394° C και 10.138 ° C αντίστοιχα
- Λανθάνουσα θερμότητα τήξης και στερεοποίησης του μίγματος CA-LA 150.305 J/g και 144.183 J/g αντίστοιχα
- Θερμοκρασία τήξης –στερεοποίησης του πάνελ με PCM 18.491° C και 18.587 ° C αντίστοιχα
- Λανθάνουσα θερμότητα τήξης και στερεοποίησης του πάνελ με PCM 39.126 J/g και 36.965 J/g αντίστοιχα

12.5.2.2 Ικάνότητα θερμικής αποθήκευσης των πάνελ με PCM

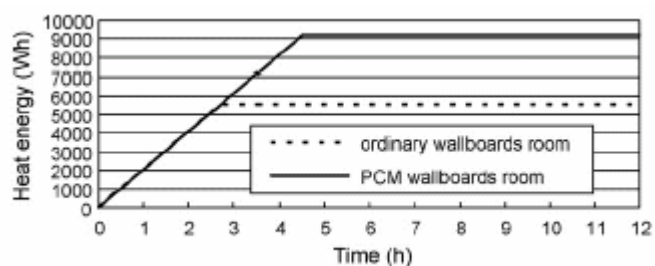
Προκειμένου να υπολογίσουμε την λανθάνουσα θερμότητα που αποθηκεύεται στα πάνελ με PCM , θεωρείται ίσο το ποσό της ενέργειας καταναλώθηκε προκειμένου να διατηρηθεί η εσωτερική θερμοκρασία σταθερή με το ποσό της θερμότητας που αποθηκεύτηκε στα πάνελ με PCM.

Επιπλέον, για λόγους ακριβείας, η θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος καθώς και οι γενικότερες κλιματολογικές συνθήκες έχουν θεωρηθεί ακριβώς οι ίδιες για όλες τις δοκιμές. Όταν και οι αρχικές εσωτερικές θερμοκρασίες και των δύο δωματίων (το ένα έχει τοίχους κατασκευασμένους από απλό πάνελ και το άλλο από πάνελ με PCM), η ηλεκτρική μεμβράνη που θερμαίνει αρχίζει να λειτουργεί στο πλήρες φορτίο της προκειμένου να αυξήσει την θερμοκρασία του δωματίου στους 24 ° C. Οι διαφορές στην θερμότητα που ουσιαστικά παρέχονται από τις ηλεκτρικές μεμβράνες αποτελούν τις τιμές της λανθάνουσας θερμότητας των πάνελ με PCM. Η θερμότητα που καταναλώθηκε σε εκάστοτε δωμάτιο κάθε ώρα παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήματα. Στα πρώτα δύο η θερμοκρασία δωματίου αυξήθηκε από τους 11 ° C στους 24 ° C, ενώ στο τρίτο από τους 12 ° C στους 24 ° C.



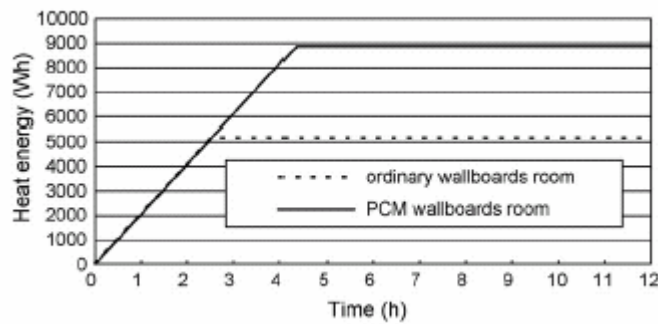
Εικόνα 59 : Καμπύλη παροχής θερμότητας για θερμοκρασία δωματίου από

11 ° C στους 24 ° C.



Εικόνα 60 : Καμπύλη παροχής θερμότητας για θερμοκρασία δωματίου από

11 ° C στους 24



Εικόνα 61 : Καμπύλη παροχής θερμότητας για θερμοκρασία δωματίου από

12 ° C στους 24 ° C.

Εξετάζοντας τα στοιχεία που μας δίνουν τα διαγράμματα, προκύπτει ότι η μέση τιμή της θερμικής ενέργειας που αποθηκεύεται σε πάνελ με PCM είναι 13.212 kJ. Ακόμα, για το δωμάτιο με το PCM χρησιμοποιήθηκαν 358 kg πάνελ με PCM, και επομένως η αποθήκευση θερμότητας ανά μονάδα μάζας προκύπτει ίση προς 36.91 kJ/kg, όταν με την μέθοδο DSC την υπολογίσαμε ίση προς 39.126 kJ/kg. Επομένως εμφανίστηκε μία πολύ μικρή απόκλιση της τάξης του 5.66%, γεγονός που αποδεικνύει ότι η μέθοδος DSC είναι πολύ απουελεσματική όταν πρόκειται για την επιλογή του PCM που θα τοποθετηθεί σε πάνελ, εφόσον υπολογίζεται με ακρίβεια η θερμική του απόδοση και προβλέπεται και αξιολογείται με ακρίβεια η δυνατότητα χρήσης τους για τον περιορισμό της κατανάλωσης ενέργειας στα κτίρια.

Κεφάλαιο 13

Εφαρμογή των PCM σε οροφή-δάπεδο

13.1 Εφαρμογή PCM σε οροφή

Εάν αναλογιστούμε την θερμική συμπεριφορά ενός κτίριου θα καταλήξουμε στο ότι η οροφή είναι ένα σημαντικά αδύναμο σημείο. Κατά τη διάρκεια της ημέρας το μεγαλύτερο ποσό της θερμότητας εισέρχεται στο κτίριο μέσω της οροφής τις ζεστές ημέρες του καλοκαιριού η θερμοκρασία κάτω ακριβώς από την οροφή αυξάνεται υπερβολικά, γεγονός που περιορίζει αρκετά την θερμική άνεση. Επιπλέον, το βράδυ ένα αρκετά μεγάλο ποσό θερμότητας που έχει αποθηκευτεί στο κτίριο κατά την διάρκεια της ημέρας χάνεται μέσω της οροφής ενώ τις κρύες χειμωνιάτικες ημέρες παρουσιάζεται σημαντικό έλλειμμα. Θερμότητα μέσω της οροφής, η οποία επηρεάζει σημαντικά τις ενεργειακές ανάγκες του κτιρίου.

Το πρόβλημα που παρουσιάζεται παραπάνω μπορεί να λυθεί με την εφαρμογή του PCM στις κατασκευές οροφών. Ύστερα από έρευνες που έγιναν από την Barbara Hildergad Pause [62], ανακαλύφθηκε ότι η ενσωμάτωση των PCM στις οροφές των κτιρίων μπορεί να βελτιώσει την θερμική τους συμπεριφορά σημαντικά, είτε πρόκειται για κατοικίσιμες είτε για βιομηχανικές εφαρμογές. Σε αυτού του είδους τις εφαρμογές το PCM θα λειτουργεί ως ρυθμιστής της θερμοκρασίας, ο οποίος θα ελέγχει την εισροή και την εκρόή της θερμότητας μέσω της οροφής του κτιρίου. Έτσι θα απορροφάει μέρος της θερμότητας που προέρχεται από την ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία, περιορίζοντας την εισροή της στο κτίριο. Ειδικά τις πολύ ζεστές καλοκαιρινές ημέρες η θερμική άνεση θα βελτιώνεται σημαντικά.

Από την άλλη, η λανθάνουσα θερμότητα που θα αποδίδει το PCM θα μπορούσε επίσης να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της ροής θερμότητας μέσω της οροφής και θα είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική τις κρύες χειμωνιάτικες νύχτες. Εν ολίγοις εφαρμόζοντας το PCM στον “φάκελο” του κτιρίου και κυρίως στην οροφή αυτού οι ενεργειακές απαιτήσεις για θέρμανση και ψύξη μειώνονται και επομένως το κτίριο γίνεται πιο αποδοτικό ενεργειακά.

Στην οροφή υπάρχουν δύο θέσεις στις οποίες μπορεί να τοποθετηθεί το υλικό αλλαγής φάσης. Εάν το τοποθετήσουμε στο πάνω μέρος της οροφής διασφαλίζουμε ότι δεν θα υπάρξει εισροή θερμότητας εξ’ αιτίας της ηλιακής ακτινοβολίας, στα υπόλοιπα υλικά κατασκευής της οροφής, όπως η θερμική μόνωση, από όπου η απομάκρυνσή της θα ήταν αρκετά δύσκολη. Έτσι, η λανθάνουσα αυτή θερμότητα θα μπορέσει να απομακρυνθεί πλήρως από το PCM κατά τη διάρκεια της νύχτας, ώστε το υλικό να είναι σε θέση να επαναφορτιστεί την επόμενη ημέρα.

Εάν το τοποθετήσουμε ακριβώς πάνω από τον τοίχο του ταβανιού, θα διασφαλίσουμε ότι η θερμοκρασία που παράγεται μέσα στο κτίριο, κάτω από την οροφή, κατά την διάρκεια της ημέρας και που συνήθως ανέρχεται στο ταβάνι, διατηρείται και είναι διαθέσιμη προς χρήση προκειμένου να περιορίσει την ροή της θερμότητας μέσω της οροφής τη νύχτα. Επιπρόσθετα, η απορρόφηση λανθάνουσας μορφής θερμότητας η οποία όμως δεν συνοδεύεται από την άνοδο της της θερμοκρασίας του ταβανιού κατά την διάρκεια της ημέρας, οδηγεί σε ελάττωση της θερμοκρασιακής διαφοράς ανάμεσα στο πάτωμα και στο ταβάνι του κτιρίου, ενισχύοντας έτσι την θερμική του άνεση. Από την άλλη πλευρά, η τοποθέτηση του PCM κάτω από το στρώμα θερμικής μόνωσης είναι πλεονεκτική αφού η λανθάνουσα θερμότητα που θα αποδίδεται από το PCM θα εισέρχεται στο μονωτικό υλικό από όπου θα χάνεται σταδιακά.

Με την τοποθέτηση του PCM και στις δύο προαναφερθείσες θέσεις έχουμε την δυνατότητα να επιτύχουμε το μέγιστο θερμικό

κέρδος.Ωστόσο, στις νότιες γεωγραφικά περιοχές και εφόσον η θερμική άνεση είναι ο βασικός σκοπός αυτής της εφαρμογής, το PCM θα πρέπει να τοποθετείται στο πάνω μέρος της οροφής, ενώ στις βόρειες γεωγραφικά περιοχές, όπου η θερμική μόνωση του κτιρίου ιδίως το χειμώνα είναι σημαντικό ζήτημα, το PCM θα πρέπει να τοποθετείται στο κάτω μέρος της οροφής.

Η απαραίτητη ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας υπό λανθάνουσα μορφή του PCM σε όποια από τις δύο θέσεις και αν αυτή τοποθετηθεί καθορίζεται από την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην οροφή, από το πόσο απορροφάται η θερμότητα από τα λοιπά μέρη της οροφής του κτιρίου και από την ροή της διαμέσου της οροφής μέσα και έξω από το κτίριο.Για παράδειγμα,για την αποτελεσματική προστασία από την θερμότητα τις ζεστές καλοκαιρινές ημέρες μπορεί να απαιτηθεί ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας υπό λανθάνουσα μορφή περίπου 360 KJ/m.sup.2.Εάν θεωρήσουμε μια μέση τιμή της ικανότητας αποθήκευσης θερμότητας υπό λανθάνουσα μορφή του PCM ίση προς 240 J/g, τότε μία ποσότητα 1,5 Kg/m.sup.2 PCM θα ήταν απαραίτητη και εάν εφαρμόσουμε περίπου 40% ενός PCM σε ένα επιλεγμένο μίγμα, τότε προκύπτει ένα συνθετικό υλικό πάχους 2mm.

Προκειμένου να αποτρέψουμε τη σημαντική απώλεια θερμότητας από την οροφή κατά την διάρκεια των κρύων χειμερινών βραδιών η ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας υπό λανθάνουσα μορφή που απαιτείται είναι περίπου 240 J/m².Χρησιμοποιώντας και πάλι ένα PCM με ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας υπό λανθάνουσα μορφή περίπου 240 J/g, οδηγούμαστε σε μία ποσότητα PCM που αντιστοιχεί σε 1 Kg/m².Εφαρμόζοντας και πάλι περίπου 40% PCM σε ένα επιλεγμένο και εύκαμπτο μίγμα προκύπτει υλικό πάχους 1,5mm.

Τέλος, αναφέρεται ότι η ετήσια ζήτηση θερμότητας ενός πρωτύπου κτιρίου υπολογίστηκε περίπου ίση προς 12.000 KWh.Με την εφαρμογή του PCM στην οροφή η ζήτηση της θερμότητας μπορεί να μειωθεί κατά 25%, δηλαδή περίπου σε 9.000 KWh.Επιπλέον, αν λάβουμε υπ' όψη και τη χρήση των συστημάτων κλιματισμού κατά τη διάρκεια των

καλοκαιρινών μηνών η συνολική εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να φτάνει και το 40%.

13.2 Εφαρμογή των PCM ταυτοχρονα σε οροφή και στο δάπεδο κτιρίων

Ο λόγος για τον οποίο πραγματοποιήθηκε αυτή η εφαρμογή είναι γιατί ως γνωστόν, η άνεση από άποψη κλίματος σε συνθήκες δωματίου, είτε πρόκειται για κατοικίσιμο είτε για βιομηχανικό κτίριο, επιτυγχάνεται διατηρώντας σταθερή τόσο την μέση θερμοκρασία δωματίου με την πάροδο του χρόνου όσο και τη διανομή της θερμοκρασίας στο δωμάτιο. Αυτή η αίσθηση της άνεσης εξαρτάται κατά πολύ από την θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στο πάτωμα και στο ταβάνι, και μάλιστα είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μικρότερη είναι η διαφορά θερμοκρασίας. Για παράδειγμα, τον χειμώνα, παρατηρείται συχνά θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στο πάτωμα και στο ταβάνι της τάξης των

5° C, η οποία όμως δημιουργεί την αίσθηση του κρύου στο κάτω μέρος του σώματός και μιά πιο θερμή αίσθηση στο πάνω μέρος του σώματος και στο κεφάλι.

Έρευνες έχουν δείξει ότι η απαραίτητη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στο πάτωμα και στο ταβάνι πρέπει να κυμαίνεται περί τους 3° C ή και λιγότερο. Μάλιστα, όταν ο άνθρωπος αισθανθεί άνετα θερμοκρασιακά σε ένα δωμάτιο, συνήθως χαμηλώνει εθελοντικά τον θερμοστάτη, πράξη που οδηγεί σε μειωμένη μέση θερμοκρασία δωματίου, και επομένως σε μειωμένη κατανάλωση ενέργειας και εξόδων.

Η διαφορά αυτή της θερμοκρασίας που περιγράφεται παραπάνω, οφείλεται στην διαφορά πυκνότητας που υπάρχει ανάμεσα στον θερμό και στον ψυχρό αέρα του δωματίου. Ο μικρότερης πυκνότητας θερμός αέρας μετακινείται προς το πάνω μέρος του δωματίου όπου και παραμένει αφήνοντας τον ψυχρό στο κοντά στο πάτωμα. Στο περελθόν έχουν χρησιμοποιηθεί πολλές μέθοδοι για την επίλυση του παραπάνω ζητήματος, όπως η θέρμανση του αέρα που βρίσκεται κοντά στο έδαφος, όμως, όπως παρουσιάζεται παρακάτω, η

χρήση PCM είναι πολλά υποσχόμενη μέθοδος για την επίλυση του προβλήματος αυτού.

Η εφαρμογή που περιγράφεται παρακάτω, ονομάζεται “Building conditioning technique using phase change materials” [63]. Η τεχνική της παρούσας εφεύρεσης για την μείωση της θερμοκρασιακής διαφοράς ανάμεσα στο πάτωμα και το ταβάνι ενός δωματίου που περιέχει πάτωμα, ταβάνι, τοίχους, τουλάχιστον μία πόρτα και ένα παράθυρο, περιλαμβάνει ένα πρώτο υλικό αλλαγής φάσης που τοποθετείται στην επιάνεια του ταβανιού και ένα δεύτερο που τοποθετείται στην επιφάνεια του πατώματος. Προκειμένου να μειωθεί η θερμοκρασιακή διαφορά αποτελεσματικά, θα πρέπει από τα δύο PCM είτε είναι τα ίδια είτε είναι διαφορετικά, το πρώτο, που τοποθετείται στο ταβάνι, να έχει θερμοκρασία τήξης μεγαλύτερη από την θερμοκρασία κρυσταλλοποίησης του δεύτερου, που τοποθετείται στο πάτωμα. Μιά επιθυμητή θερμοκρασία τήξης του πρώτου PCM είναι οι 25°C , συν ή πλην 1°C , και μία επιθυμητή θερμοκρασία κρυσταλλοποίησης του δεύτερου είναι οι 22°C , συν ή πλην 1°C .

Επιπλέον, καλύτερο θερμορυθμιστικό αποτέλεσμα επιτυγχάνεται όταν τα PCM τοποθετούνται επάνω στην επιφάνεια τόσο του πατώματος όσο και του ταβανιού, ενώ είναι προτιμότερη η κάλυψη ολόκληρων των ανωτέρω επιφανειών με PCM σε καθορισμένες ποσότητες. Εάν καλυφθούν μόνο τμήματα των παραπάνω επιφανειών με υλικό αλλαγής φάσης, θα πρέπει να μεταβληθεί η ποσότητα του PCM που τοποθετείται ώστε να επιτευχθεί το ίδιο θερμορυθμιστικό αποτέλεσμα με την περίπτωση της πλήρους κάλυψης. Ακόμα, θα μπορούσε ενδεχομένως να καλυφθεί μόνο το πάτωμα ή μόνο το ταβάνι με PCM, κάτω από καθορισμένες συνθήκες, προκειμένου να λάβουμε την θερμοκρασιακή διαφορά που επιθυμούμε.

Τέλος, αναφέρεται ο τρόπος με τον οποίο τοποθετείται το PCM στις ζητούμενες επιφάνειες. Συγκεκριμένα, για το ταβάνι προτείνεται η μικροενσωμάτωση σε κάψουλες για την διαμόρφωση καλύμματος, ενώ για το πάτωμα προτείνεται και πάλι η μικροενσωμάτωση σε κάψουλες,

αυτή την φορά για το γέμισμα των κενών αέρα που υπάρχουν στο υλικό του τελευταίου.

Κεφάλαιο 14

Έρευνες σχετικές με την εξοικονόμηση της ενέργειας που επιτυγχάνεται με την χρήση των PCM

14.1 Ενεργειακή αποδοτικότητα των τοίχων δωματίου που περιέχουν PCM, κάτω από απόλυτα ελεγχόμενες εργαστηριακές συνθήκες

14.1.1 Εισαγωγή

Όπως είναι ήδη γνωστό, ένα βασικό μειονέκτημα των ελαφριάς κατασκευής κτιρίων είναι η χαμηλή θερμική τους μάζα. Προφανώς, υπόκεινται σε μεγάλες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις εξ' αιτίας των εξωτερικών θερμικών ή ψυκτικών φορτίων. Χρησιμοποιώντας, λοιπόν, υλικά αλλαγής φάσης σε τέτοιου είδους κτίρια είναι δυνατή η μείωση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων που οφείλονται κυρίως στα φορτία της ηλιακής ακτινοβολίας.

Έτσι, τα υλικά PCM παρουσιάζουν ιδιαίτερη χρησιμότητα για τις ελαφριές κατασκευές κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Προκειμένου να αξιολογηθούν αυτά τα προτερήματα, έχουν πραγματοποιηθεί έρευνες πάνω στη θερμική συμπεριφορά των PCM χρησιμοποιώντας ένα ελεγχόμενο δωμάτιο δοκιμών, το οποίο προσομοιάζει τις θερμοκρασίες περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών καθώς και την αντίστοιχη ηλιακή ακτινοβολία [64].

14.1.2. Διεξαγωγή του πειράματος

Πιο συγκεκριμένα, το υλικό PCM που τίθεται υπό δοκιμή είναι της εταιρίας DuPont de Nemours Society και αποτελείται από 60% μικροενσωματωμένες κάψουλες PCM, με θερμοκρασία τήξης 22°C, ενώ η τελική του μορφή αποτελείται από ευέλικτα φύλλα πάχους 5mm, με πυκνότητα $\rho_{PCM}=1019 \text{ kg/m}^3$.

Η θερμική του ικανότητα μετρήθηκε με την μέθοδο DSC, και η αναλυτική της έκφραση είναι δίνεται από τις σχέσεις:

$$C = \begin{cases} 4250 + 10,750e^{-((22.6-T)/4)^2} & \text{if } T \leq 22.6^\circ\text{C} \\ 4250 + 10,750e^{-((22.6-T)/3)^2} & \text{if } T > 22.6^\circ\text{C} \end{cases} \quad (10)$$

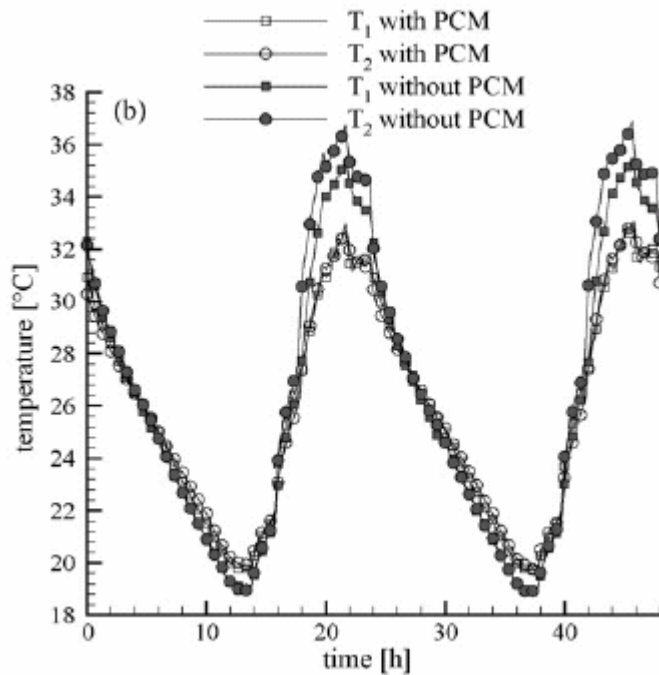
Σε ότι αφορά στην θερμική αγωγιμότητα του PCM, αυτή μετρήθηκε περίπου 0.22 W/m K και μειώνεται κατά την διάρκεια της θερμοκρασίας τήξης περίπου σε 0.18 W/m K .

Το δωμάτιο δοκιμών απομονώνεται, μέσω της νότιας γυάλινης πρόσοψής του από ένα ειδικό δωμάτιο, το λεγόμενο 'climatic chamber', το οποίο έχει ελεγχόμενη θερμοκρασία που μπορεί να κυμανθεί από τους -10°C έως τους 40°C με τη βοήθεια ενός συστήματος αέρα. Επιπλέον, διατηρούνται οι θερμοκρασίες των υπόλοιπων εξωτερικών τοίχων στην σταθερή τιμή των $20,5^\circ \text{C}$, ενώ οι 12 λάμπες των 1000 W η καθεμία, προσομοιάζουν την ηλιακή ακτινοβολία, που εισέρχεται στο υπό δοκιμή δωμάτιο μέσω του γυάλινου τοίχου. Έτσι, είναι δυνατός ο δυναμικός έλεγχος της θερμοκρασίας του 'climatic chamber' καθώς και του επιπέδου της εισροής της ακτινοβολίας μέσω του αριθμού των αναμένων λαμπτήρων. Τέλος, αναφέρεται μία ακόμη φορά ότι η μελέτη γίνεται για τους καλοκαιρινούς μήνες, οπότε η θερμοκρασία του 'climatic chamber' κυμαίνεται μεταξύ 15°C και 30°C .

14.1.3 Πειραματικά αποτελέσματα

14.1.3.1 Μετρήσεις σε δύο διαφορετικά ύψη

Από τις μετρήσεις που προκύπτουν σε δύο διαφορετικά ύψη στο μέσο του δωματίου, όπως φαίνεται και από τα σχήματα που παρουσιάζονται παρακάτω, η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα για την περίπτωση χωρίς PCM ποικίλλει από τους 36°C στους $18,9^\circ \text{C}$, ενώ για την περίπτωση με PCM ποικίλλει από τους $32,8^\circ \text{C}$ στους $19,8^\circ \text{C}$. Προκύπτει, επομένως, ότι η εφαρμογή του PCM στους τοίχους μείωσε τη διακύμανση της θερμοκρασίας κατά 4.7°C .

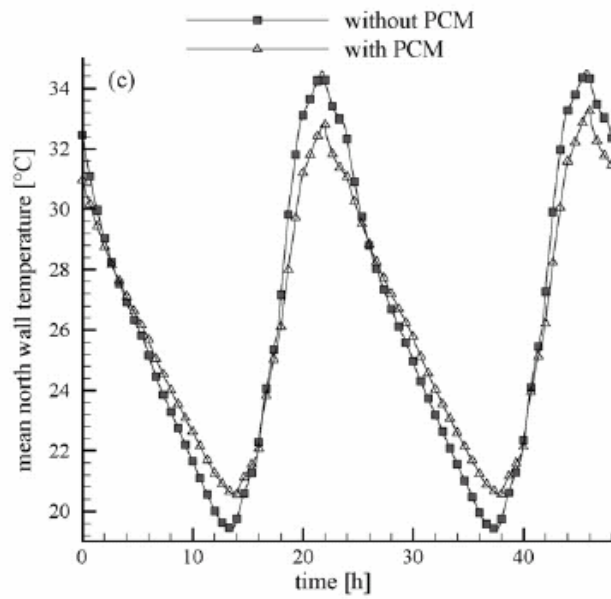
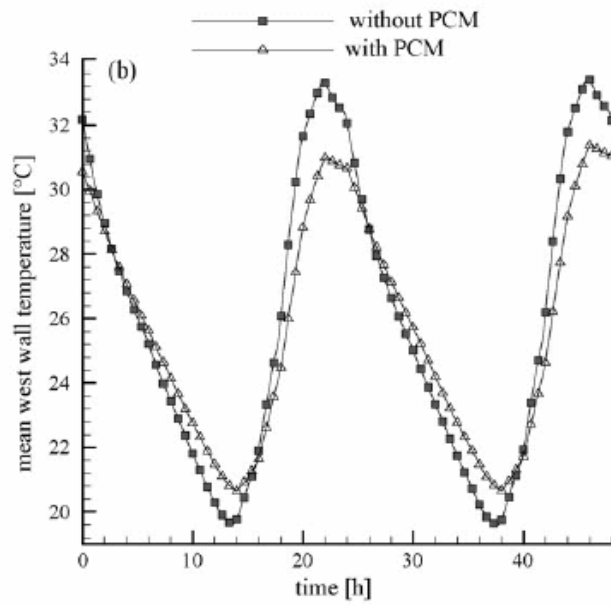
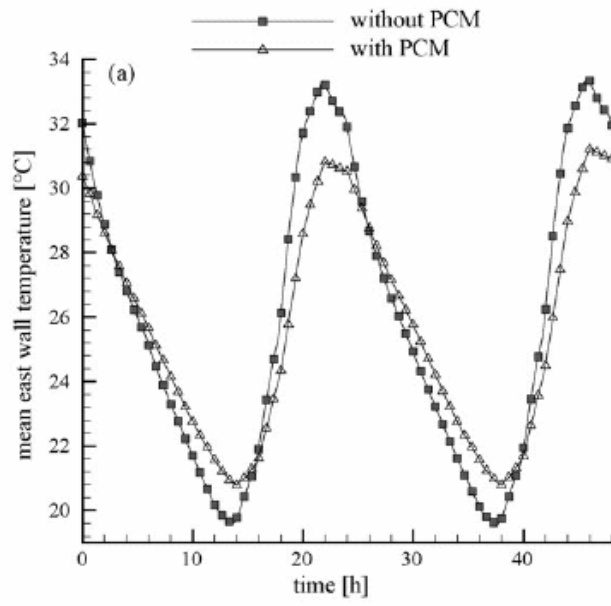


Εικόνα 62 : Η κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας σε δύο διαφορετικά ύψη του δωματίου T₁ και T₂ με και χωρίς PCM .

Επεξεργαζόμενοι το παραπάνω σχήμα, οδηγούμαστε σε μία εξαιρετικά ενδιαφέρουσα παρατήρηση , που αφορά στις θερμοκρασιακές διαφορές T₁ και T₂. Μιά διαφορά της τάξης του 1°C εμφανίζεται ανάμεσα στα θερμοκρασιακά μέγιστα, στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιείται PCM, η οποία δεν εμφανίζεται καθόλου όταν το τελευταίο χρησιμοποιείται. Αυτό οφείλεται κυρίως στις επιπτώσεις της πιο έντονης κίνησης των αέριων μαζών εξ αιτίας της διαφοράς των θερμοκρασιών στους τοίχους με PCM. Το φαινόμενο αυτό, βελτιώνει την θερμική άνεση, αποφεύγοντας την θερμοκρασιακή κατανομή κατά ζώνες, και ήταν η πρώτη φορά που παρατηρήθηκε.

14.1.3.2 Θερμοκρασιακές μεταβολές στο εσωτερικό μέρος των τοίχων

Οι μεταβολές της θερμοκρασίας στο εσωτερικό των επιφανειών των τοίχων, πλην του νότιου που είναι γυάλινος όπως έχει ήδη αναφερθεί, για την περίπτωση με και χωρίς PCM παρουσιάζονται παρακάτω.



Εικόνα 63 : (α) Κατανομή των θερμοκρασιών στον ανατολικό τοίχο

(b) Κατανομή των θερμοκρασιών στον δυτικό τοίχο

(c) Κατανομή των θερμοκρασιών στον βόρειο τοίχο

Όπως αναμαίνεται, οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις είναι χαμηλότερες για την περίπτωση χρήσης τοίχου με PCM συγκριτικά με αυτές των συνιθισμένων τοίχων. Επιπλέον, σημαντική είναι η ομοιότητα στις θερμοκρασίες που αναπτύχθηκαν στον ανατολικό και στον δυτικό τοίχο, ενώ έμφαση θα πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι οι καμπύλες με και χωρίς PCM παρουσιάζουν μια διαφορά φάσης της τάξης των 40 λεπτών. Θα μπορούσαμε να υποστηρίξουμε ότι κατά κάποιο τρόπο τα υλικά αλλαγής φάσης προσθέτουν αδράνεια στον τοίχο.

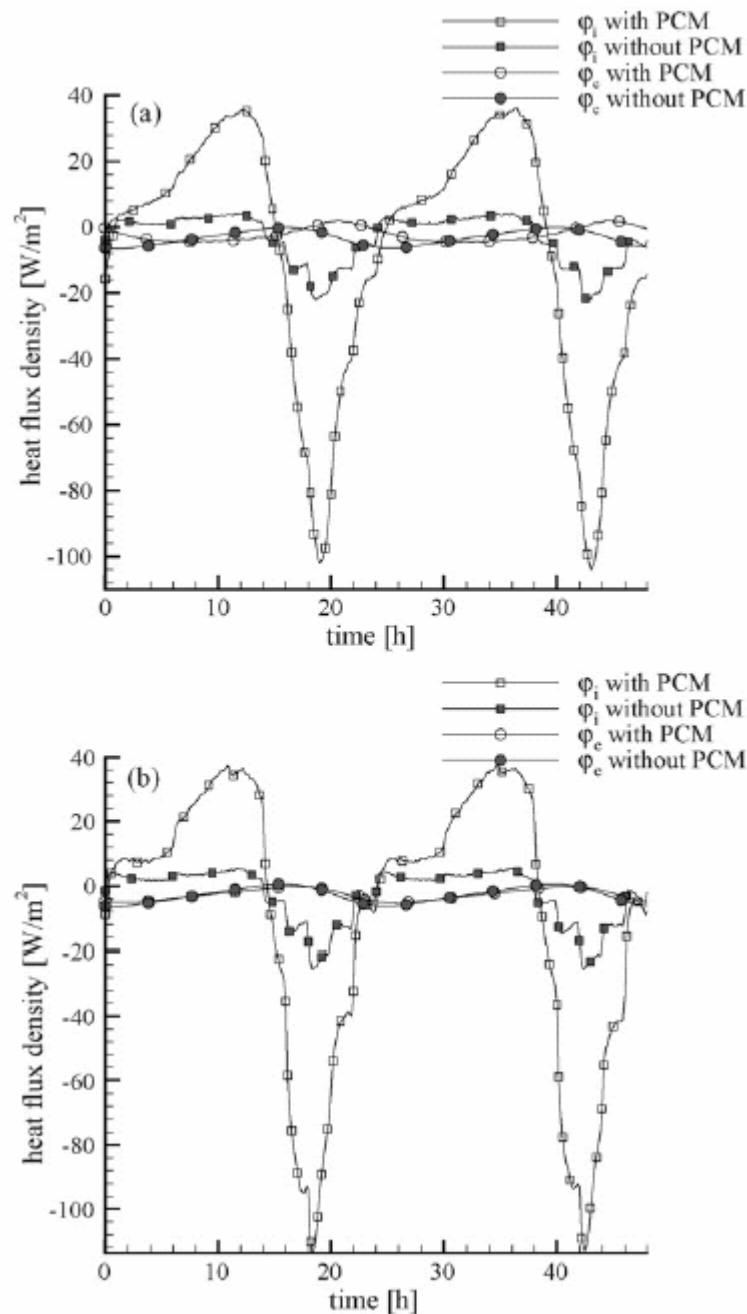
Παρατηρώντας τις παραπάνω καμπύλες για τον ανατολικό και τον δυτικό τοίχο, το υλικό αλλαγής φάσης προκαλεί μία μείωση στις μεταβολές της θερμοκρασίας της τάξης των 3.5 °C. Για τον νότιο τοίχο, η μείωση της θερμοκρασίας είναι της τάξης των 2.8 °C, τιμή πολύ χαμηλότερη συγκριτικά με τις προηγούμενες εξ 'αίτιας της ηλιακής ακτινοβολίας που είναι αυξημένη.

14.1.3.3 Πυκνότητα της ροής θερμότητας

Σε αυτό το σημείο θα αναφερθούμε εκτενέστερα στην ανάλυση της πυκνότητας της ροής θερμότητας ενός τοίχου, όπου με ϕ_e συμβολίζεται η εξωτερική ροή θερμότητας, που είναι θετική όταν διαπερνάει το πάνελ, και ϕ_i συμβολίζεται η εσωτερική ροή θερμότητας, η οποία είναι θετική όταν εγκαταλείπει το πάνελ από την εσωτερική του πλευρά.

Στα διαγράμματα που παρουσιάζονται παρακάτω, δίδονται οι πυκνότητες της εσωτερικής και της εξωτερικής ροής θερμότητας τόσο για τον «ανατολικό-δυτικό» τοίχο, οι οποίοι αποτελούν μια κατηγορία λόγω των όμοιοτήτων στα αποτελέσματά τους, όσο και για τον νότιο τοίχο. Για τις περιπτώσεις με και χωρίς PCM, η μέγιστη διακύμανση για το ϕ_e είναι περίπου 6 W/m² χωρίς και 7 W/m² με PCM. Οι μικρότερες και οι μεγαλύτερες τιμές για την εξωτερική ροή θερμότητας, που λαμβάνουν τις τιμές -6.5 και -0.2 αντίστοιχα χωρίς PCM και 2.0 και -4.5 με

PCM, είναι αρκετά χαμηλές λόγω του μονωτικού υλικού που χρησιμοποιήθηκε. Επιπλέον, αναφέρεται ότι οι καμπύλες που αναφέρονται στην πυκνότητα της εξωτερικής ροής θερμότητας με και χωρίς PCM παρουσιάζουν μια διαφορά φάσης της τάξης των 6 ωρών.



Εικόνα 64 : Πυκνότητα ροής θερμότητας για α. για τον «ανατολικό-δυτικό» τοίχο και β. για τον νότιο τοίχο

Όμως, και το φαινόμενο της αποθήκευσης-αποδέσμευσης της θερμότητας από το PCM είναι εμφανές, εάν παρατηρήσουμε την μεταβολή του ϕ . Για την περίπτωση με PCM οι διακυμάνσεις κυμαίνονται ανάμεσα σε 36 W/m^2 και -103 W/m^2 , όταν στον παραδισιακό τοίχο οι τιμές αυτές είναι 4 W/m^2 και -22 W/m^2 . Η θερμότητα εισχωρεί στο πάνελ όταν η πυκνότητα της ροής ακτινοβολίας είναι η μέγιστη και απομακρύνεται από αυτήν όταν η θερμοκρασία λαμβάνει την μικρότερη τιμή της, δηλαδή όταν όλες οι λάμπες είναι κλειστές.

14.1.3.4 Μελέτη της ενέργειας που αποθηκεύεται και αποδεσμεύεται

Όπως φαίνεται και από τα σχήματα, η συμπεριφορά και των τριών τοίχων που μελετώνται (ανατολικός, δυτικός και νότιος) είναι όμοια, οπότε εδώ θα δωθούν κάποιες πληροφορίες μόνο για τον ανατολικό τοίχο.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η αποθήκευση-αποδέσμευση της πυκνότητας της ροής θερμότητας ϕ σε ολόκληρο τον τοίχο, η οποία παίρνει θετικές τιμές όταν η ενέργεια αποθηκεύεται. Θεωρώντας τ^+ το χρονικό διάστημα κατά το οποίο ενέργεια αποθηκεύεται και τ^- το χρονικό διάστημα κατά το οποίο ενέργεια αποδεσμεύεται, τότε το σύνολο της ενέργειας που αποθηκεύεται είναι:

$$E_{st} = \int_{\tau^+} \phi dt$$

(11)

Και το σύνολο της ενέργειας που αποβάλλεται :

$$E_{des} = \int_{\tau^-} \phi dt$$

(12)

Τα αποτελέσματα της έρευνας αυτής συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5:

Stocked–destocked energy analysis

	τ^+ (h)	τ^- (h)	E_{st} (kJ/m ²)	E_{des} (kJ/m ²)
Without PCM	8.3	15.7	313.9	-315.0
With PCM	9	15	663.5	-670.4

Από εδώ βλέπουμε ότι η ενέργεια που αποθηκεύεται σε τοίχο με PCM είναι περίπου διπλάσια αυτής που αποθηκεύεται σε συνιθισμένο τοίχο. Το θερμικό κέρδος είναι περίπου 352 kJ/m² ανά τοίχο, που σημαίνει ότι η συνολική αποθηκευμένη ενέργεια και από τους τρεις τοίχους είναι 8.2 MJ.

14.1.4 Επίλογος

Τελειώνοντας αυτό το κεφάλαιο, καταλήγουμε στο ότι η ενσωμάτωση PCM σε πάνελ μειώνει τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις ενός δωματίου, ότι το φαινόμενο της υπερθέρμανσης είναι ηπιότερο με χρήση του υλικού αλλαγής φάσης και ότι η αρχικά αποθηκευμένη ενέργεια αποδεσμεύεται για να θερμάνει το δωμάτιο όταν η θερμοκρασία αυτού είναι η ελάχιστη. Επιπλέον, τα 5mm του PCM που χρησιμοποιήθηκαν στην ελαφριά κατασκευή, ενίσχυσαν την θερμική αδράνεια του δωματίου και πιο συγκεκριμένα, η διαθέσιμη προς αποθήκευση ενέργεια είναι σχεδόν η διπλάσια με το PCM, τιμή που θα αντιστοιχούσε σε στρώση τσιμέντου πάχους 8cm.

14.2 Εφαρμογή ενός επικυρωμένου αριθμητικού μοντέλου για την πρόβλεψη της κατανάλωσης ενέργειας από την χρήση υλικών αλλαγής φάσης στα κατασκευαστικά υλικά του κτιρίου.

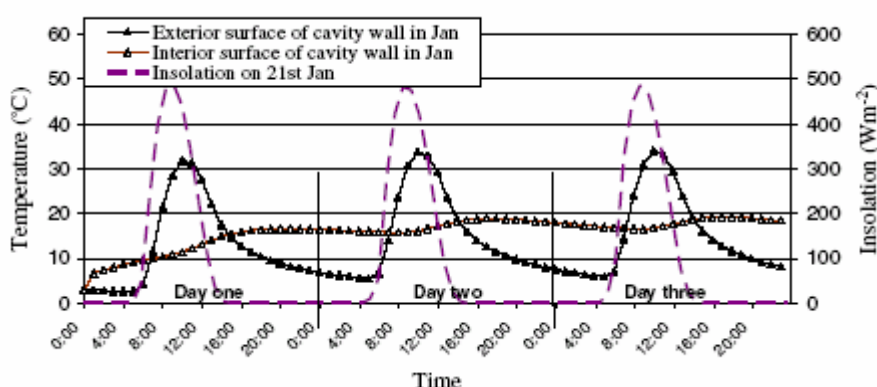
Τα τρία πιο σημαντικά θερμικά χαρακτηριστικά ενός τοίχου είναι η θερμική του ικανότητα, η θερμική του αγωγιμότητα, η θέση της μόνωσης και οι στρώσεις των κατασκευαστικών υλικών στον τοίχο. Αυτά, μαζί με κάποια άλλα χαρακτηρίζουν το εκάστοτε κτίριο επηρεάζοντας τα θερμικά-ψυκτικά του φορτία καθώς και τις

Θερμοκρασίες των επιφανειών του. Στην μελέτη που θα παρουσιαστεί στο κεφάλαιο αυτό [65], στους τοίχους των κτιρίων προστίθενται δύο τύποι PCM που είναι διαθέσιμοι στο εμπόριο σε διαφορετικές θερμοκρασίες τήξης. Επιπλέον, εξετάζονται και οι διαφορετικές θέσεις στις οποίες τοποθετείται το PCM για ρεαλιστικά θερμοκρασιακά όρια τόσο το χειμώνα όσο και το καλοκαίρι, η μεταφορά θερμότητας καθώς και η διανομή της θερμοκρασίας.

14.2.1 Παραμετρική ανάλυση

Προκειμένου να αξιολογήσουμε την συμπεριφορά ενός κτιρίου, έγιναν προβλέψεις για τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο εσωτερικό ενός τοίχου που περιέχει ένα διάκενο, χωρίς PCM ώστε να το χρησιμοποιήσουμε ως βάση δεδομένων για περαιτέρω σύγκριση. Το πάχος του τοίχου είναι 0.250 m, με 0.110 m τούβλο, 0.100 m τσιμέντο, 0.010 m γύψο και 0.030 m διάκενο.

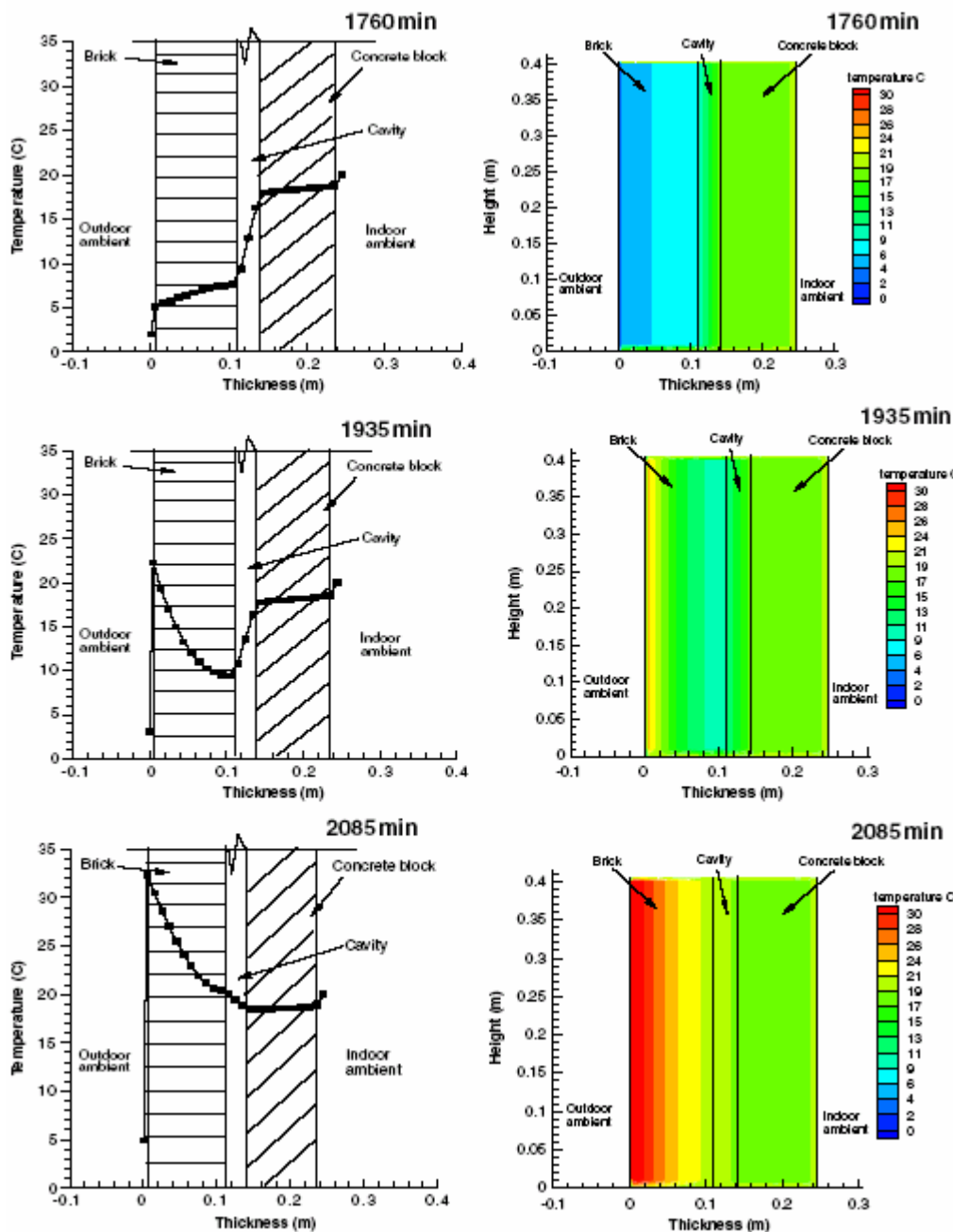
Στο διάγραμμα που παρουσιάζεται παρακάτω δίδονται οι προβλεπόμενες θερμοκρασίες για την εσωτερική και την εξωτερική επιφάνεια ενός τοίχου με διάκενο στην Βρετανία την 21 Ιανουαρίου, ύστερα από τριήμερη προσομοίωση.



Εικόνα 65: Προβλεπόμενες θερμοκρασίες της εσωτερικής και της εξωτερικής επιφάνειας ενός τοίχου με διάκενο την 21 Ιανουαρίου στην Βρετανία, ύστερα από τριήμερη προσομοίωση.

Τα προβλεπόμενα αποτελέσματα δείχνουν ότι μετά την πρώτη μέρα, οι θερμοκρασίες επαναλαμβάνονται. Η ηλιακή ακτινοβολία που απορροφήθηκε από την μπροστινή πρόσοψη του τοίχου, ο οποίος περιείχε τούβλα, μεταδόθηκε με αγωγή μέσω αυτού του τοίχου και αύξησε την θερμοκρασία της εσωτερικής του επιφάνειας. Η απορροφώμενη ηλιακή ενέργεια παραμένει αποθηκευμένη στους τοίχους όσο η θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος είναι υψηλή και αποδίδεται σταδιακά κατά την διάρκεια της νύχτας. Το διάκενο αποτελεί μια πολύ καλή θερμική αντίσταση ανάμεσα στο εσωτερικό και στο εξωτερικό κομμάτι του τοίχου. Η θερμοκρασία στην εσωτερική επιφάνεια του εσωτερικού τοίχου έχει μικρότερες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις συγκριτικά με αυτές της εξωτερικής επιφάνειας του εξωτερικού τοίχου. Καθώς περνάει η ώρα, θερμότητα μεταφέρεται μέσω του διακένου στο τσιμεντένιο κομμάτι του τοίχου και στη συνέχεια μεταφέρεται στο δωμάτιο. Επιπλέον, είναι γεγονός ότι οι εσωτερική και η εξωτερική θερμοκρασία του τοίχου επηρεάζονται πολύ περισσότερο από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας παρά από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος, γι' αυτό και όταν πέφτει ο ήλιος η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του τοίχου μειώνεται με ταχύ ρυθμό. Η εξωτερική θερμοκρασία του τοίχου με διάκενο ακολουθεί την ίδια κατανομή με αυτή που προκαλεί η ηλιοφάνεια, με μια χρονική υστέρηση 20 λεπτών.

Οι διακυμάνσεις στη θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας είναι αναμενόμενες λαμβάνοντας υπ όψη την θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας του τοίχου με διάκενο, όμως και εδώ παρουσιάζεται χρονική υστέρηση 2 ωρών. Ακόμα, για θερμοκρασία δωματίου 20 °C και υγρασία 70%, εμφανίζεται η πιθανότητα υγραποίησης όταν η εσωτερική θερμοκρασία του τοίχου πέφτει κάτω από τους 14.5 °C, περίπτωση που δεν μας απασχολεί στην παρούσα έρευνα αφού, σύμφωνα με το διάγραμμα, η εσωτερική θερμοκρασία του τοίχου είναι μεγαλύτερη από 14.5°C.

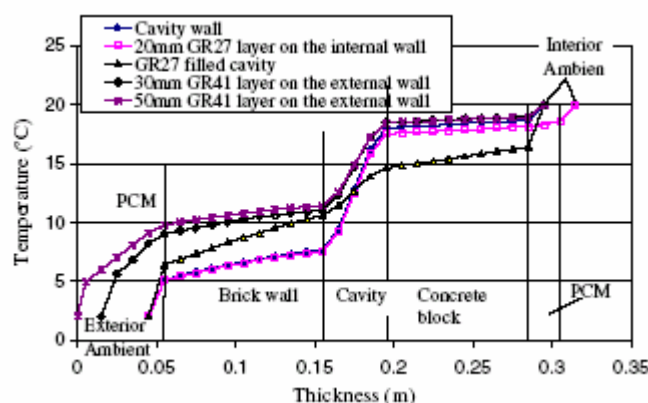


Εικόνα 66 : Προβλεπόμενες κατανομές θερμοκρασίας σε ένα τοίχο με διάκενο

Η παραπάνω εικόνα παρουσιάζει την προβλεπόμενη κατανομή θερμοκρασίας ενός τοίχου με διάκενο όπως προέκυψε από προσομοίωση τριών ημερών με χρήση στοιχείων για τον καιρό της Βρετανίας για την 21 Ιανουαρίου σε 1760, 1985 και 2080 λεπτά, που αντιστοιχούν στην χαμηλότερη, σε μία μέτρια και στην υψηλότερη θερμοκρασία που αναπτύσσεται. Μπορούμε να δούμε ότι η εξωτερική επιφάνεια του τοίχου με διάκενο ανταποκρίνεται έντονα στην έκθεση

στον ήλιο και στην θερμοκρασία του περιβάλλοντος και επομένως οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις του εξωτερικού τοίχου είναι μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές της εσωτερικής επιφάνειας του τοίχου. Η ύπαρξη του διακένου μειώνει την μεταφορά της θερμότητας ανάμεσα στα δύο μέρη του τοίχου, ενώ οι επιφανειακές διαφορές θερμοκρασίας και η θερμοκρασιακή κλίση στο εσωτερικό του τοίχου είναι υπεύθυνες για την μεταφορά θερμότητας με αγωγή και για την αύξηση του ρυθμού της.

Προκειμένου να εξετάσουμε την επίδραση της θέσης και του τύπου του PCM στην μεταφορά της θερμότητας σε προσομοιωμένο με PCM τοίχο, έχουν προσομοιωθεί τα προφίλ των θερμοκρασιών του τοίχου αυτού, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



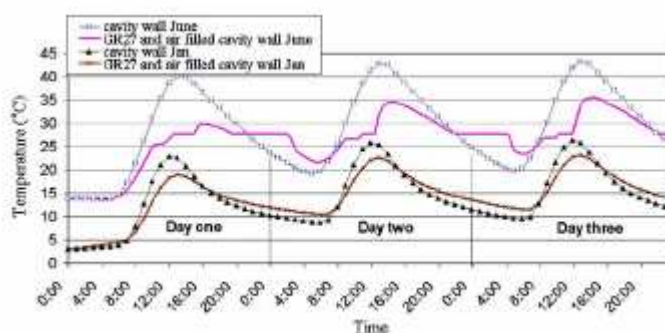
Εικόνα 67 : Θερμοκρασιακό προφίλ τοίχου με PCM μετά από 1760 min.

Συγκεκριμένα, βλέπουμε μια σύγκριση ανάμεσα στα προβλεπόμενα θερμοκρασιακά προφίλ σε συνάρτηση με το πάχος τοίχου, όταν χρησιμοποιούνται δύο ειδών PCM, το GR27 και το GR41, τα οποία τοποθετούνται σε διάφορες θέσεις μέσα στον τοίχο για 1760min, οπότε η εξωτερική θερμοκρασία του τοίχου λαμβάνει την χαμηλότερη τιμή της.

Παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία στις δύο επιφάνειες του διακένου, για την περίπτωση χωρίς PCM είναι 7.5 και 18, ενώ τα φαινόμενα της συναγωγής και της συμπύκνωσης είναι πιθανό να εμφανιστούν. Με την προσθήκη του PCM GR41 στην εξωτερική επιφάνεια του τοίχου, η θερμοκρασιακή διαφορά μέσα στο διάκενο μειώνεται. Η θερμοκρασία που χάθηκε από το εσωτερικό προς το

εξωτερικό για την περίπτωση GR27 filled cavity είναι η μέγιστη, αυτό άλλωστε είναι εμφανές από την ελάχιστη προβλεπόμενη θερμοκρασία εσωτερικής επιφάνειας και την μέγιστη θερμοκρασία εξωτερικής επιφάνειας, επομένως η θερμοκρασιακή διαφορά κατά μήκος του διακένου είναι η μικρότερη. Επιπλέον, μόνωση της εξωτερικής επιφάνειας του τούχου με GR41 πάχους 30mm και 50mm μπορεί να περιορίσει αρκετά την μείωση της θερμοκρασίας στην εσωτερική επιφάνεια της εξωτερικής πλευράς του διακένου. Ακόμα, δεν παρατηρείται μεταβολή στην θερμοκρασία κατά μήκος του τσιμέντου ή του τούβλου για καμία από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις και η τοποθέτηση του PCM στην εσωτερική επιφάνεια του τοίχου αν και μπορεί να μειώσει την θερμότητα που χάνεται από το εσωτερικό προς το εξωτερικό του δωματίου, δεν επηρεάζει ιδιαίτερα τη θερμοκρασία μέσα στο διάκενο.

Τελευταίο διάγραμμα της έρευνας αυτής αποτελεί το επόμενο, το οποίο παρουσιάζει τις προβλεπόμενες θερμοκρασίες για τοίχο προσυζητημένο με 20 mm GR27, για τις καιρικές συνθήκες της 21 Ιανουαρίου και 21 Ιουνίου στην Βρετανία.



Εικόνα 68 : Προβλεπόμενες θερμοκρασίες για τοίχο με 20 mm GR27, για τις καιρικές συνθήκες της 21 Ιανουαρίου και 21 Ιουνίου στην Βρετανία.

Όπως φαίνεται, το καλοκαίρι, η προσθήκη του PCM μειώνει σημαντικά τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες αλλαγής φάσης, ενώ και τον χειμώνα μειώνει τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις πιο αποτελεσματικά από έναν απλό τοίχο με διάκενο χάρη στην αυξημένη θερμική μάζα. Παρ' όλα αυτά, η

επίδραση του υλικού αλλαγής φάσης στον έλεγχο της θερμοκρασίας της εσωτερικής επιφάνειας του εξωτερικού τοίχου μειώνεται κατά την διάρκεια της δεύτερης και της τρίτης ημέρας κυρίως λόγω της αλλαγής στο ποσό της αισθητής θερμότητας που αποθηκεύεται στο PCM. Στο τέλος της δεύτερης και της τρίτης ημέρας η θερμοκρασία πέφτει κάτω από την θερμοκρασία αλλαγής φάσης υποδηλώνοντας την αποβολή λανθάνουσας θερμότητας.

Τέλος, αναφέρεται γενικότερα ότι η συγκριτική ανάλυση των διαφόρων τύπων τοίχου με διάκενο αποδεικνύει τα προτερήματα της χρήσης λανθάνουσας μορφής θερμότητας και των χαμηλών θερμοκρασιών για τα παθητικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας στα κτίρια.

14.3 Αναλυτική βελτιστοποίηση του εσωτερικού ενός δωματίου ελαφράς κατασκευής για παθητικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με σκοπό την εξοικονόμηση αυτής.[66]

14.3.1 Βασικές αρχές της διαδικασίας βελτιστοποίησης

Προκειμένου να απλοποιηθεί η παραπάνω μελέτη χρησιμοποιήθηκε ένα ιδανικό δωμάτιο ελαφράς κατασκευής, που αποτελεί παθητικό σύστημα αποθήκευσης της ενέργειας, και το οποίο υπόκειται σε περιοδικές αλλαγές των κλιματικών του συνθηκών. Οι παραδοχές που έγιναν είναι οι εξής:

1. Η ικανότητα αποθήκευσης αισθητής μορφής θερμότητας από το ελαφράς κατασκευής κτίριο θεωρείται αμελητέα.
2. Χρησιμοποιείται ένας συντελεστής h_{in} , ο οποίος αντιπροσωπεύει την μεταφορά θερμότητας τόσο μέσω ακτινοβολίας όσο και μέσω συναγωγής ανάμεσα στους τοίχους και στο περιβάλλον.

3. Τα ιδανικά πάνελ με PCM έχουν επαρκή ικανότητα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας σε μία καθορισμένη θερμοκρασία αλλαγής φάσης T_m .
4. Η εσωτερική κατανομή της θερμοκρασίας θεωρείται ομοιόμορφη, καθώς η θερμική αντίσταση στην επιφάνεια είναι αρκετά μεγάλη σε σχέση με την αντίσταση της συναγωγής του πάνελ με PCM.
5. Η επιφάνεια του πάνελ με PCM όταν δεν βρίσκεται τοποθετημένη στο δωμάτιο θεωρείται μονωμένη.

14.3.2 Βελτιστοποίηση της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης

Η βέλτιστη θερμοκρασία αλλαγής φάσης λαμβάνεται από την εξίσωση:

$$T_{m,i} = \bar{T}_a + \frac{\int_P (Q_{r,i} + Q_{r,in,i}) d\tau}{h_{in} \cdot P \cdot A_i}$$

(13)

Από όσο βλέπουμε, η βέλτιστη θερμοκρασία αλλαγής φάσης δεν εξαρτάται μόνο από την μέση θερμοκρασία του δωματίου αλλά και από την απορροφώμενη ακτινοβολία. Σε περίπτωση που αυτή είναι μηδέν, η βέλτιστη θερμοκρασία αλλαγής φάσης ισούται με την μέση θερμοκρασία του δωματίου.

14.3.3 Εκτίμηση της μέσης θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα

Η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα δίνεται προσεγγιστικά από τον τύπο :

$$T_a = \bar{T}_o + T_q + \frac{UA_o + G\rho_{air}c_{p,a}}{\rho_{air}c_{p,a}V_a} \int f(w\tau) \cdot e^{B\tau} d\tau \quad (14)$$

Για το δεξί μέλος της εξίσωσης, ο πρώτος όρος παριστάνει την μέση εξωτερική θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα και ο δεύτερος παριστάνει την σταθερή μεταβολή της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα λόγω της μεταδιδόμενης ηλιακής ενέργειας και των εσωτερικών πηγών ενέργειας.

Η μέση θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα, λόγω της παραπάνω εξίσωσης, γράφεται:

$$\bar{T}_a = \bar{T}_o + T_q \quad (15)$$

Από αυτή την εξίσωση βλέπουμε ότι η ικανότητα αποθήκευσης λανθάνουσας μορφής θερμότητας δεν μεταβάλλει την μέση θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα για δεδομένες τιμές των U και G .

14.3.4 Εκτίμηση της διακύμανσης της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα

Θεωρώντας ότι η εξωτερική θερμοκρασία μπορεί να εκφραστεί μέσω της σειράς Fourier από την έκφραση:

$$T_o = \bar{T}_o + \Delta T_o \sin(\omega\tau + \beta)$$

(16)

Η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα, που έχει ήδη δοθεί υπό μορφή εξίσωσης, θα γίνει:

$$T_a = \bar{T}_o + T_q + \frac{(UA_o + G\rho_{\text{air}}c_{p,a}) \cdot \Delta T_o}{\sqrt{(UA_o + G\rho_{\text{air}}c_{p,a} + h_{\text{in}}A)^2 + (\rho_{\text{air}}c_{p,a}V_a\omega)^2}} \times \sin(\omega\tau + \beta)$$

(17)

Ο τελευταίος όρος της εξίσωσης αυτής είναι περιοδικός, με πλάτος που εξαρτάται από το πλάτος της διακύμανσης της εξωτερικής θερμοκρασίας ΔT_o , από το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στην επιφάνεια του πάνελ και από το εμβαδό της επιφάνειας του πάνελ. Το πλάτος της διακύμανσης της εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα μειώνεται με την αύξηση του γινομένου $h_{\text{in}}A$ και πλησιάζει την τιμή μηδέν καθώς το $h_{\text{in}}A$ τρένει στο άπειρο.

14.3.5 Βελτιστοποίηση της ικανότητας αποθήκευσης λανθάνουσας μορφής θερμότητας

Σύμφωνα με την υπόθεση, που έχει ήδη αναφερθεί, σχετικά με την επαρκή ικανότητα αποθήκευσης λανθάνουσας μορφής θερμότητας, το

πάνελ που περιέχει PCM μπορεί να απορροφήσει όλη την ενέργεια από ακτινοβολία που προσπίπτει σε συτό και ακόμα θα μπορεί να απορροφάει ενέργεια πάντα όταν η θερμοκρασία του δωματίου ξεπερνάει την τιμή T_m . Επιπλέον, μέρος ή και ολόκληρη η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να απορριφθεί από τα πάνελ, όσο η εσωτερική θερμοκρασία του αέρα έχει τιμές μικρότερες της T_m . Η ενέργεια που αποθηκεύεται σε ένα κύκλο δίνεται από την εξίσωση:

$$E_{\text{storage}} = h_{\text{in}} A \int_P (T_a - T_m)^+ d\tau + \int_P (Q_r + Q_{r,\text{in}}) d\tau \quad T_a > T_m$$

(18)

Και η ενέργεια που αποδίδεται σε έναν κύκλο είναι :

$$E_{\text{release}} = h_{\text{in}} A \int_P (T_m - T_a)^+ d\tau \quad T_m > T_a$$

(19)

Για την βέλτιστη θερμοκρασία αλλαγής φάσης, η οποία δίδεται από την σχέση :

$$T_m = \bar{T}_a + \frac{\int_P (Q_r + Q_{r,\text{in}}) d\tau}{h_{\text{in}} \cdot P \cdot A}$$

(20)

Θεωρούμε ότι η ενθαλπία των πάνελ με PCM δεν μεταβάλλεται ύστερα από έναν κύκλο, ώστε η αποθηκευμένη και η αποδιδόμενη ενέργεια που αποθηκεύονται και αποδίδονται σε έναν κύκλο να είναι ίσες. Έτσι, η βέλτιστη τιμή της ικανότητας αποθήκευσης λανθάνουσας μορφής θερμότητας, προκειμένου να ολοκληρωθεί ένας κύκλος είναι

$$E_{\text{PCM}} = E_{\text{storage}} = E_{\text{release}}$$

(21)

14.3.6. Εφαρμογή και συμπεράσματα

Οι παραπάνω εξισώσεις εφαρμόστηκαν σε ένα κτίριο ελαφριάς κατασκευής, το οποίο βρίσκεται στο Πεκίνο, για μία τυπική ημέρα του Ιανουαρίου. Μόνο ο νότιος τοίχος του είναι εκτεθειμένος σε ηλιακή

ακτινοβολία, ενώ το δωμάτιο έχει διαστάσεις 4 m (μήκος) x 5 m (πλάτος) x 2.8 m (ύψος).

Από την παραπάνω αναλυτική μελέτη καταλήξαμε στην:

- Δημιουργία μιάς εξίσωσης για την βέλτιστη θερμοκρασία αλλαγής φάσης του PCM που χρησιμοποιείται σε κτίρια ελαφριάς κατασκευής.Μάλιστα, η παραπάνω θερμοκρασία εξαρτάται από την μέση θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα και αυξάνεται με την αύξηση της ποσότητας της ακτινοβολίας που απορροφάται από τα πάνελ με PCM.
- Δημιουργία μιάς εξίσωσης για την μέση θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα ενός κτιρίου ελαφριάς κατασκευής,από την οποία βλέπουμε ότι η αποθήκευση ενέργειας από το PCM επιδρά ελάχιστα στην μεταβολή της.
- Δημιουργία μιάς εξίσωσης για την μεταβολή της θερμοκρασίας του εσωτερικού αέρα, από την οποία παρατηρούμε ότι το πλάτος της μεταβολής αυτής μειώνεται με την αύξηση του επιφανειακού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας h_{in} και της επιφάνειας των πάνελ,αφού η μεγάλη επιφάνεια αυξάνει τον ρυθμό φορτισης-αποφόρτησης της θερμότητας από το PCM πάνελ.

Κεφάλαιο 15

Μελέτη για την θέρμανση δωματίου στην Αθήνα με χρήση PCM που λειτουργεί ως παθητικό σύστημα

15.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα μελέτη θα εξετάσουμε την δυνατότητα θέρμανσης ενός δωματίου διαστάσεων 4 m (μήκος) x 3m (πλάτος) x 2.5m (ύψος), το οποίο βρίσκεται στην Αττική και διαθέτει έναν υαλοπίνακα διαστάσεων 1.5m (πλάτος) x 2m (ύψος) στην νότια πλευρά του. Το γεγονός ότι επιλέχθηκε ένα δωμάτιο λίγων τετραγωνικών το οποίο περιέχει έναν υαλοπίνακα τόσων μεγάλων διαστάσεων έγινε με προκειμένου να δοθεί έμφαση στον σκοπό της μελέτης, δηλαδή την θέρμανση του δωματίου και να είναι πιο εμφανής η επίδραση των όποιων μεταβολών. Ο τοίχος που περιέχει το PCM θεωρούμε ότι είναι αυτός που βρίσκεται απέναντι από το παράθυρο, δηλαδή αυτός που έχει προσανατολισμό προς τον βορρά και αποτελεί και το βασικό αντικείμενο προς μελέτη. Επειδή, όπως ήδη αναφέρθηκε, θέλουμε να εξετάσουμε το κατά πόσο μπορεί το PCM, όταν αυτό βρίσκεται στο εσωτερικό του τοίχου, να συμβάλλει στην παθητική θέρμανση του δωματίου, οι μήνες που θα εξετάσουμε θα είναι από τον Νοέμβριο έως και τον Μάρτιο, ενώ ακολουθεί και παραμετρική διερεύνηση για την αποτελεσματικότητα του παραπάνω συναρτήσεως της θέσης του PCM στον τοίχο, όταν αυτό υπάρχει.

15.2 Θερμότητα που προέρχεται από την ηλιακή ακτινοβολία και πώς αυτή υπολογίζεται[67]

Για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται μέσα στο δωμάτιο από τον υαλοπίνακα χρησιμοποιούμε τις σχέσεις της μέσης στιγμιαίας άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου :

$$Gb = Mt + At \times \sin\left(\frac{360}{365} \times D - Pt\right)$$

(22)

$$Gd = mt + at \times \sin\left(\frac{360}{365} \times D - Pt\right)$$

(23)

Τις οποίες αντικαθιστούμε στην σχέση :

$$Gt = Gb \times Rb + Gd \times \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + (Gb + Gd) \times \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right)$$

(24)

- όπου, ρ είναι η ανακλάστικότητα του εδάφους, που για συνιθισμένο έδαφος έχει τιμή ρ=0.2
- β=90°, εφόσον ο τοίχος πάνω στον οποίο προσπίπτει είναι κατακόρυφος
- $Rb = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z}$ με

(25)

$$\cos \theta = -\sin \delta \cos \phi \cos \gamma + \cos \delta \sin \phi \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \gamma \sin \omega \quad (26)$$

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega$$

(27)

Από την τιμή που υπολογίζεται με τον παραπάνω τρόπο θεωρούμε ότι το 85% εισέρχεται στο δωμάτιο, και από αυτή το 15% απορροφάται από τον αέρα, ενώ το υπόλοιπο 85% από τον τοίχο με προσανατολισμό στο βορρά.

15.3 Επιλογή υλικού PCM

Το υλικό αλλαγής φάσης που επιλέχθηκε για την συγκεκριμένη εφαρμογή είναι ένα υποθετικό υλικό, του οποίου η κατασκευή απαιτεί περαιτέρω εργαστηριακή έρευνα.

Τα χαρακτηριστικά που το προσδιορίζουν είναι τα εξής:

- Θερμοκρασιακό εύρος αλλαγής φάσης: 15-26°C
- H=132.1 kJ/kg
- Πυκνότητα ρ=1019 kg/m³

- Ειδική θερμική αγωγιμότητα $k=0.8 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$
- Ειδική θερμοχωρητικότητα στερεής φάσης =Ειδική θερμοχωρητικότητα υγρής φάσης:

$$C_{p_s}=C_{p_l}=7000 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$$

Κατά την διάρκεια αλλαγής φάσης, οι τιμές της ειδικής θερμοχωρητικότητας μεταβάλλονται συναρτήσει της θερμοκρασίας του υλικού του PCM σύμφωνα με τις εξισώσεις :

$$C_p = 4 \times (H - b \times C_{p_s}) \times \frac{T - T_s}{b^2} + C_{p_s} \quad \text{για} \quad 15 \leq T \leq 20.5$$

(28)

$$C_p = 4 \times (b - C_{p_l} - H) \times \frac{(T - T_s - b/2)}{b^2} + 2 \times \frac{H}{b} - C_{p_l}$$

για $20.5 \leq T \leq 26$

(29)

οπου $b=T_l-T_s=26-25=11$.

Με αντικατάσταση των τιμών των μεταβλητών οι εξισώσεις αυτές λαμβάνουν την μορφή:

$$C_p=1821.49 (T-15) + 7000 \quad \text{για} \quad 15 \leq T \leq 20.5$$

(30)

$$C_p=-1821.48 (T-20.5) + 17018.18 \quad \text{για} \quad 20.5 \leq T \leq 26$$

(31)

15.4 Επιλογή της διαστρωμάτωσης των τοίχων και της οροφής

15.4.1 Διαστρωμάτωση τοίχων

Η διαστρωμάτωση των τοίχων του δωματίου, πλήν αυτού που έχει τον βόρειο προσανατολισμό και παρουσιάζεται παρακάτω είναι ο εξής:

- Σοβάς 10 mm
- Τούβλο 60 mm

- Μόνωση: Πλάκες διογκωμένης πολυστερίνης 40 mm
- Τούβλο 60 mm
- Σοβάς 10 mm

Η θερμική του αντίσταση προκύπτει ίση προς : $U= 0.85 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$

15.4.2 Διαστρωμάτωση οροφής

Η διαστρωμάτωση της οροφής είναι η εξής:

- Πλάκες 50 mm
- Μπετόν 100 mm
- Μόνωση οροφής 30 mm
- Σοβάς 20 mm

Η θερμική της αντίσταση προκύπτει ίση προς : $U= 1 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$

15.4.3 Διαστρωμάτωση βόρειου τοίχου

Η διαστρωμάτωση του τοίχου με προσανατολισμό προς τον βορρά είναι η εξής:

- Σοβάς 10 mm
- Τούβλο 60 mm
- PCM 50 mm
- Μόνωση: Πλάκες διογκωμένης πολυστερίνης 50 mm
- Τούβλο 60 mm
- Σοβάς 10 mm

Η θερμική του αντίσταση προκύπτει ίση προς : $U= 0.6613 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$

15.4.4 Διαστρωμάτωση τοίχου για την πρώτη παραμετρική μελέτη

Η διαστρωμάτωση του τοίχου με προσανατολισμό προς τον βορρά για την πρώτη παραμετρική μελέτη, στην οποία αλλάζουμε την θέση που τοποθετείται το PCM μέσα στον τοίχο, είναι η εξής:

- Γυψοσανίδα 10
- PCM 50 mm
- Μόνωση :Πλάκες διογκωμένης πολυστερίνης 50 mm

- Τούβλο 60 mm
- Σοβάς 10 mm

Η θερμική του αντίσταση προκύπτει ίση προς : $U = 0.678 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$

15.4.5 Διαστρωμάτωση τοίχου για την δεύτερη παραμετρική μελέτη

Η διαστρωμάτωση του τοίχου με προσανατολισμό προς τον βορρά για την δεύτερη παραμετρική μελέτη, στην οποία δεν χρησιμοποιούμε καθόλου υλικό αλλαγής φάσης είναι ακριβώς η ίδια με αυτή των υπόλοιπων τοίχων, δηλαδή:

- Σοβάς 10 mm
- Τούβλο 60 mm
- Μόνωση: Πλάκες διογκωμένης πολυστερίνης 50 mm
- Τούβλο 60 mm
- Σοβάς 10 mm

Η θερμική του αντίσταση προκύπτει ίση προς : $U = 0.69 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$

15.4.6 Φυσικά χαρακτηριστικά υλικών

Τα φυσικά χαρακτηριστικά των υλικών παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5:

Υλικά	Πυκνότητα (kg/m³)	Θερμική αγωγιμότητα k (W/m °C)	Ειδική θερμοχωρητικότητα Cp (J/kg °C)
Αέρας	1.2	-	1004
Τούβλο	1690	0.653	900
Μόνωση τοίχου (πλάκες διογκωμένης)	35	0.04	1210

πολυστερίνη)			
Μόνωση οροφής (πλάκες εξιλασμένης πολυστερίνης)	27	0.019	1210
Σοβάς	1860	1.2	835
Γυψοσανίδα	950	0.16	840

15.5 Επιλογή των τιμών του συντελεστή θερμικής συναγωγής $h(W/m^2 \text{ } ^\circ C)$

15.5.1 Συντελεστής συναγωγής τοίχου-περιβάλλοντος

Η τιμή του συντελεστή συναγωγής ανάμεσα στον τοίχο και στο περιβάλλον επιλέγεται ίση προς $h_{out}=16 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ C$, η οποία αποτελεί και τυπική τιμή που χρησιμοποιείται συχνά στις εφαρμογές.

15.5.2 Συντελεστής συναγωγής τοίχου-δωματίου

Η τιμή του συντελεστή συναγωγής ανάμεσα στον τοίχο και στο εσωτερικό του δωματίου εξετάζεται εκτενέστερα. Η ASHRAE προτείνει τιμή του συντελεστή συναγωγής ίση προς:

$$h_{in}=8 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ C$$

Ωστόσο, ποικίλες είναι οι σχέσεις [69-73] που έχουν δημοσιευτεί για τον υπολογισμό της παραπάνω τιμής. Ενδεικτικά παρουσιάζεται η εξής [69]:

$$h_{in} = [[1.5 \times (\Delta T / 3)^{1/4}]^6 + (1.23 \times \Delta T^{1/3})^6]^{1/6}$$

(32)

Όπου ΔT είναι η διαφορά θερμοκρασίας της επιφάνειας του τοίχου που μελετάμε από τον εσωτερικό αέρα του δωματίου. Για τις τιμές του ΔT , όπως αυτές προκύπτουν ύστερα από την εκτέλεση του προγράμματος, ο συντελεστής συναγωγής κυμαίνεται γύρω από την τιμή $h_{in} = 2 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ C$.

Επειδή οι δύο τιμές που δίδονται παραπάνω απέχουν αρκετά η μία από την άλλη, στους υπολογισμούς μας θα λάβουμε ως τιμή του συντελεστή συναγωγής :

$$h_{in} = 4 \text{ W/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Για λόγους πληρότητας στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται και μία ενδεικτική παραμετρική μελέτη για τον μήνα Νοέμβριο, στην οποία φαίνεται η σημαντική επίδραση της τιμής του συντελεστή συναγωγής ανάμεσα στον τοίχο και στο δωμάτιο σε ένα παθητικό σύστημα θέρμανσης ενός χώρου με χρήση PCM.

15.6 Μαθηματικό μοντέλο-Αριθμητική προσομοίωση

15.6.1 Μαθηματικό μοντέλο

Το μαθηματικό μοντέλο που ακολουθείται κατά την υπολογιστική διαδικασία περιγράφεται αναλυτικά βήμα προς βήμα:

1. Αρχικά, υπολογίζεται η θερμότητα που προσπίπτει στο τζάμι του δωματίου κάθε ώρα, από τις εξισώσεις που δίδονται πιο πάνω (22-24). Επειδή, όμως, στην μελέτη που θα κάνουμε το χρονικό μας βήμα θα είναι $\Delta t = 10 \text{ min}$, θα θεωρήσουμε ότι οι τιμές που υπολογίσαμε ισοκατανέμονται στο διάστημα της μίας ώρας.
2. Στη συνέχεια, και αφού λάβουμε υπόψη ότι το 85% της υπολογισθείσας θερμότητας διαπερνάει το τζάμι, μπορούμε να υπολογίσουμε και την εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου, υποθέτοντας ότι ο αέρας απορροφάει το 15% αυτής. Έτσι, ο αέρας θα έχει απορροφήσει το 12.75% της θερμότητας που προσπίπτει στο τζάμι, ενώ το 72.25% αυτής απορροφάται από τον τοίχο που έχει βόρειο προσανατολισμό, με την θερμοκρασιακή κατανομή του οποίου θα ασχοληθούμε εκτενέστερα. Η εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου υπολογίζεται από την επίλυση της εξίσωσης:

$$\rho_{air} \times C p_{air} \times \frac{T_{in} - T_{in}^o}{\Delta t} = \Sigma q$$

(33)

ως προς T_{in} , όπου T_{in}^o είναι η θερμοκρασία του δωματίου κατά το προηγούμενο χρονικό βήμα. Επιπλέον, αναφέρεται ότι το Σ κατά την διάρκεια της ηλιοφάνειας ισούται με την θερμότητα που έχει απορροφήσει ο αέρας λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας αυξημένη με το ποσό θερμότητας που απορροφάει λόγω της συναγωγής από τον τοίχο προς τον αέρα του δωματίου μείον τις απώλειες από τους τοίχους, το τζάμι και την οροφή. Κατά την διάρκεια των ωρών που δεν έχει ηλιοφάνεια το Σ ισούται με το ποσό της θερμότητας που αποδίδει ο τοίχος με το υλικό αλλαγής φάσης στον αέρα του δωματίου λόγω συναγωγής μείον τις απώλειες από τους τοίχους, το τζάμι και την οροφή.

3. Σειρά έχει η μελέτη της κατανομής της θερμοκρασίας κατά μήκος του τοίχου που έχει βόρειο προσανατολισμό, και στον οποίο βρίσκεται ενσωματωμένο το υλικό αλλαγής φάσης. Η μεταβατική μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας δίδεται από την εξίσωση:

$$\rho \times Cp \times \frac{\partial T}{\partial t} = k \times \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

(34)

Για την επίλυσή της, χρησιμοποιείται η έμμεση διατύπωση της εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών, η οποία παρουσιάζεται παρακάτω.

4. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία αυτή για τις 12 ώρες (7.00-18.00), στην διάρκεια των οποίων θεωρώ ότι έχω ηλιοφάνεια, χρησιμοποιώ εκ νέου την παραπάνω εξίσωση για την μελέτη της μεταβολής της θερμοκρασίας τόσο κατά μήκος του τοίχου όσο και στο εσωτερικό του δωματίου για τις επόμενες 12 ώρες (19.00-6.00). Κατά την διάρκεια των τελευταίων, τον ρόλο των πηγών θερμότητας έχουν κυρίως το PCM αλλά και τα λοιπά δομικά στοιχεία από τα οποία είναι κατασκευασμένος ο τοίχος.
5. Τέλος, αναφέρεται ότι ολόκληρη η διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω πραγματοποιείται για την 21^η ημέρα κάθε μήνα από τον Νοέμβριο έως και τον Μάρτιο, ενώ προκειμένου να επιτύχουμε την σύγκλιση των αποτελεσμάτων οι υπολογισμοί κάθε ημέρας

επαναλαμβάνονται τόσες φορές , όσες κρίνονται απαραίτητες
κάθε φορά(από 20 έως 50).

15.6.2 Αριθμητική προσομοίωση [68]

Η αριθμητική προσομοίωση θα γίνει με την επίλυση της γραμμικής εξίσωσης με τριδιαγώνια μορφή (TDMA), χρησιμοποιώντας την έμμεση διατύπωση της εξίσωσης πεπερασμένων διαφορών.

Πιο συγκεκριμένα, αφού χωρίσουμε τον τοίχο σε N κόμβους, οι οποίοι θεωρούμε ότι ισαπέχουν μεταξύ τους ($\delta x = \text{σταθερό}$), η εξίσωση πεπερασμένων διαφορών γράφεται:

$$A_N \times T_N = A_{N+1} \times T_{N+1} + A_{N-1} \times T_{N-1} + A_N^o \times T_N^o$$

(35)

, όπου

$$A_{N+1} = \frac{k_{N+1}}{(\delta x)}$$

$$A_{N-1} = \frac{k_{N-1}}{(\delta x)}$$

$$A_N^o = \frac{\rho \times Cp \times \Delta x}{\Delta t}$$

$$A_N = A_{N+1} + A_{N-1} + A_N^o$$

Με αυτό τον τρόπο υπολογίζονται όλοι οι συντελεστές των A των θερμοκρασιών T, οι οποίοι είναι απαραίτητοι για την επίλυση του τριδιαγώνιου πίνακα, που θα μας δώσει τελικά και την κατανομή των θερμοκρασιών.

Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιούνται είναι δύο και εφαρμόζονται στον πρώτο και στον τελευταίο κόμβο. Και στις δύο αυτές οριακές συνθήκες λαμβάνεται υπ όψη η συναγωγή της θερμότητας ανάμεσα στον τοίχο και στον εσωτερικό ή εξωτερικό αέρα αντίστοιχα,

έχοντας πάντα γνωστή την τιμή της θερμοκρασίας του εσωτερικού ή του εξωτερικού αέρα.

Πιο αναλυτικά, η πρώτη οριακή συνθήκη, που προκύπτει από την διπλή ολοκλήρωση της εξίσωσης της μεταβατικής μονοδιάστατης αγωγής θερμότητας είναι η :

$$(h_{in} + \frac{k_1}{dx} + \frac{\rho_1 \times Cp_1 \times dx}{\Delta t}) \times T_1 - \frac{k_2}{dx} \times T_2 = h_{in} \times T_{in} + (\frac{\rho_1 \times Cp_1 \times dx}{\Delta t}) \times T_1^o \quad (36)$$

Και η δευτερη:

$$(h_{out} + \frac{k_n}{dx} + \frac{\rho_N \times Cp_N \times dx}{\Delta t}) \times T_N - \frac{k_{n-1}}{dx} \times T_{n-1} = h_{out} \times T_{out} + \frac{\rho_N \times Cp_N \times dx}{\Delta t} \times T_N^o \quad (37)$$

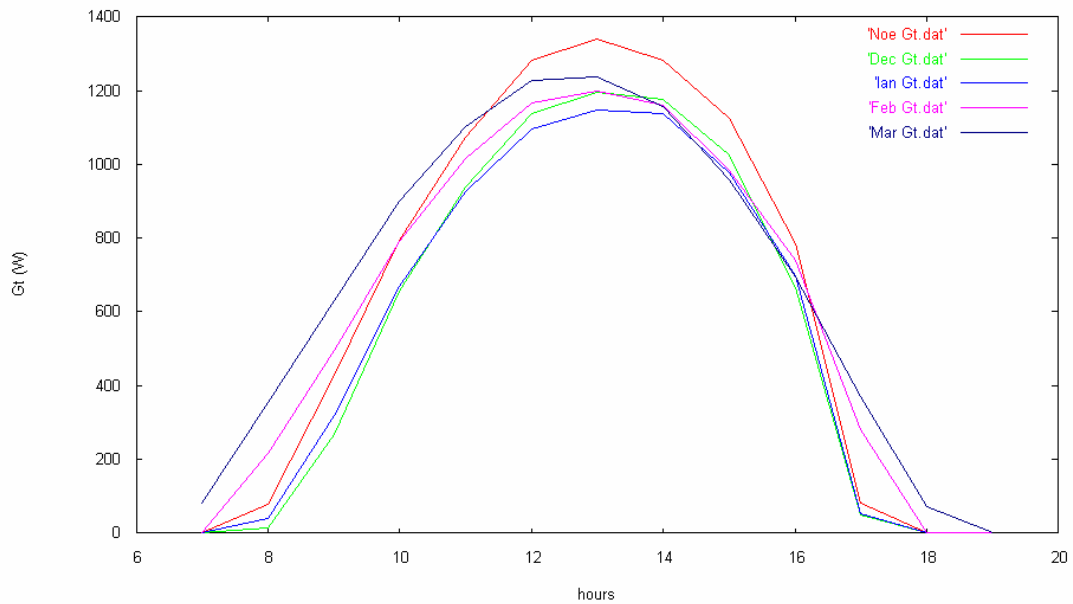
Η γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιήθηκε είναι η Fortran 70 και τα αποτελέσματα της μελέτης παρουσιάζονται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 16

Αποτελέσματα της μελέτης για την θέρμανση δωματίου στην Αθήνα με χρήση PCM που λειτουργεί ως παθητικό σύστημα

16.1 Η συνολική θερμότητα που προσπίπτει πάνω στον υαλοπίνακα για τον εκάστοτε μήνα

Στο διάγραμμα που δίδεται παρακάτω παρουσιάζονται οι τιμές της θερμότητας G_t (W) που προσπίπτει στον υαλοπίνακα κατά την διάρκεια των ωρών της ηλιοφάνειας (7.00-18.00) για τους μήνες Νοέμβριο- Μάρτιο.

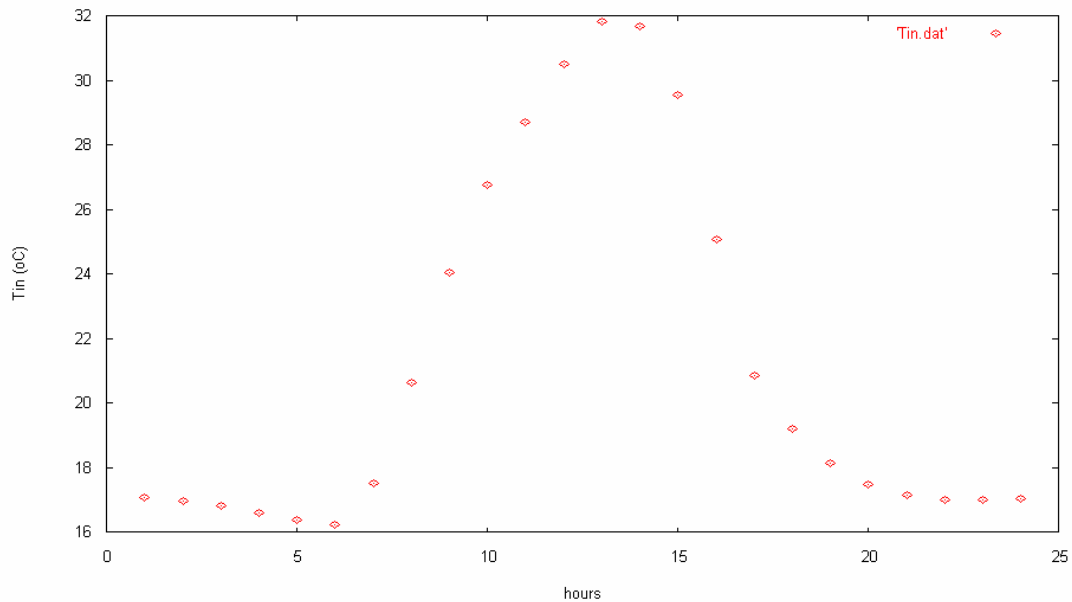


Εικόνα 69: Θερμότητα που προσπίπτει στο τζάμι (W) -ώρες ηλιοφάνειας (h)

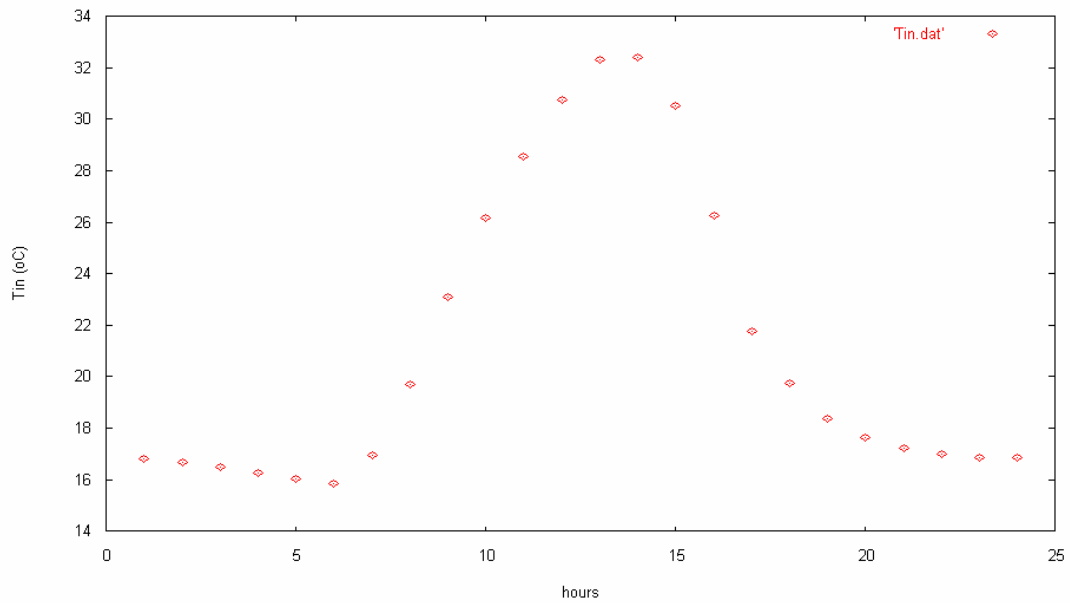
Όπως παρατηρούμε, τον Δεκέμβριο και τον Ιανουάριο οι τιμές της συνολικής θερμότητας ολοένα μειώνονται, κάτι που άλλωστε αναμαίνεται εάν λάβουμε υπ όψη τις χαμηλές θερμοκρασίες του περιβάλλοντος, ενώ τον Φεβρουάριο και τον Μάρτιο οι τιμές της αρχίζουν να αυξάνονται, όπως επίσης περιμέναμε. Οι μέγιστες τιμές της θερμότητας προκύπτουν για τον μήνα Νοέμβριο, γεγονός που μπορεί να δικαιολογηθεί από το ότι τον Νοέμβριο οι θερμοκρασίες του περιβάλλοντος είναι ίσες ή υψηλότερες σε σχέση με τους λοιπούς μήνες που μελετάμε σε συνδυασμό με την κλίση που έχει ο ήλιος σε σχέση με την γή τον μήνα αυτό. Επειδή ακριβώς ο ήλιος βρίσκεται χαμηλά τον Νοέμβριο, οι ακτίνες του προσπίπτουν με μεγάλη καθετότητα στην επιφάνεια του υαλοπίνακα, με αποτέλεσμα να είναι μεγάλο και το ποσό της θερμότητας που λαμβάνει ο τελευταίος.

16.2 Παραμετρική μελέτη του συντελεστή συναγωγής ανάμεσα στο δωμάτιο και στην επιφάνεια του τοίχου για τον μήνα Νοέμβριο.

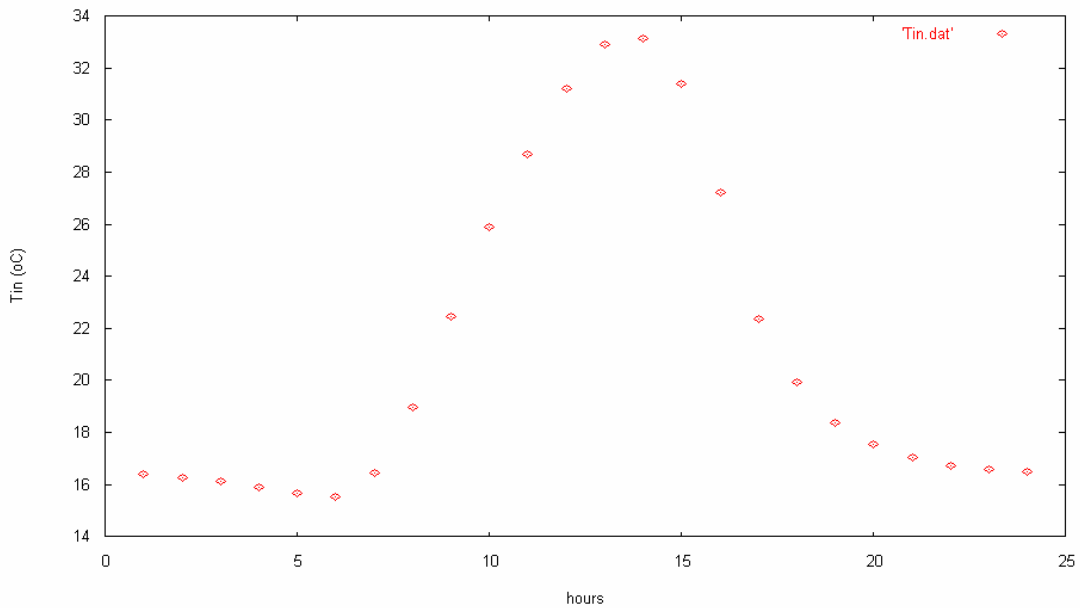
Όπως ήδη αναφέρεται, σε αυτή την παράγραφο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της παραμετρικής μελέτης για τον συντελεστή συναγωγής h_{in} , η οποία έγινε ενδεικτικά για τον μήνα Νοέμβριο.



Εικόνα 70: Κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου κατά την διάρκεια του 24 ωρου για $h_{in}=2 \text{ W/m}^2\text{°C}$



Εικόνα 71 : Κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου κατά την διάρκεια του 24 ωρου για $h_{in}=4 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$



Εικόνα 72: Κατανομή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου κατά την διάρκεια του 24 ωρου για $h_{in}=8 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$

Όπως φαίνεται από τις παραπάνω εικόνες η μεταβολή του συντελεστή συναγωγής h_{in} δεν επηρεάζει ιδιαίτερα την εσωτερική

θερμοκρασία του δωματίου. Αυτό οφείλεται προφανώς στο ότι η αύξηση αυτή συνδυάζεται με μία αρκετά μεγάλη μείωση της θερμοκρασίας του τοίχου, πράγμα άλλωστε

αναμεινόμενο αφού η φυσική έννοια της αύξησης του h_{in} συνεπάγεται και αύξηση του ποσού της θερμότητας που μεταδίδεται από τον τοίχο προς το δωμάτιο. Έτσι, στην σχέση μετάδοσης της θερμότητας με συναγωγή:

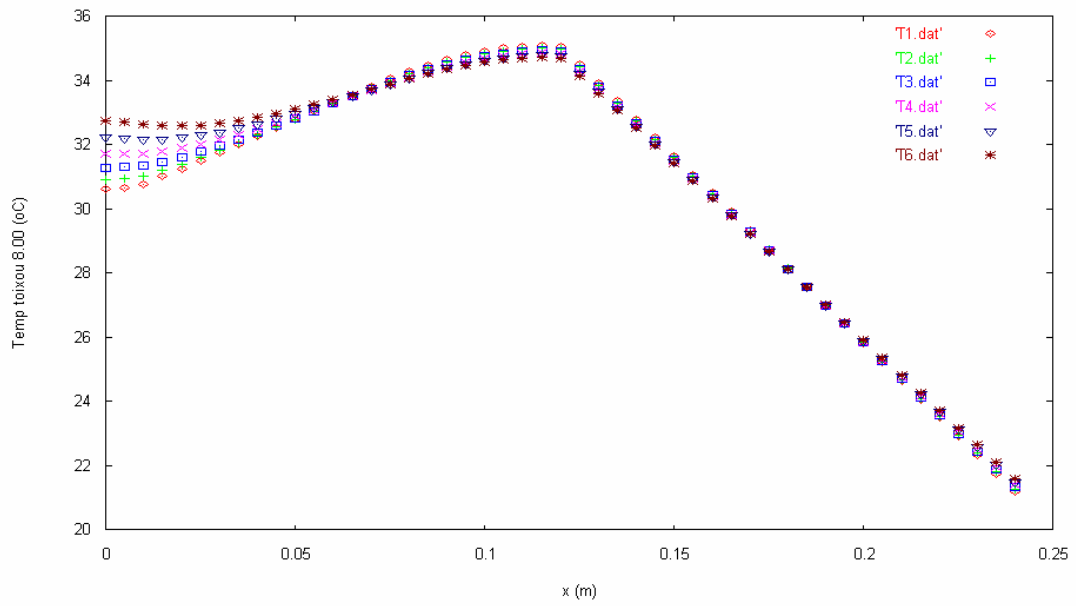
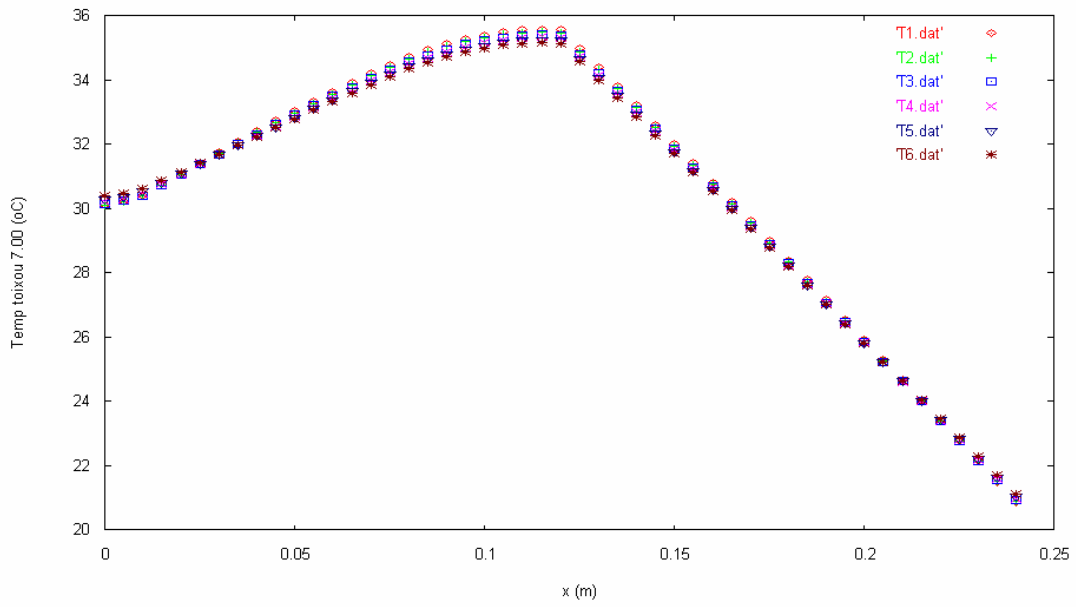
$$Q_{sin} = h_{in} \times (T_{\delta\omega\mu} - T_{in})$$

(38)

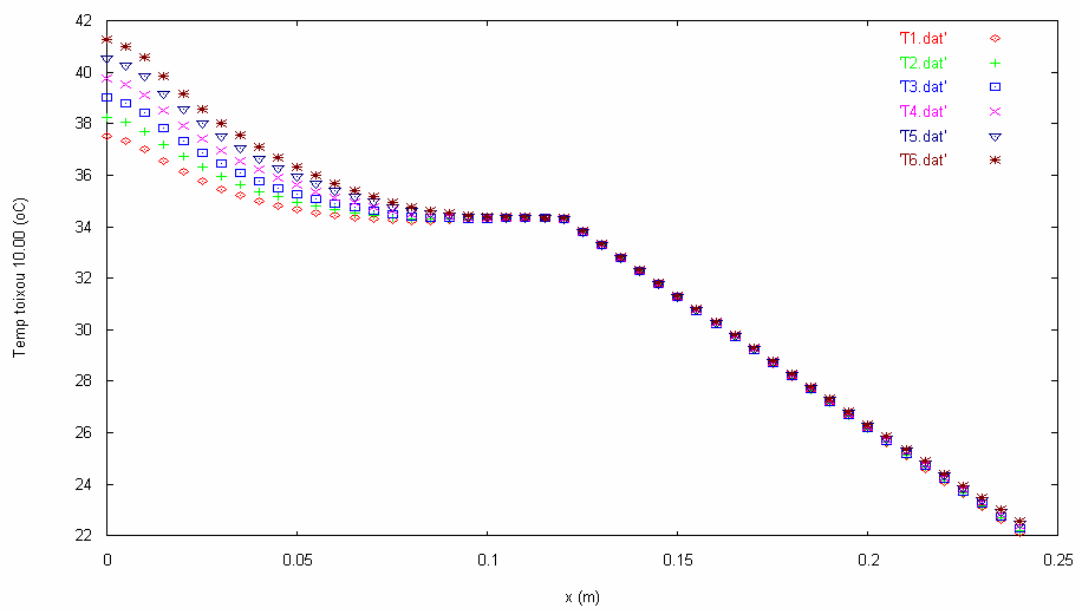
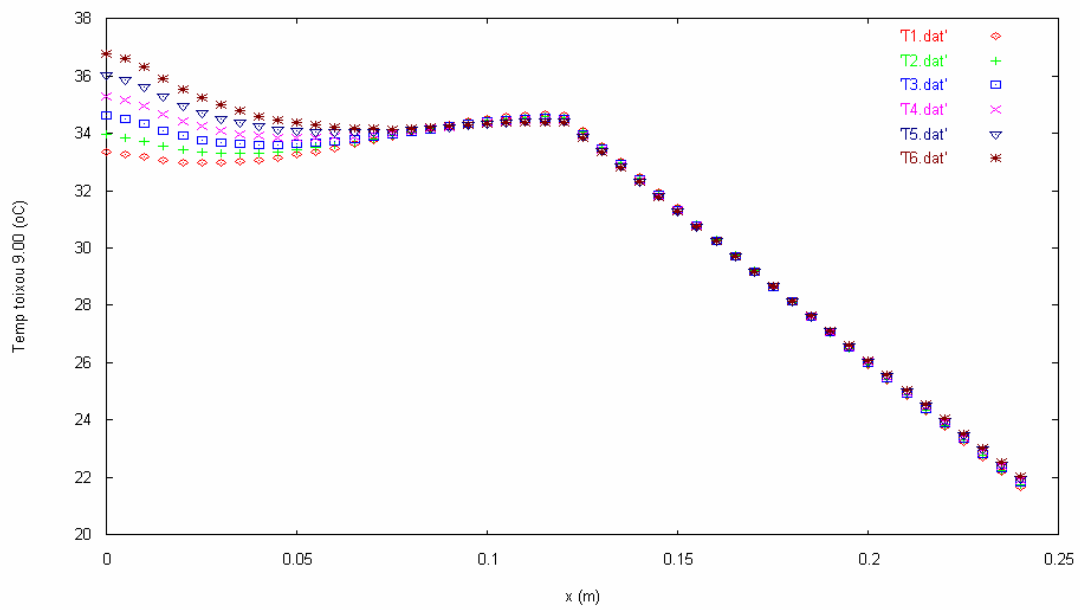
Η επίδραση των ποσοτήτων h_{in} και ΔT είναι αντίρροπη, με αποτέλεσμα να μην παρουσιάζονται ιδιαίτερες μεταβολές στην εσωτερική θερμοκρασία.

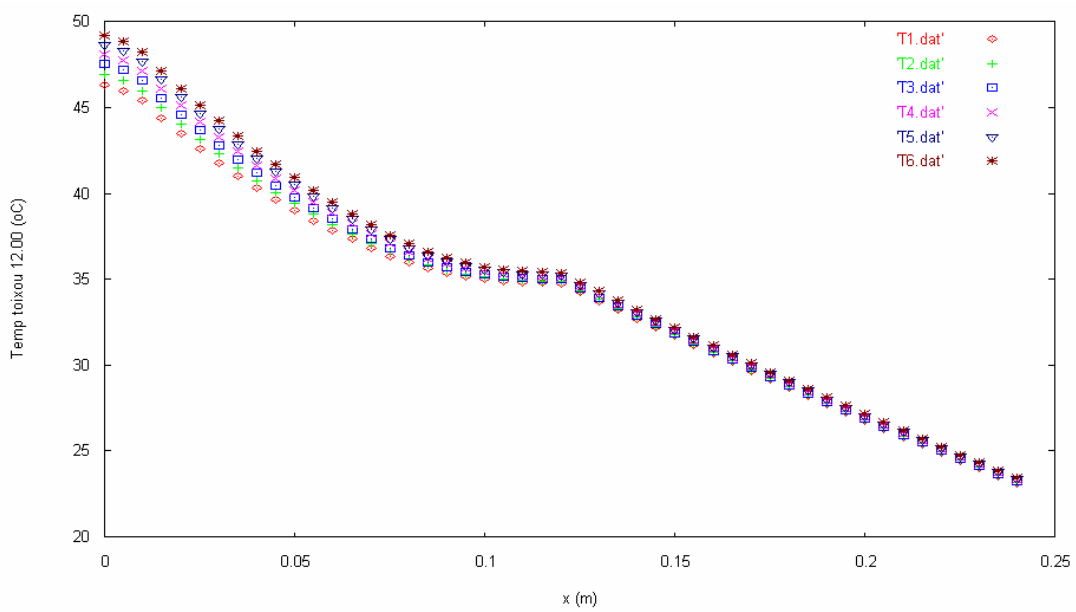
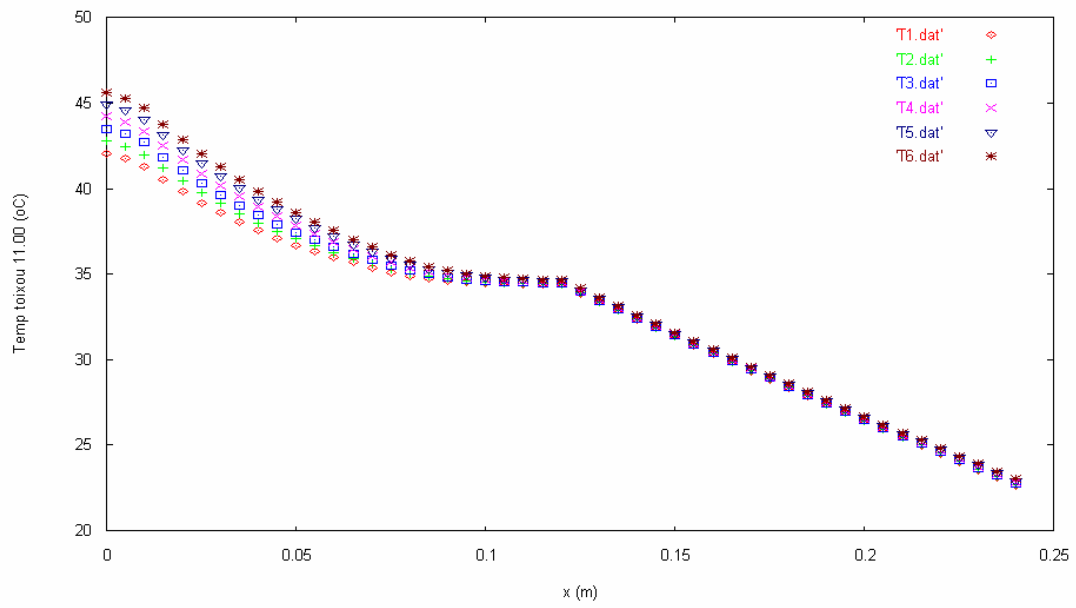
Παρακάτω δίδονται τα διαγράμματα μεταβολής της θερμοκρασίας του τοίχου με ενσωματωμένο το PCM, για όλο το 24 ωρο ανά δεκάλεπτο, και για τις τρεις περιπτώσεις, $h_{in} = 2,4,8 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$, στα οποία γίνεται εμφανής η μείωση της θερμοκρασίας του τοίχου με την αύξηση του h_{in} .

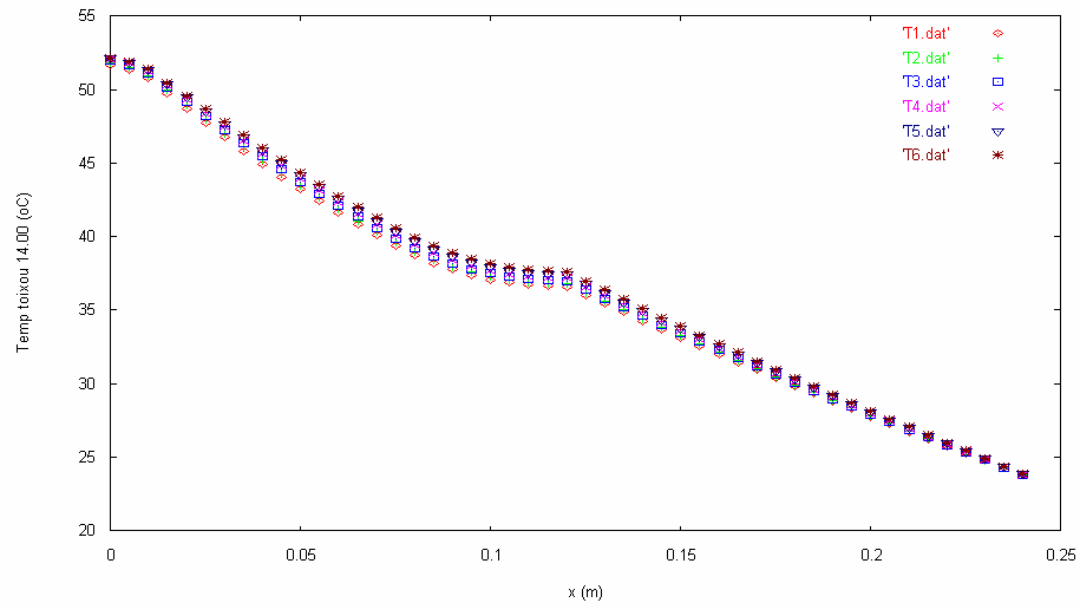
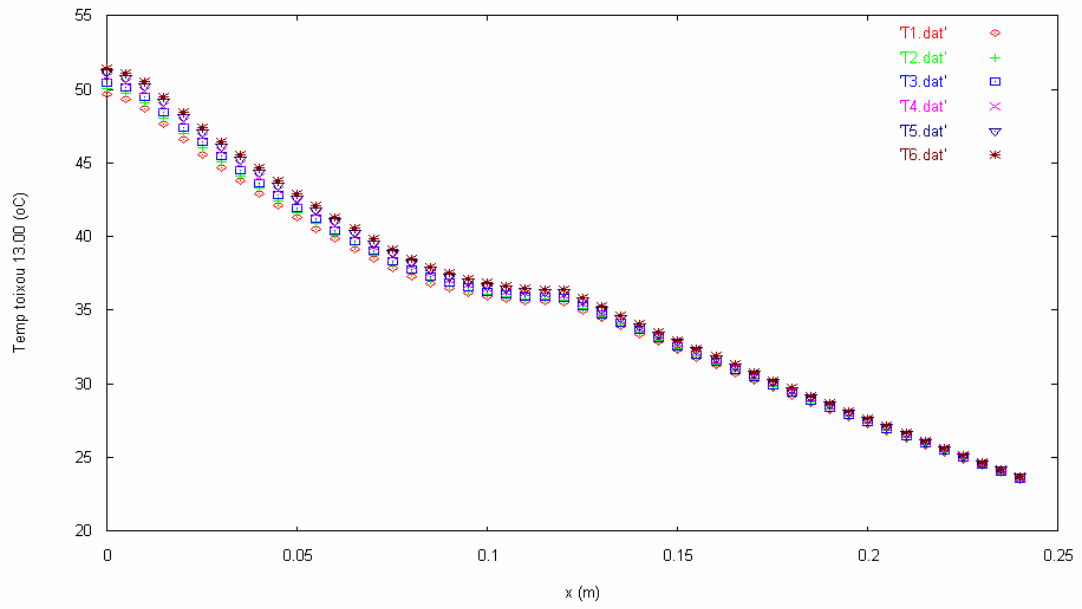
Για $h_{in}=2 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$

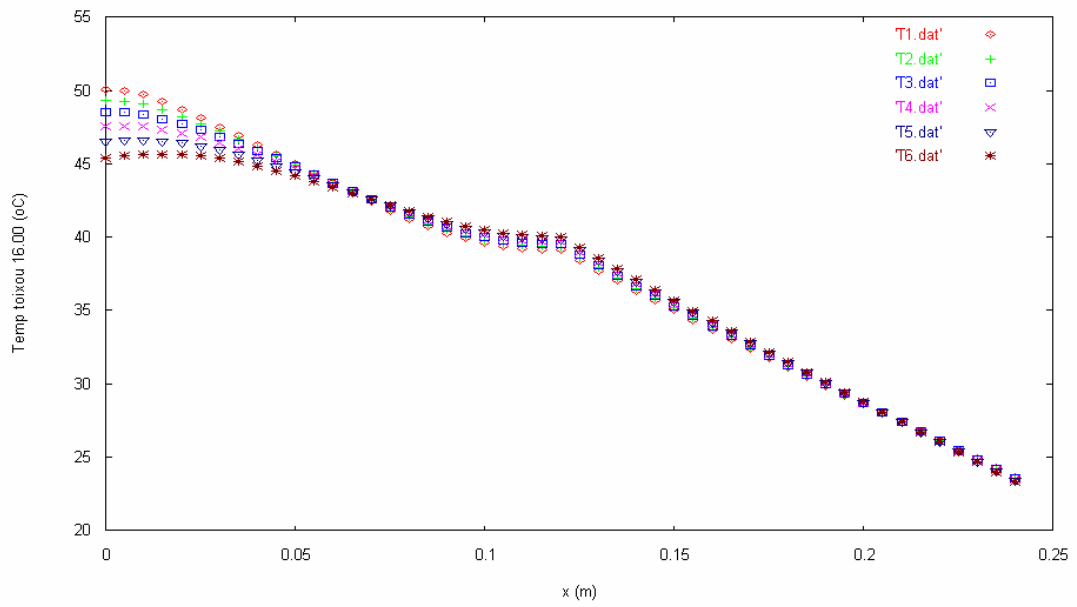
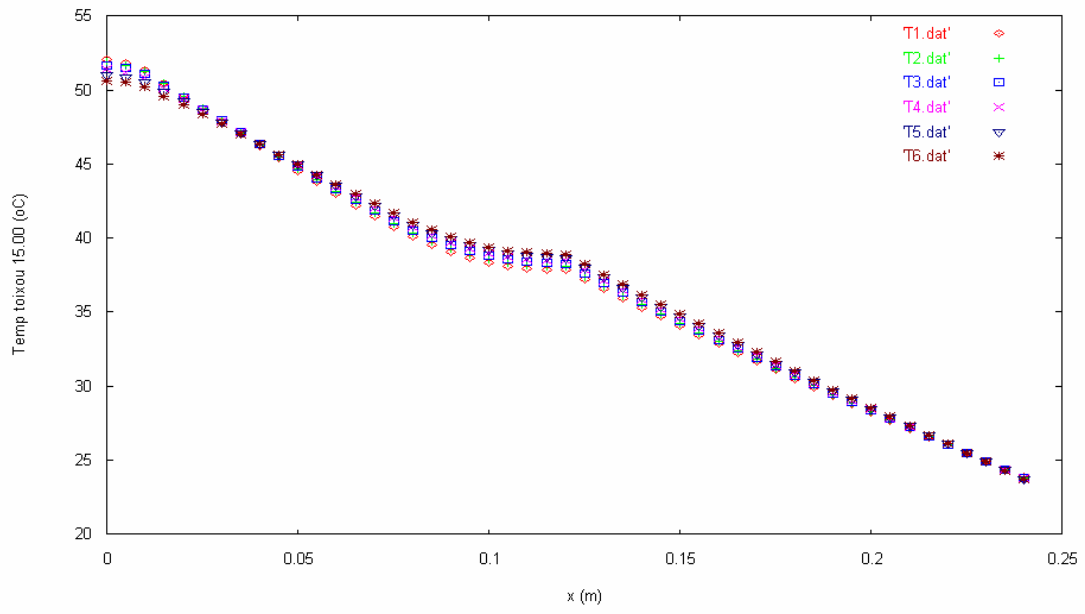


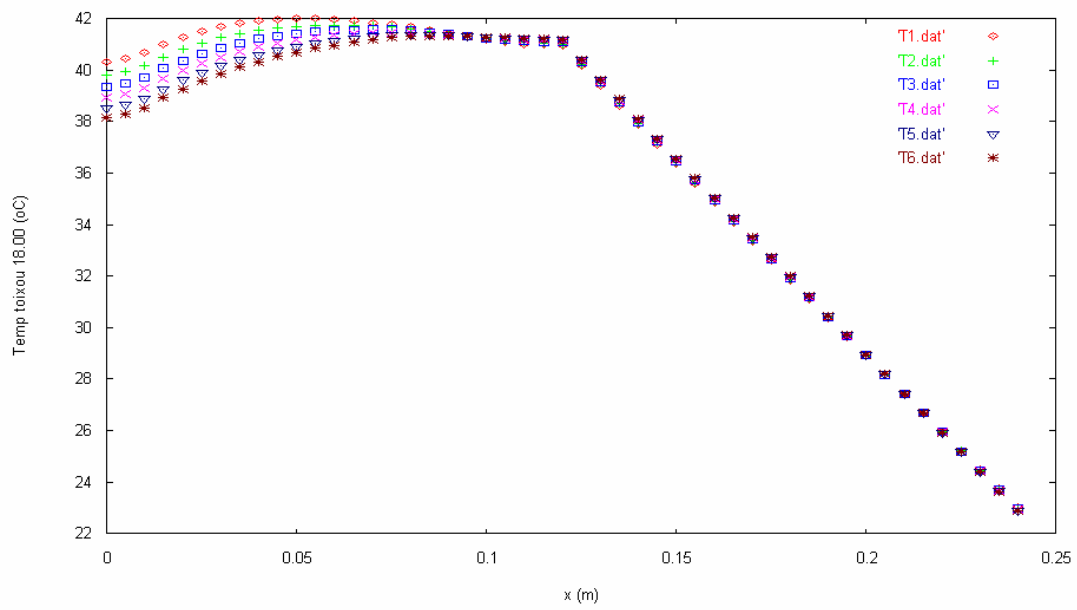
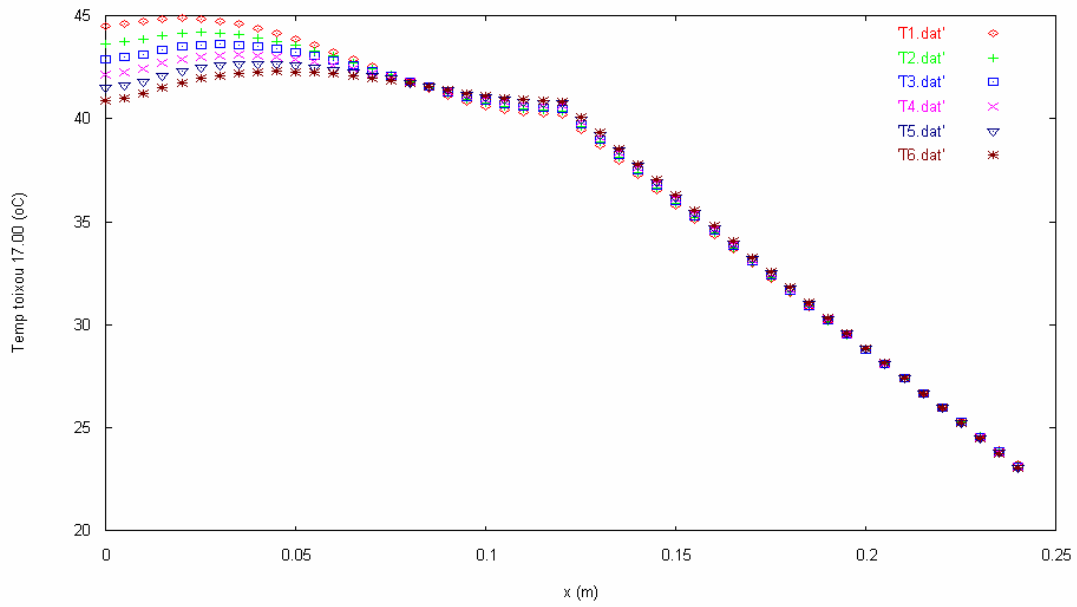
Εικόνα 73 : Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος του τοίχου κατά την διάρκεια του 24 ωρου για τον μήνα Νοέμβριο με $h_{in} = 2W/m^2 \cdot ^\circ C$, ακολουθούν τα διαγράμματα και των υπόλοιπων ωρών

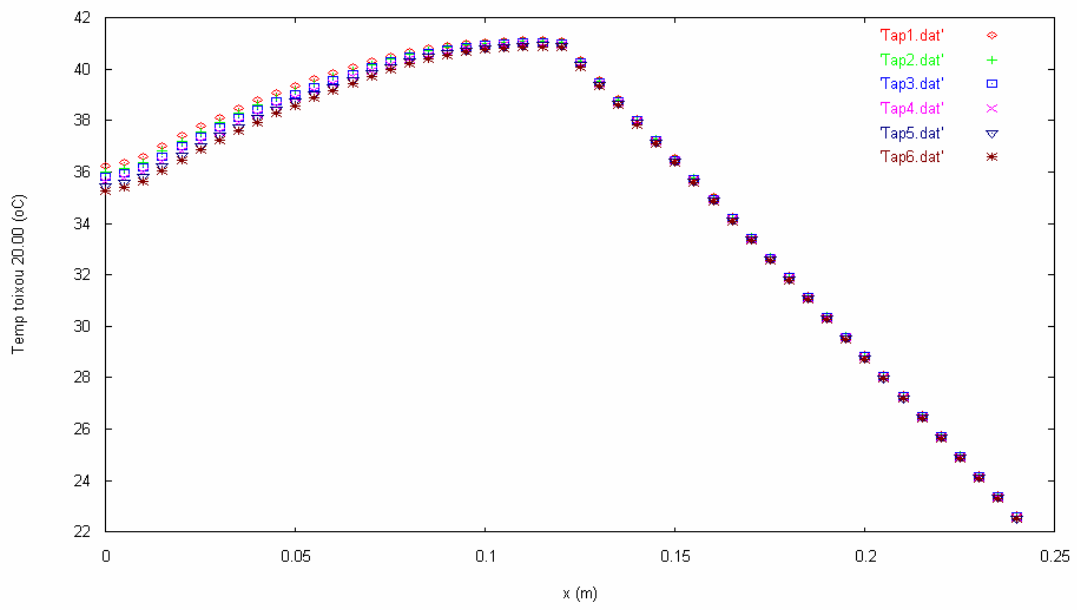
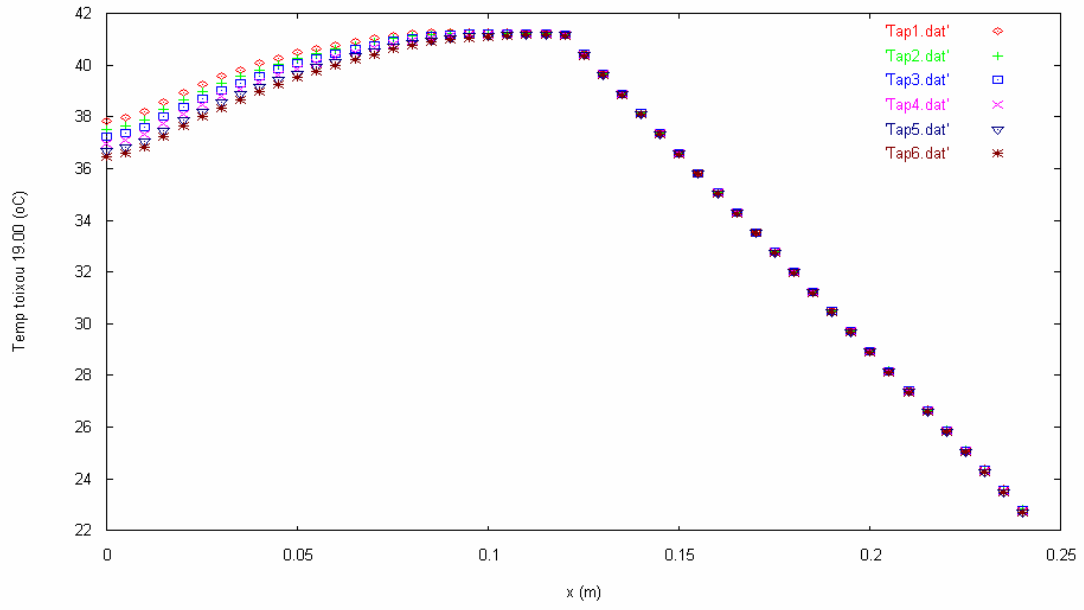


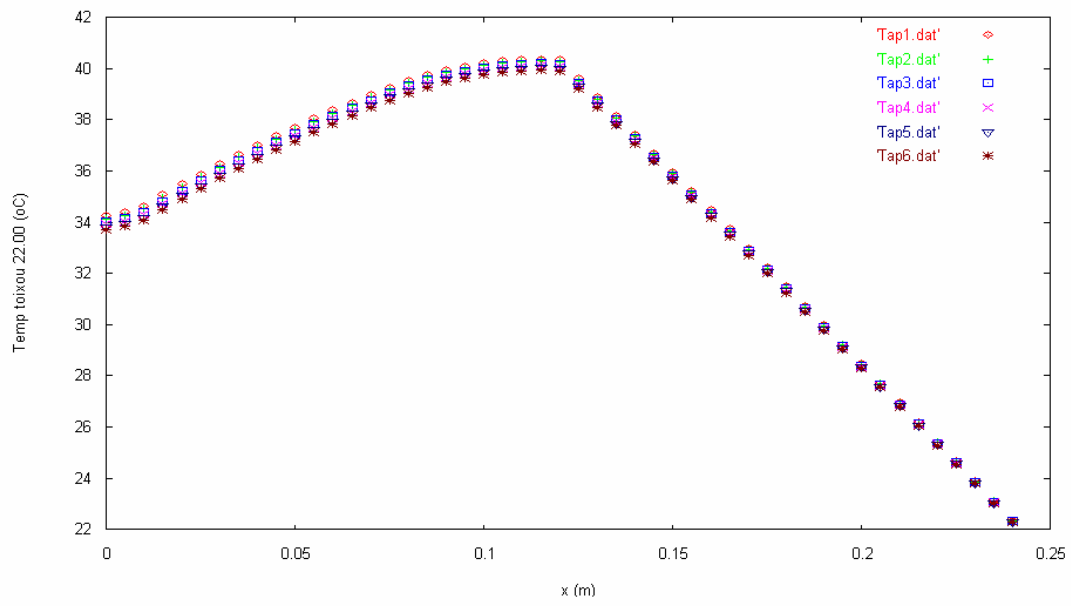
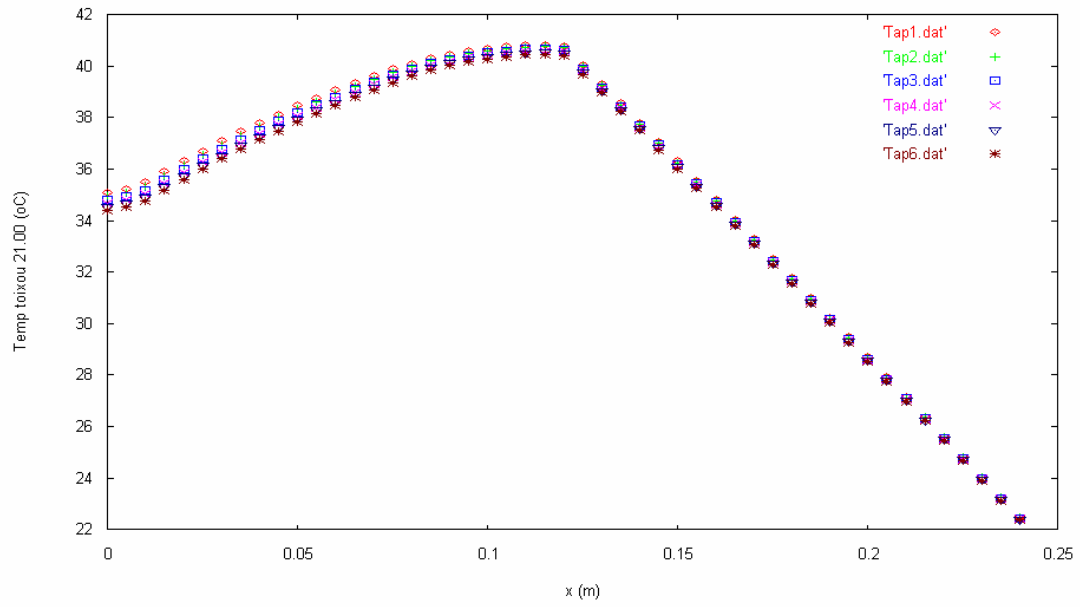


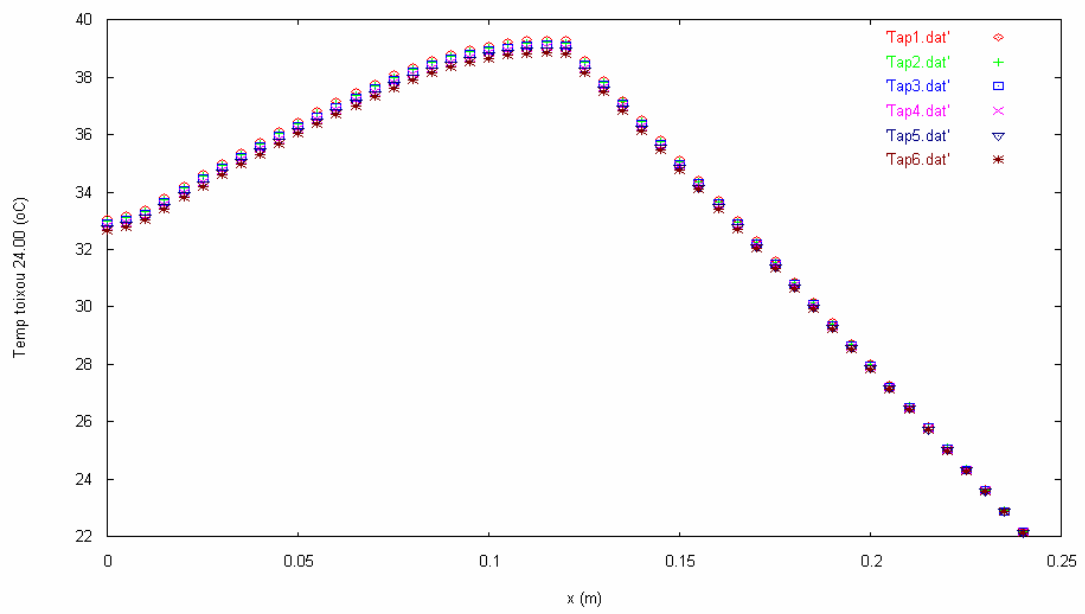
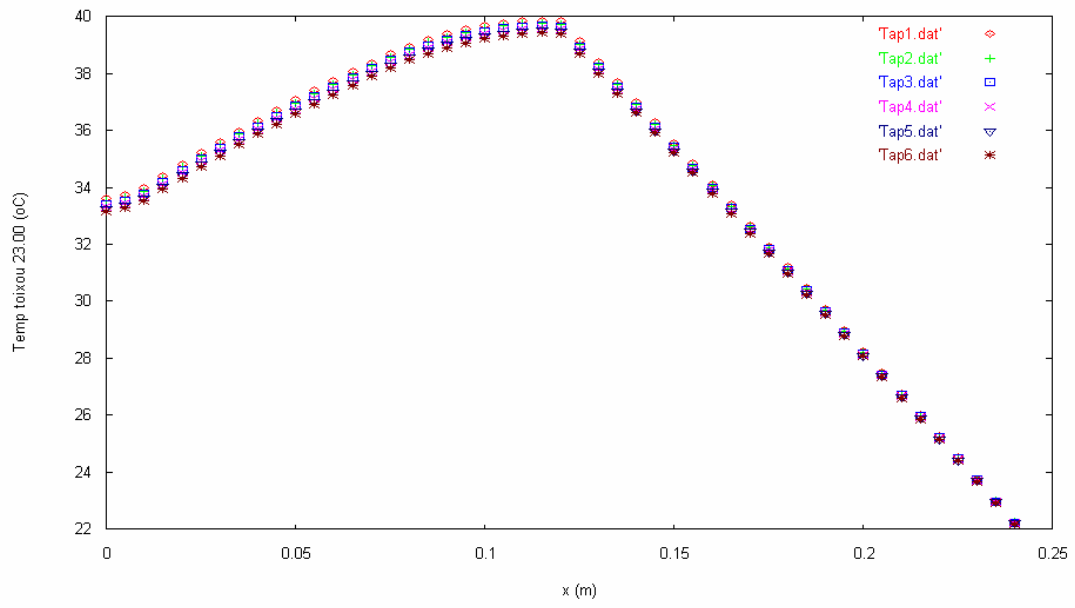


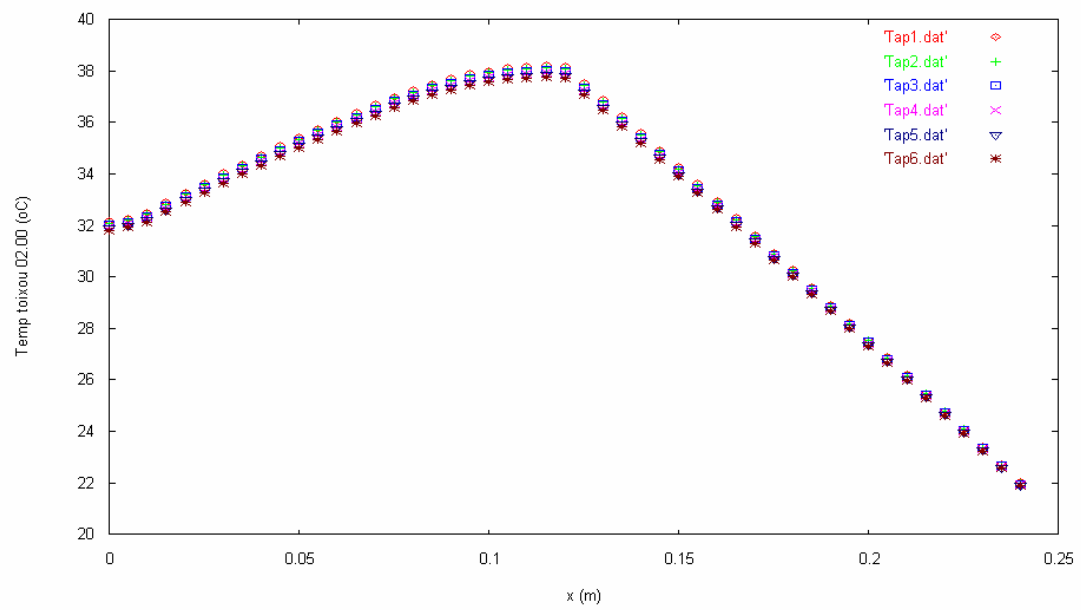
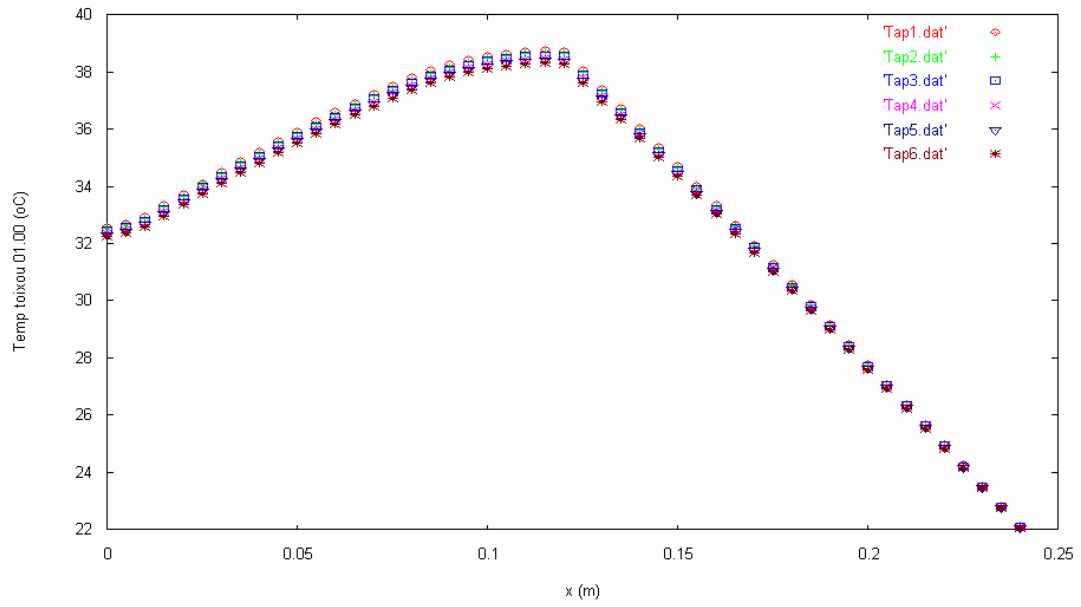


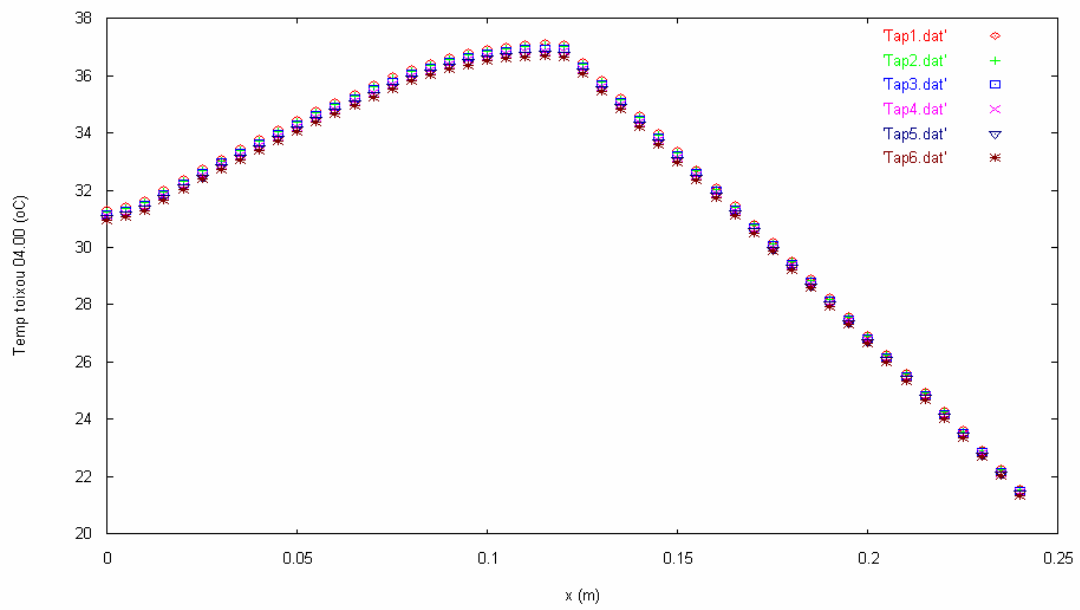
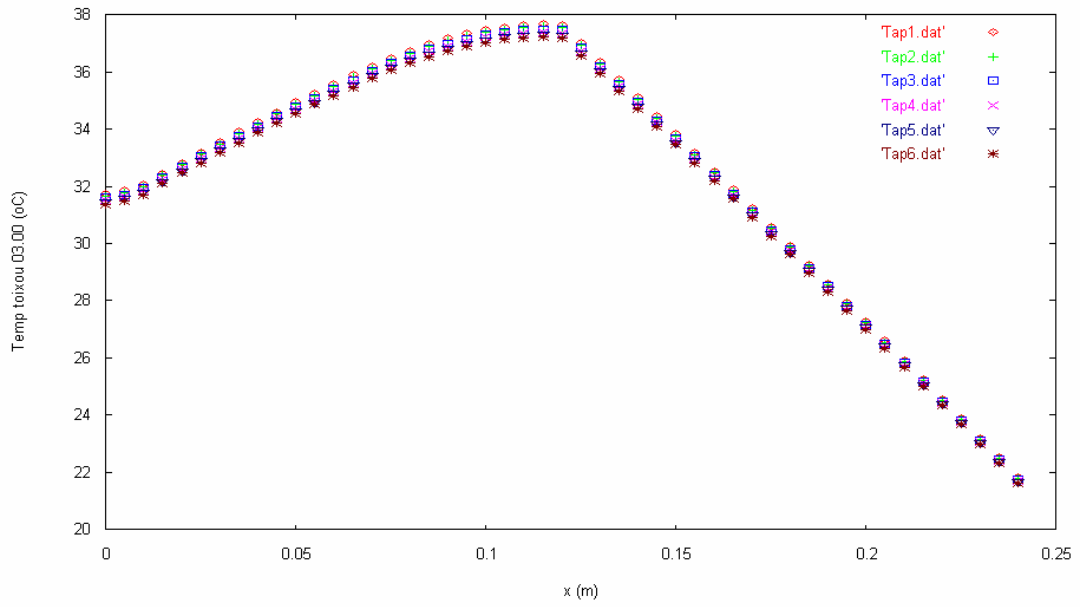


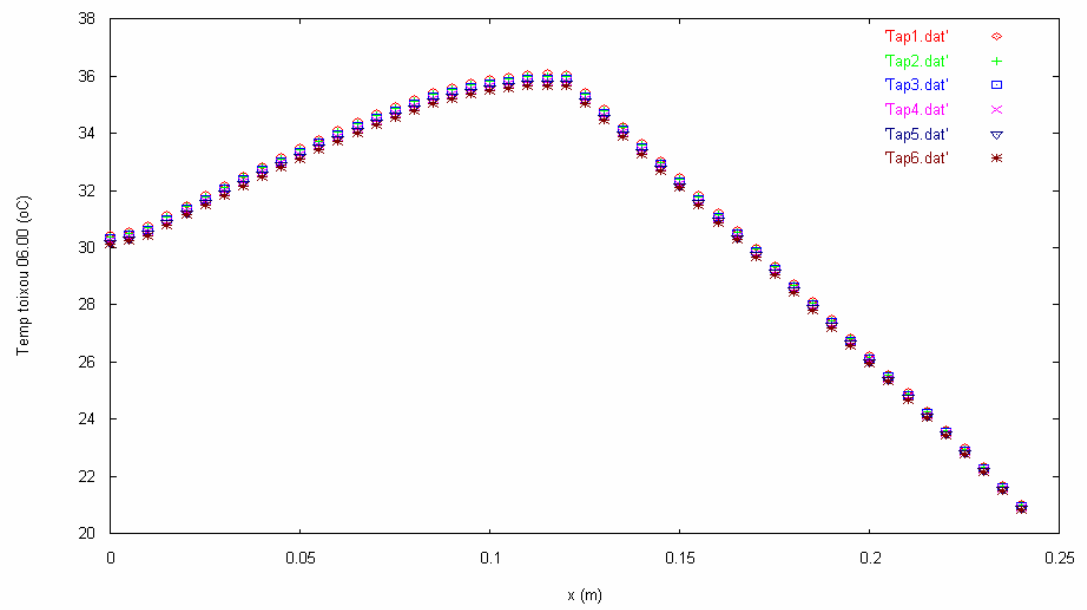
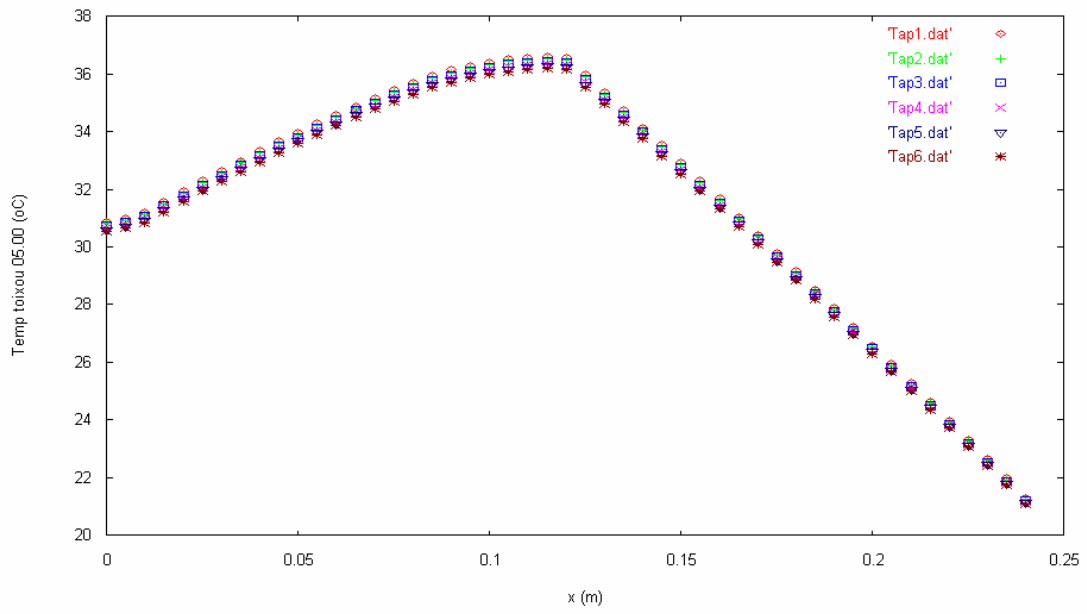




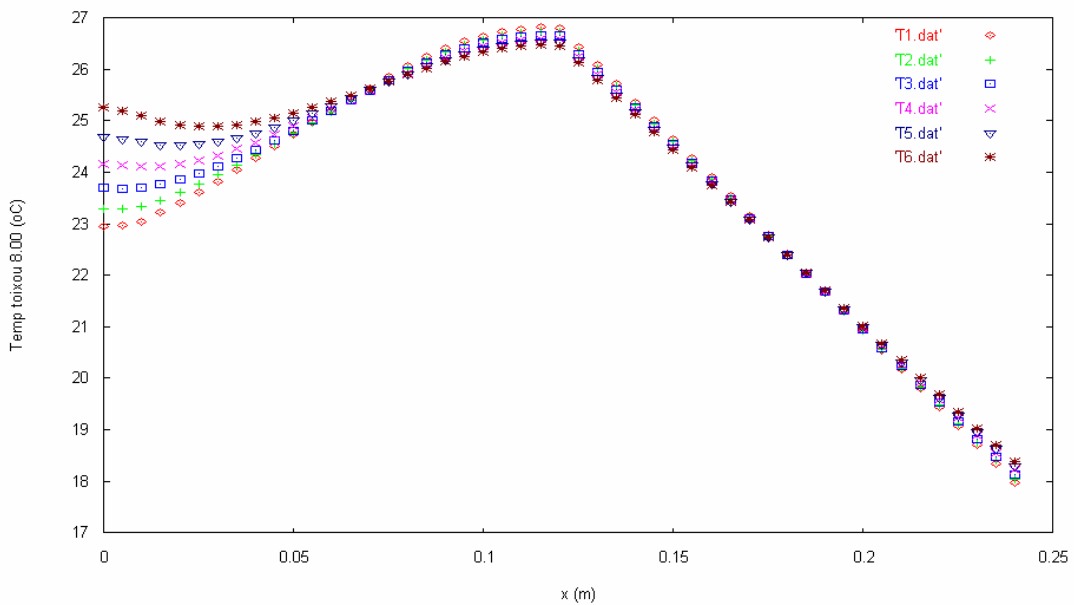
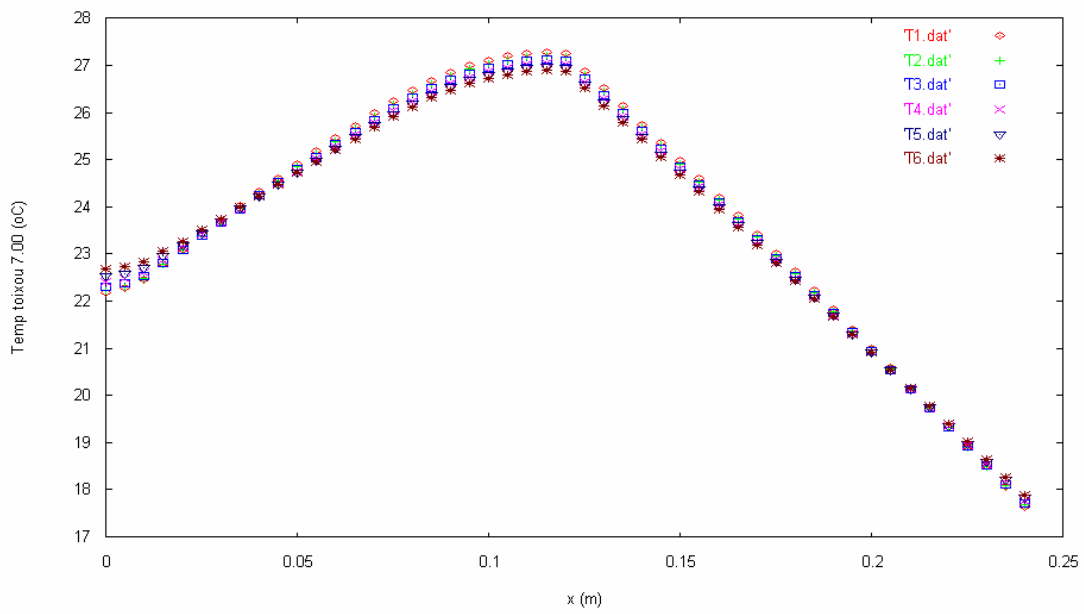




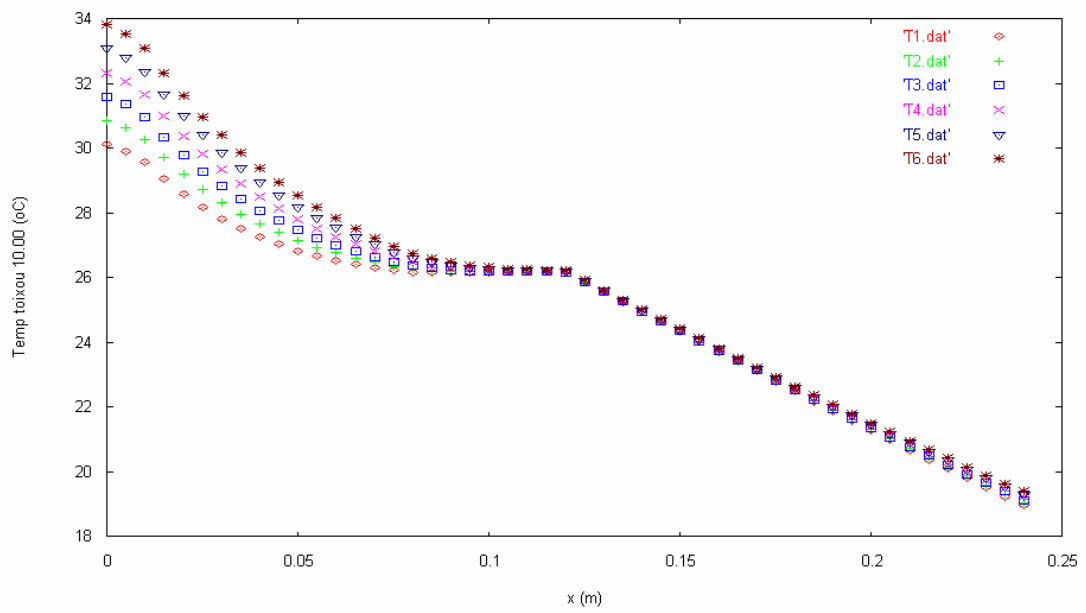
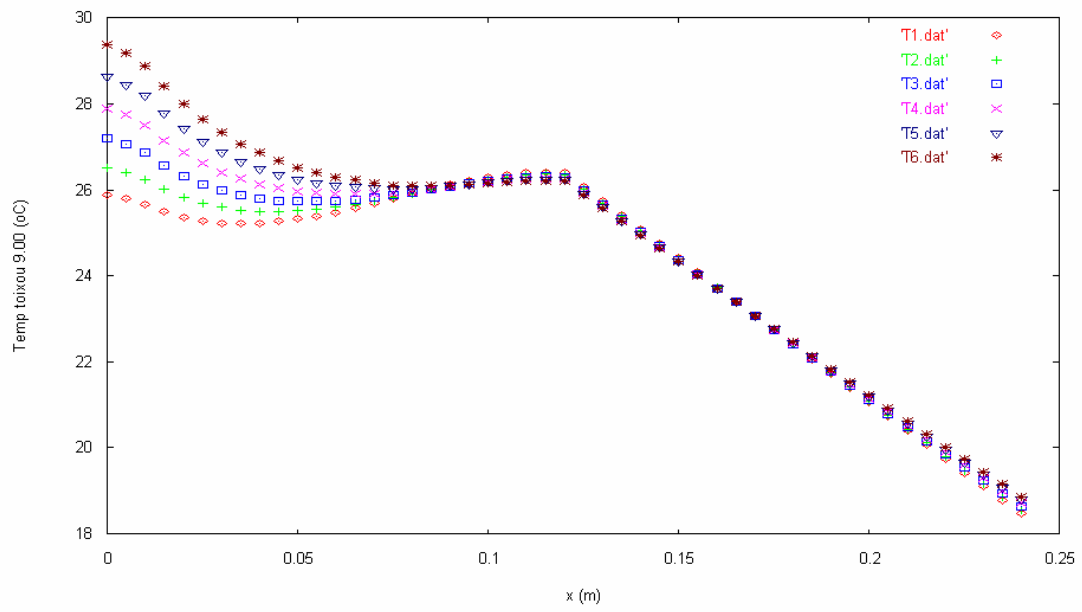


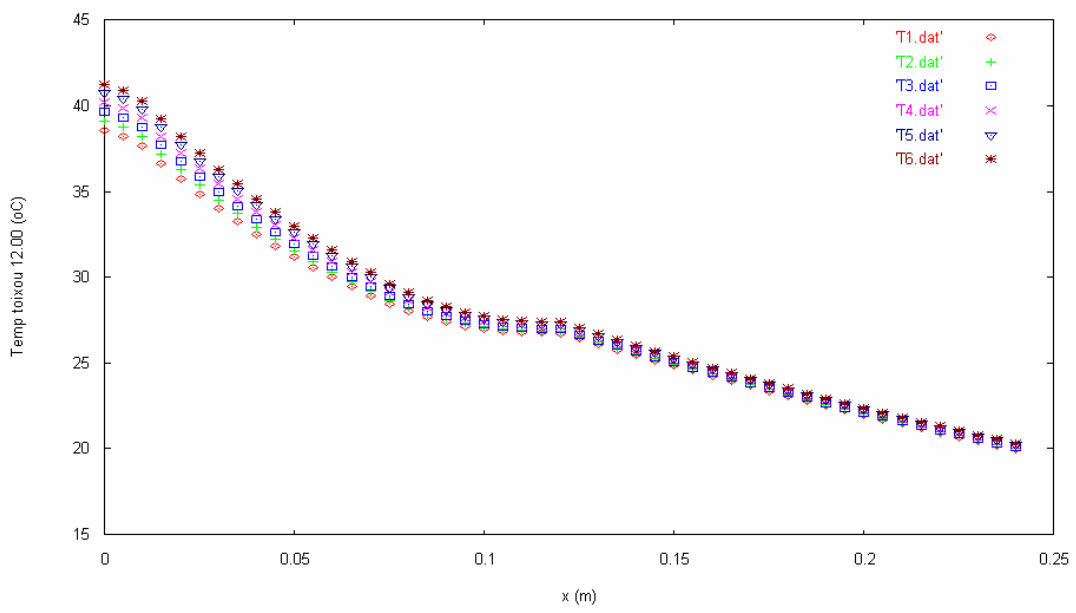
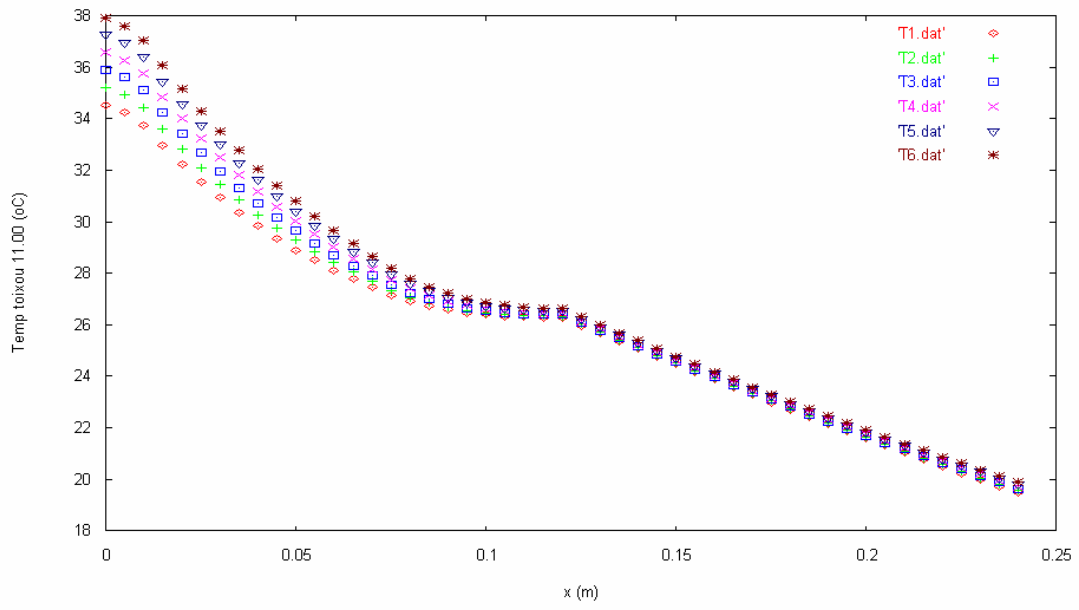


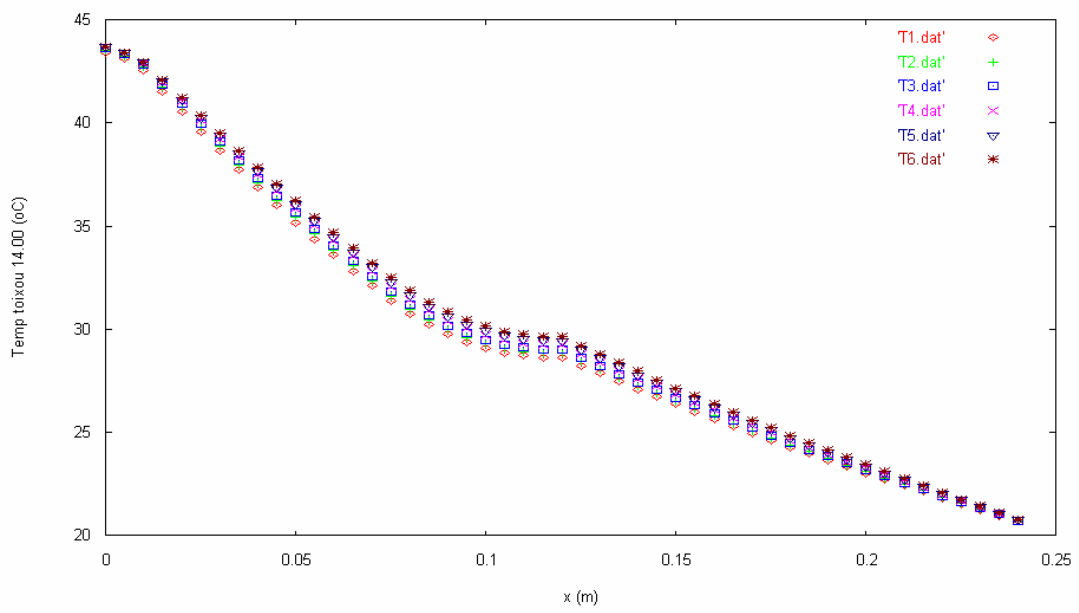
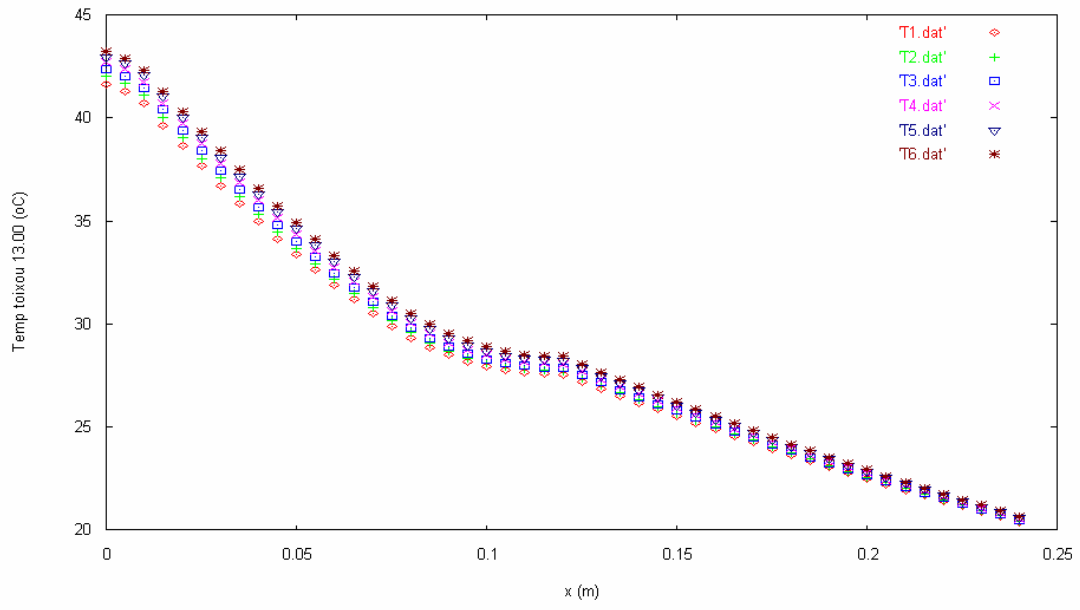
Για $h_{in}=4 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$

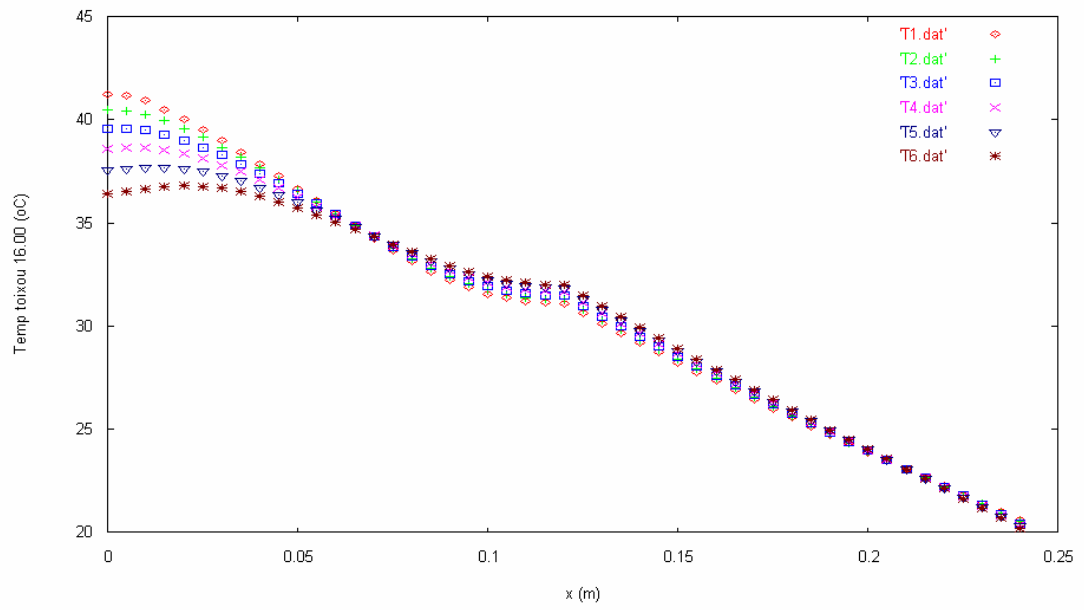
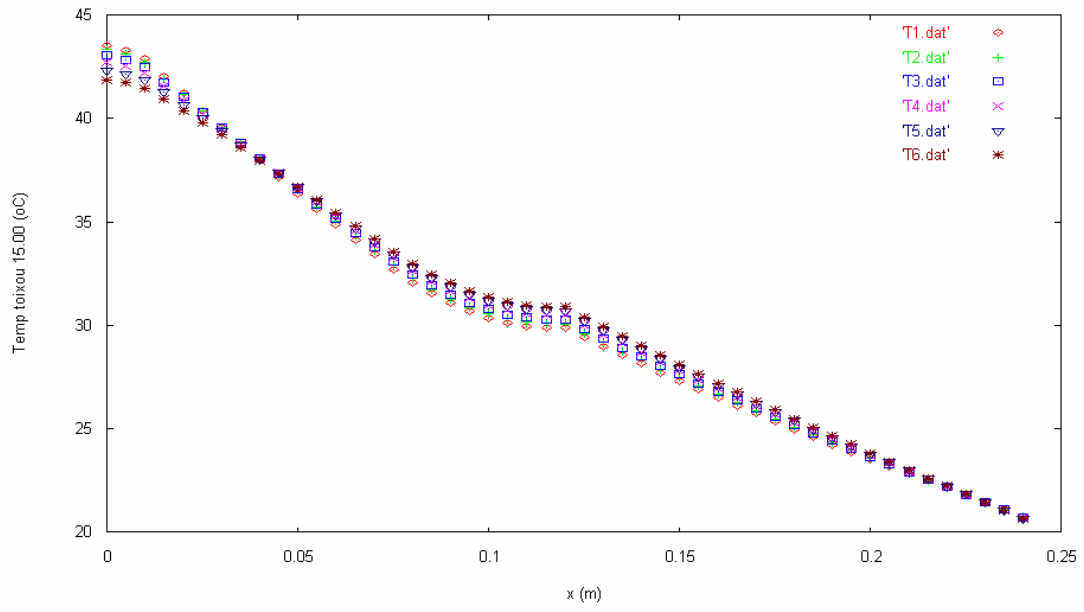


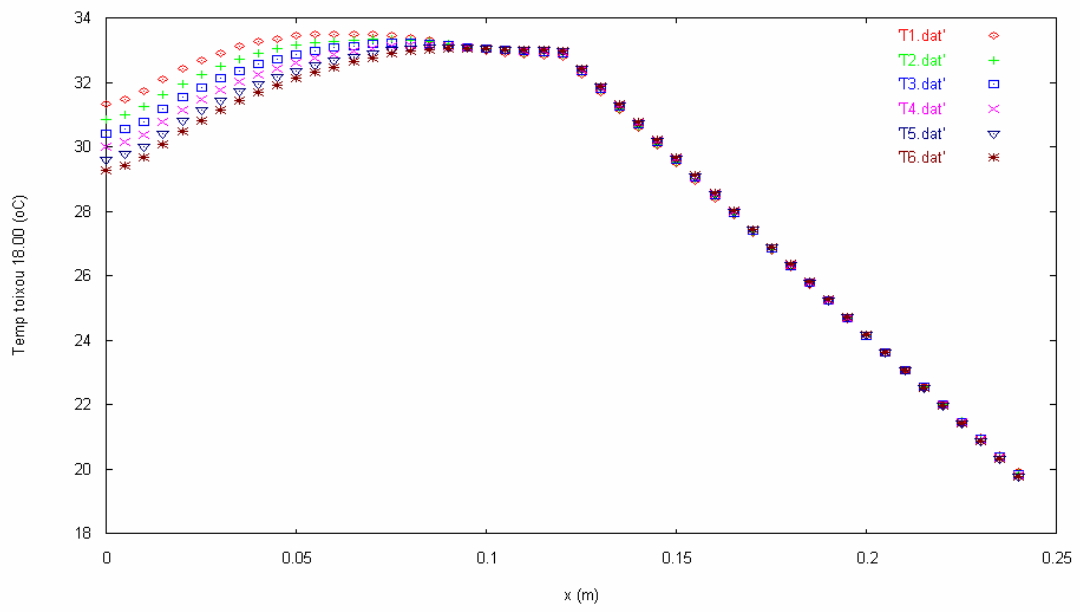
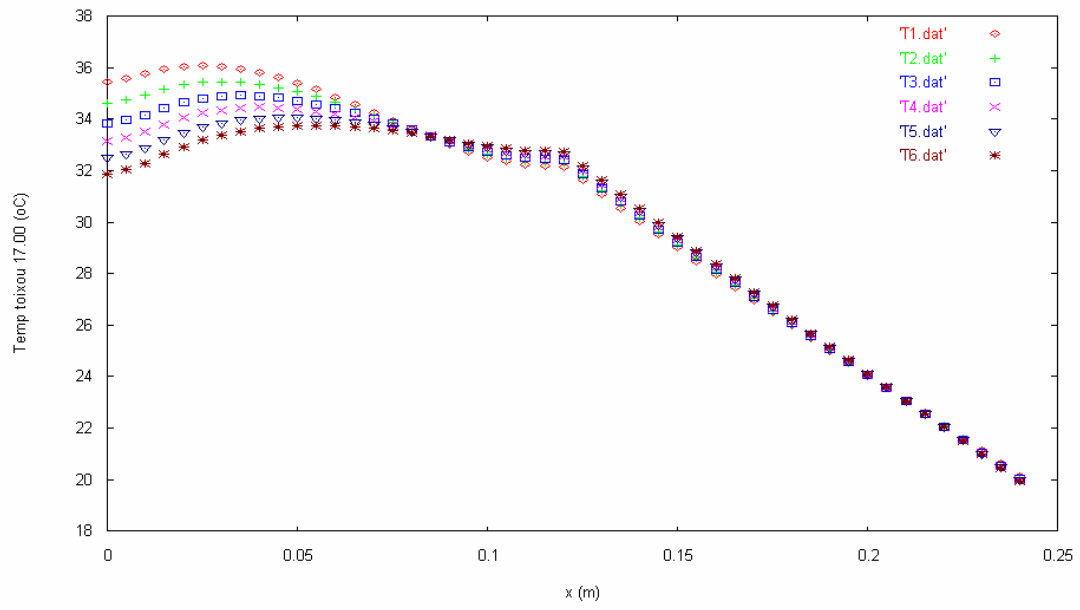
Εικόνα74 : Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος του τοίχου κατά την διάρκεια του 24 ωρου για τον μήνα Νοέμβριο με $h_{in}=4 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$, ακολουθούν και τα διαγράμματα των υπόλοιπων ωρών.

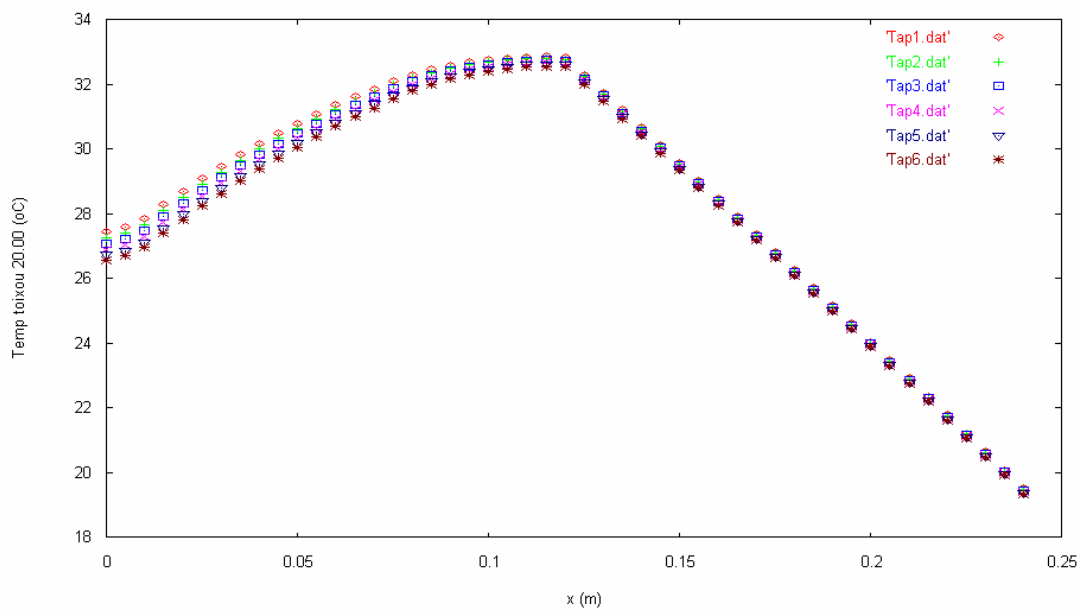
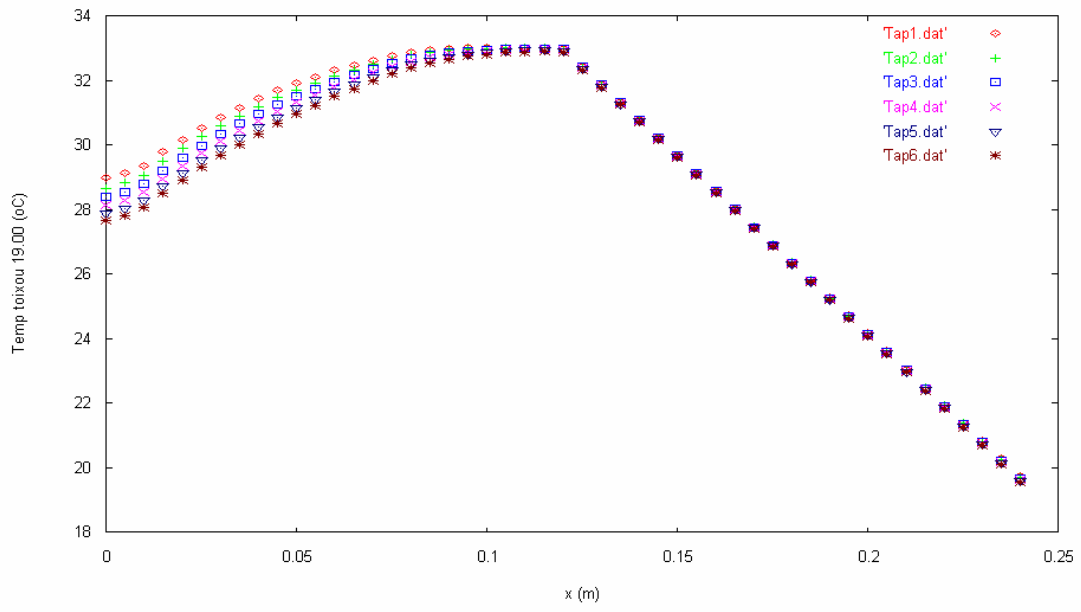


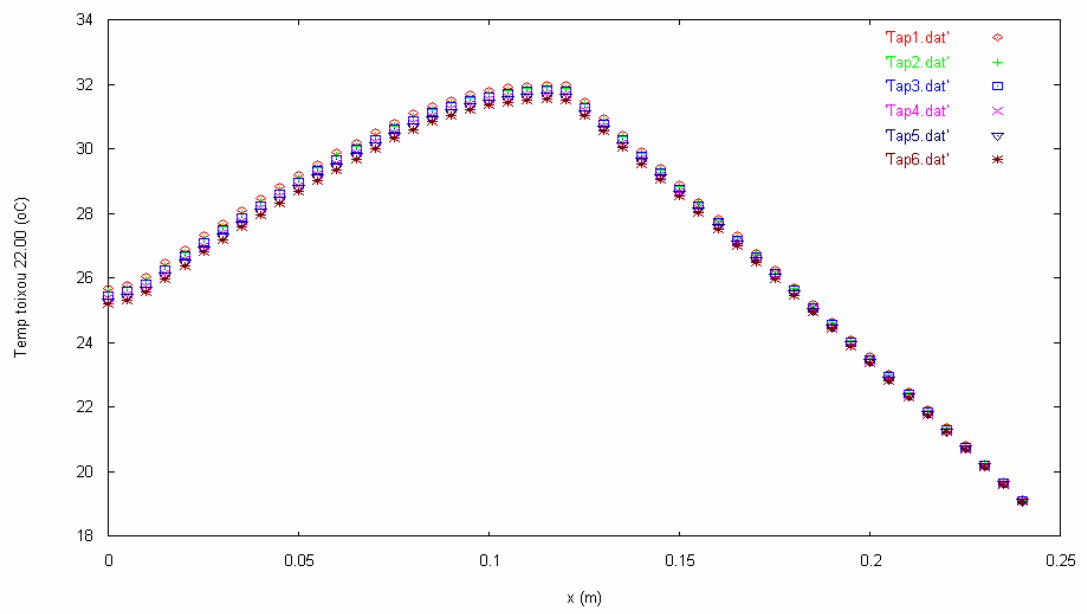
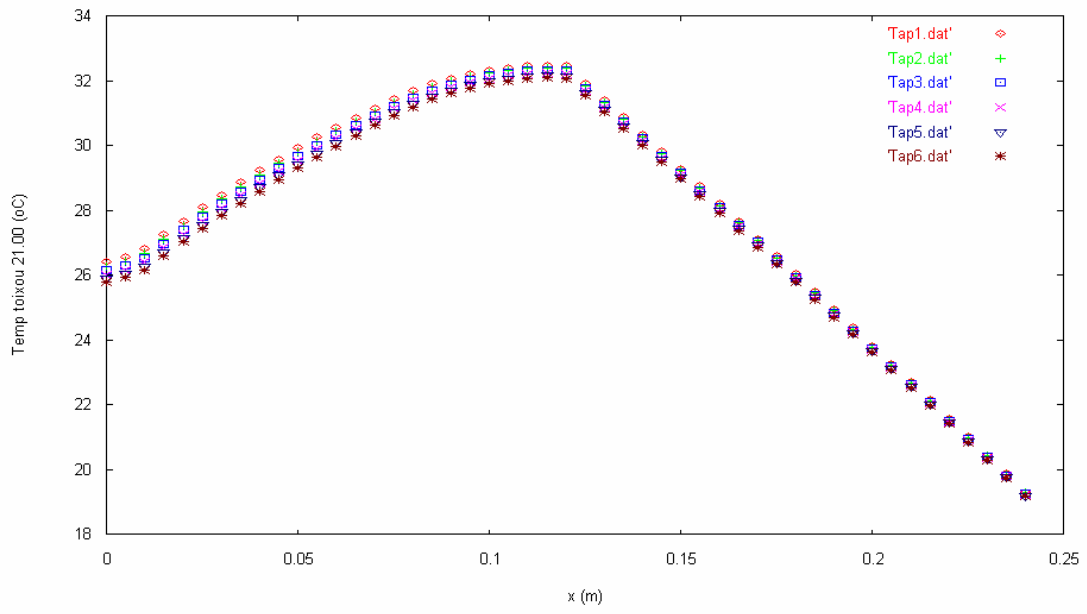


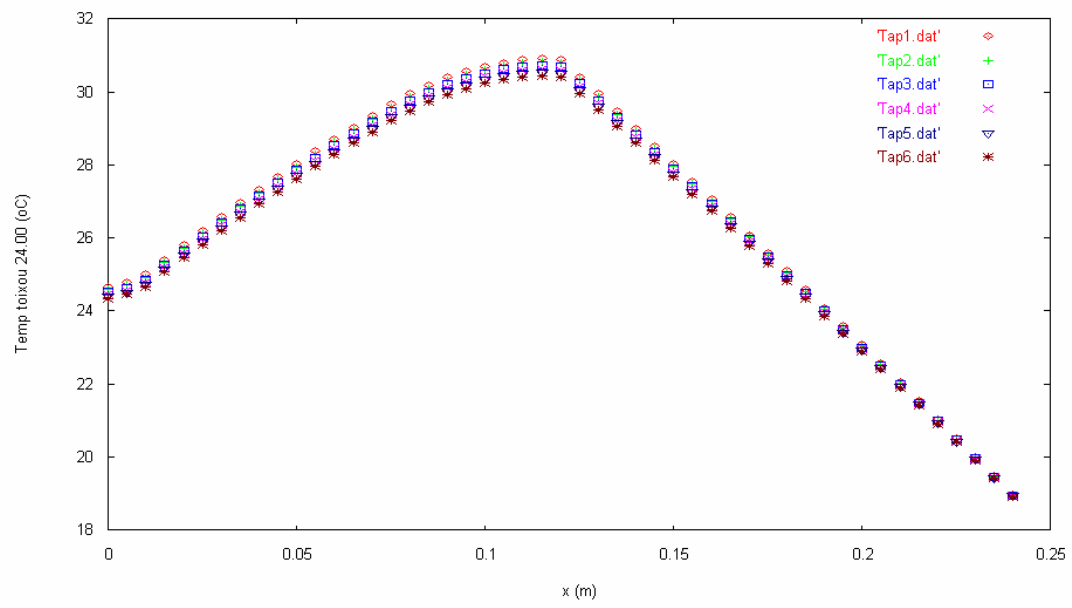
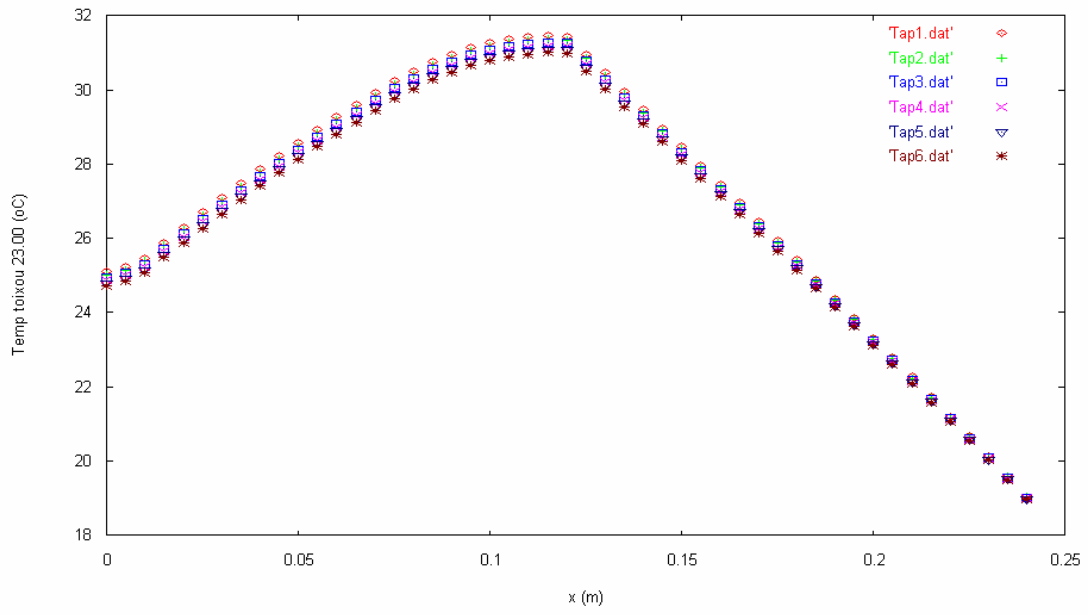


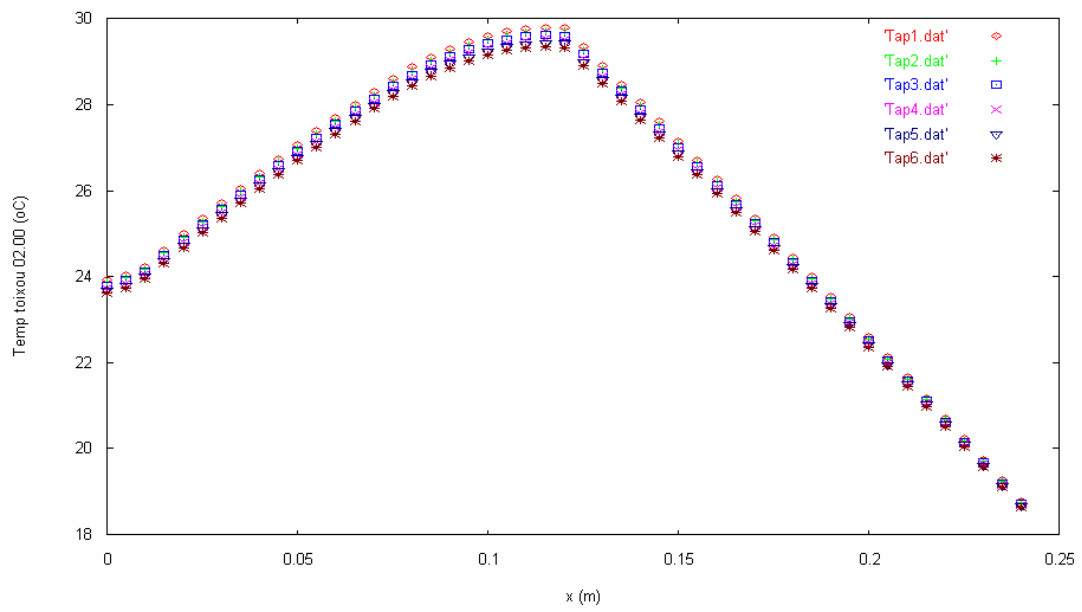
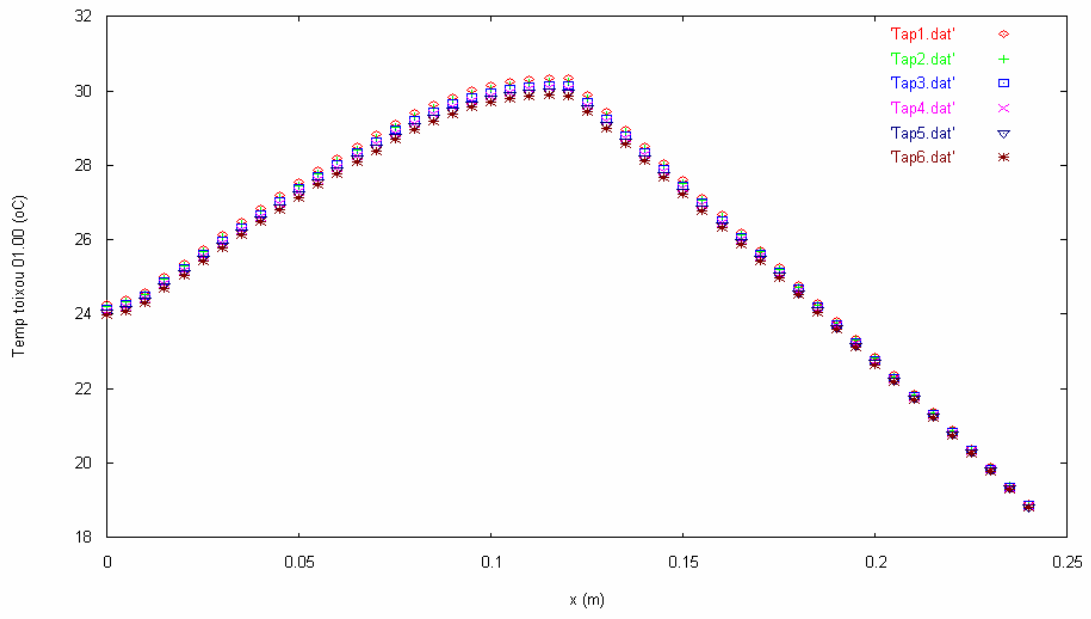


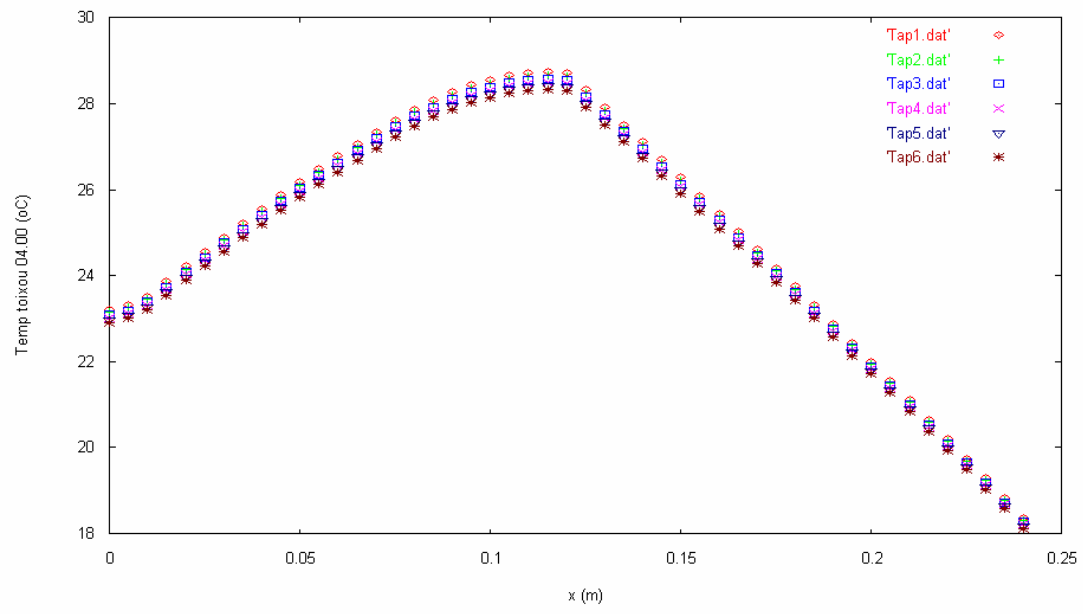
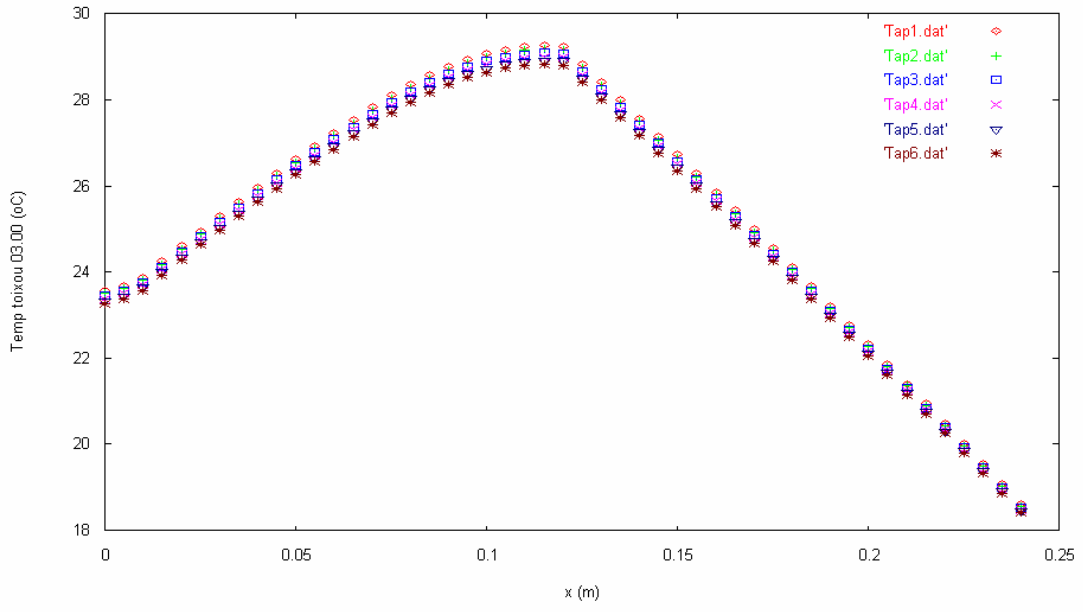


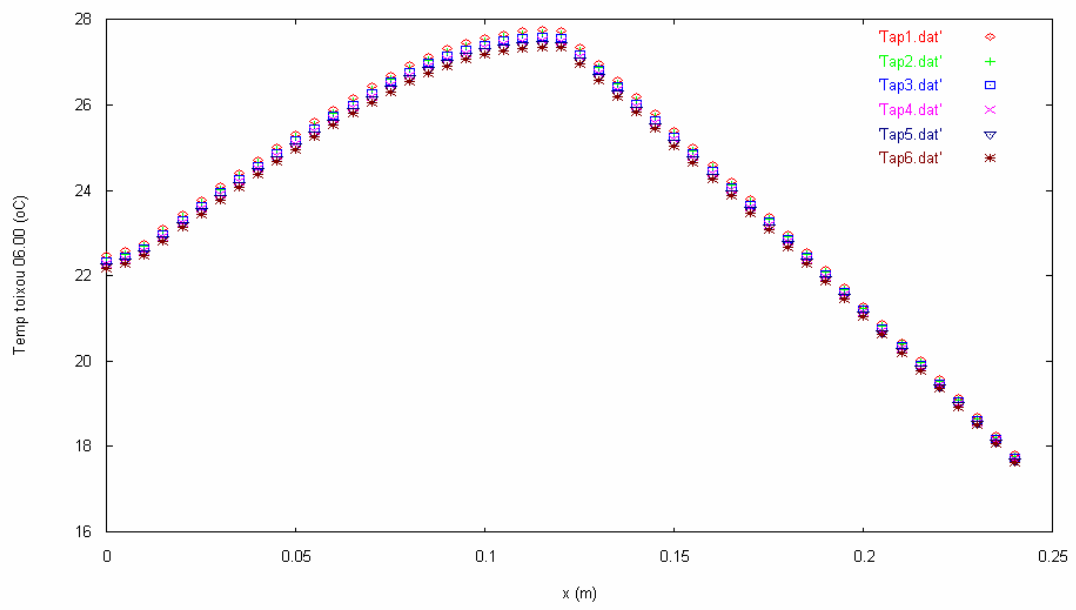
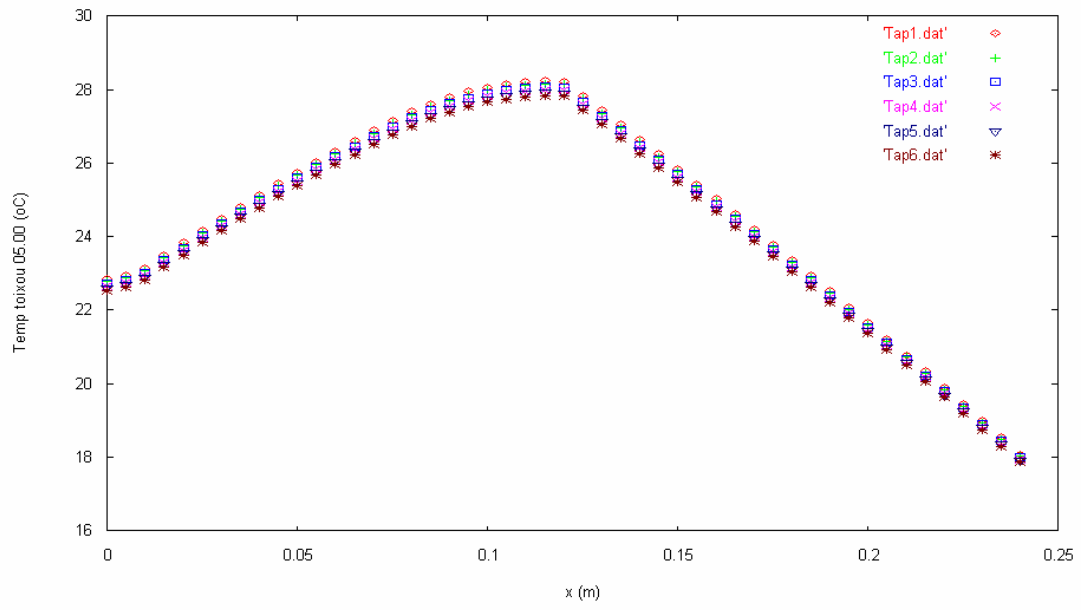




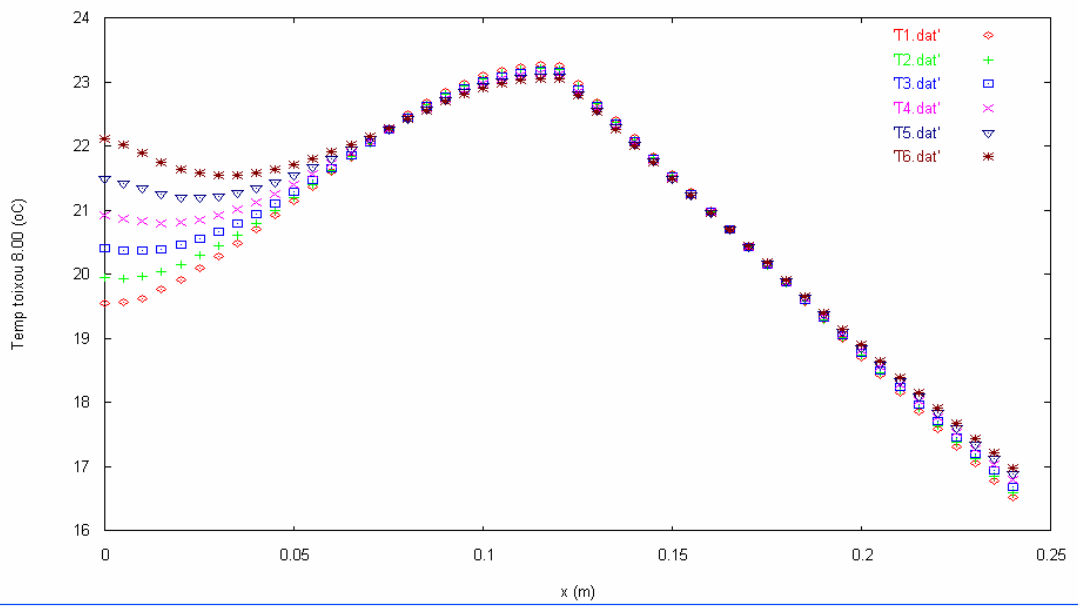
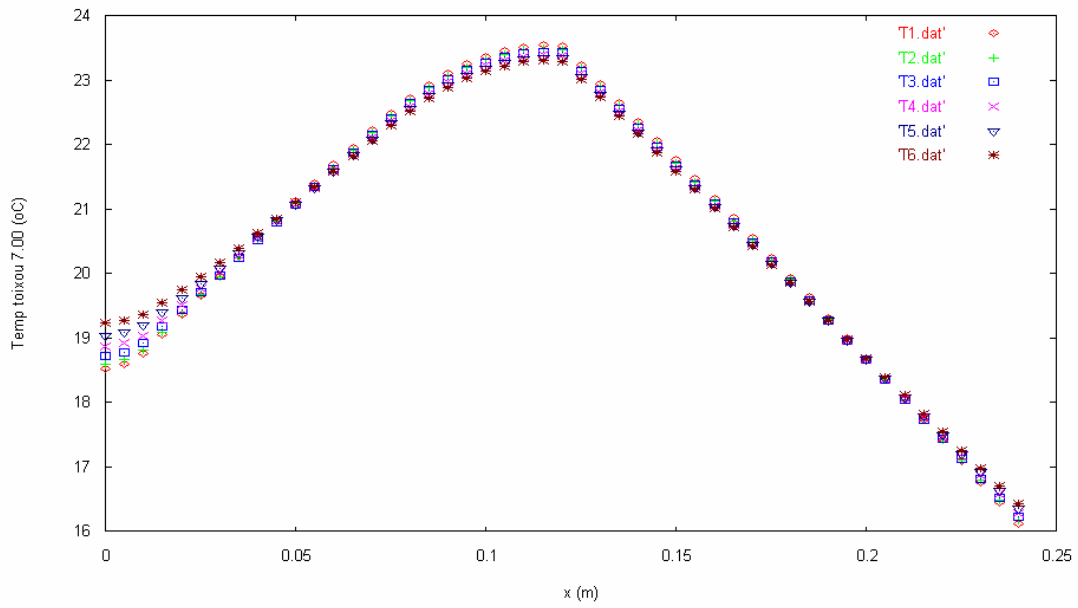




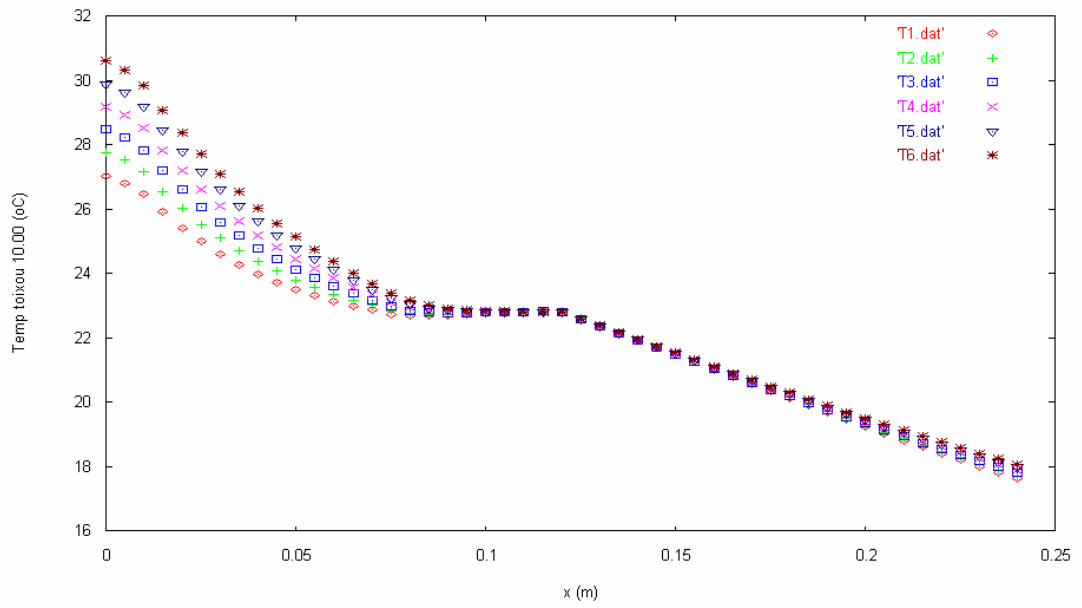
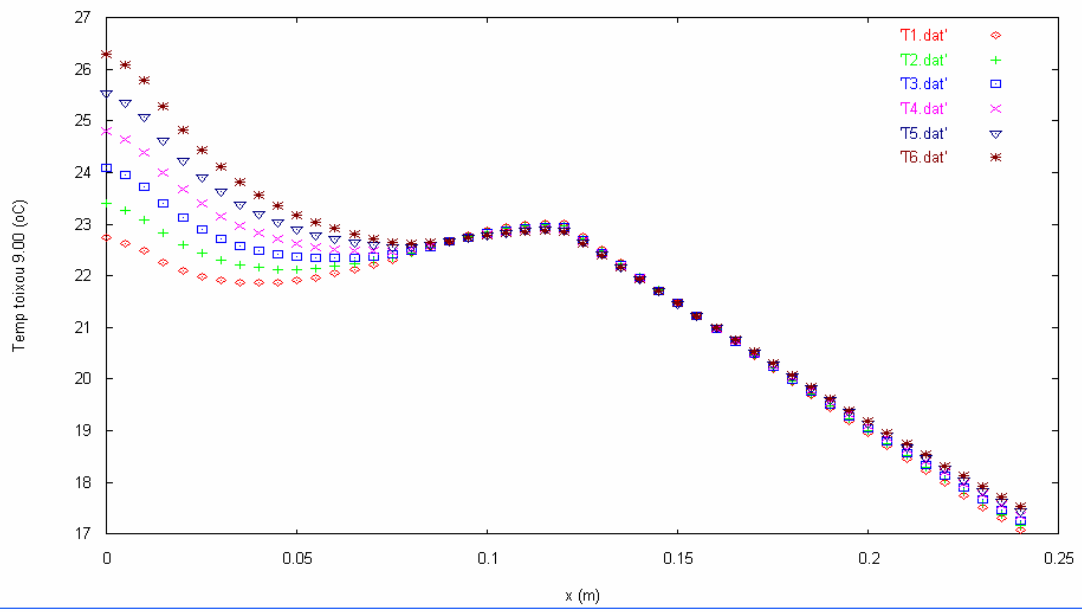


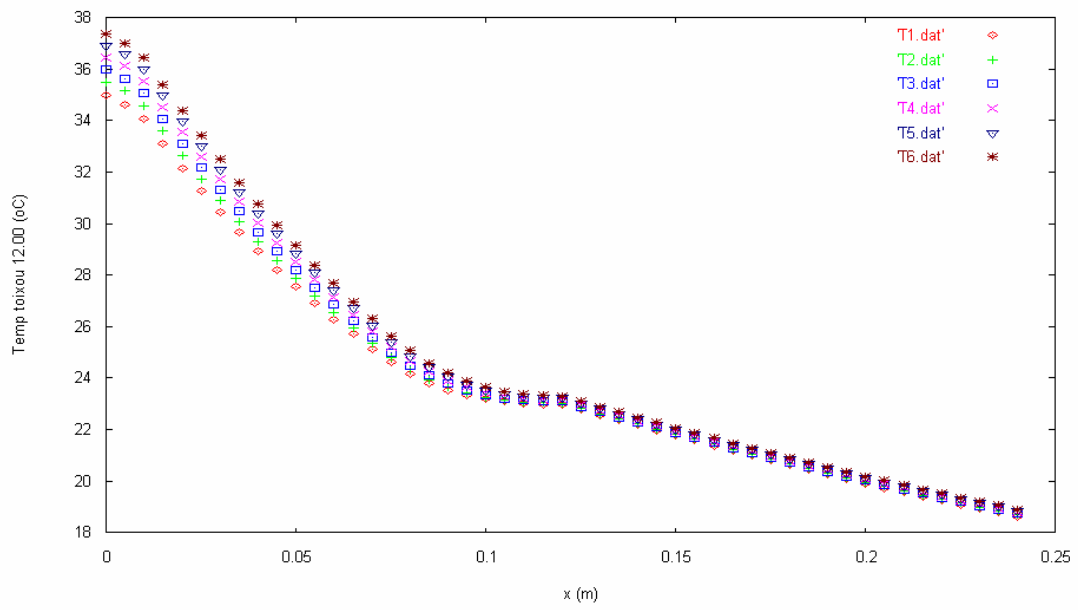
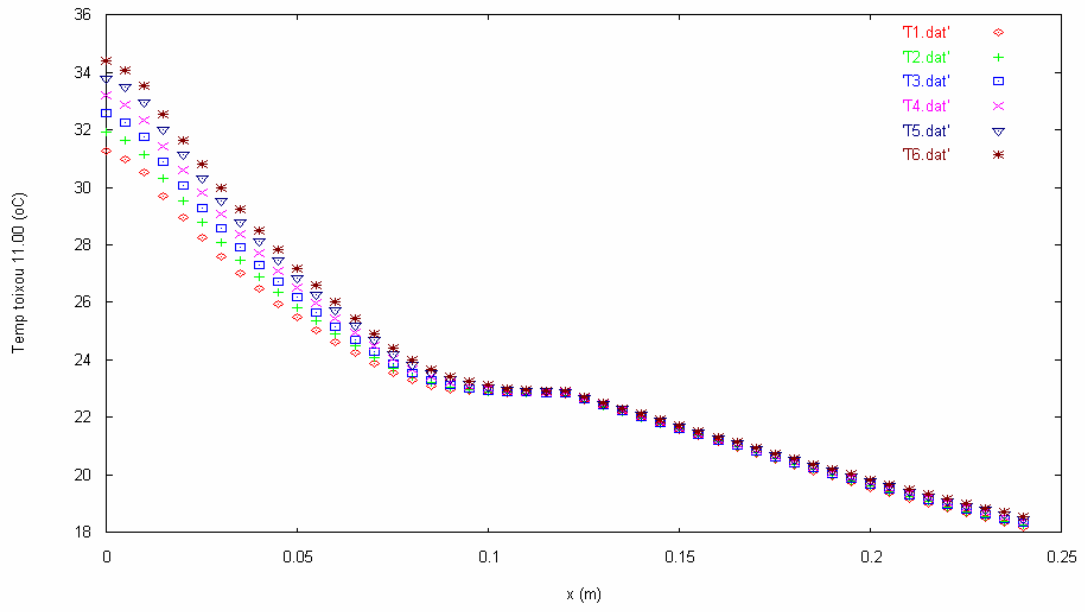


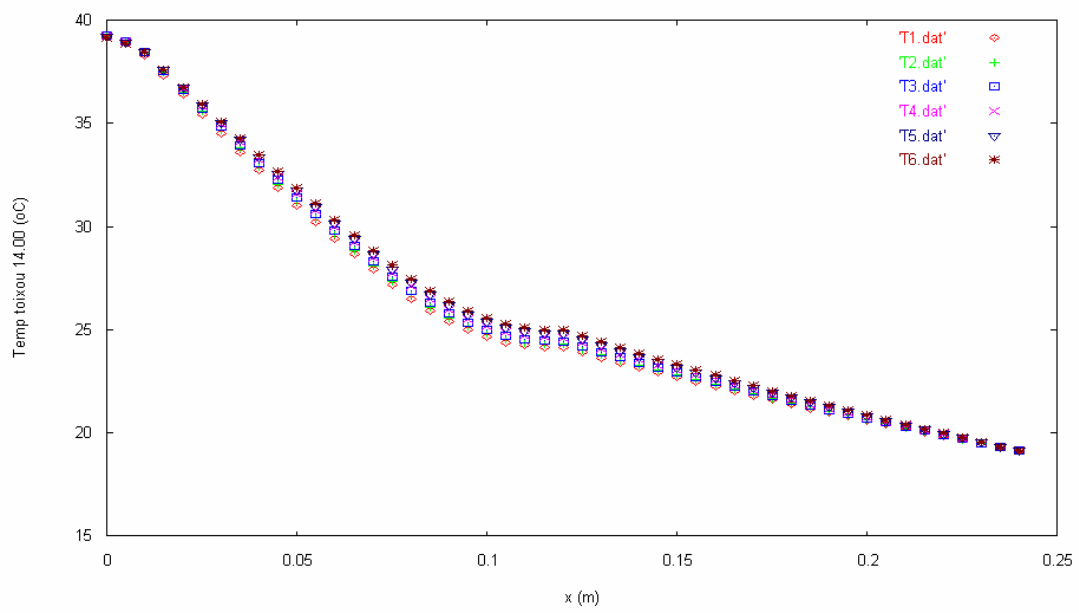
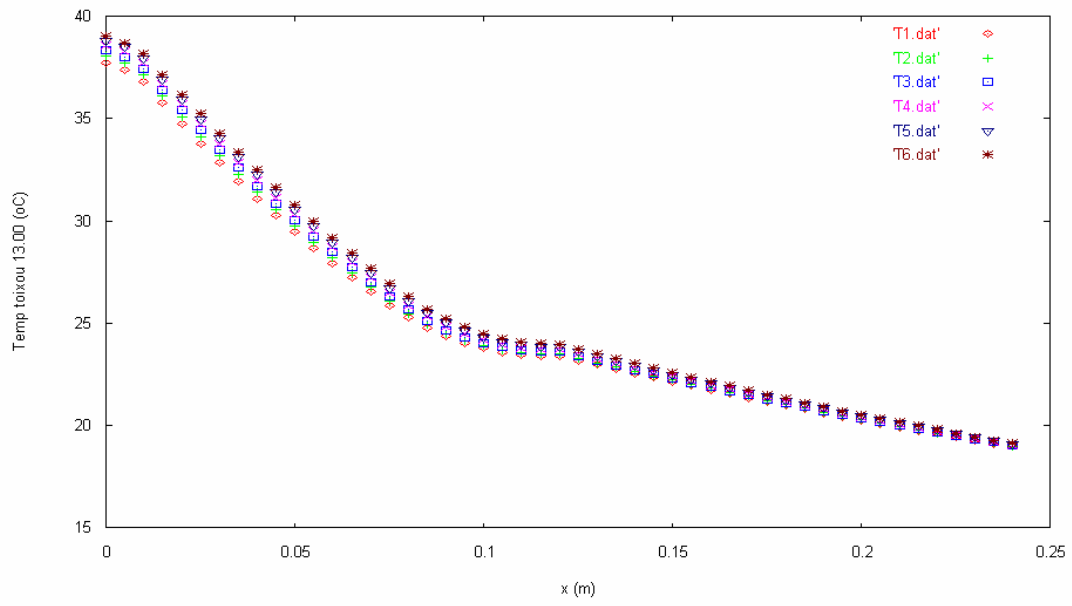
Για $h=8 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$

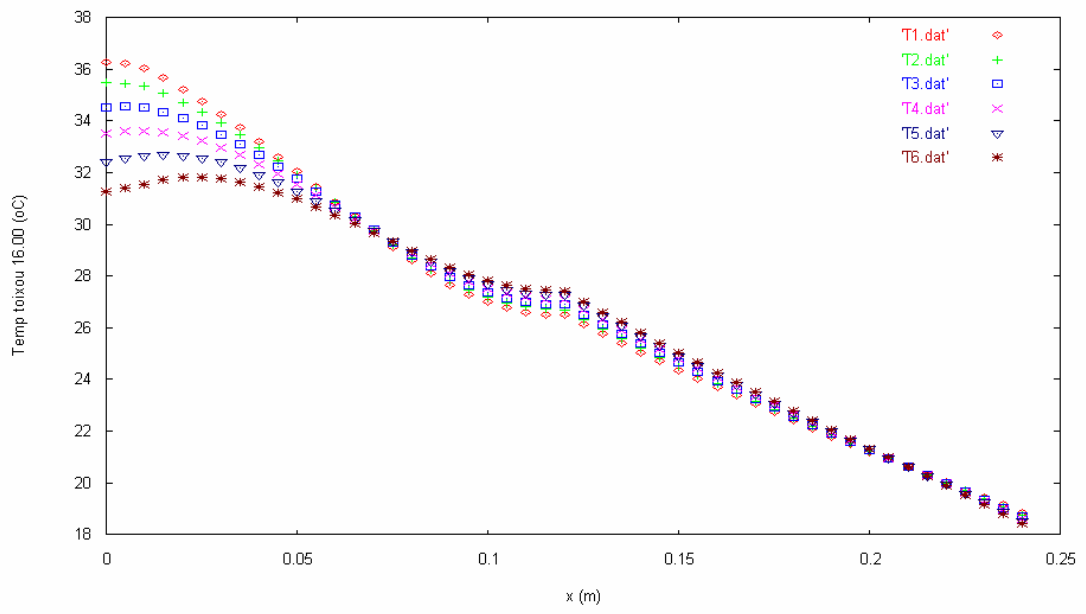
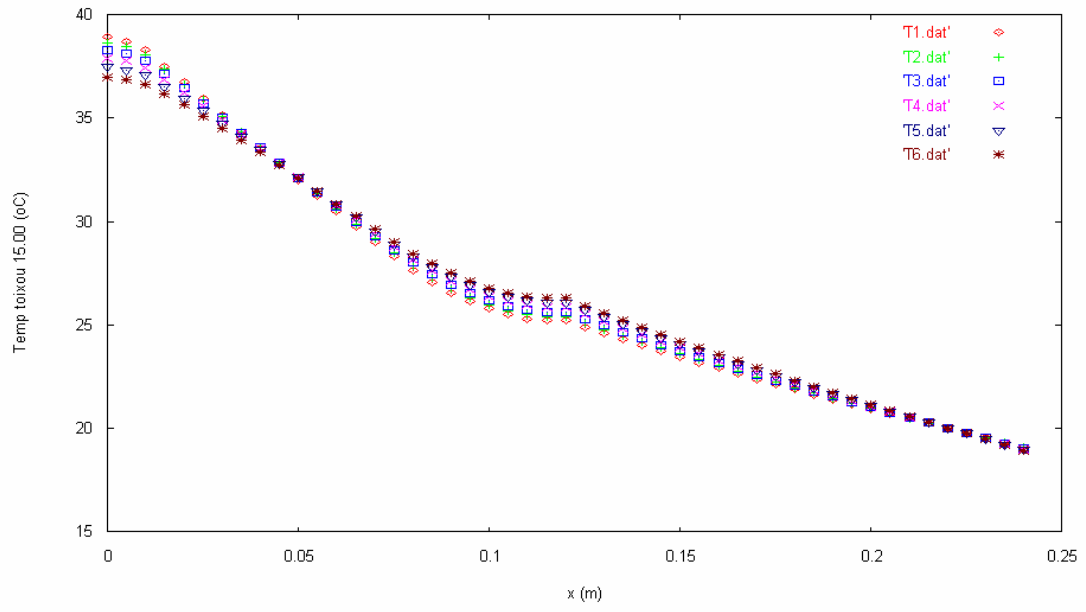


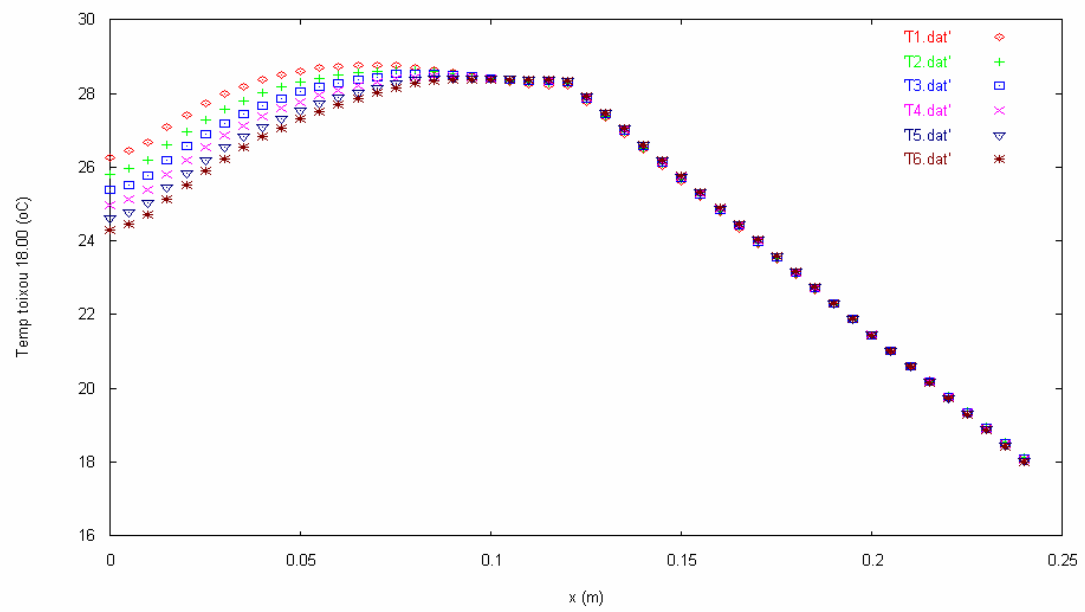
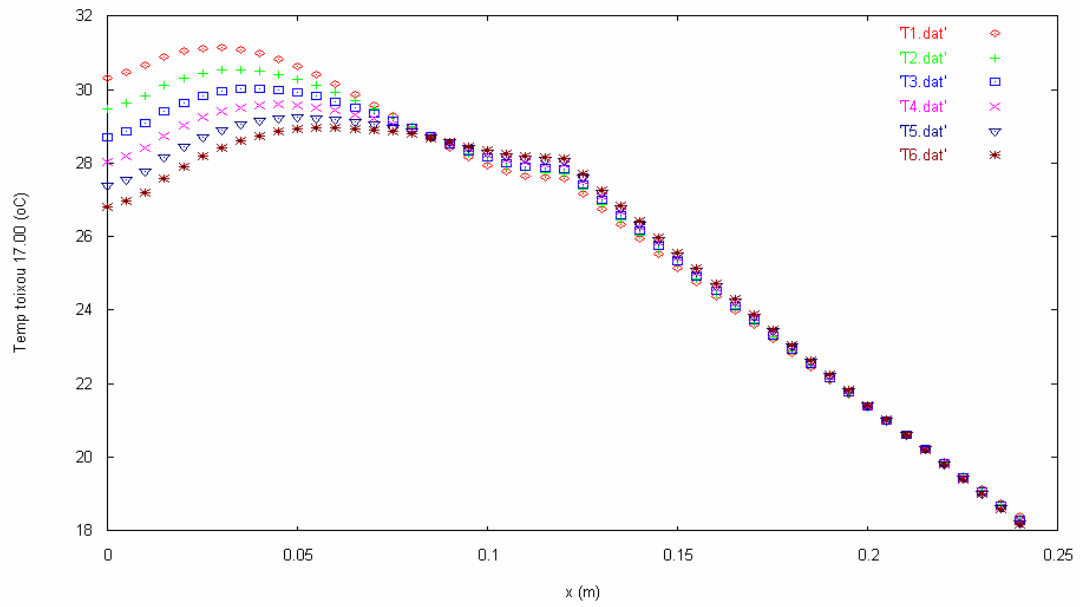
Εικόνα 74 : Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος του τοίχου κατά την διάρκεια του 24 ωρου για τον μήνα Νοέμβριο με $h_{in}=8 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$, ακολουθούν τα διαγράμματα των υπόλοιπων ωρών

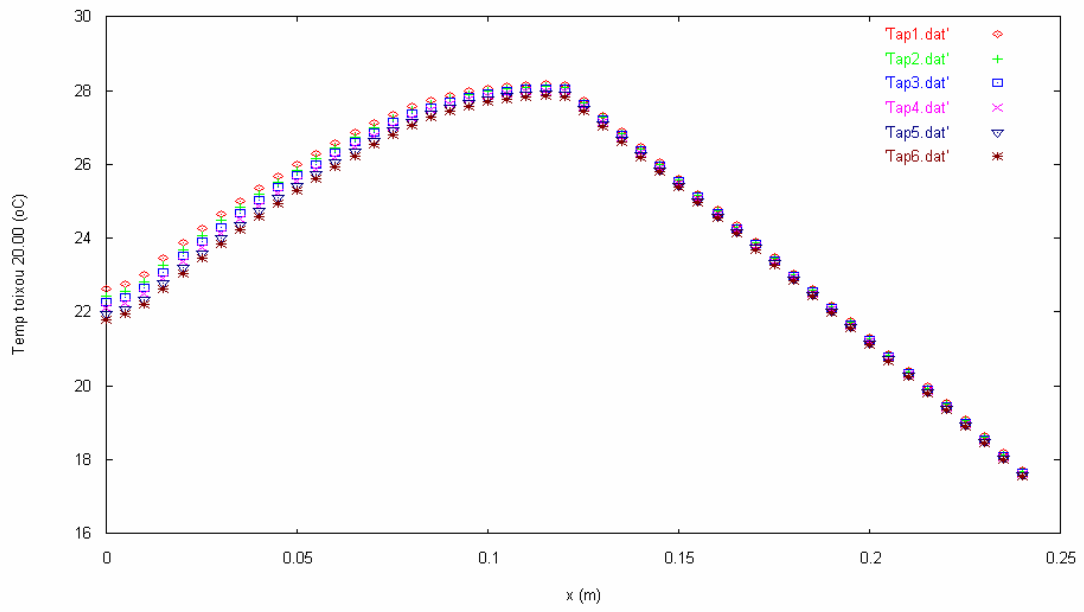
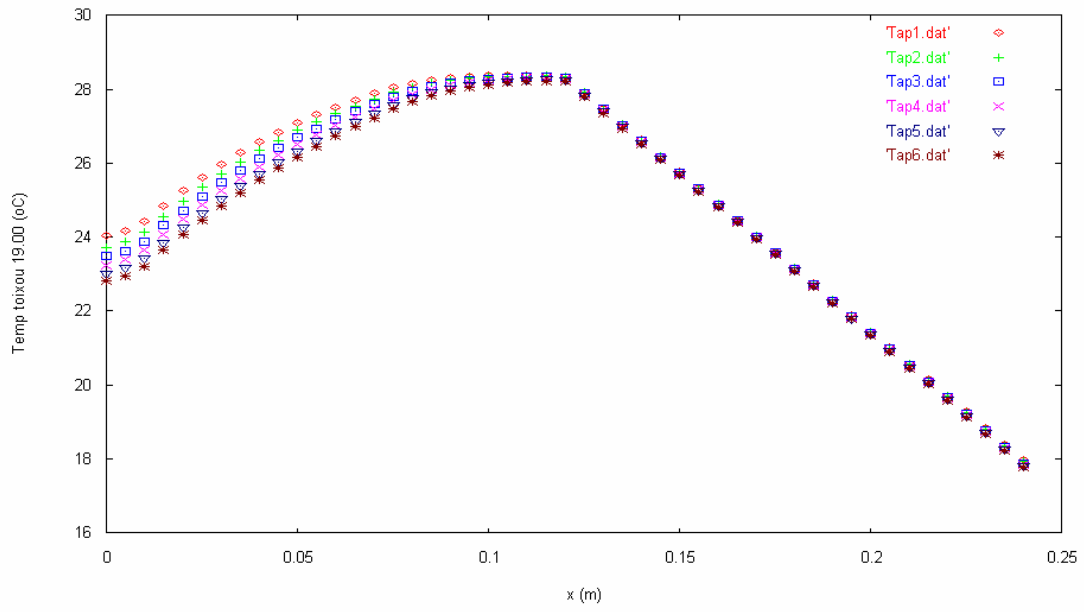


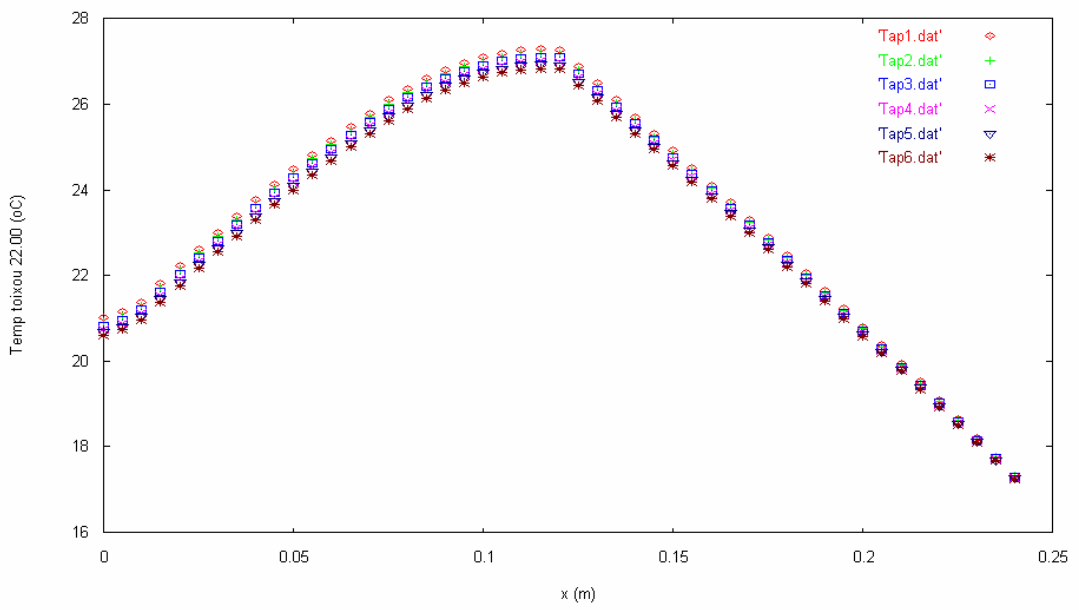
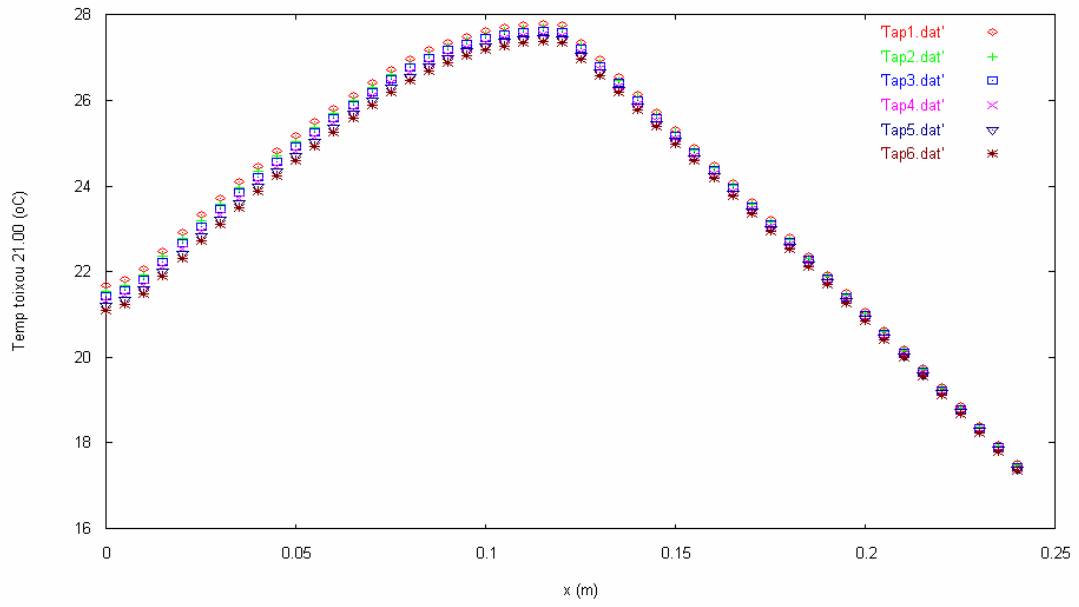


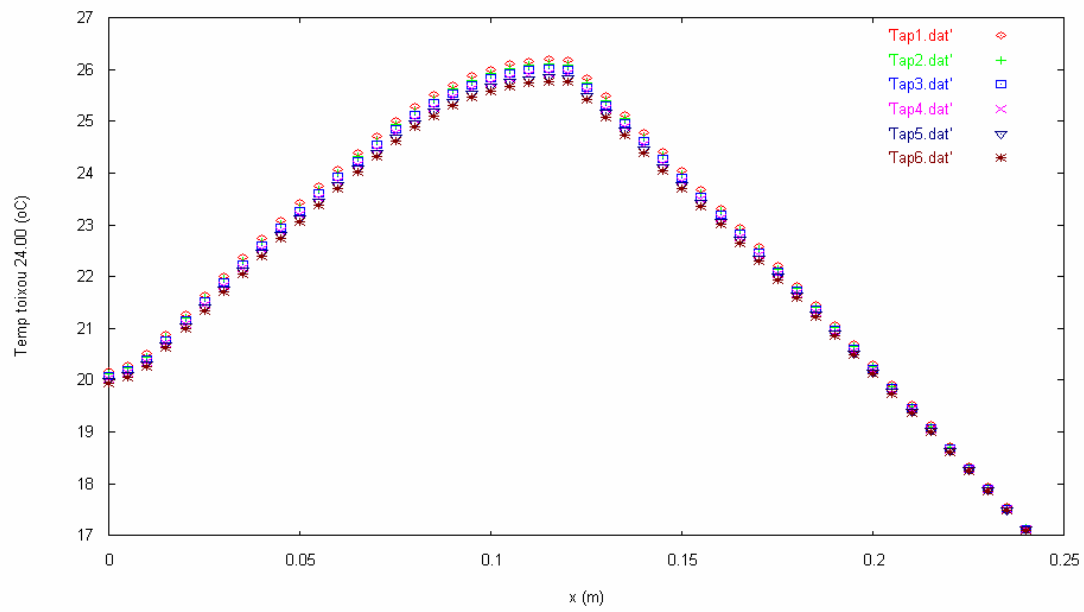
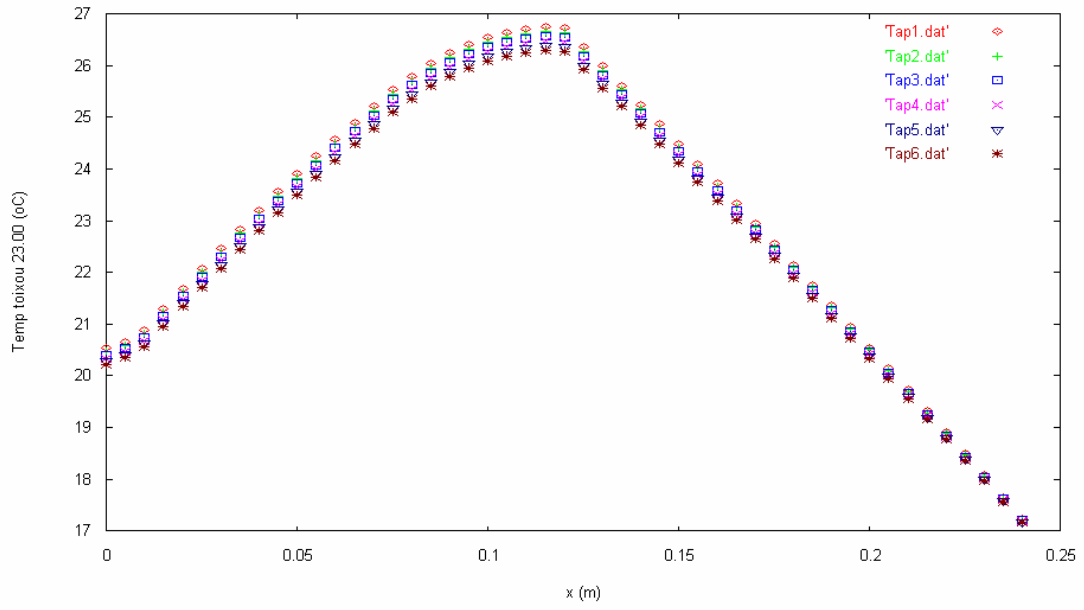


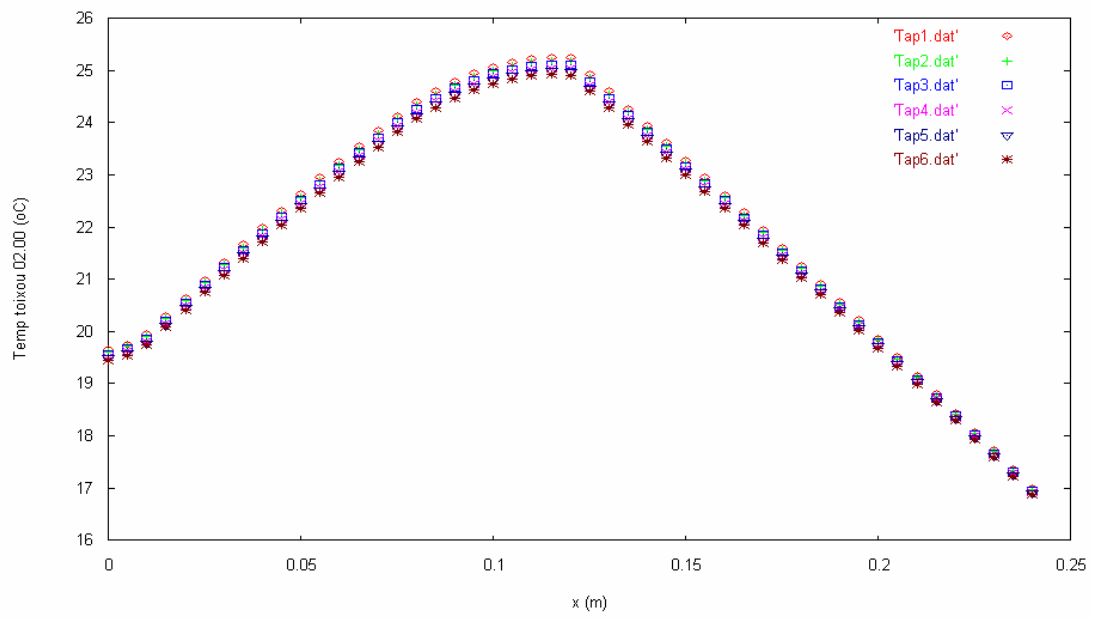
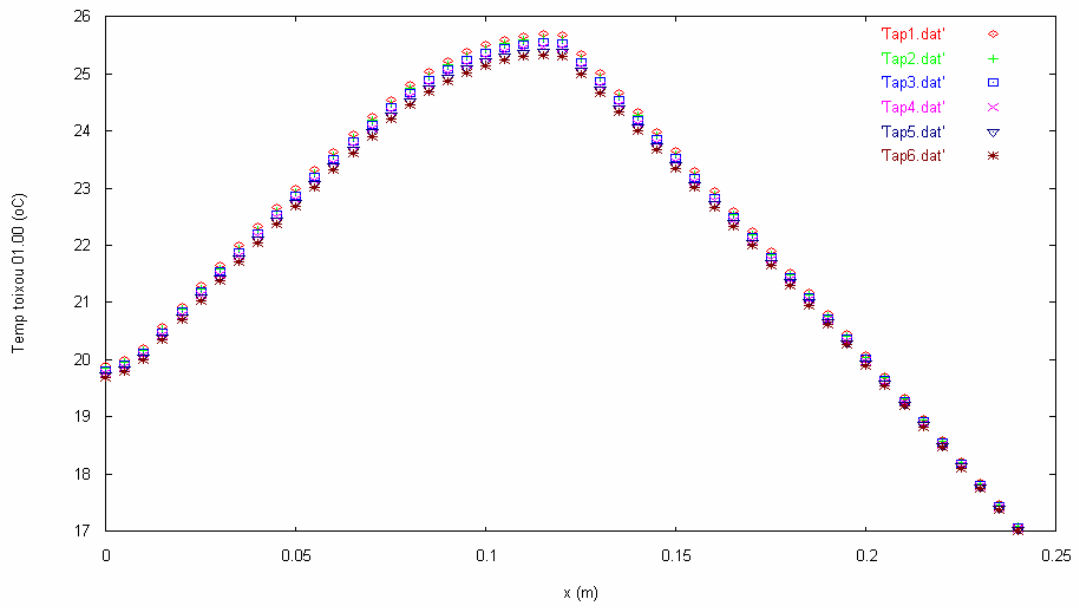


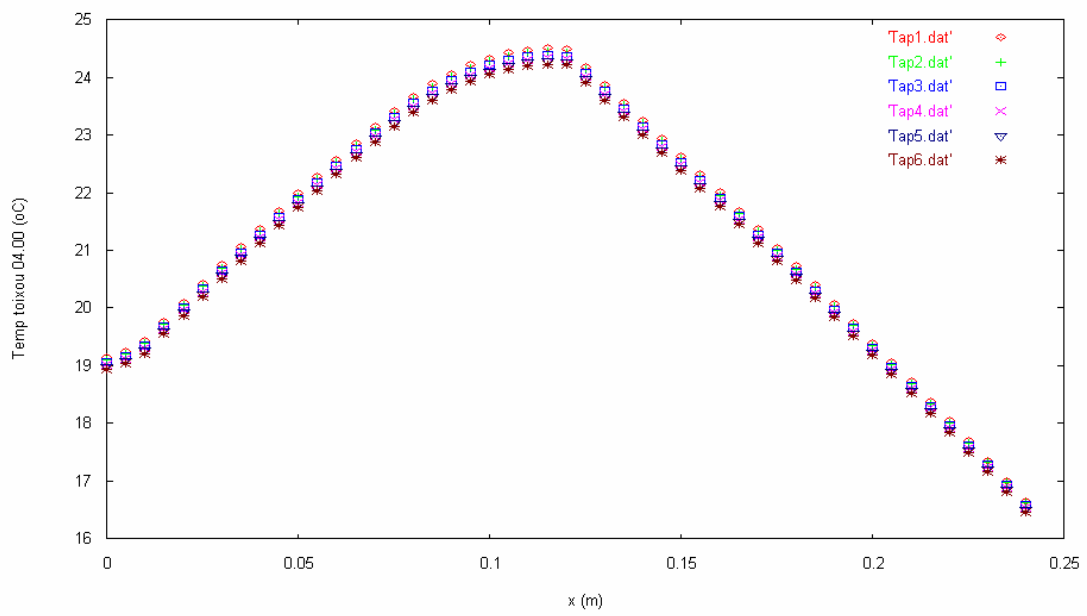
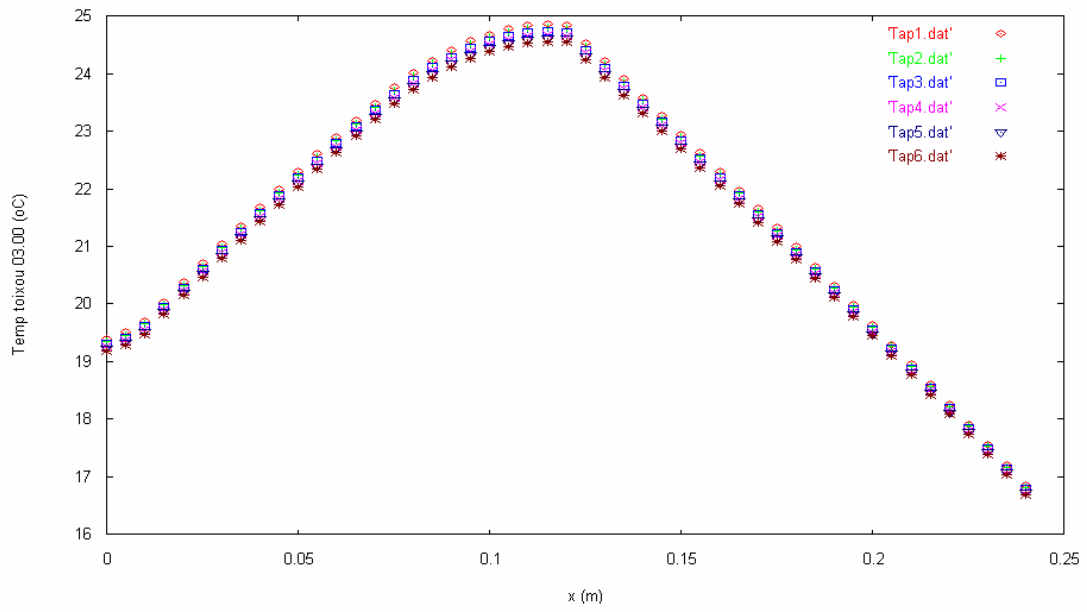


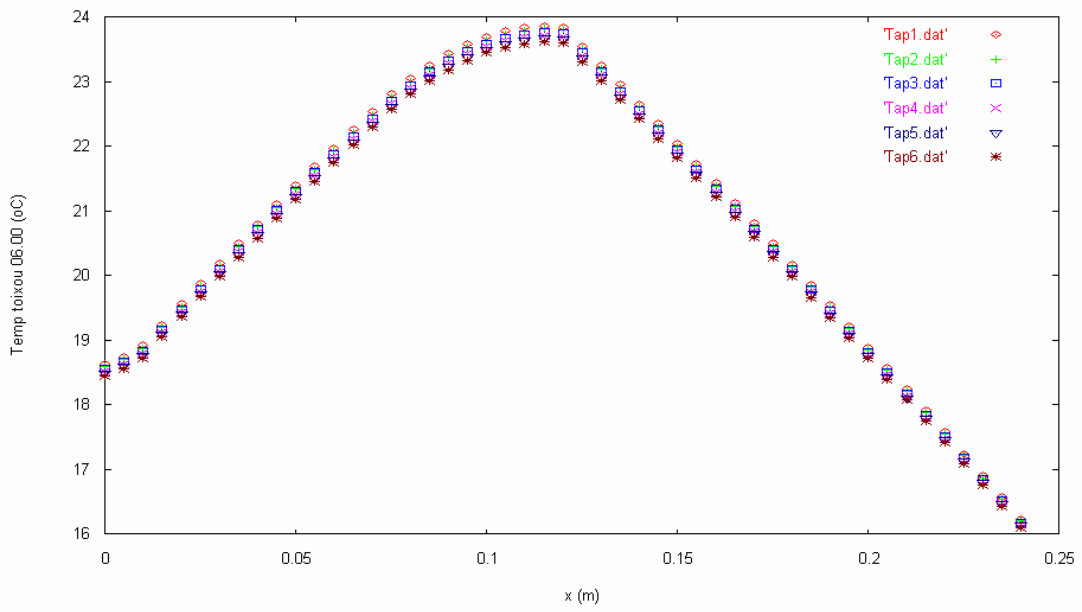
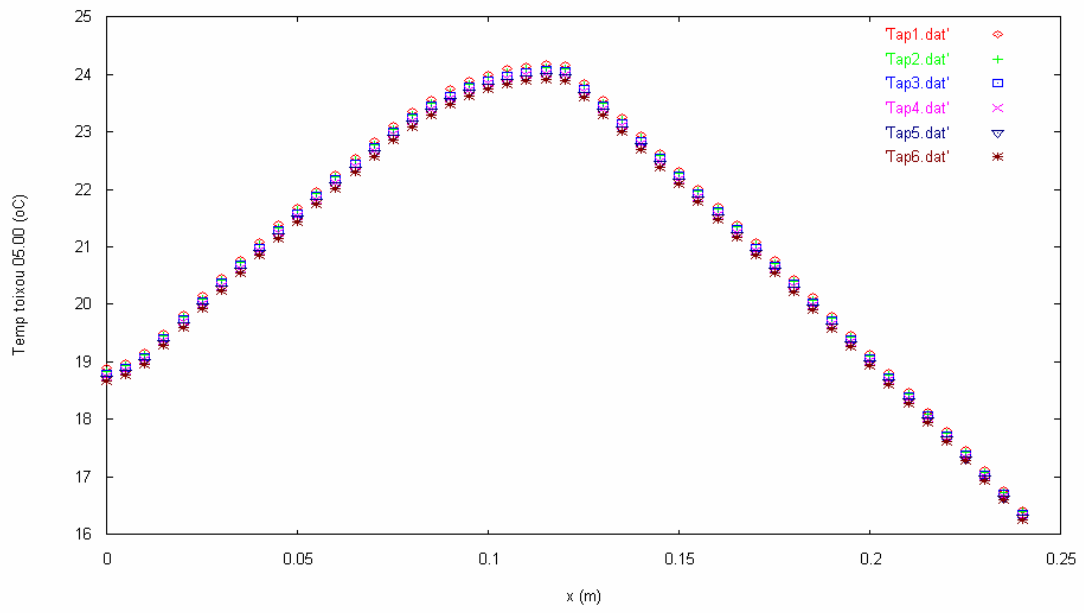






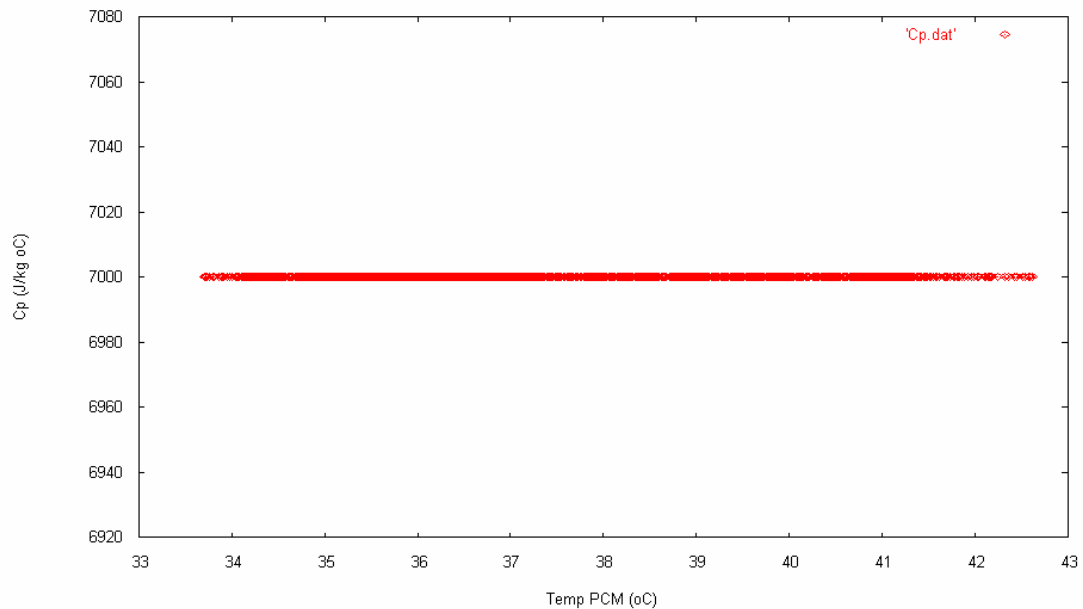






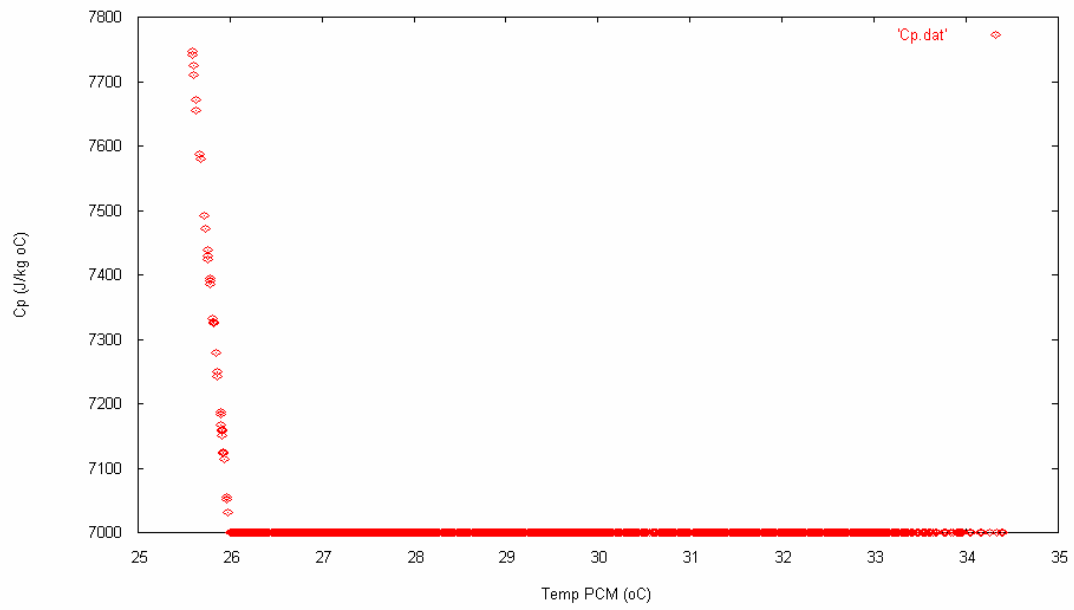
Σημαντική είναι και η επίδραση που έχει η μεταβολή του συντελεστή συναγωγής στο PCM, και πιά συγκεκριμένα στο κατά πόσο μπορούμε να εκμεταλλευτούμε την ποσότητα της λανθάνουσας θερμότητας που αποθηκεύεται σε αυτό ανάλογα με την φάση στην οποία βρίσκεται. Για τον λόγο αυτό παρουσιάζουμε τα διαγράμματα μεταβολής του C_p (J/kg °C) συναρτήσει της θερμοκρασίας που λαμβάνει το PCM.

Για $h=2$ W/m² °C



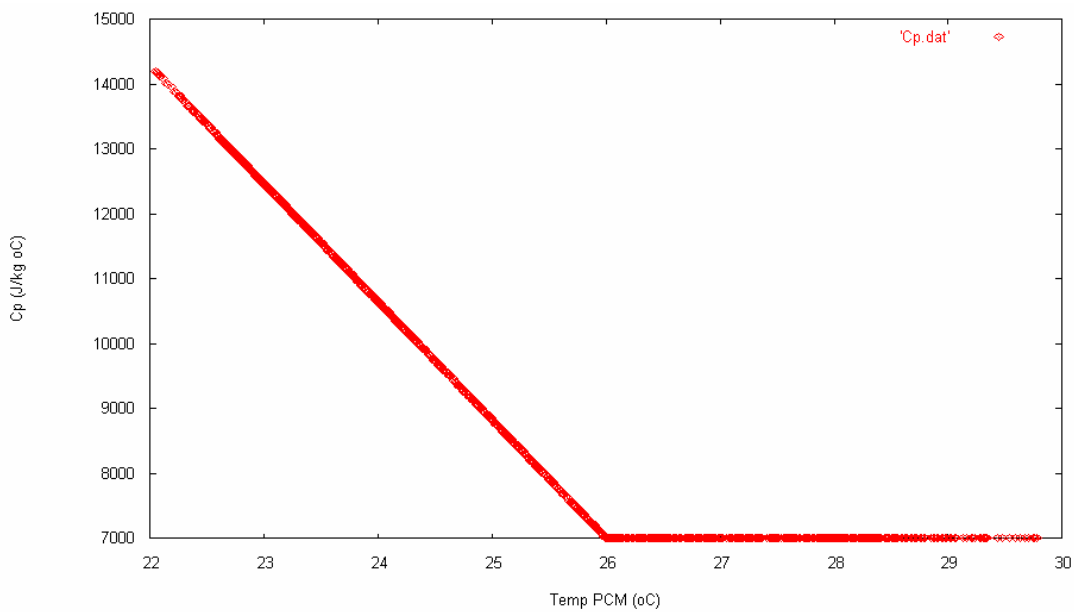
Εικόνα 75 :Μεταβολή του C_p του PCM συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για τον μήνα Νοέμβριο με $h_{in}=2$ W/m² °C

Για $h=4 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$



Εικόνα 76: Μεταβολή του C_p του PCM συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για τον μήνα Νοέμβριο με $h_{in}=4 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$

Για $h=8 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$



Εικόνα 77: Μεταβολή του C_p του PCM συναρτήσει της θερμοκρασίας του PCM για τον μήνα Νοέμβριο με $h_{in}=8 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$

Όπως παρατηρούμε, όταν η τιμή του συντελεστή λαμβάνει την τιμή $h_{in}=2 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, δεν μπορούμε να εκμεταλλευτούμε καθόλου τις ιδιότητες του υλικού αλλαγής φάσης αφού είναι ρευστό κατά την διάρκεια ολόκληρης της ημέρας. Η κατάσταση αυτή φαίνεται να βελτιώνεται για την περίπτωση που το $h_{in}=4 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, αφού τότε το PCM δεν είναι μόνο ρευστό αλλά εισέρχεται και στο τέλος της διφασικής περιοχής, ενώ είναι ακόμα καλύτερη για $h_{in}=8 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Λαμβάνοντας υπ όψην όλα τα παραπάνω καθώς και για να έχουμε μία μέση λύση, η τιμή του συντελεστή συναγωγής επιλέγεται ίση προς $h_{in}=4 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, η οποία μας εξασφαλίζει λογικές τιμές της εσωτερικής θερμοκρασίας, ούτε πολύ υψηλές ούτε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες κατά μήκος του τοίχου, συγκριτικά πάντα με αυτές που θα μπορούσαμε να επιτύχουμε, και εκμετάλλευση της λανθάνουσας θερμότητας που αποθηκεύει το υλικό αλλαγής φάσης που επιλάξαμε.

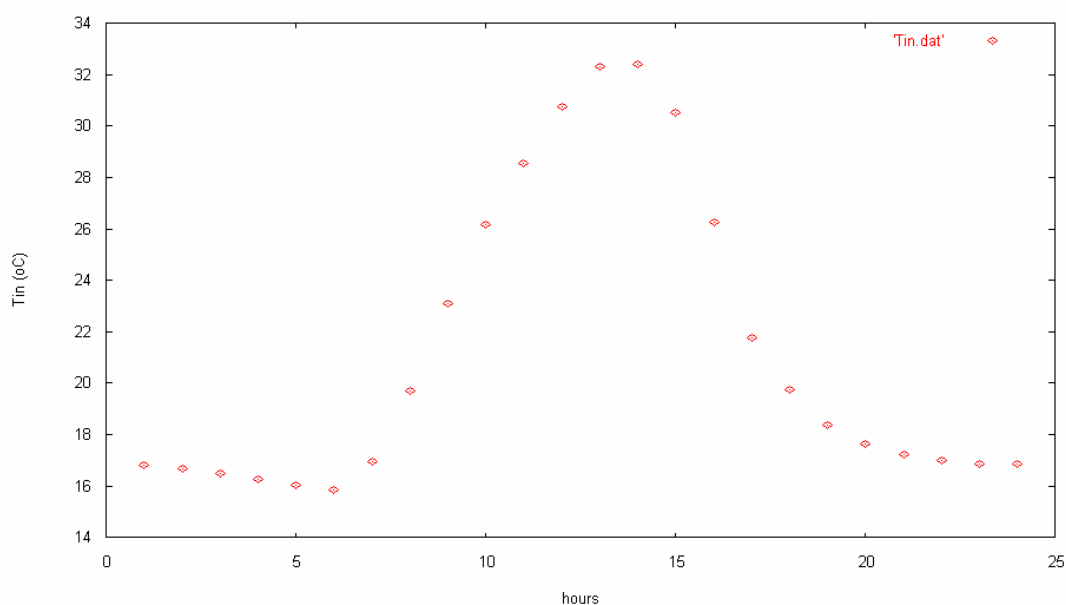
16.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων και παραμετρική διερεύνηση για τον μήνα Νοέμβριο.

Σε αυτή την παράγραφο θα παρουσιαστούν αναλυτικά όλα τα διαγράμματα που προκύπτουν από τους υπολογισμούς του προγράμματος, και αφορούν στην κατανομή τόσο της θερμοκρασίας του δωματίου όσο και του τοίχου κατά την διάρκεια της 21^{ης} ημέρας του Νοεμβρίου, με χρονικό βήμα δεκαλέπτου. Κάθε διάγραμμα που παρουσιάζει την θερμοκρασιακή κατανομή κατά μήκος του τοίχου απεικονίζει 6 μεταβολές, που αντιστοιχούν στα 6 δεκάλεπτα της κάθε ώρας. Μάλιστα, για τις ώρες που έχει ηλιοφάνεια, τα 6 αυτά δεκάλεπτα αντιστοιχούν στα αρχεία T1, T2, T3, T4, T5, T6 και για τις ώρες που δεν έχει ηλιοφάνεια στα αρχεία Tar1, Tar2, Tar3, Tar4, Tar5, Tar6. Επιπλέον, η

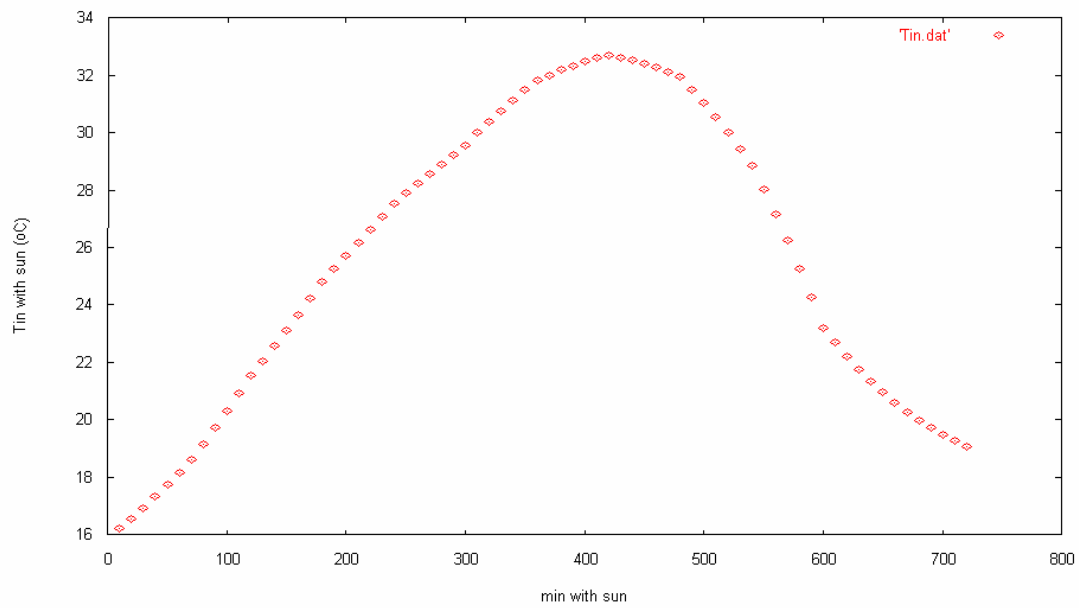
μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας δίδεται σε δύο μορφές. Στην μία φαίνεται η μεταβολή της συναρτήσε των ωρών του εικοσιτετραώρου, και στην άλλη δίδεται η μεταβολή της συναρτήσε των λεπτών κατά την διάρκεια των οποίων έχουμε ηλιοφάνεια και η μεταβολή της συναρτήσε των λεπτών κατά την διάρκεια των οποίων δεν έχουμε ηλιοφάνεια.

16.3.1 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων για την κλασσική διάταξη του τοίχου για τον μήνα Νοέμβριο (σοβάς-τούβλο –PCM-μόνωση-τούβλο-σοβάς)

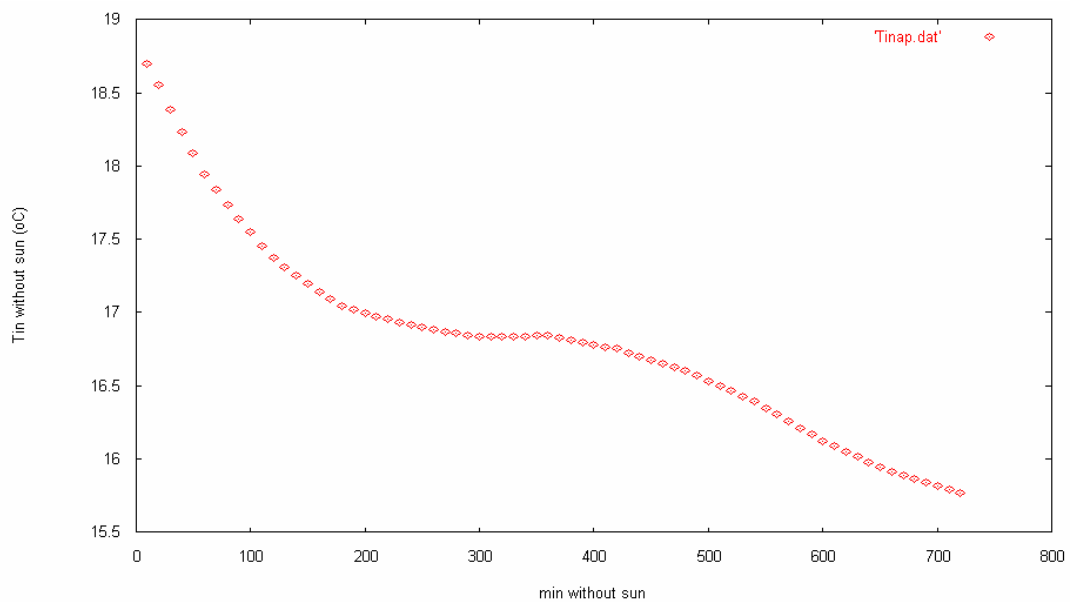
Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας



Εικόνα 78 : Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας συναρτήσε των ωρών του 24ωρου για τον Νοέμβριο



Εικόνα 79: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου συναρτήσει των λεπτών κατά την διάρκεια των οποίων έχει ηλιοφάνεια (7.00-18.00)



Εικόνα 80: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου συναρτήσει των λεπτών χωρίς ηλιοφάνεια (19.00-6.00)

Μεταβολή της θερμοκρασίας του τοίχου κατά την διάρκεια ενός 24ωρου:

Στα διαγράμματα που παρουσιάζονται παρακάτω το μήκος x (m) κατανέμεται ως εξής:

Σοβάς :0-0.01 m

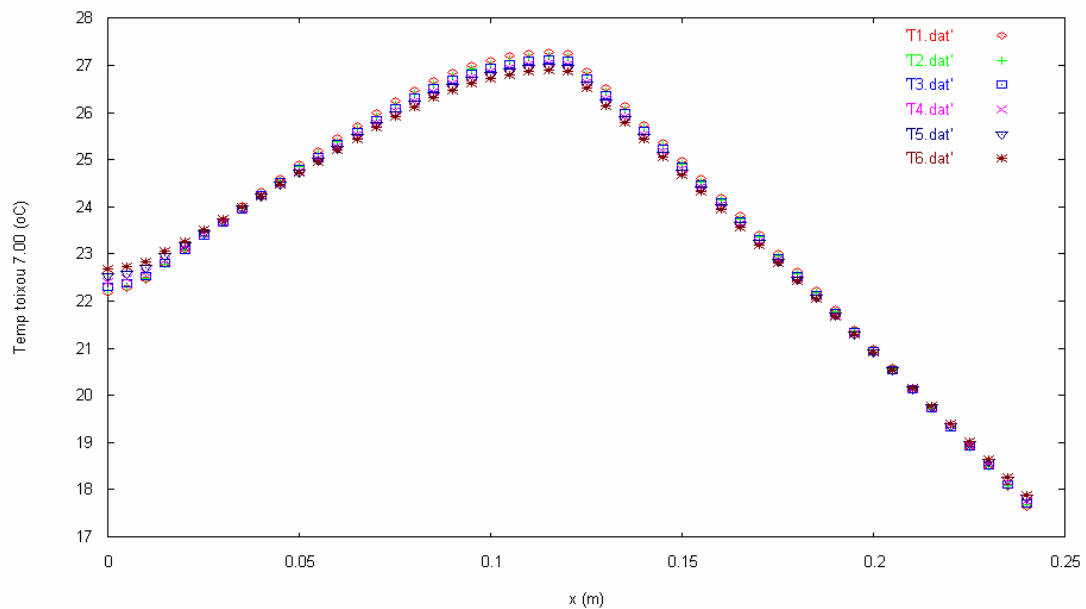
Τούβλο :0.01-0.07 m

PCM: 0.07-0.12 m

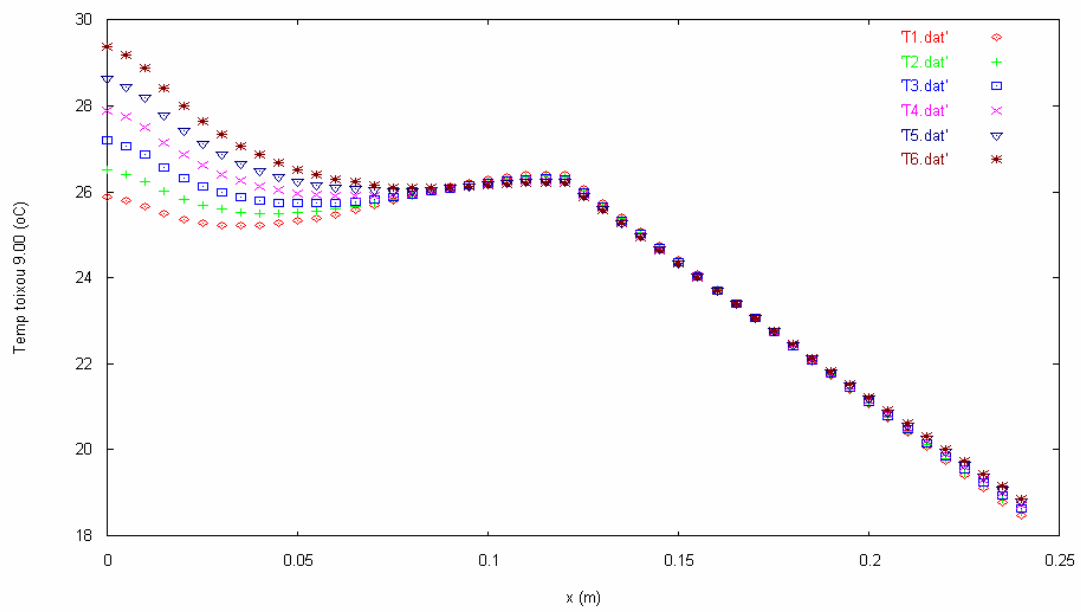
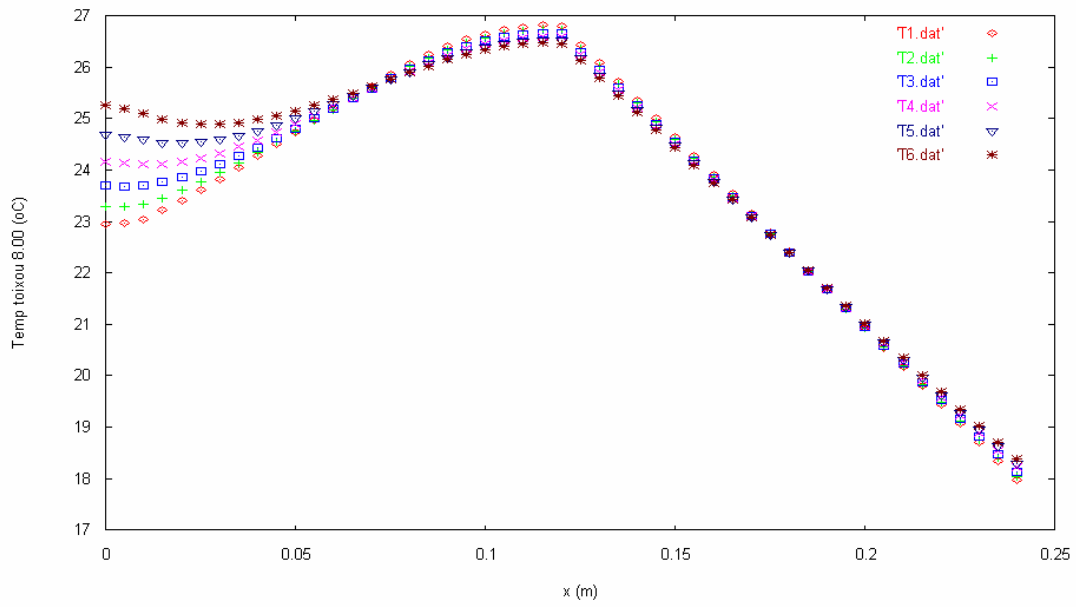
Μόνωση: 0.12-0.17 m

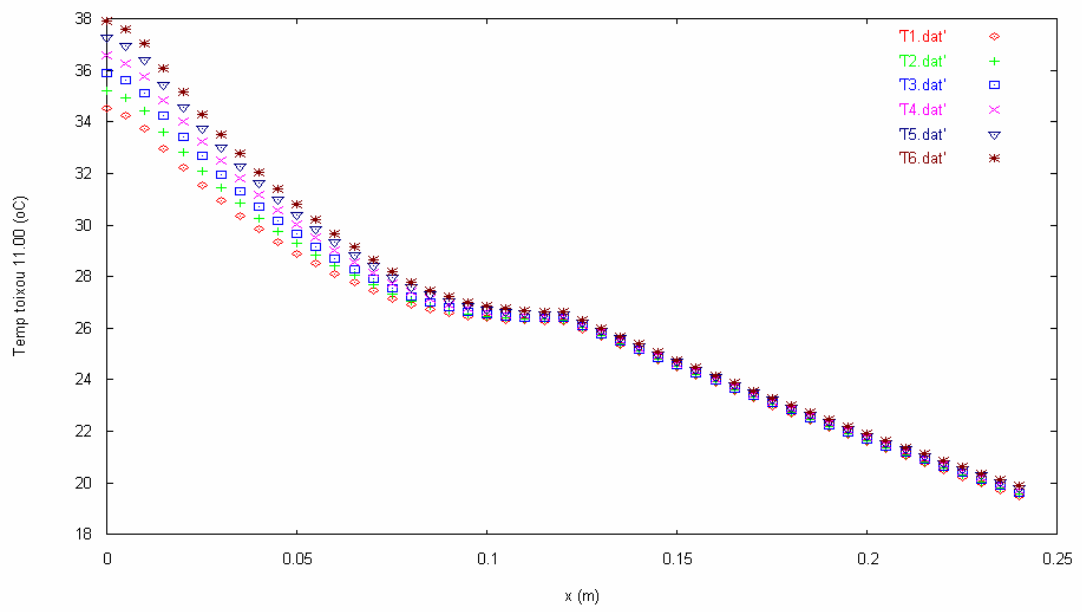
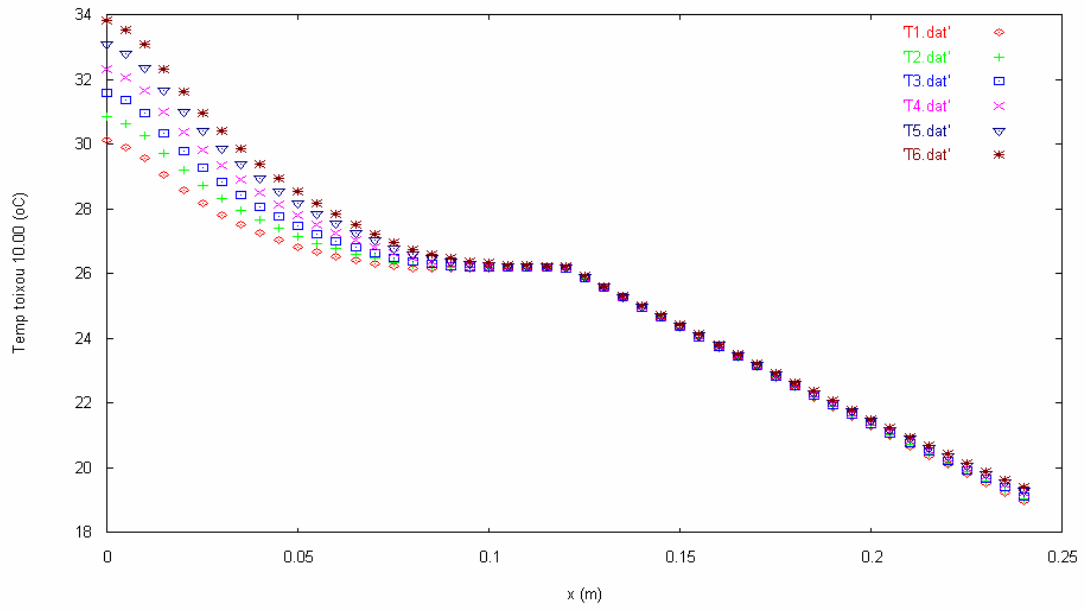
Τούβλο:0.17-0.23 m

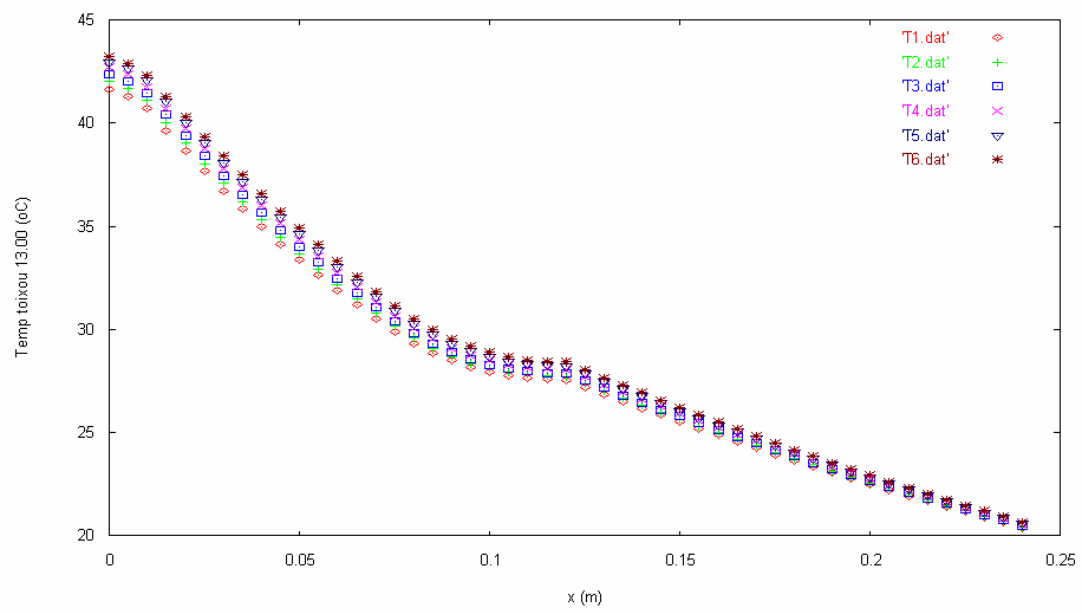
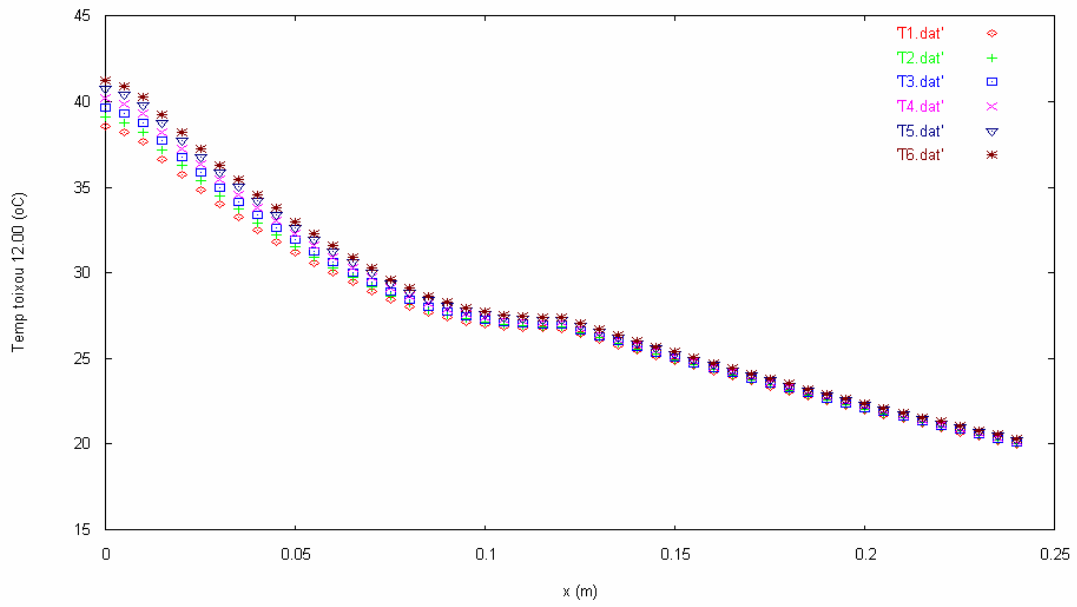
Σοβάς: 0.23-0.24 m

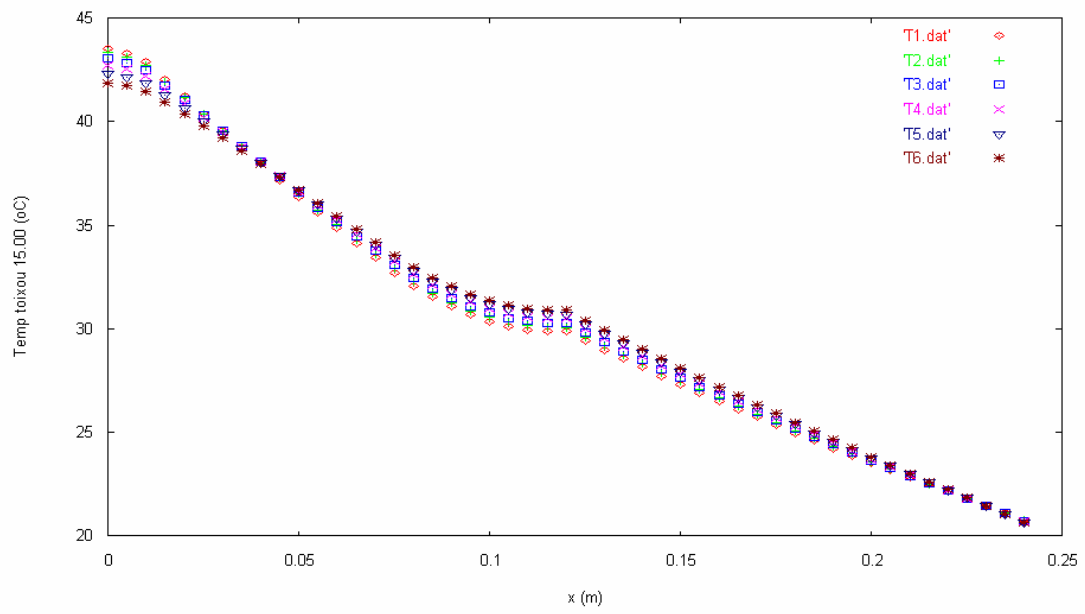
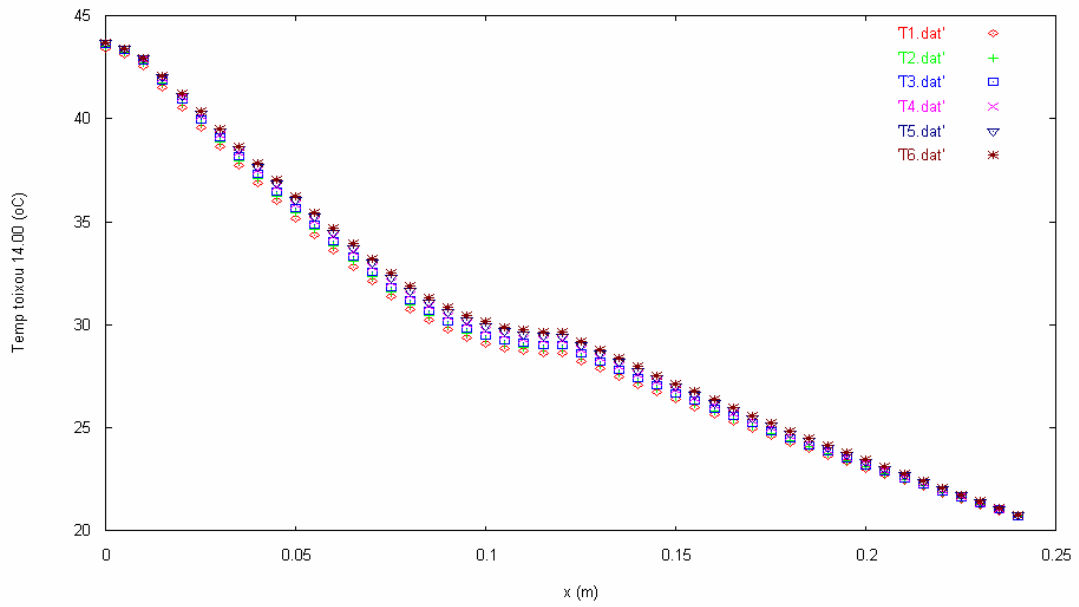


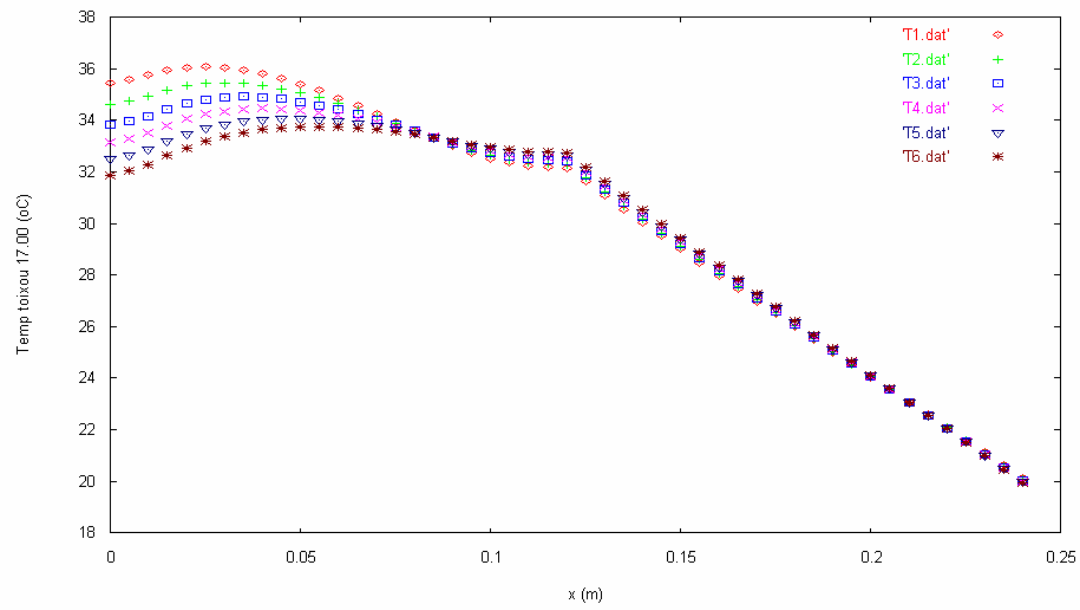
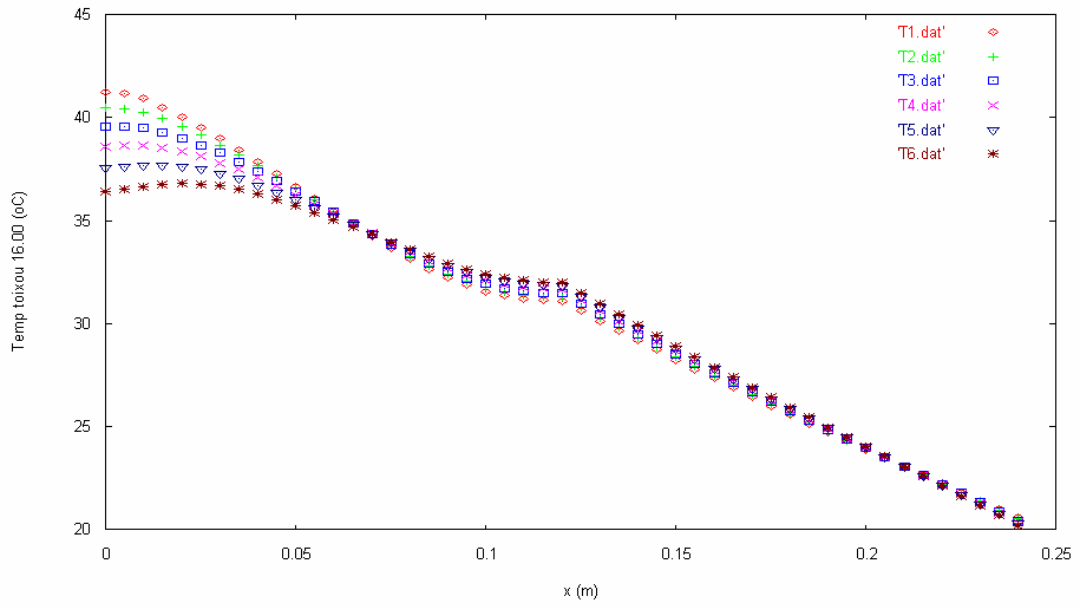
Εικόνα 81: Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος του τοίχου κατά την διάρκεια του 24 ωρου συναρτήσει του πάχους του τοίχου, ακολουθούν τα διαγράμματα των υπόλοιπων ωρών

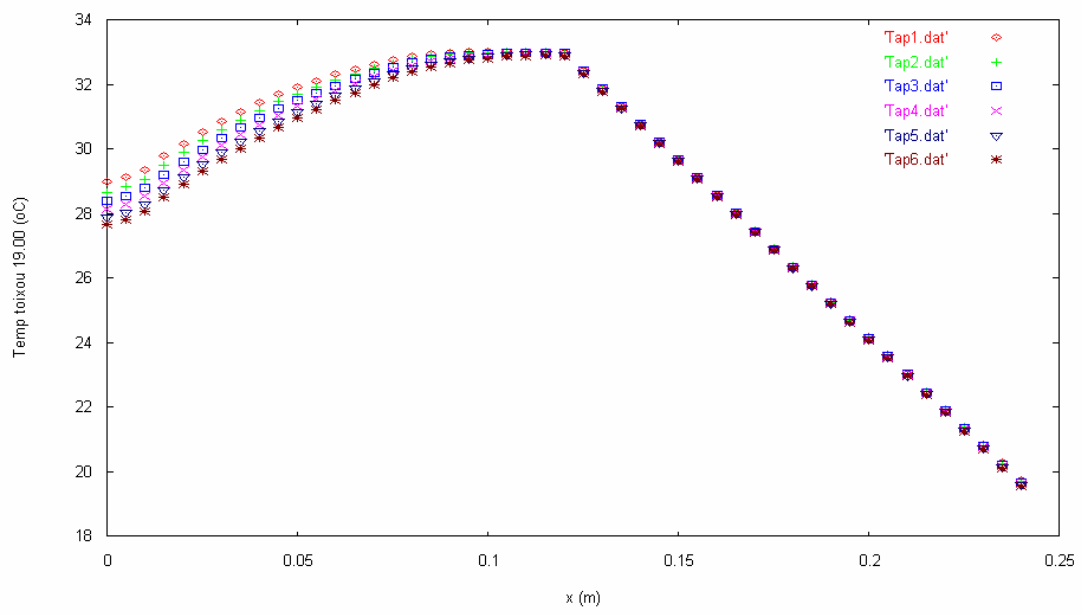
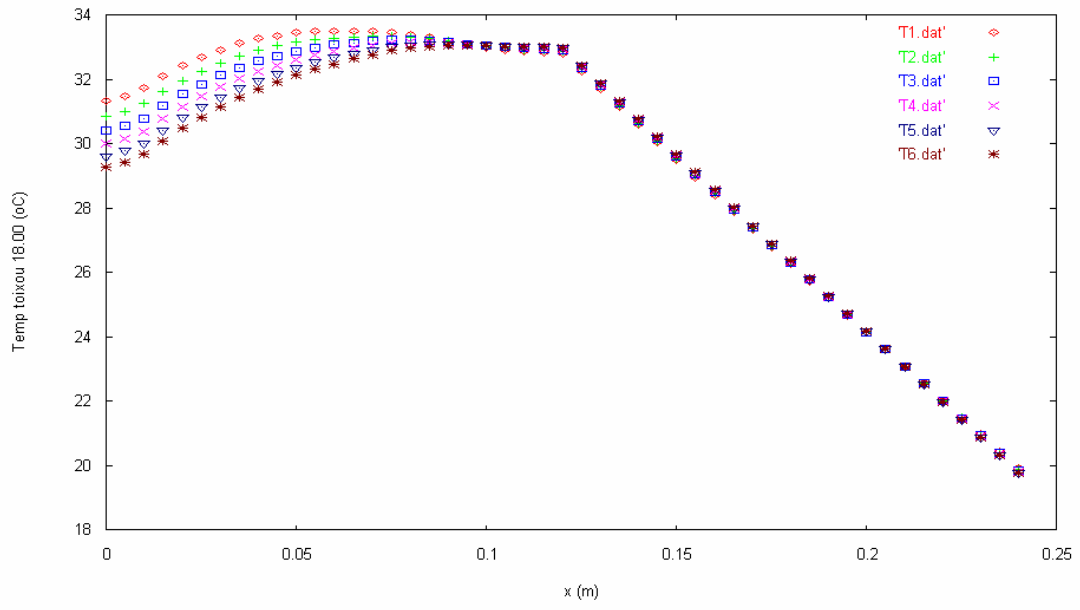


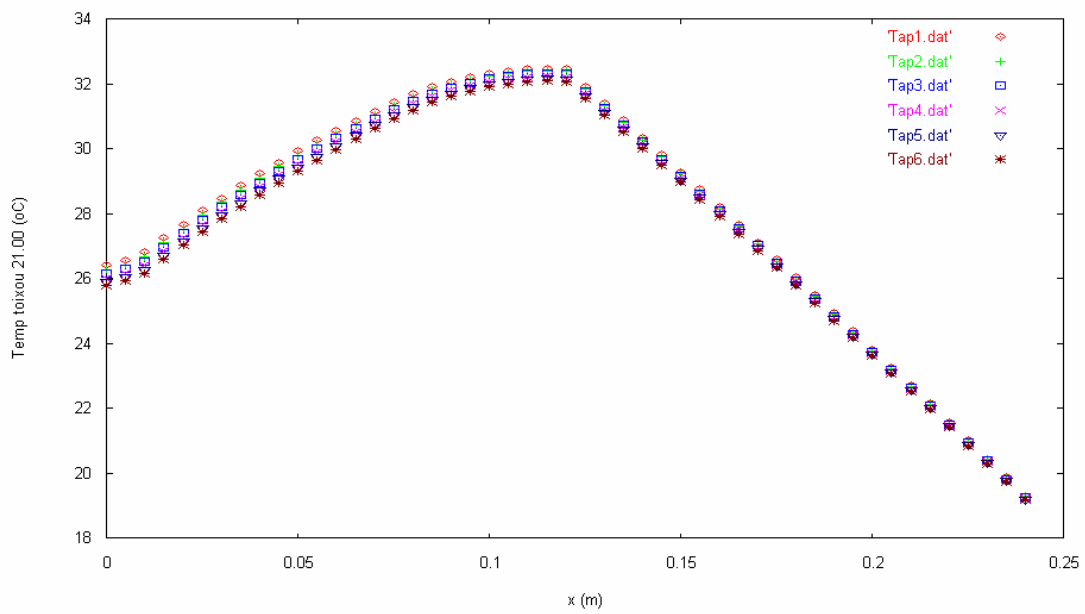
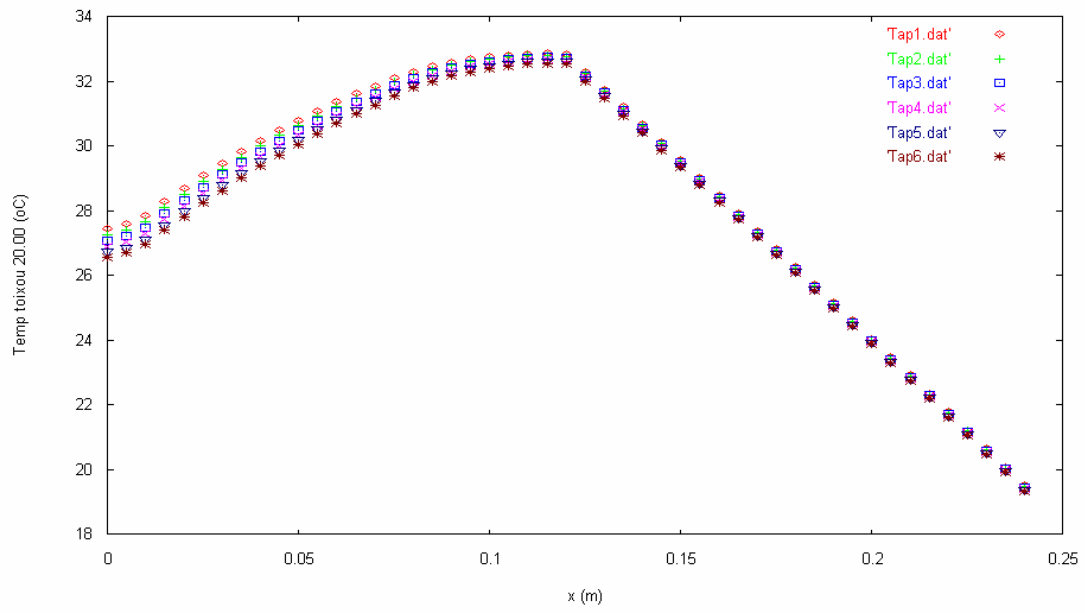


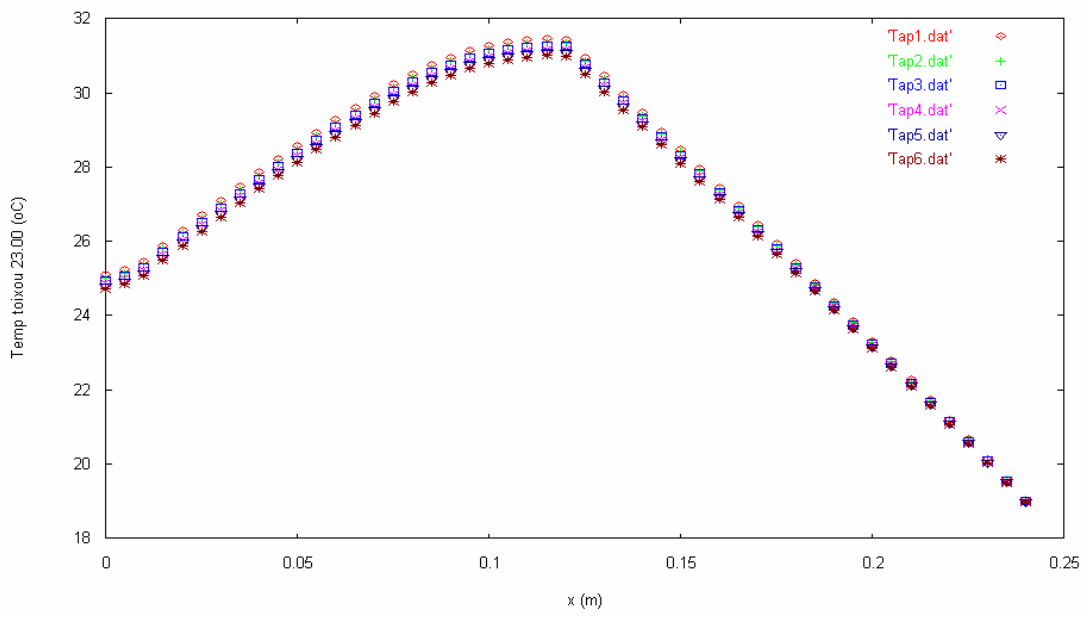
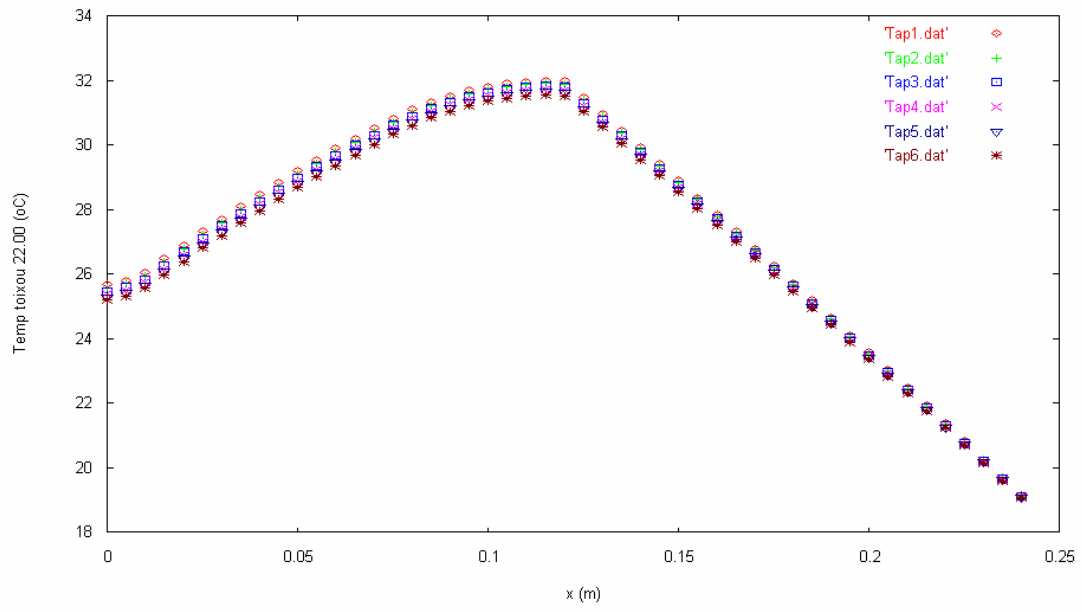


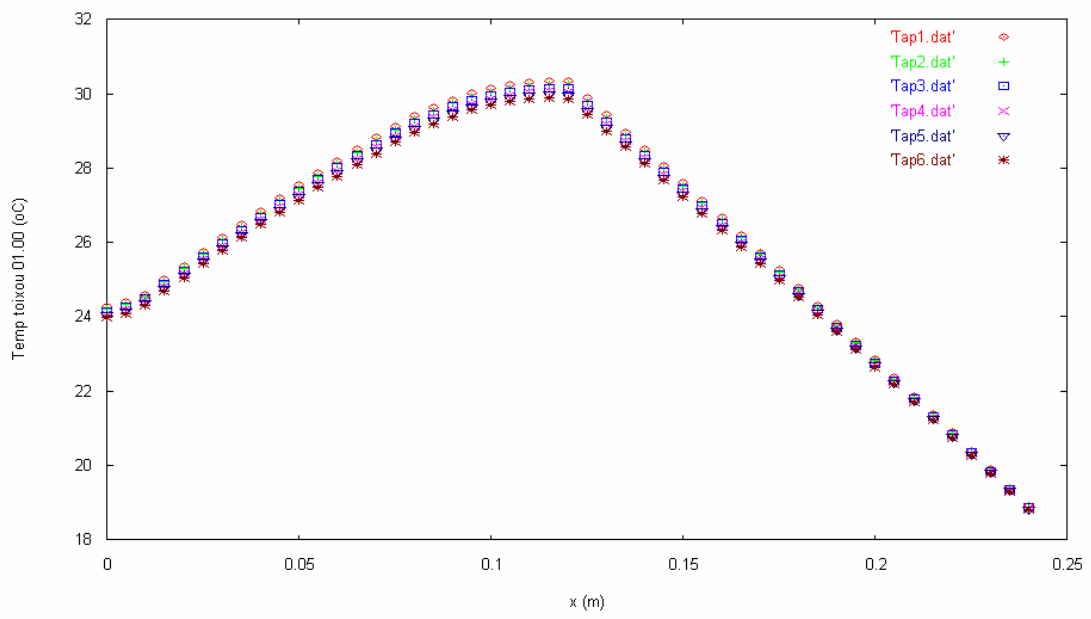
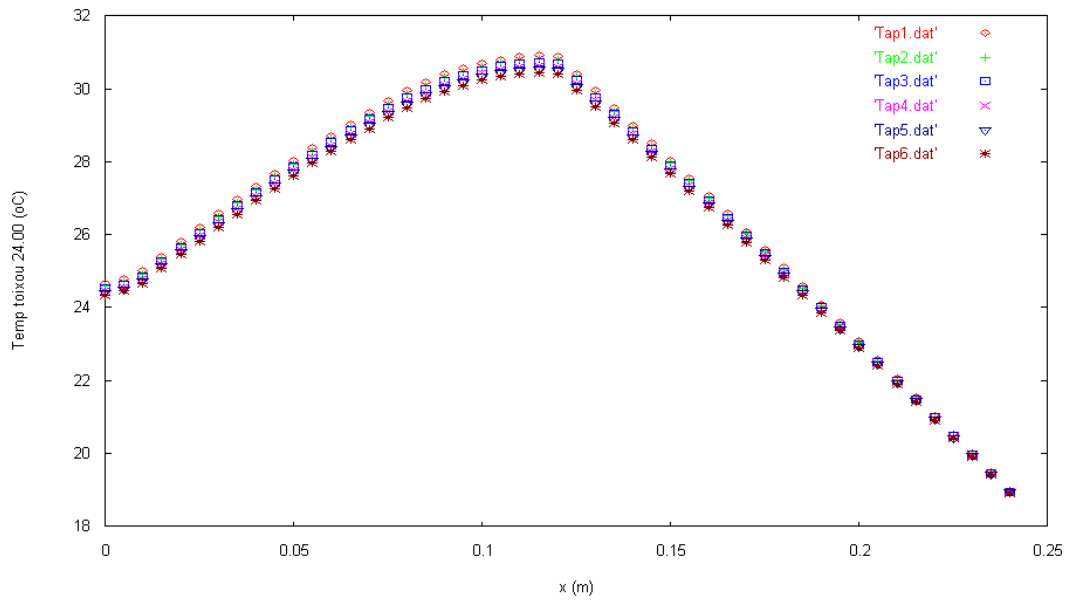


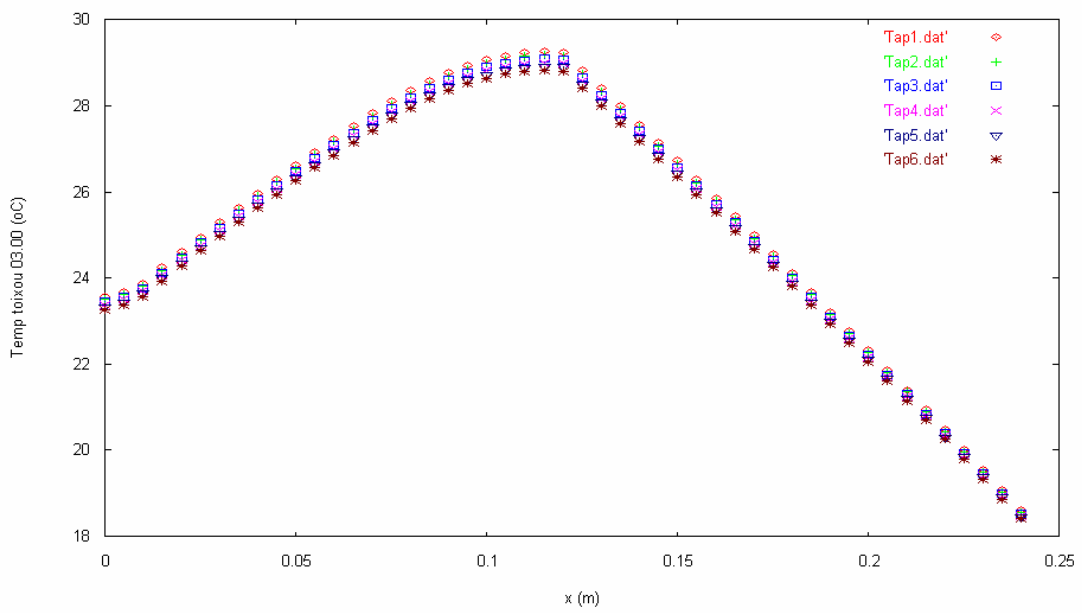
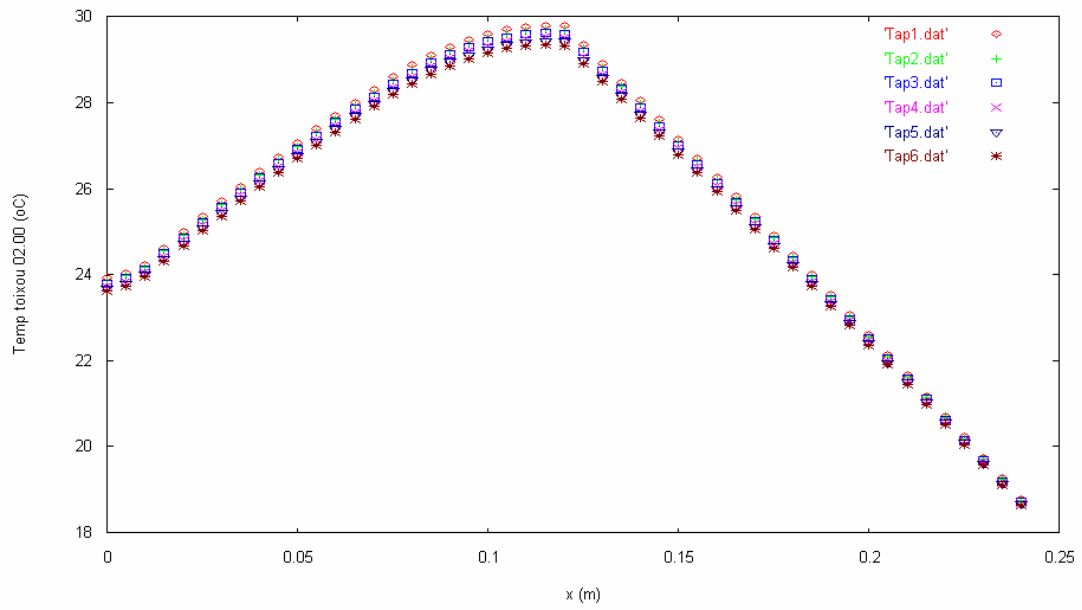


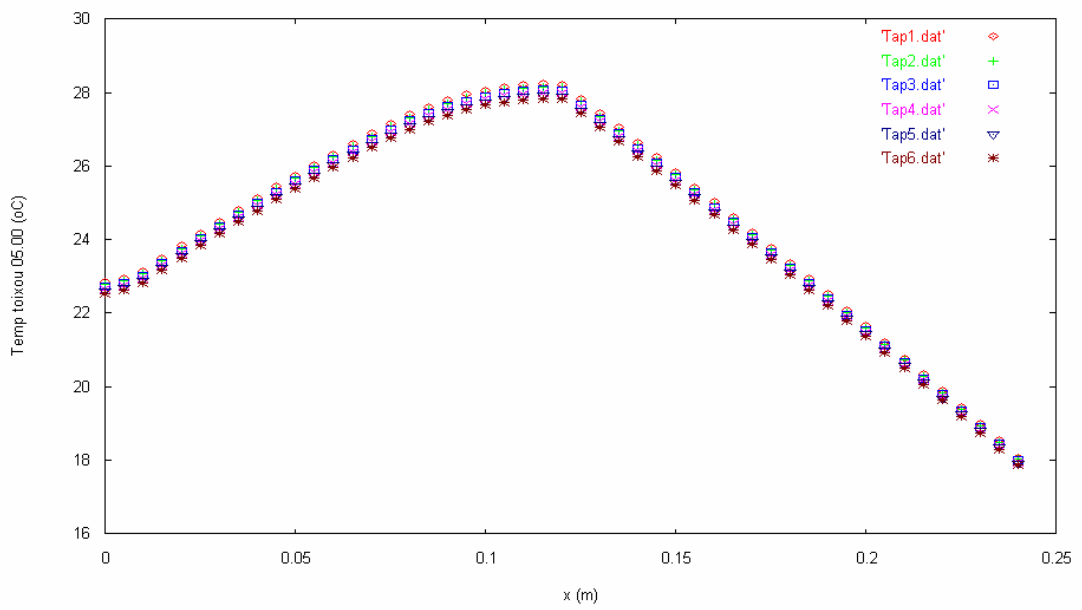
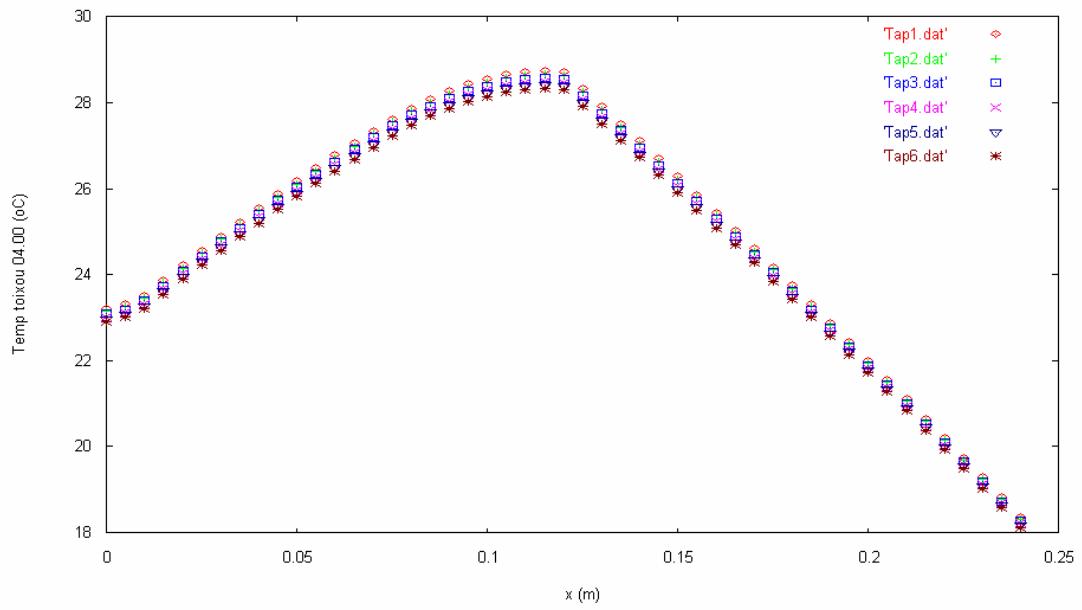


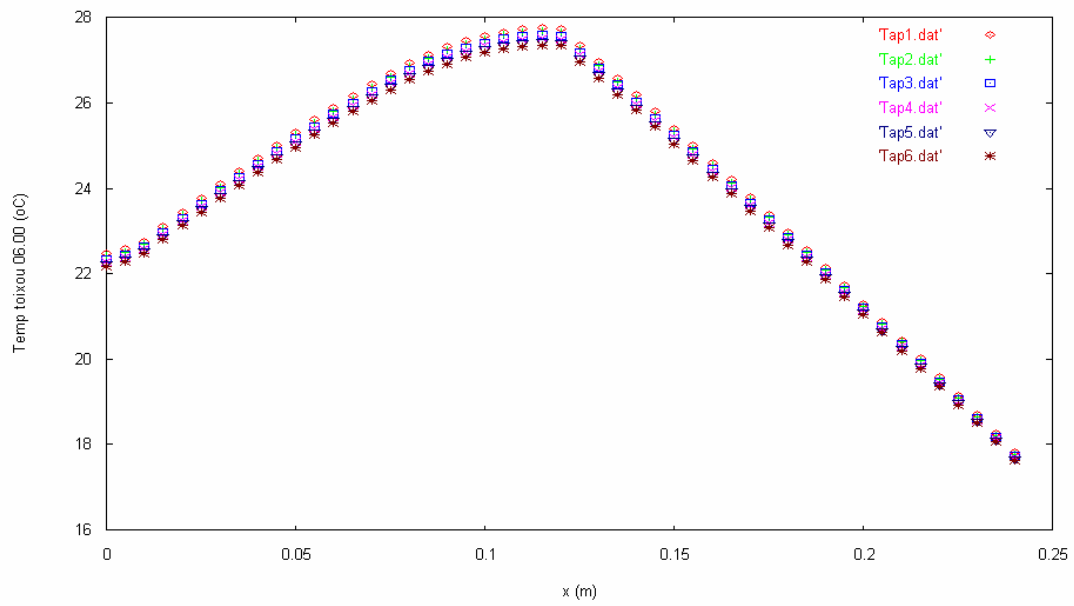




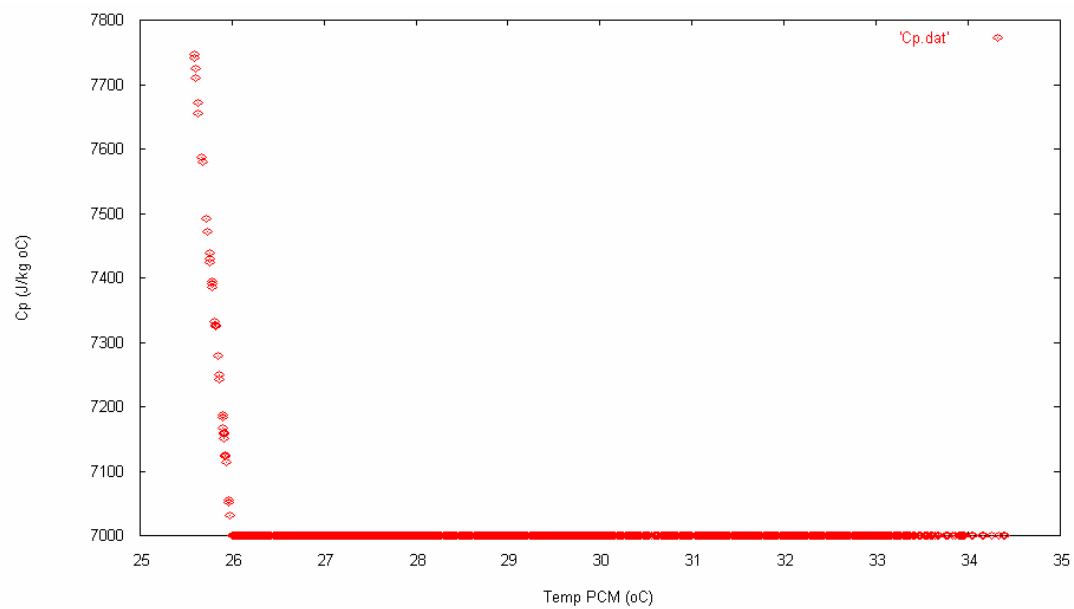








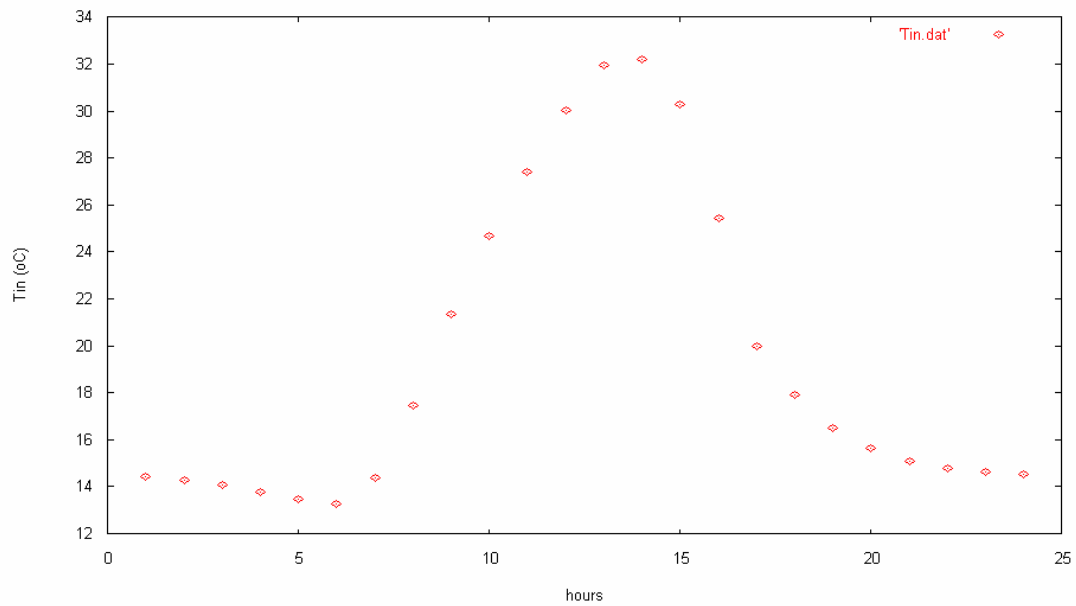
Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM συναρτήσει της θερμοκρασίας αυτού.



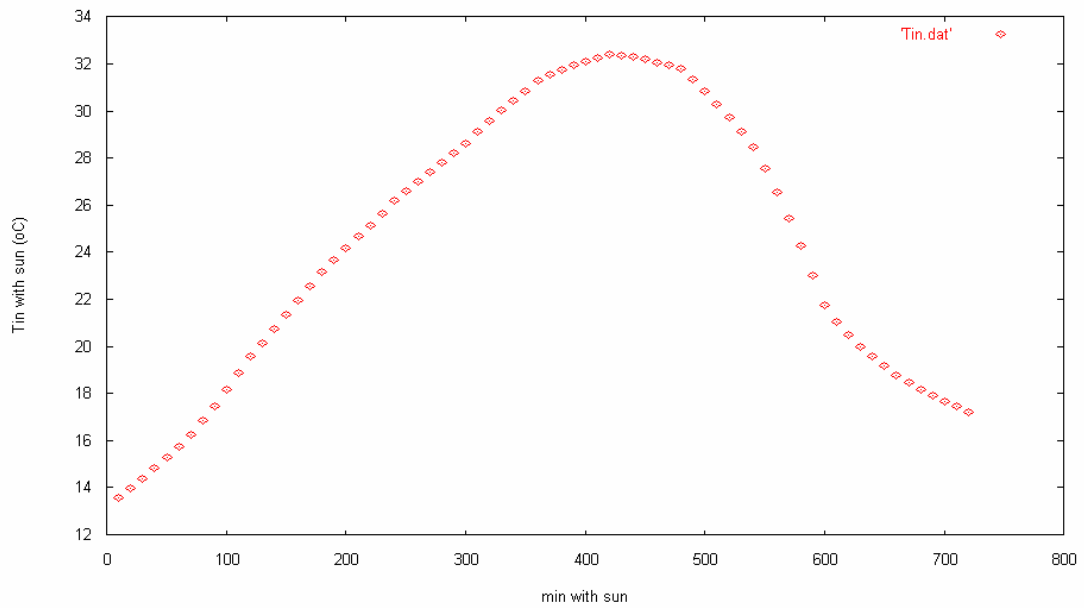
Εικόνα 82: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM συναρτήσει της θερμοκρασίας αυτού

16.3.2 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων για την πρώτη παραμετρική μελέτη του τοίχου για τον Νοέμβριο (γυψοσανίδα –PCM-μόνωση-τούβλο-σοβάς)

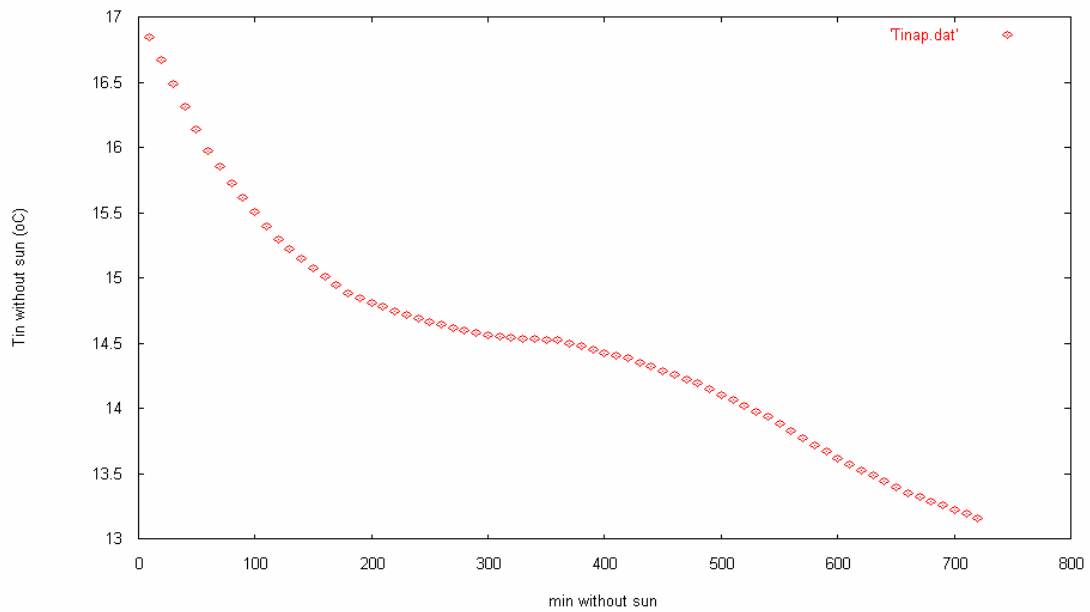
Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου



Εικόνα 83: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου συναρτήσει των ωρών του 24 ώρου



Εικόνα 84: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου συναρτήσει των λεπτών της ηλιοφάνειας (7.00-18.00)



Εικόνα 85: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου συναρτήσει των λεπτών χωρίς ηλιοφάνεια (19.00-6.00)

Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος του τοίχου κατά την διάρκεια του

24 ωρου

Τα υλικά κατά μήκος του τοίχου $x(m)$ κατανέμονται ως εξής:

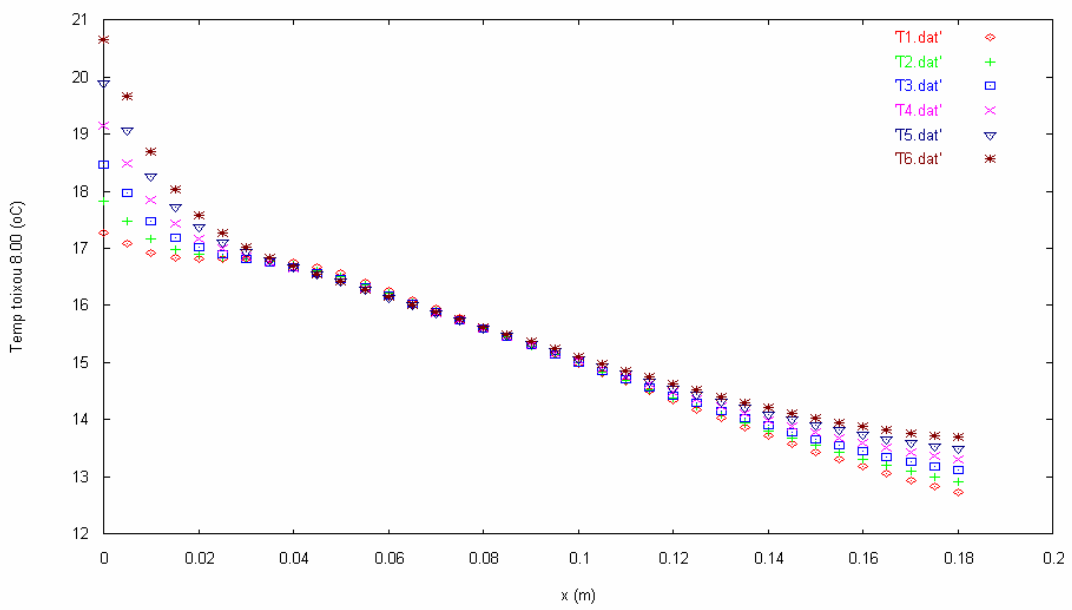
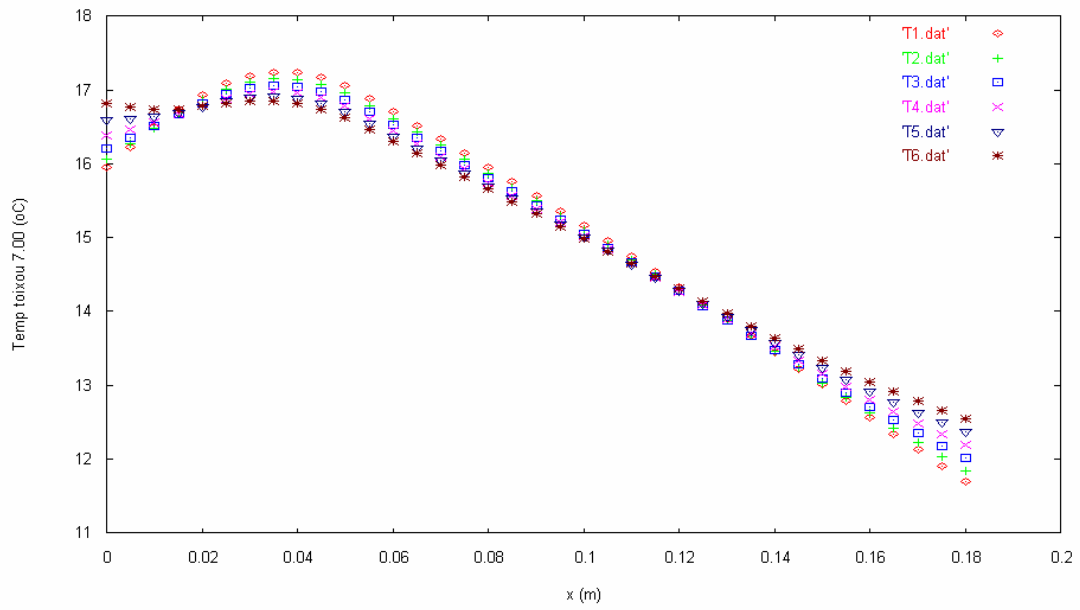
Γυψοσανίδα :0-0.01 m

PCM :0.01-0.07 m

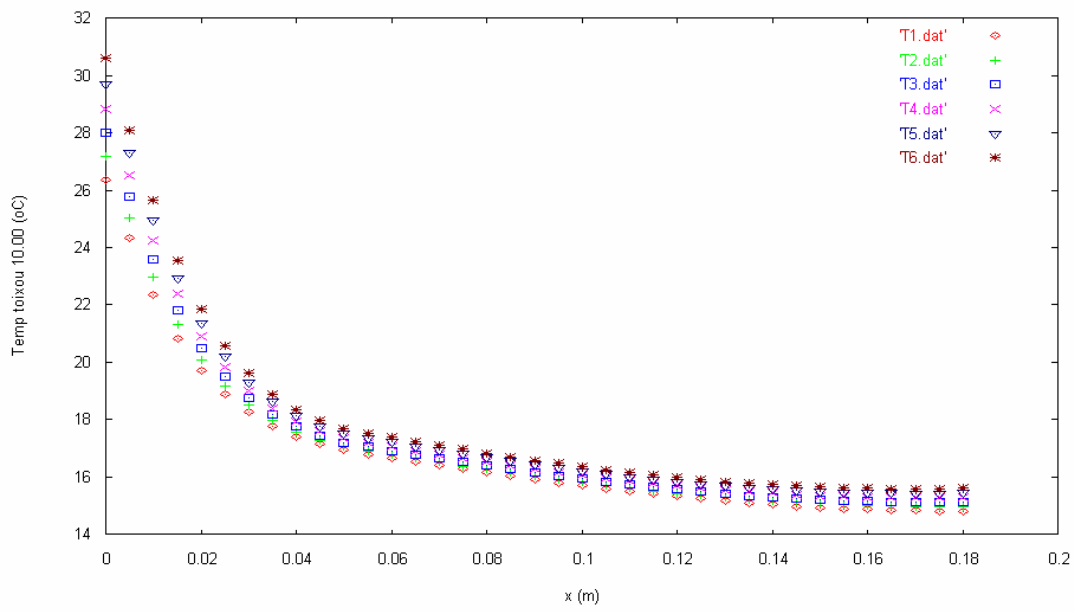
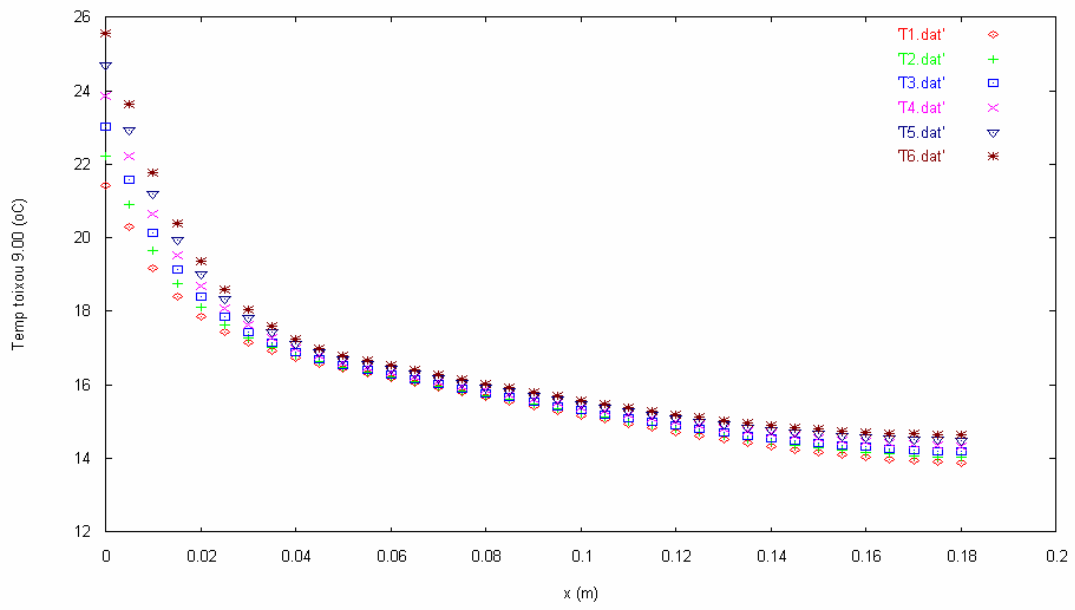
Μόνωση :0.07-0.12 m

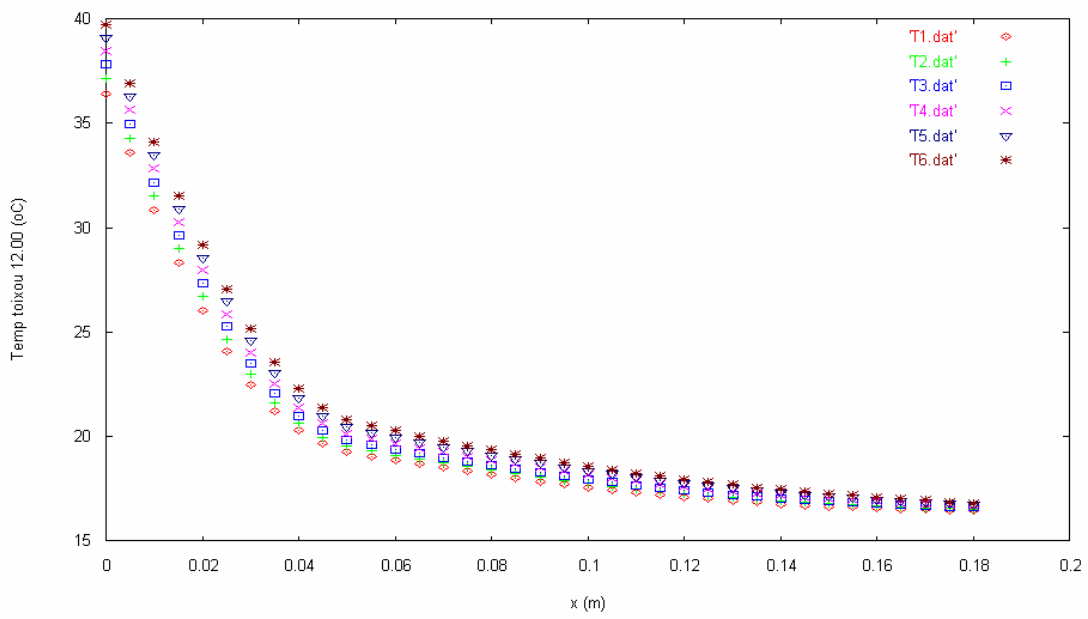
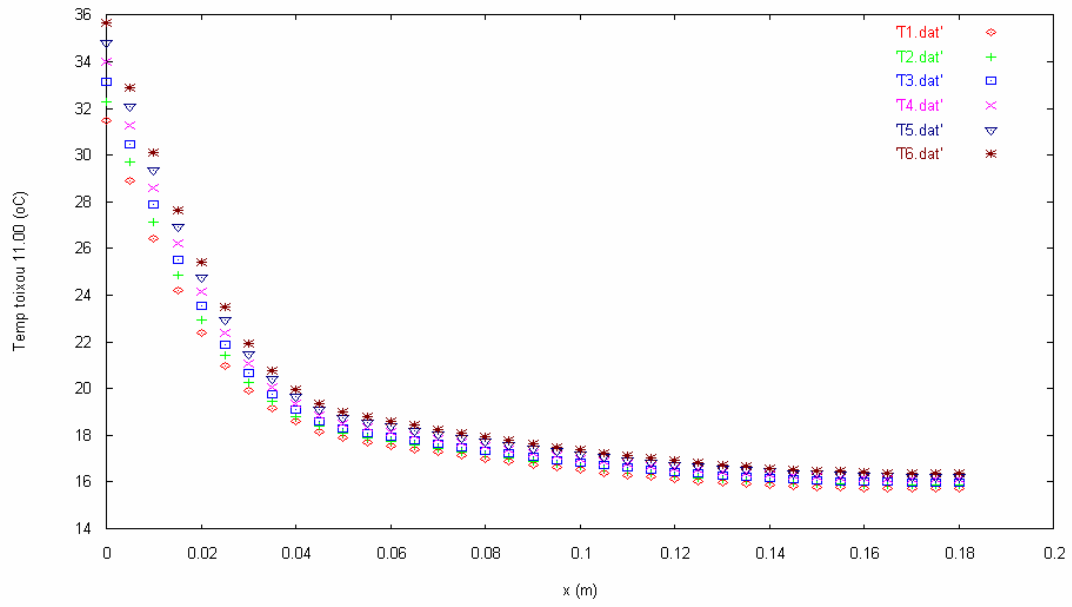
Τούβλο:0.12-0.18 m

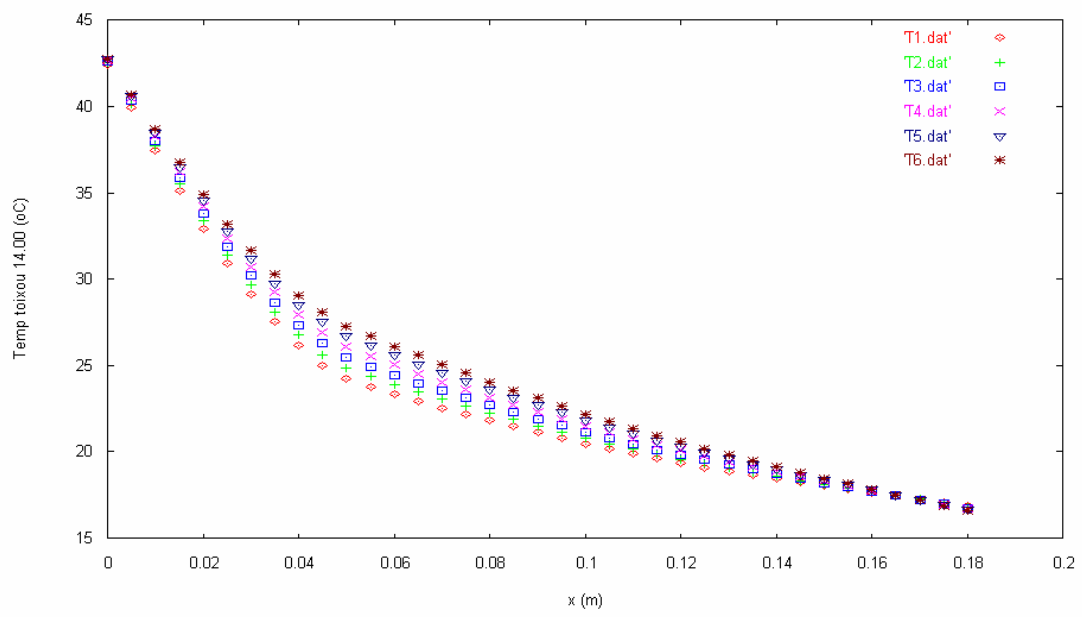
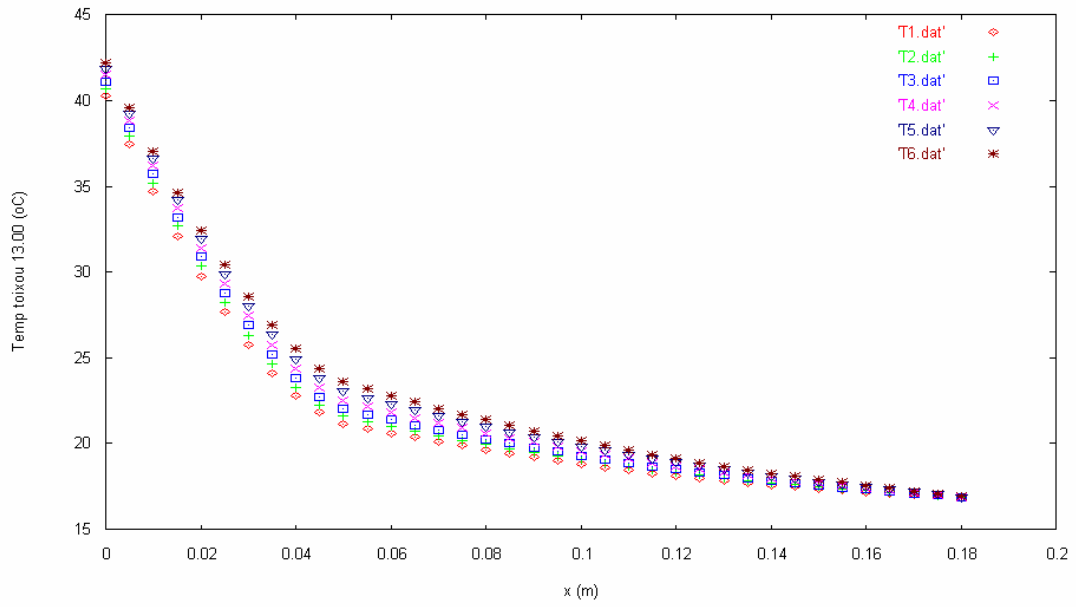
Σοβάς:0.18-0.19 m

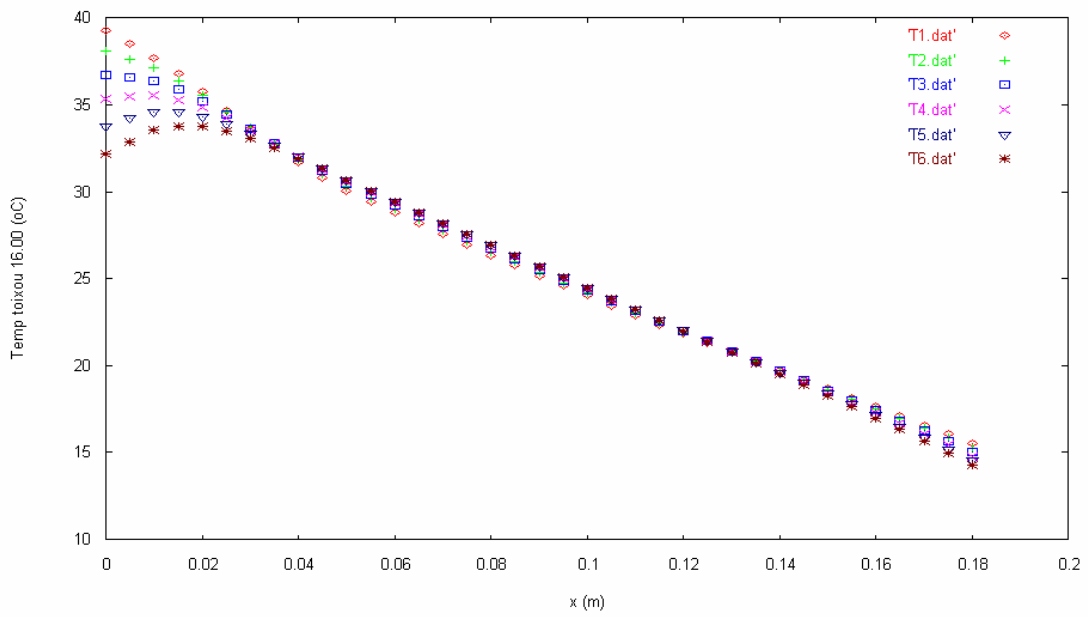
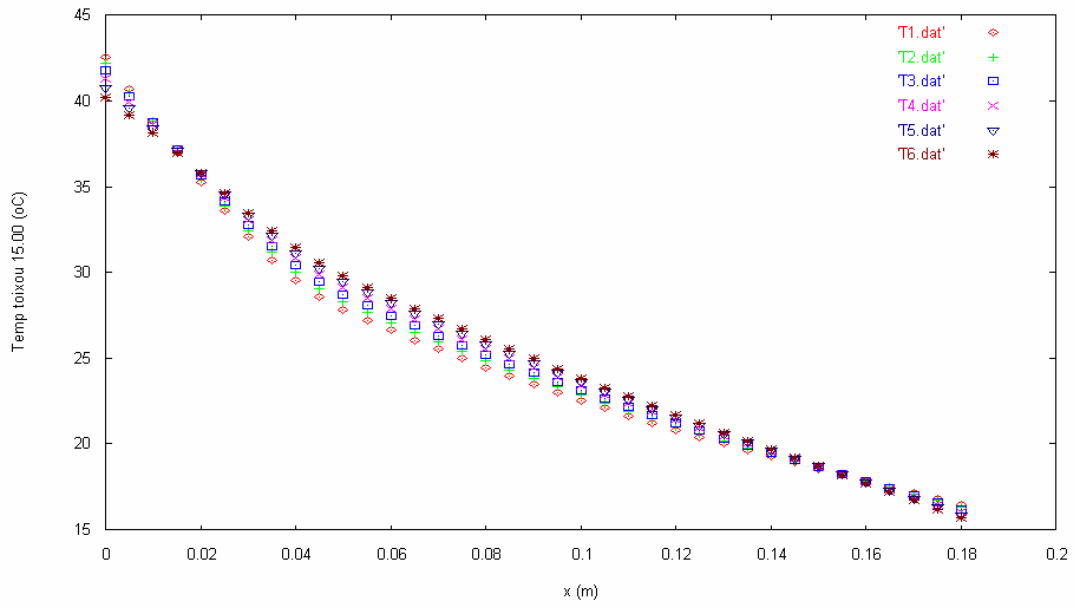


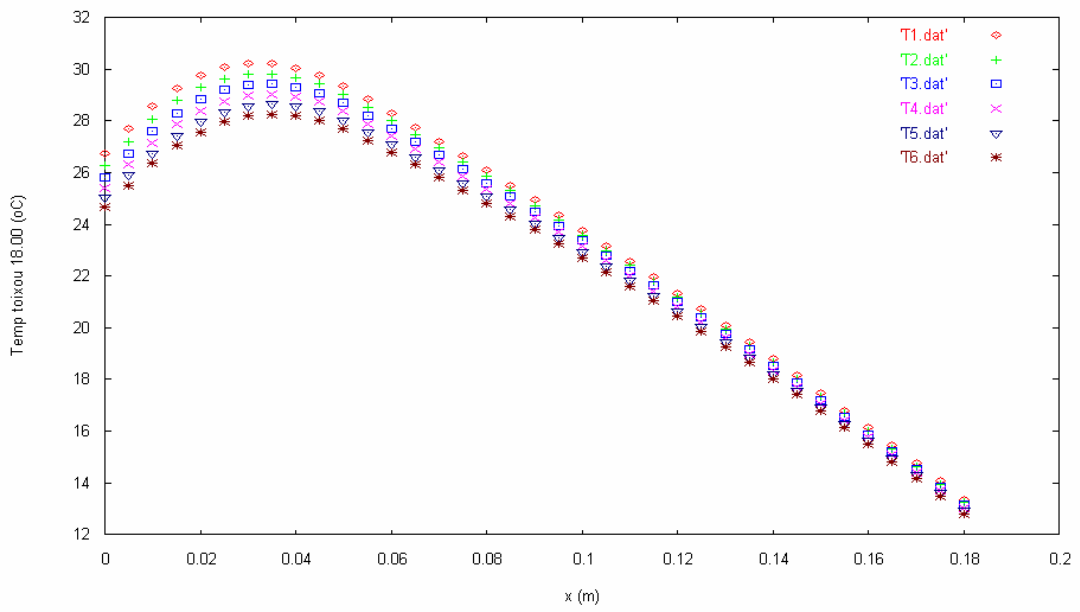
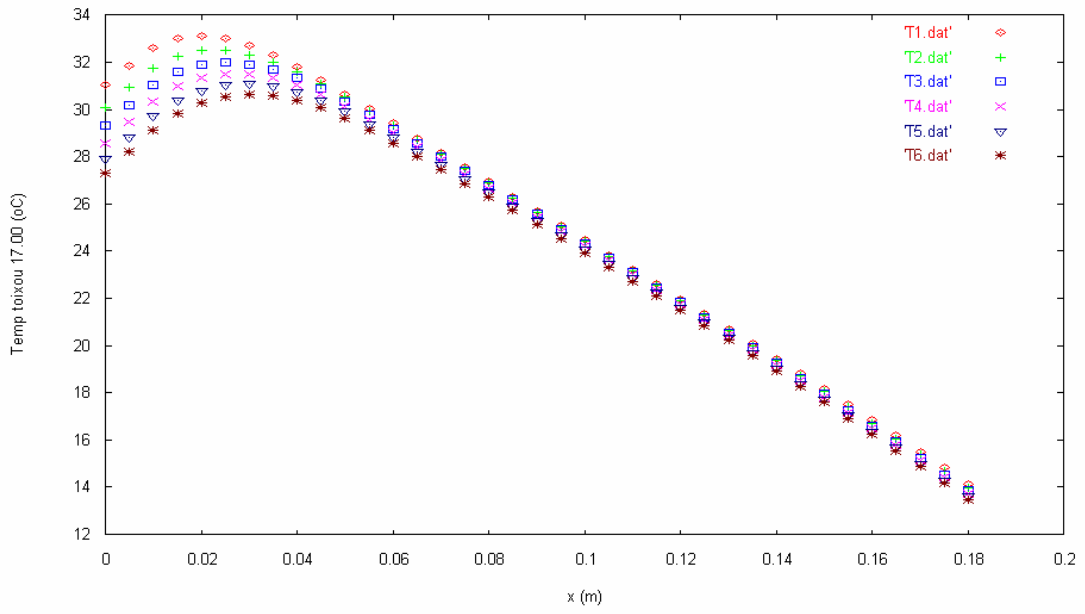
Εικόνα 86: Μεταβολή της θερμοκρασίας του τοίχου κατά μήκος του, κατά την διάρκεια του 24 ωρου , ακολουθούν τα διαγράμματα των υπόλοιπων ωρών

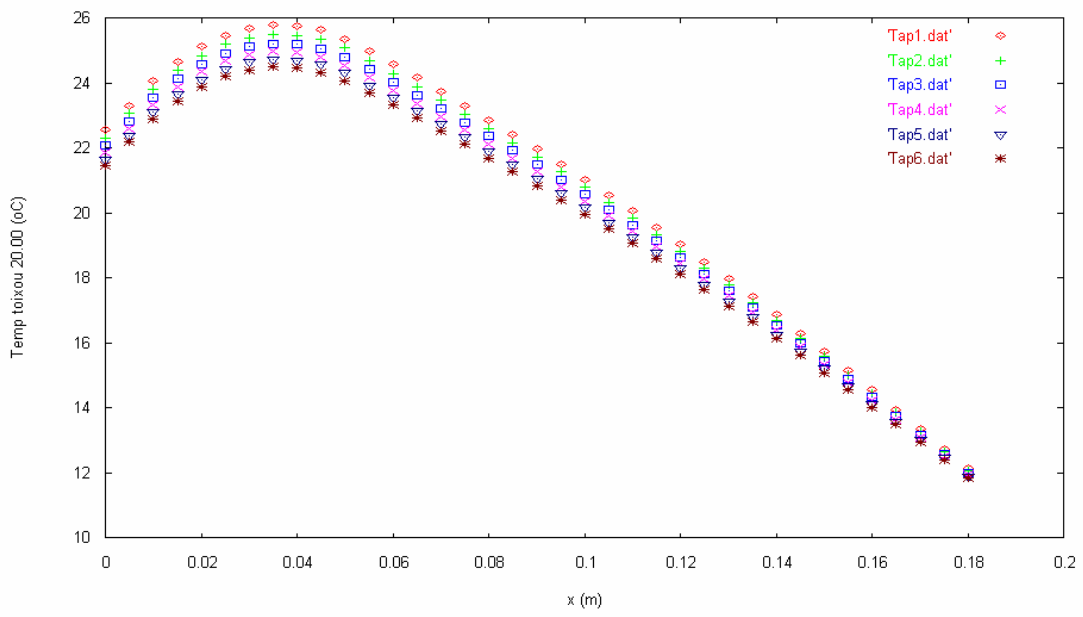
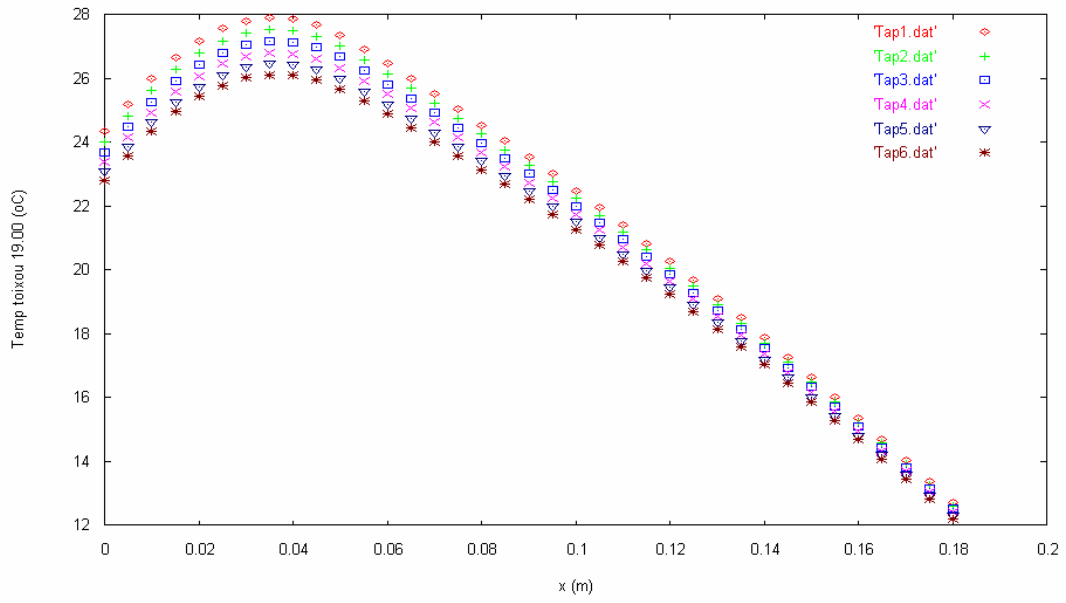


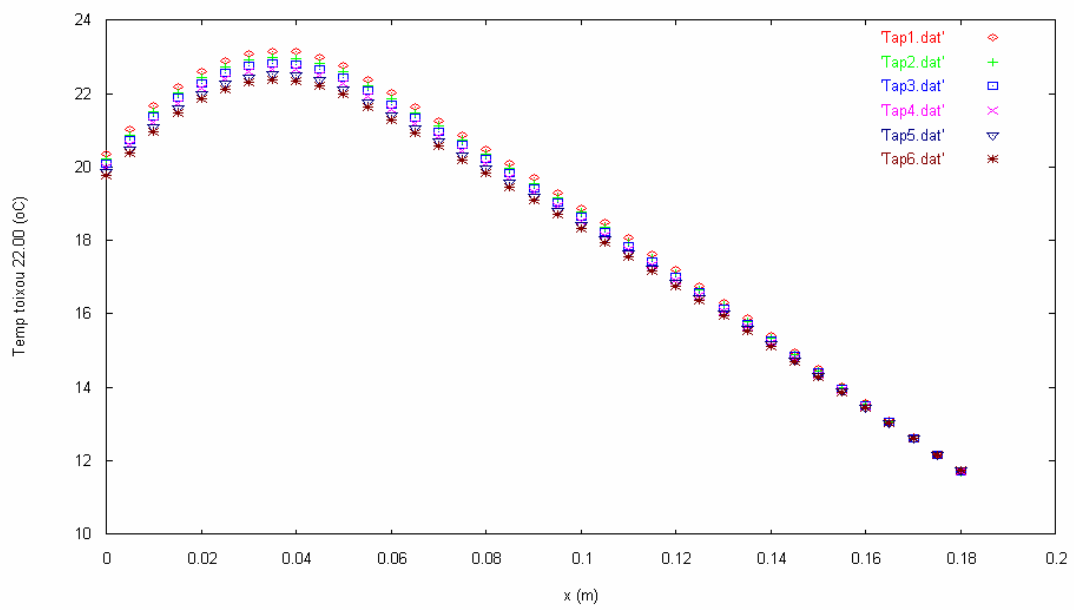
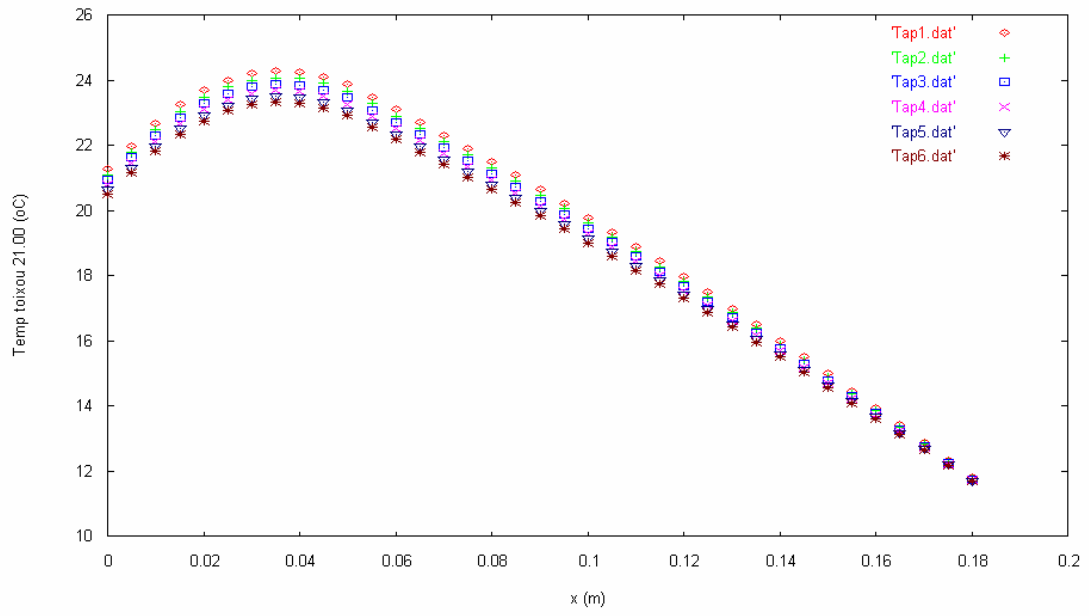


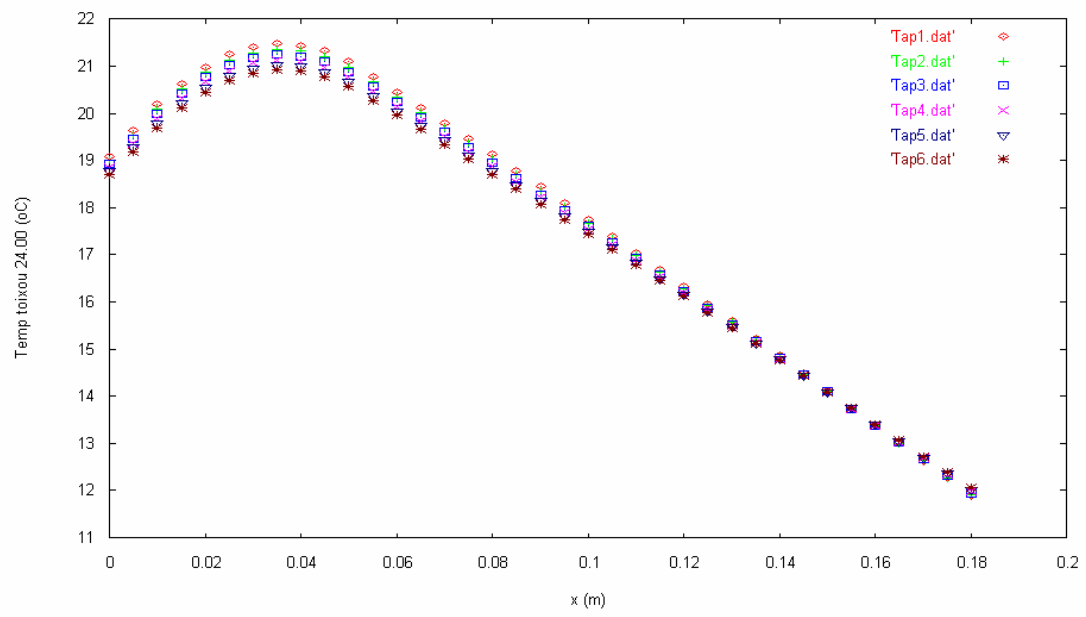
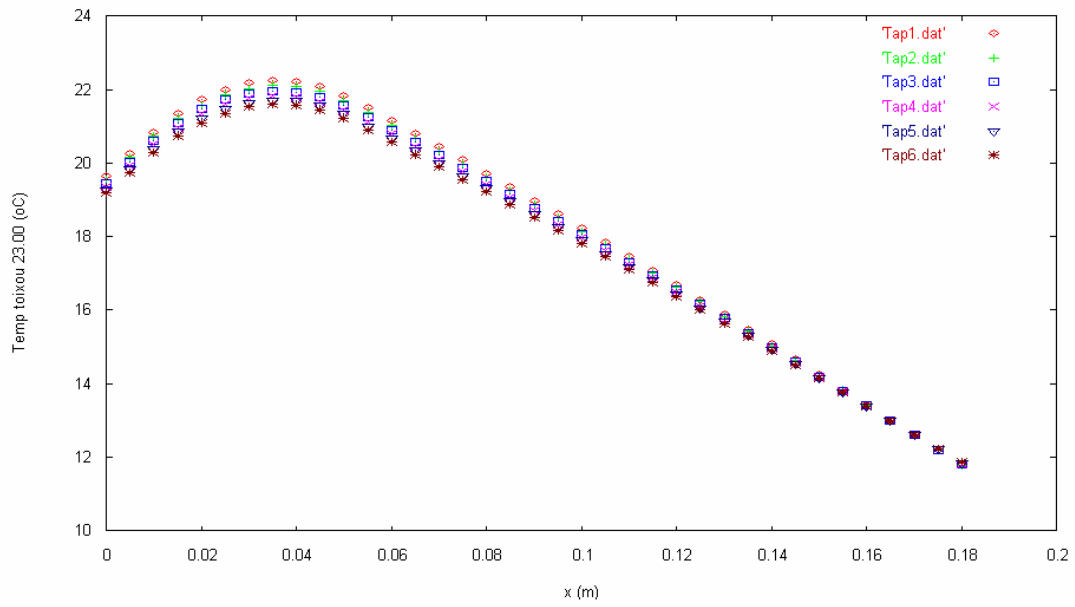


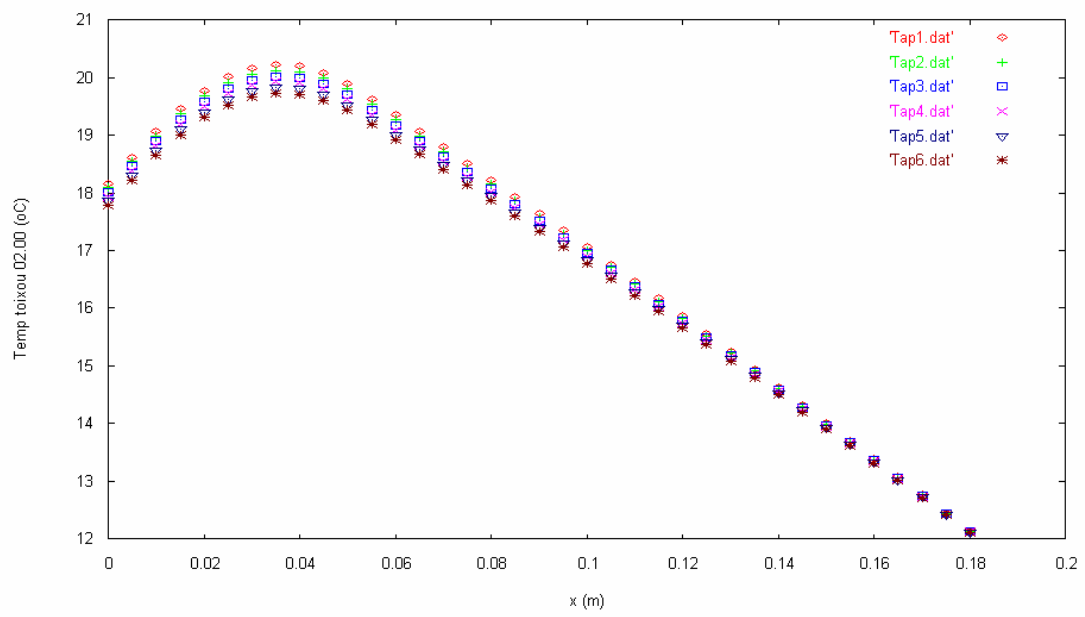
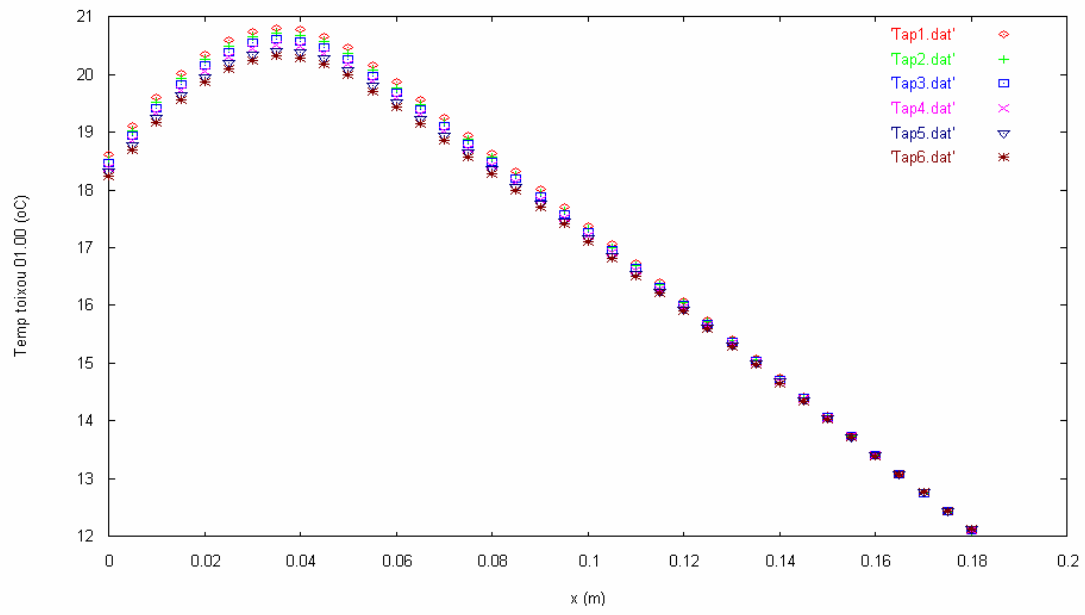


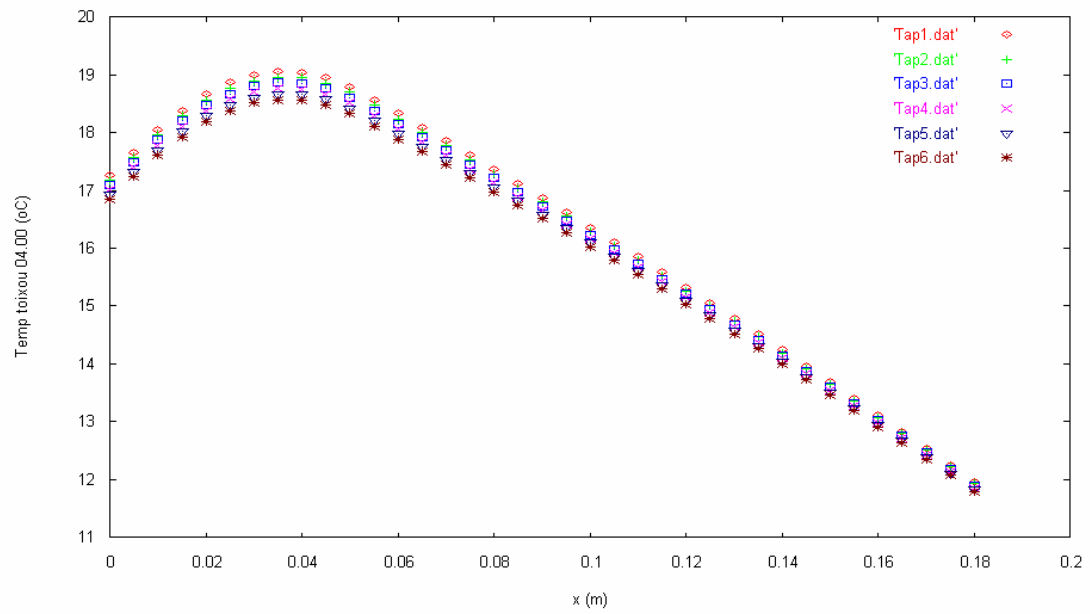
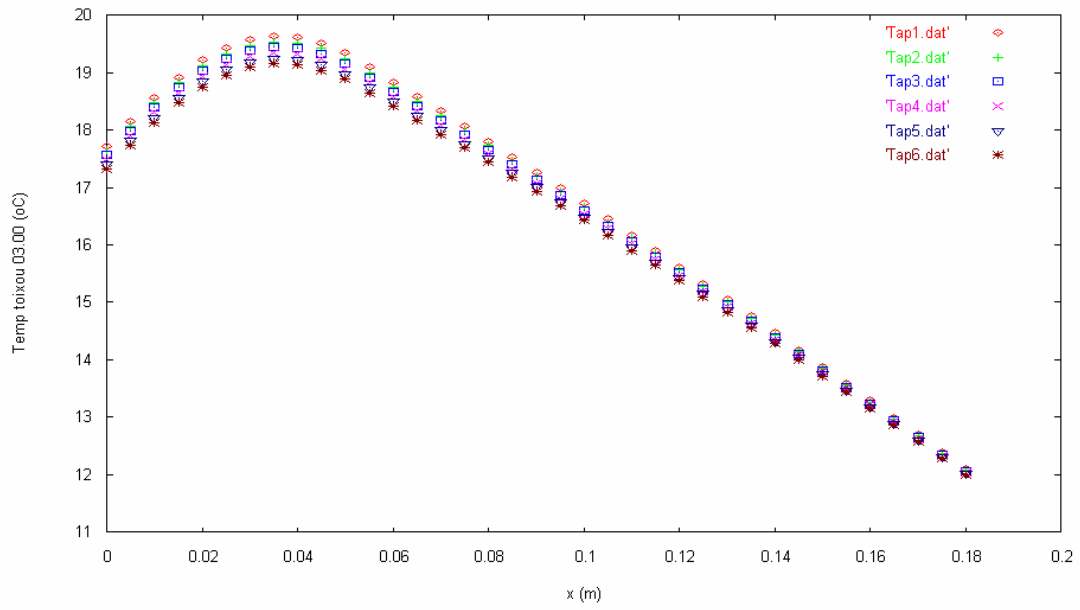


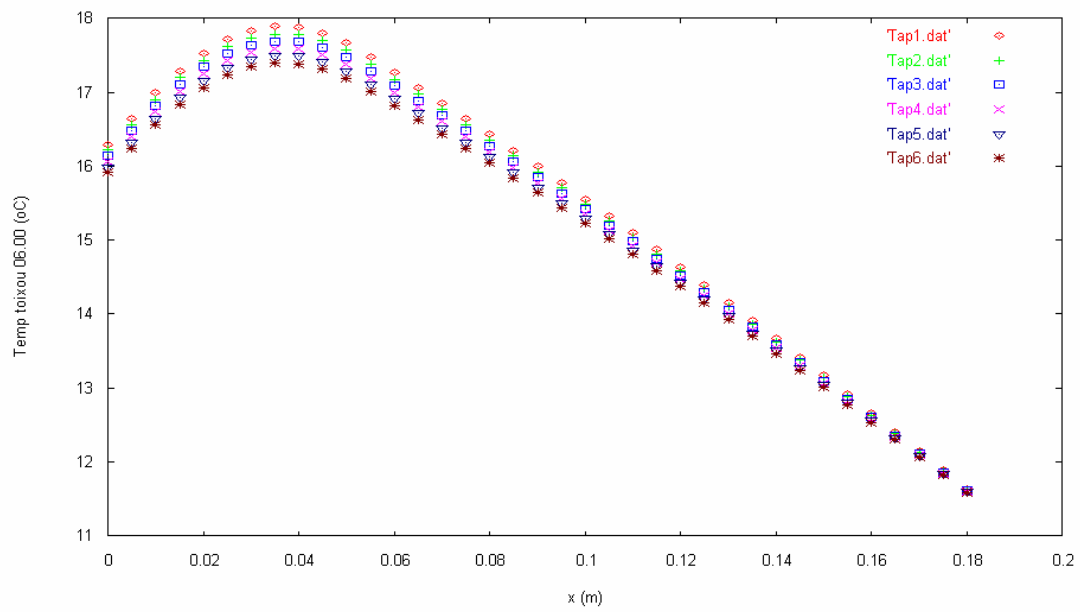
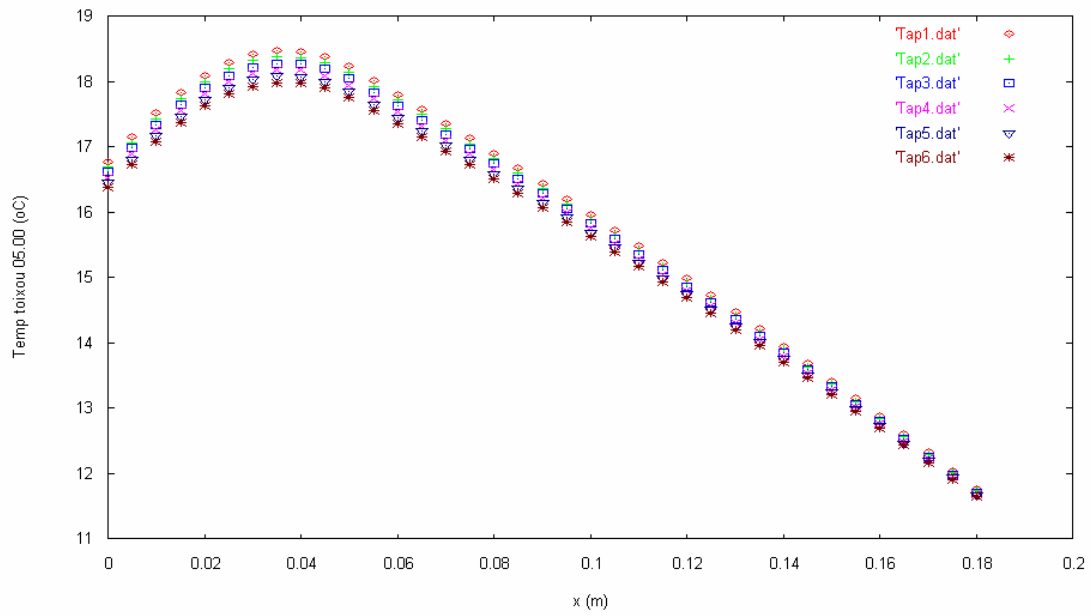






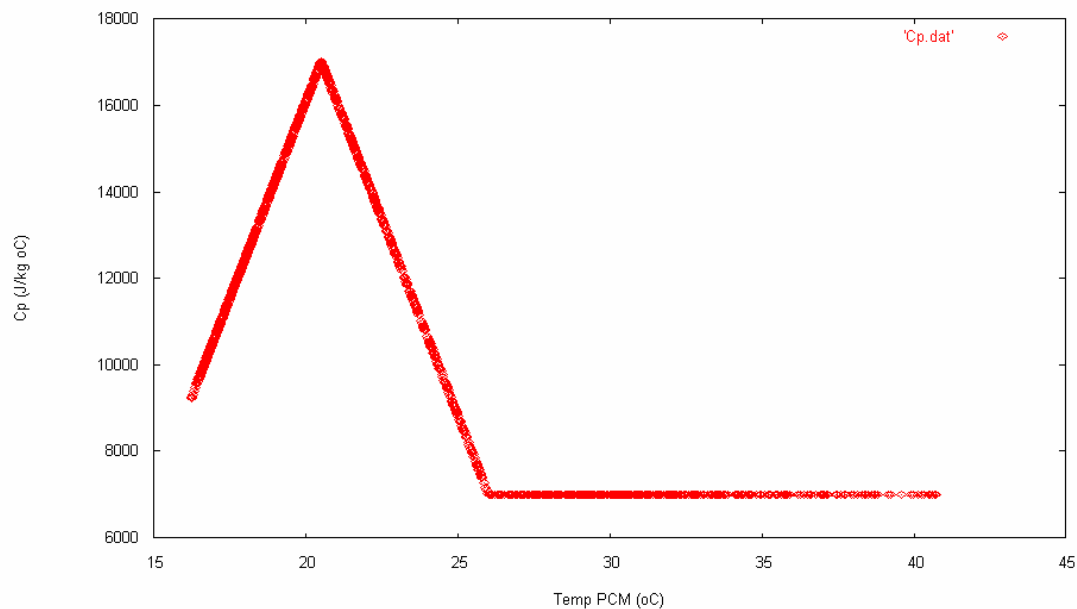






Εικόνα 86: Μεταβολή της θερμοκρασίας του τοίχου κατά μήκος του, κατά την διάρκεια του 24 ωρου

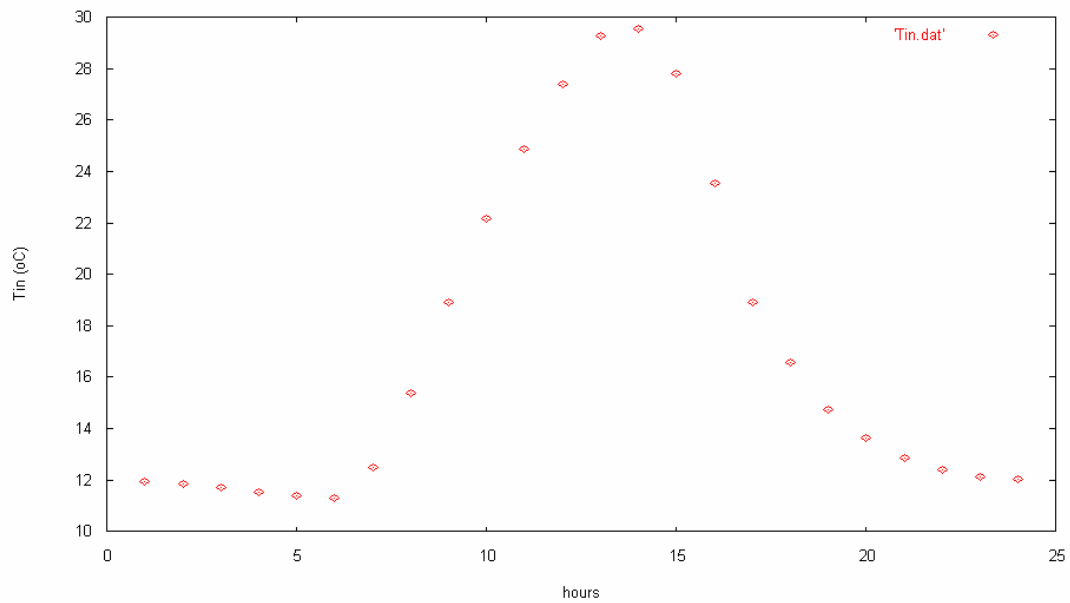
Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM συναρτήσει της θερμοκρασίας του



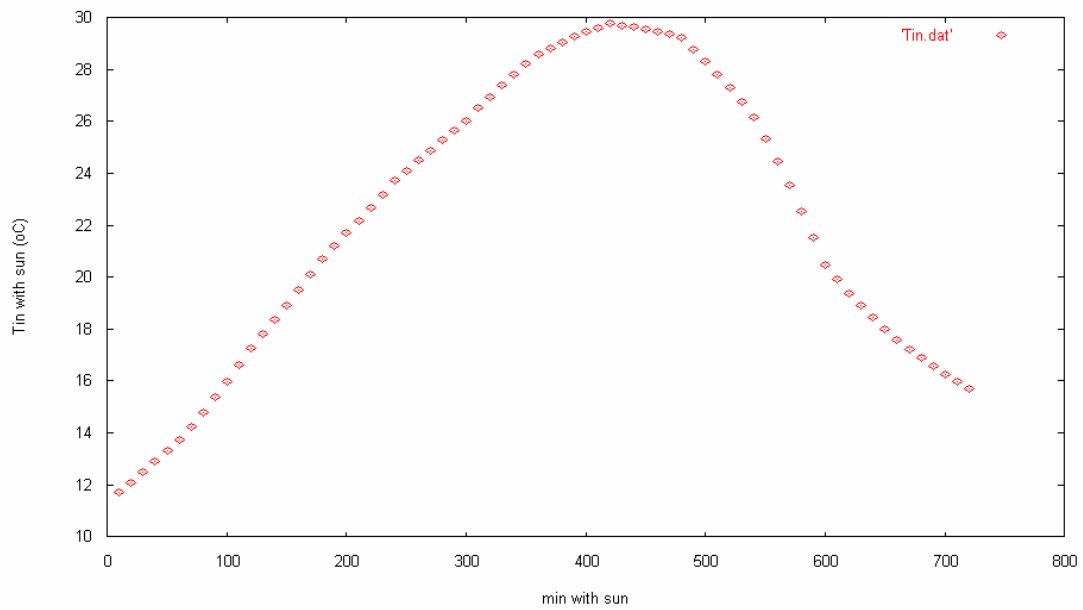
Εικόνα 87: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM συναρτήσει της θερμοκρασίας του

16.3.3 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων για την δεύτερη παραμετρική μελέτη του τοίχου, χωρίς PCM, για τον Νοέμβριο (σοβάς-τούβλο -μόνωση-τούβλο-σοβάς)

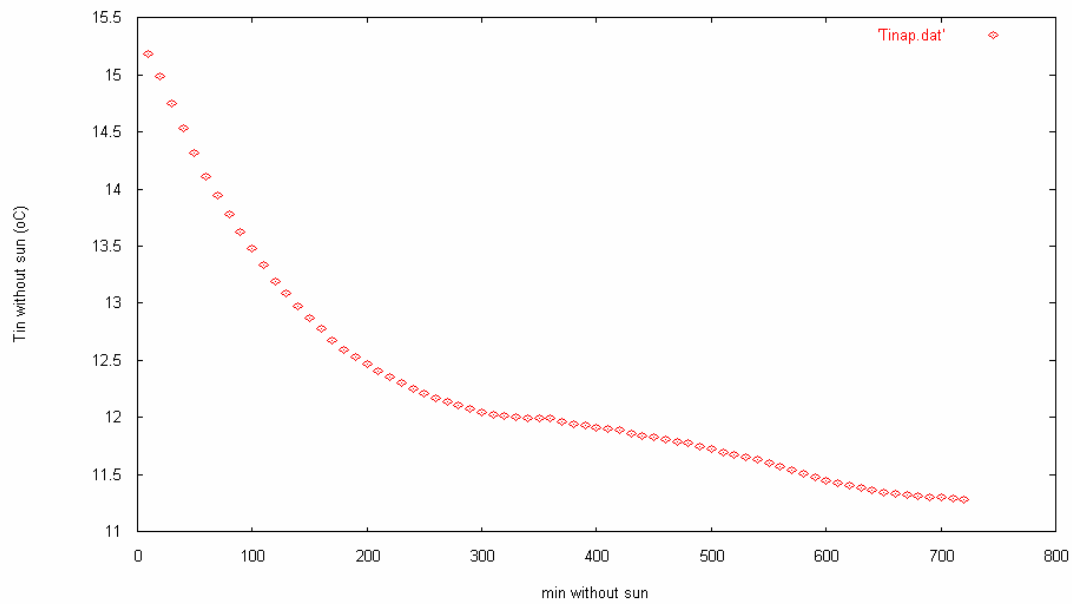
Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου



Εικόνα 88: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου συναρτήσει των ωρών του 24 ωρου



Εικόνα 89: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου συναρτήσει των λεπτών της ηλιοφάνειας (7.00-18.00)



Εικόνα 90: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου συναρτήσει των λεπτών χωρίς ηλιοφάνεια (19.00-6.00)

Μεταβολή της θερμοκρασίας του τοίχου κατά την διάρκεια του 24 ωρου

Τα υλικά κατά μήκος του τοίχου x (m) κατανέμονται ως εξής:

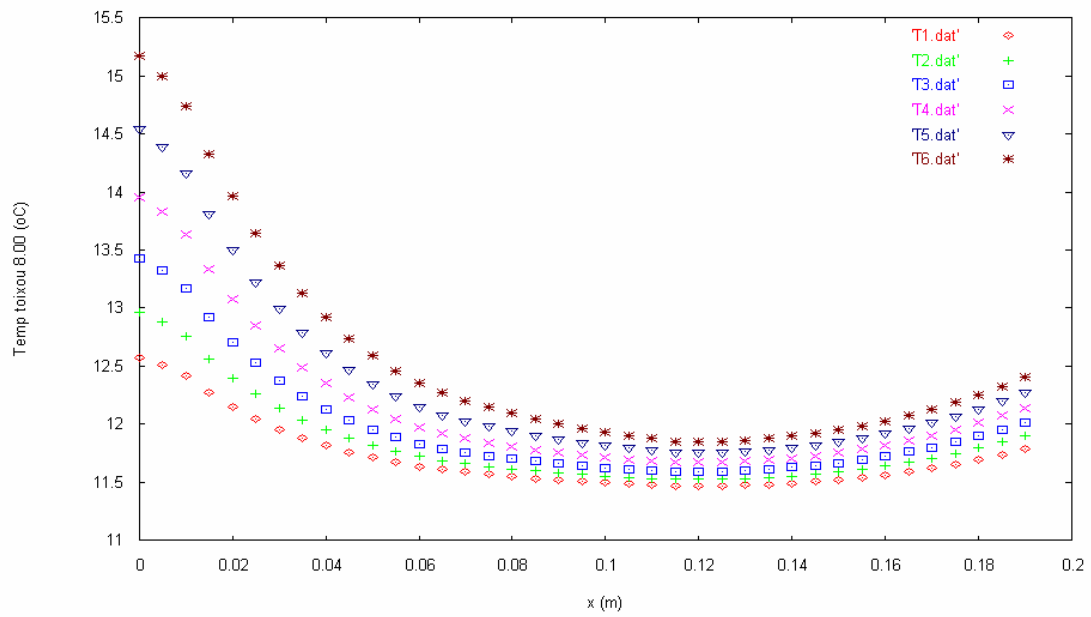
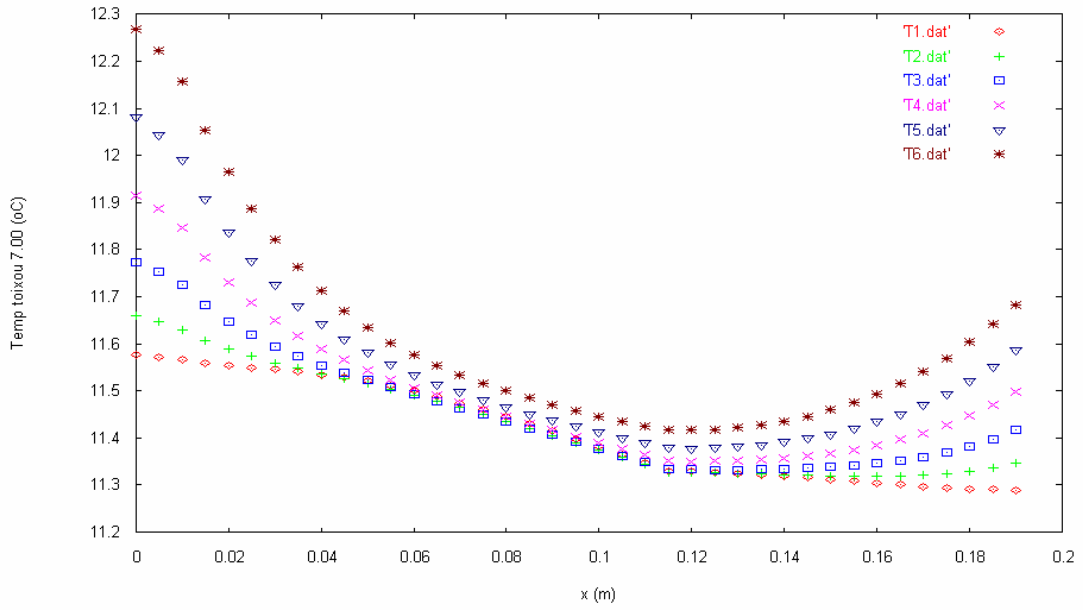
Σοβάς: 0-0.01 m

Τούβλο : 0.01-0.07 m

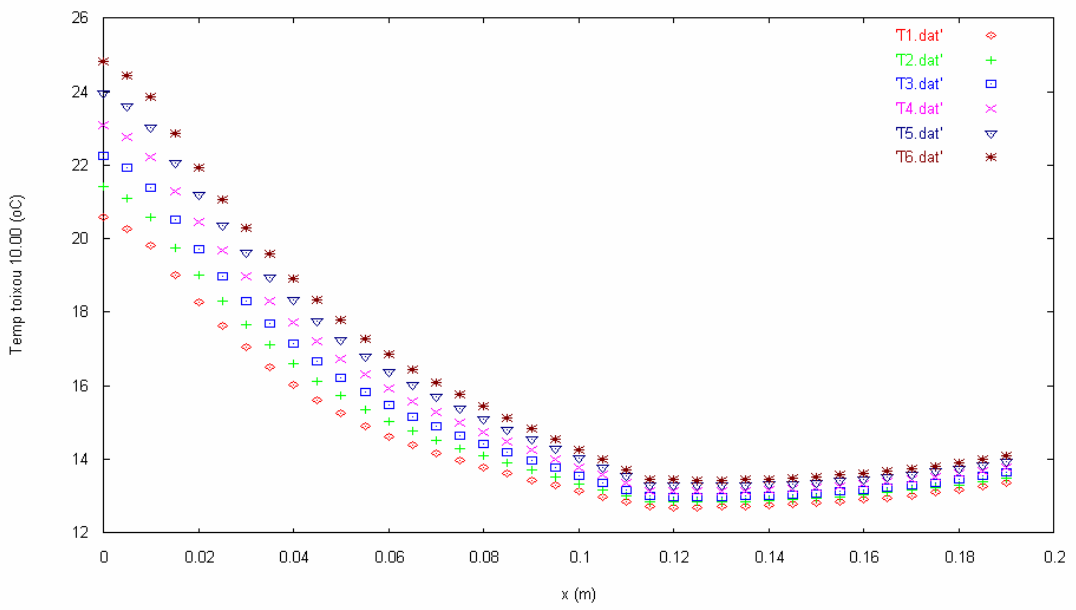
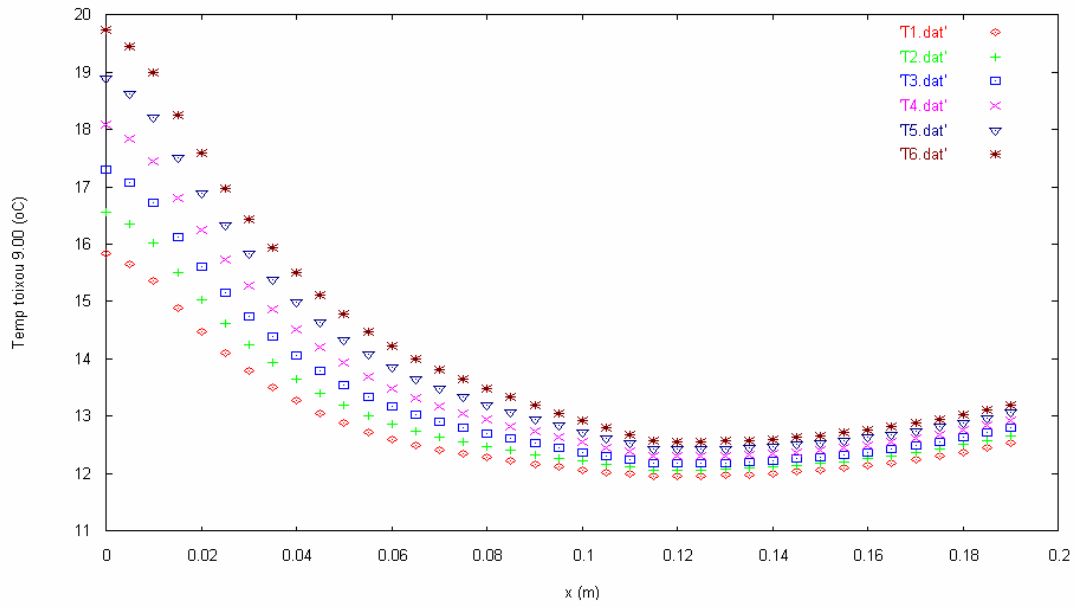
Μόνωση : 0.07-0.12 m

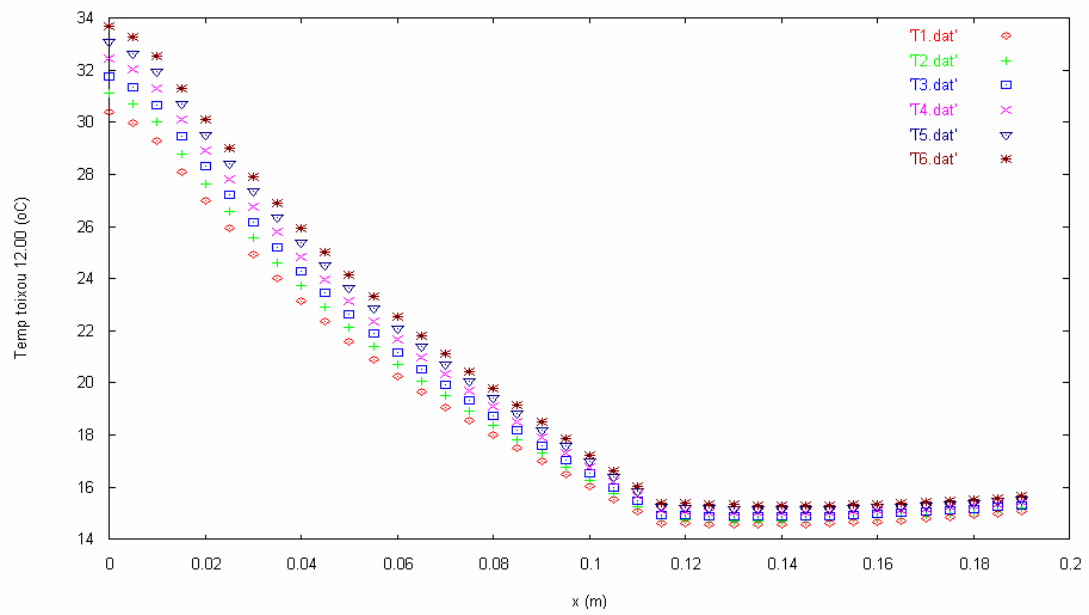
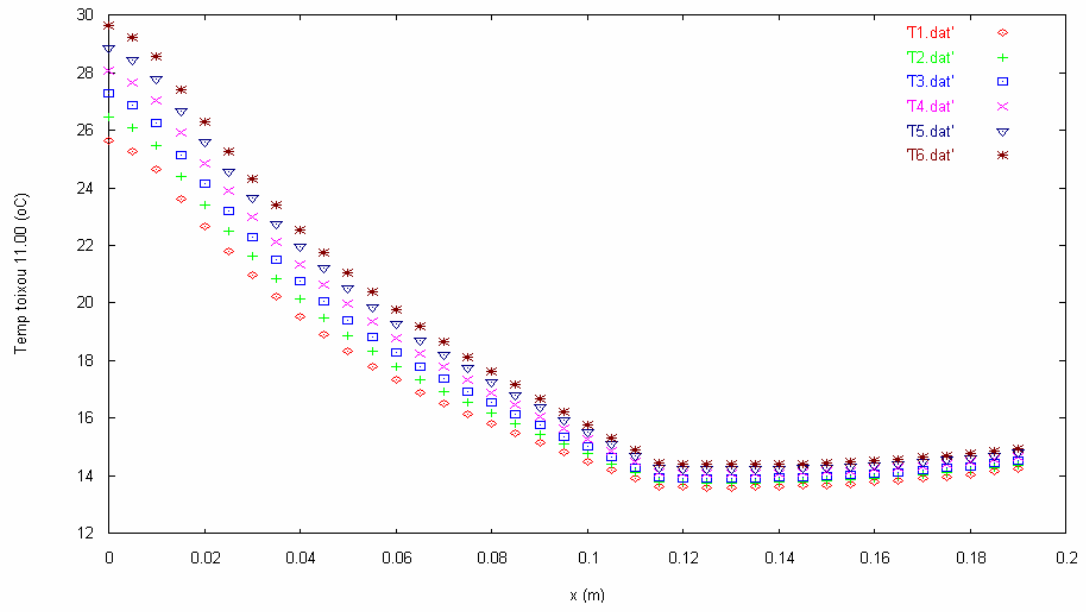
Τούβλο : 0.12-0.18 m

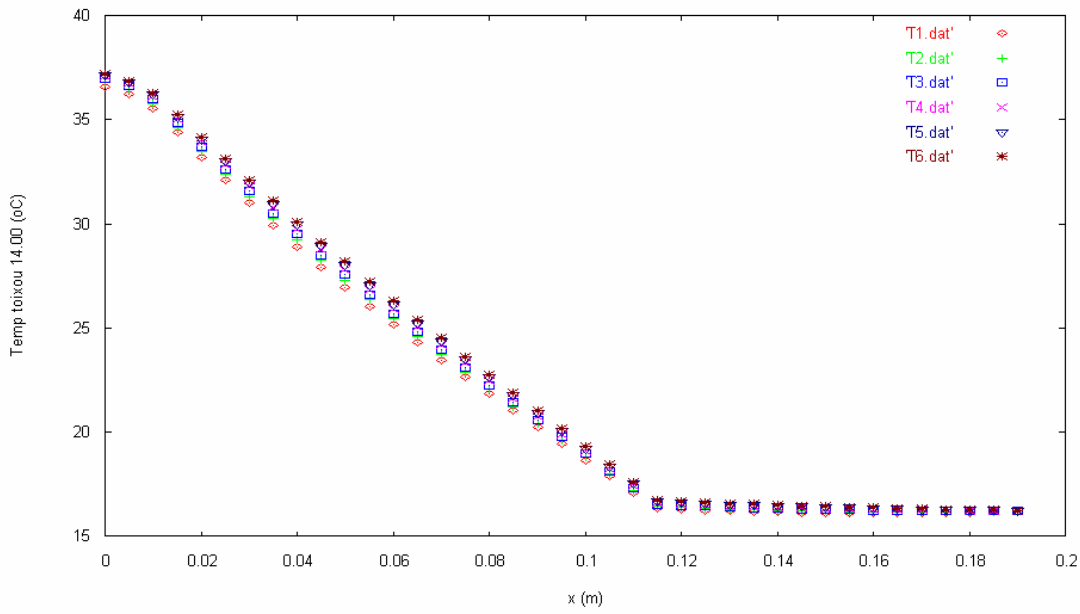
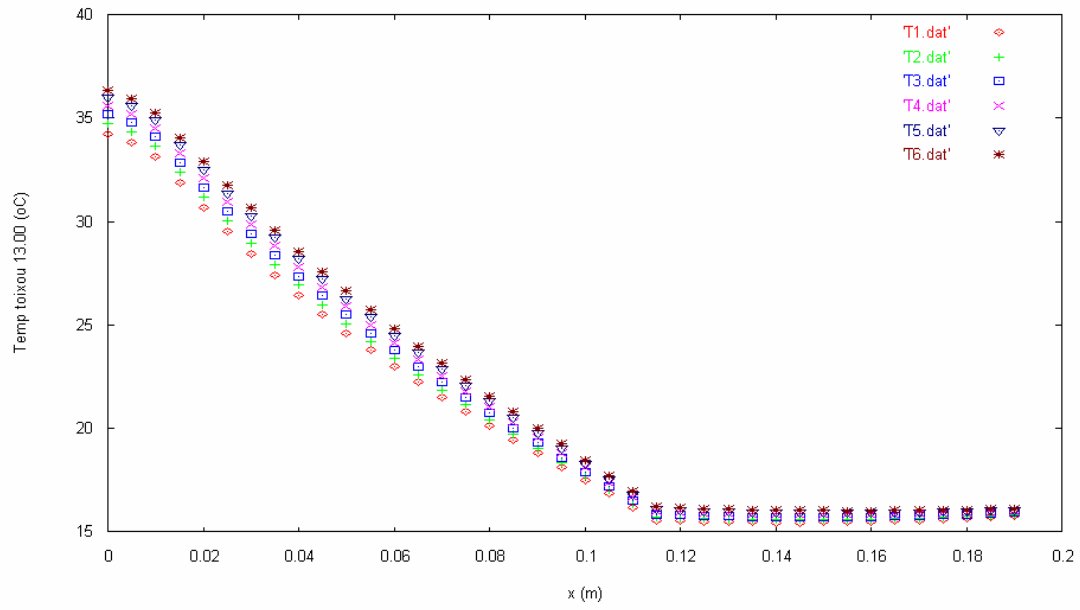
Σοβάς : 0.18-0.19 m

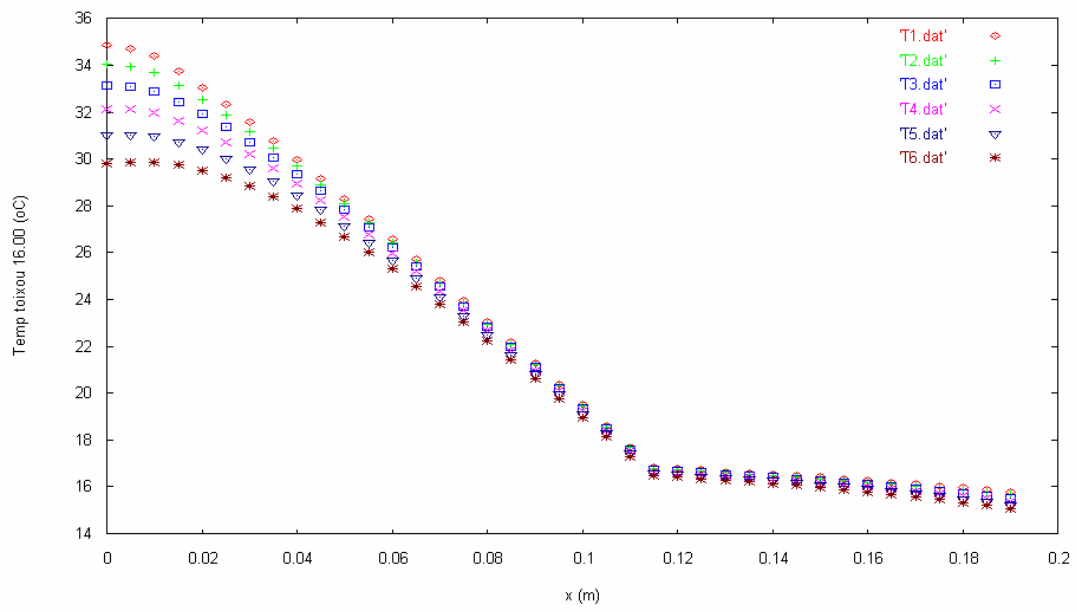
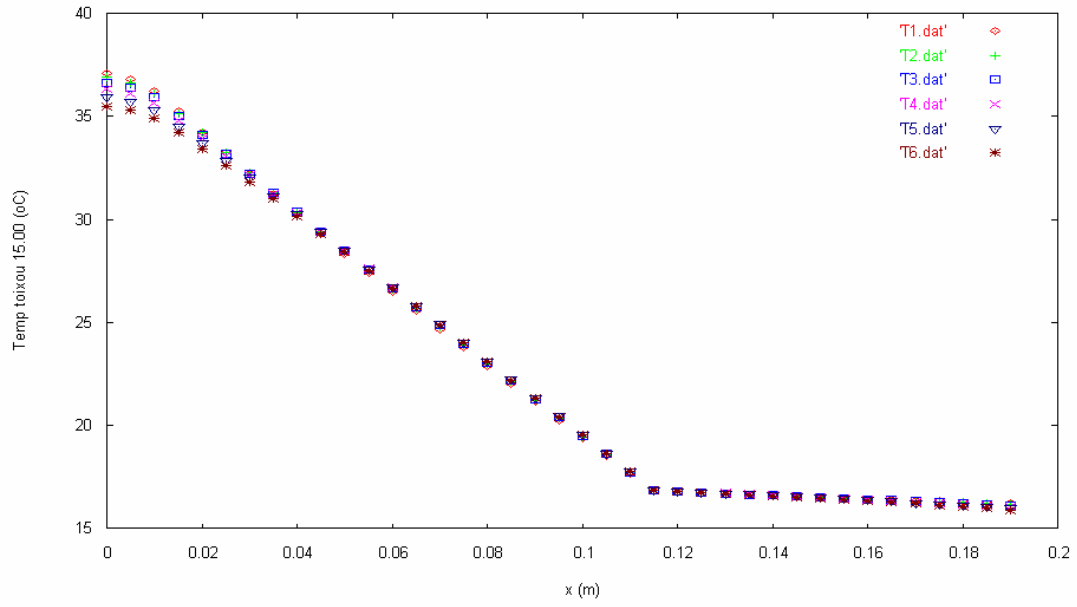


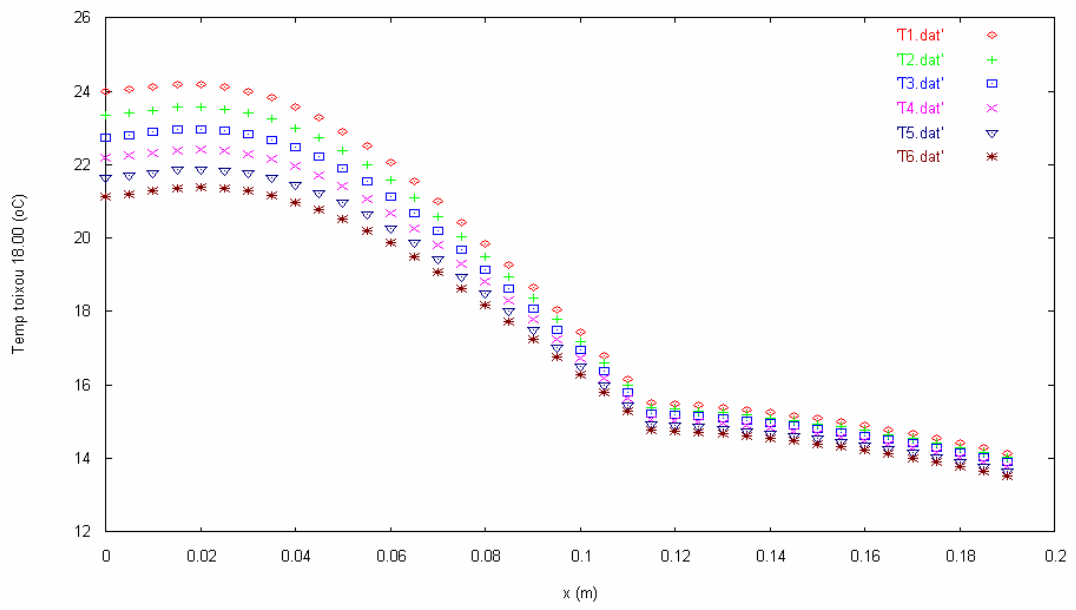
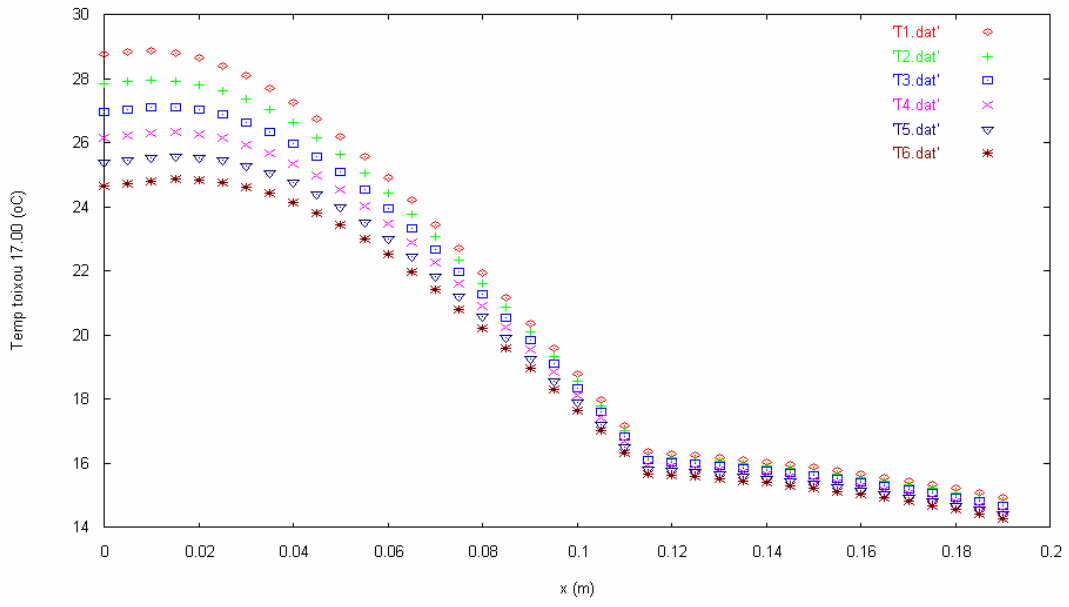
Εικόνα 91: Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος του τοίχου , κατά την διάρκεια του 24 ώρου, ακολουθούν τα διαγράμματα των υπόλοιπων ωρών

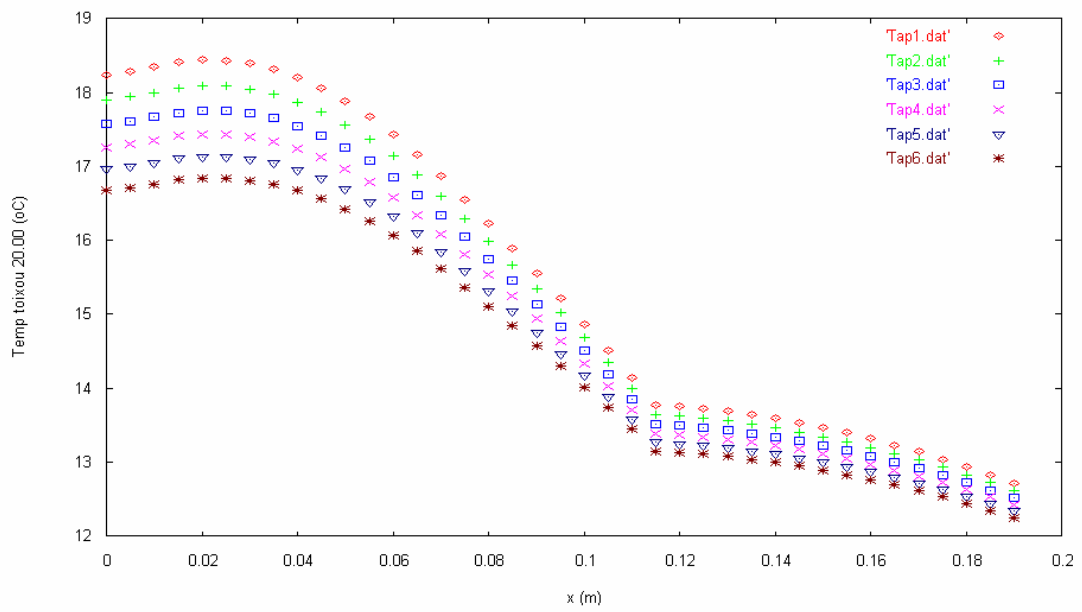
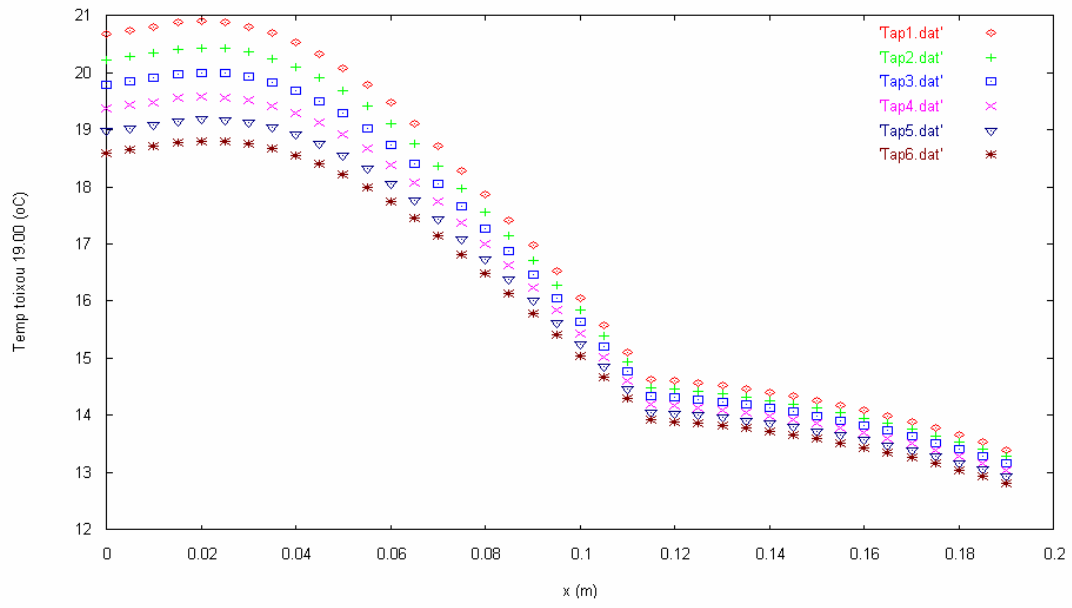


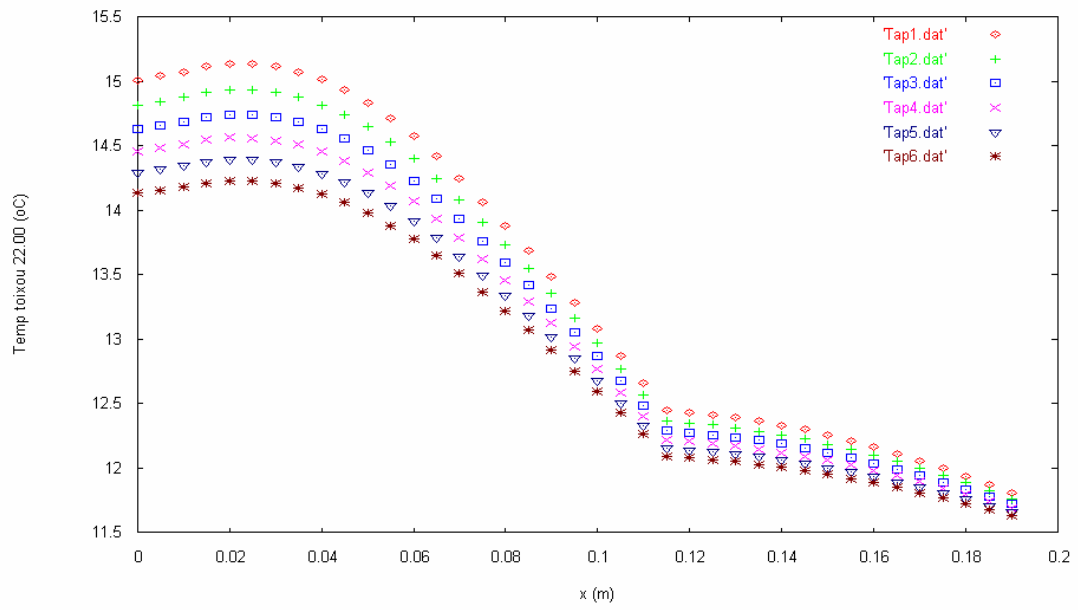
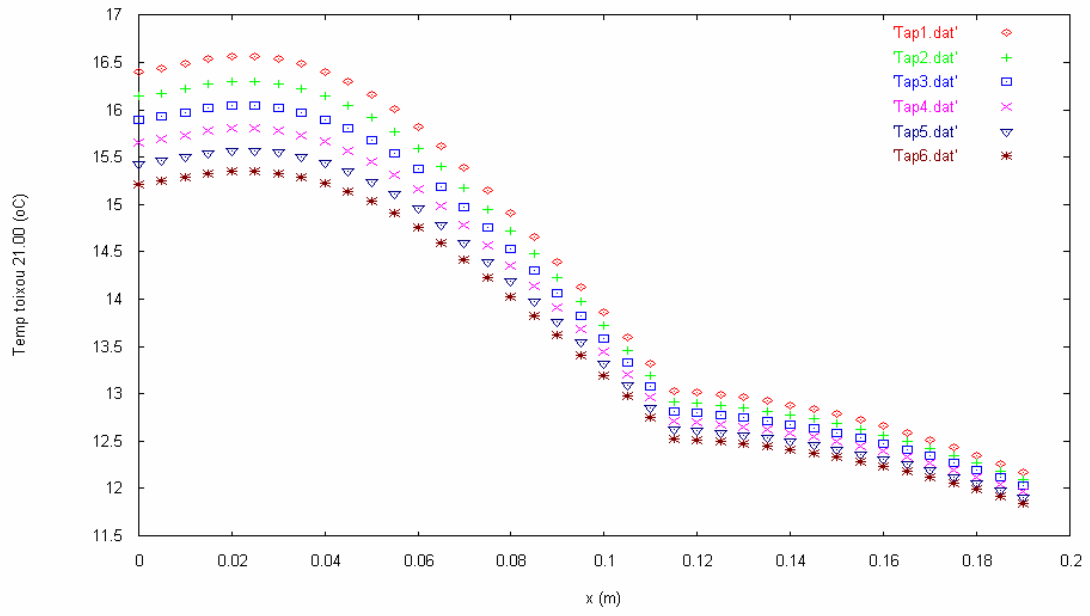


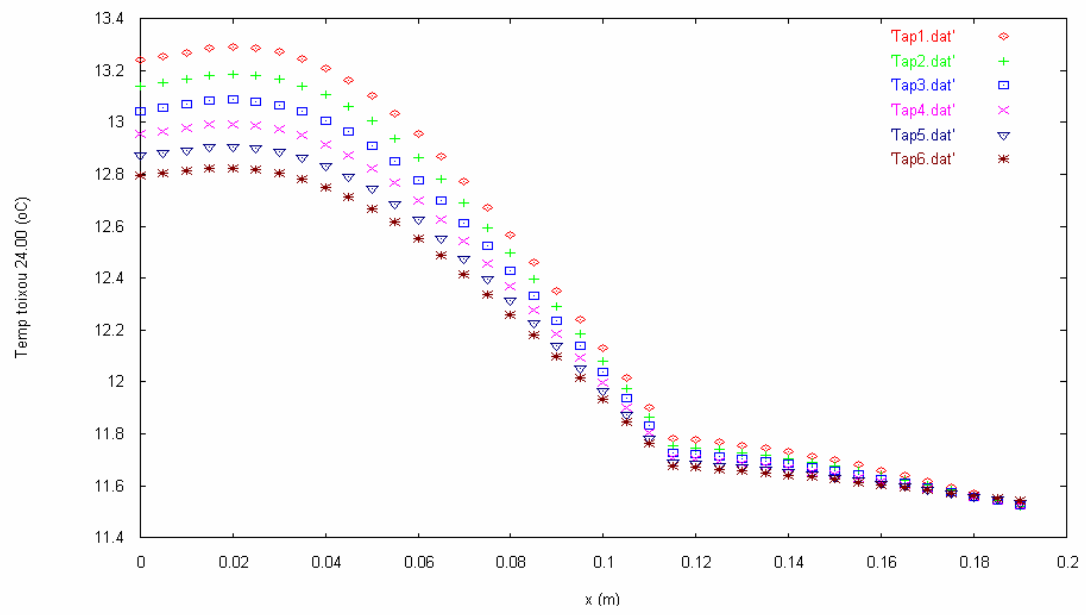
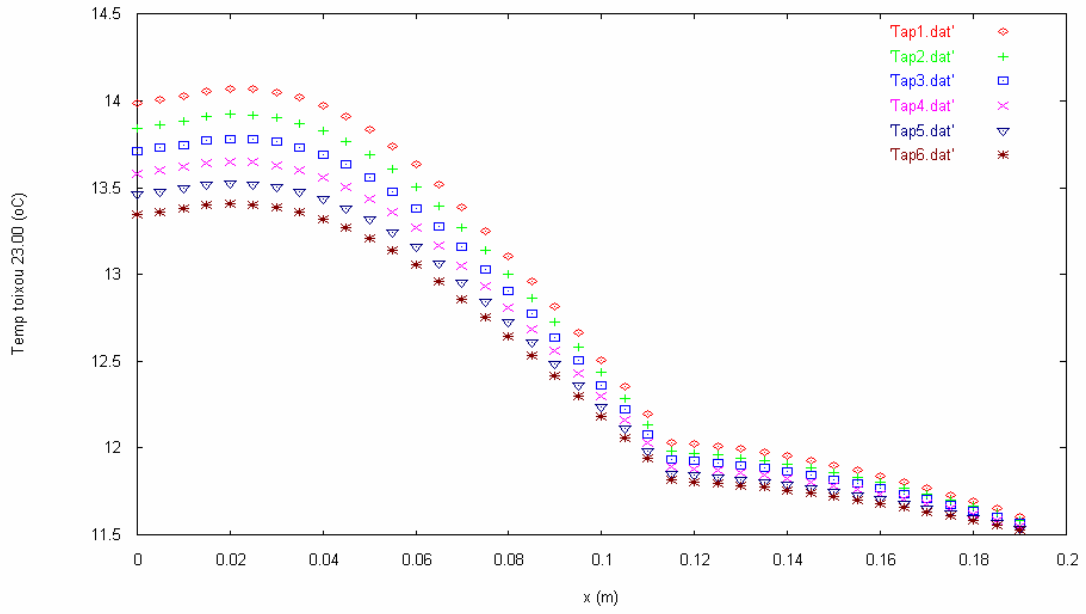


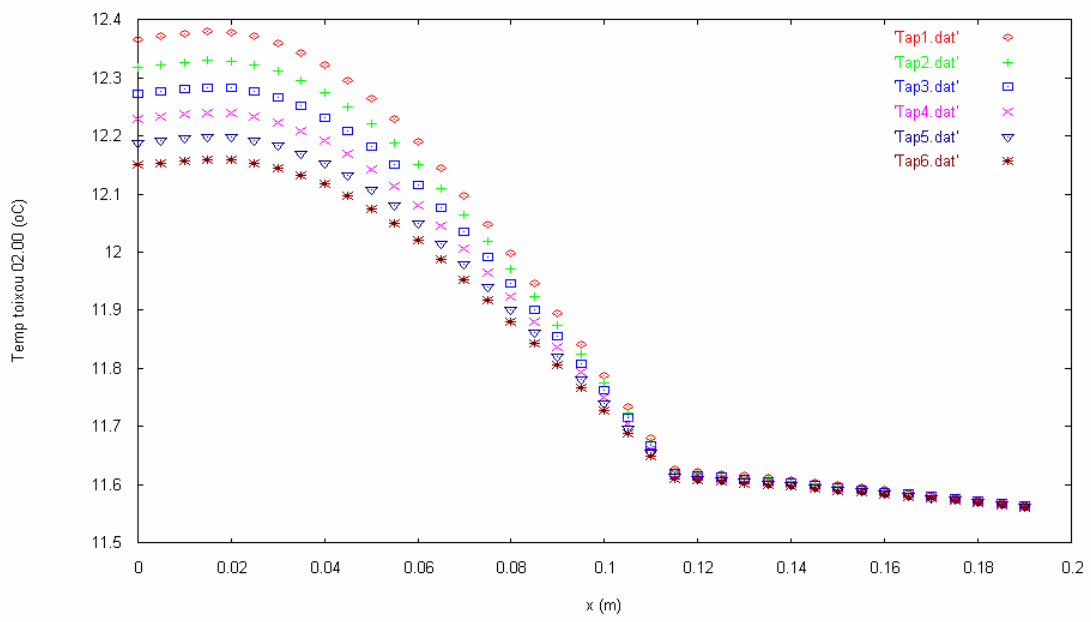
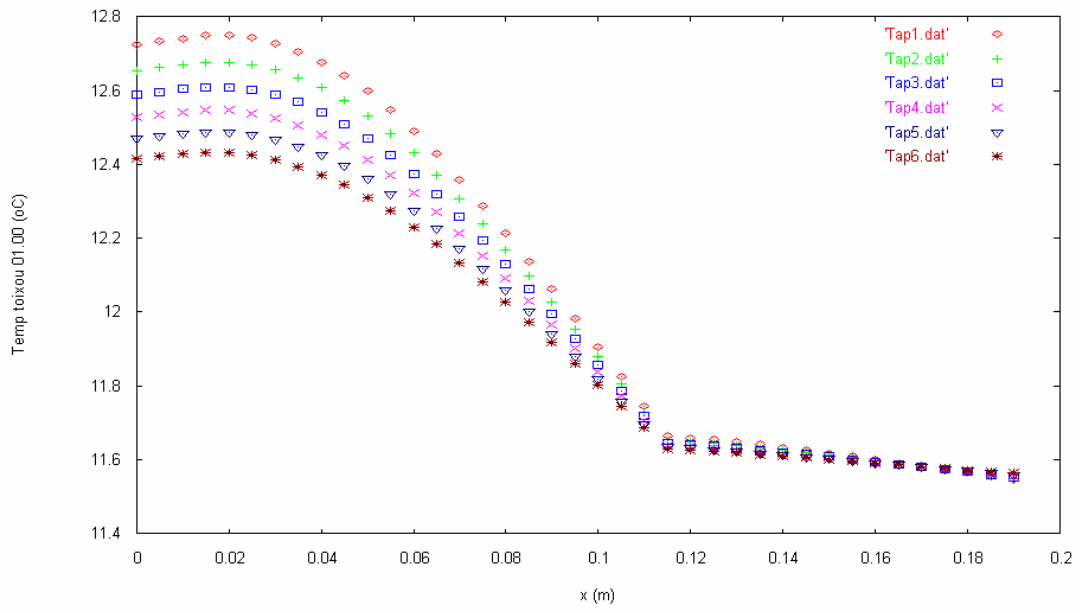


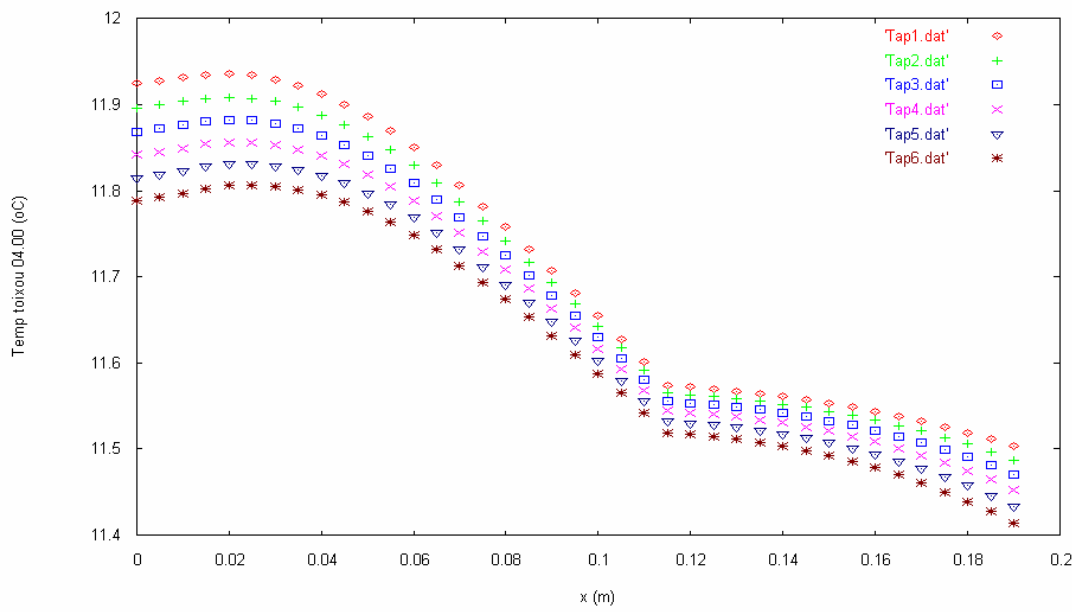
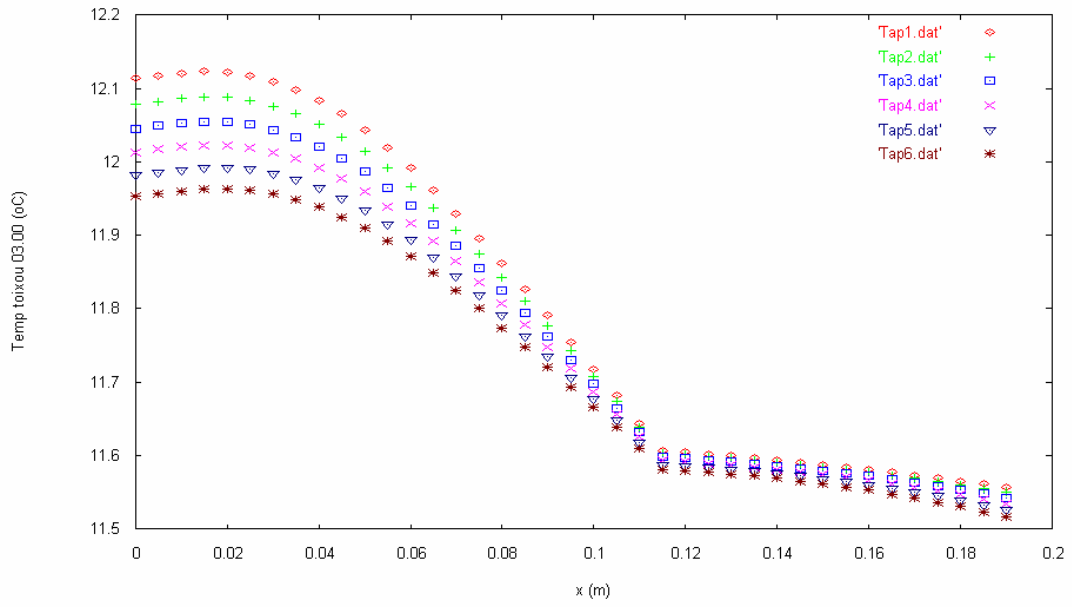


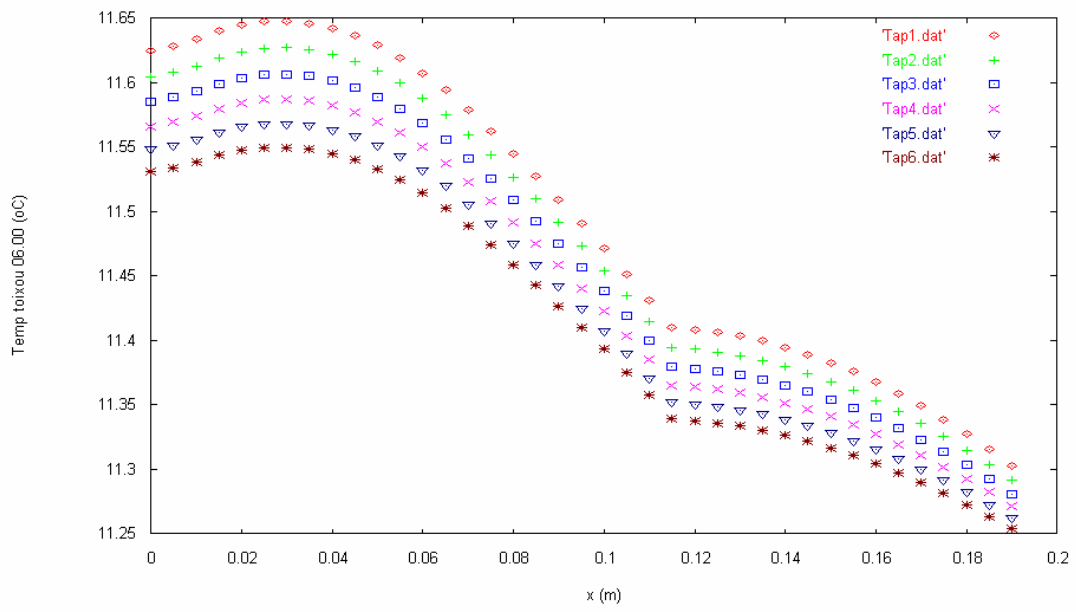
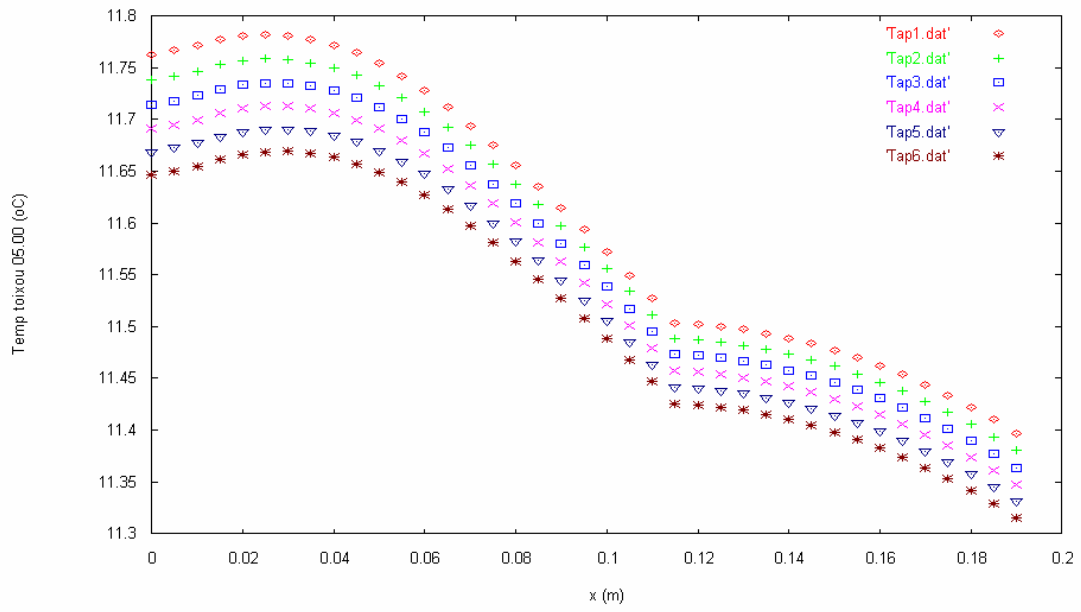












16.3.4 Σύγκριση των αποτελεσμάτων και συμπεράσματα για τον

Νοέμβριο

Η μέγιστη θερμοκρασία που εμφανίζεται μέσα στο δωμάτιο, διαφέρει ελάχιστα στις δύο περιπτώσεις που χρησιμοποιούμε PCM , και κυμαίνεται γύρω από τους 32°C, ενώ στην περίπτωση που δεν υπάρχει το PCM πλησιάζει τους

30 °C.Ωστόσο, αυτό που παρουσιάζει αξιόλογη μεταβολή είναι το εύρος της διακύμανσης της θερμοκρασίας του δωματίου.Πιο συγκεκριμένα, για την περίπτωση που το PCM είναι τοποθετημένο μετά το τούβλο, δηλαδή για την κλασσική διάταξη του τοίχου με PCM, το εύρος αυτό είναι 16-32 °C, ενώ για την πρώτη παραμετρική διερεύνηση, κατά την οποία το PCM είναι τοποθετημένο ακριβώς μετά την γυψοσανίδα, το εύρος αυτό αυξάνεται και κυμαίνεται ανάμεσα στις τιμές 13-32 °C. Όταν δεν χρησιμοποιούμε καθόλου υλικό αλλαγής φάσης το εύρος είναι 11-30 °C.Εδώ είναι σκόπιμο να κάνουμε την εξής παρατήρηση: Για την περίπτωση που δεν έχουμε καθόλου υλικό αλλαγής φάσης αναμαίναμε να προκύψει το μεγαλύτερο θερμοκρασιακό εύρος σε σχέση με τις άλλες δύο περιπτώσεις.Το γεγονός ότι το εύρος αυτό είναι το ίδιο και για την μελέτη κατά την οποία το PCM είναι τοποθετημένο κοντά στην εσωτερική επιφάνεια του τοίχου,παρ όλο που οι θερμοκρασίες είναι υψηλότερες λόγω της ύπαρξης του PCM, θα μπορούσε να αποδοθεί στις πολύ μεγάλες απώλειες θερμότητας που παρουσιάζονται επειδή η γυψοσανίδα, που διαχωρίζει το PCM από το δωμάτιο, δεν έχει μεγάλη θερμική αγωγιμότητα.

Επιπλέον, τονίζεται ότι οι τιμές της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου μπορεί να είναι σχετικά υψηλές για τον μήνα Νοέμβριο, όμως δεν θα πρέπει να παραβλέψουμε το γεγονός ότι για χάρη της έρευνας, μελετάμε ένα δωμάτιο πολύ μικρών διαστάσεων, μόνο 12 m², το οποίο έχει στην νότια πλευρά του ένα αρκετά μεγάλο παράθυρο, 3 m².Με βάση τα παραπάνω, βλέπουμε ότι ως προς τις τιμές της εσωτερικής

θερμοκρασίας του δωματίου που μελετάμε, πιο υψηλές και με μικρότερη διακύμανση είναι αυτές που δημιουργούνται από τον κλασσικό τοίχο με ενσωματωμένο PCM (σοβάς-τούβλο-PCM –μόνωση –τούβλο-σοβάς).

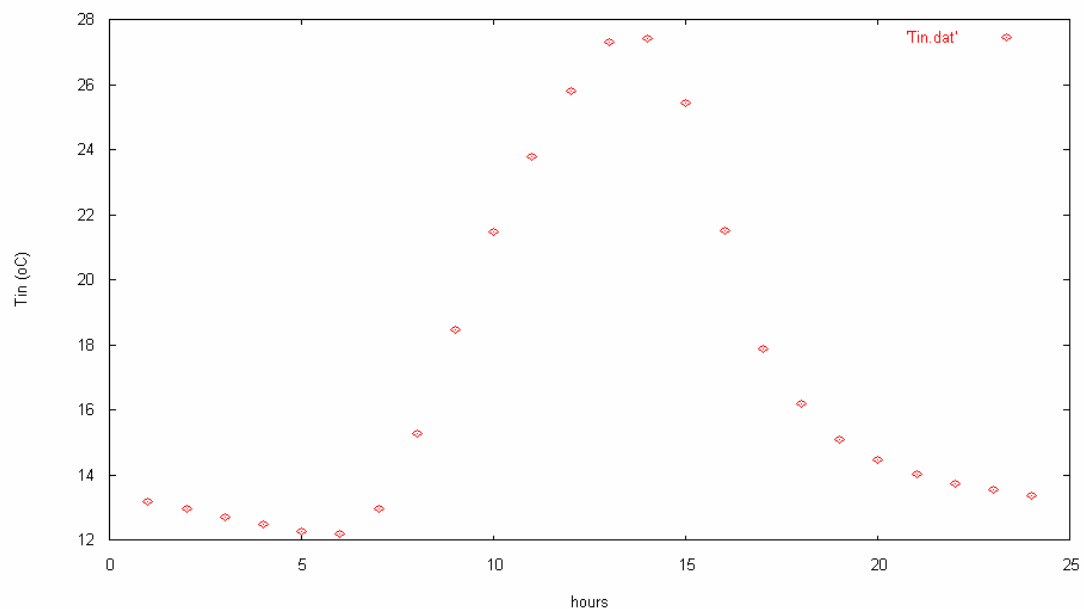
Για την θερμοκρασιακή κατανομή κατά μήκος του τοίχου, παρατηρούμε ότι υψηλότερες θερμοκρασίες εμφανίζονται στην επιφάνεια αυτού για τις δύο περιπτώσεις που έχω PCM , ενώ στην τρίτη είναι εμφανώς πιο χαμηλές, και το υλικό αλλαγής φάσης παρουσιάζει πιο ομοιόμορφη κατανομή στην περίπτωση που είναι τοποθετημένο μέσα στην κλασσική διάταξη του τοίχου.Όταν είναι τοποθετημένο κοντά στην εσωτερική επιφάνεια του τοίχου (πρώτη παραμετρική μελέτη), το θερμοκρασιακό εύρος του PCM είναι πολύ μεγαλύτερο , όπως άλλωστε φαίνεται και από τα διαγράμματα του C_p , που σημαίνει ότι εκμεταλλευόμαστε πολύ περισσότερο την λανθάνουσα θερμότητά του.Βέβαια, το γεγονός ότι η θερμοκρασία του τοίχου τις ώρες κατά τις οποίες δεν έχει ηλιοφάνεια είναι πολύ χαμηλότερη στην περίπτωση αυτή, θα μπορούσε να αποδοθεί στις αυξημένες απώλειες θερμότητας που εμφανίζονται μιάς και το PCM έρχεται πιο άμεσα σε επαφή με το περιβάλλον το δωματίου.

Με βάση όλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν , η καλύτερη επιλογή για την θέρμανση του δωματίου για τον μήνα Νοέμβριο είναι σίγουρα η προσθήκη του υλικού αλλαγής φάσης στην κλασσική διάταξη του τοίχου, ενώ πρέπει να τονισθεί η αισθητή διαφορά στις θερμοκρασιακές μεταβολές που έχει προκαλέσει η προσθήκη του PCM.

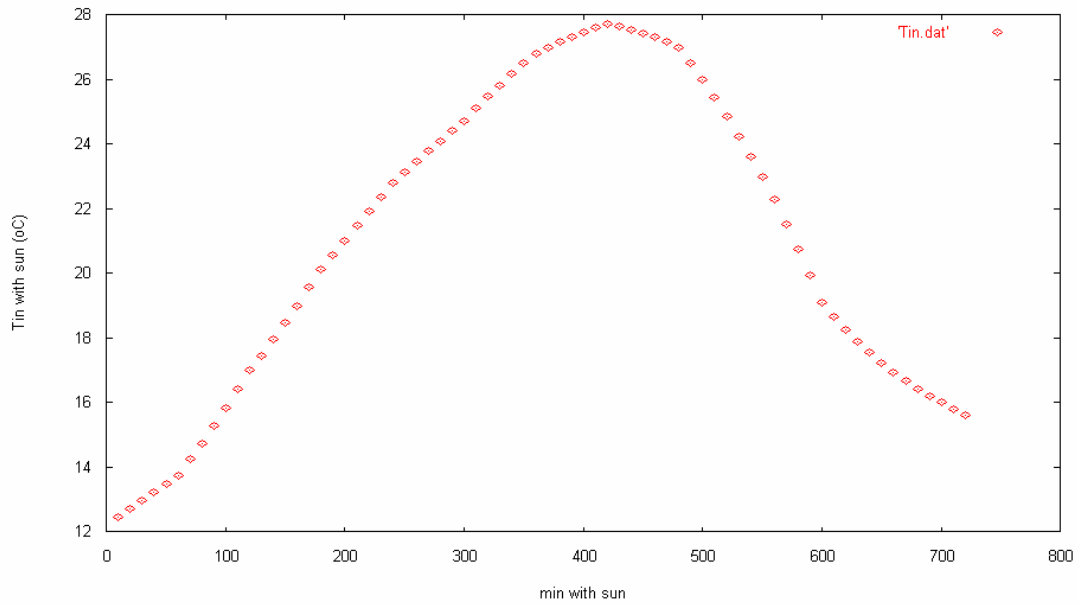
16.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων και παραμετρική διερεύνηση για τον μήνα Δεκέμβριο.

16.4.1 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων για την κλασική διάταξη του τοίχου με το PCM για τον μήνα Δεκέμβρη (σοβάς-τούβλο-PCM-μόνωση-τούβλο-σοβάς)

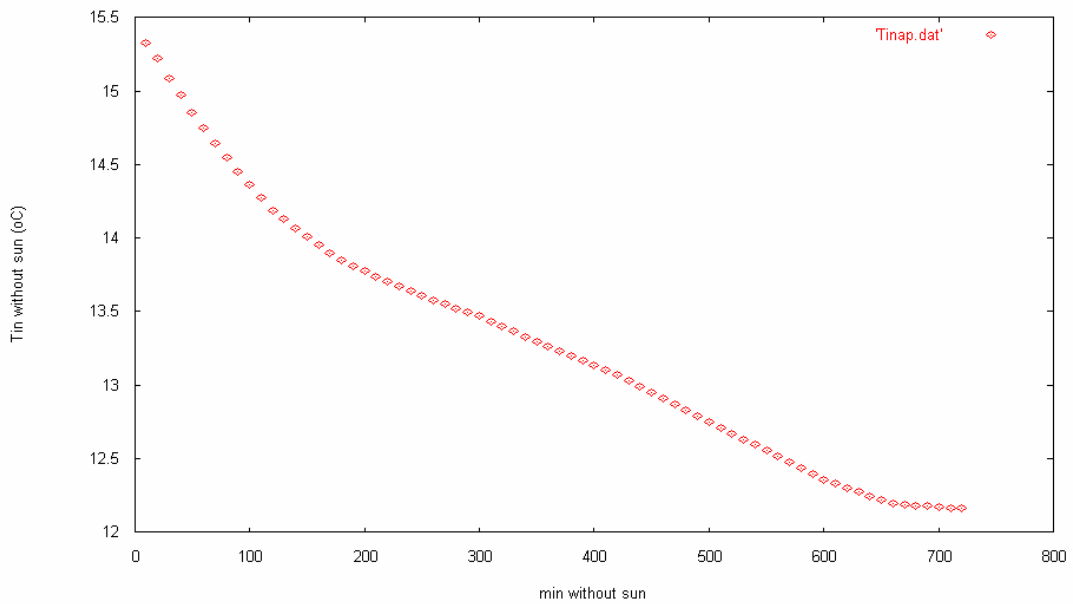
Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου.



Εικόνα 92: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου κατά την διάρκεια του 24 ωρου.



Εικόνα 93: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου συναρτήσει των λεπτών της ηλιοφάνειας (7.00-18.00)



Εικόνα 94: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου συναρτήσει των λεπτών κατά την διάρκεια των οποίων δεν υπάρχει ηλιοφάνεια (19.00- 6.00)

Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος του τοίχου κατά την διάρκεια του

24 ωρου

Η κατανομή των υλικών κατά μήκος του τοίχου $x(m)$ είναι η εξής:

Σοβάς :0-0.01 m

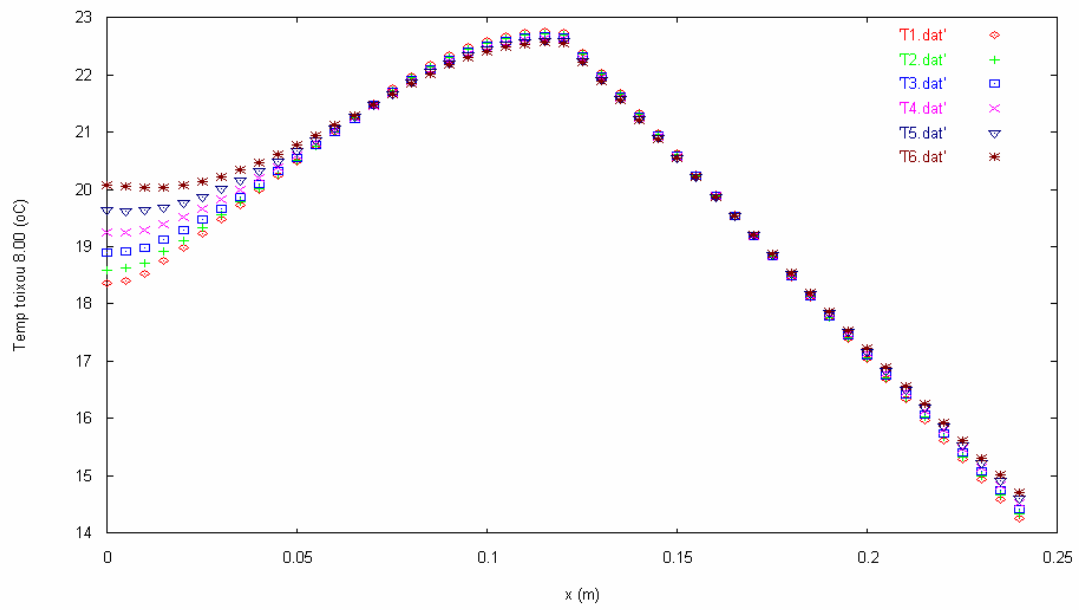
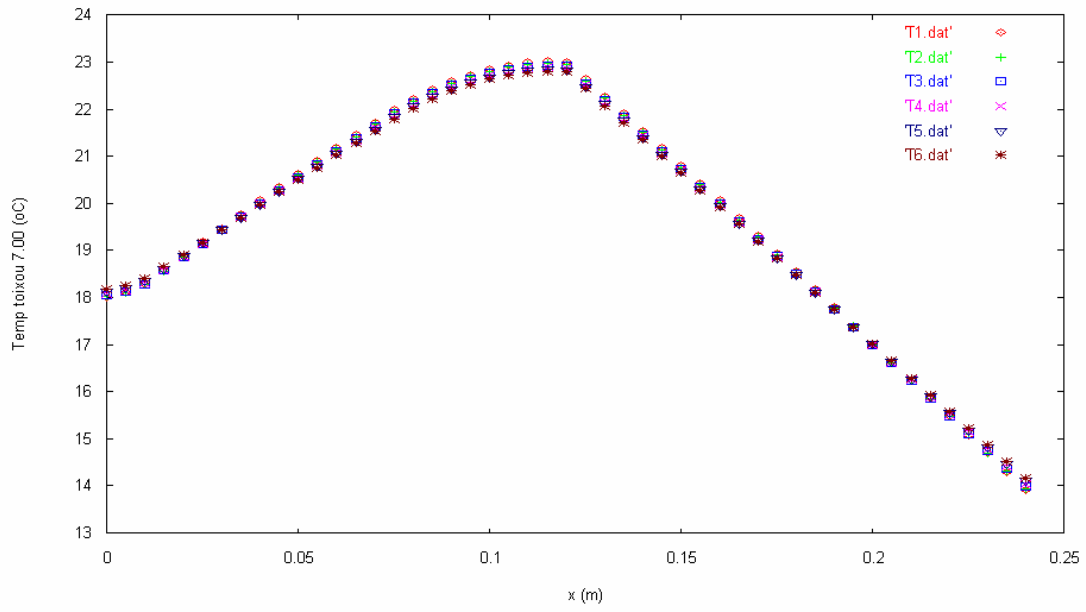
Τούβλο :0.01-0.07 m

PCM :0.07-0.12 m

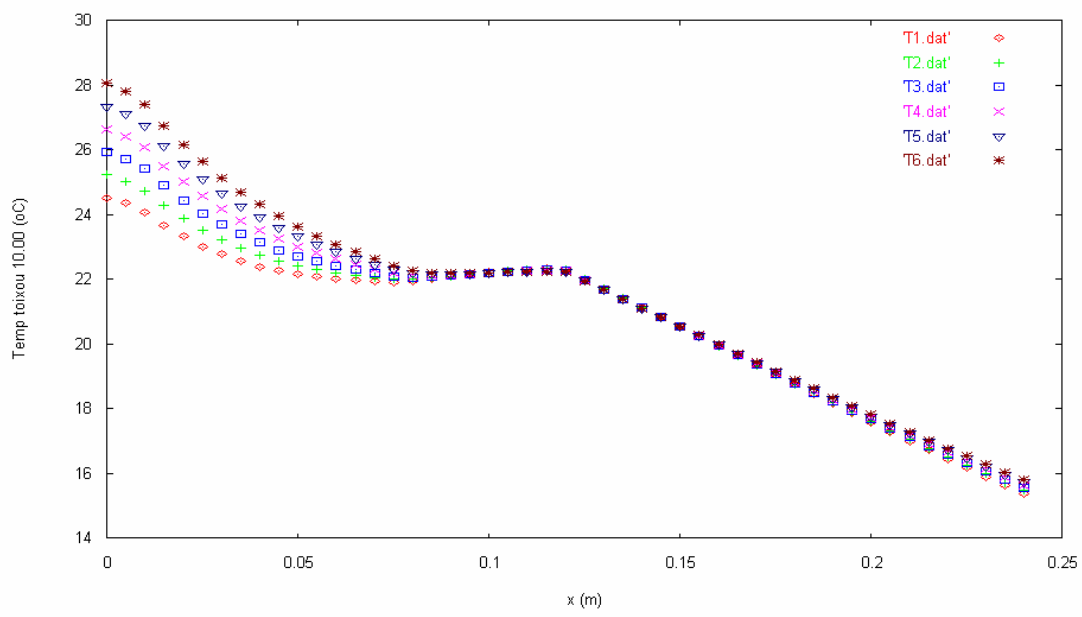
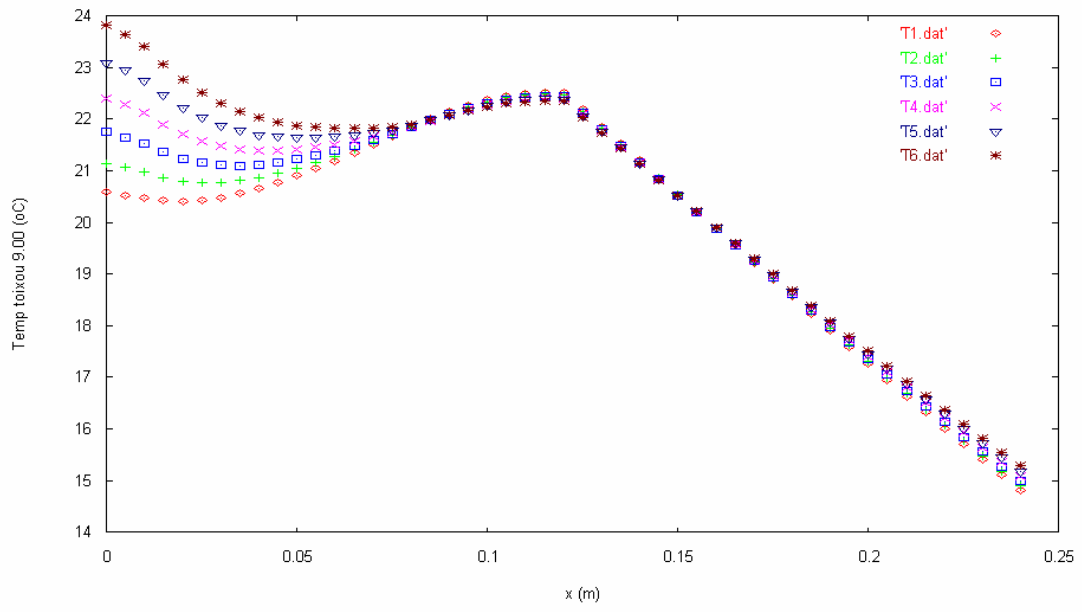
Μόνωση : 0.12-0.17 m

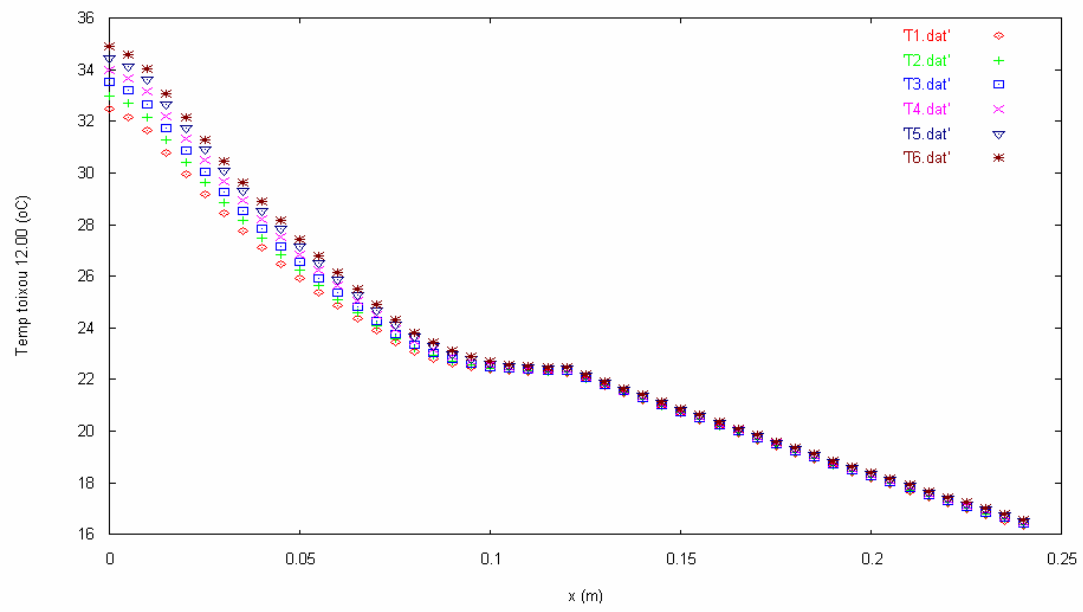
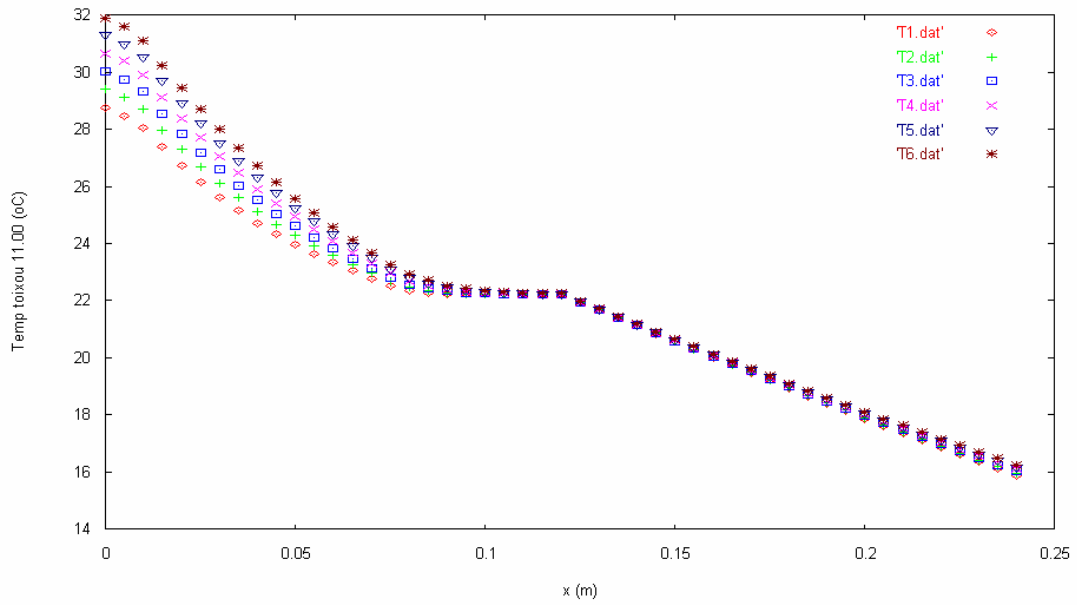
Τούβλο : 0.17-0.23 m

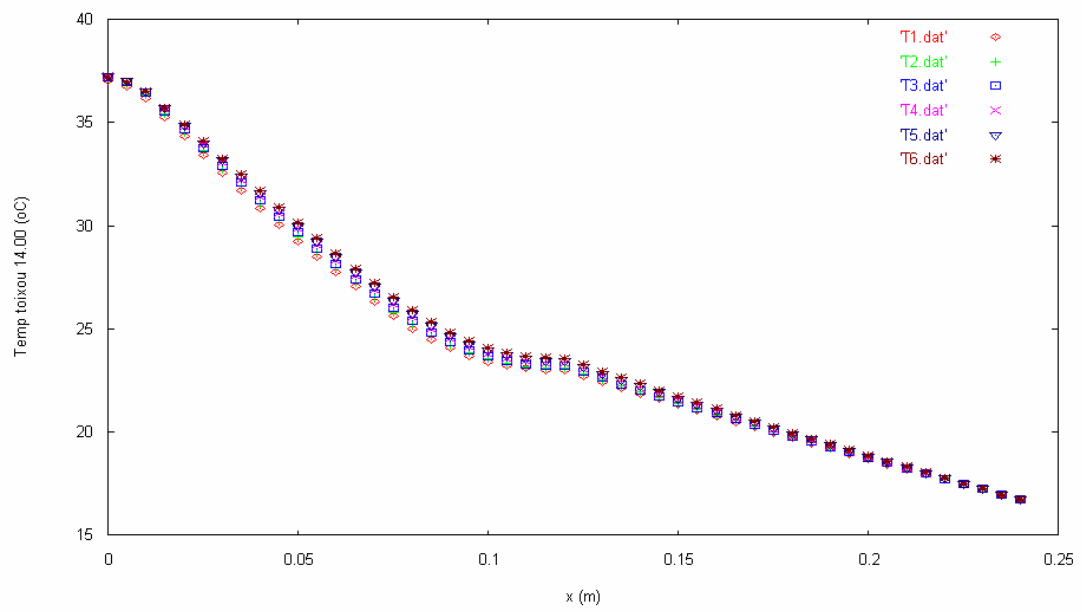
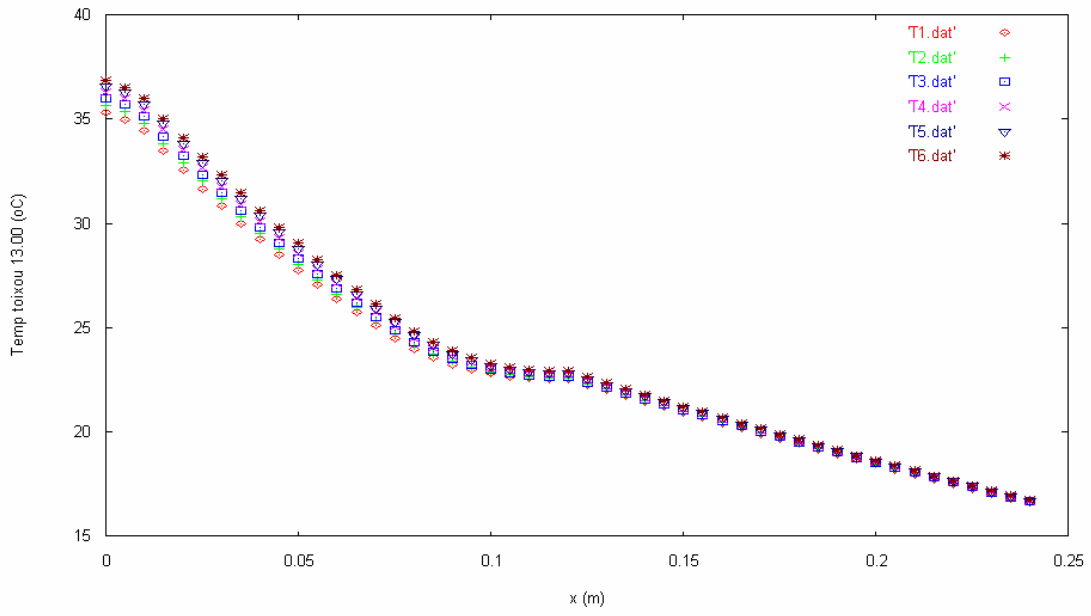
Σοβάς : 0.23-0.24 m

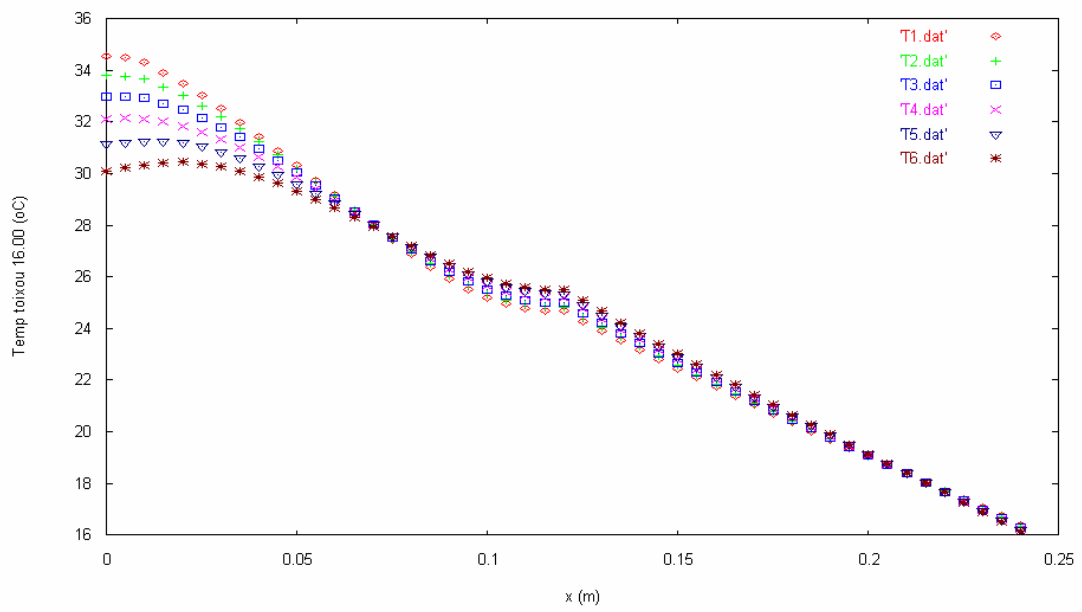
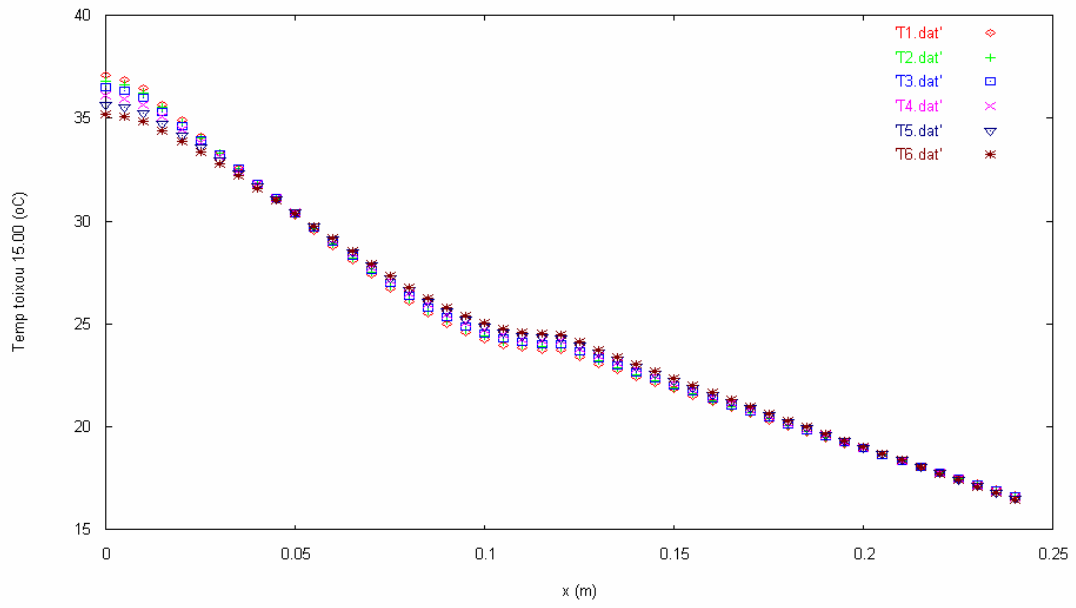


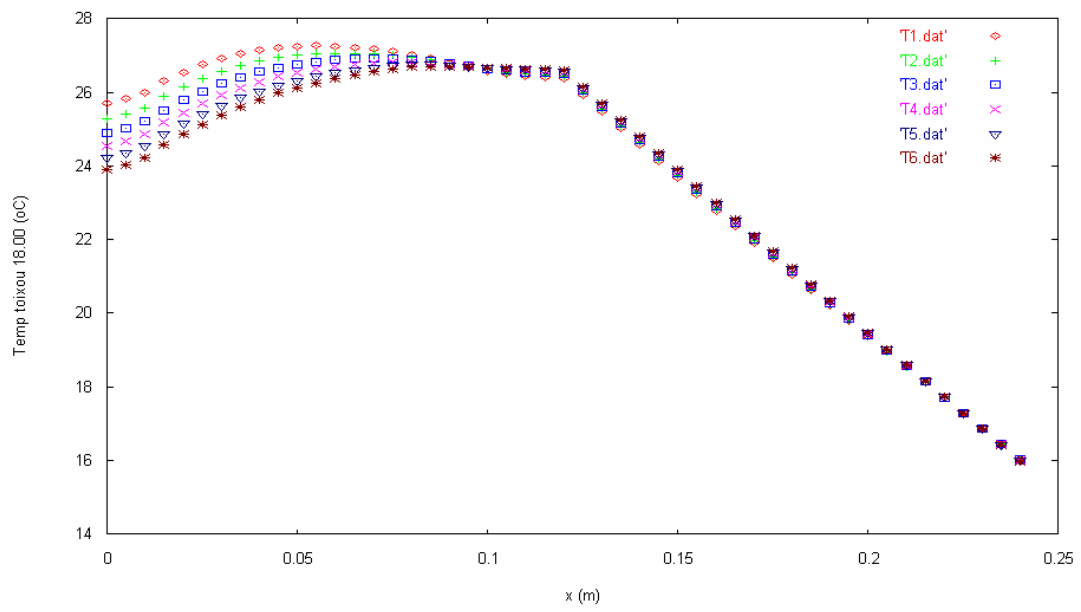
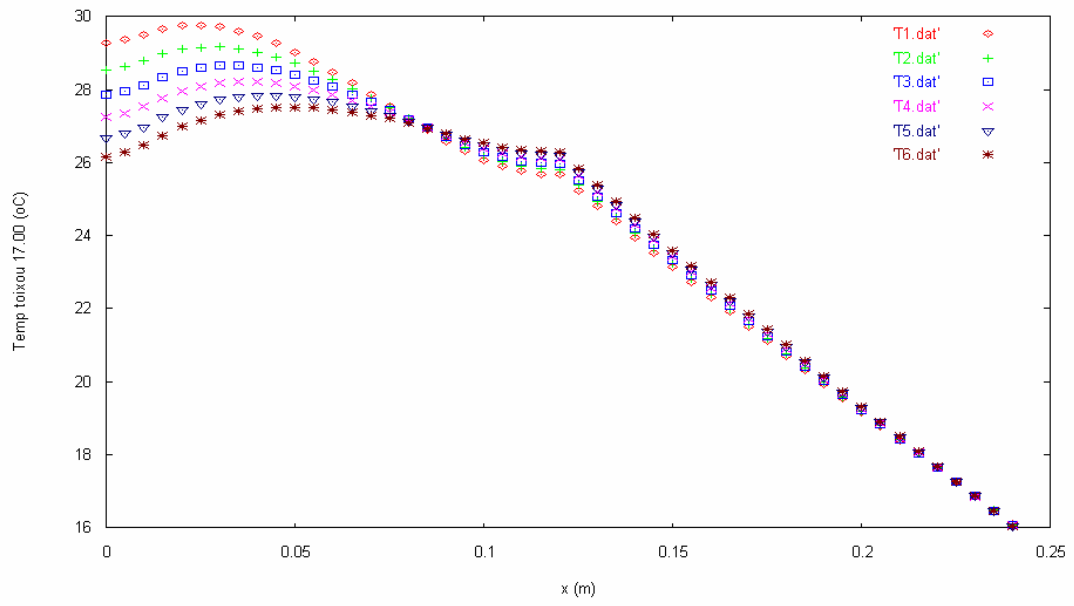
Εικόνα 95: Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος του τοίχου κατά την διάρκεια του 24 ωρου, ακολουθούν τα διαγράμματα των υπόλοιπων ωρών

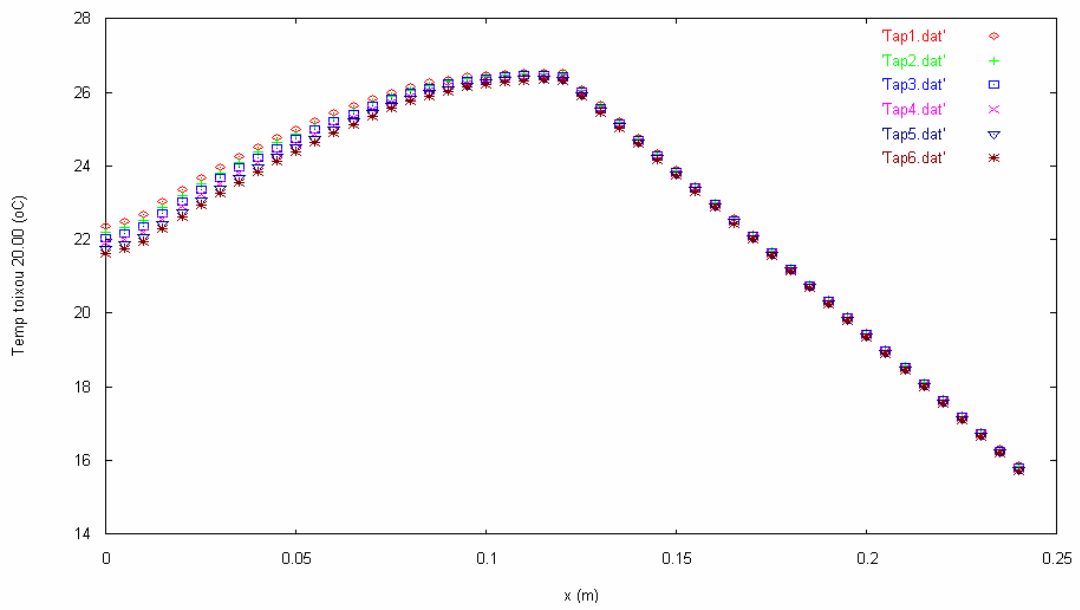
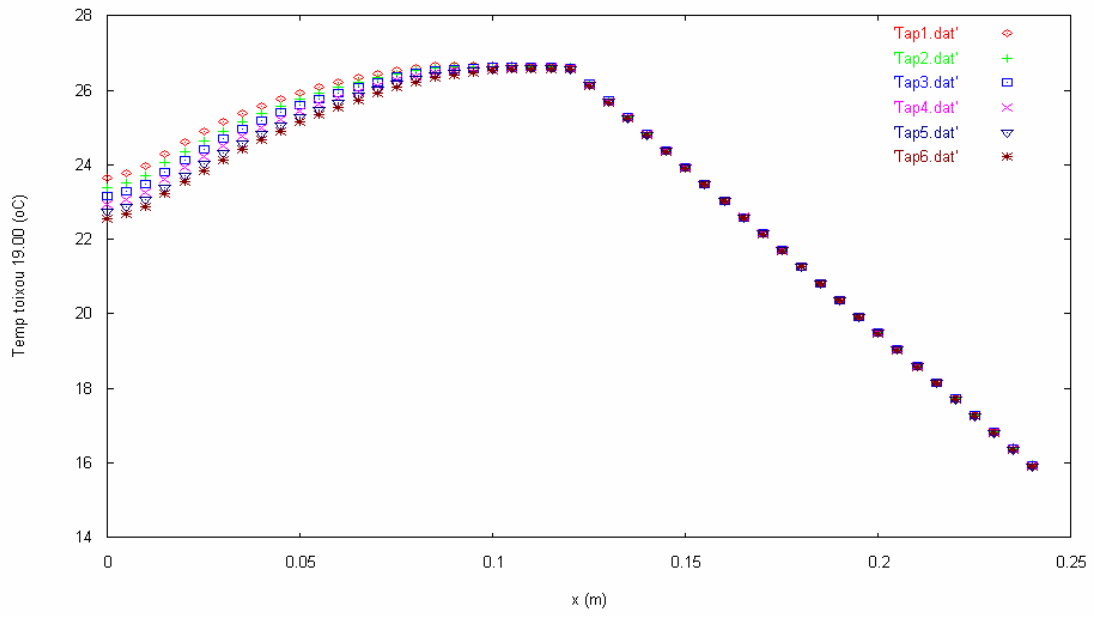


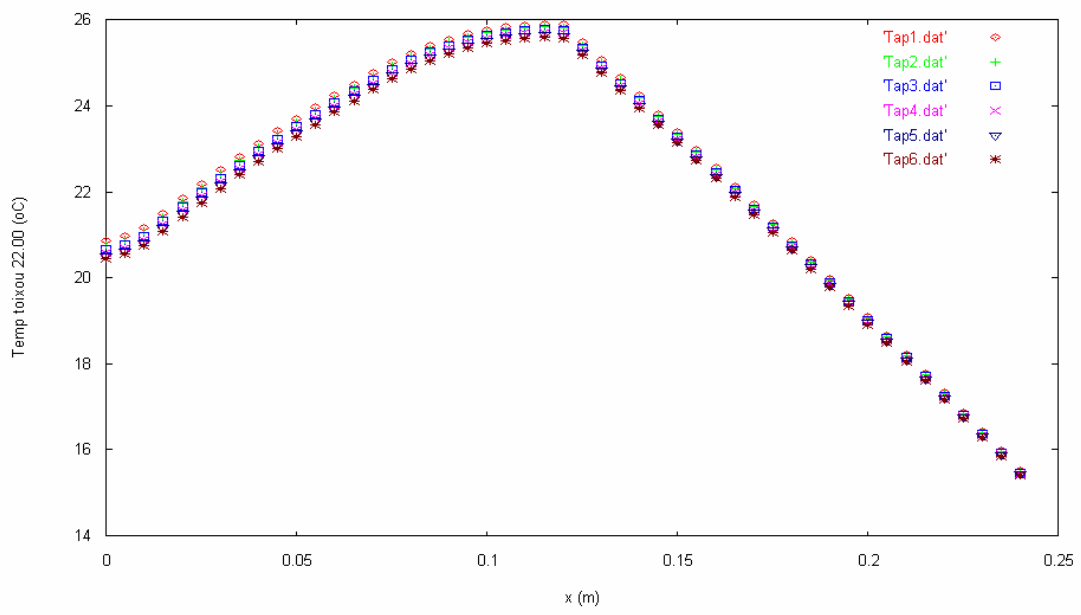
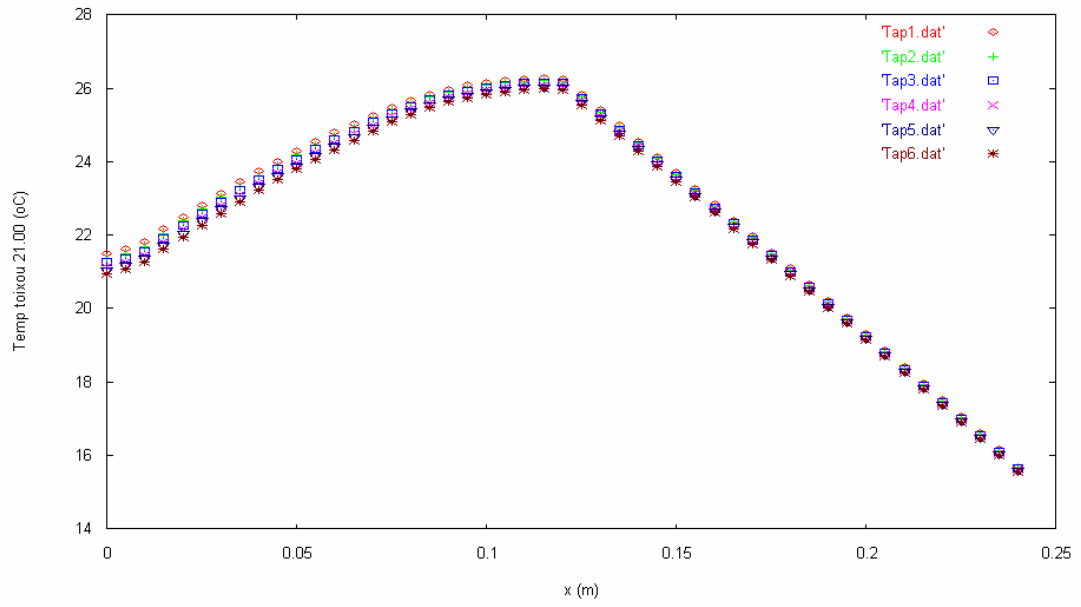


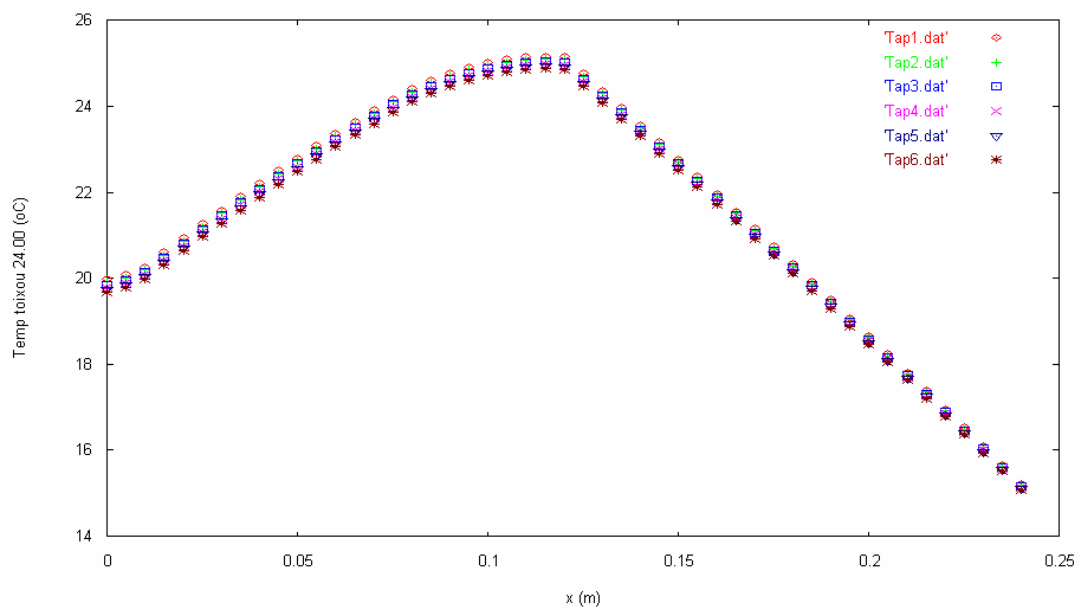
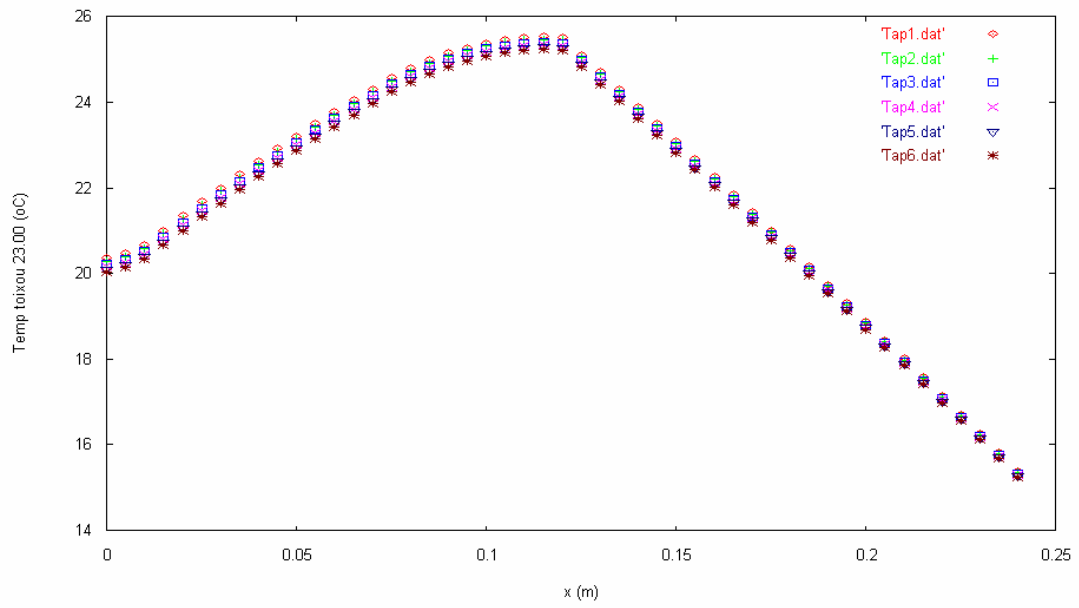


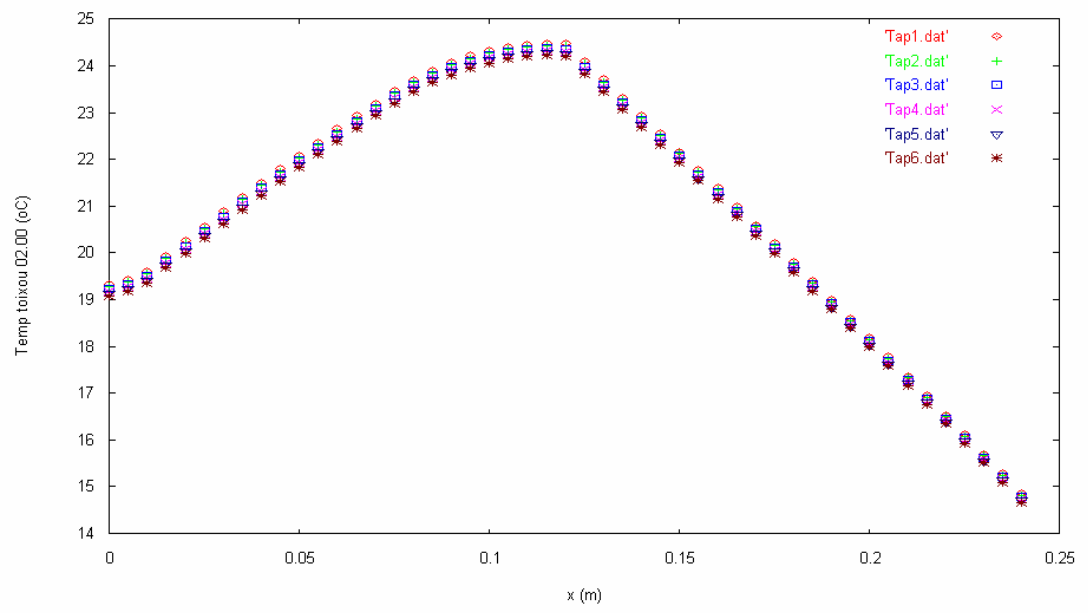
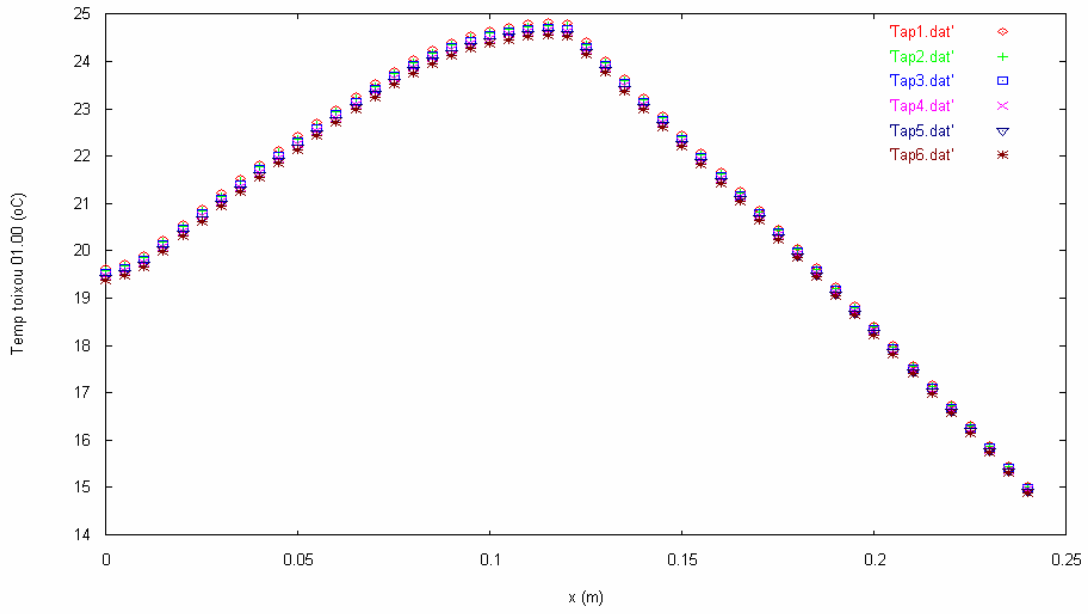


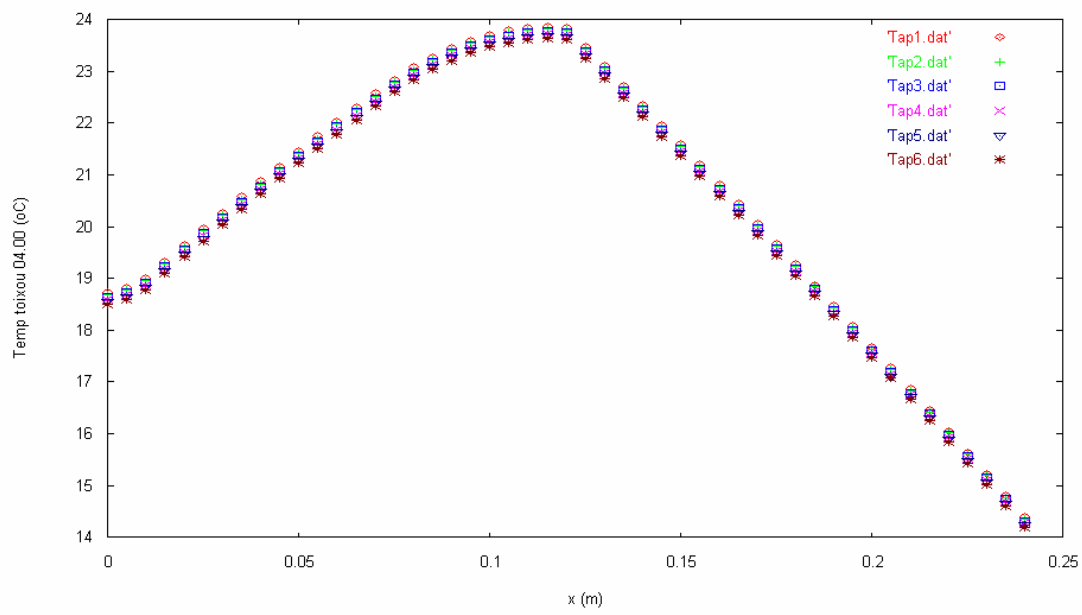
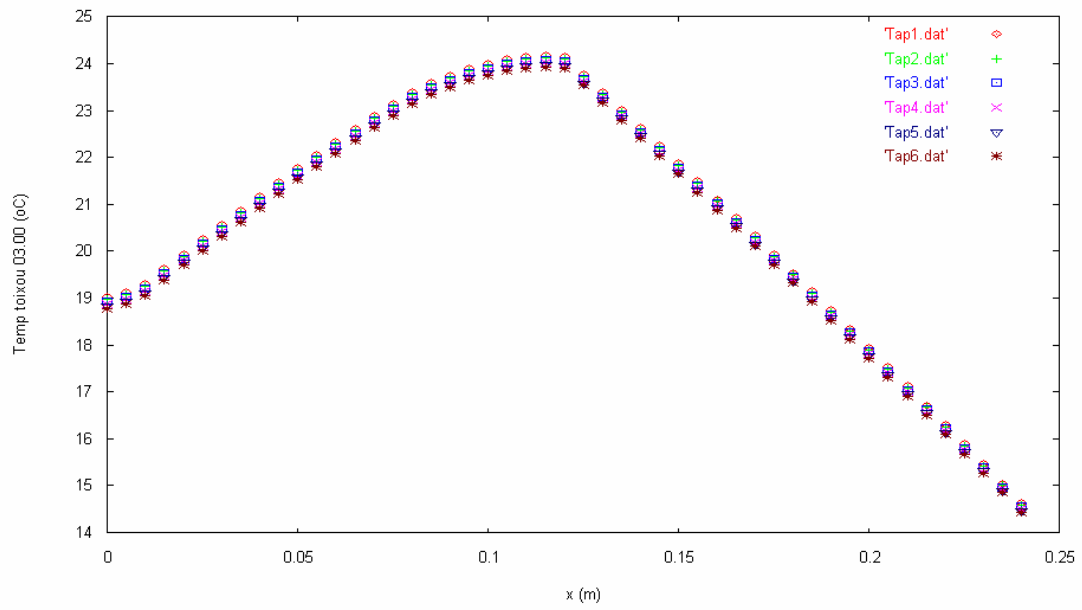


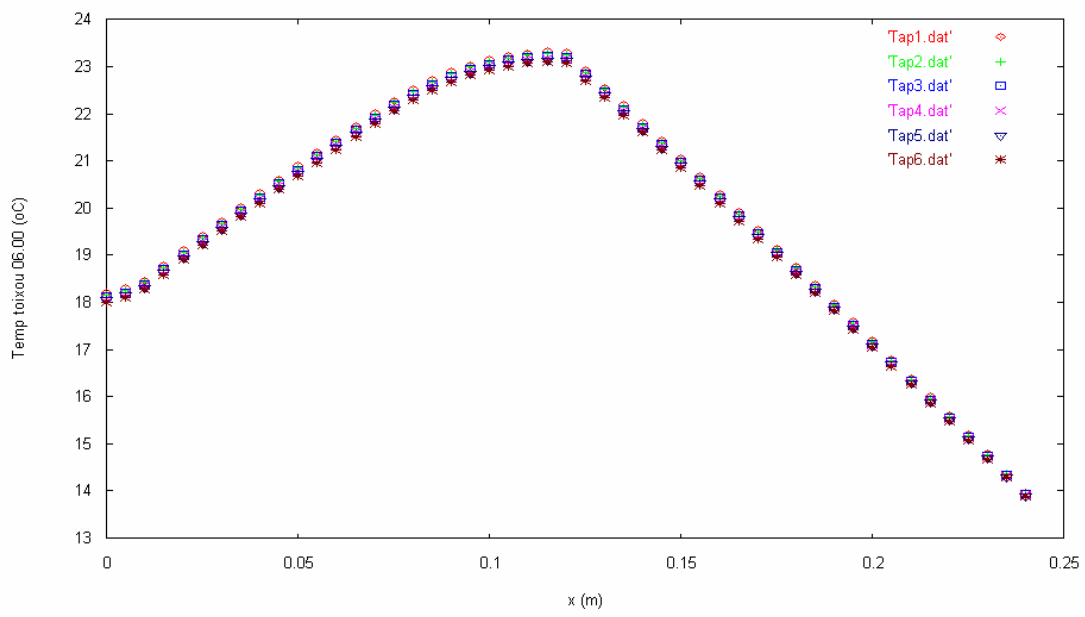
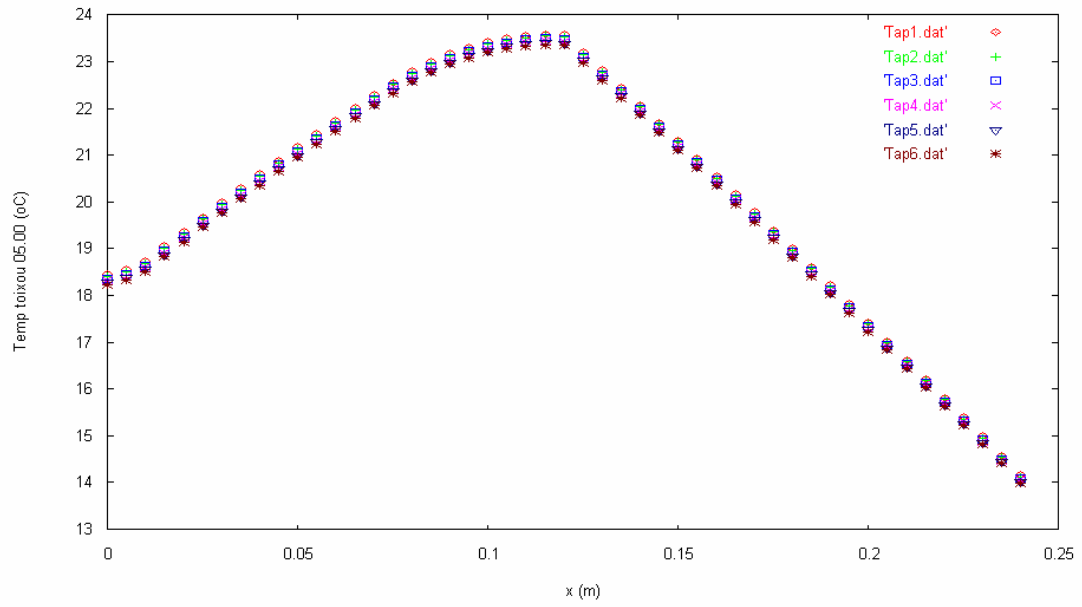




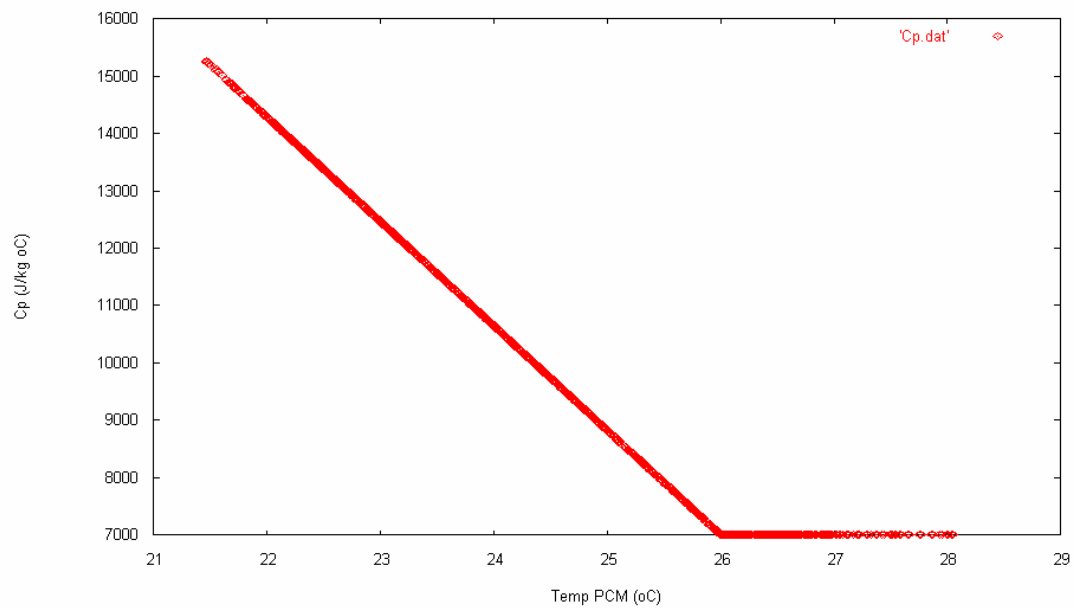








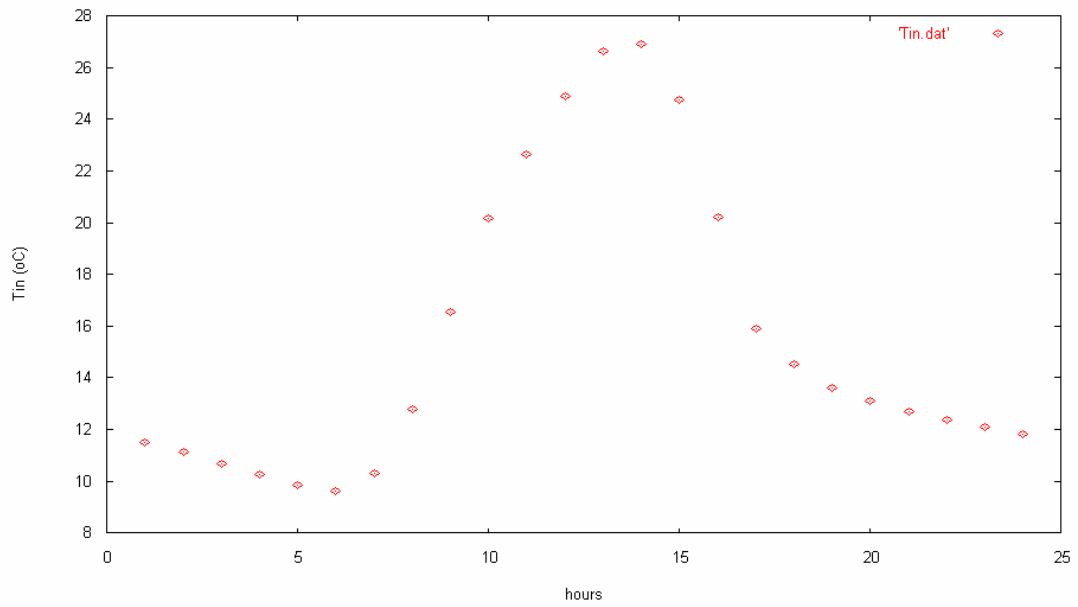
Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του υλικού αλλαγής φάσης Cp



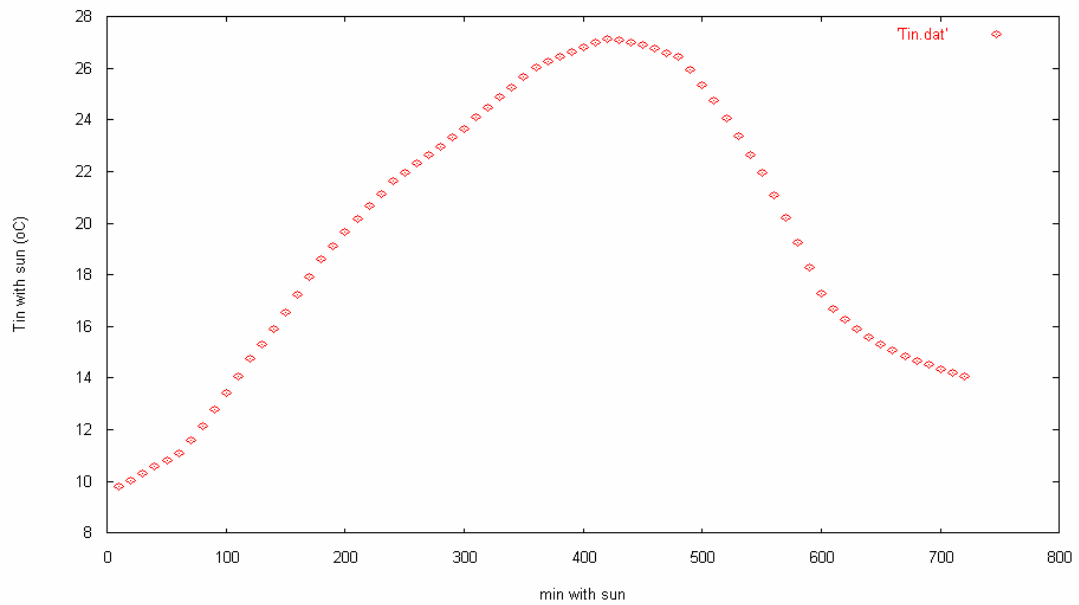
Εικόνα 96: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM συναρτήσει της θερμοκρασίας του.

16.4.2 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων για την πρώτη παραμετρική μελέτη για τον μήνα Δεκέμβρη (γυψοσανίδα-PCM –μόνωση-τούβλο-σοβάς)

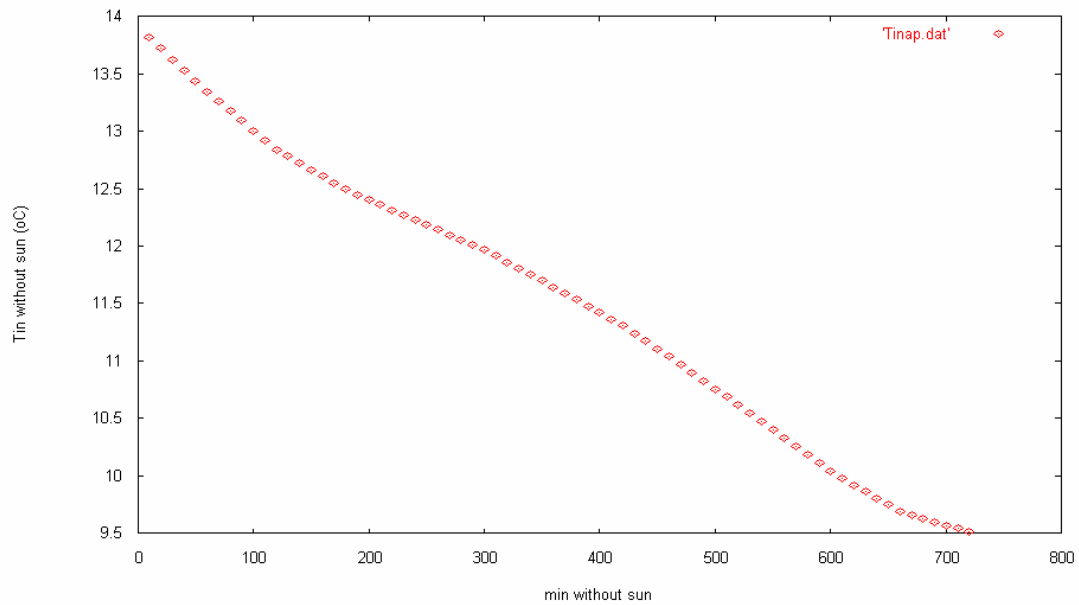
Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου



Εικόνα 97: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου κατά την διάρκεια του 24 ωρου



Εικόνα 98: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου συναρτήσει των λεπτών της ηλιοφάνειας (7.00-18.00)



Εικόνα 99: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου συναρτήσει των λεπτών κατά την διάρκεια των οποίων δεν υπάρχει ηλιοφάνεια (19.00- 6.00)

Μεταβολή της θερμοκρασίας του τοίχου κατά την διάρκεια του 24 ωρου

Η κατανομή των υλικών κατά μήκος του τοίχου x (m) είναι η εξής:

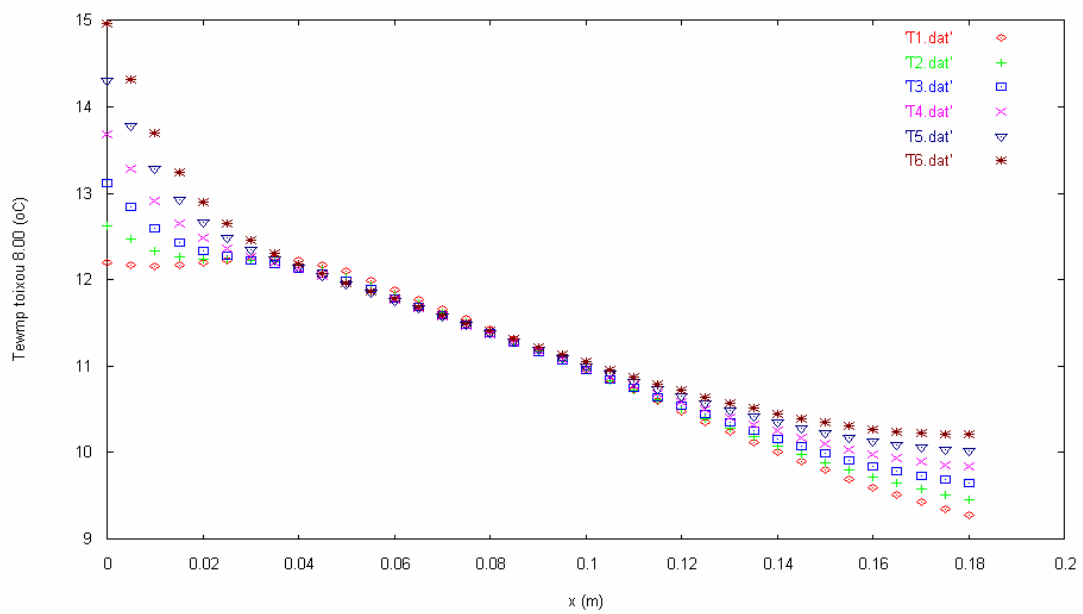
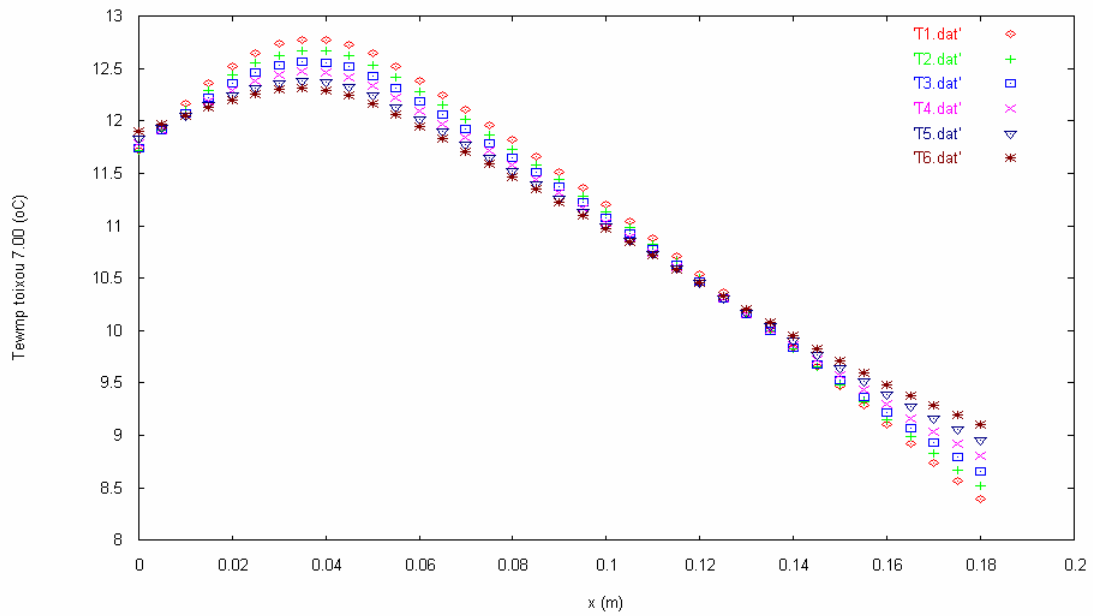
Γυψοσανίδα : 0-0.01 m

PCM : 0.01-0.06 m

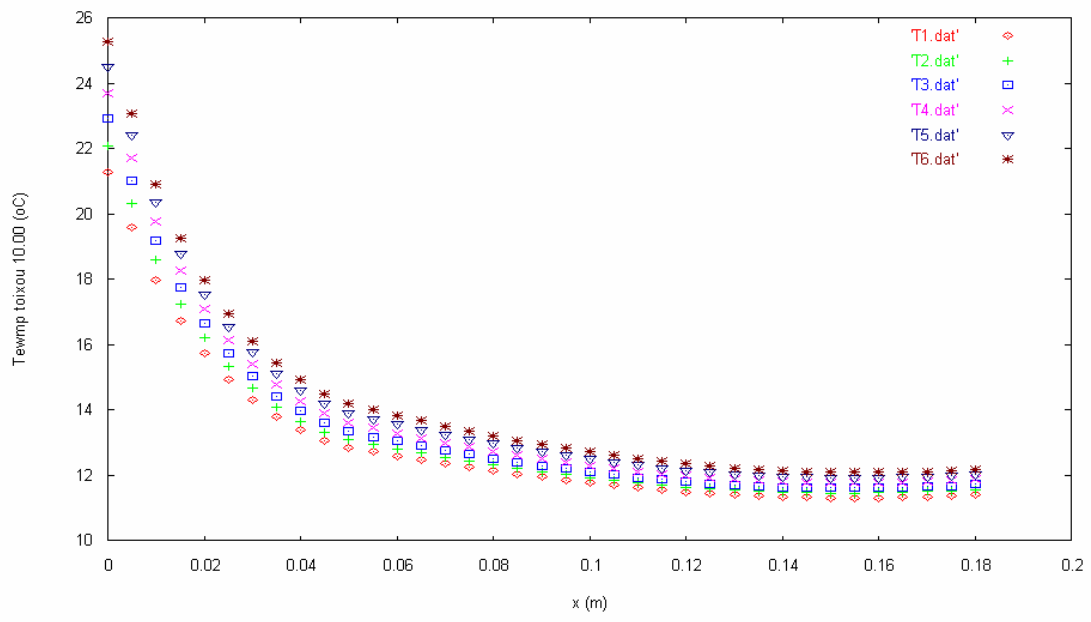
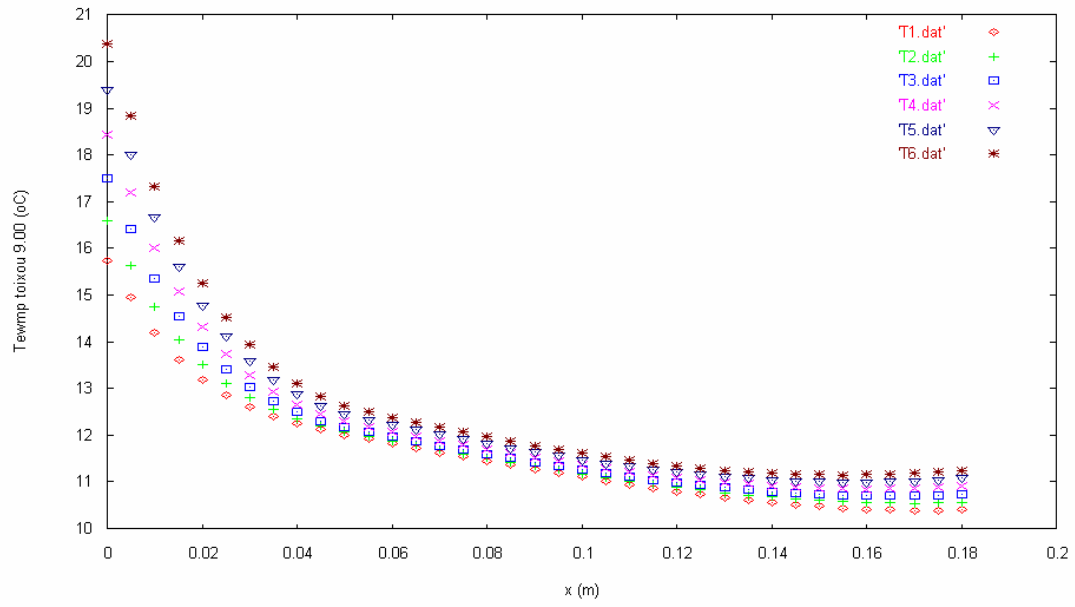
Μόνωση : 0.06-0.12 m

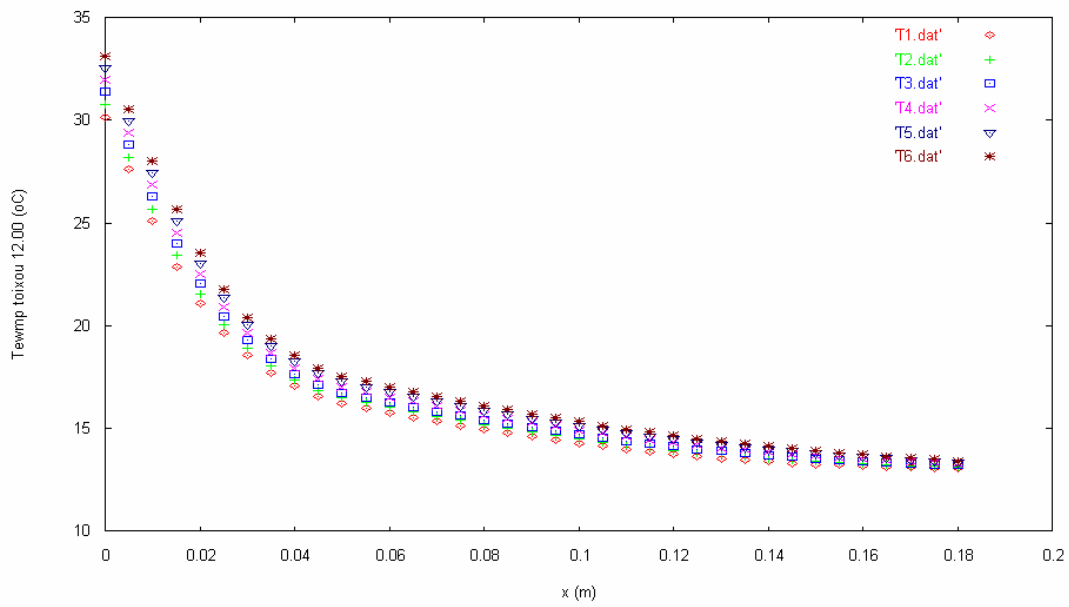
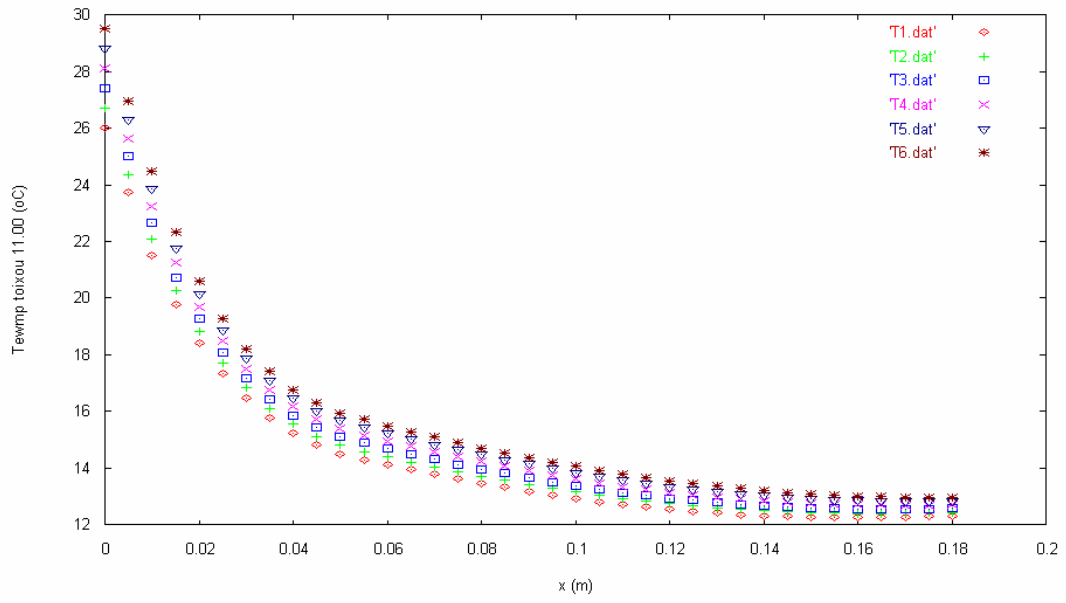
Τούβλο: 0.12-0.18 m

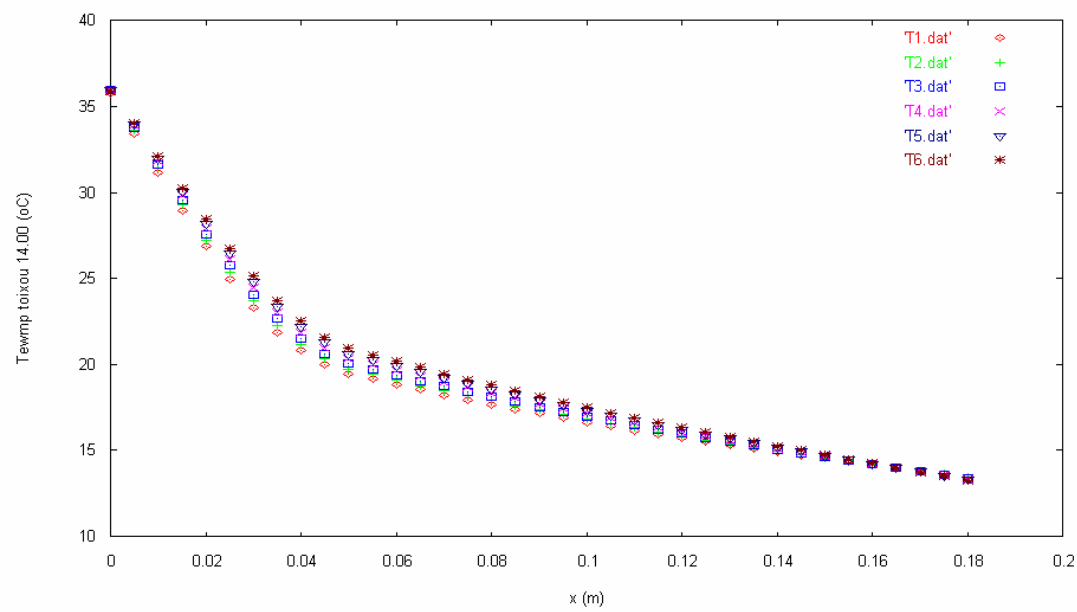
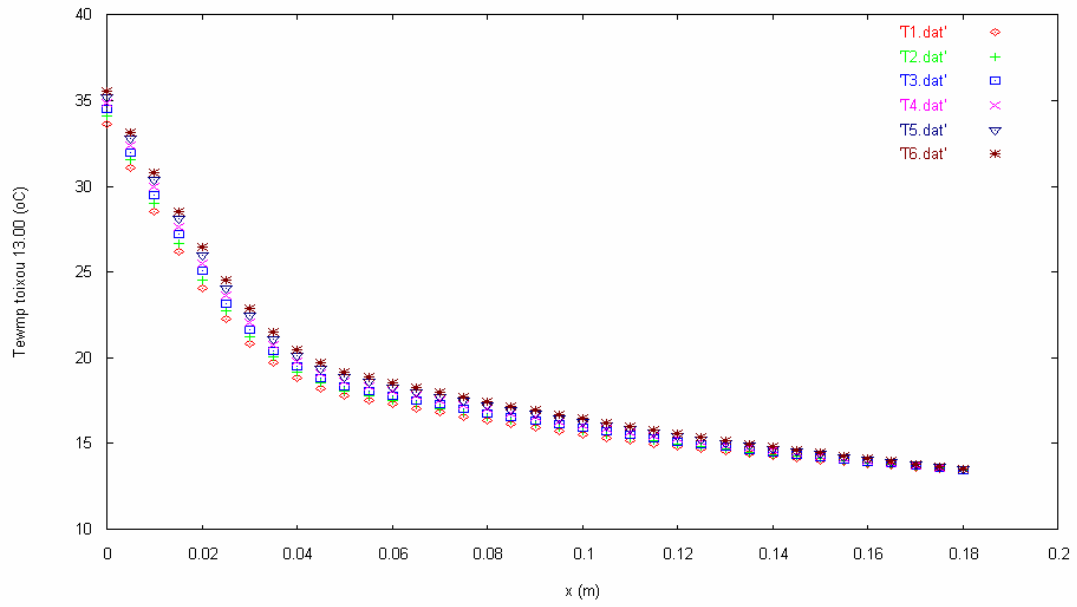
Σοβάς: 0.18-0.19 m

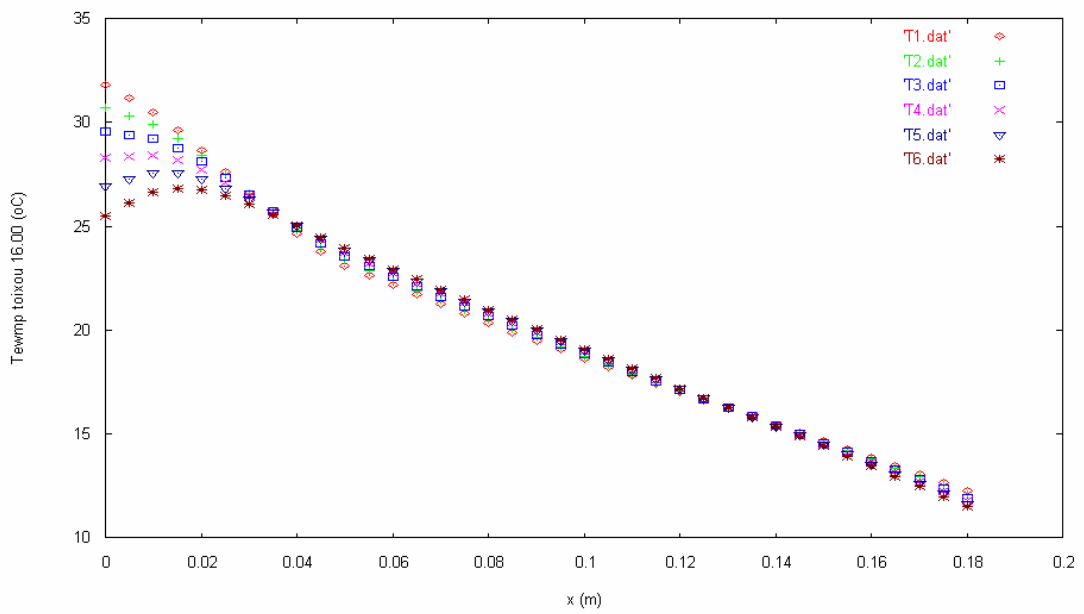
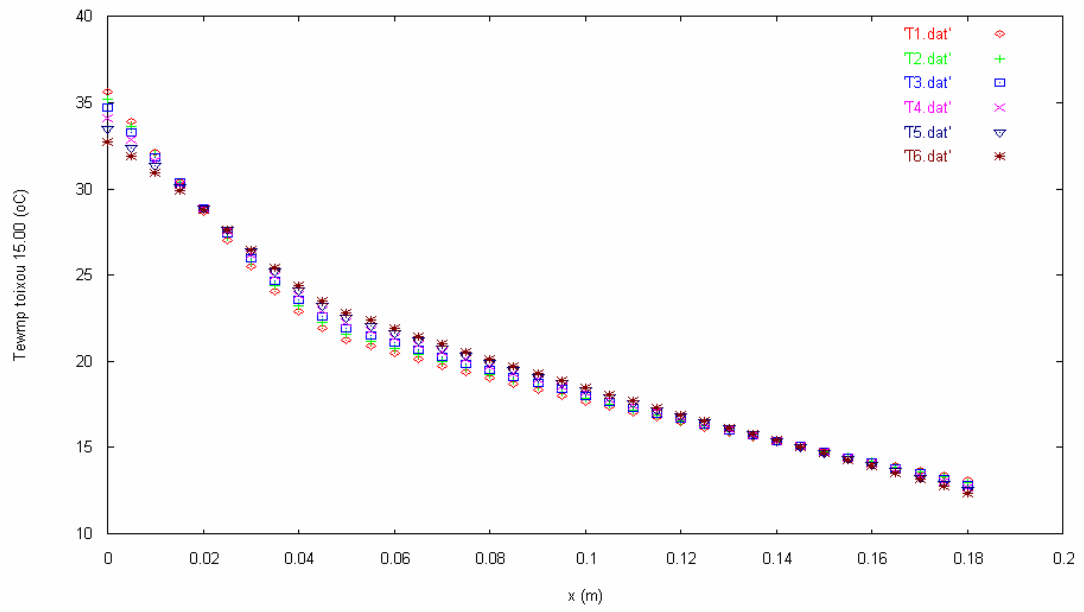


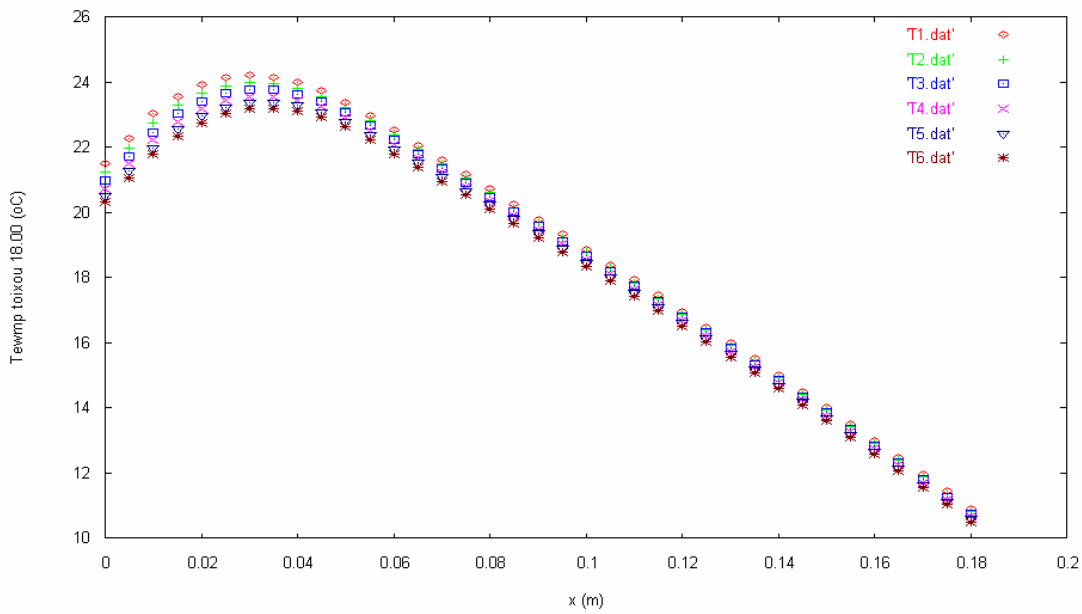
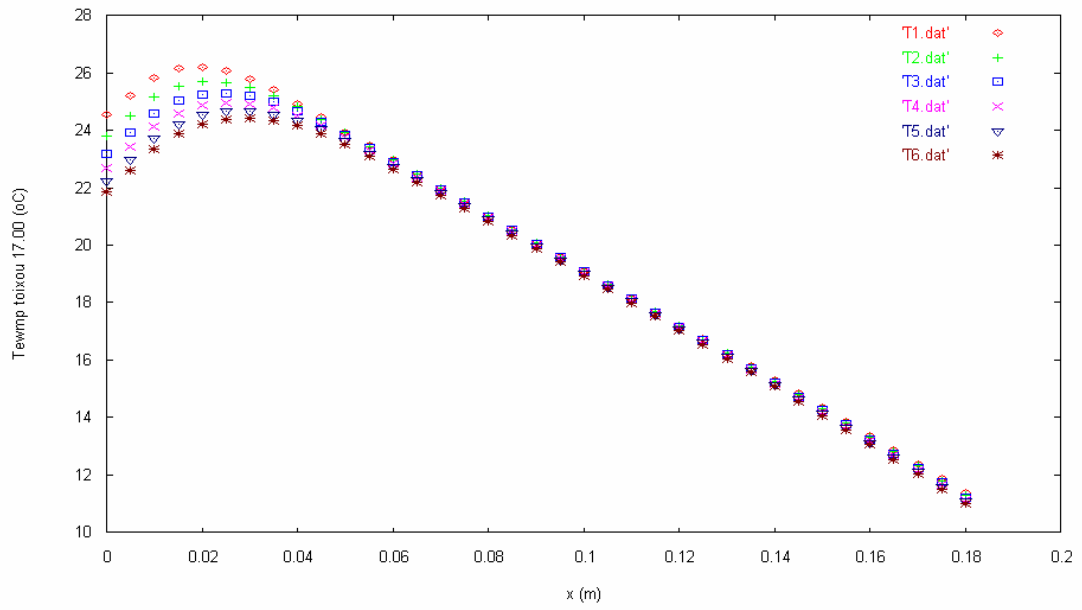
Εικόνα 100: Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος του τοίχου, κατά την διάρκεια του 24 ωρου , ακολουθούν τα διαγράμματα των υπόλοιπων ωρών

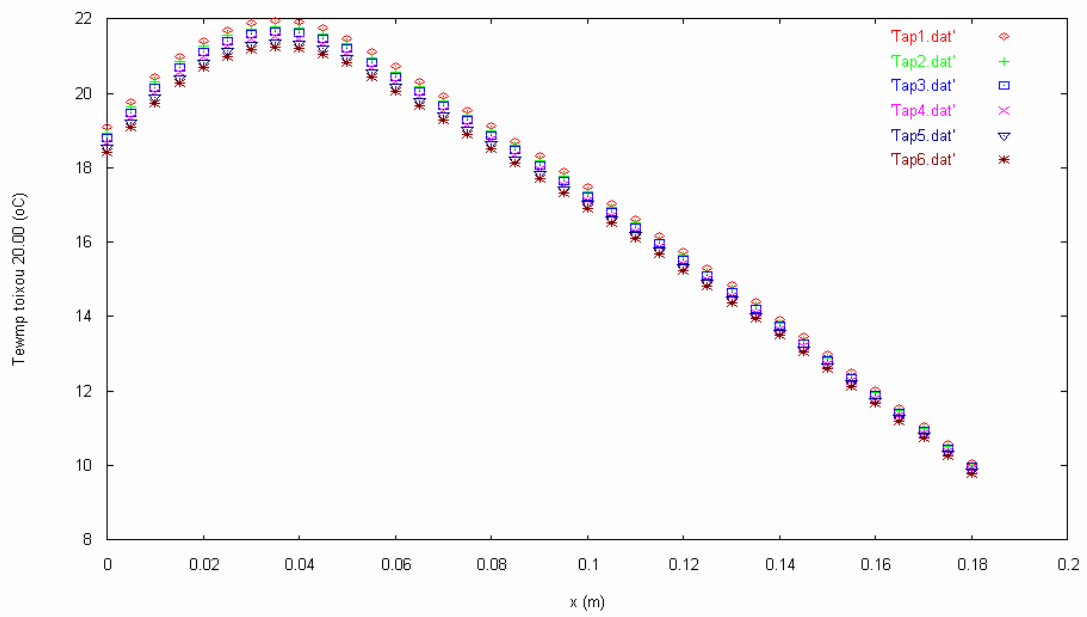
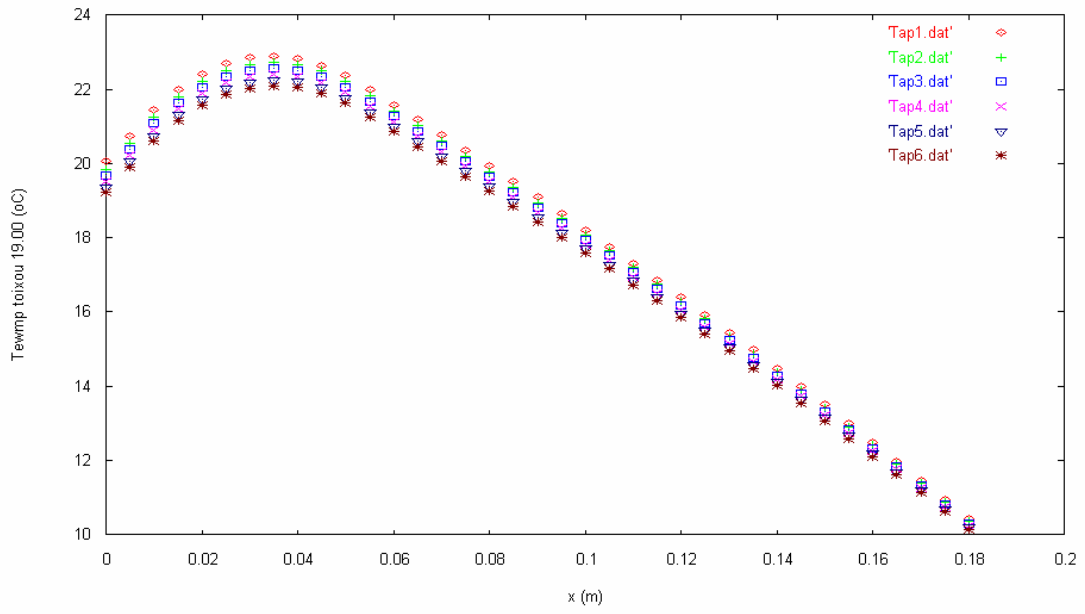


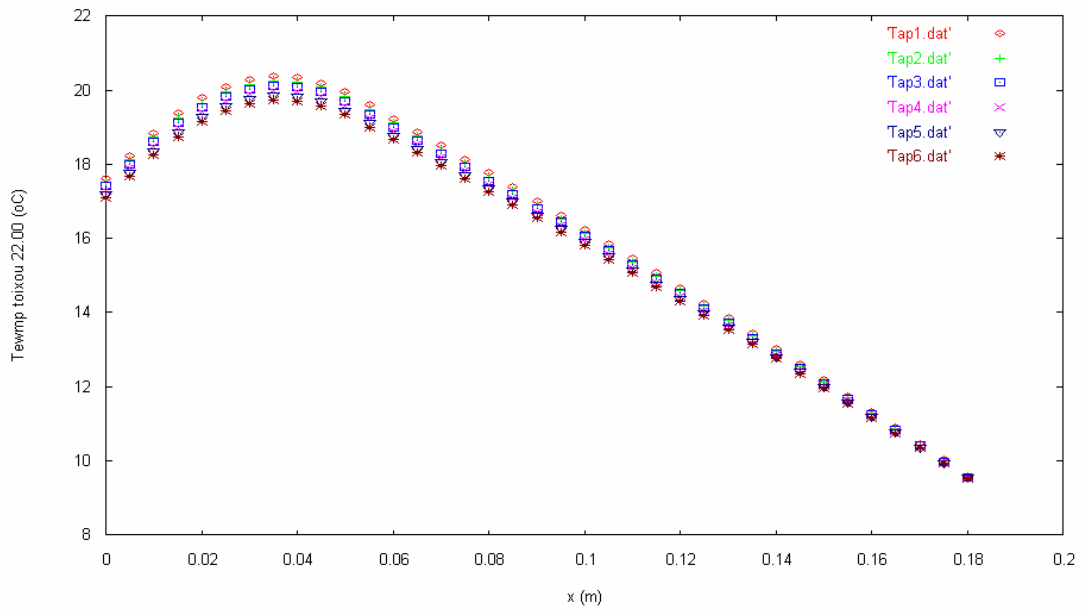
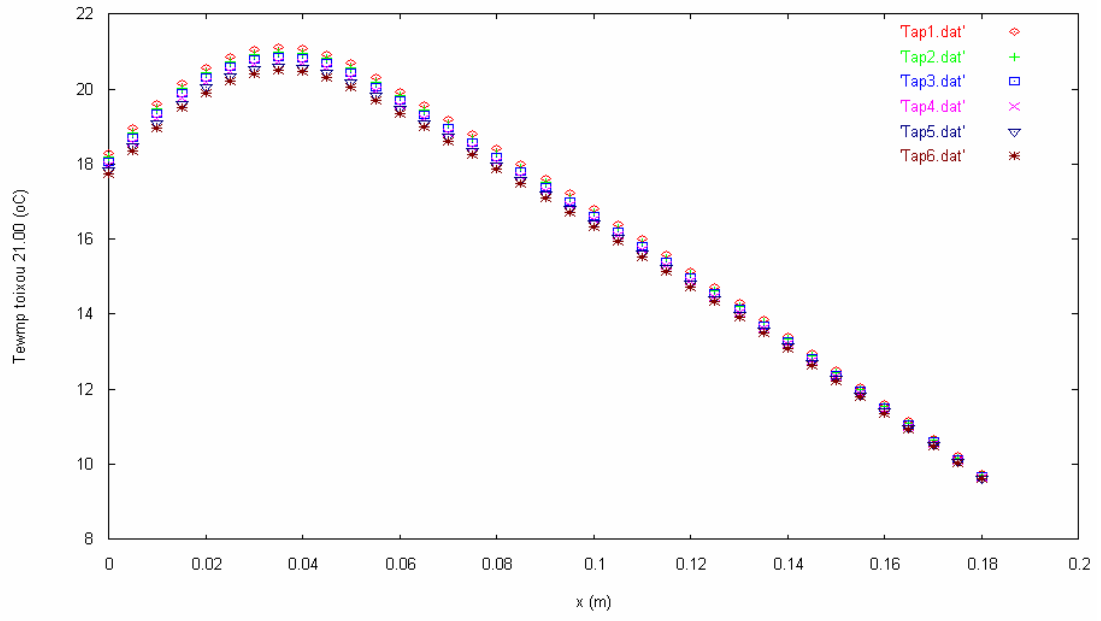


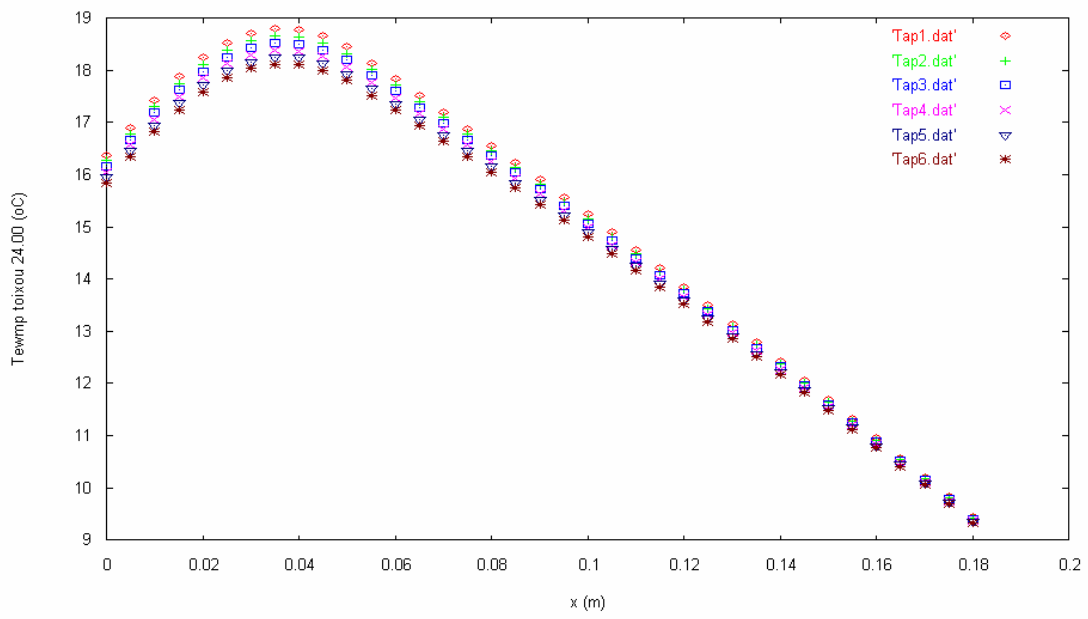
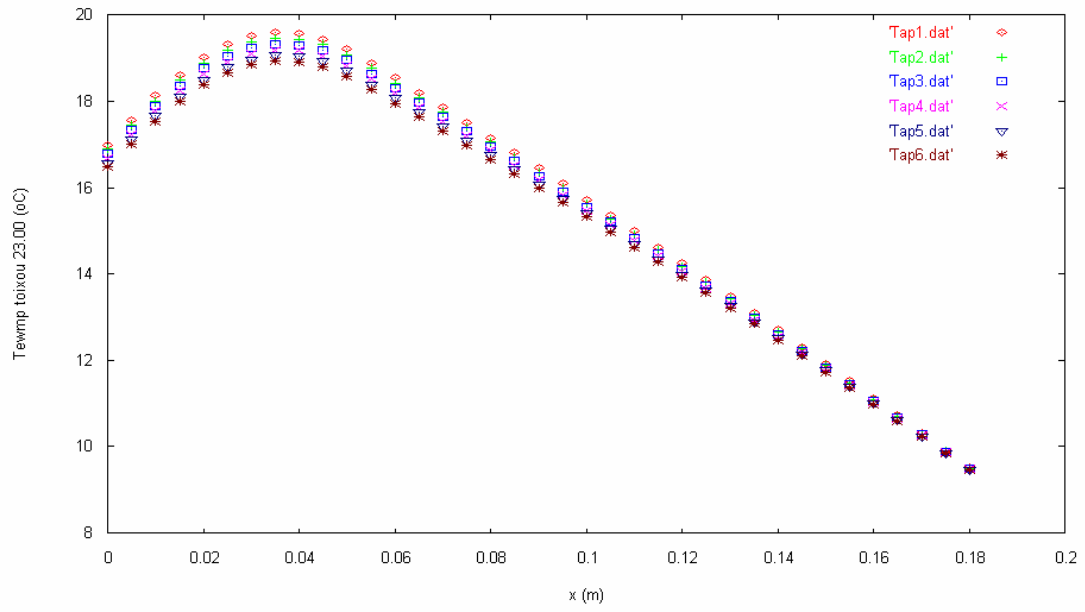


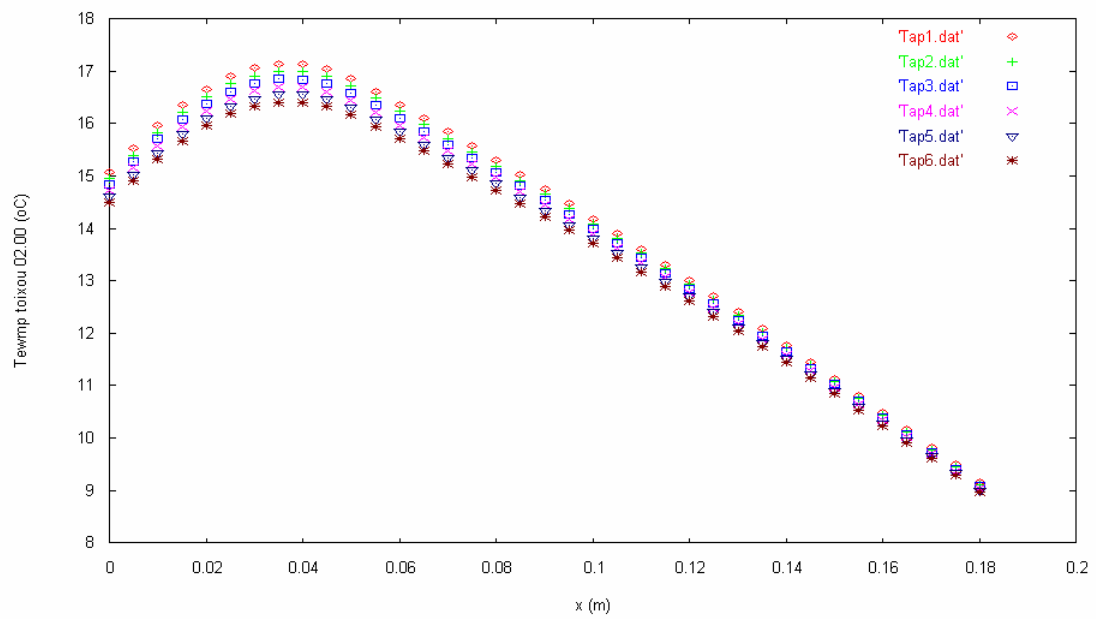
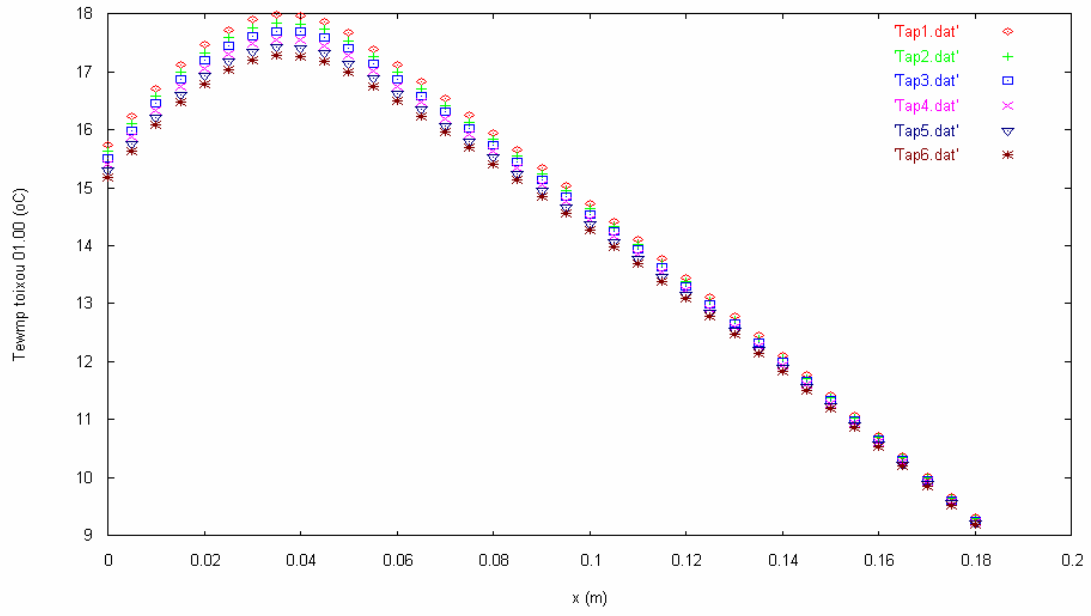


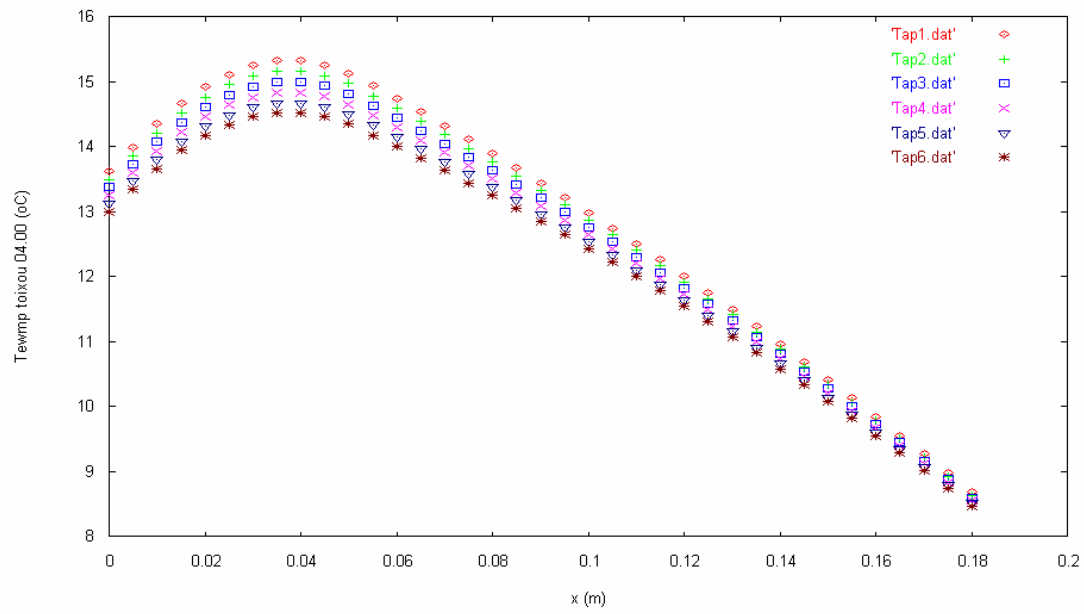
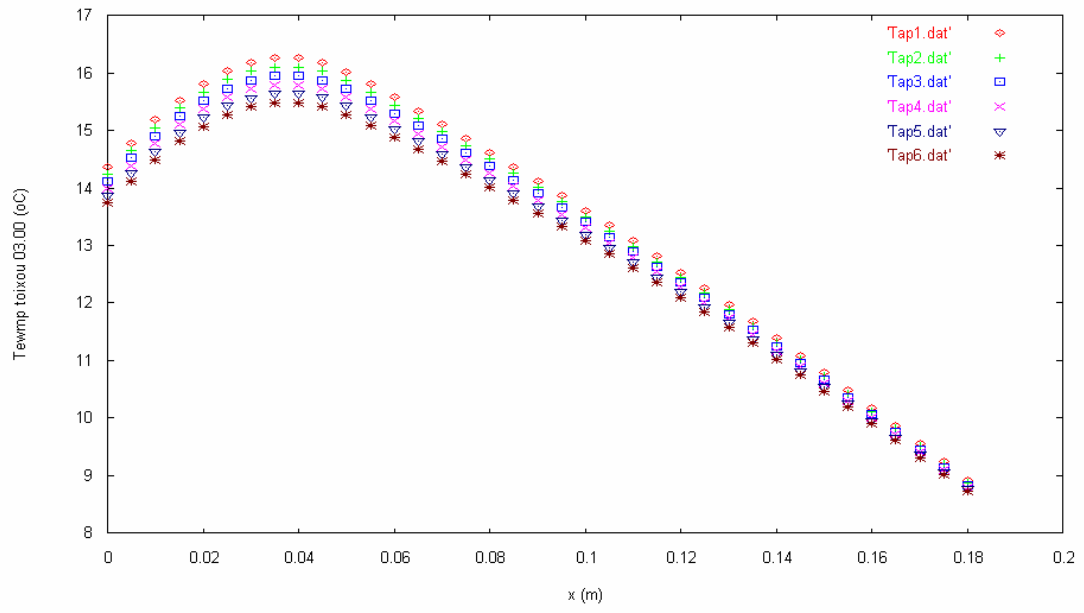


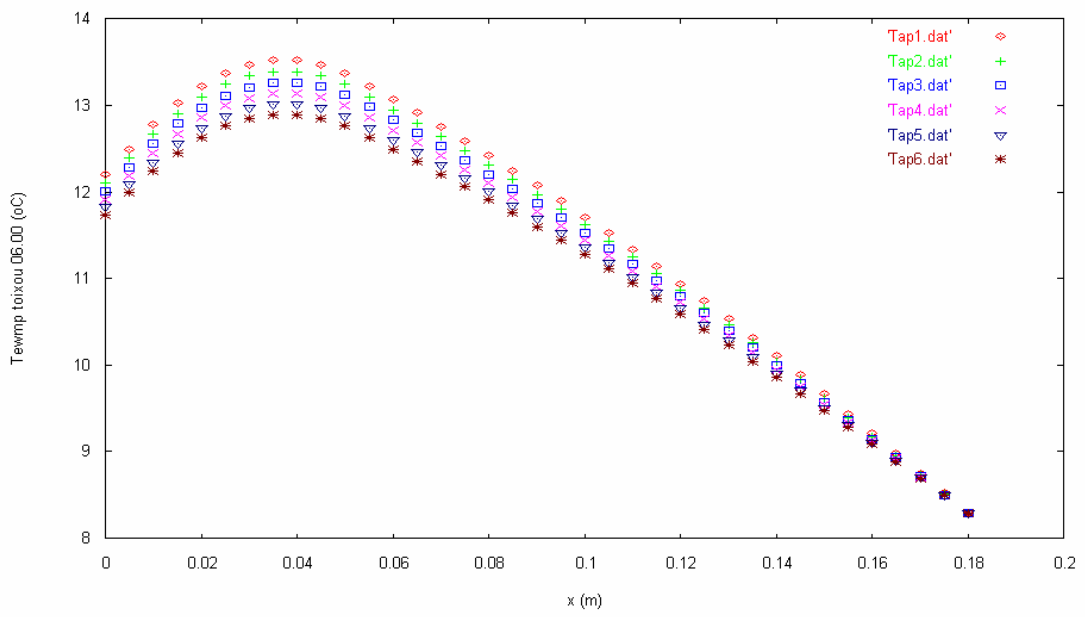
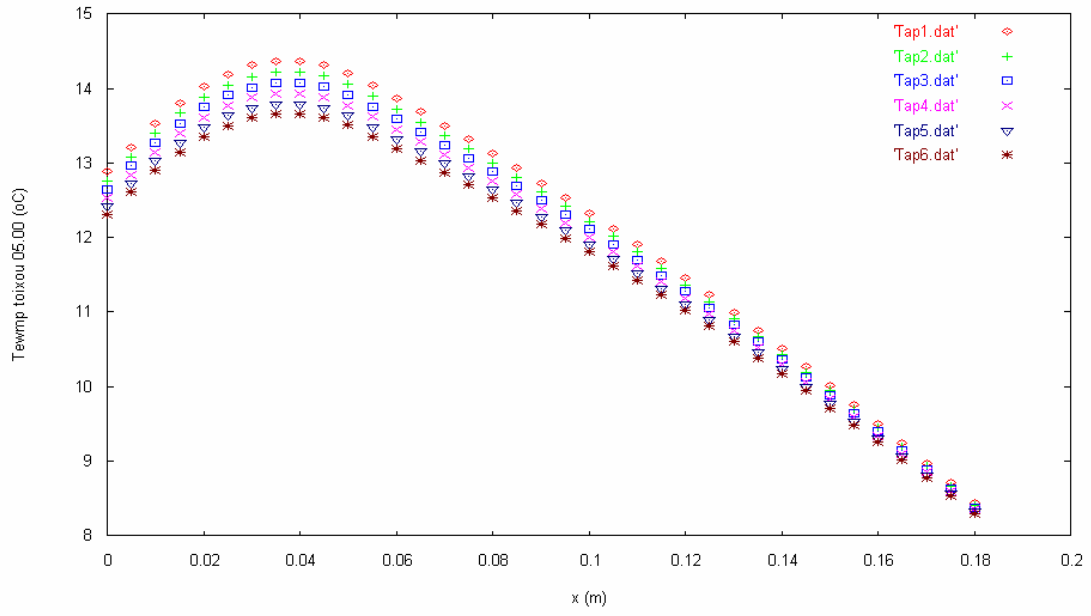




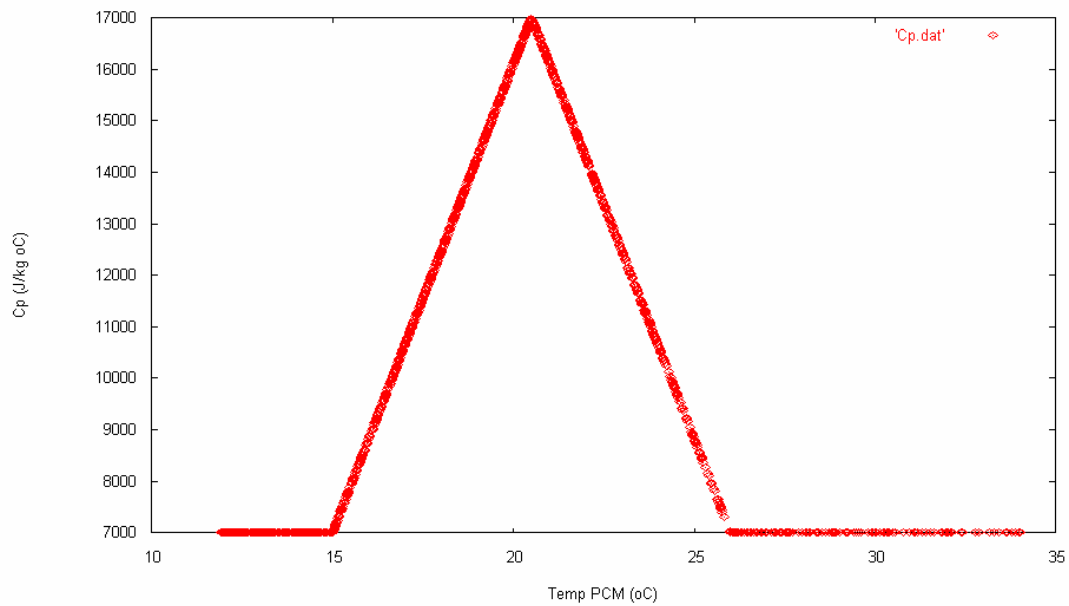








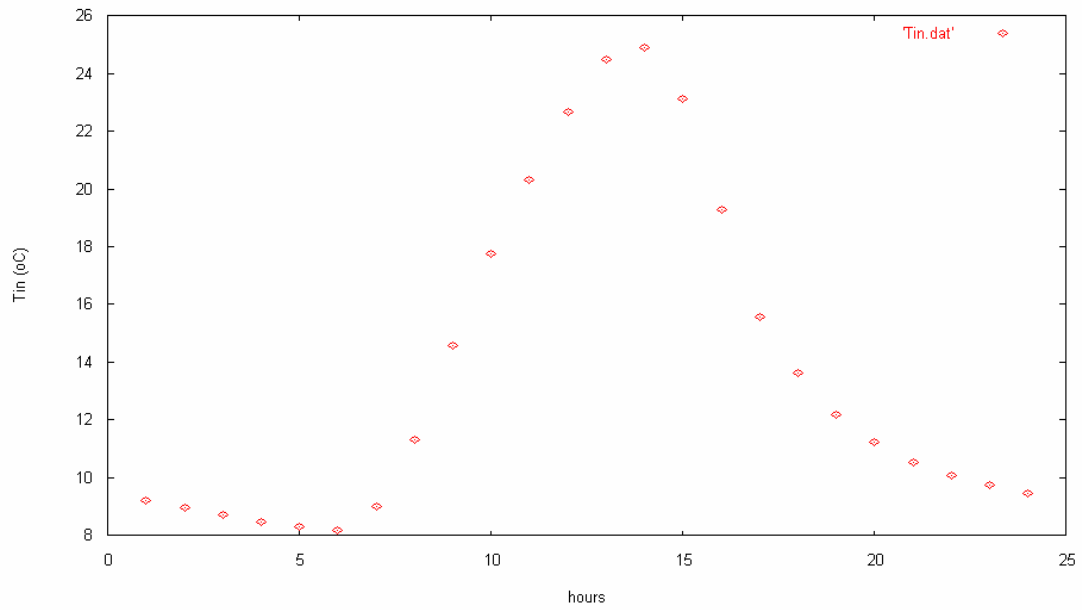
Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του υλικού αλλαγής φάσης συναρτήσει της θερμοκρασίας του



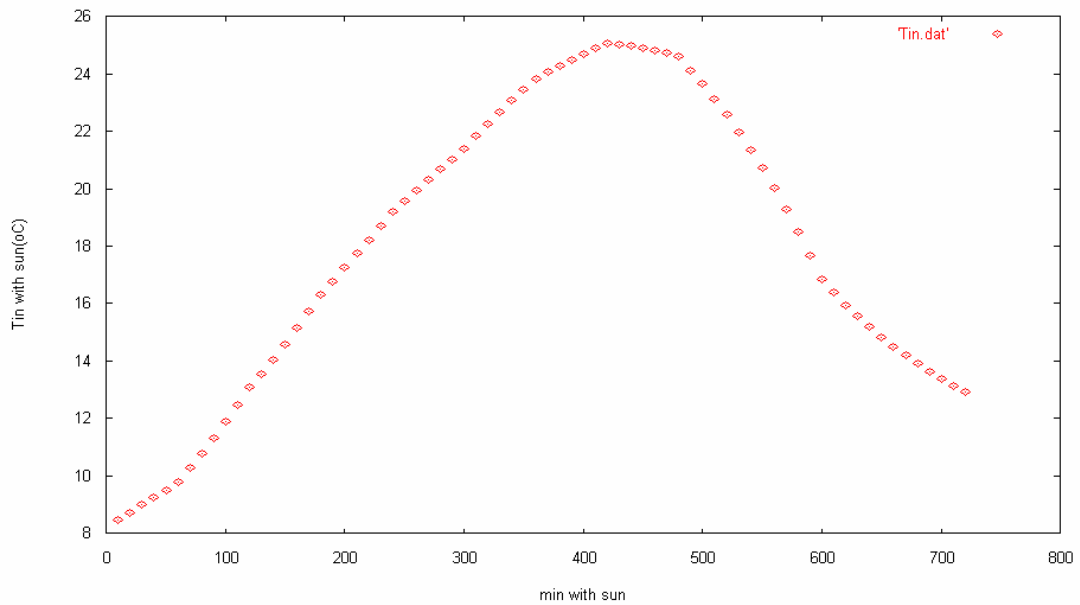
Εικόνα 101: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM συναρτήσει της θερμοκρασίας του

16.4.3. Παρουσίαση των αποτελεσμάτων της δεύτερης παραμετρικής μελέτης για τον μήνα Δεκέμβρη (σοβάς-τούβλο-μόνωση-τούβλο-σοβάς)

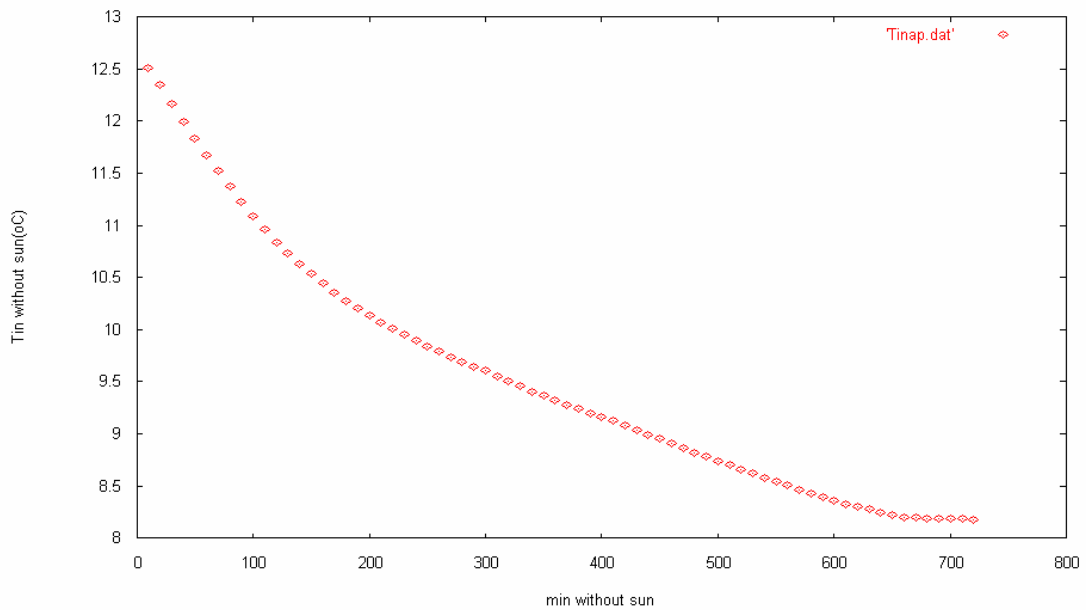
Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου



Εικόνα 102: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου κατά την διάρκεια του 24 ωρου



Εικόνα 103: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου συναρτήσει των λεπτών κατά την διάρκεια των οποίων έχουμε ηλιοφάνεια (7.00- 18.00)



Εικόνα 104: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου συναρτήσει των λεπτών , κατά την διάρκεια των οποίων δεν υπάρχει ηλιοφάνεια.

Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος του τοίχου , κατά την διάρκεια του

24 ωρου

Η κατανομή των υλικών κατά μήκος του τοίχου $x(m)$ είναι η εξής:

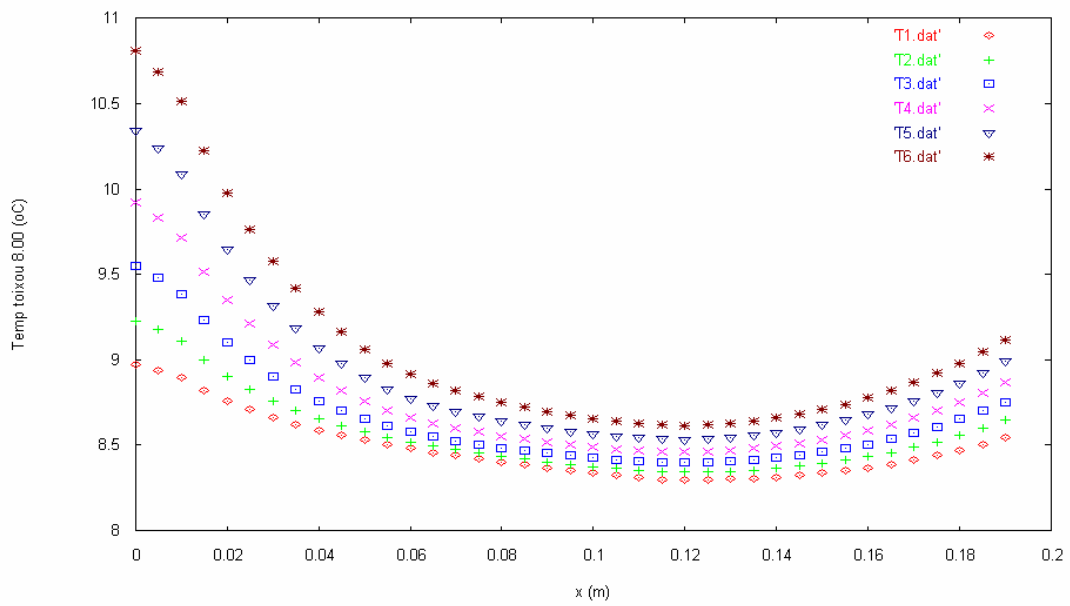
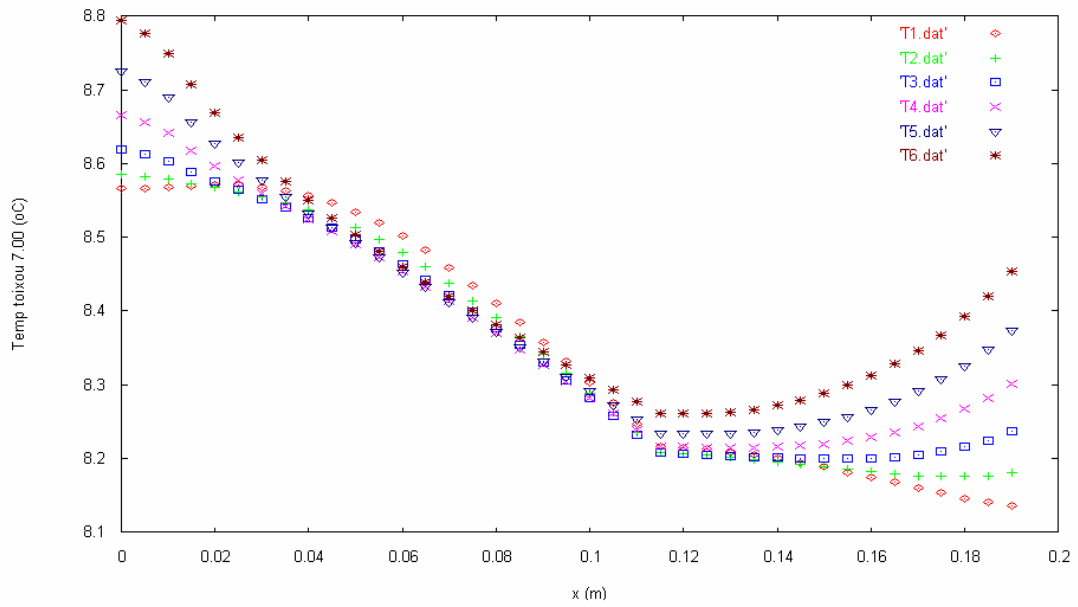
Σοβάς:0-0.01 m

Τούβλο :0.01-0.07 m

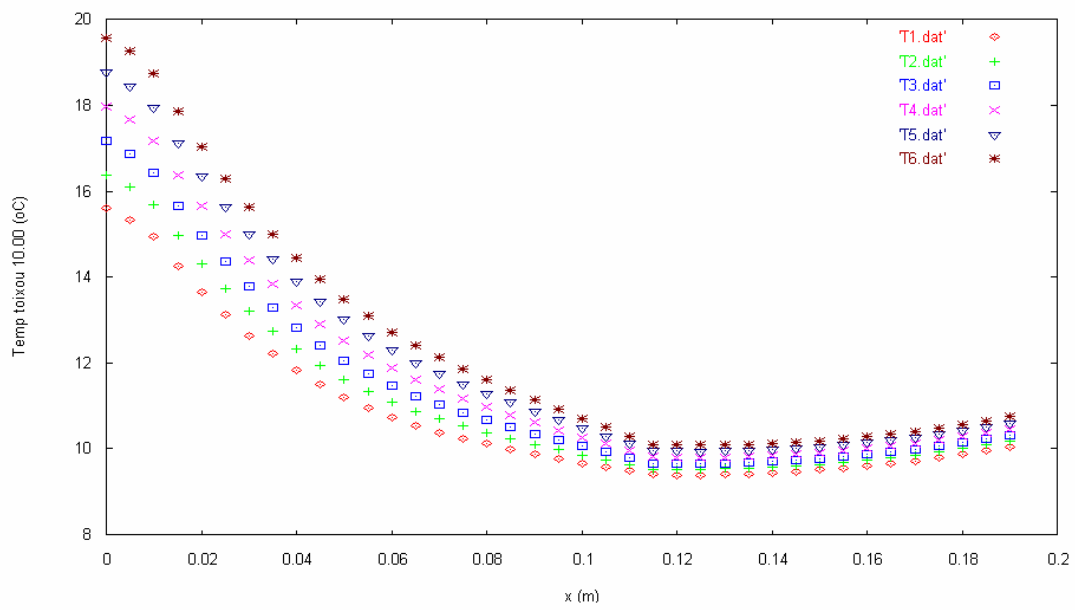
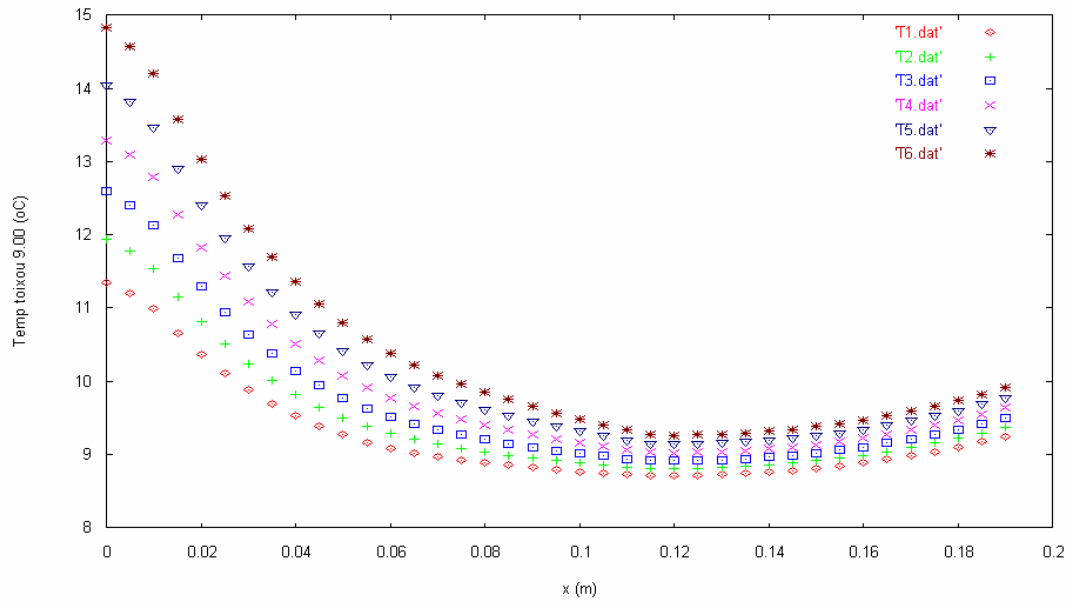
Μόνωση :0.07-0.12 m

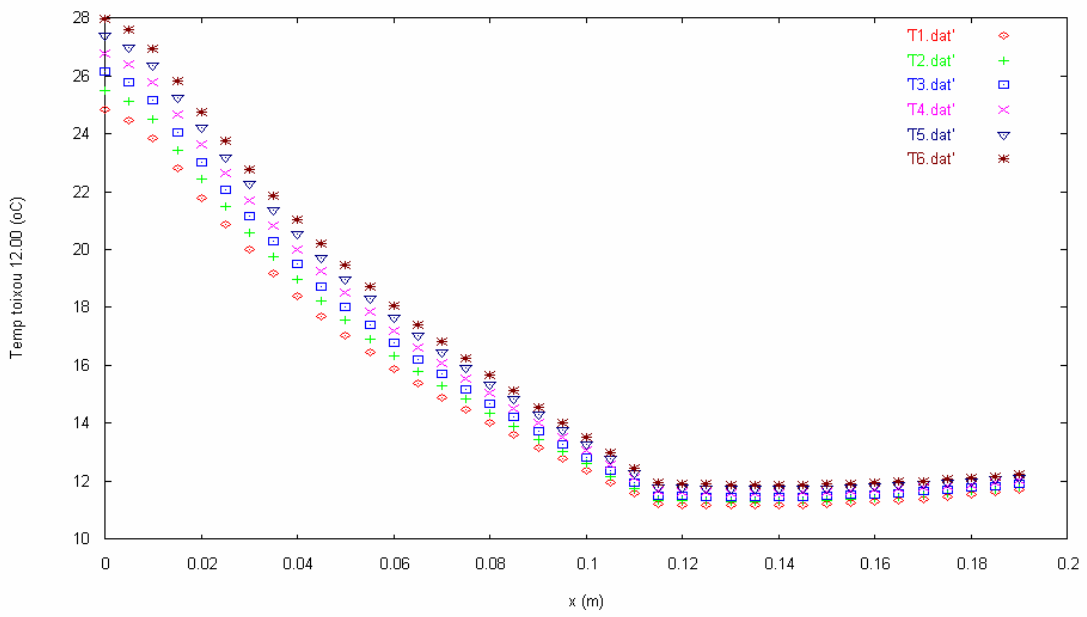
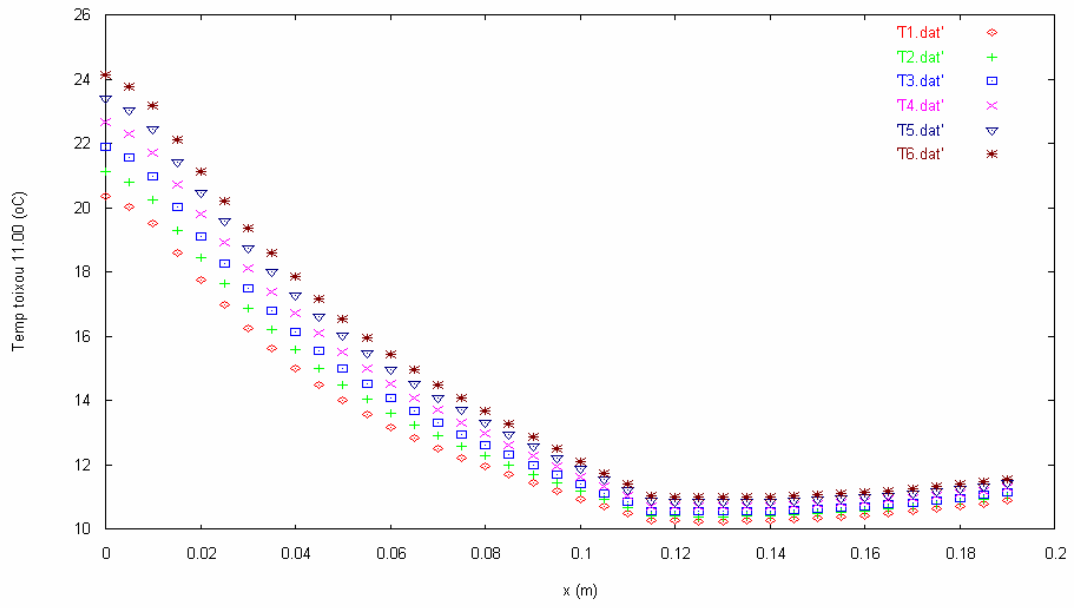
Τούβλο :0.12-0.18 m

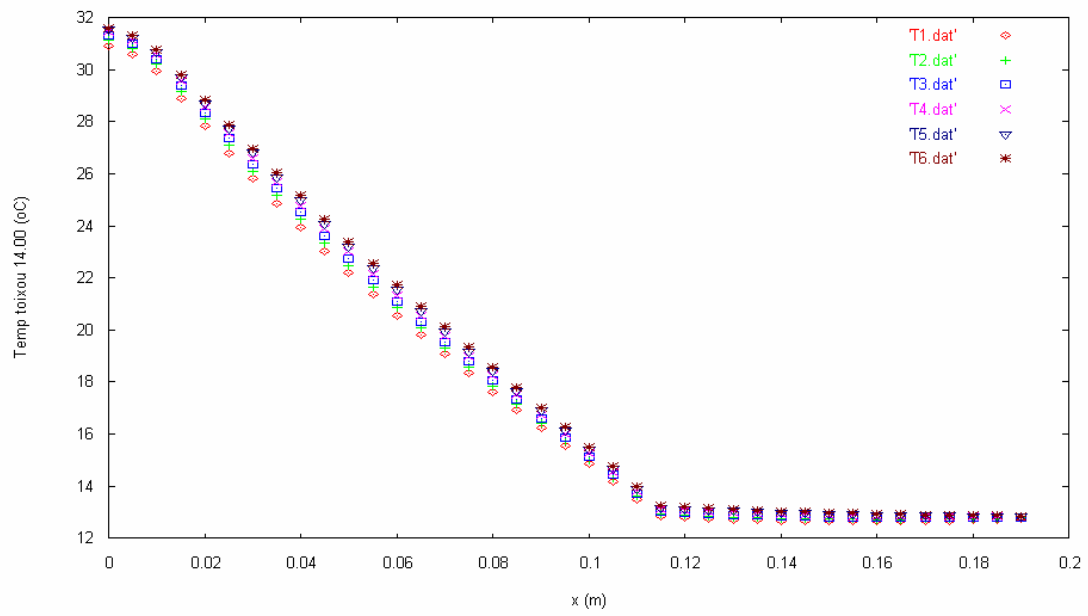
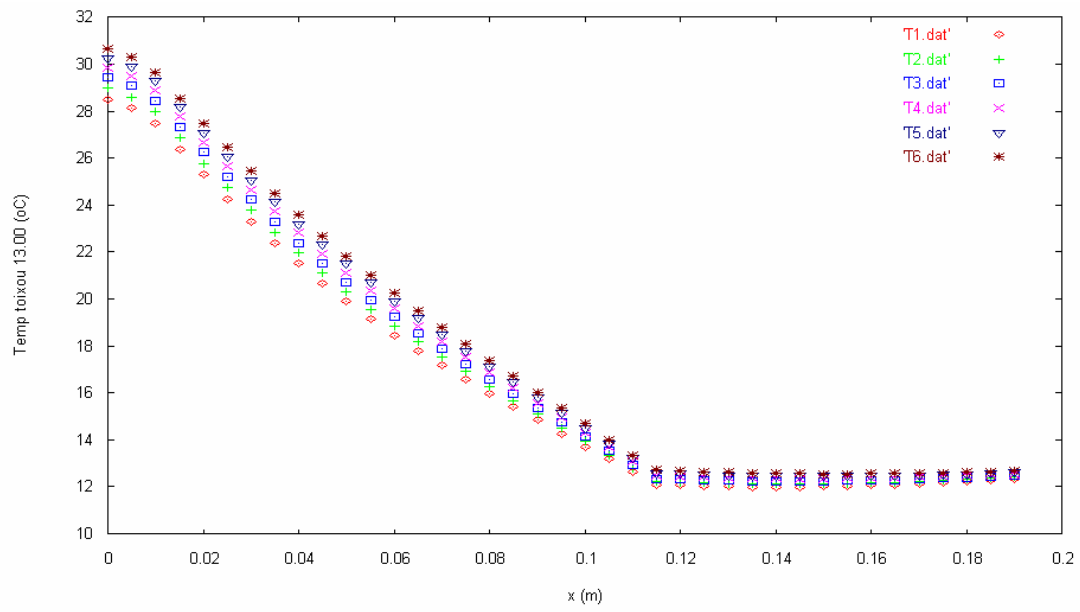
Σοβάς: 0.18-0.19 m

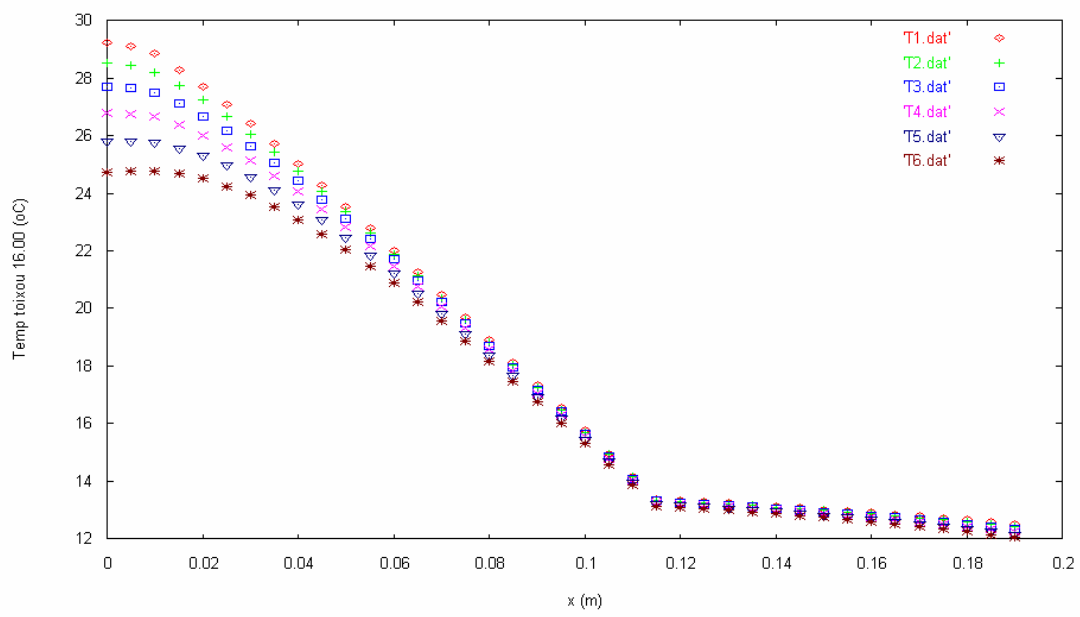
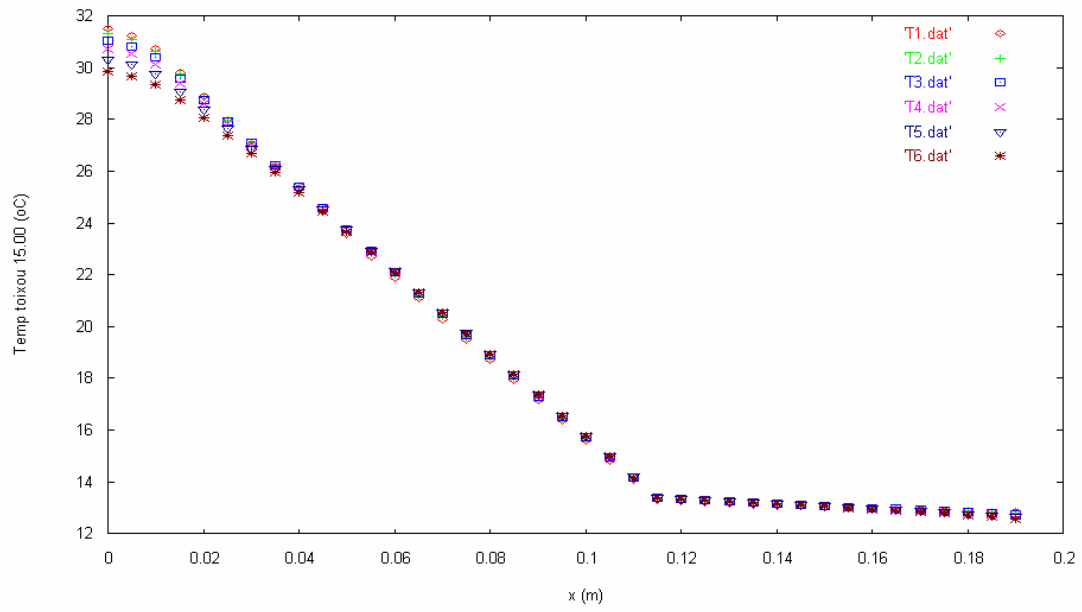


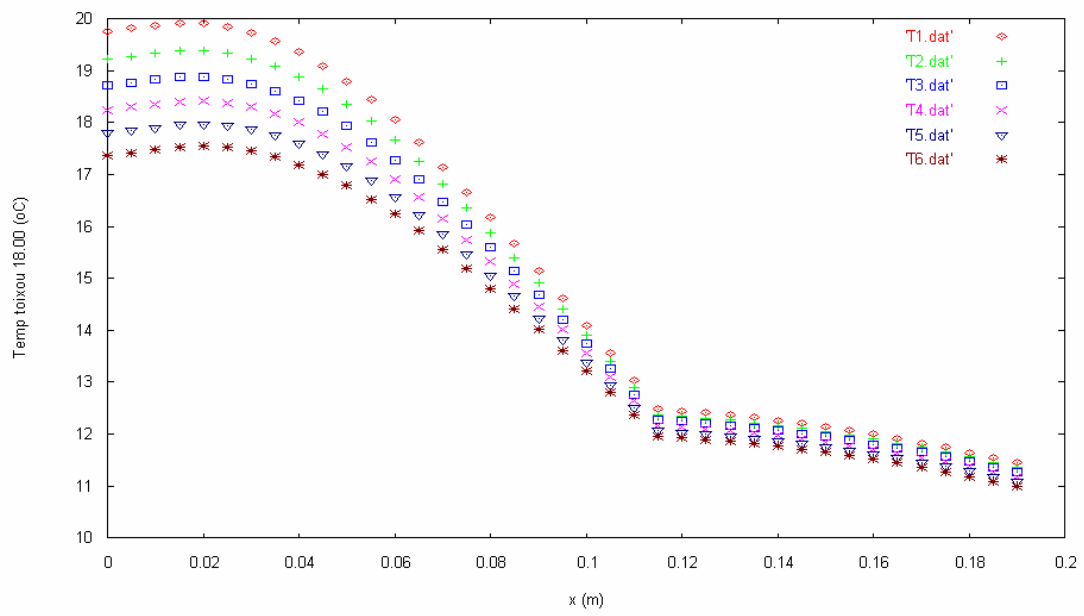
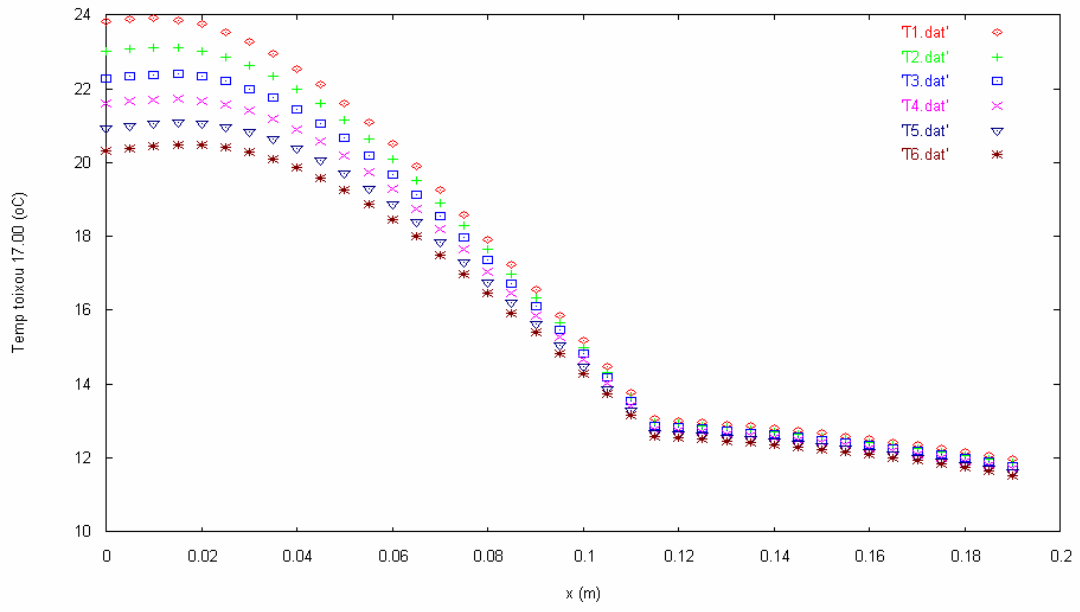
Εικόνα 105: Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος του τοίχου κατά την διάρκεια του 24 ωρου, ακολουθούν τα διαγράμματα των υπόλοιπων ωρών

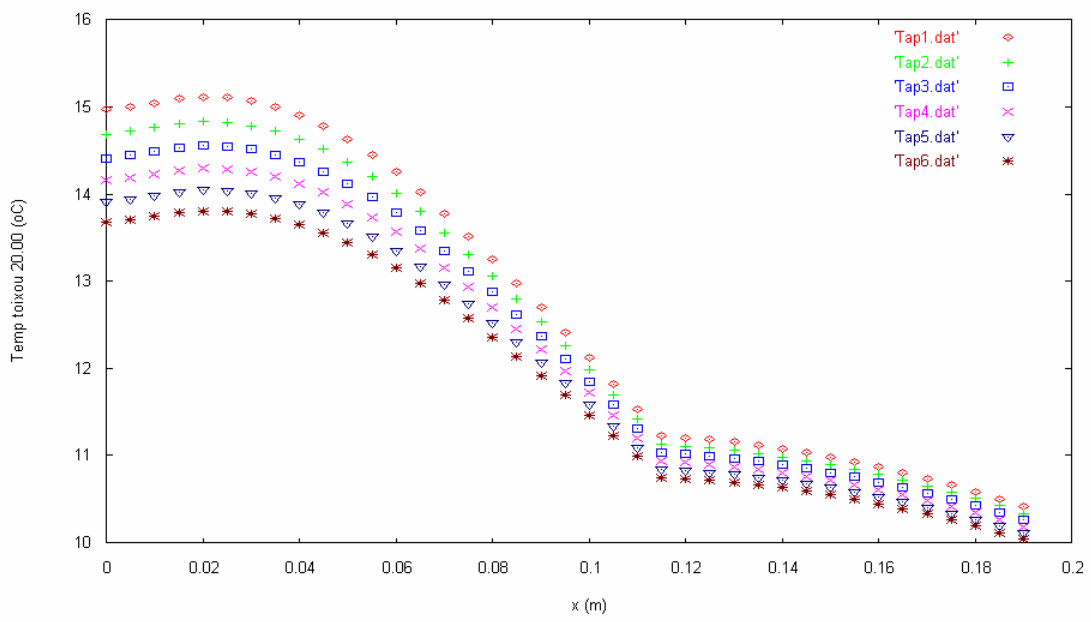
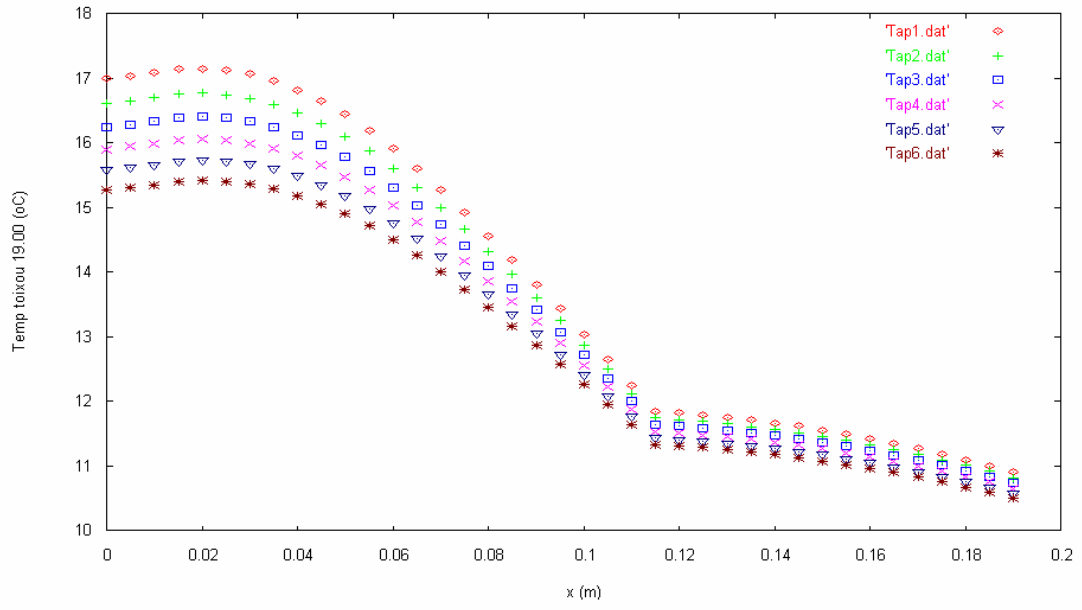


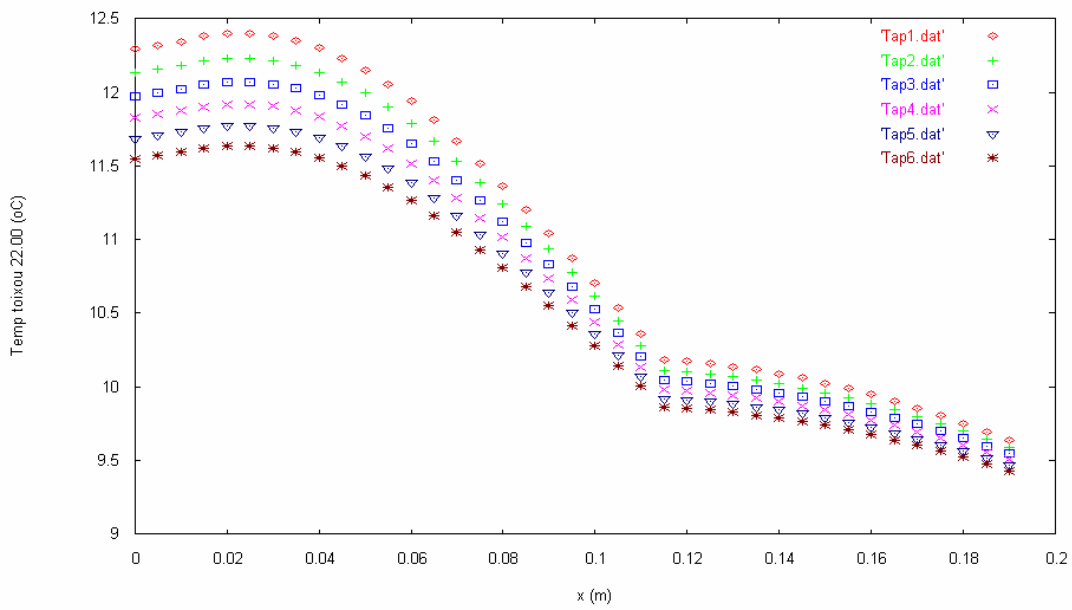
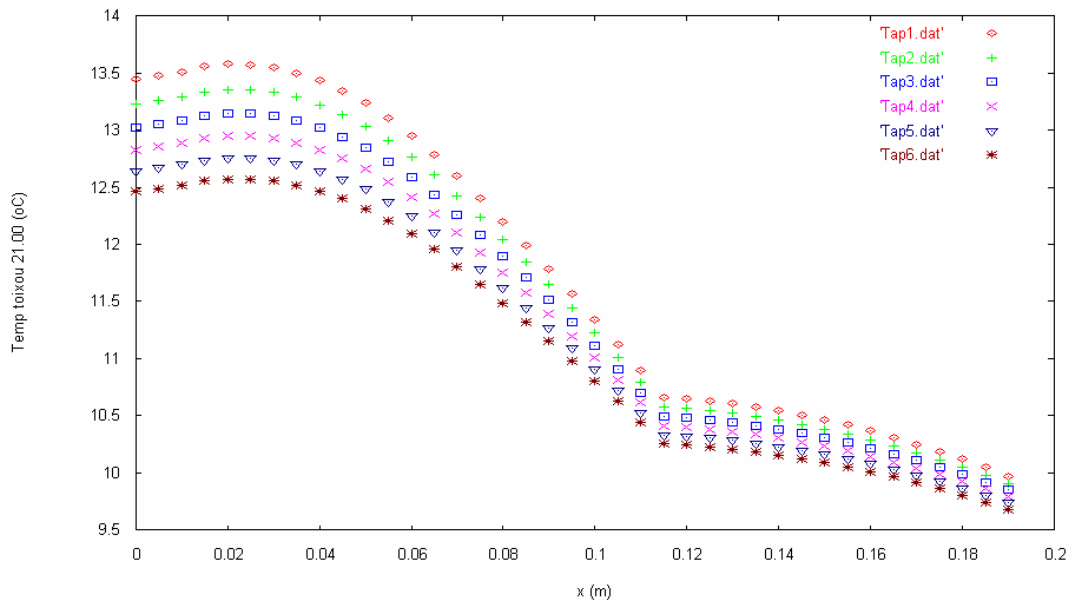


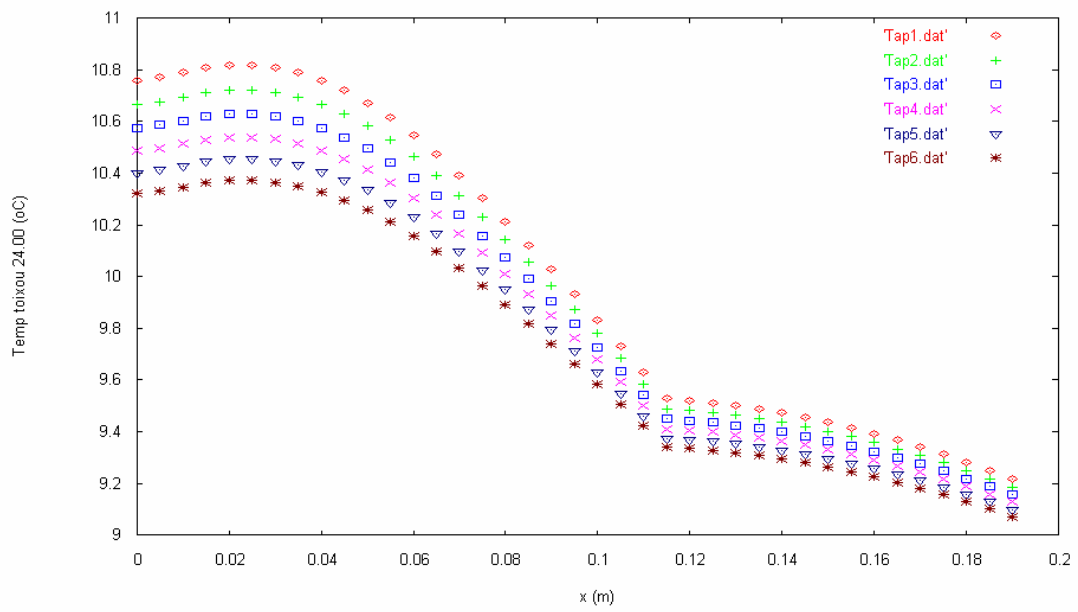
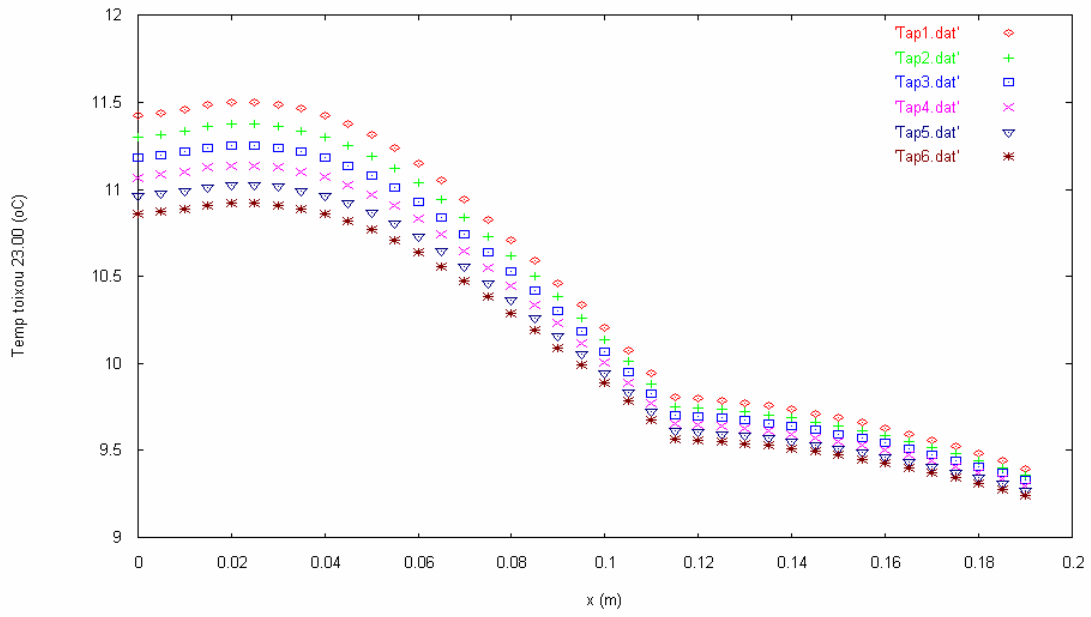


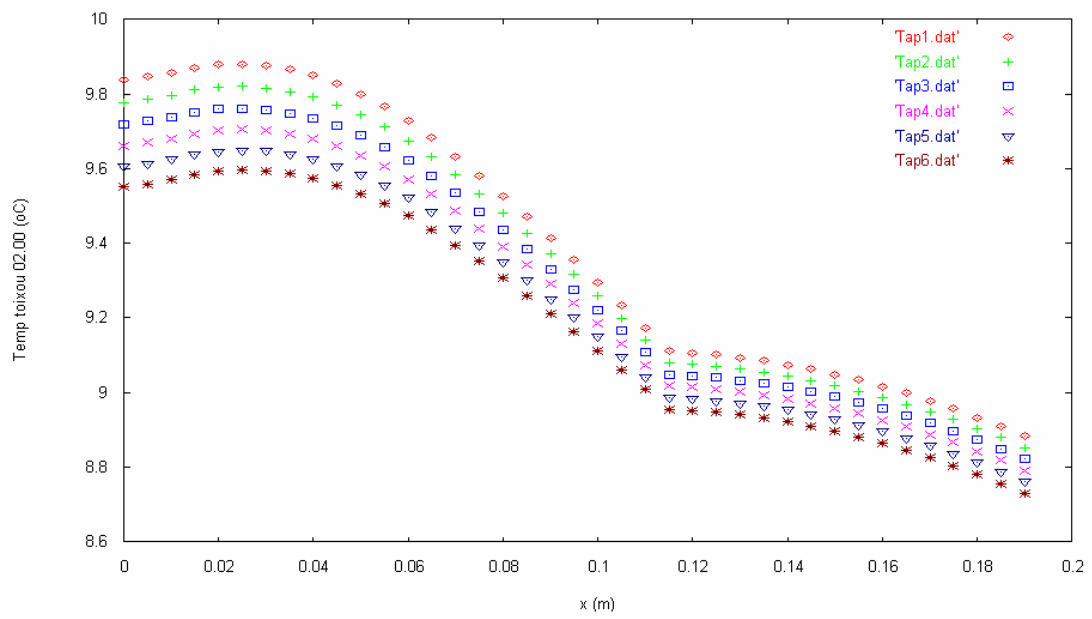
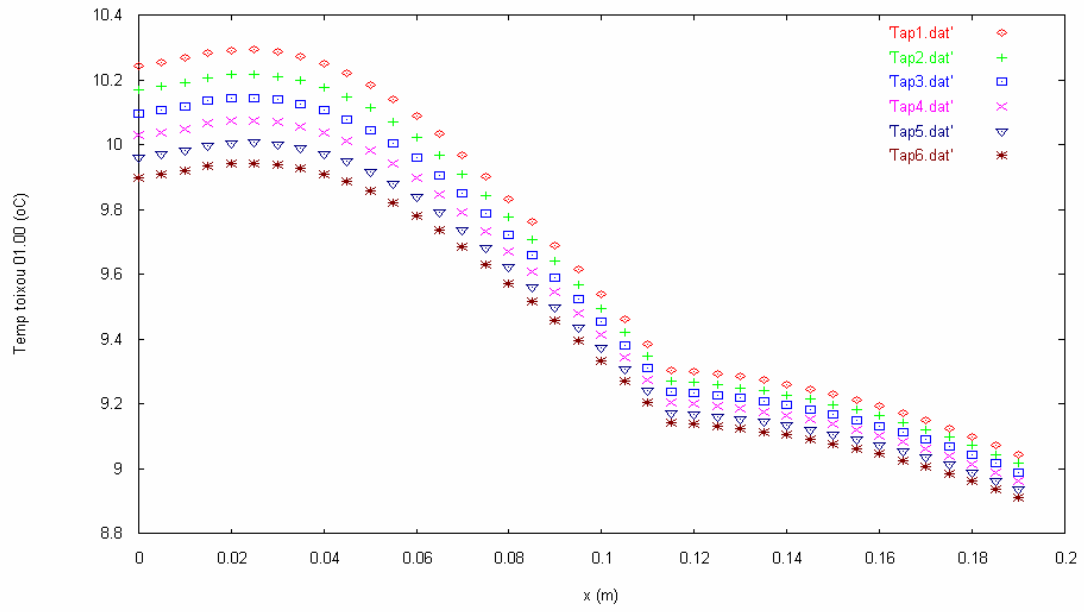


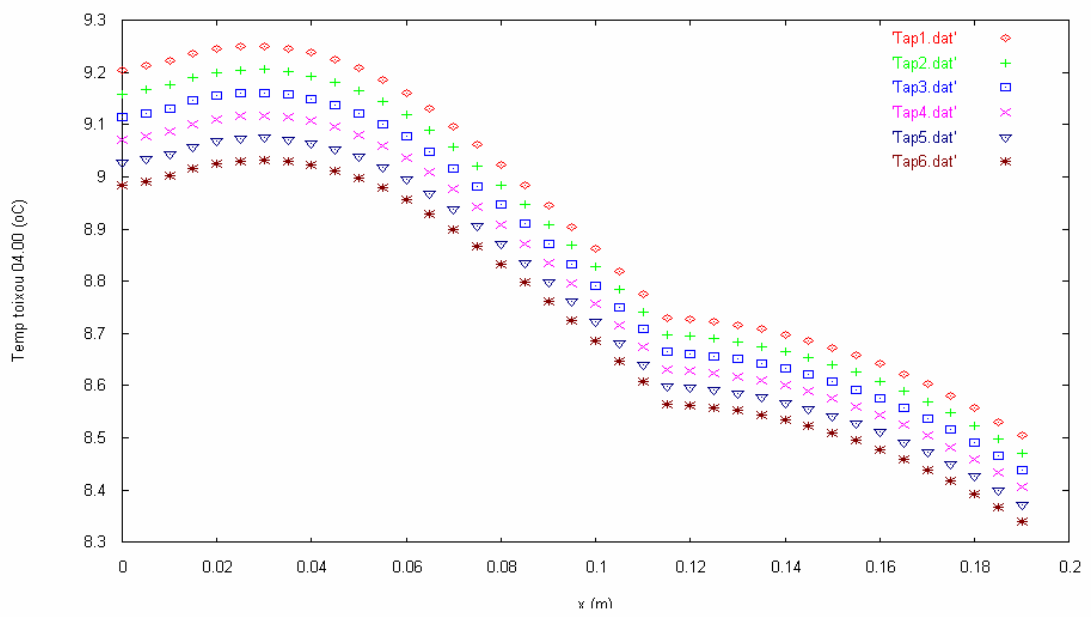
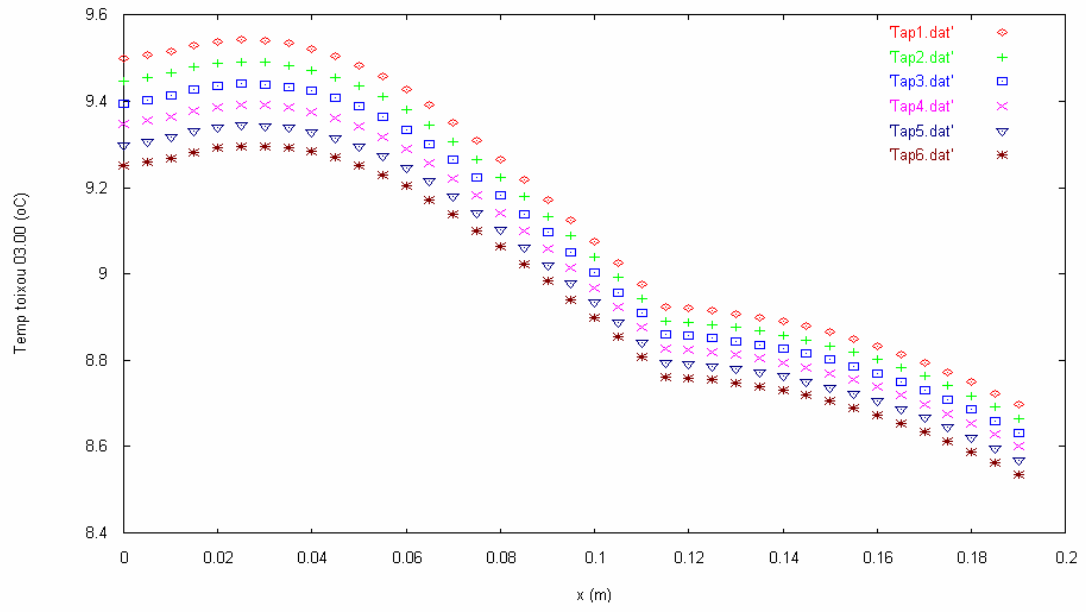


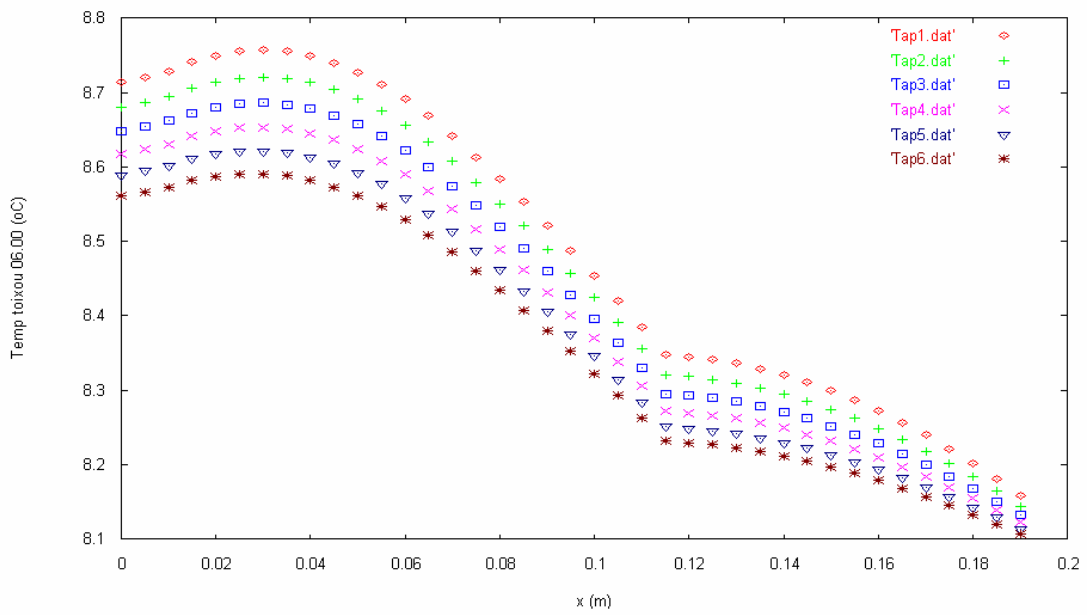
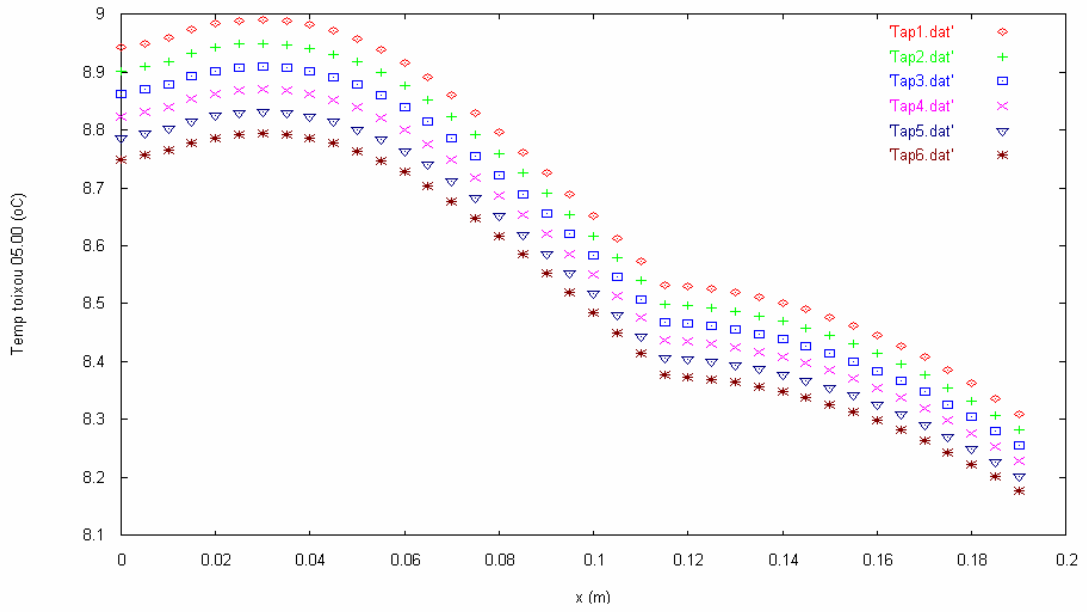












16.4.4 Σύγκριση των αποτελεσμάτων και συμπεράσματα για τον μήνα

Δεκέμβρη

Σύμφωνα με την μελέτη που προηγήθηκε, παρατηρούμε ότι για τις περιπτώσεις που χρησιμοποιείται υλικό αλλαγής φάσης η μέγιστη εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου παραμένει σταθερή και ίση περίπου προς τους 27.5 °C. Ωστόσο, η ελάχιστη θερμοκρασία για την κλασσική διάταξη του τοίχου είναι περίπου 13 °C ενώ για την περίπτωση που εξετάζεται κατά την πρώτη παραμετρική μελέτη αυτή φτάνει ως την τιμή των 10 °C. Επομένως, για την κλασσική διάταξη του τοίχου η διακύμανση είναι πολύ μικρότερη, κάτι το οποίο επιθυμούμε να επιτύχουμε με την χρήση του PCM. Επιπλέον, όπως είναι επόμενο, όταν δεν χρησιμοποιείται PCM και η μέγιστη και η ελάχιστη θερμοκρασία είναι μικρότερες, 25 °C και 9 °C αντίστοιχα.

Οι μέγιστες θερμοκρασίες κατά μήκος του τοίχου λαμβάνουν τις ίδιες περίπου τιμές για την κλασσική διάταξη του τοίχου και για την πρώτη παραμετρική μελέτη, με την κλασσική διάταξη να εμφανίζει ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές, ενώ φυσικά η διακύμανση των τιμών στην πρώτη παραμετρική μελέτη είναι πολύ πιο έντονη, ειδικά μέσα στο PCM μιάς και επηρεάζεται πολύ περισσότερο από τις θερμοκρασιακές μεταβολές στο εσωτερικό του δωματίου. Το τελευταίο επιβεβαιώνεται και από τα διαγράμματα των Cr, όπου στην περίπτωση της παραμετρικής μελέτης είναι ξεκάθαρο ότι εκμεταλλευόμαστε την λανθάνουσα θερμότητα που μπορεί να αποθηκεύσει το PCM πλήρως, καθώς το τελευταίο λαμβάνει μεγάλο εύρος τιμών, σε αντίθεση με την κλασσική διάταξη όπου εκμεταλλευόμαστε μόνο ένα μέρος των ιδιοτήτων του. Τέλος, για την περίπτωση χωρίς PCM και οι θερμοκρασίες κατά μήκος του τοίχου είναι χαμηλότερες συγκριτικά με τις λοιπές υπό μελέτη περιπτώσεις

Έτσι, και για τον μήνα Δεκέμβριο, μπορούμε να καταλήξουμε ότι η περίπτωση που θερμαίνει περισσότερο τον χώρο, και μειώνει κατά τον δυνατόν την θερμοκρασιακή διακύμανση σε αυτόν, είναι η κλασσική

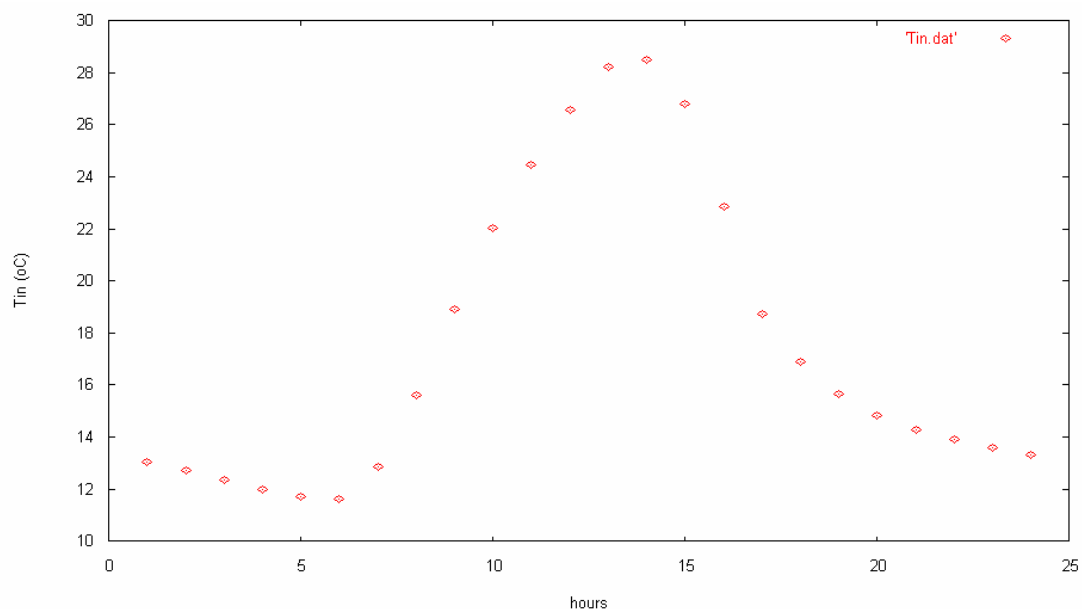
διάταξη του τοίχου, με χρήση PCM, αν και δεν εκμεταλλευόμαστε πλήρως τις ιδιότητες του τελευταίου.

16.5 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων και παραμετρική μελέτη για τον μήνα Ιανουάριο

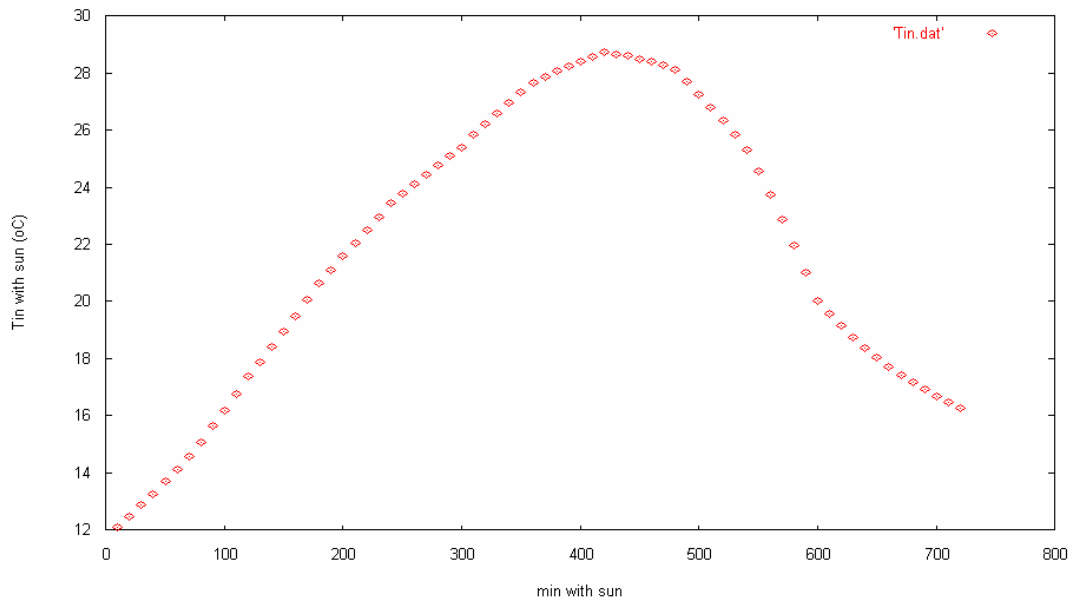
16.5.1 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων για την κλασσική διάταξη του τοίχου , κατά τον μήνα Ιανουάριο

(σοβάς-τούβλο-PCM-μόνωση- τούβλο-σοβάς)

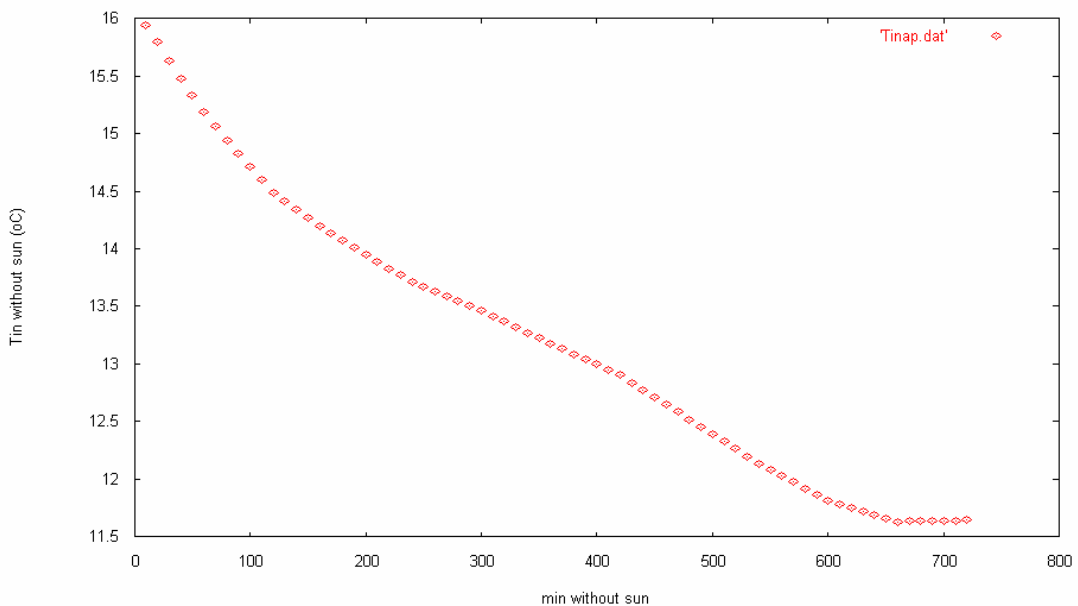
Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου



Εικόνα 106: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου κατά την διάρκεια του 24 ωρου



Εικόνα 107: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου συναρτήσει των λεπτών κατά την διάρκεια των οποίων έχουμε ηλιοφάνεια (7.00- 18.00)



Εικόνα 108: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου συναρτήσει των λεπτών κατά την διάρκεια των οποίων δεν υπάρχει ηλιοφάνεια

**Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος του τοίχου κατά την διάρκεια
του
24 ωρου**

Η κατανομή των υλικών κατά μήκος του τοίχου x (m) είναι η εξής:

Σοβάς: 0-0.01 m

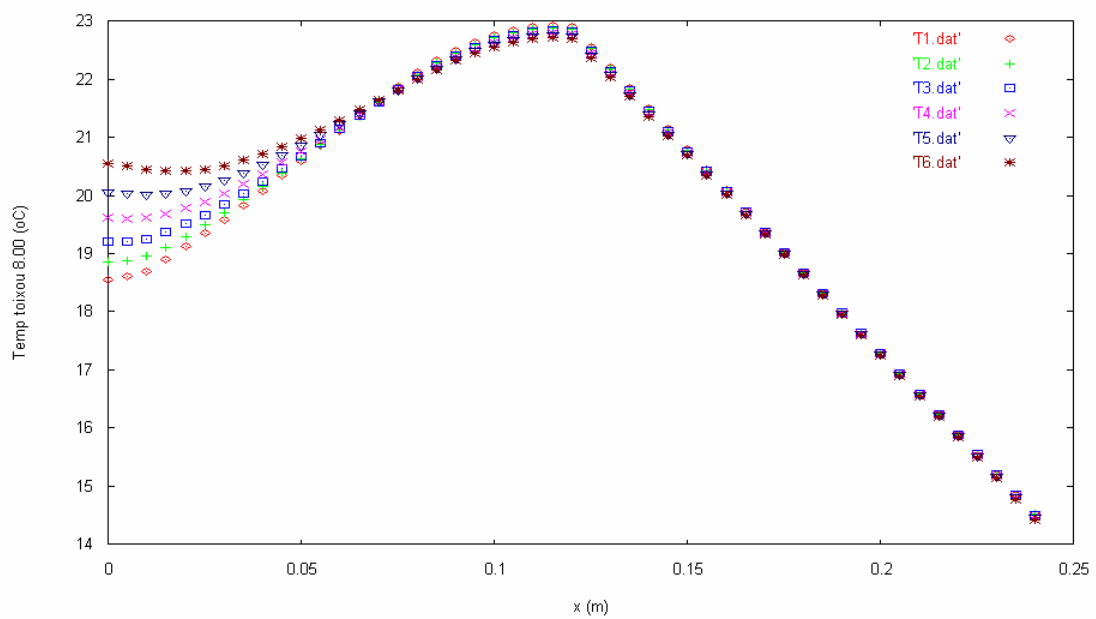
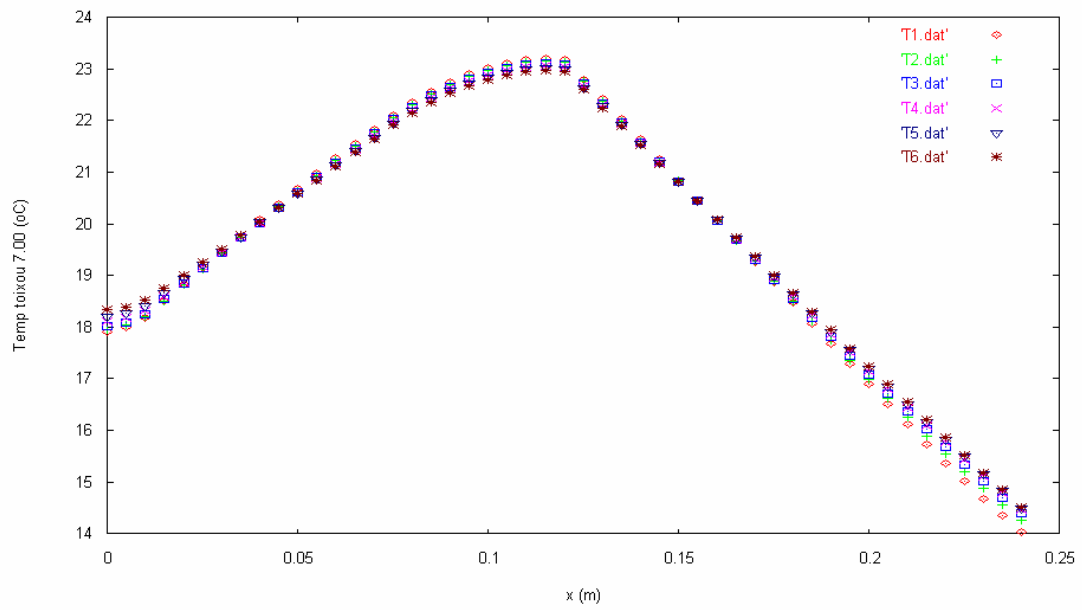
Τούβλο: 0.01-0.07 m

PCM:0.07-0.12 m

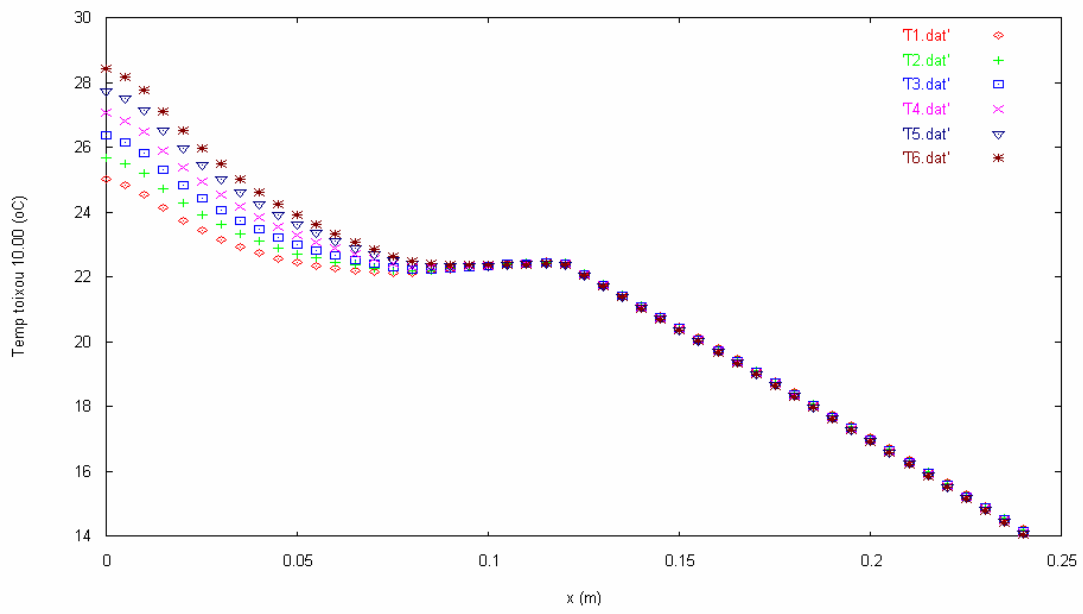
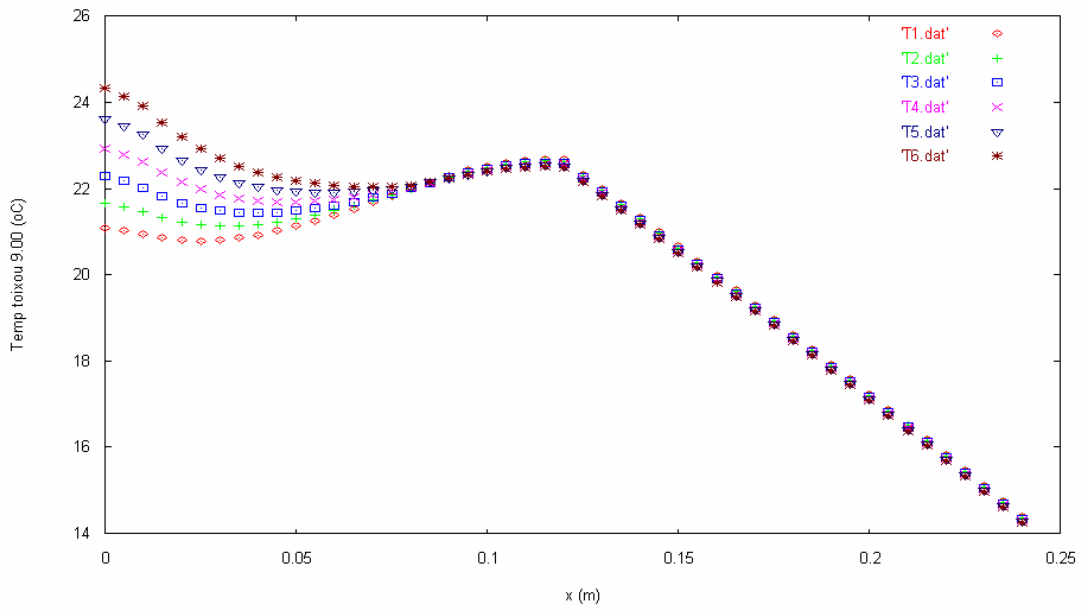
Μόνωση: 0.12-0.17 m

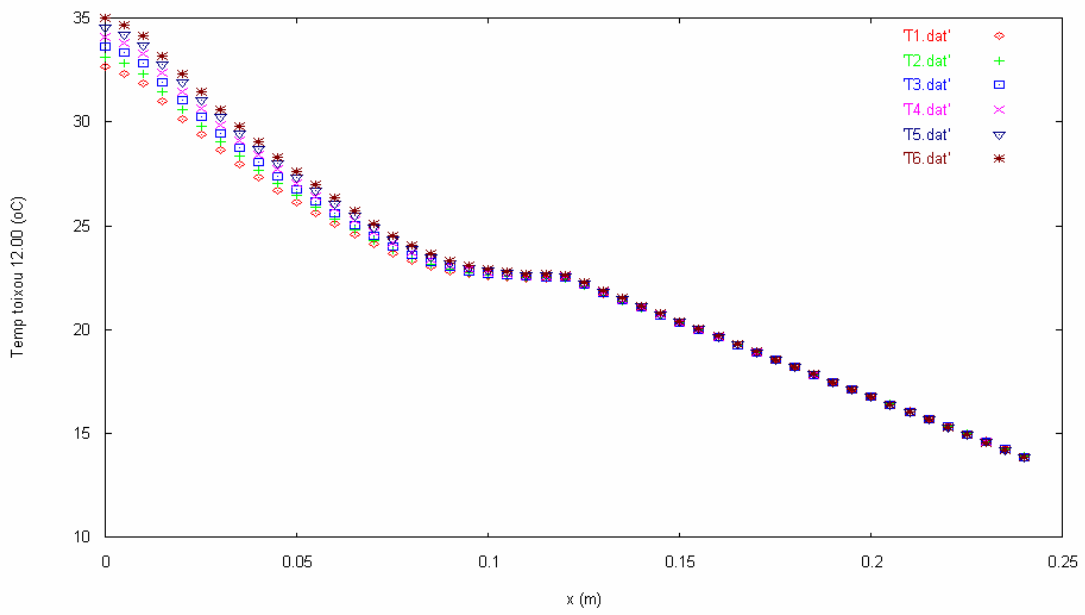
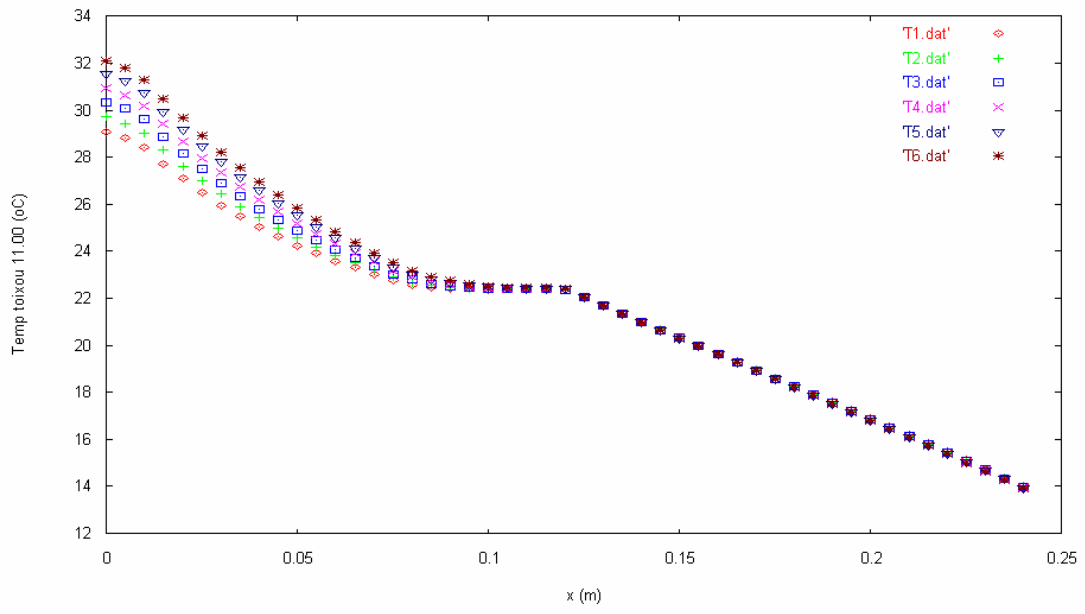
Τούβλο : 0.17-0.23 m

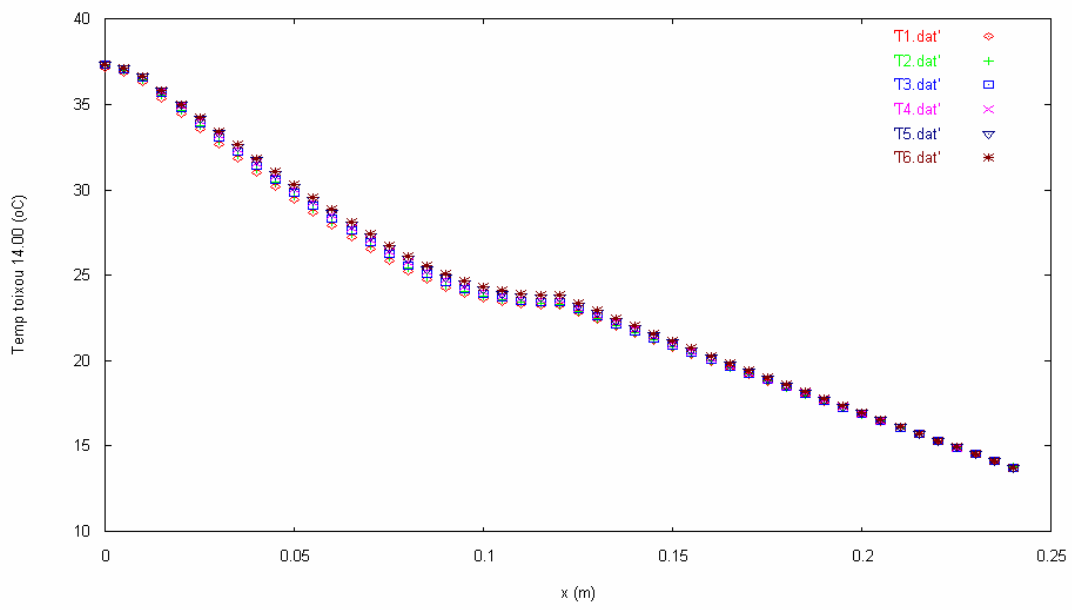
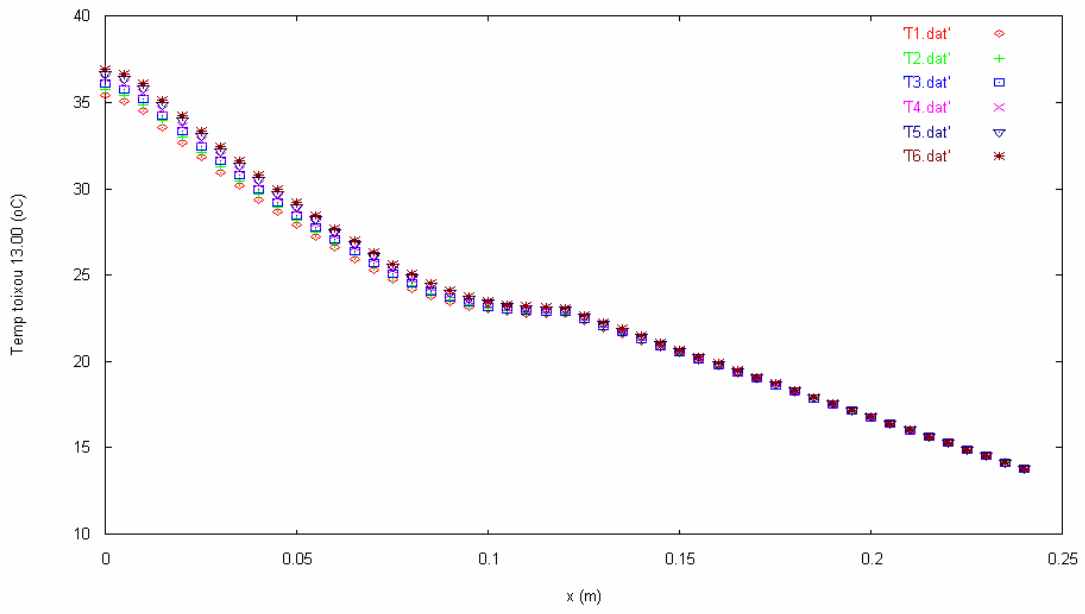
Σοβάς: 0.23-0.24 m

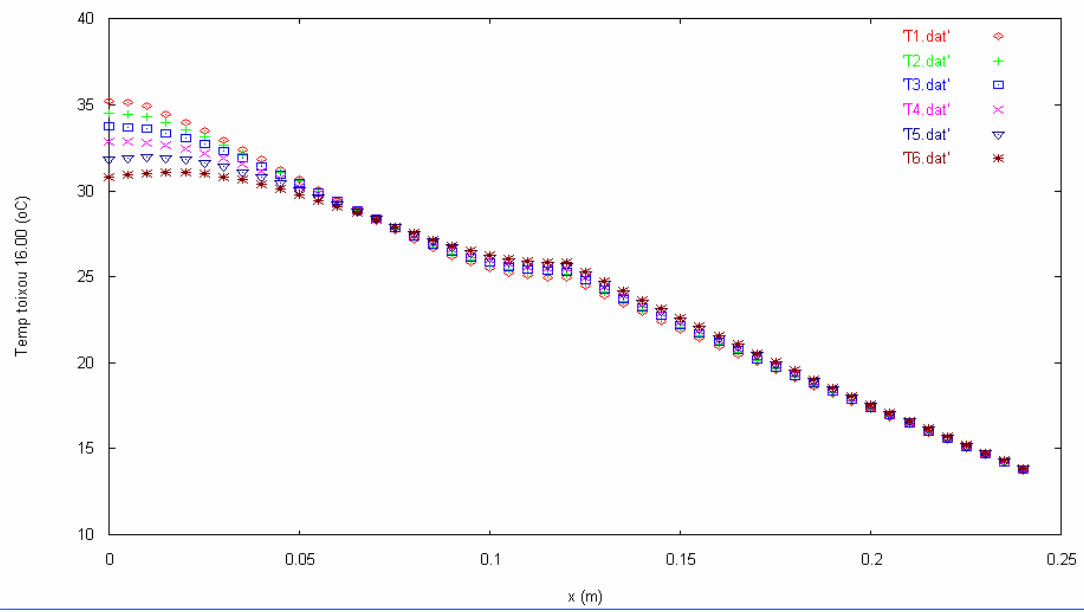
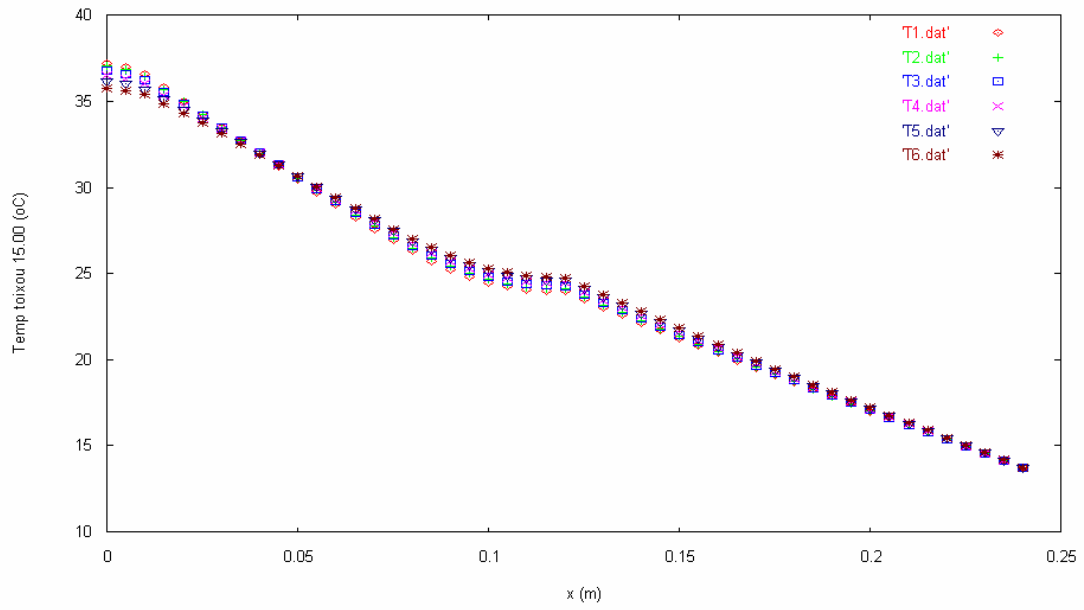


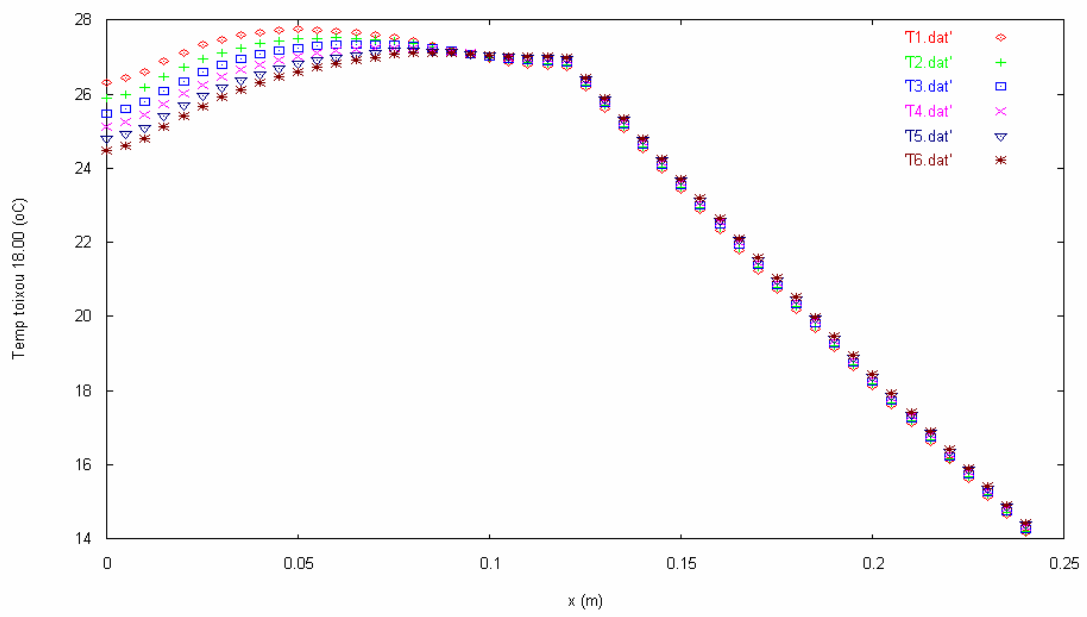
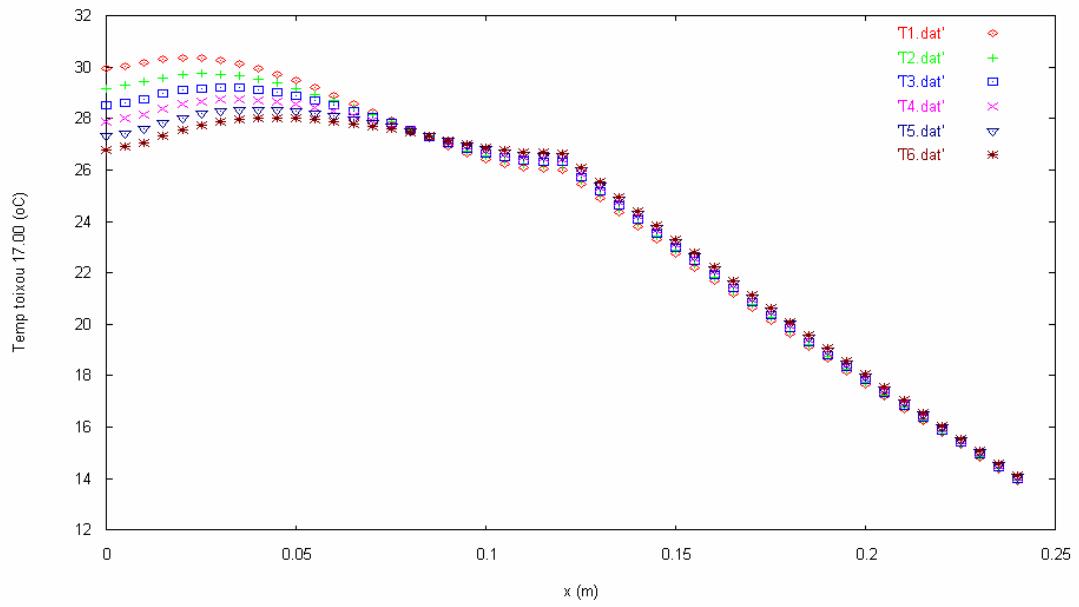
Εικόνα 109: Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος του τοίχου κατά την διάρκεια του 24 ωρου, ακολουθούν τα διαγράμματα των υπόλοιπων ωρών

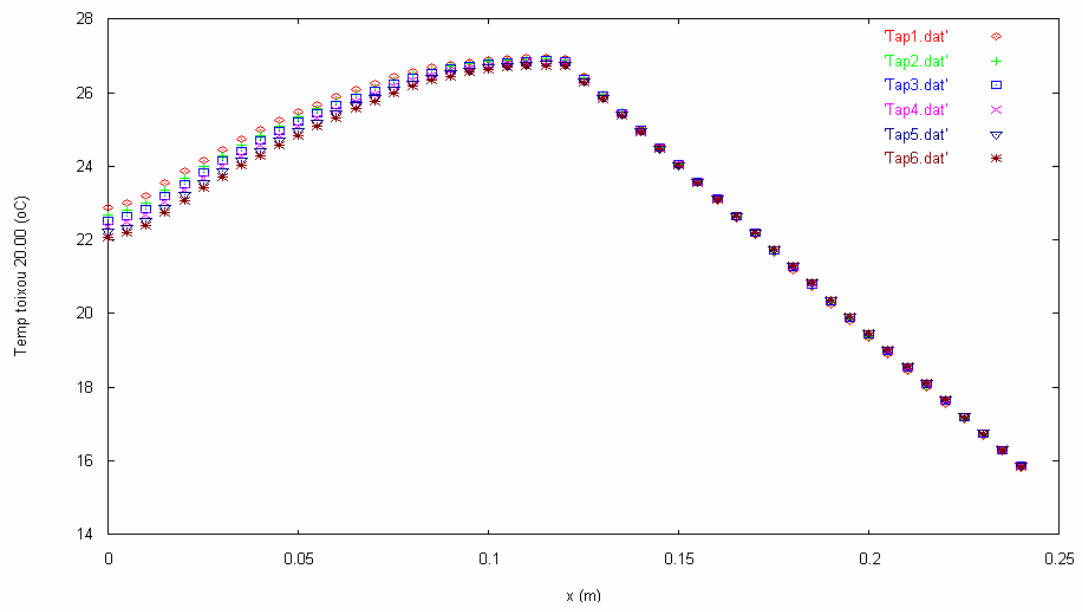
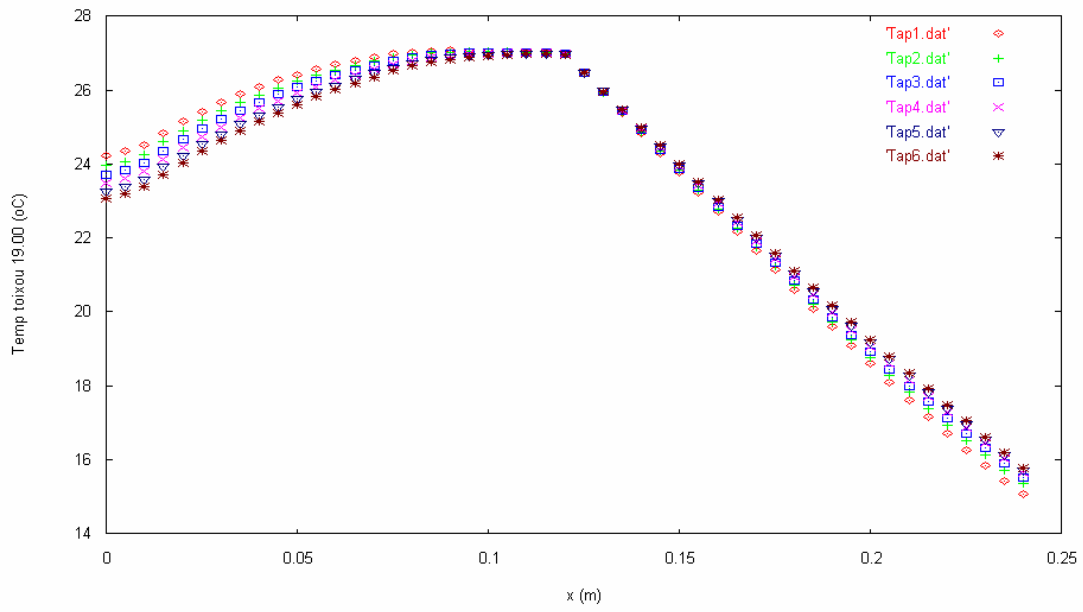


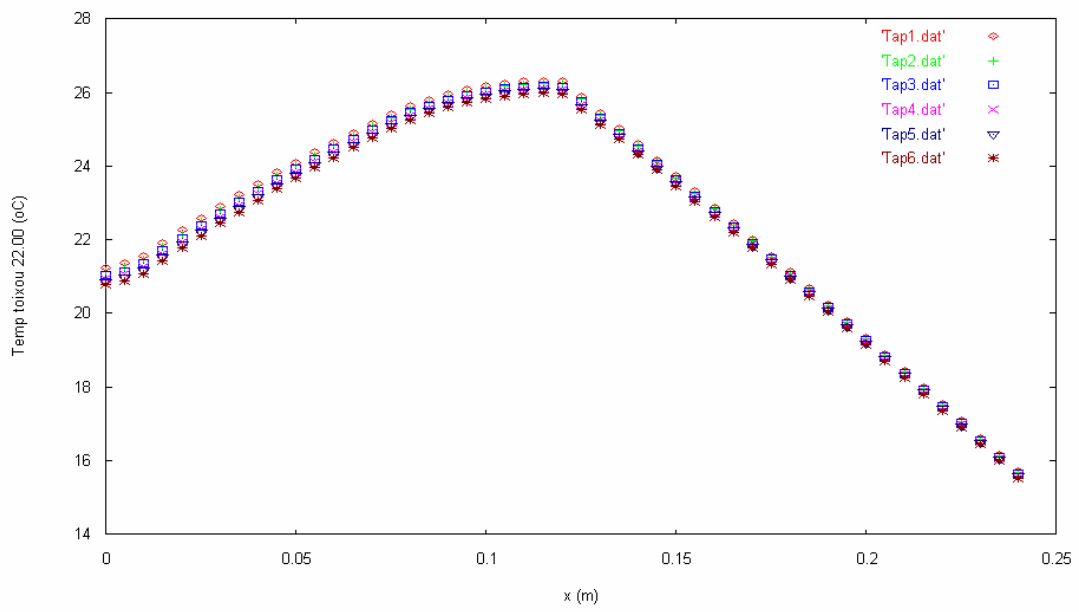
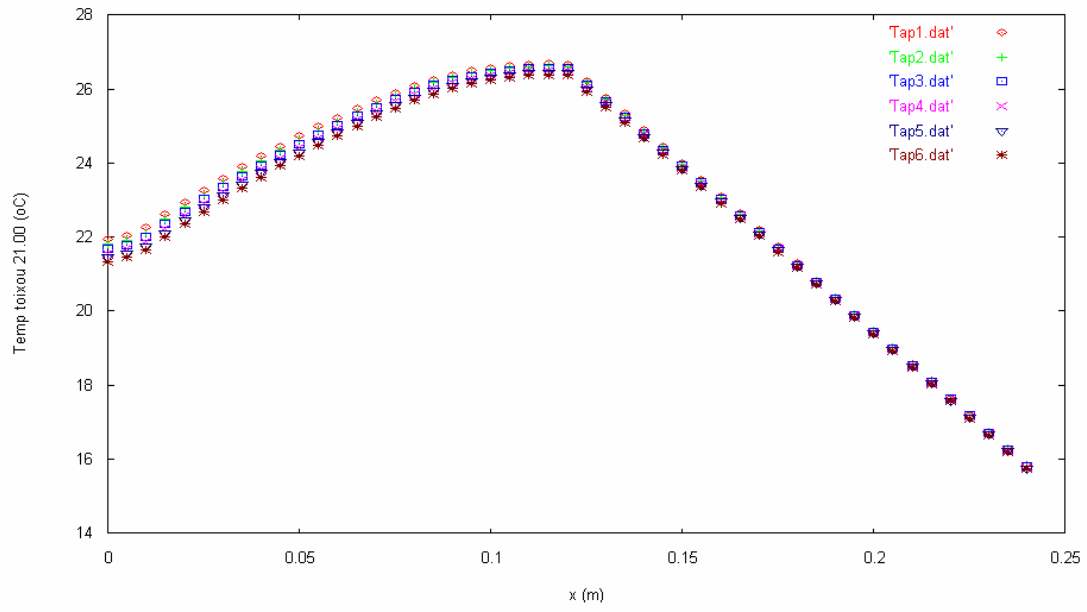


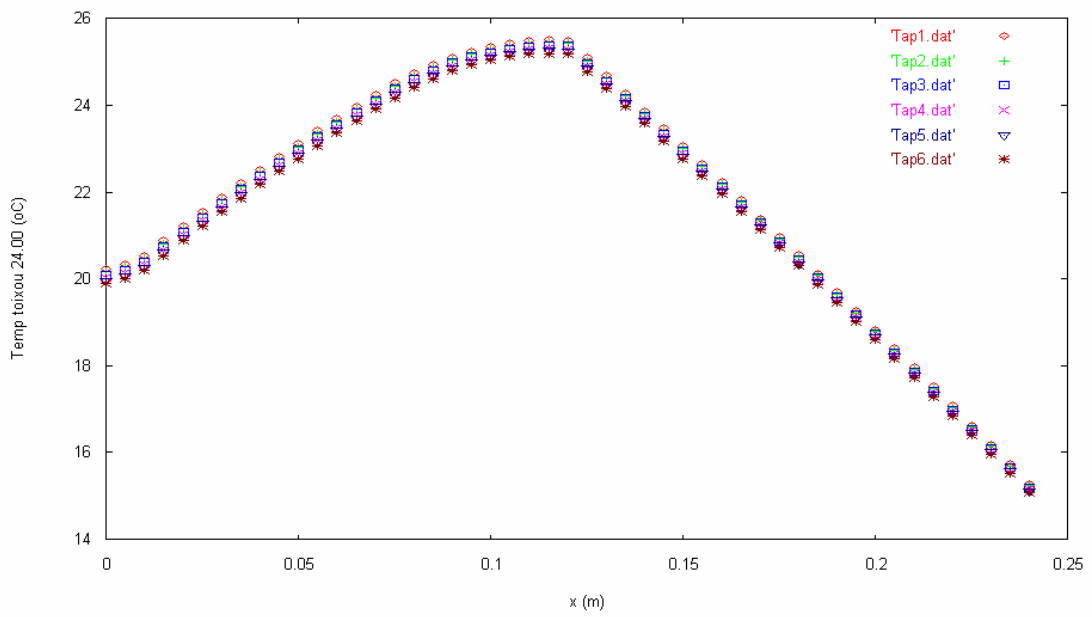
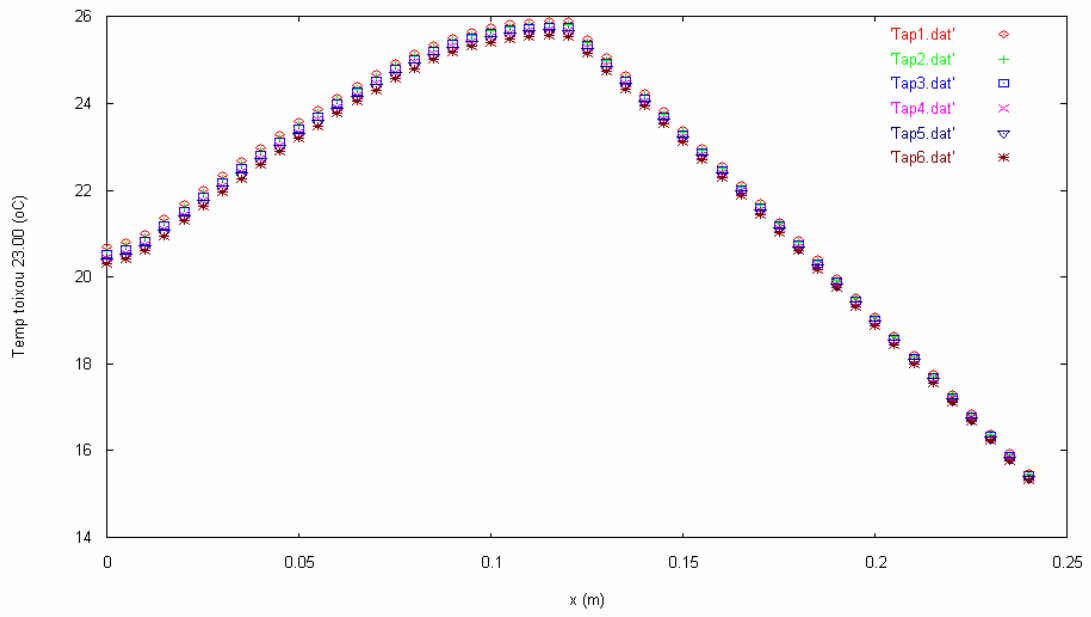


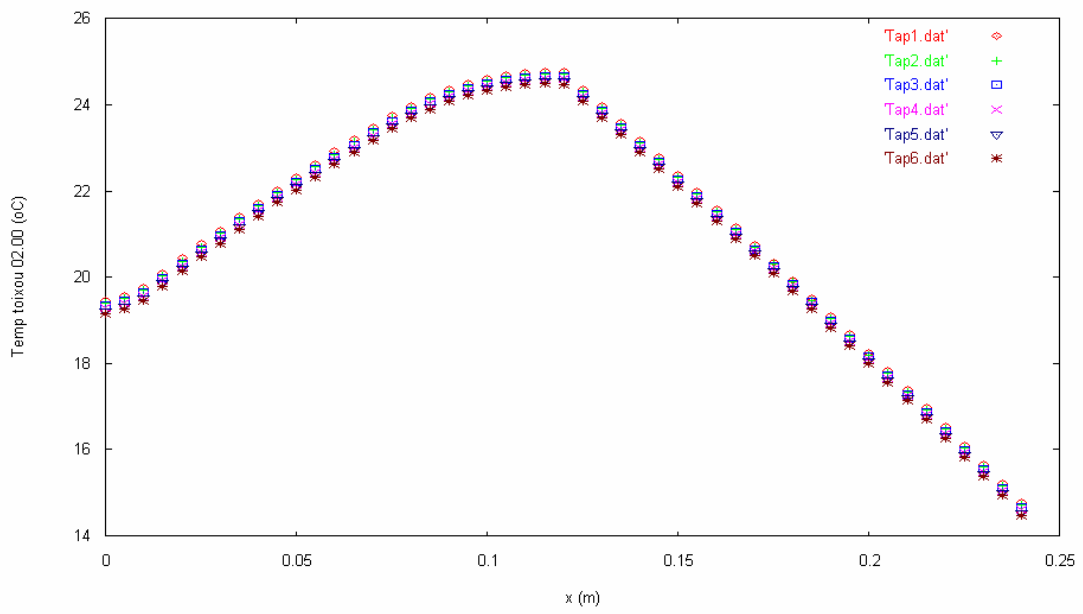
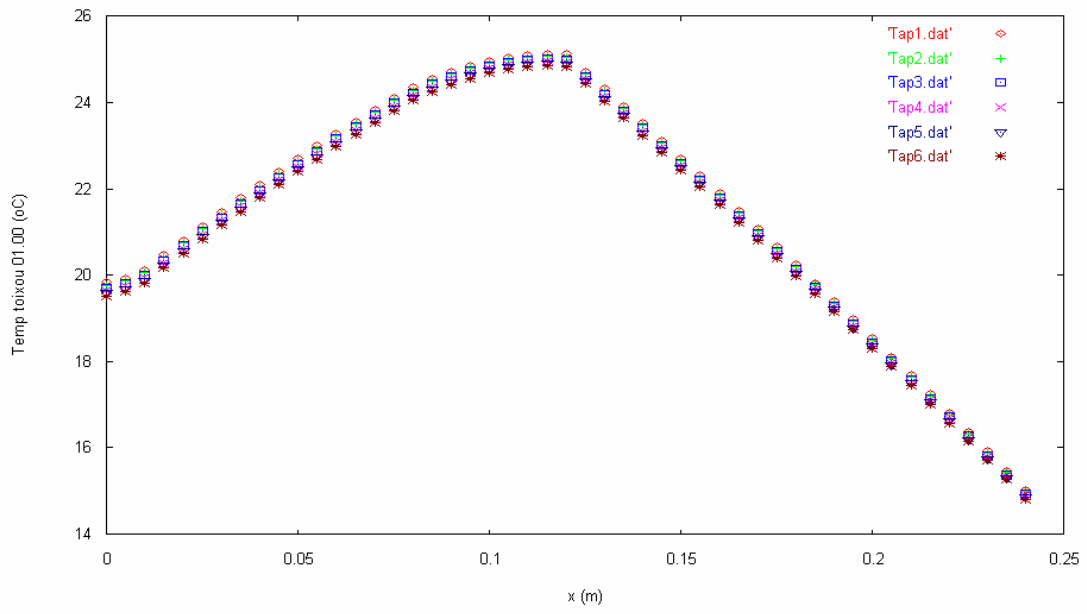


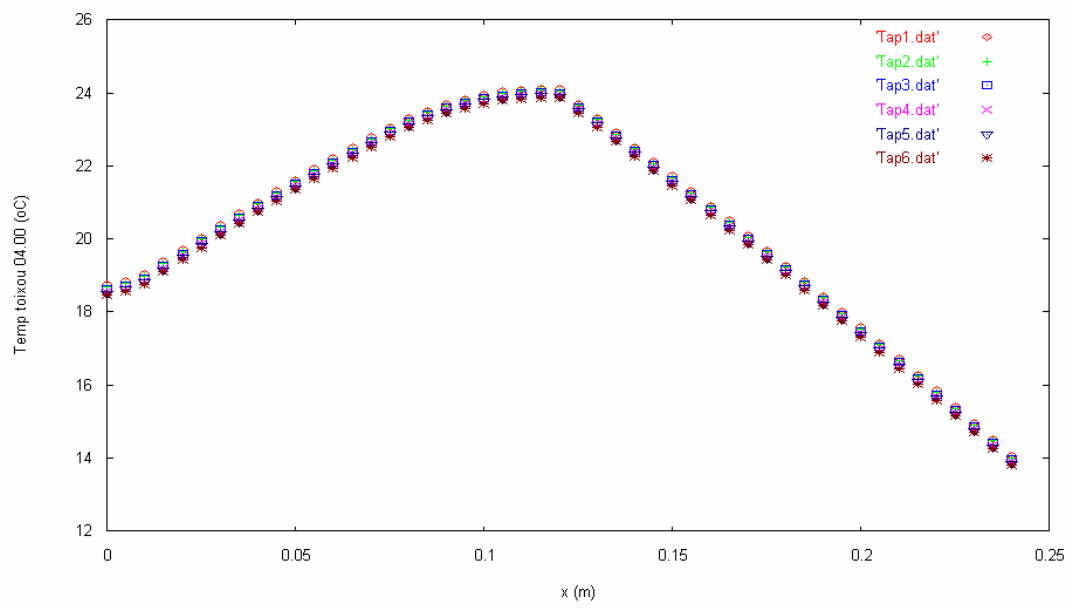
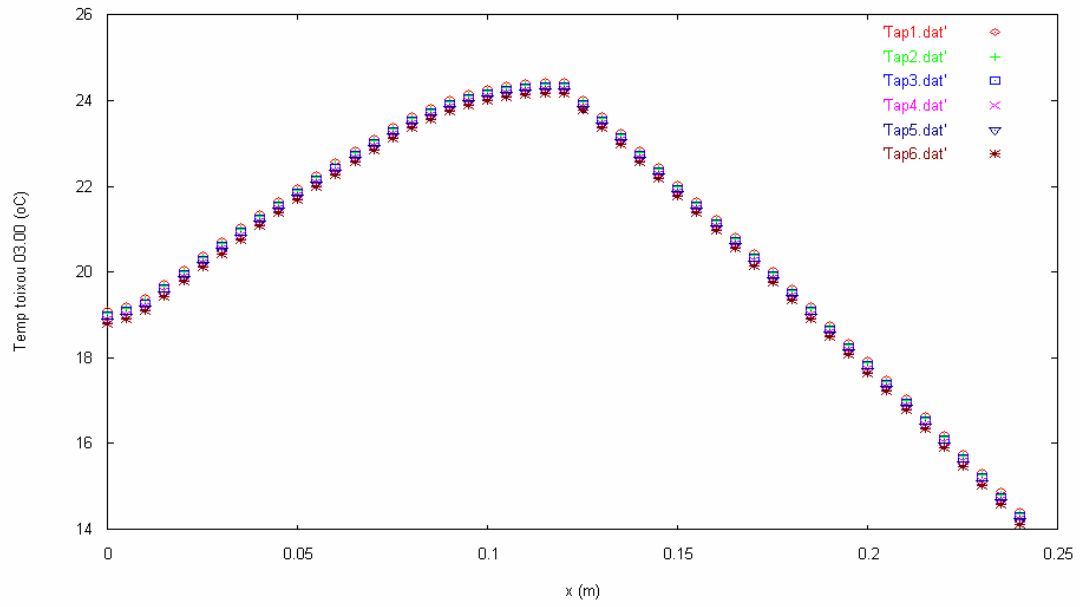


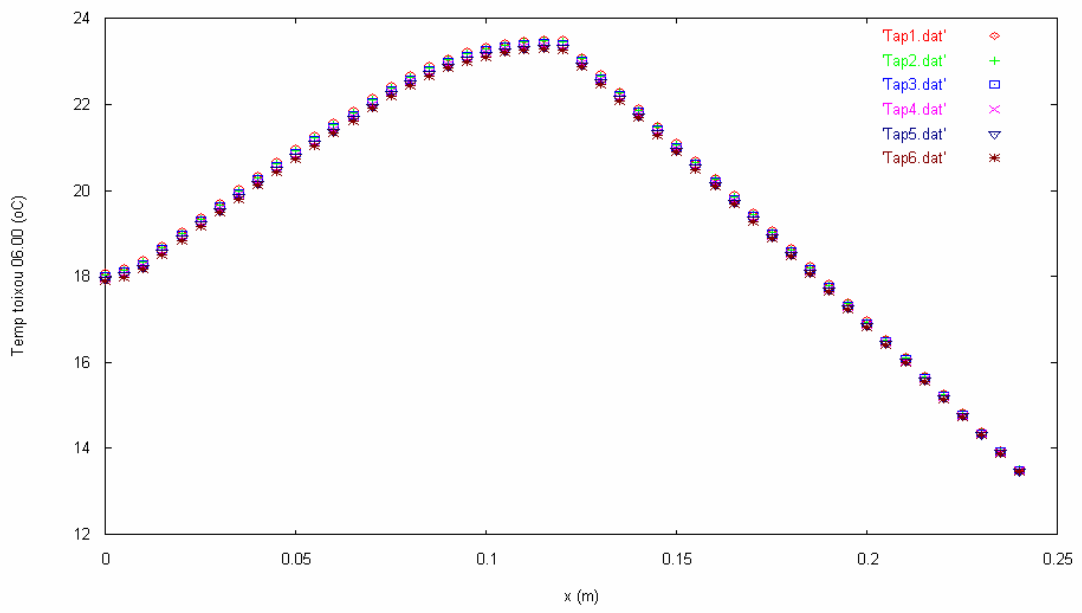
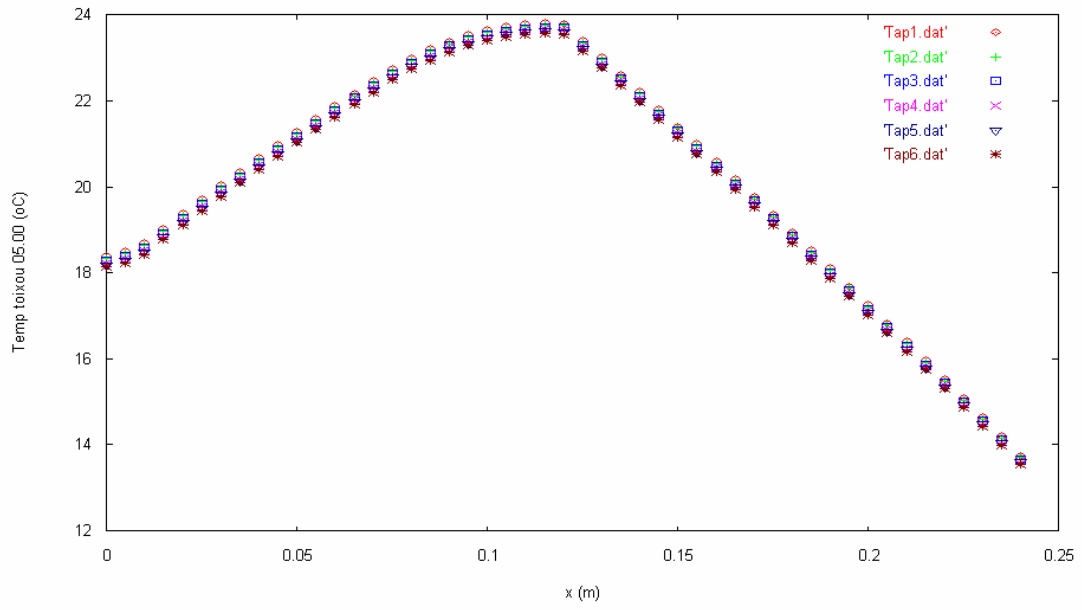




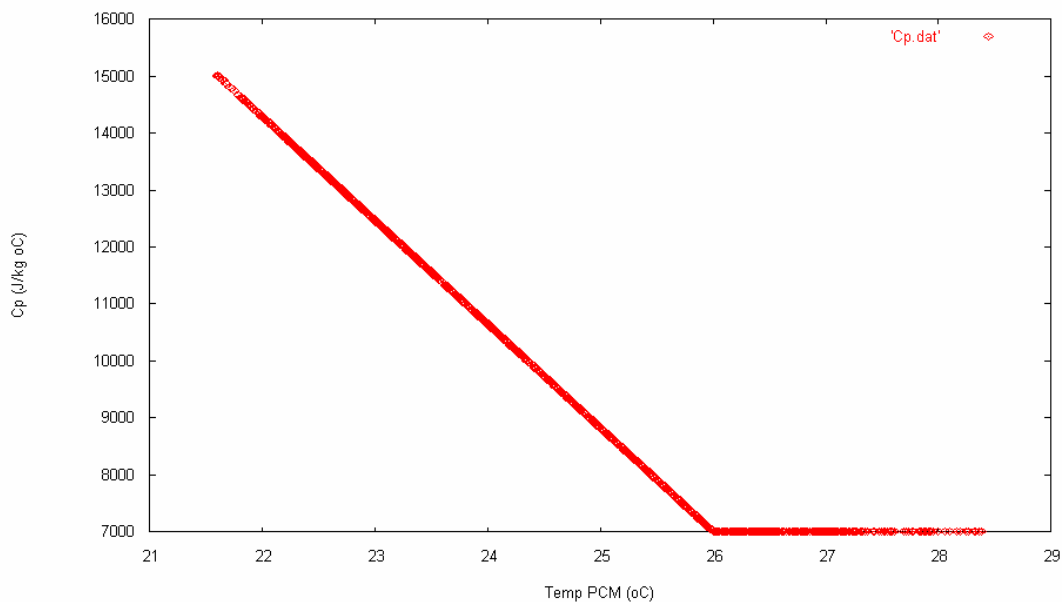








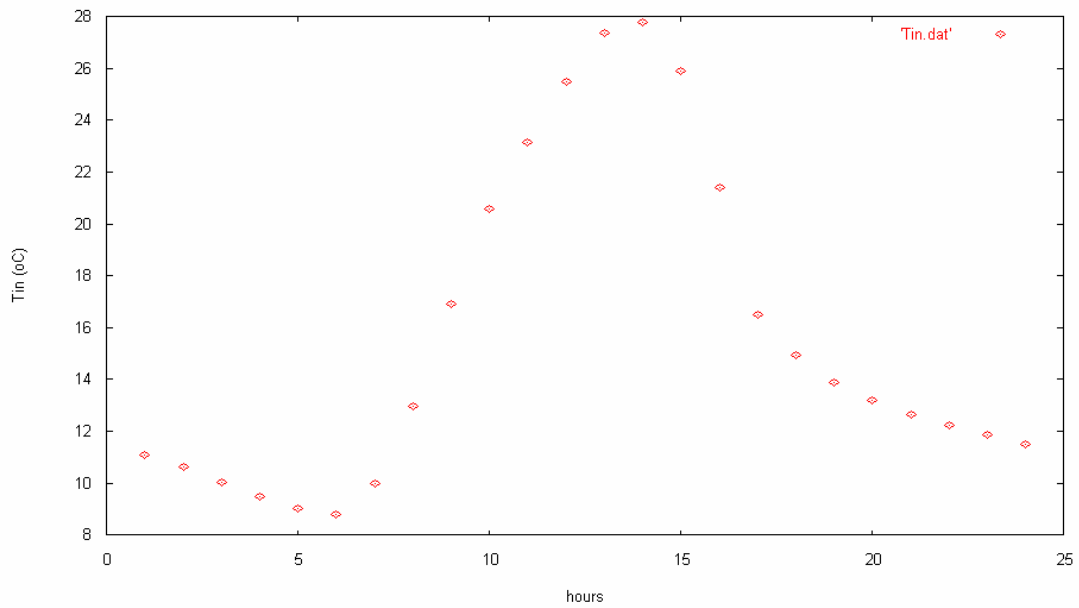
Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του υλικού αλλαγής φάσης συναρτήσει της θερμοκρασίας του



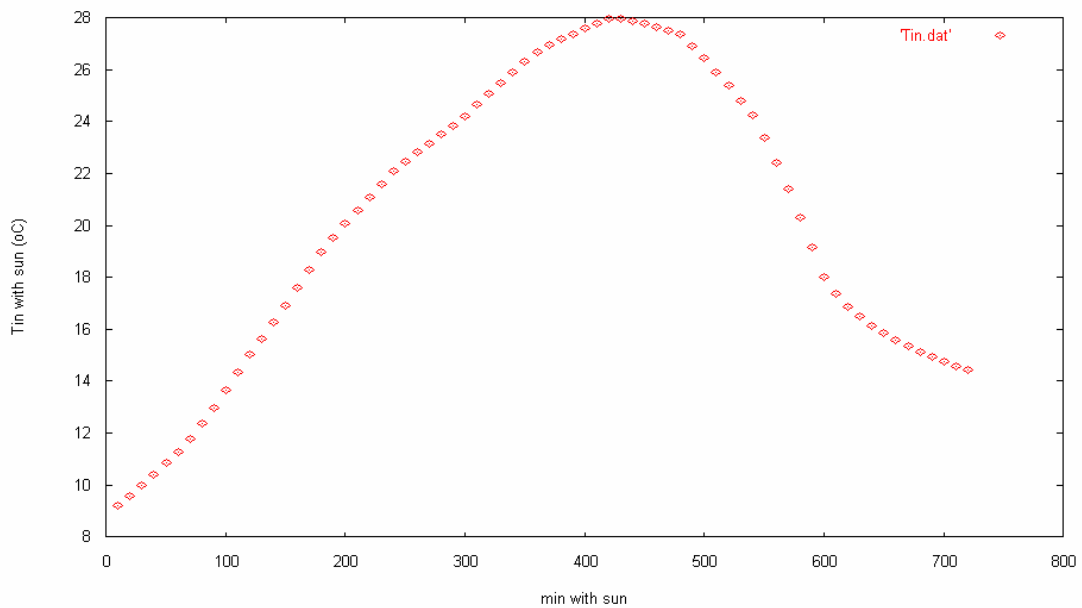
Εικόνα 110: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του υλικού συναρτήσει της θερμοκρασίας του

16.5.2. Παρουσίαση των αποτελεσμάτων για την πρώτη παραμετρική διερεύνηση για τον μήνα Ιανουάριο (γυψοσανίδα-PCM-μόνωση-τούβλο-σοβάς)

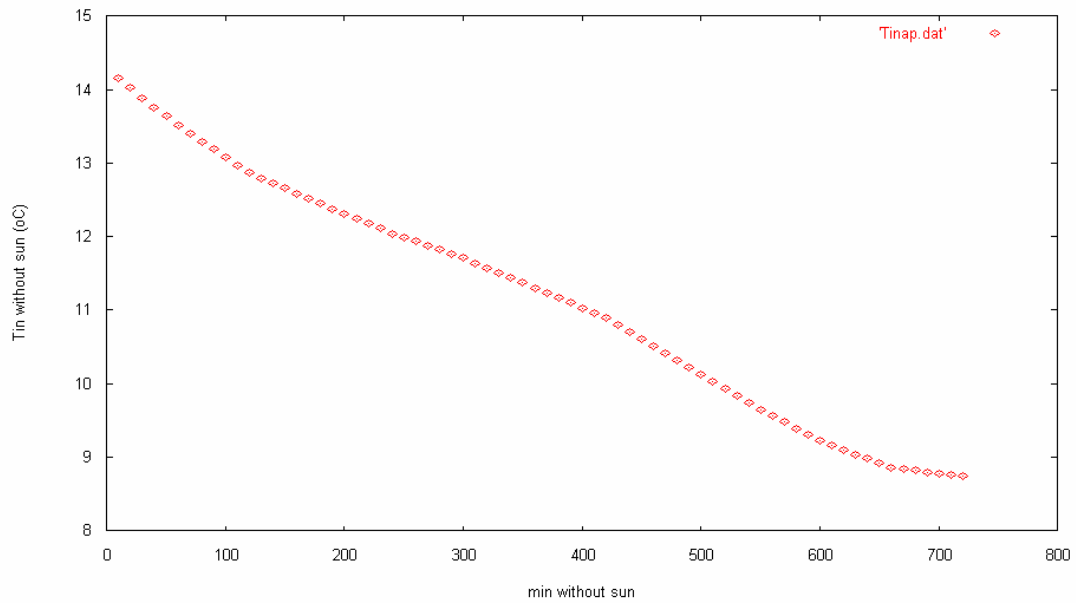
Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου



Εικόνα 111: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου κατά την διάρκεια του 24 ωρου



Εικόνα 112: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου συναρτήσει των λεπτών κατά την διάρκεια των οποίων υπάρχει ηλιοφάνεια (7.00- 18.00)



Εικόνα 113: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου συναρτήσει των λεπτών κατά την διάρκεια των οποίων υπάρχει ηλιοφάνεια (19.00- 6.00)

Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος του τοίχου κατά την διάρκεια του 24 ώρου

Τα υλικά κατά μήκος του τοίχου x (m) κατανέμονται ως εξής:

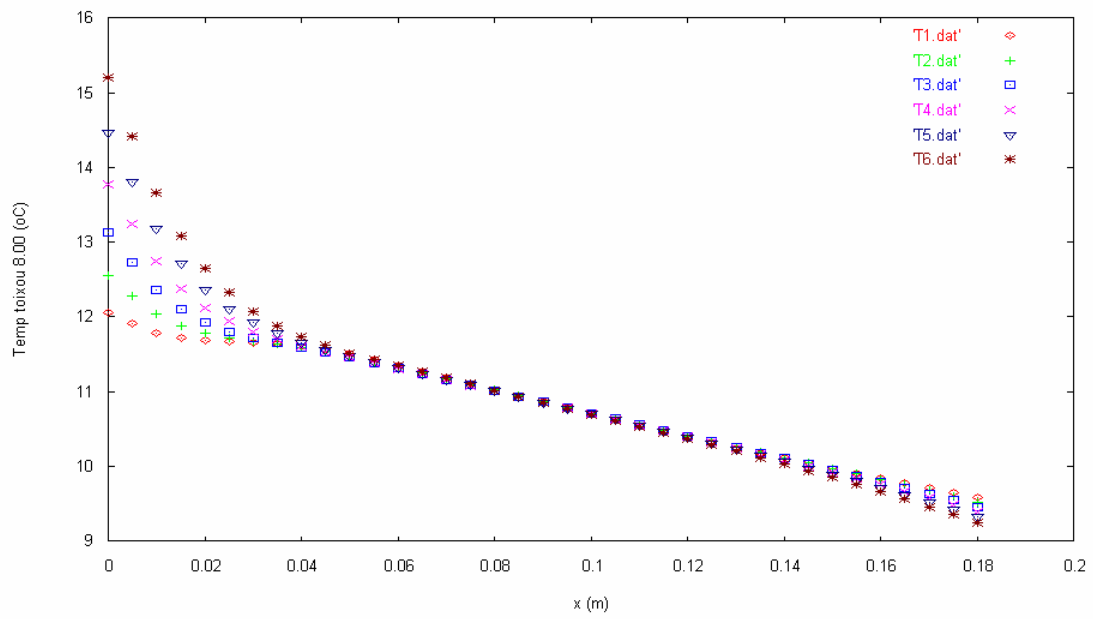
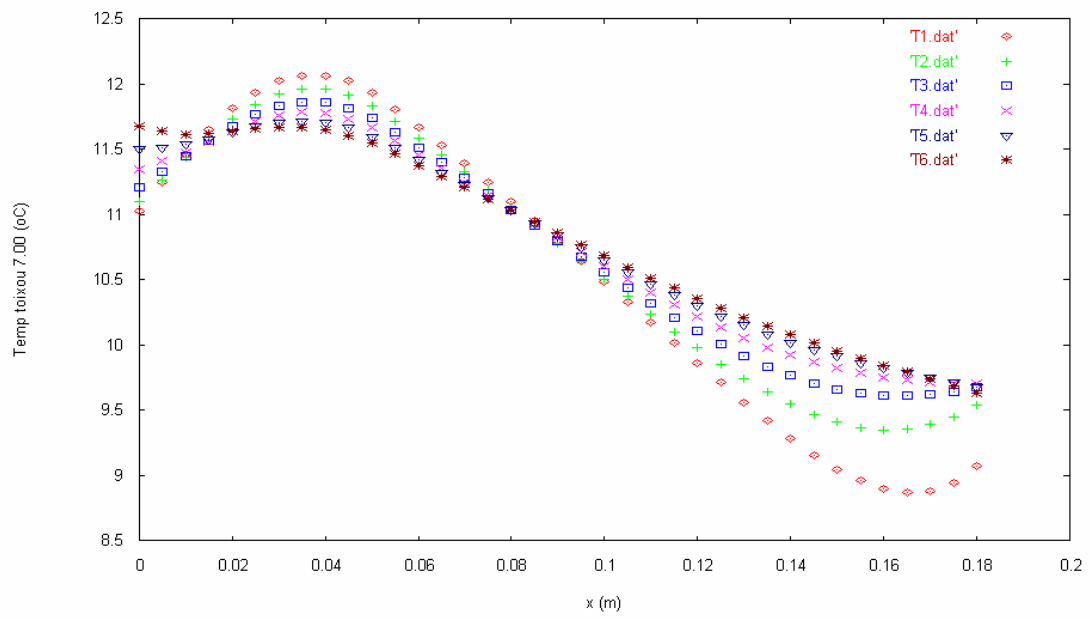
Γυψοσανίδα : 0-0.01 m

PCM : 0.01-0.06 m

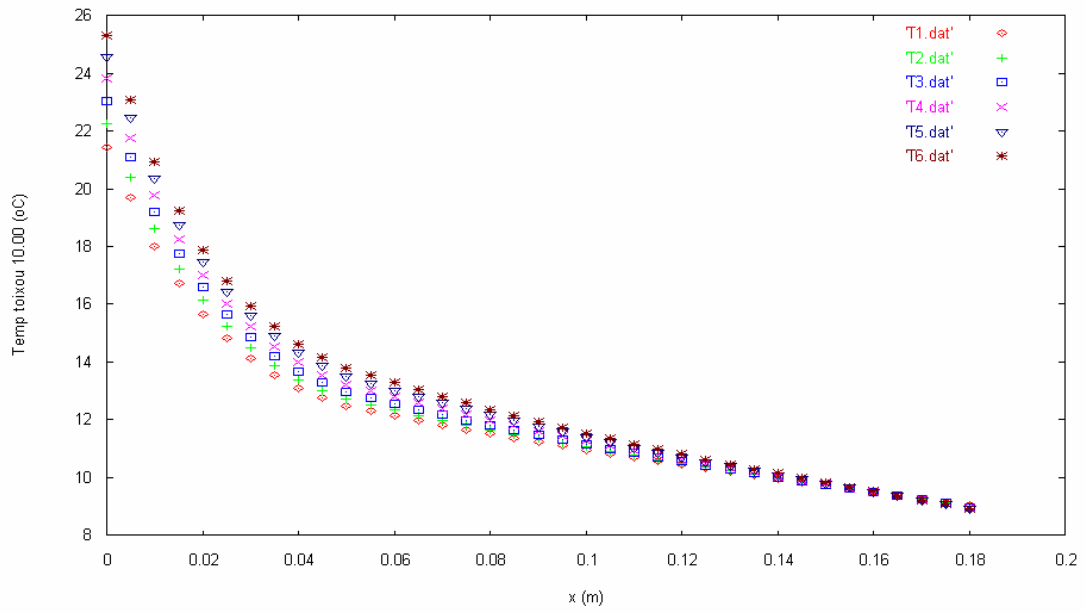
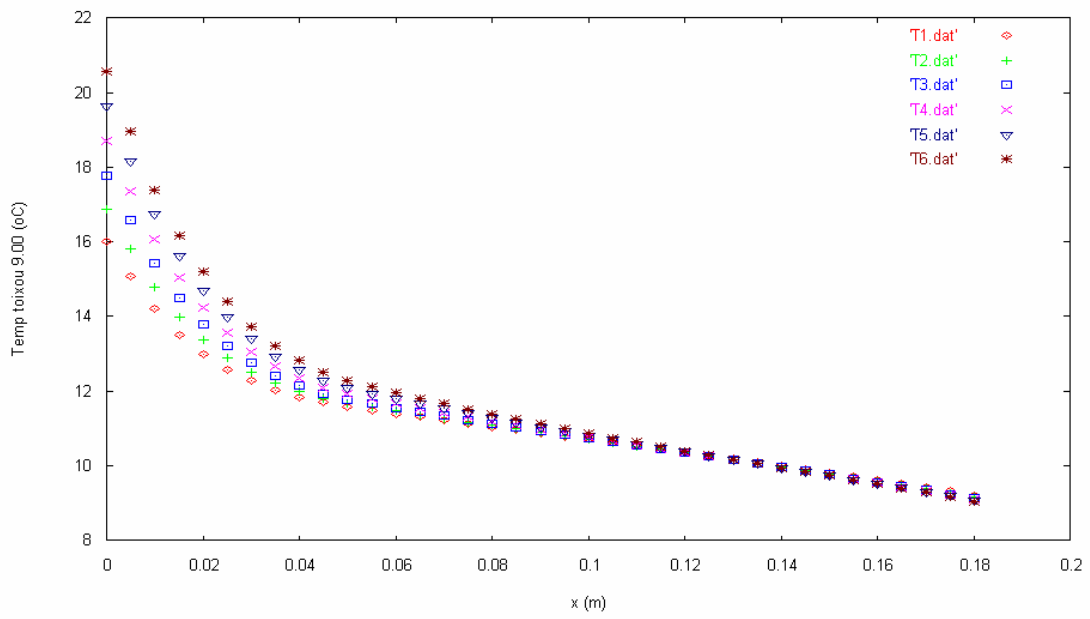
Μόνωση : 0.06-0.11 m

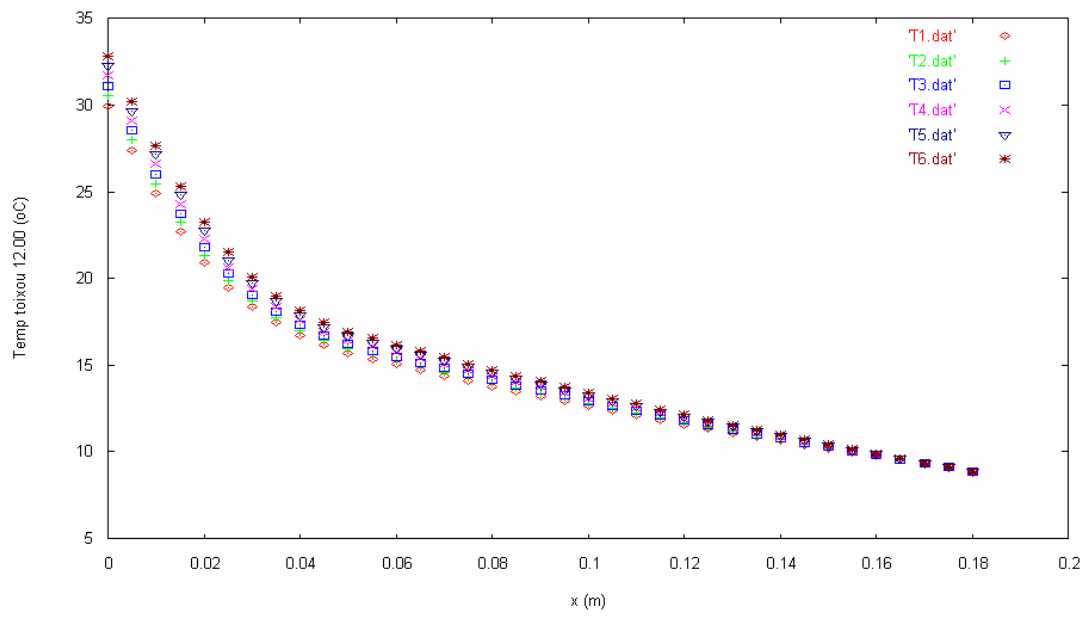
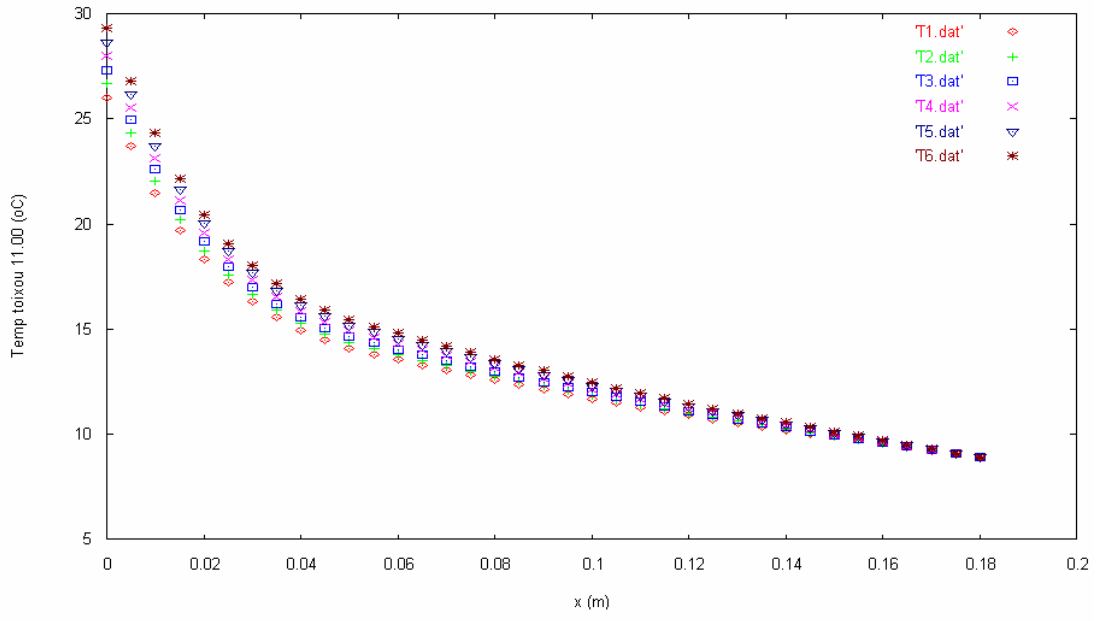
Τούβλο : 0.11-0.17 m

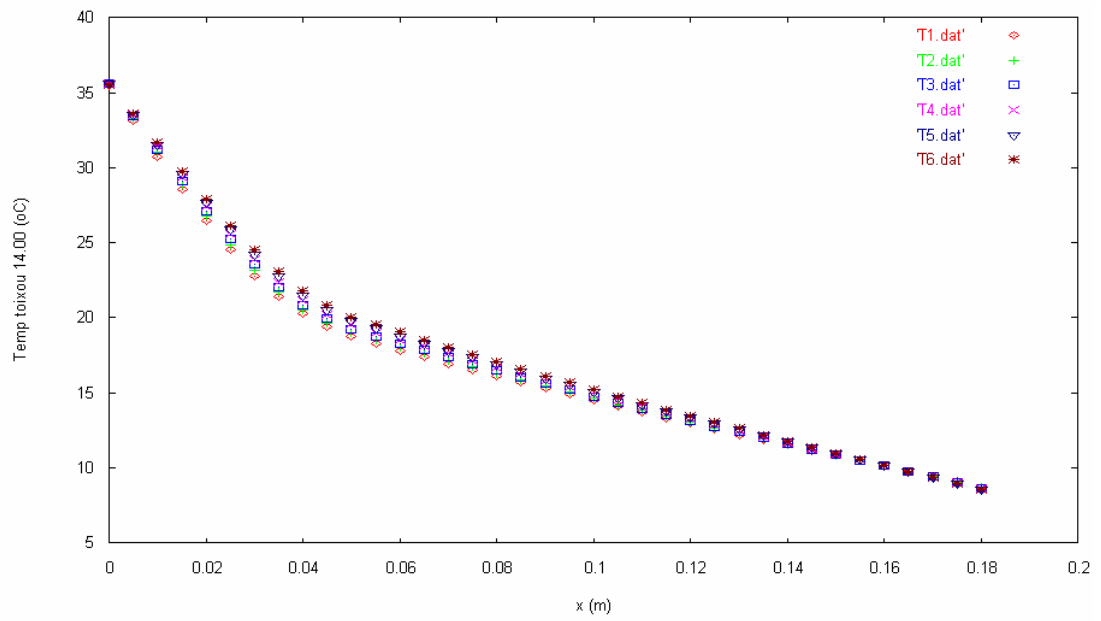
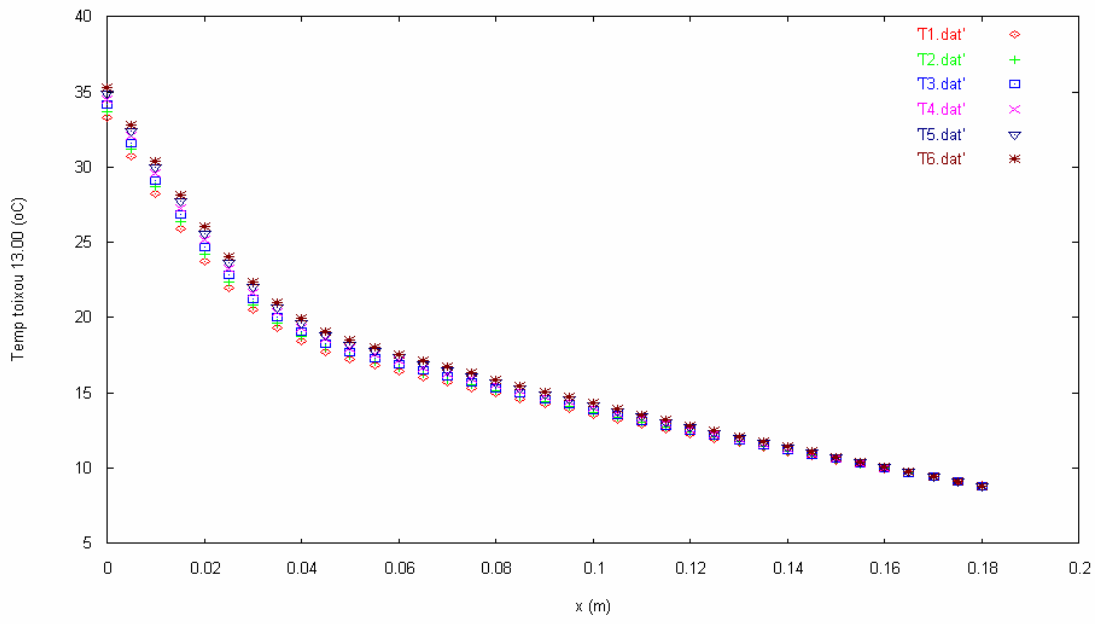
Σοβάς: 0.17-0.18 m

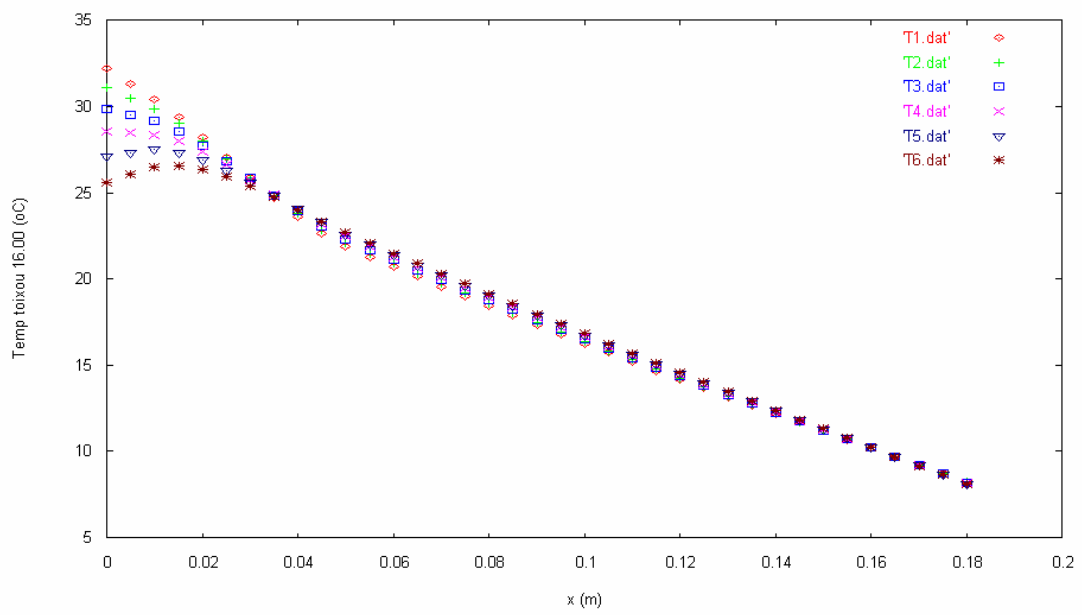
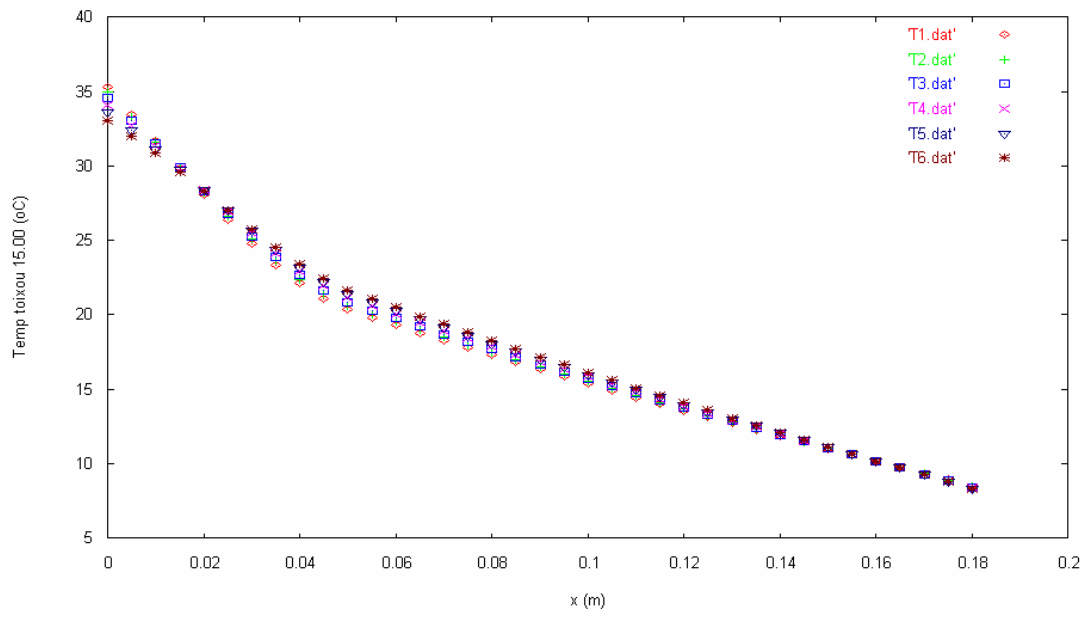


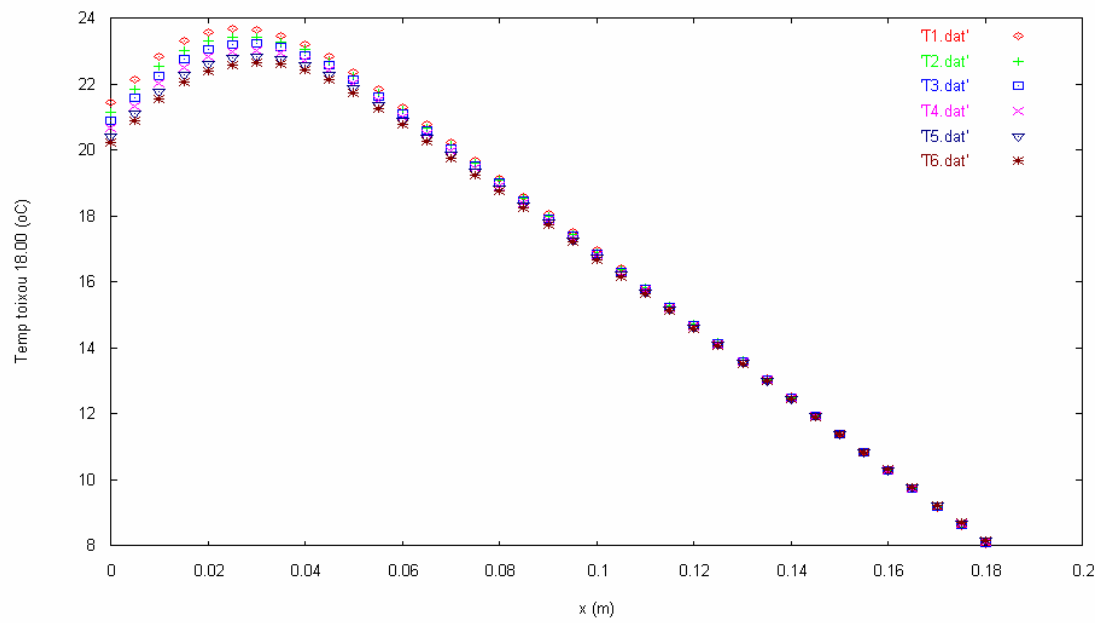
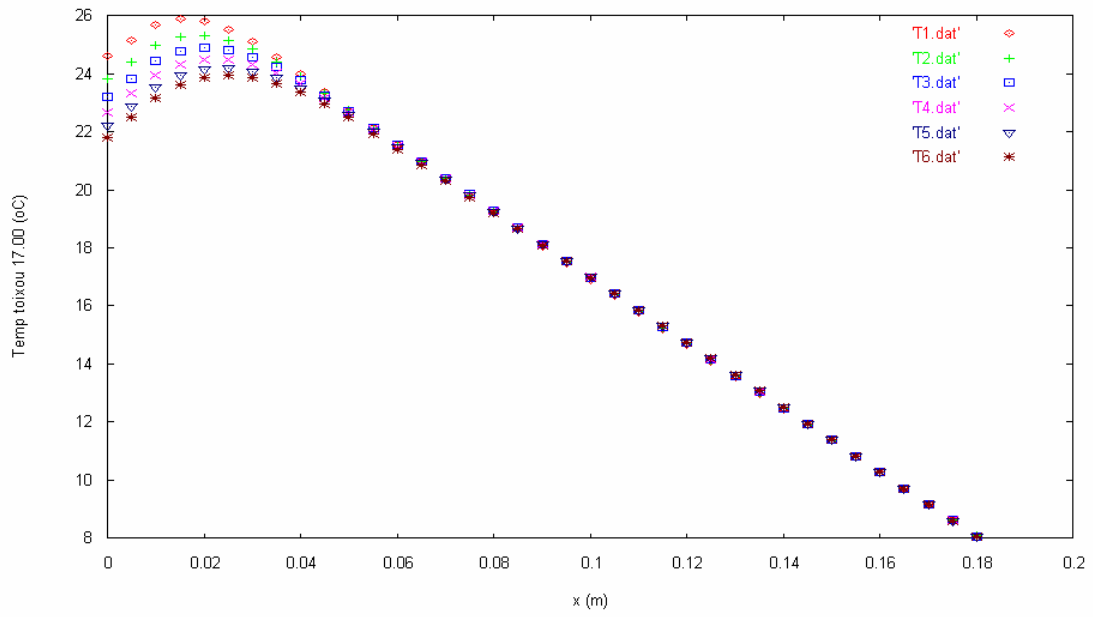
Εικόνα 114: Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος του τοίχου κατά την διάρκεια του 24 ώρου, ακολουθούν τα διαγράμματα των υπόλοιπων ωρών

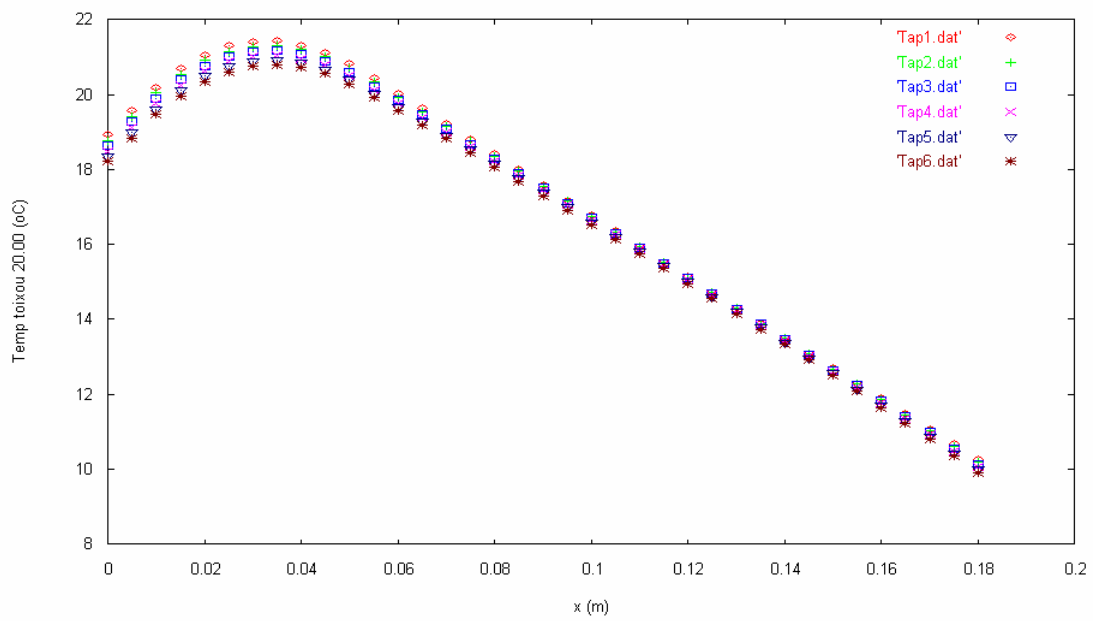
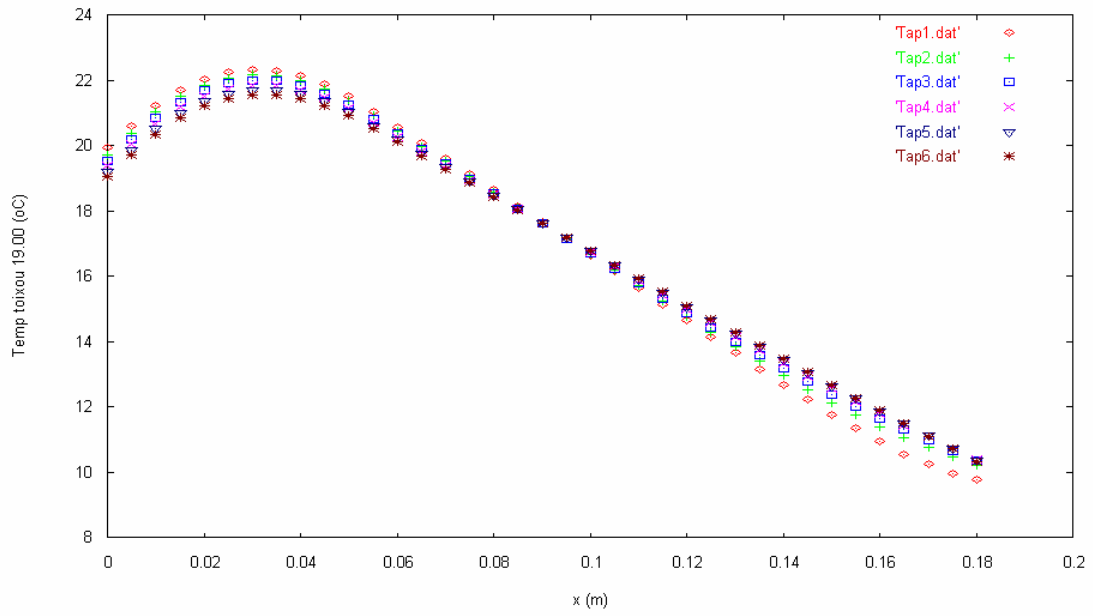


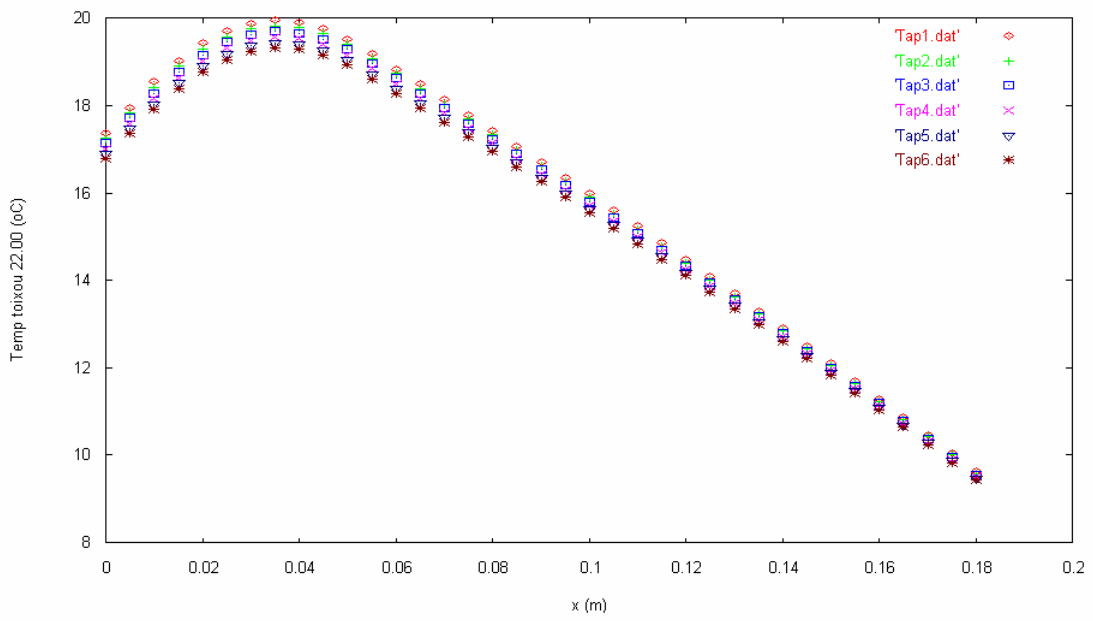
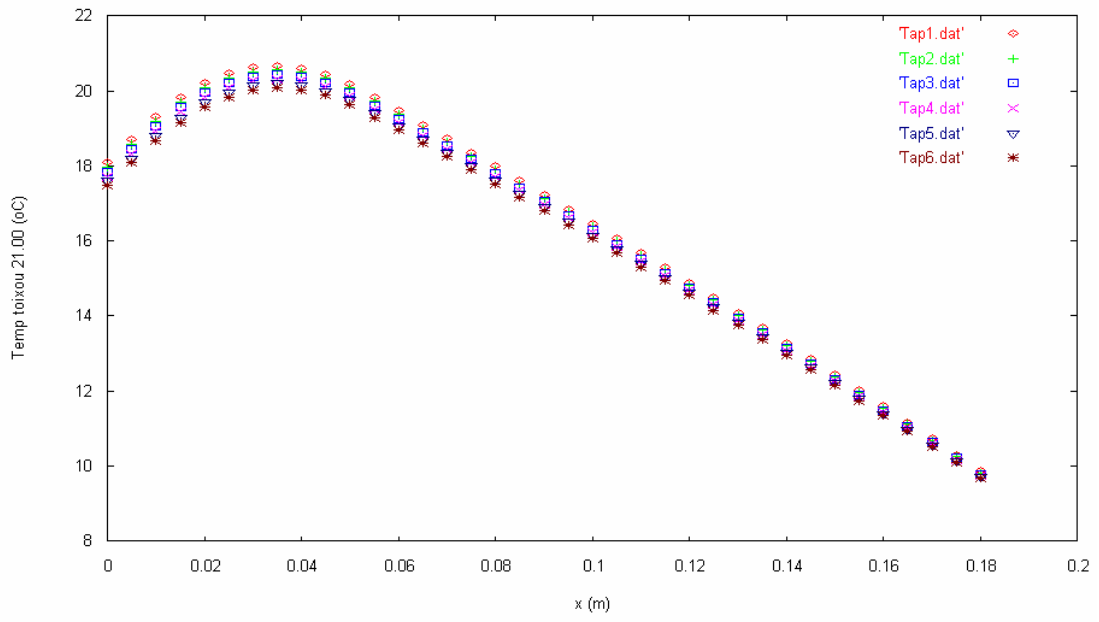


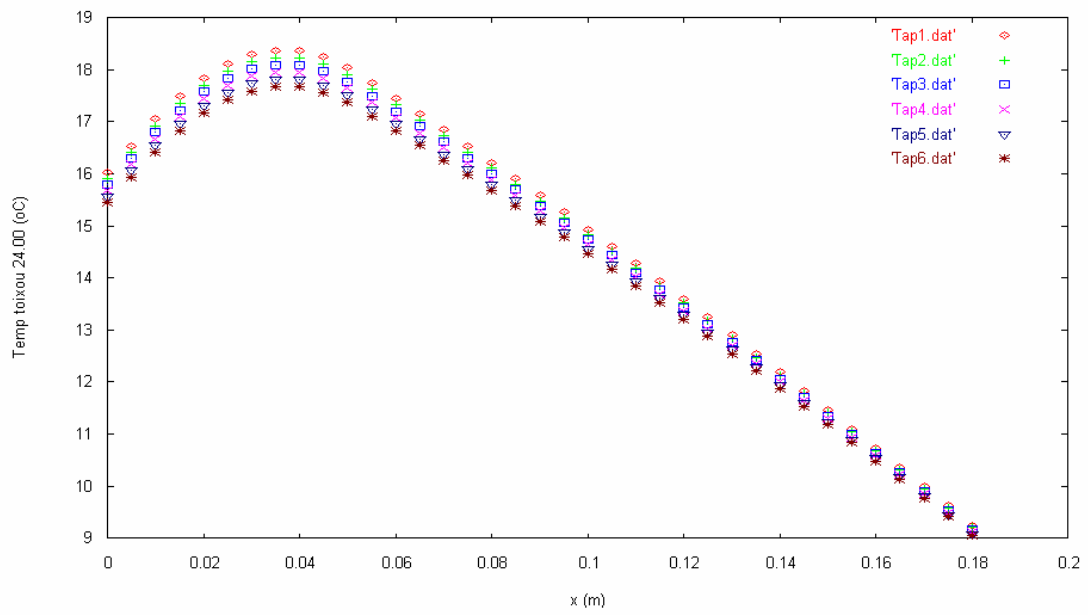
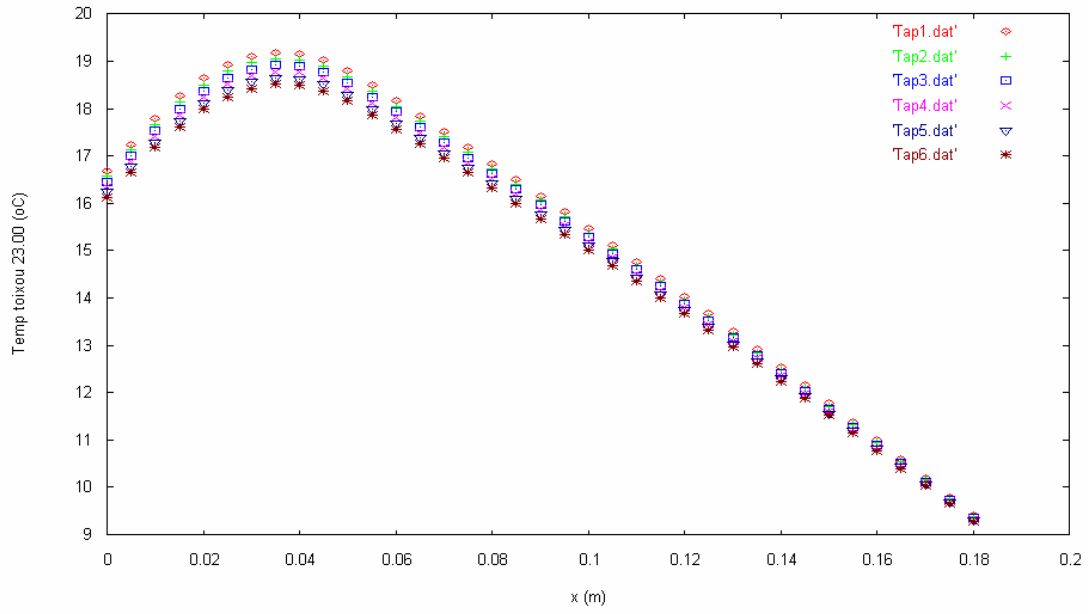


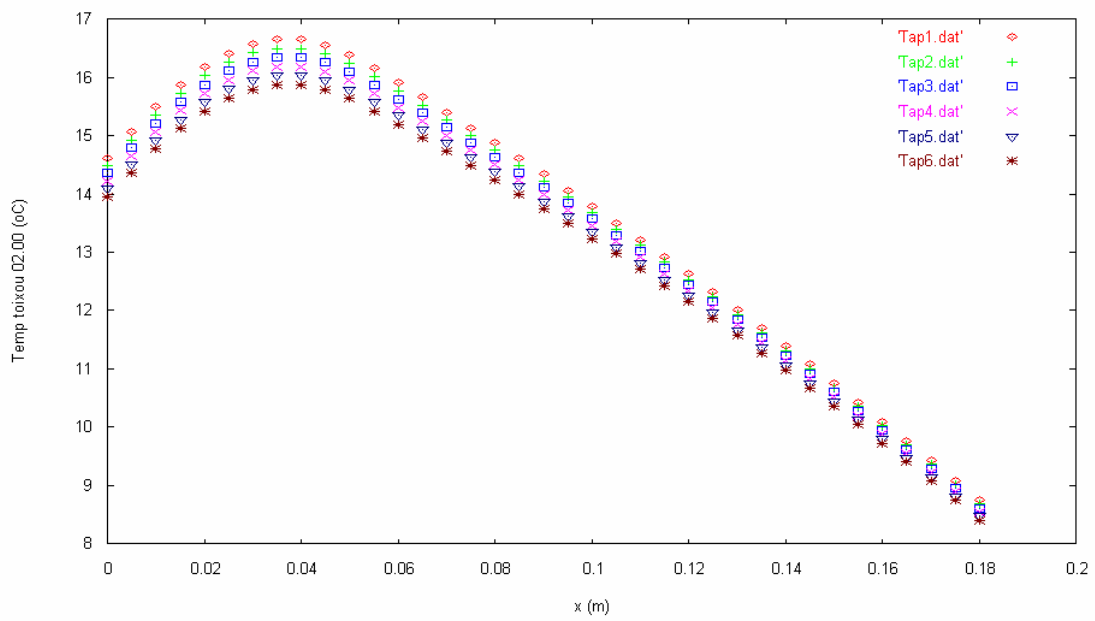
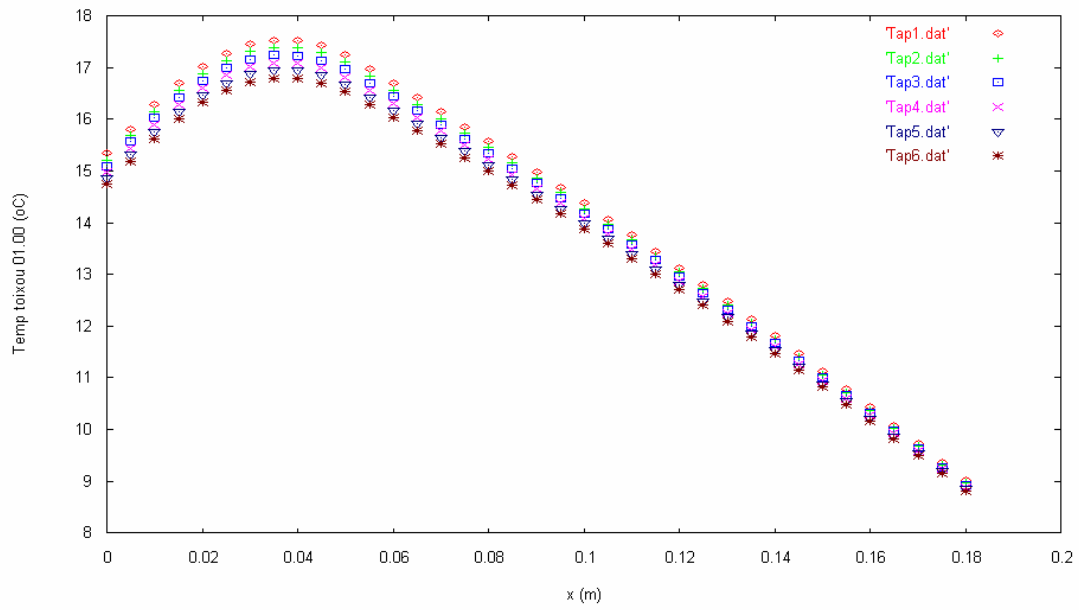


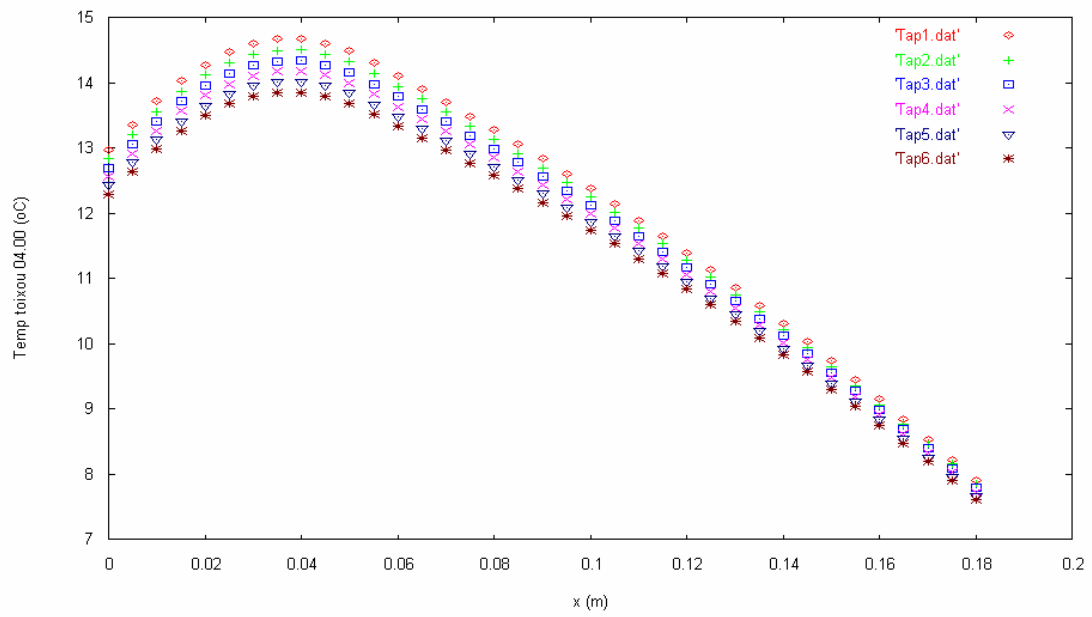
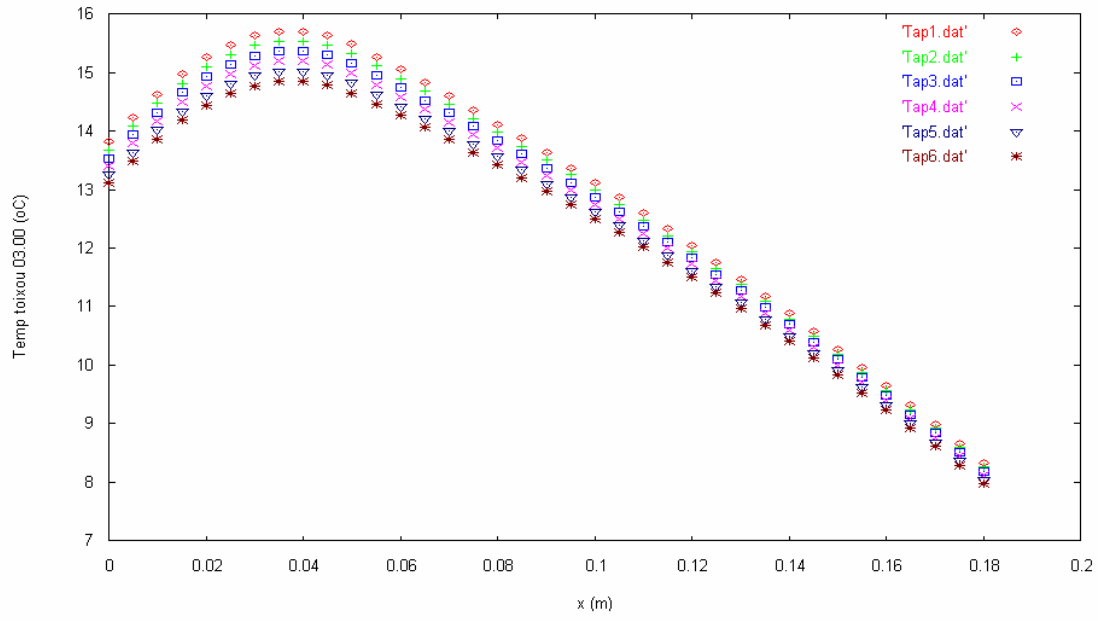


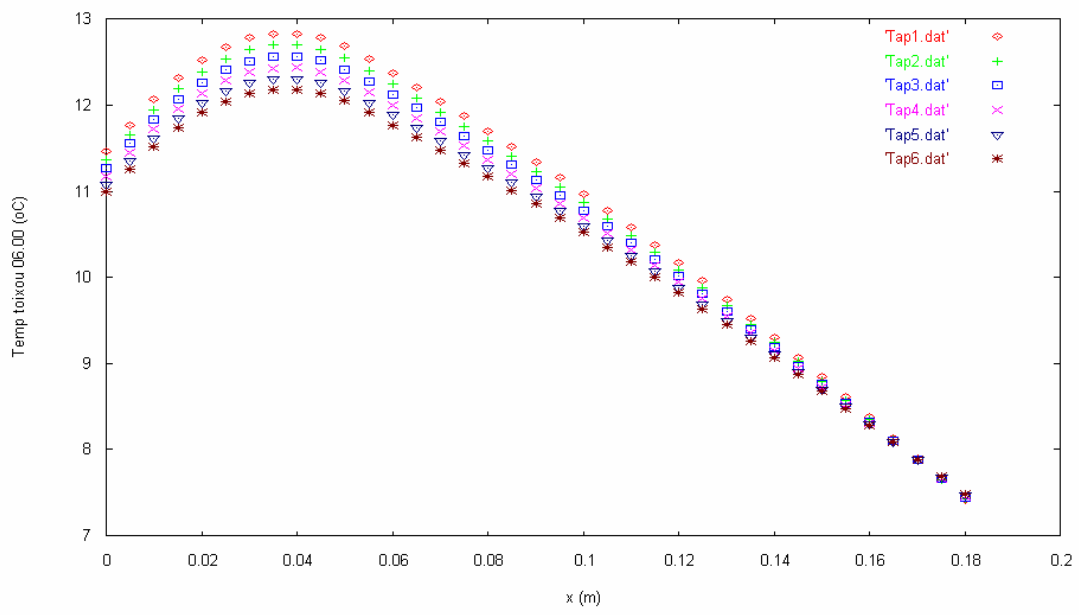
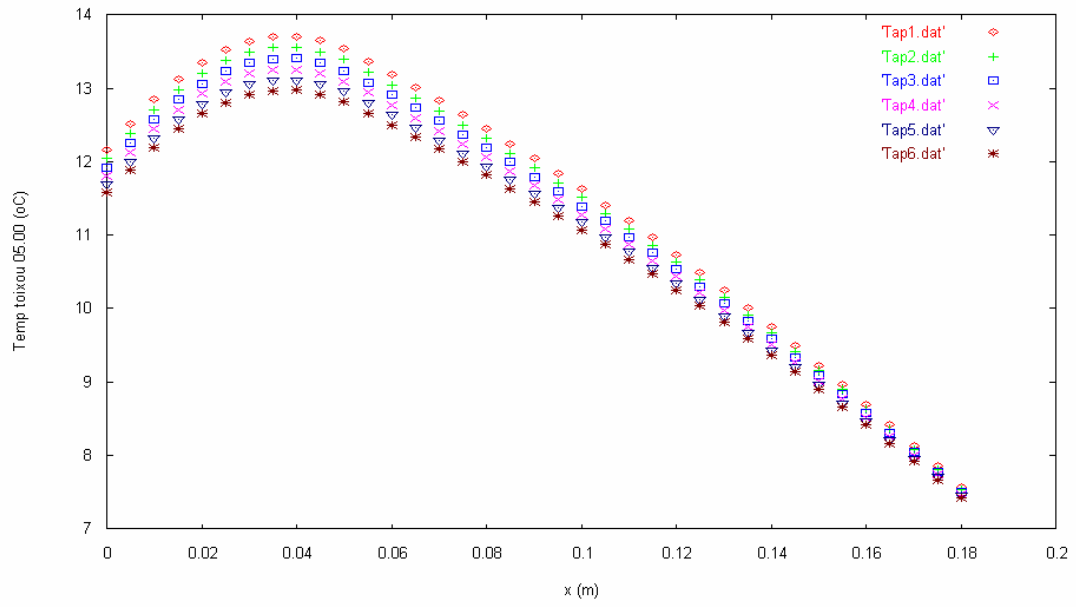




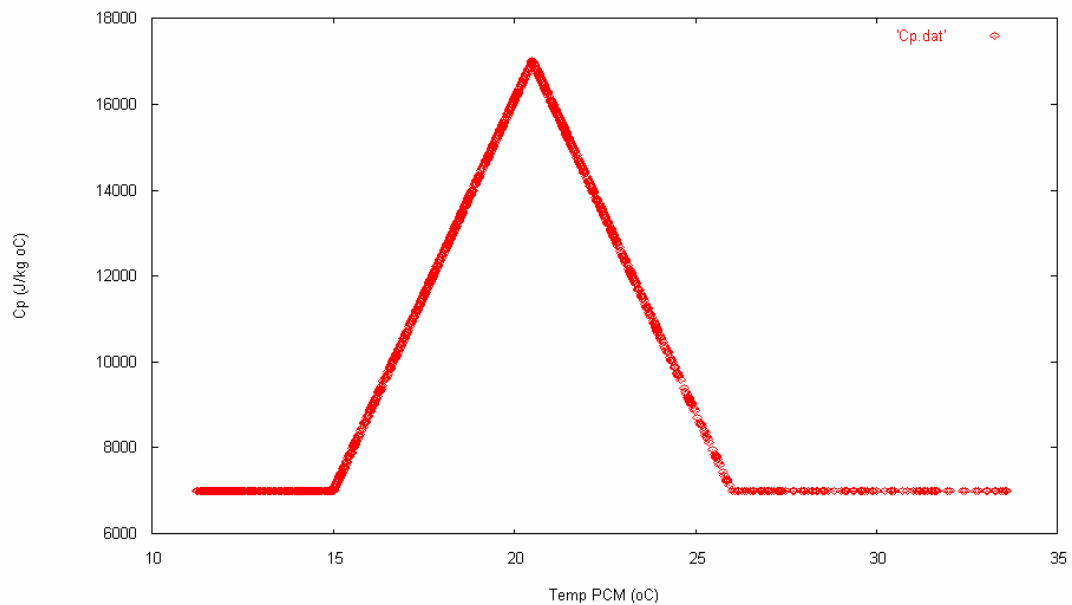








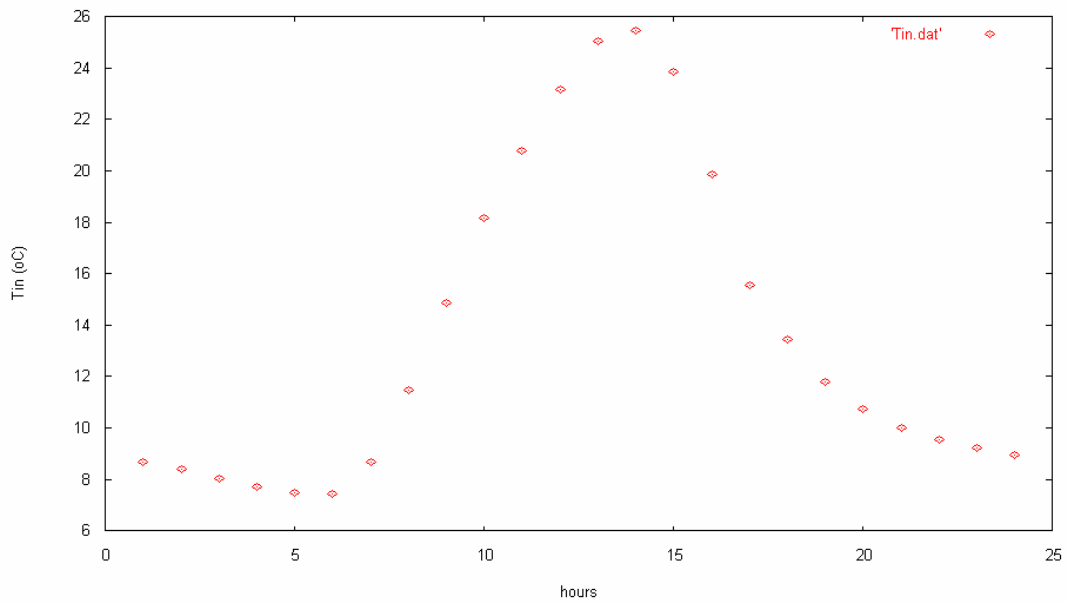
Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM συναρτήσει της θερμοκρασίας του



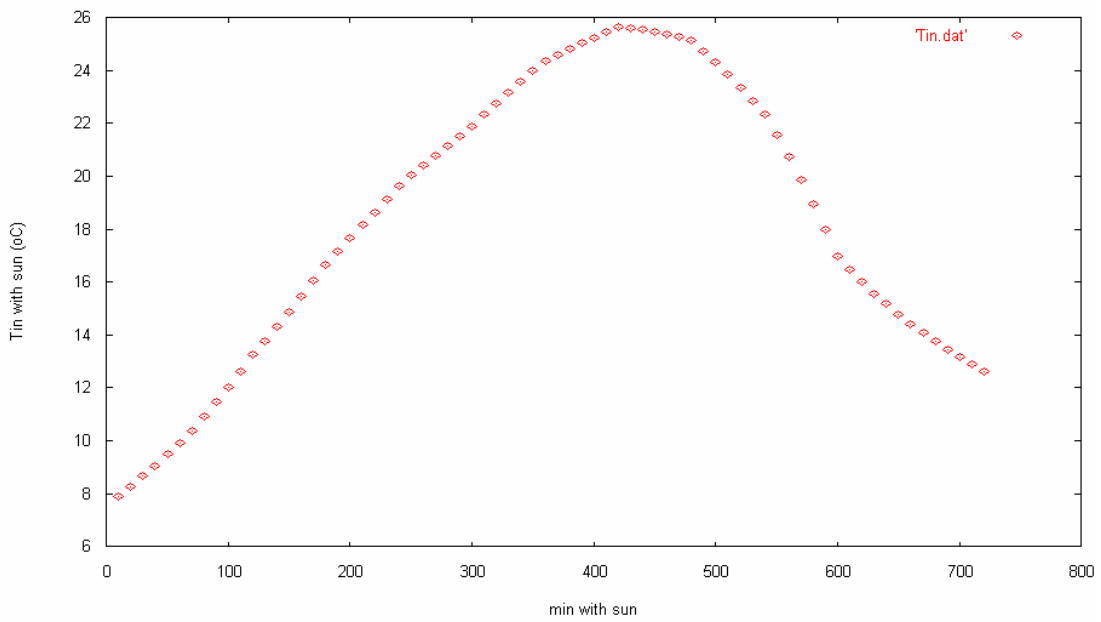
Εικόνα 115: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM συναρτήσει της θερμοκρασίας του

16.5.3. Παρουσίαση των αποτελεσμάτων για την δεύτερη παραμετρική μελέτη για τον μήνα Ιανουάριο (σοβάς-τούβλο-μόνωση-τούβλο-σοβάς)

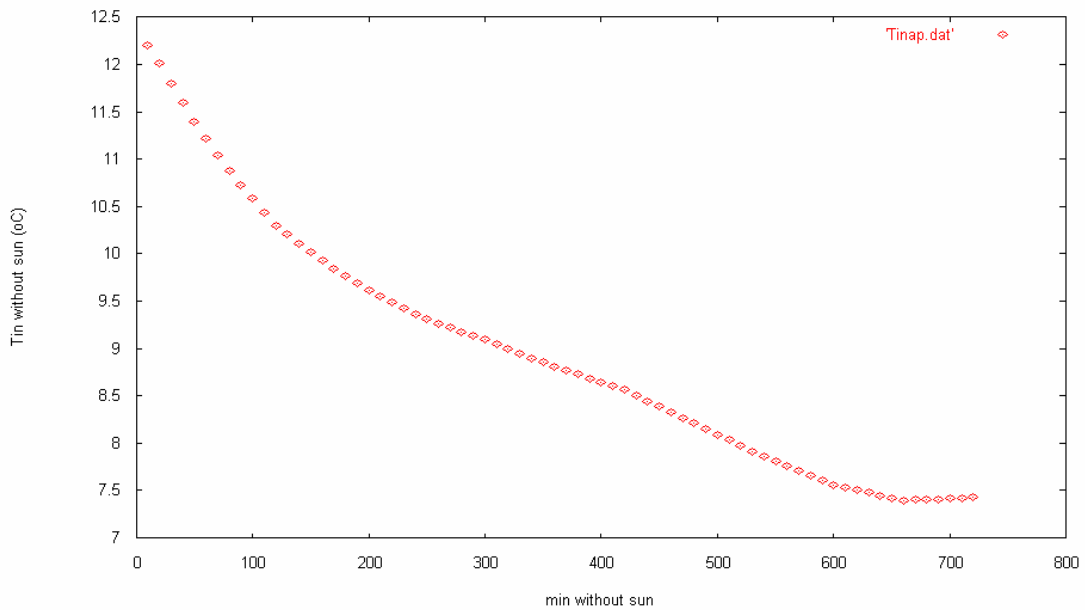
Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου



Εικόνα 116: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου κατά την διάρκεια του 24 ωρου



Εικόνα 117: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου συναρτήσεως των λεπτών κατά την διάρκεια των οποίων υπάρχει ηλιοφάνεια (7.00- 18.00)



Εικόνα 118: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου συναρτήσει των λεπτών κατά την διάρκεια των οποίων δεν υπάρχει ηλιοφάνεια
(19.00-6.00)

Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος του τοίχου κατά την διάρκεια της ημέρας

Η κατανομή των υλικών κατά μήκος του τοίχου x (m) είναι η εξής :

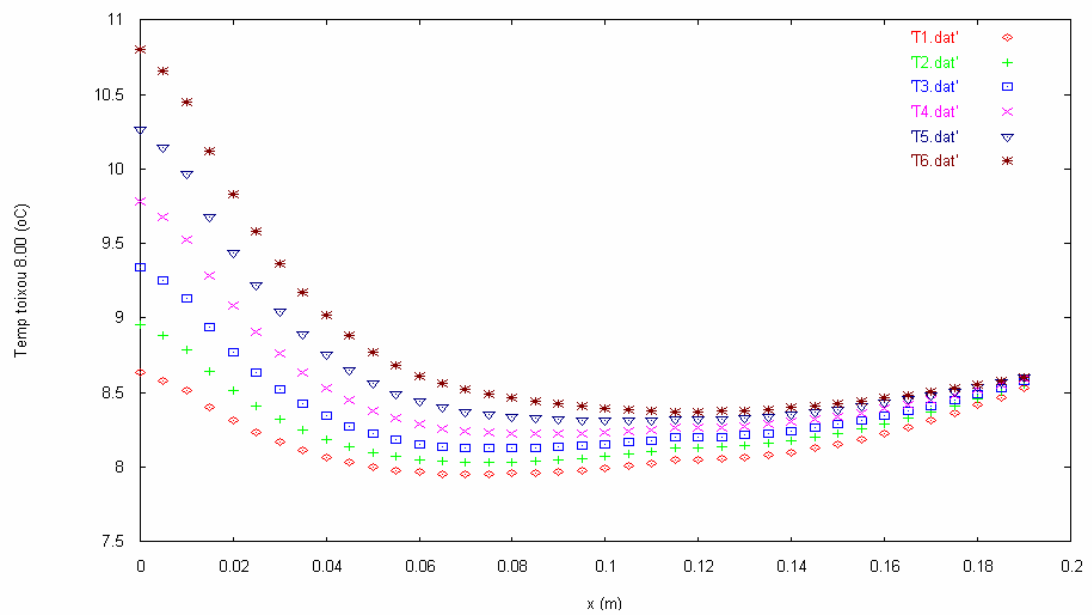
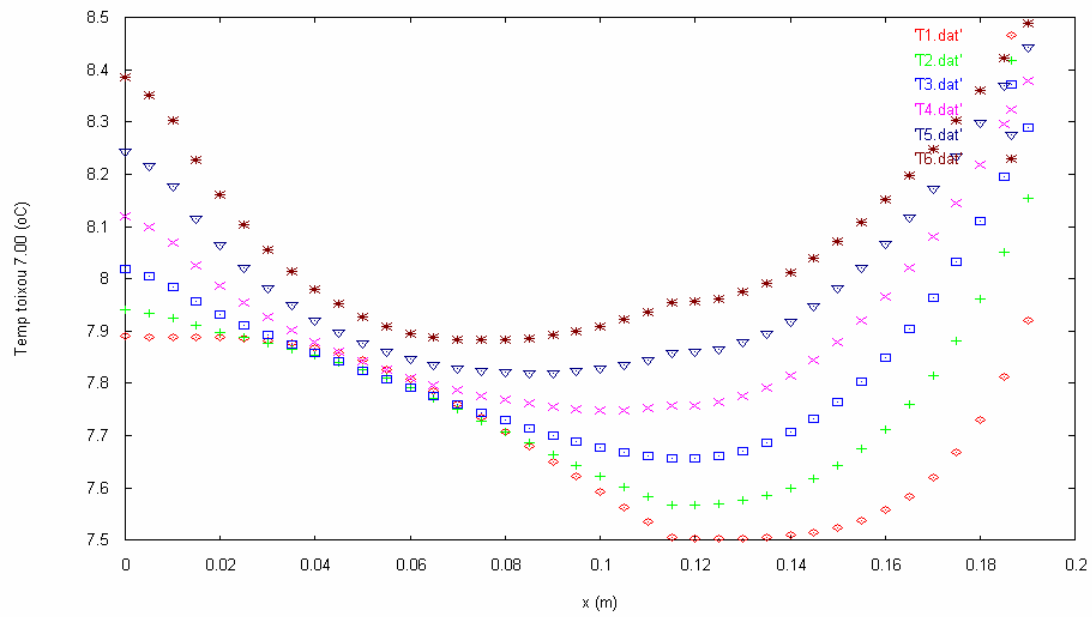
Σοβάς: 0-0.01 m

Τούβλο: 0.01-0.07 m

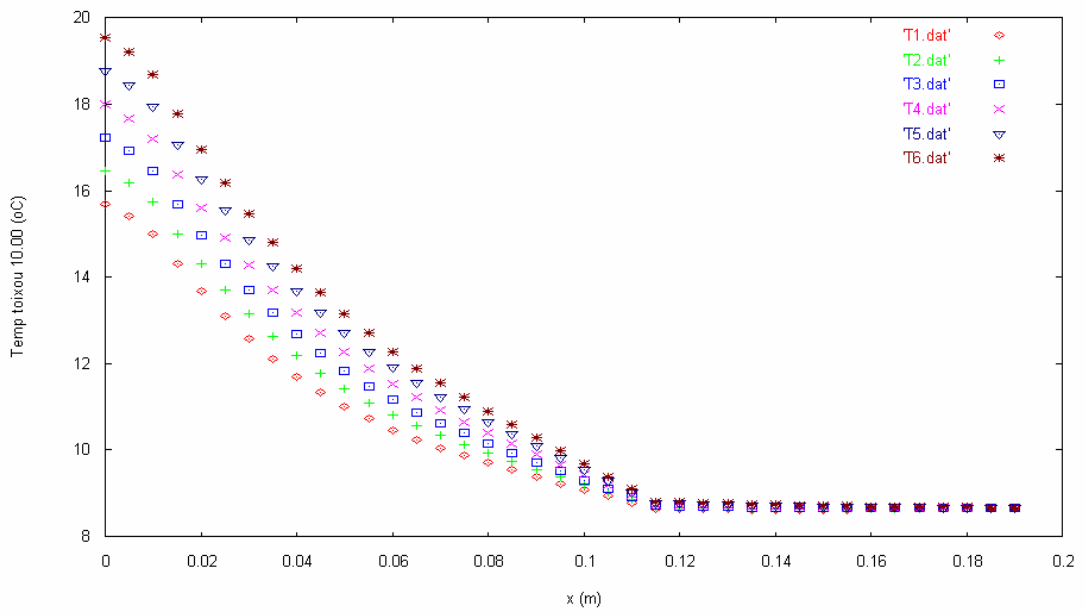
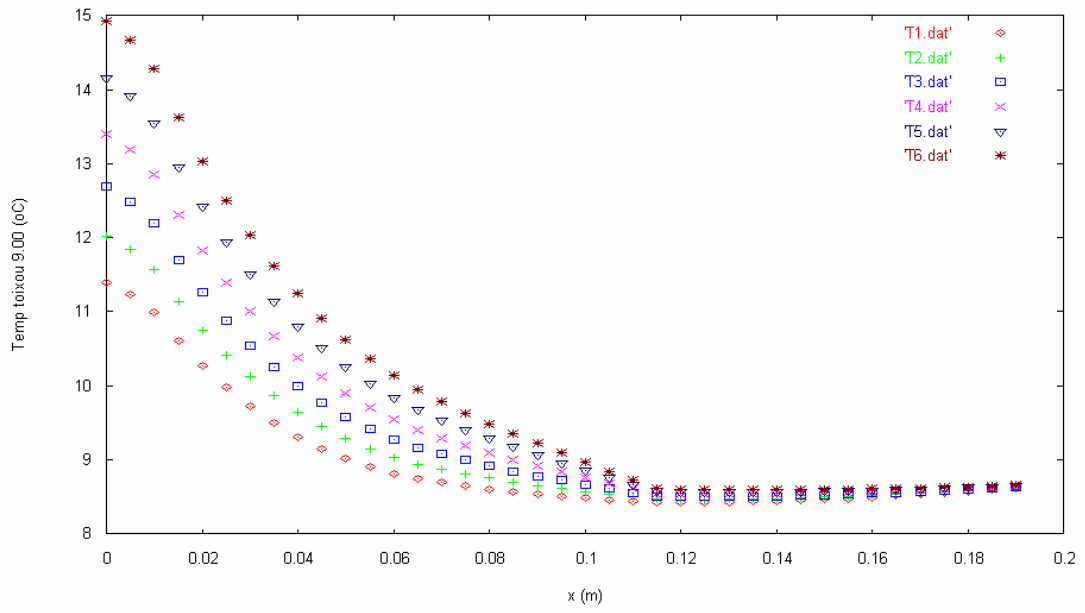
Μόνωση: 0.07-0.12 m

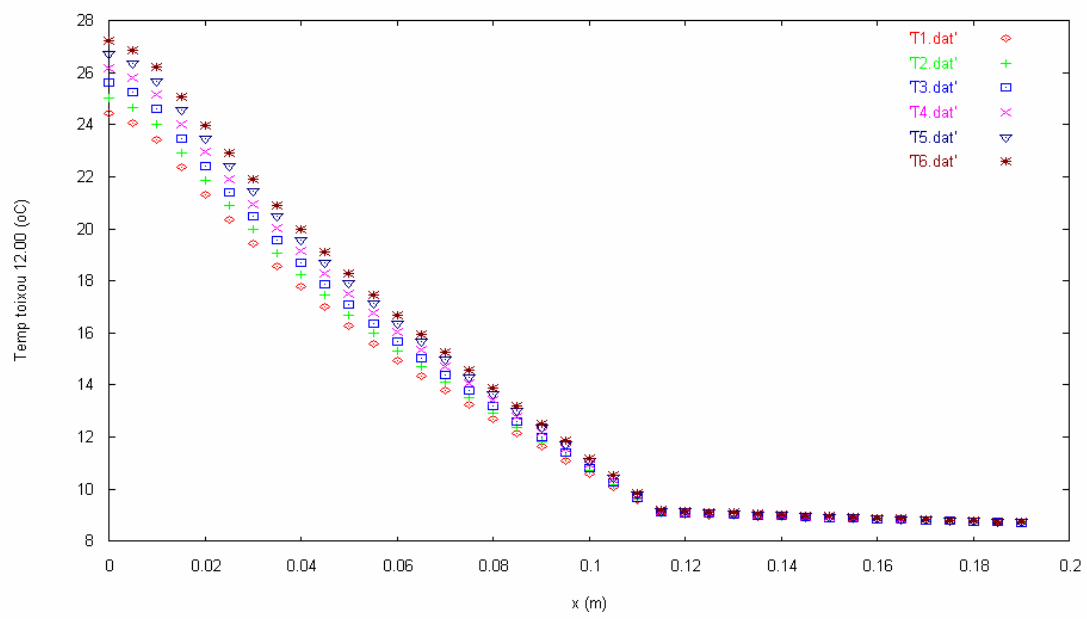
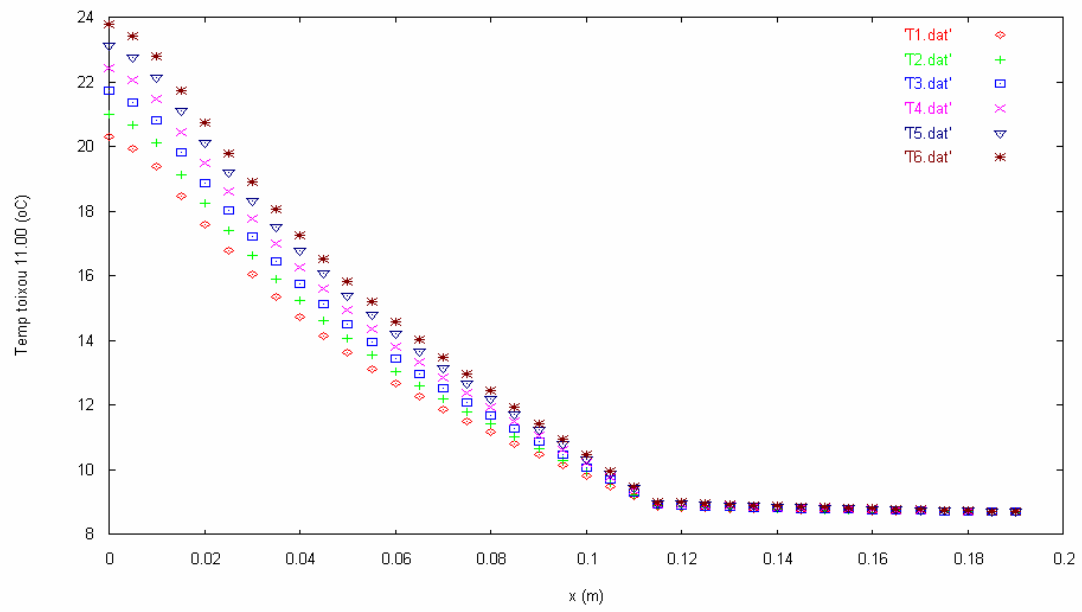
Τούβλο :0.12-0.18 m

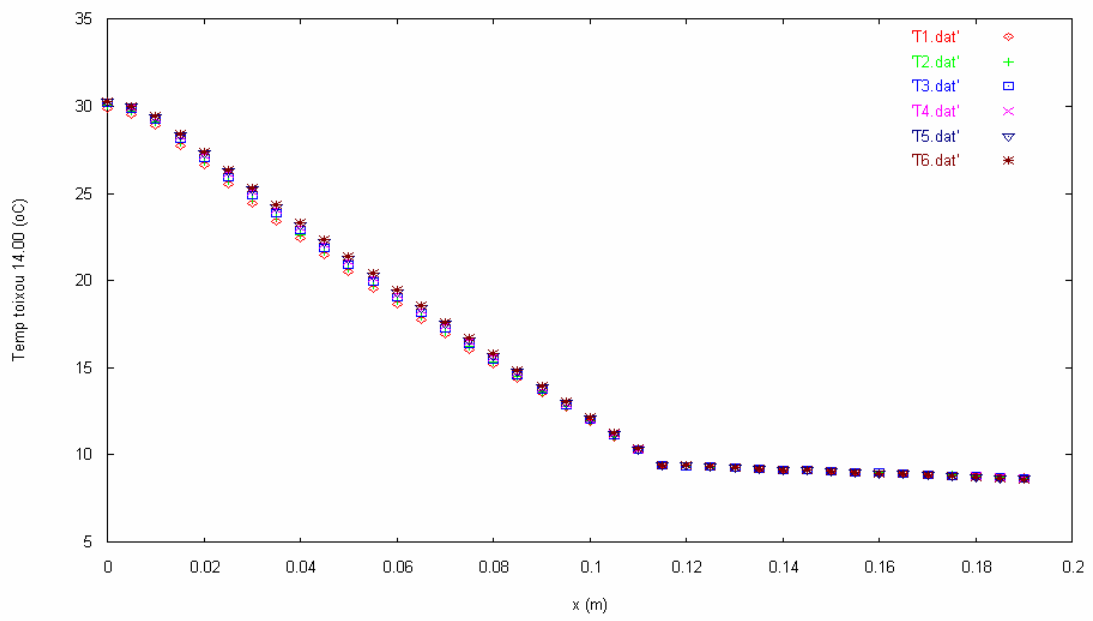
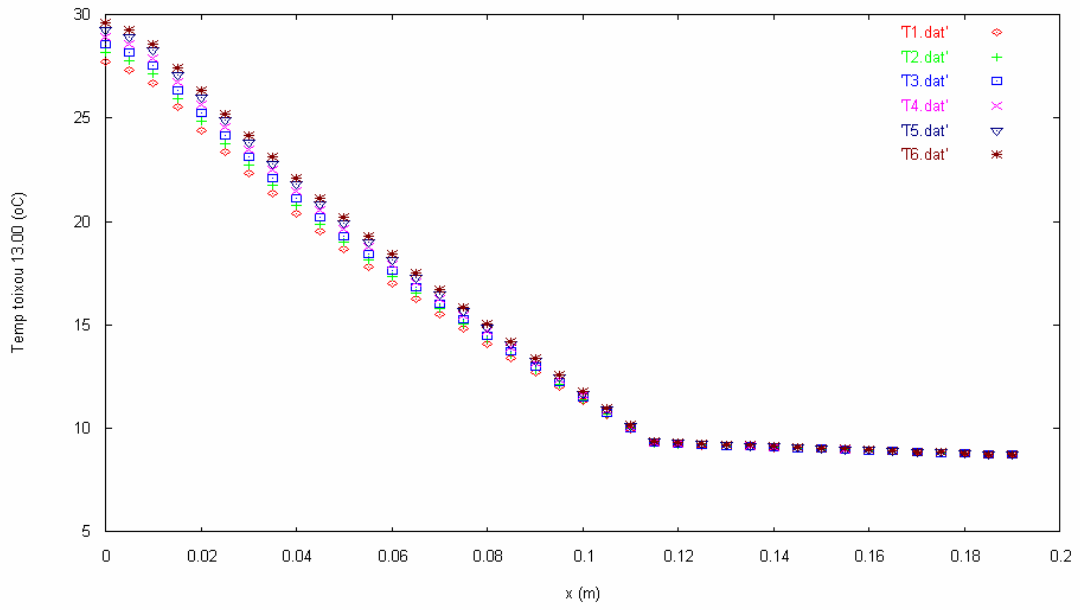
Σοβάς: 0.18-0.19 m

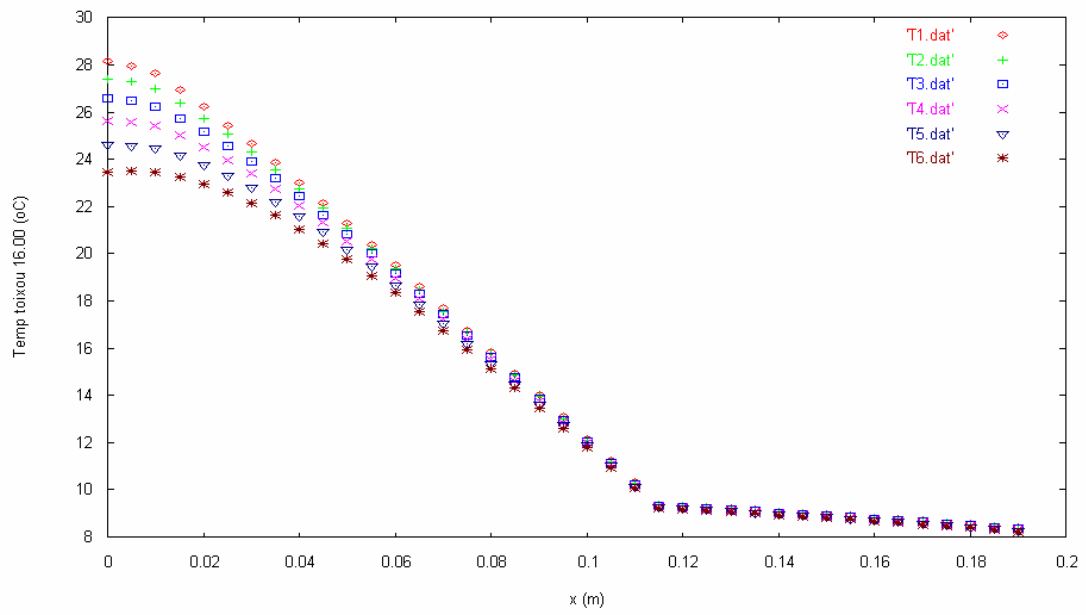
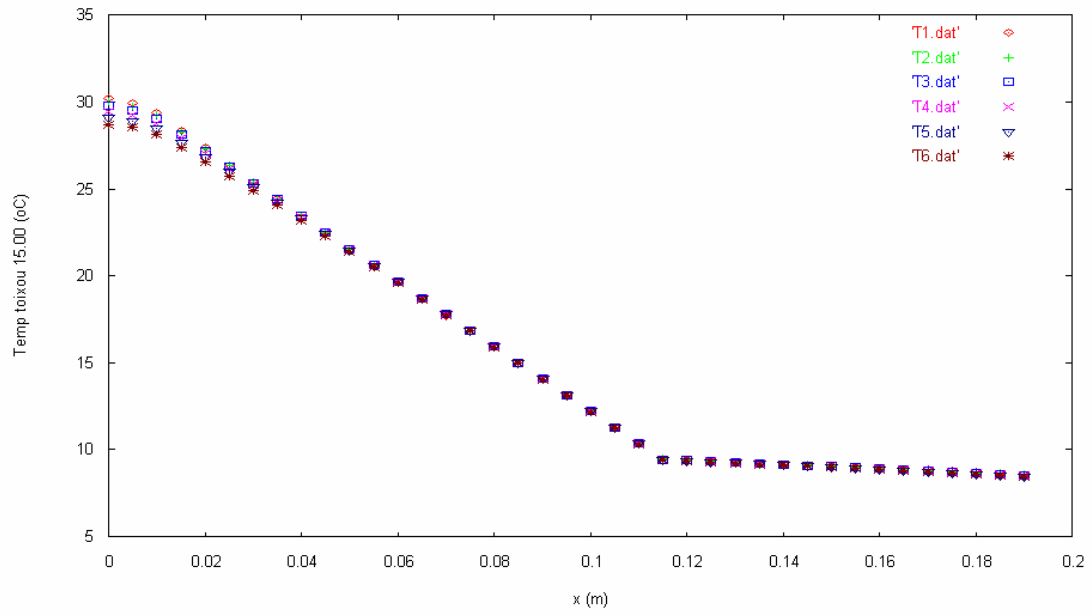


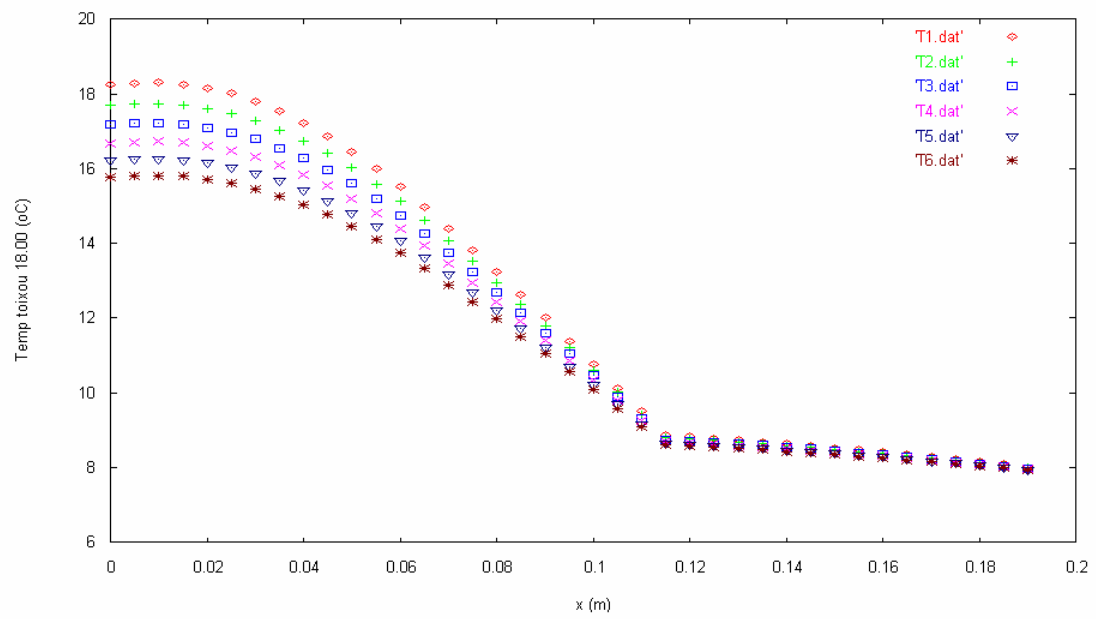
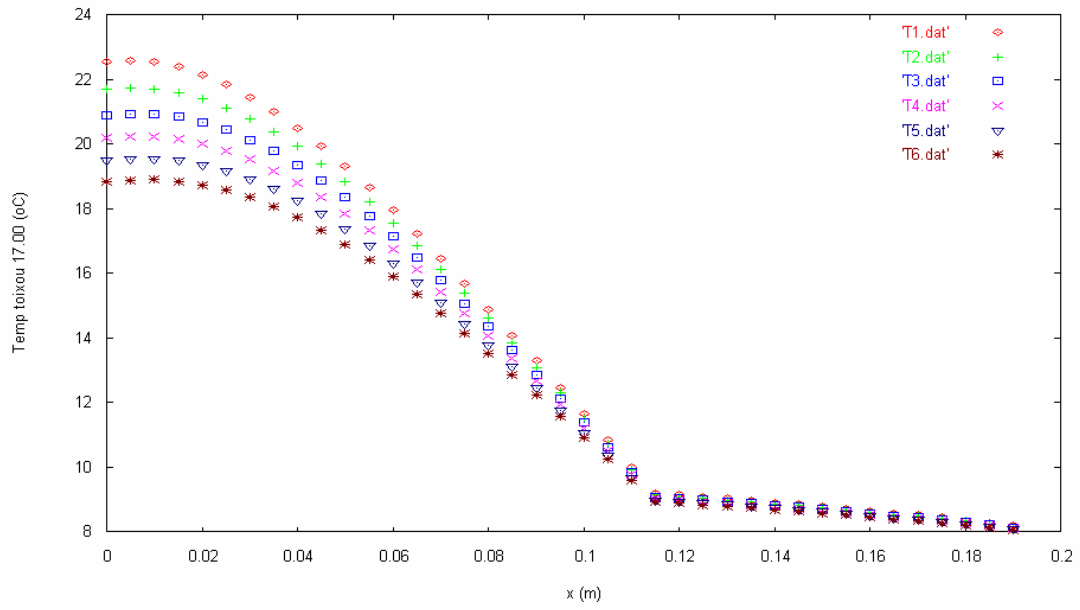
Εικόνα 119: Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος του τοίχου κατά την διάρκεια του 24 ωρου, ακολουθούν τα διαγράμματα των υπόλοιπων ωρών

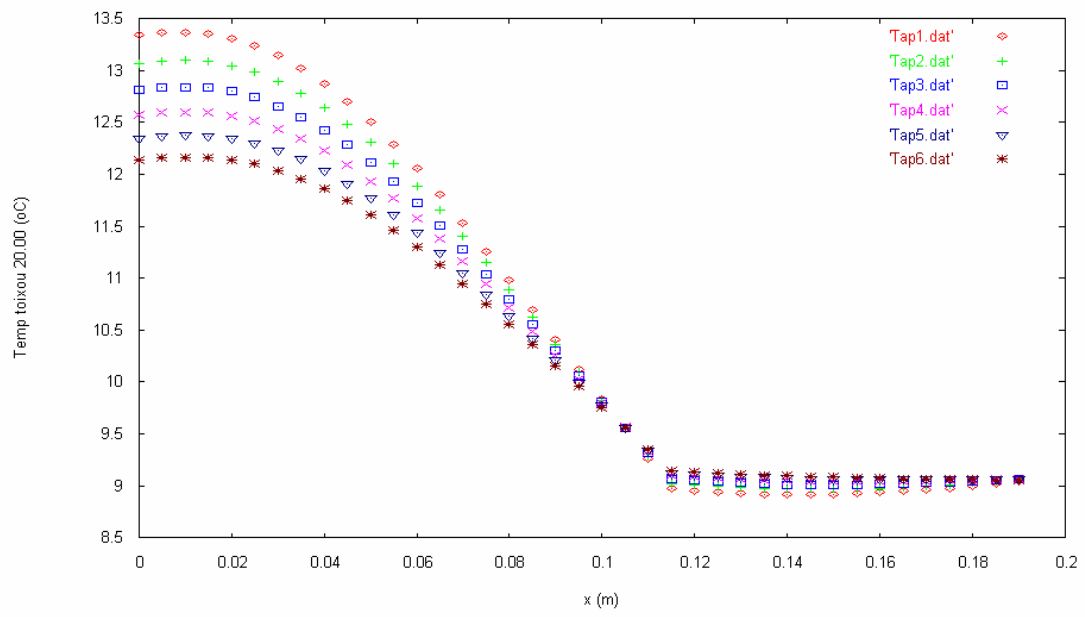
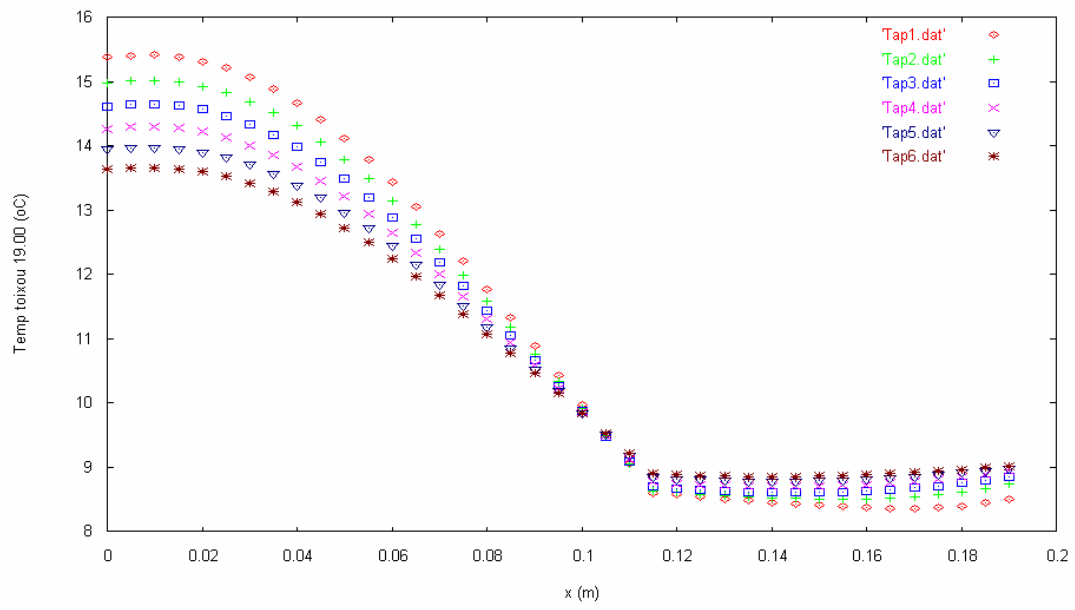


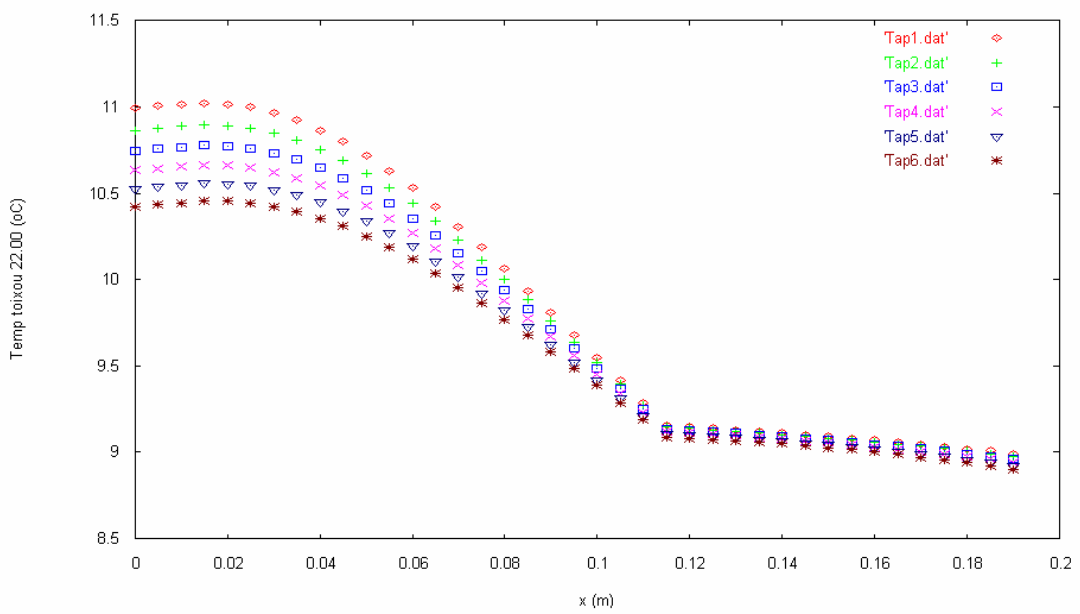
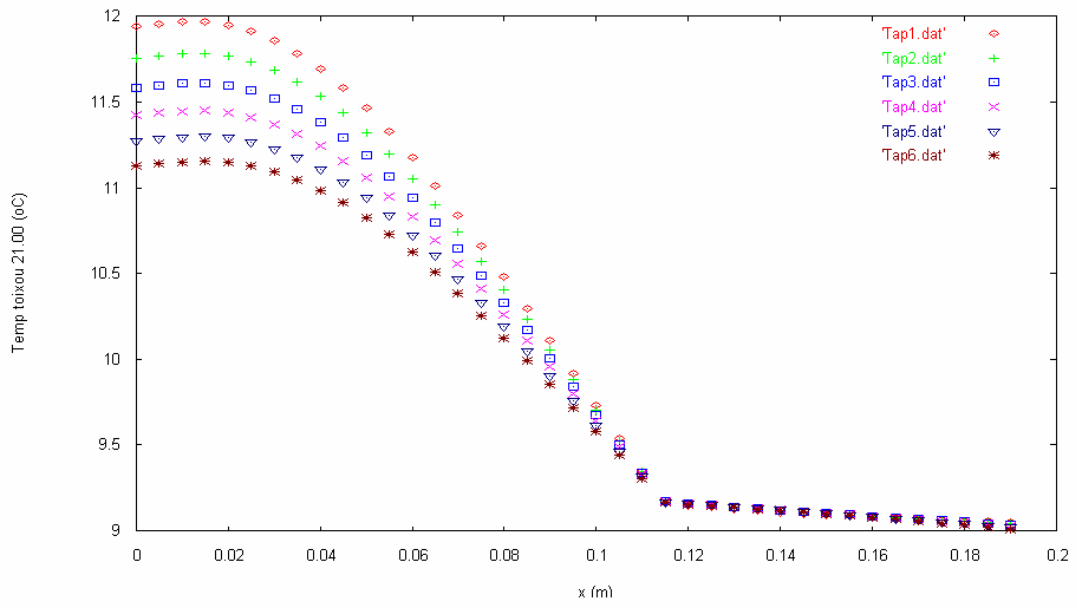


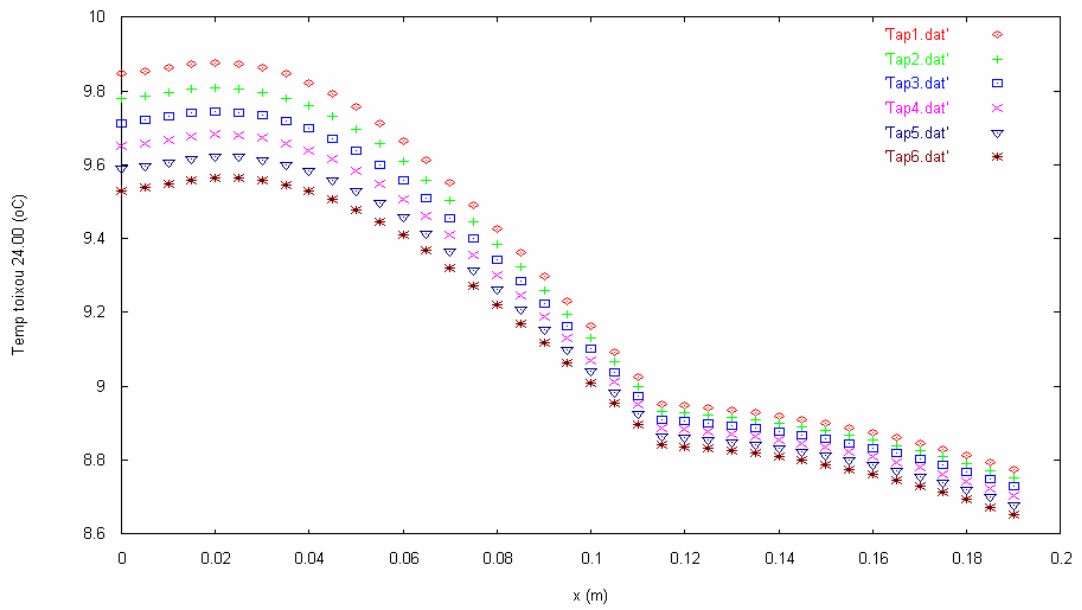
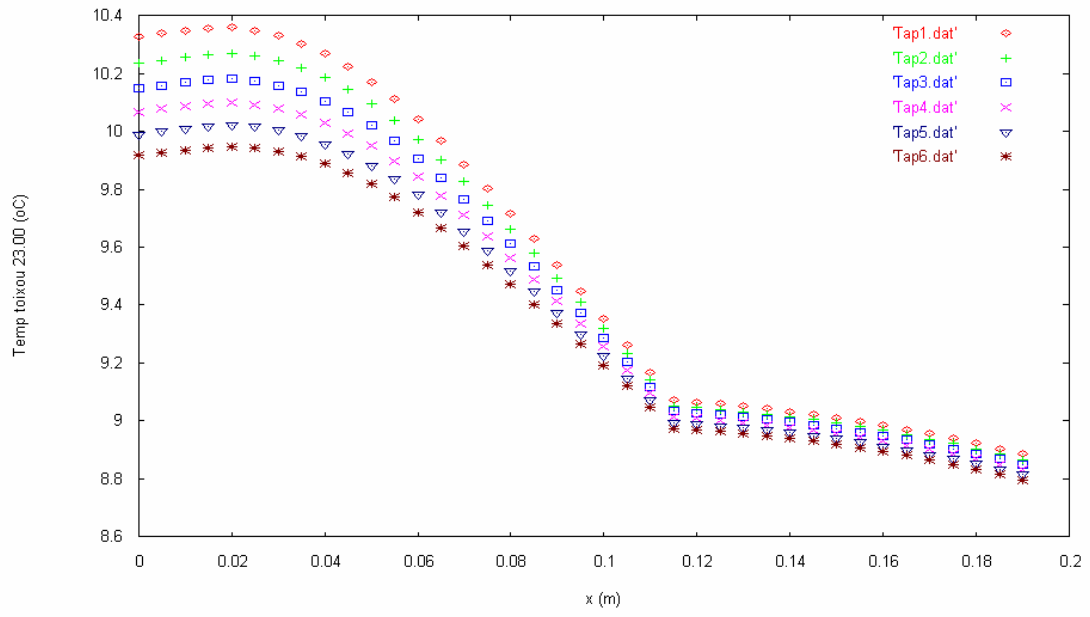


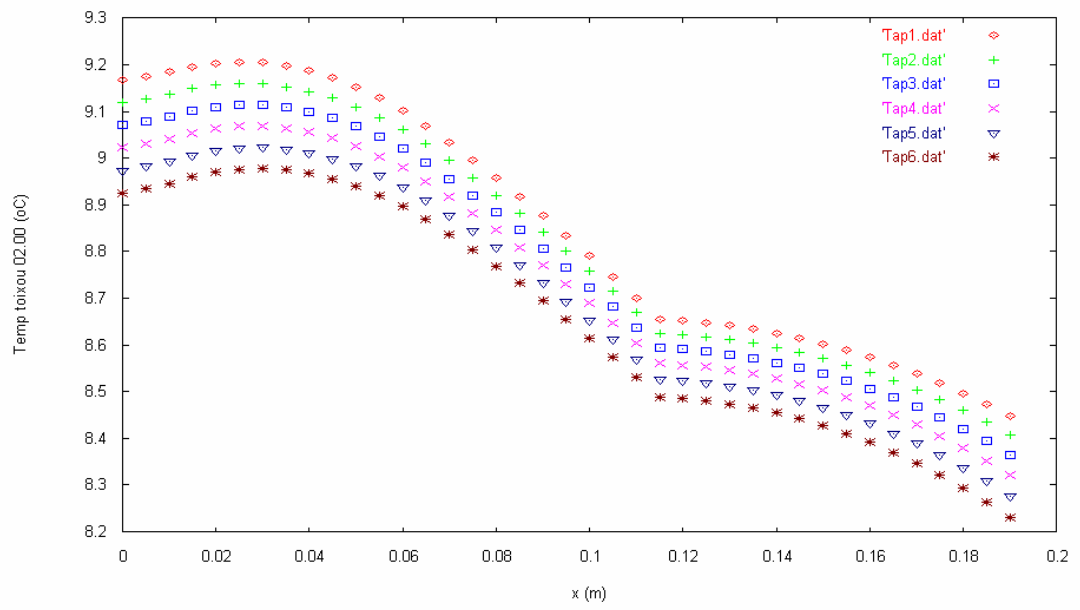
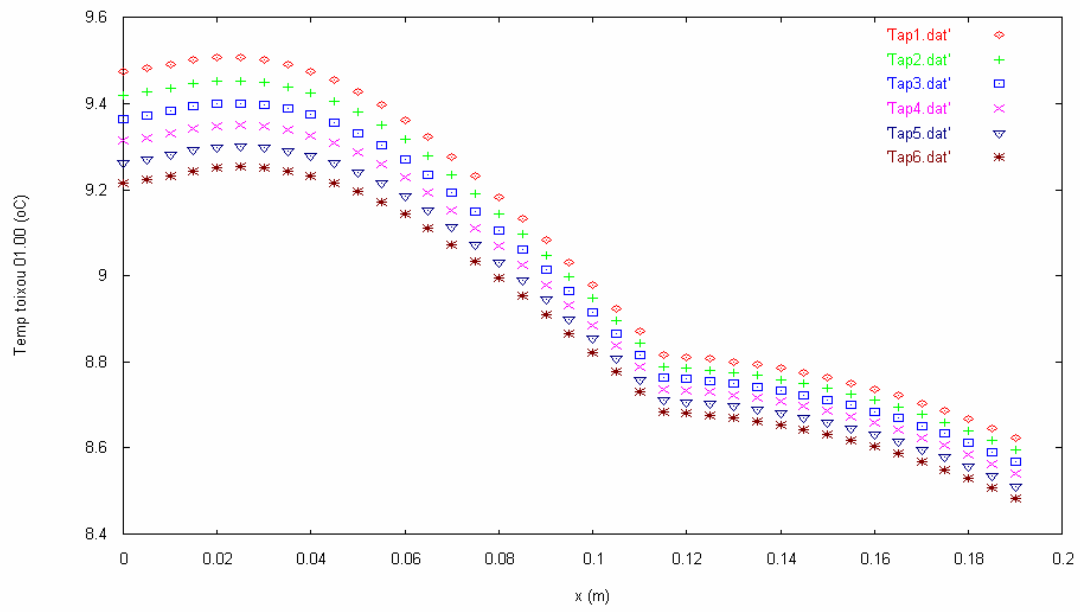


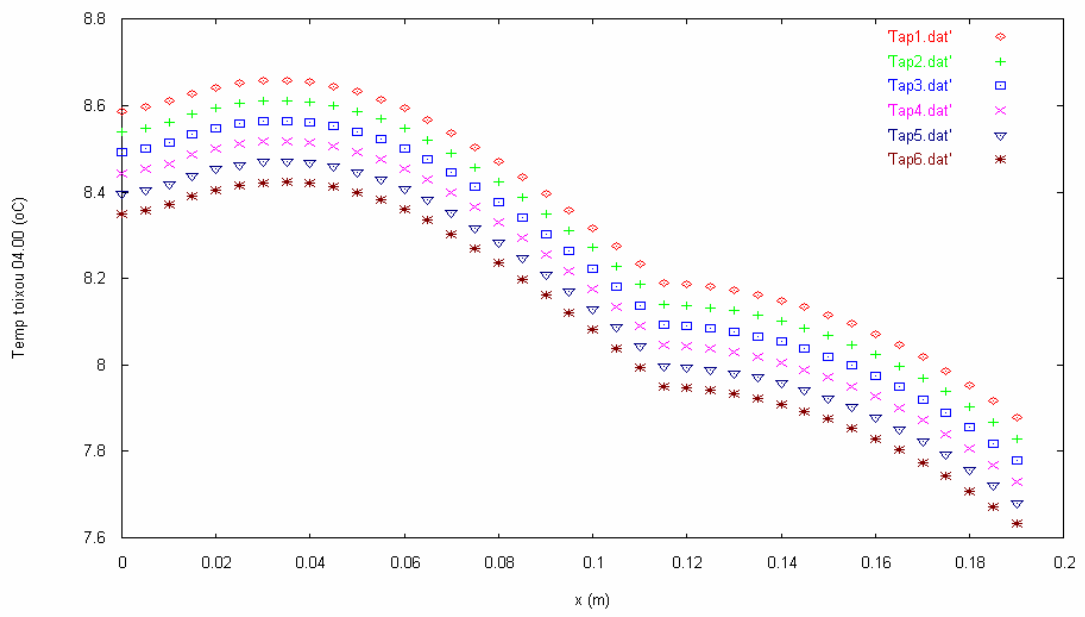
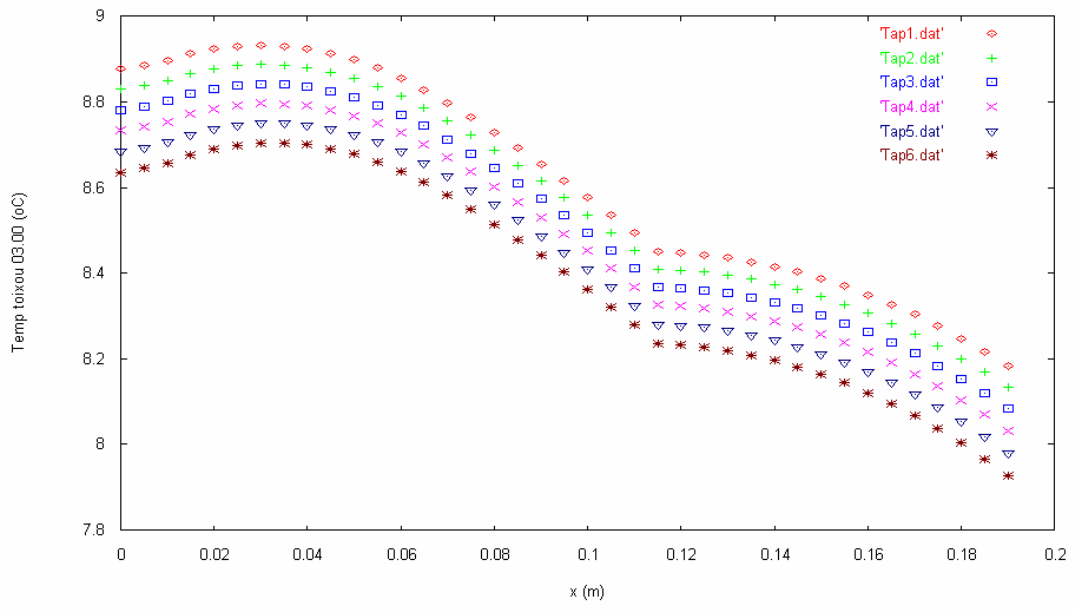


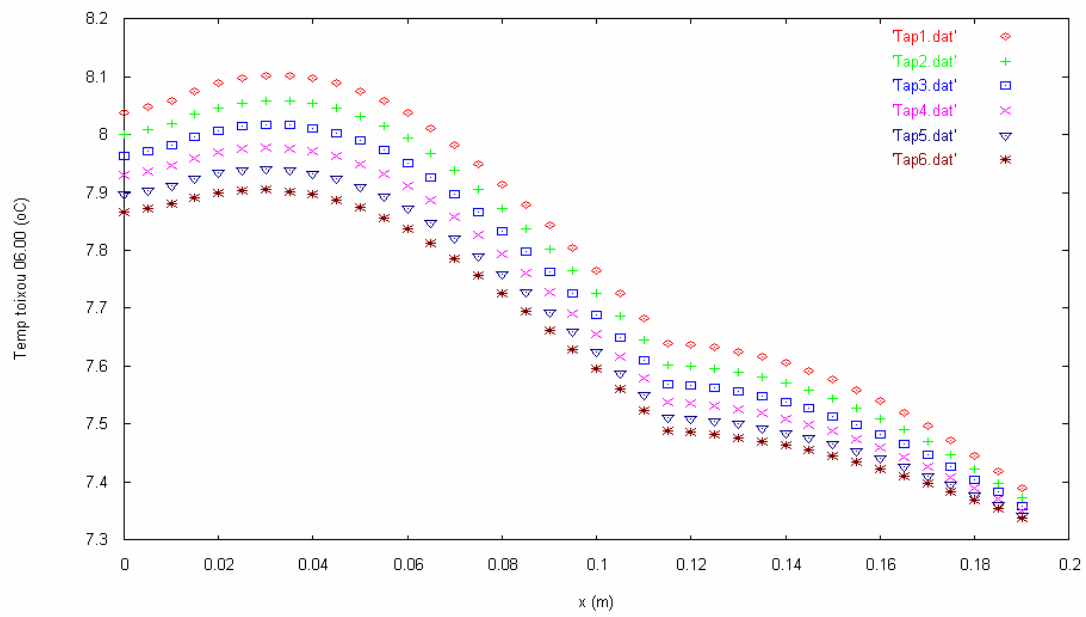
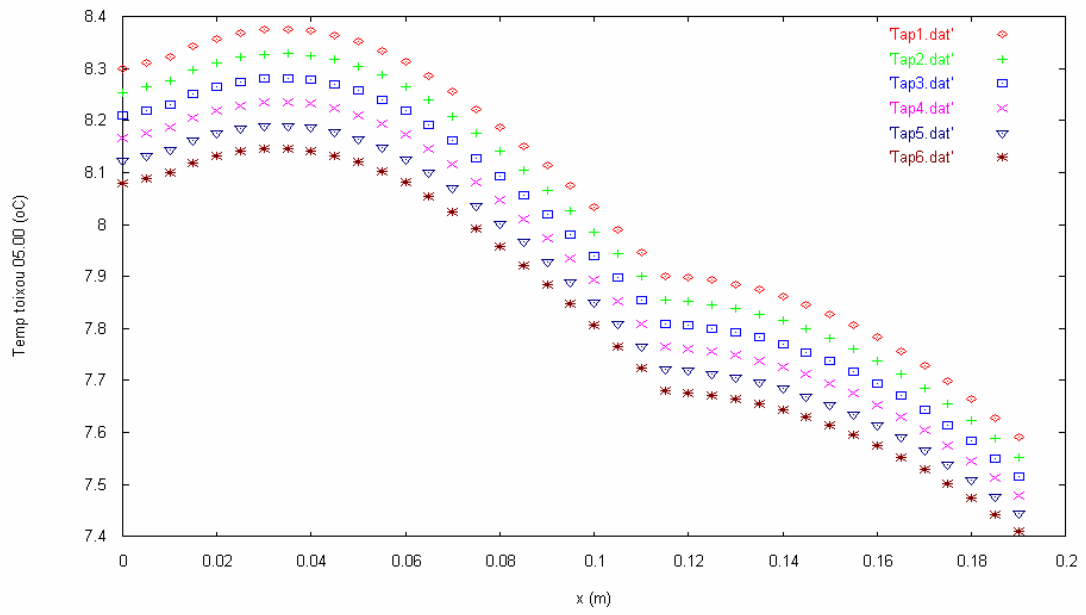












16.5.4. Σύγκριση των αποτελεσμάτων και συμπεράσματα για τον μήνα Ιανουάριο

Για τον μήνα Ιανουάριο , το εύρος των τιμών της εσωτερικής θερμοκρασίας στην περίπτωση της κλασσικής κατανομής του τοίχου με PCM είναι περίπου 28.5-13 °C, ενώ για την πρώτη παραμετρική μελέτη το εύρος αυτό αυξάνεται, αν και η μέγιστη θερμοκρασία παραμένει η ίδια, και είναι περίπου 28-10 °C. Φυσικά, η επίδραση της ύπαρξης του PCM γίνεται αισθητή εάν μελετήσουμε τα αποτελέσματα που προκύπτουν για την κλασσική διάταξη του τοίχου χωρίς το PCM. Τότε, το θερμοκρασιακό εύρος της εσωτερικής θερμοκρασίας είναι 26-8 °C, το οποίο αν και είναι το ίδιο με αυτό της πρώτης παραμετρικής μελέτης, αντιστοιχεί σε πολύ μικρότερες θερμοκρασίες.

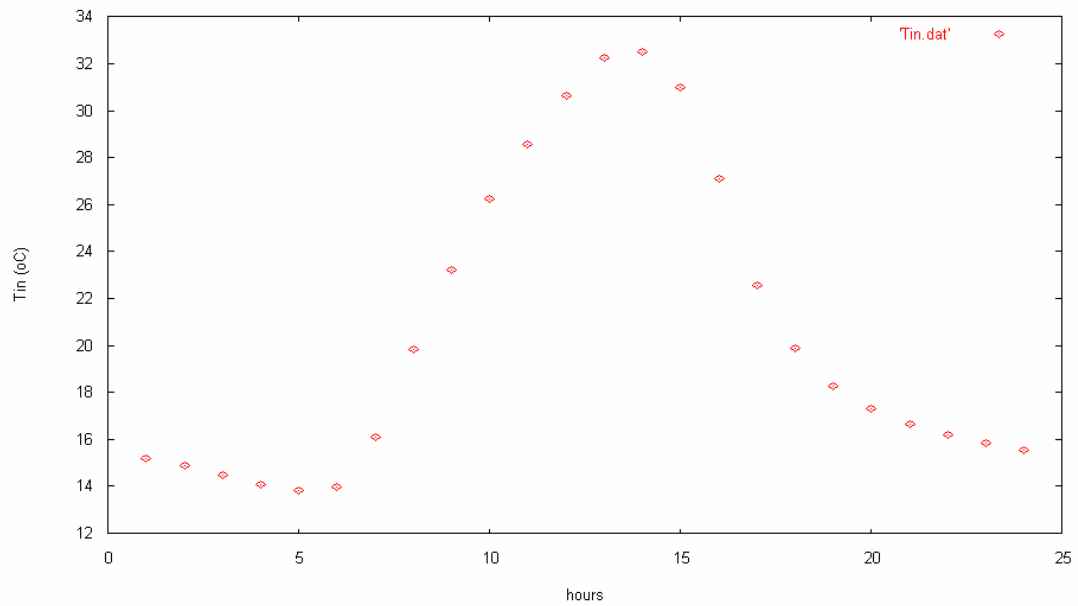
Σε ότι αφορά στις θερμοκρασίες κατά μήκος του τοίχου, αυτές προκύπτουν και πάλι υψηλότερες για την περίπτωση της κλασσικής διάταξης του τοίχου, χαμηλότερες για την πρώτη παραμετρική μελέτη και φυσικά ακόμα χαμηλότερες για την δεύτερη παραμετρική μελέτη, οπότε και δεν χρησιμοποιείται υλικό αλλαγής φάσης. Και πάλι η κατανομή των θερμοκρασιών είναι πολύ πιο έντονη στην πρώτη παραμετρική μελέτη όπου το PCM βρίσκεται πιο κοντά στο εσωτερικό του δωματίου, ενώ στην κλασσική διάταξη του τοίχου οι θερμοκρασίες μέσα στο PCM είναι κατανεμημένες πιο ομοιόμορφα. Το τελευταίο είναι και πάλι εμφανές από τα διαγράμματα της ειδικής θερμοχωρητικότητας που δίδονται.

Επομένως, σε γενικές γραμμές και για τον μήνα Ιανουάριο, προτιμότερη είναι η κλασσική διάταξη του τοίχου με PCM, προκειμένου να θερμανθεί το δωμάτιο, μειώνοντας παράλληλα , κατά το δυνατόν, την θερμοκρασιακή του διακύμανση μέσα στην ημέρα.

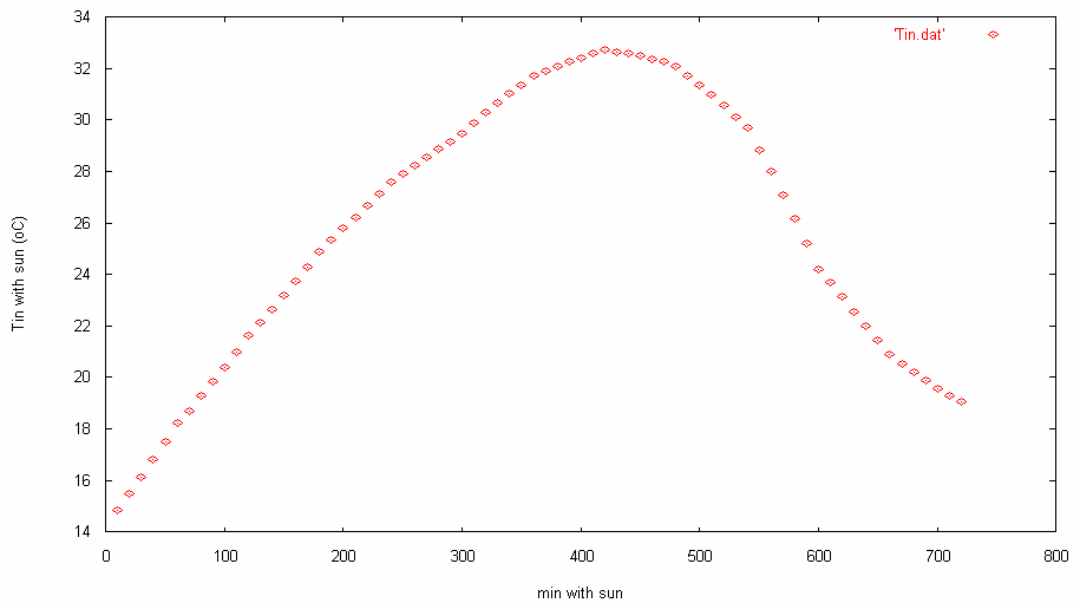
16.6 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων και των συμπερασμάτων που προκύπτουν από την μελέτη για τον μήνα Φεβρουάριο

16.6.1. Παρουσίαση των αποτελεσμάτων για την κλασική διάταξη του τοίχου με PCM για τον μήνα Φεβρουάριο (σοβάς-τούβλο-PCM-μόνωση-τούβλο-σοβάς)

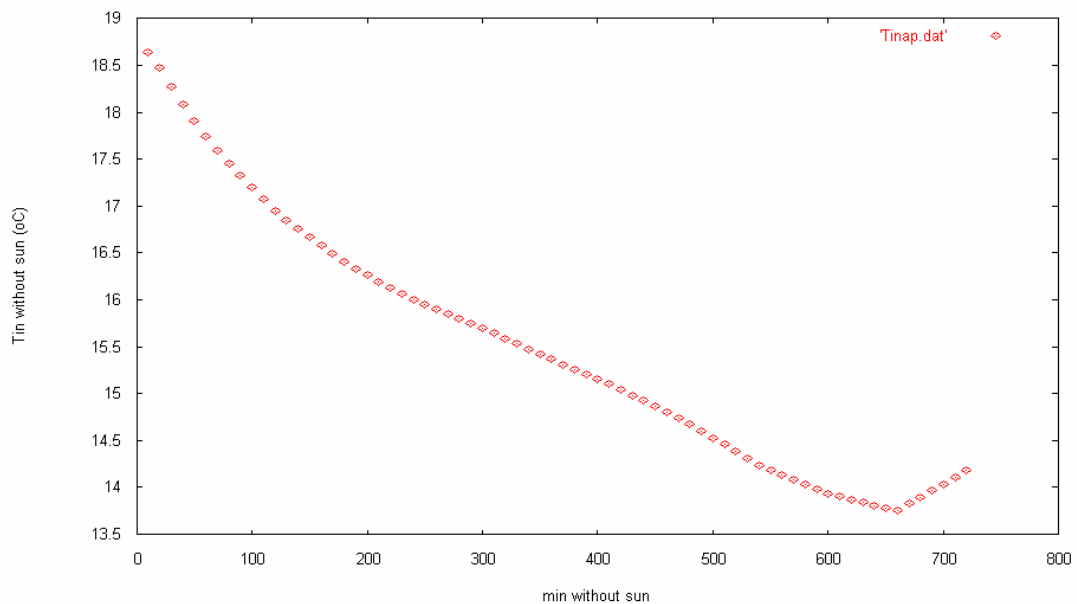
Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου



Εικόνα 120: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου κατά την διάρκεια του 24 ωρου



Εικόνα 121: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου συναρτήσει των λεπτών κατά την διάρκεια των οποίων υπάρχει ηλιοφάνεια (7.00- 18.00)



Εικόνα 122: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου συναρτήσει των λεπτών κατά την διάρκεια των οποίων δεν υπάρχει ηλιοφάνεια (19.00-6.00)

**Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος του τοίχου κατά την διάρκεια
του
24 ωρου**

Η κατανομή των υλικών μέσα στον τοίχο x (m) είναι η εξής:

Σοβάς :0-0.01 m

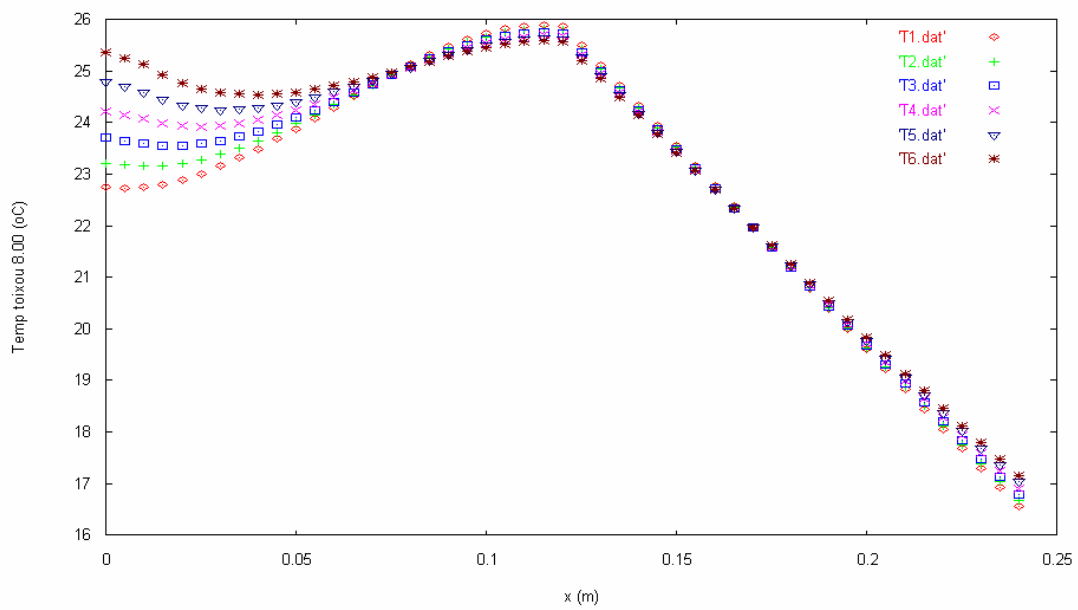
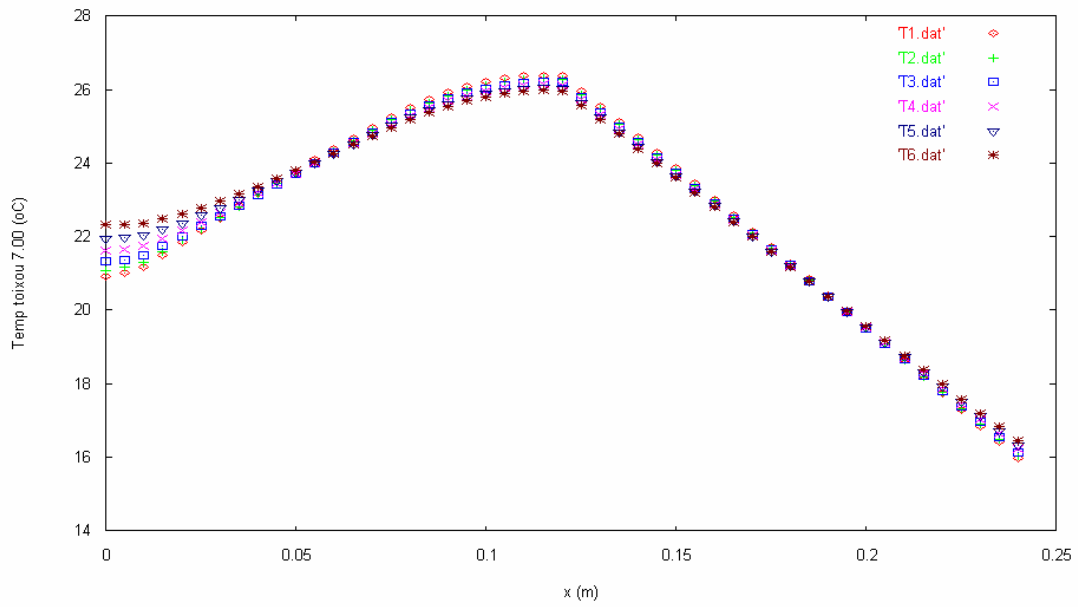
Τούβλο: 0.01-0.07 m

PCM :0.07-0.12 m

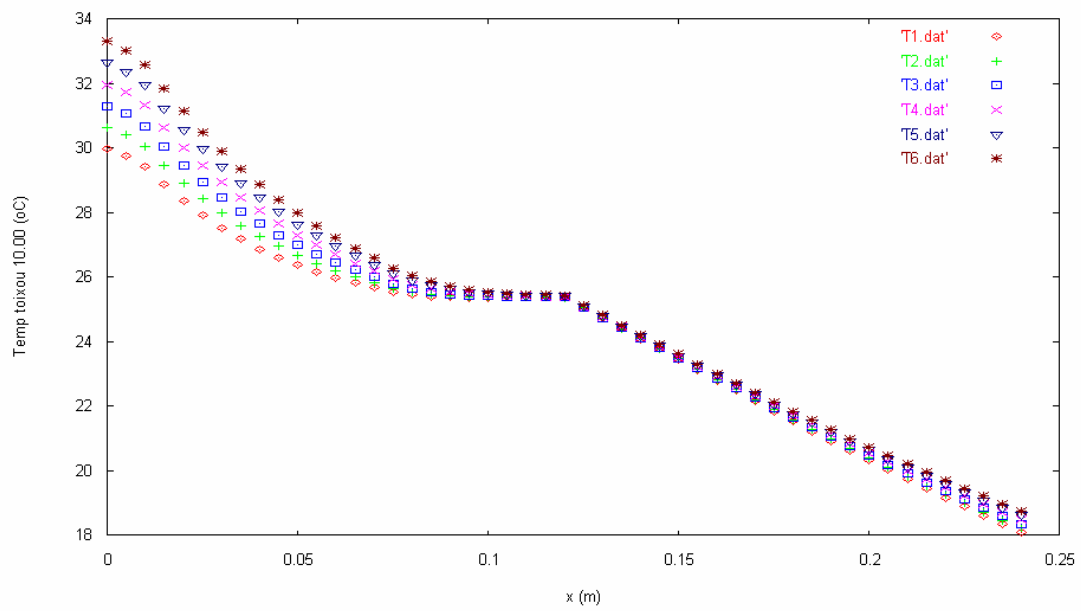
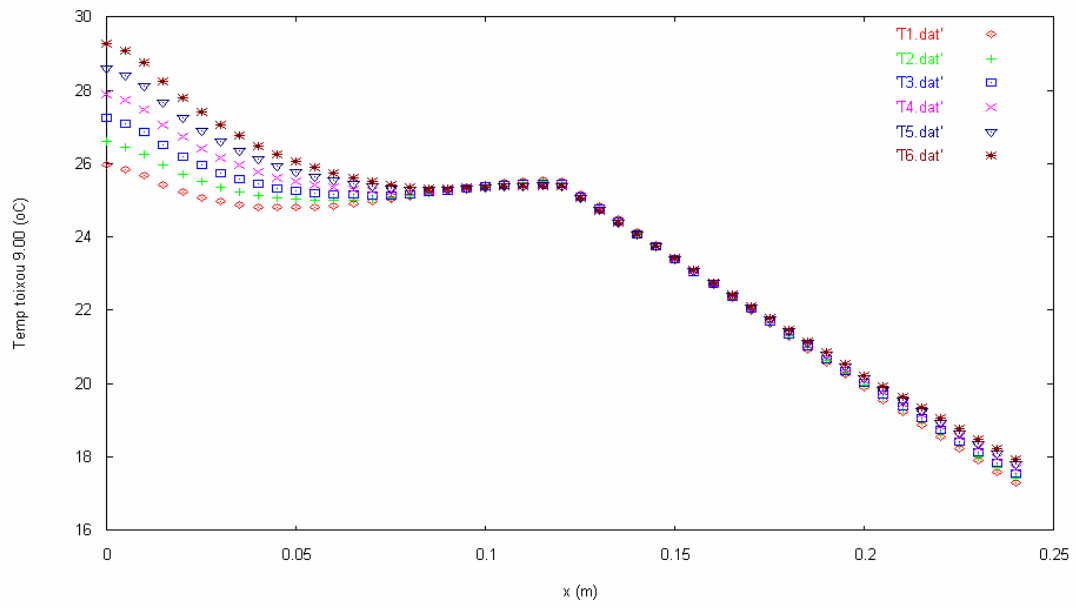
Μόνωση: 0.12-0.17 m

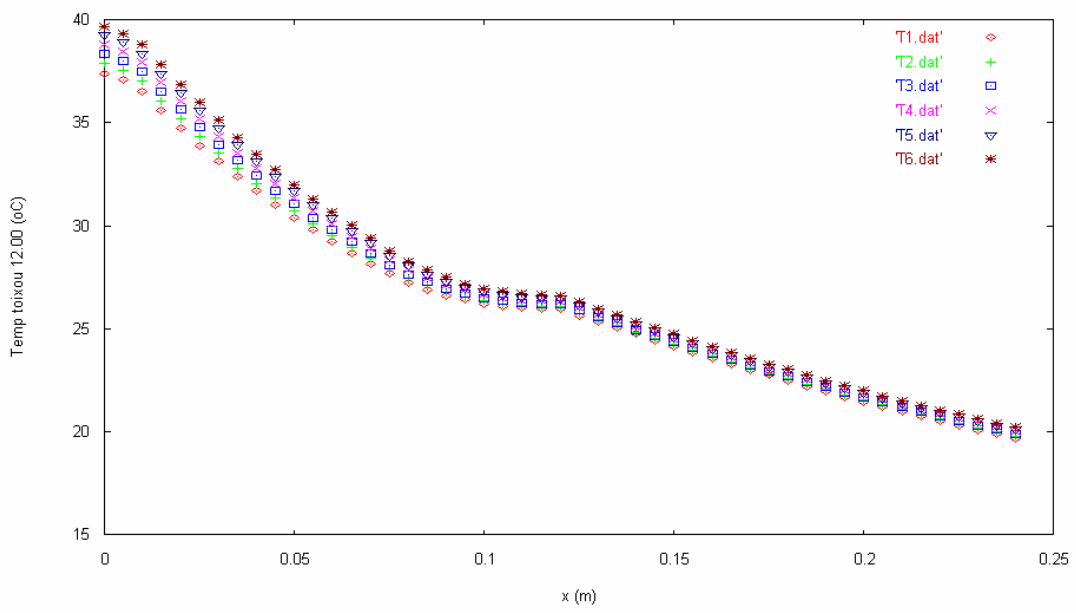
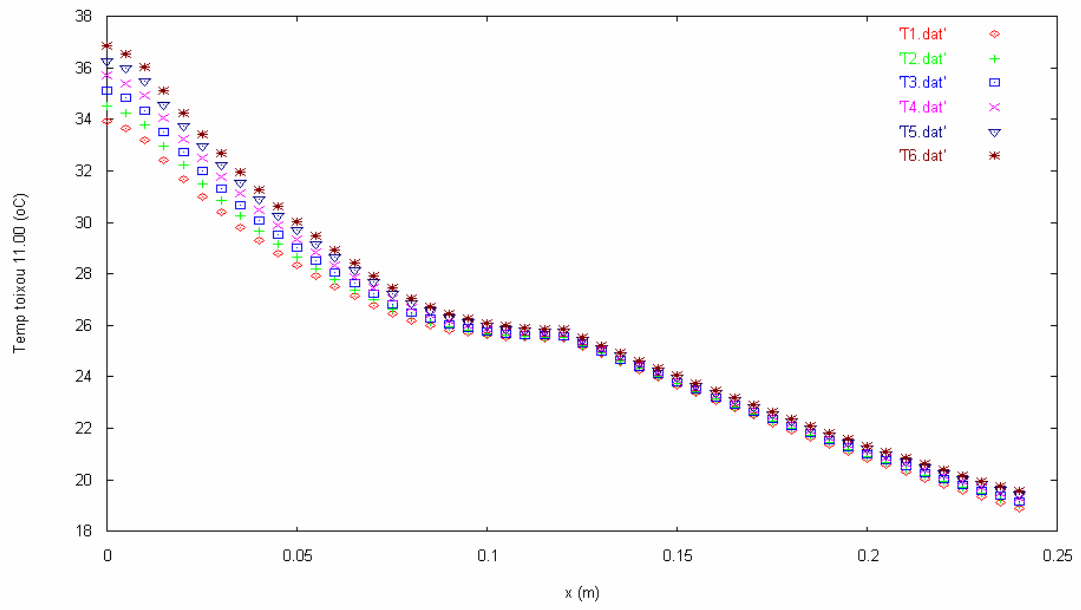
Τούβλο: 0.17-0.23 m

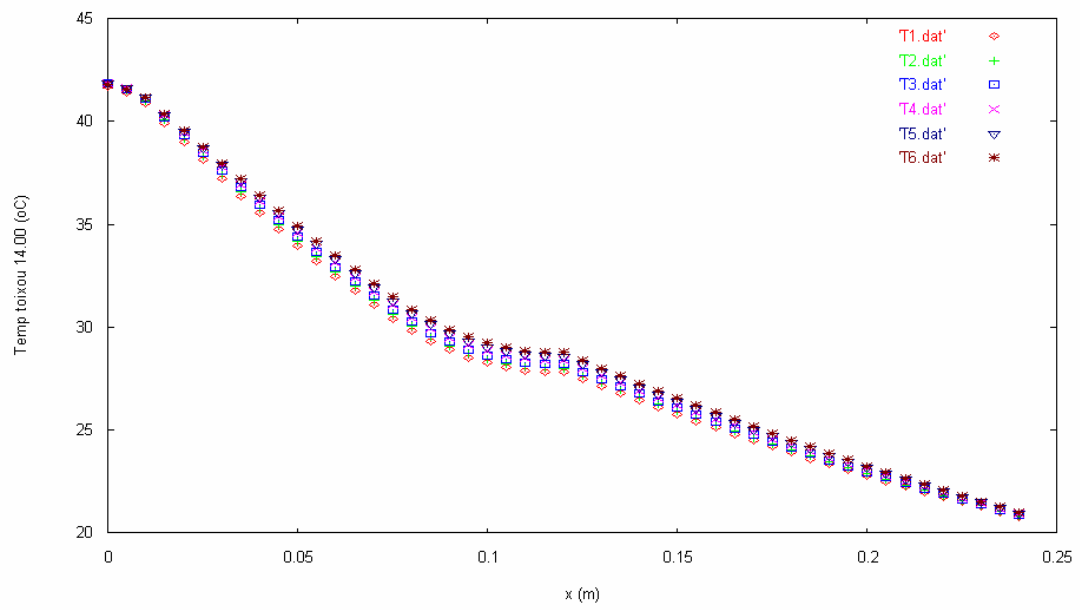
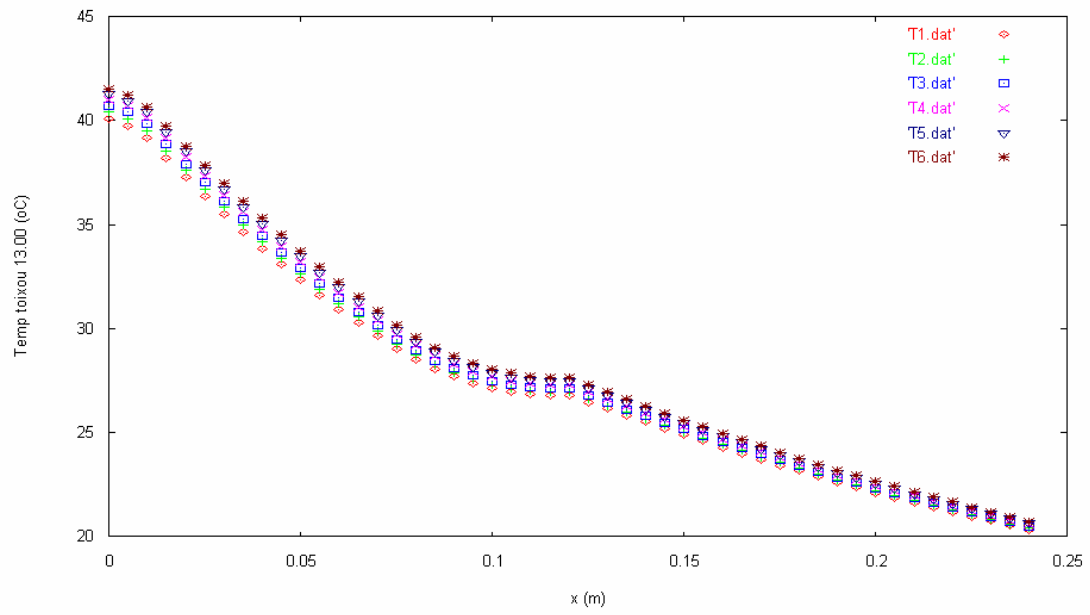
Σοβάς: 0.23-0.24 m

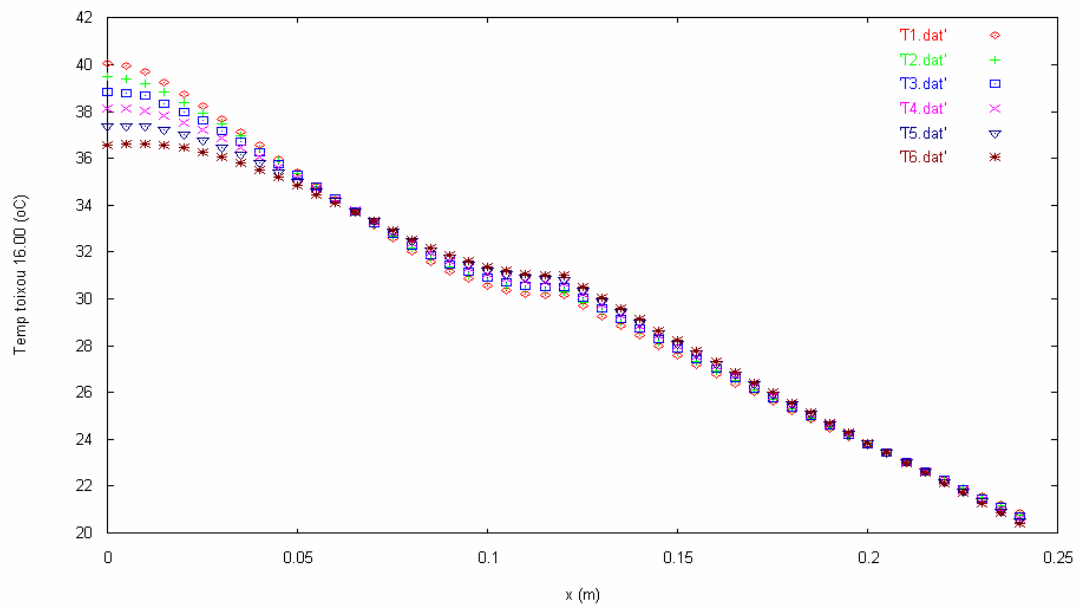
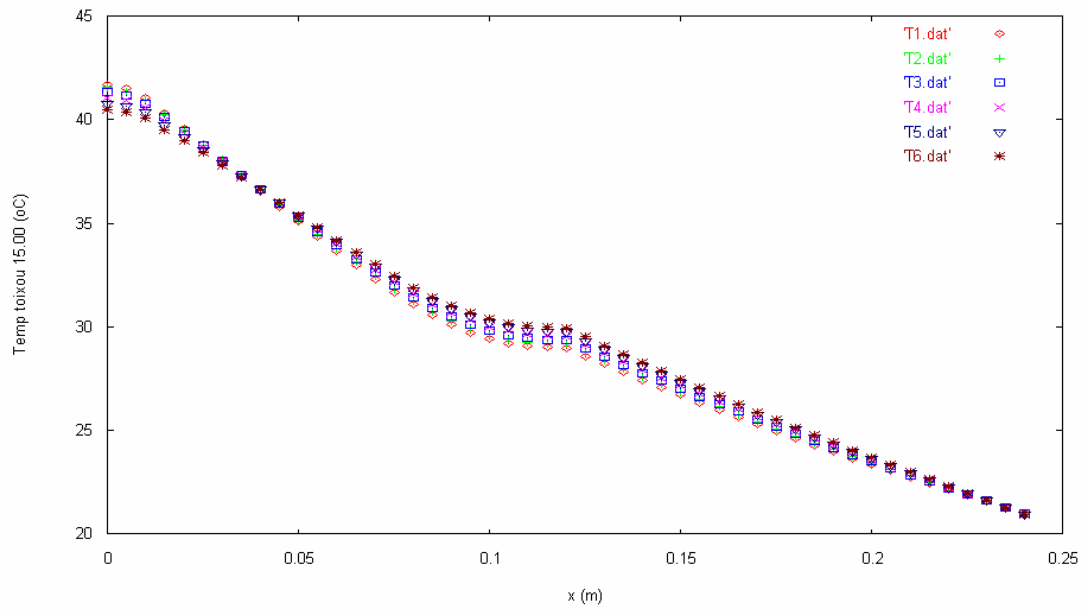


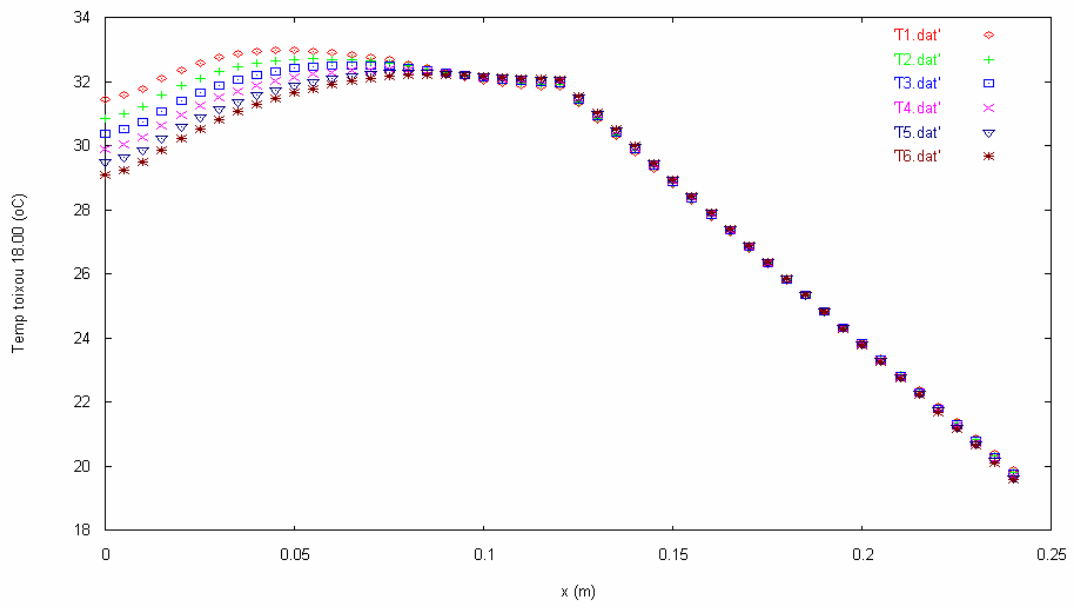
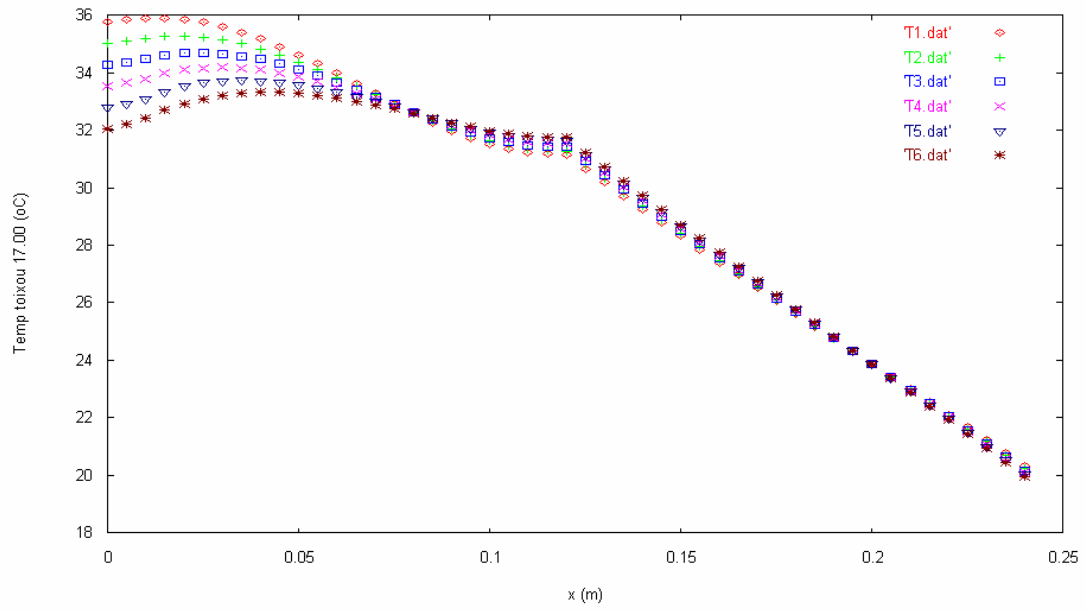
Εικόνα 123: Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος του τοίχου κατά την διάρκεια του 24 ωρου, ακολουθούν τα διαγράμματα των υπόλοιπων ωρών

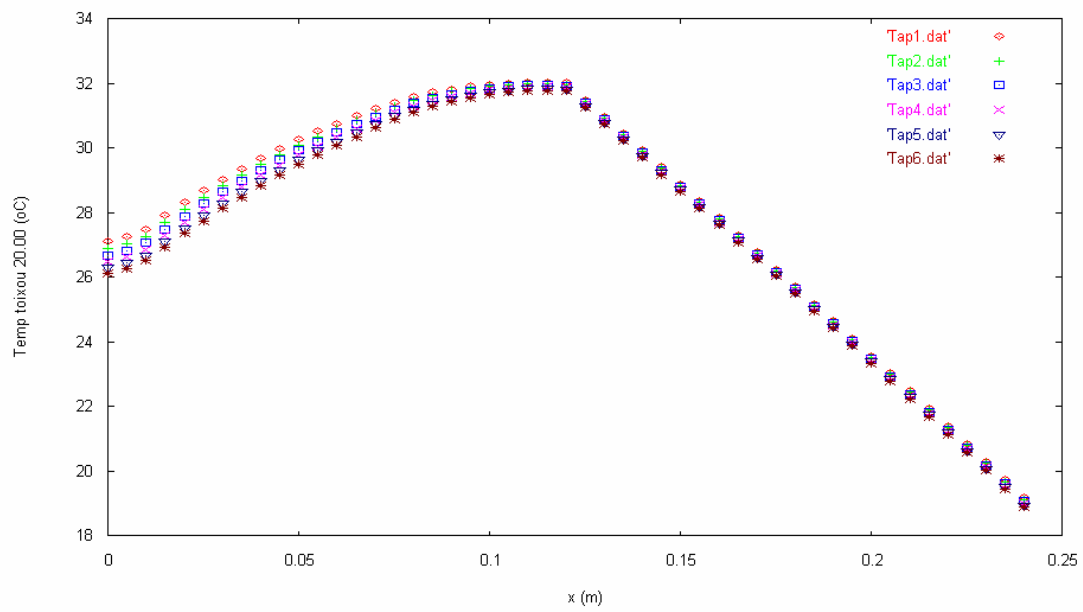
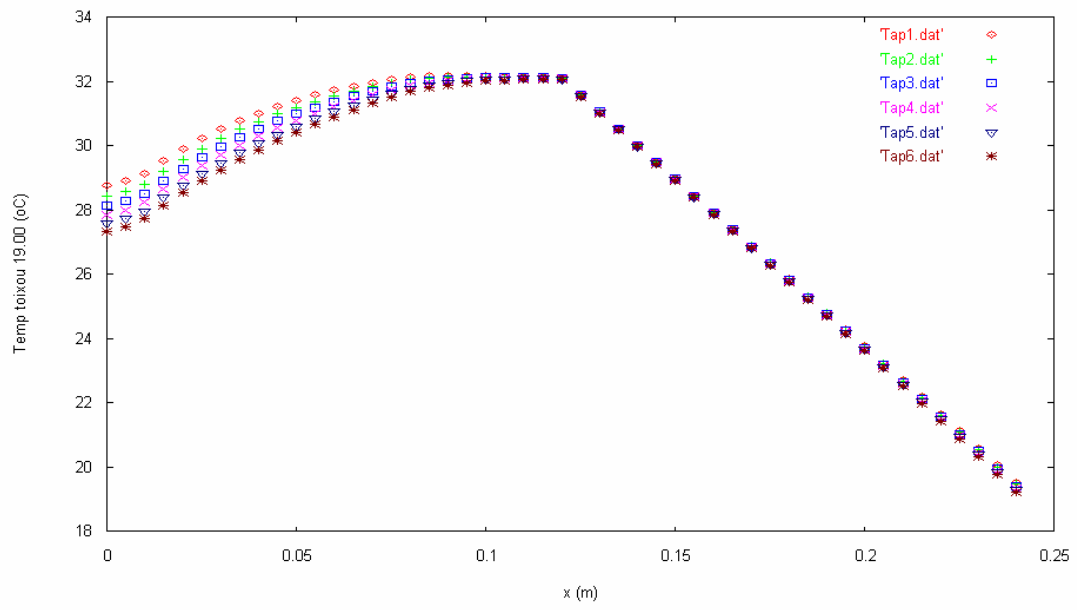


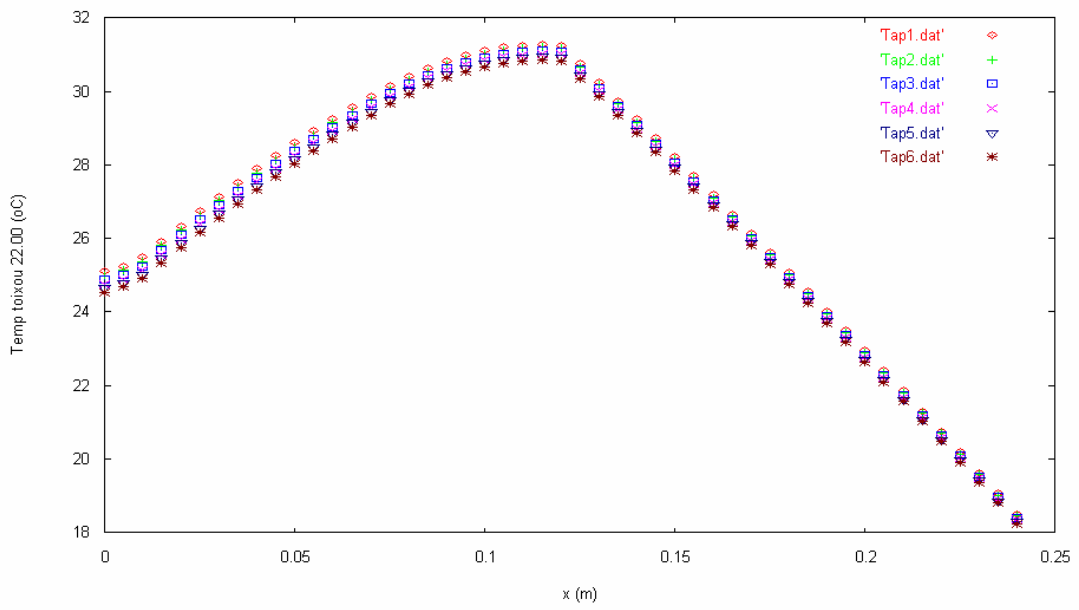
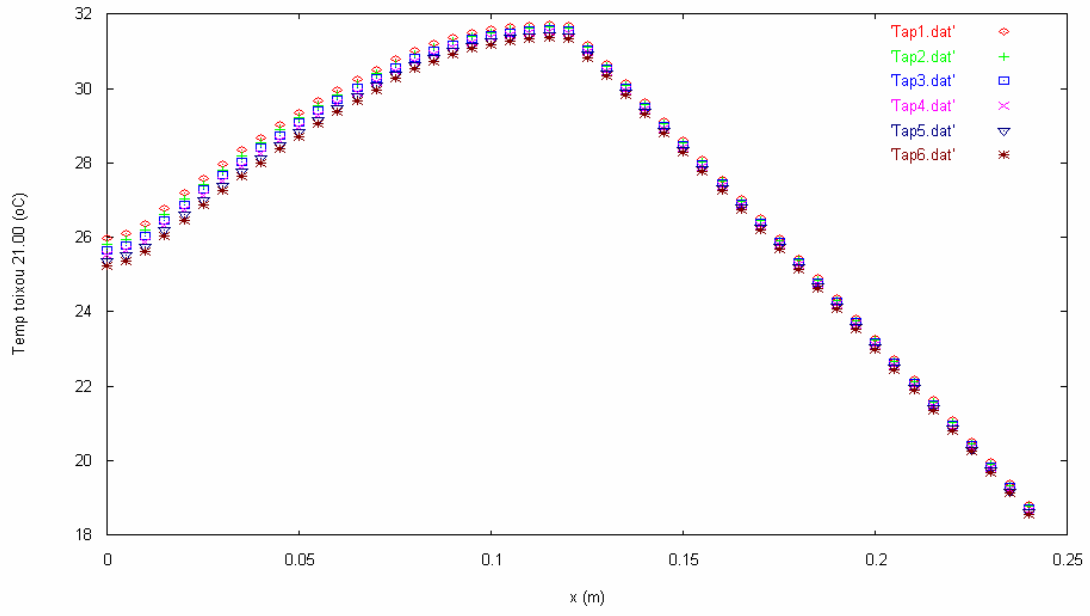


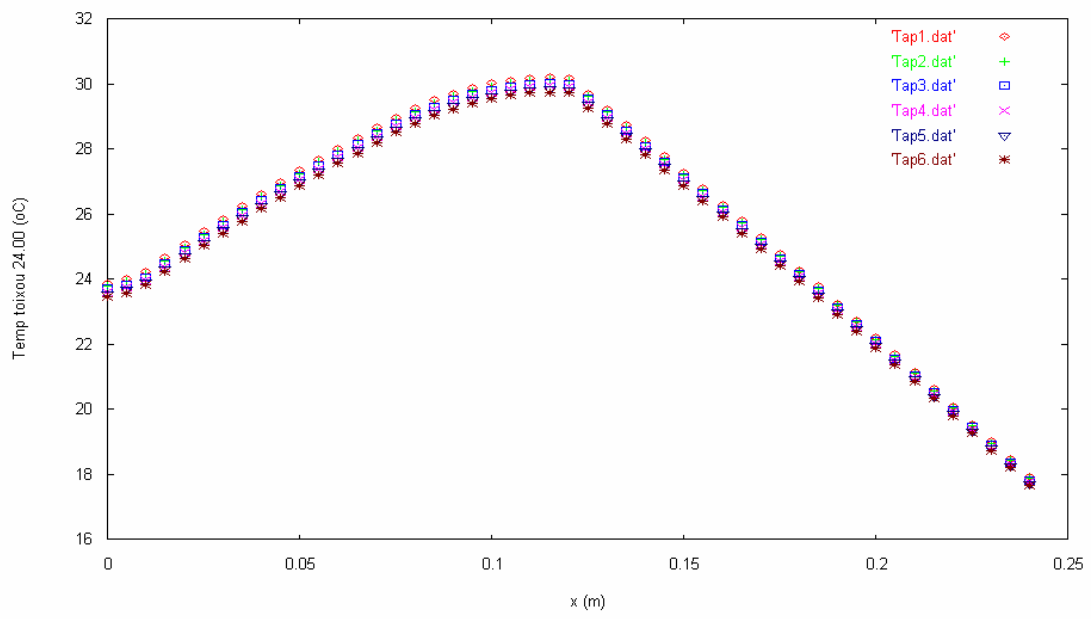
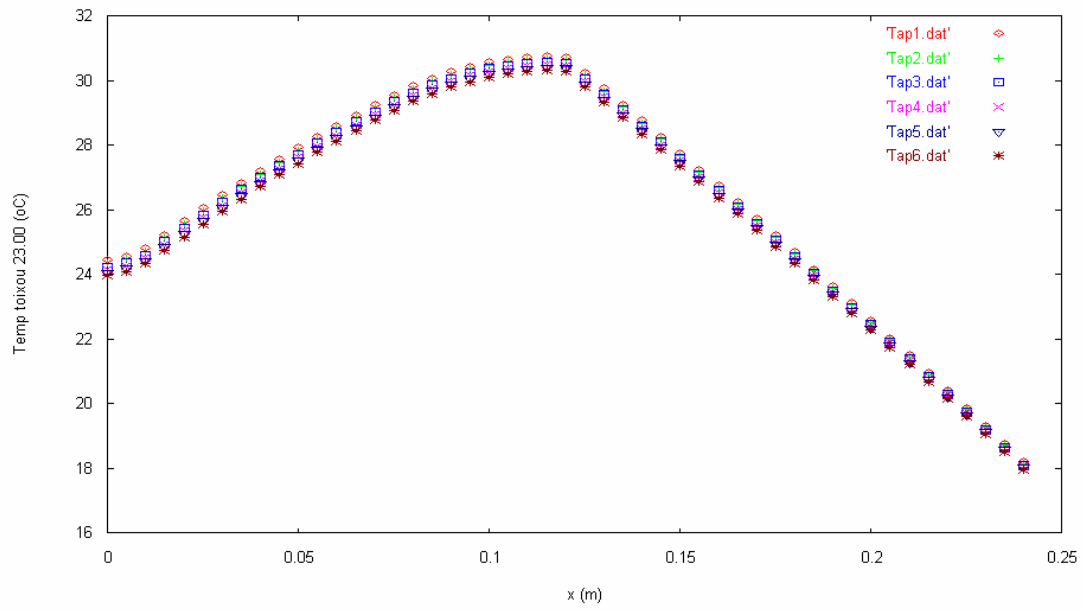


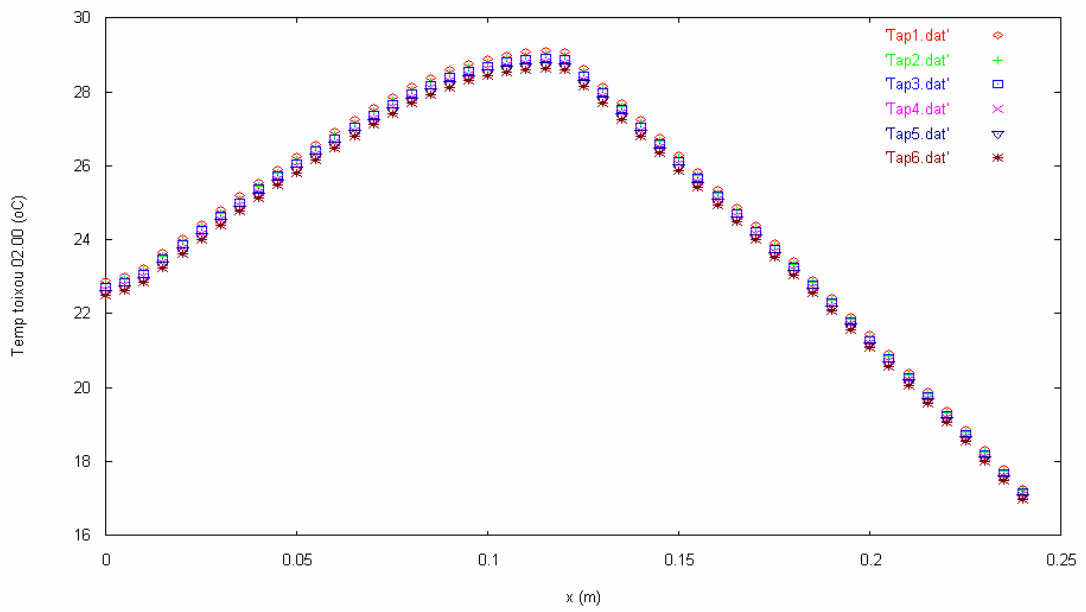
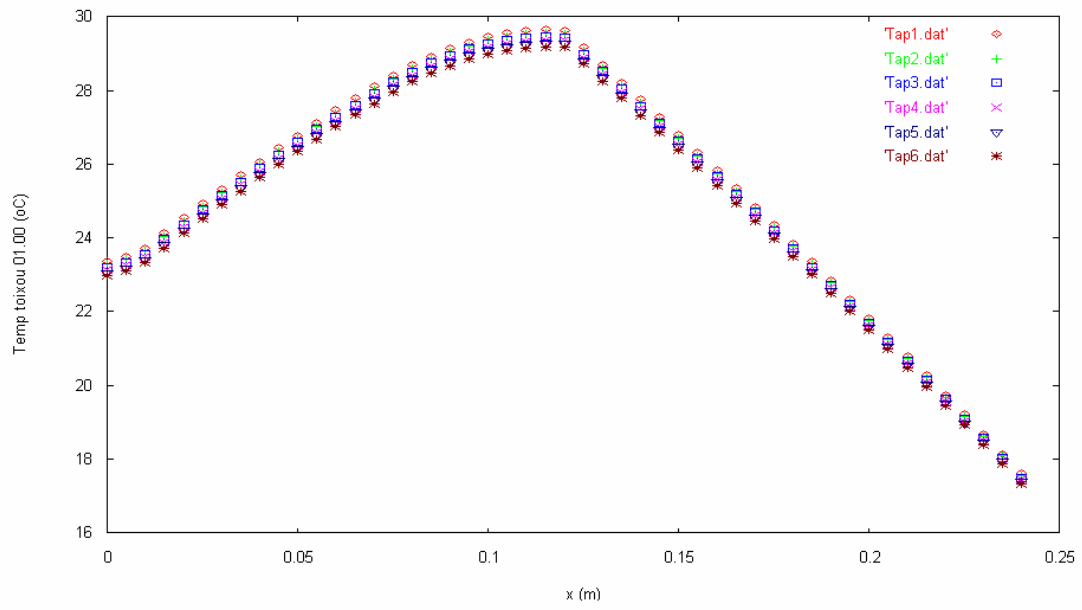


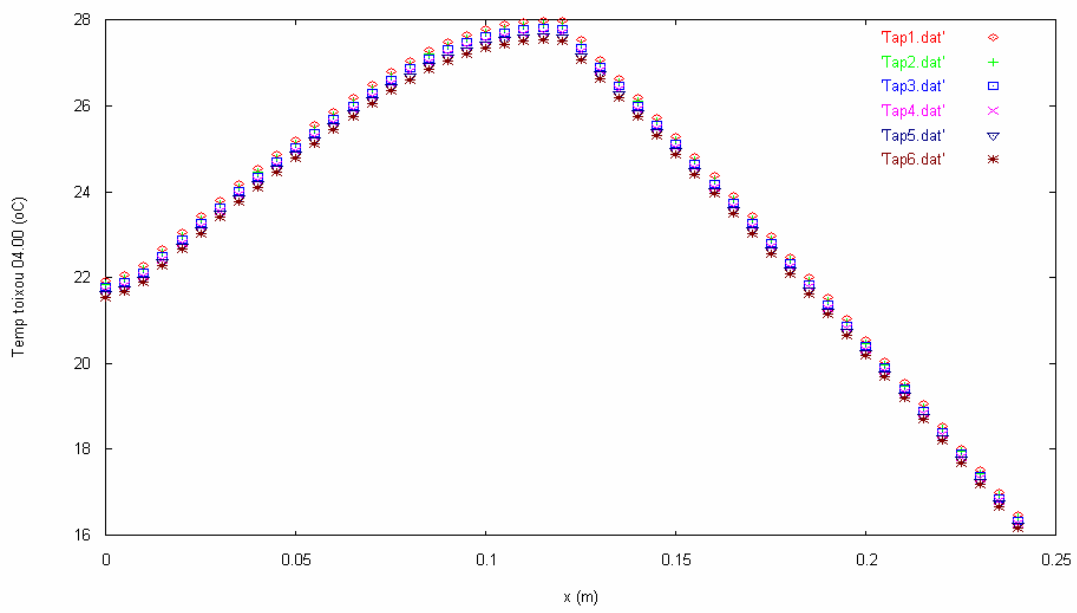
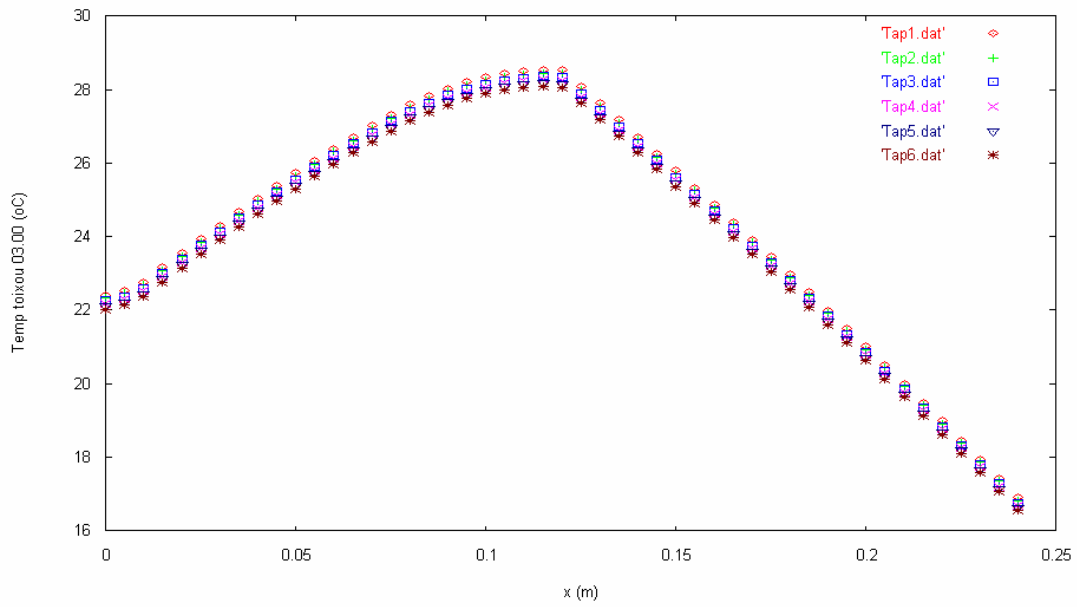


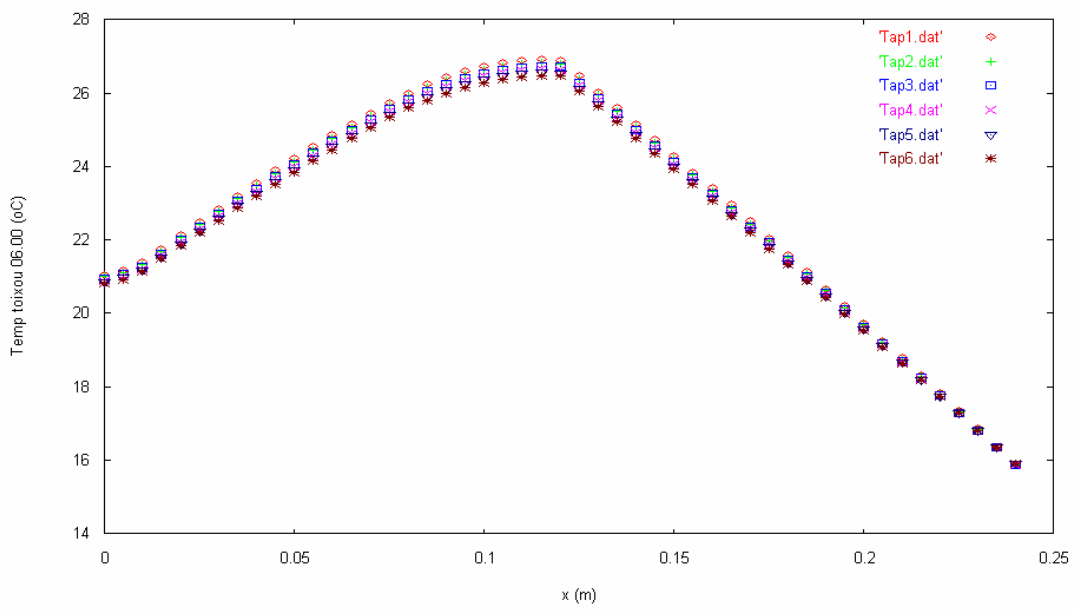
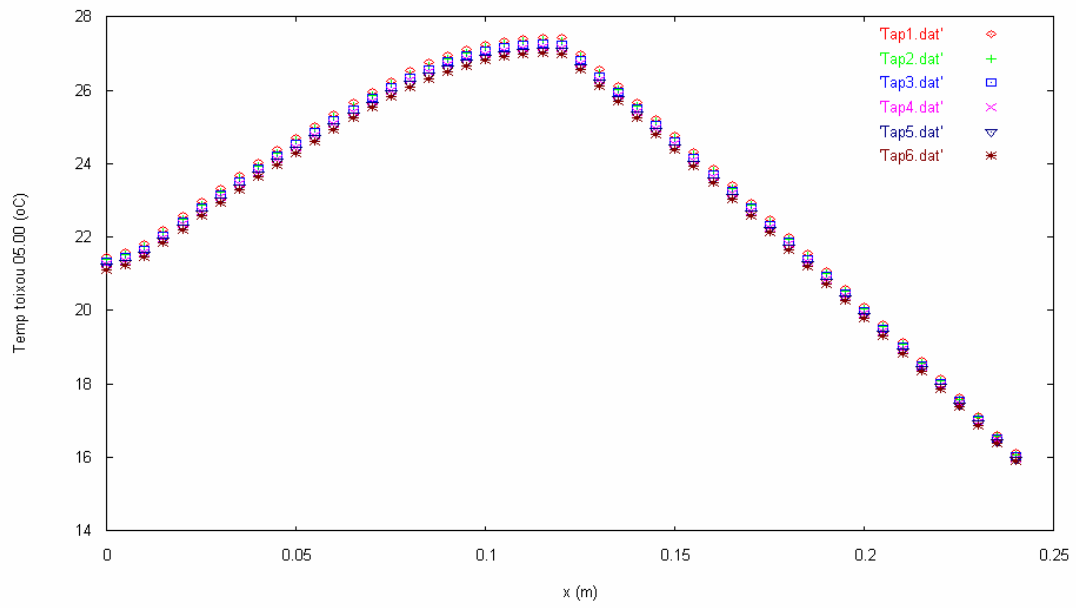




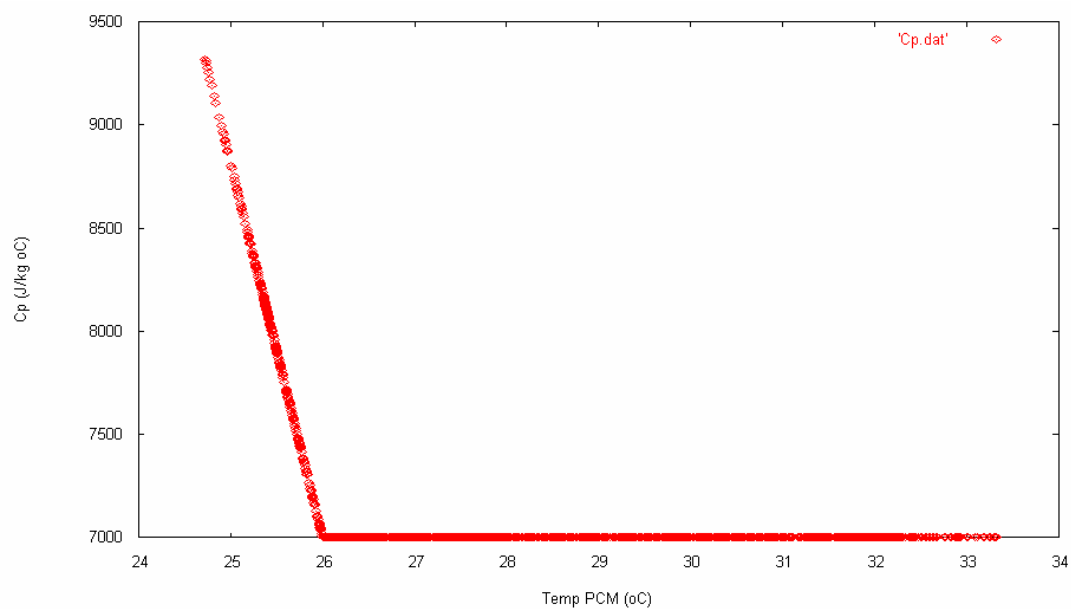








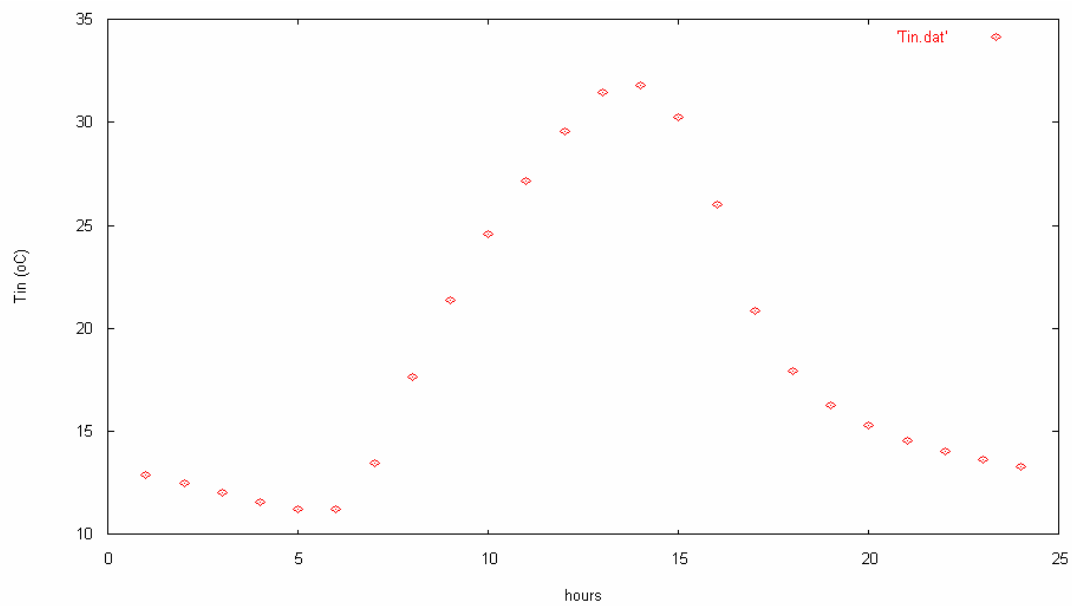
Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM συναρτήσει της θερμοκρασίας του



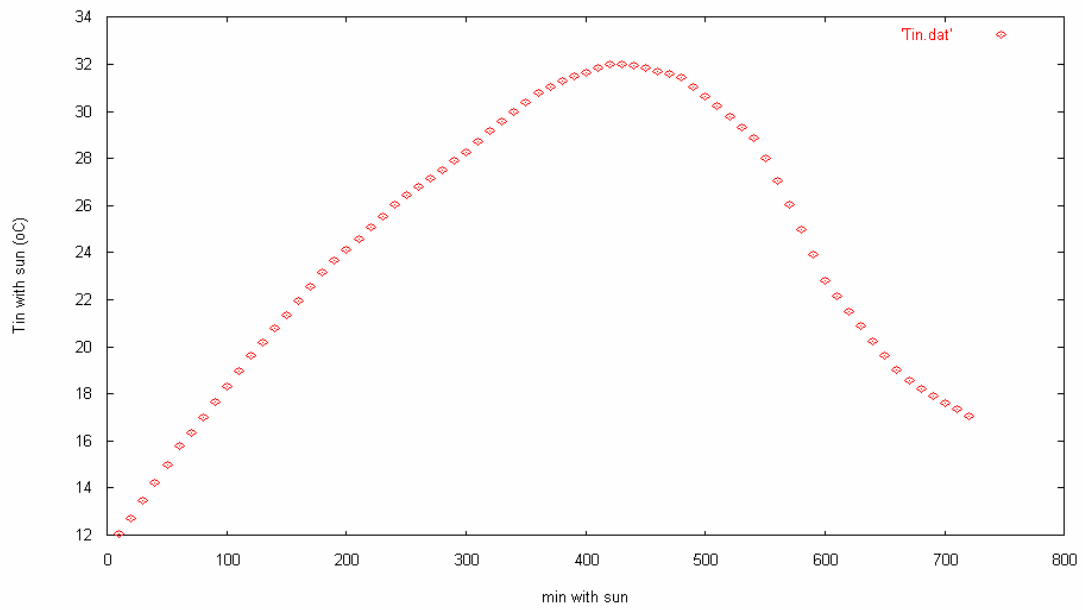
Εικόνα 124: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM συναρτήσει της θερμοκρασίας του

16.6.2 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων για την πρώτη παραμετρική μελέτη για τον μήνα Φεβρουάριο (γυψοσανίδα-PCM-μόνωση-τούβλο-σοβάς)

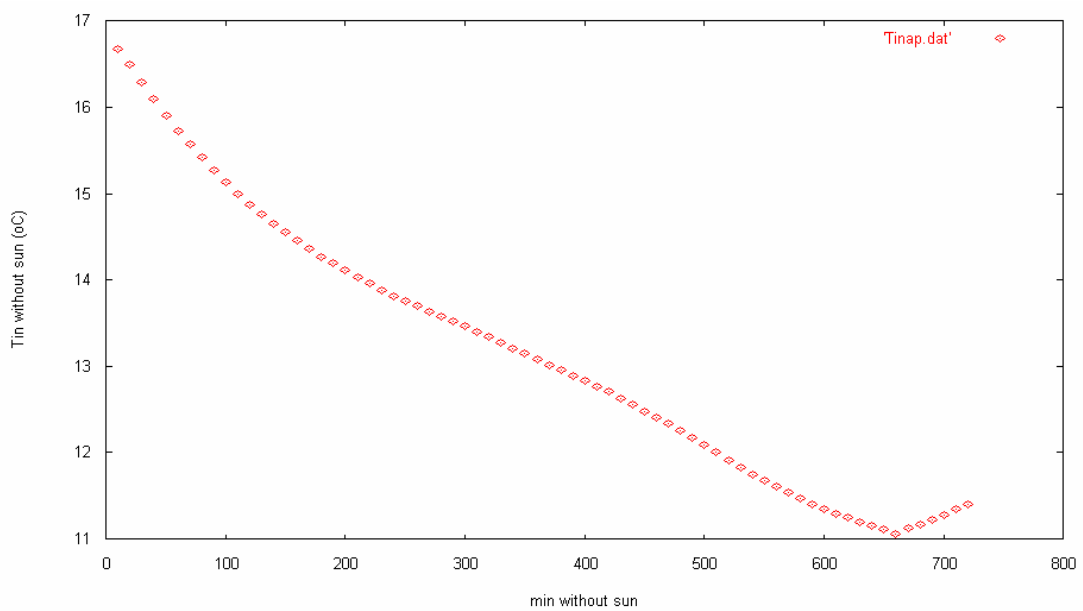
Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου



Εικόνα 124:Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου κατά την διάρκεια του 24 ωρου



Εικόνα 125: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου συναρτήσει των λεπτών κατά την διάρκεια των οποίων υπάρχει ηλιοφάνεια (7.00- 18.00)



Εικόνα 126: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου συναρτήσει των λεπτών κατά την διάρκεια των οποίων δεν υπάρχει ηλιοφάνεια (19.00-6.00)

Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος του τοίχου κατά την διάρκεια της ημέρας

Η κατανομή των υλικών κατά μήκος του τοίχου x (m) είναι η εξής:

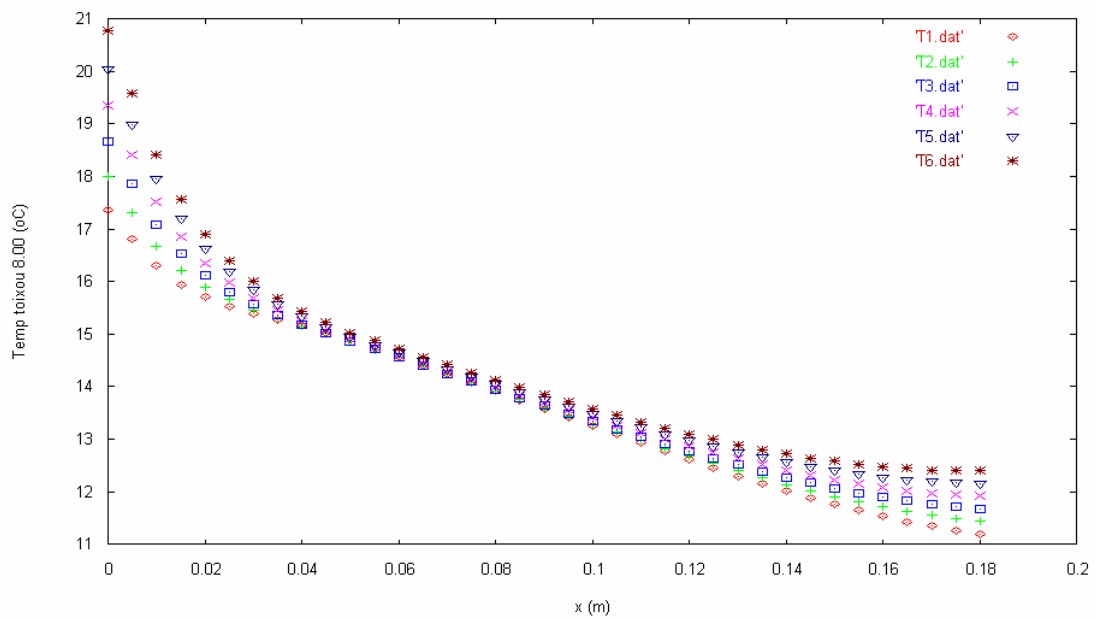
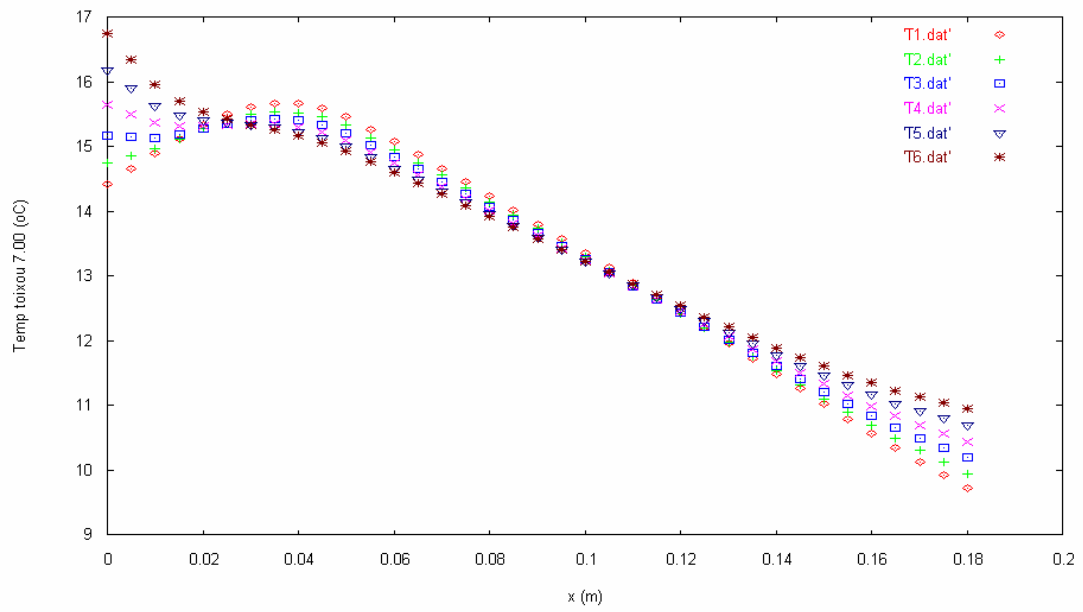
Γυψοσανίδα :0-0.01 m

PCM:0.01-0.06 m

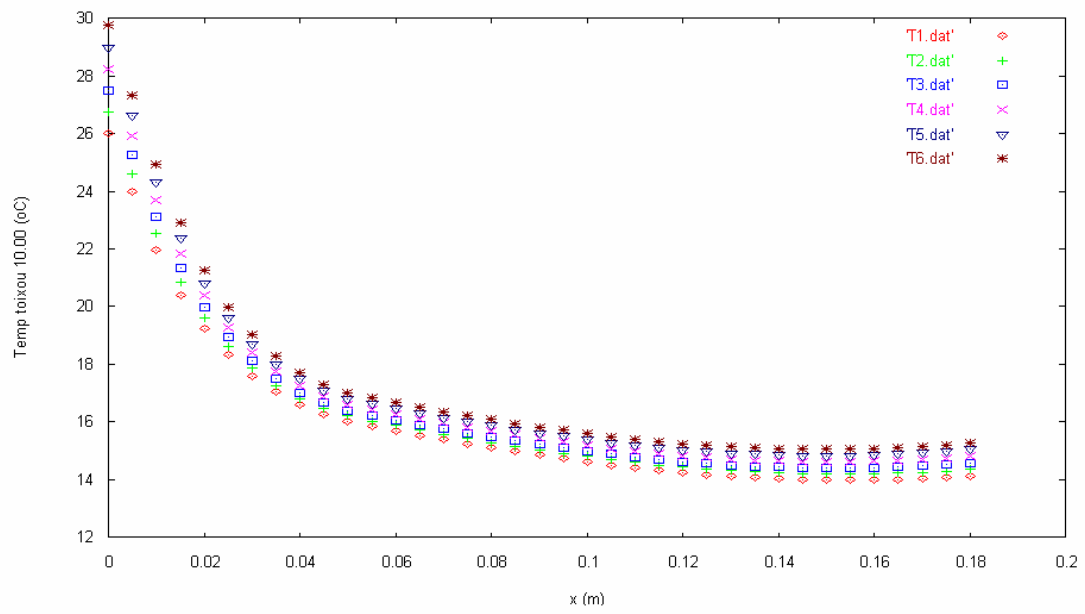
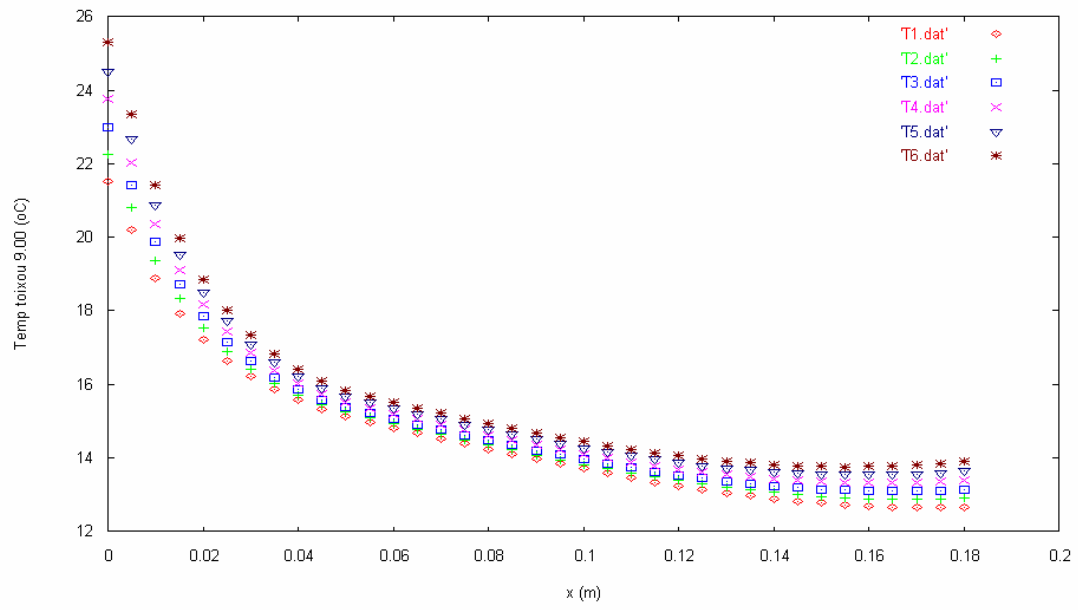
Μόνωση: 0.06-0.11 m

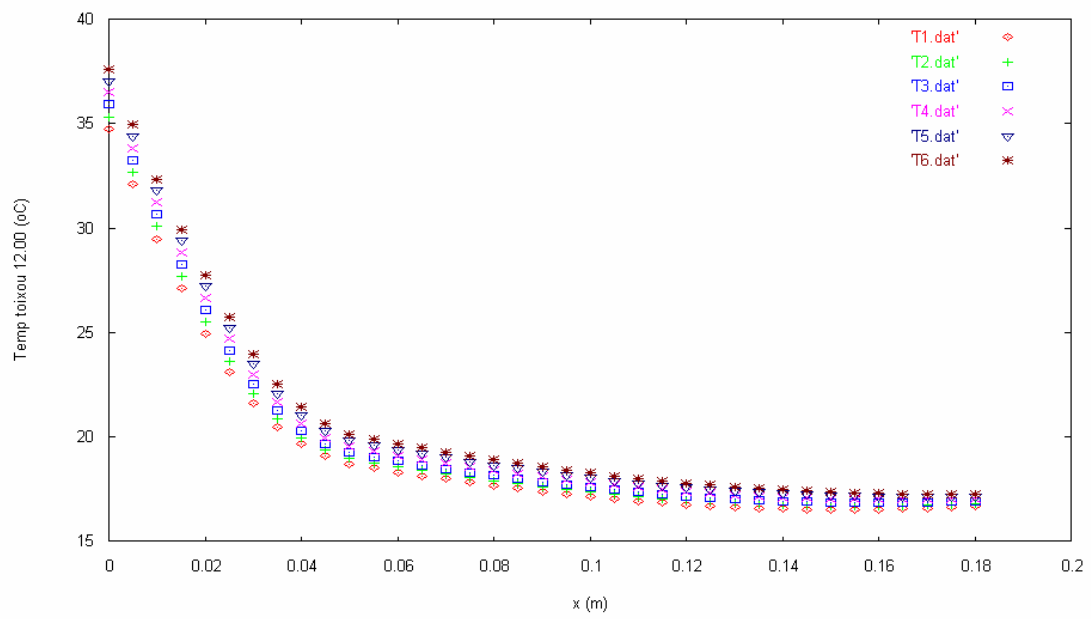
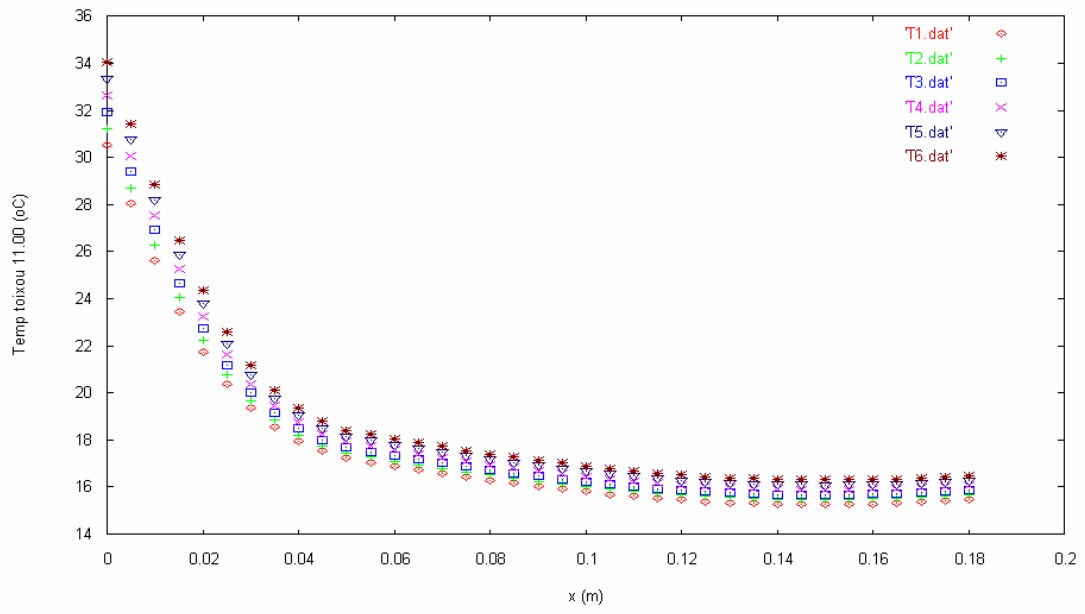
Τούβλο :0.11-0.17 m

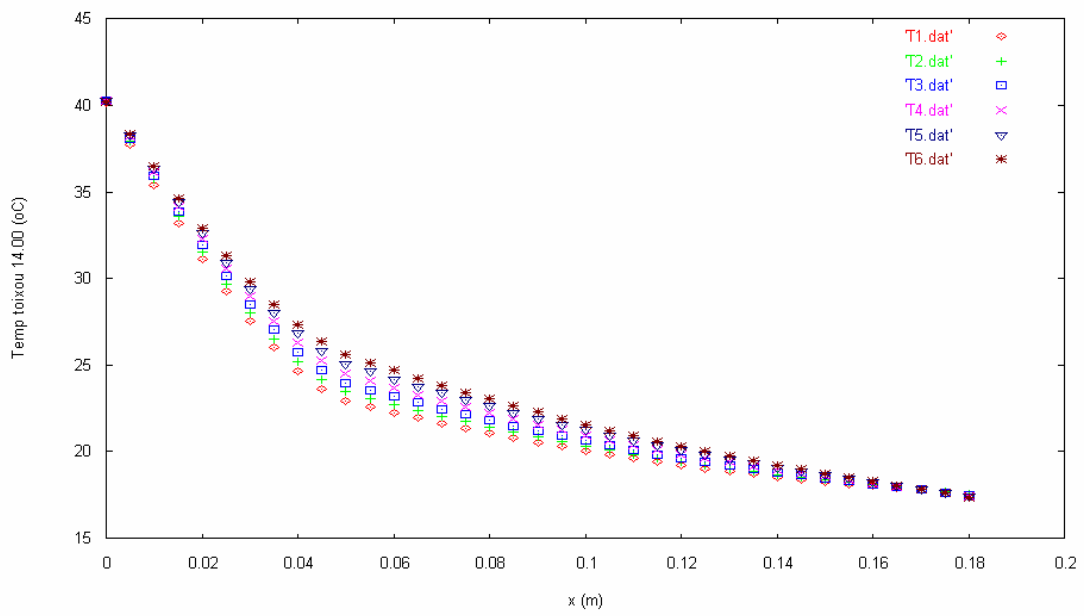
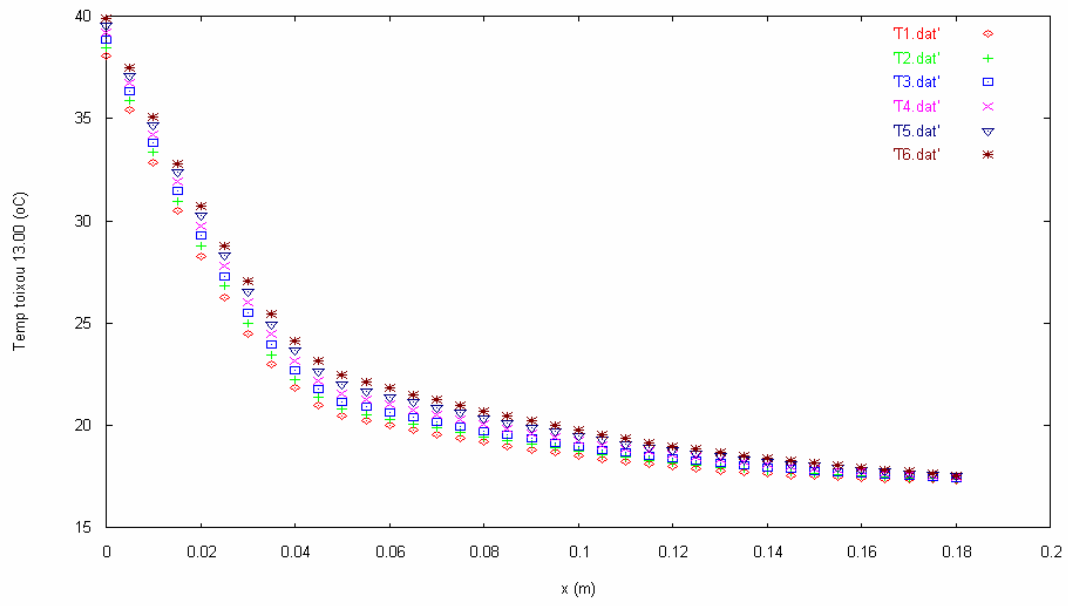
Σοβάς: 0.17-0.18 m

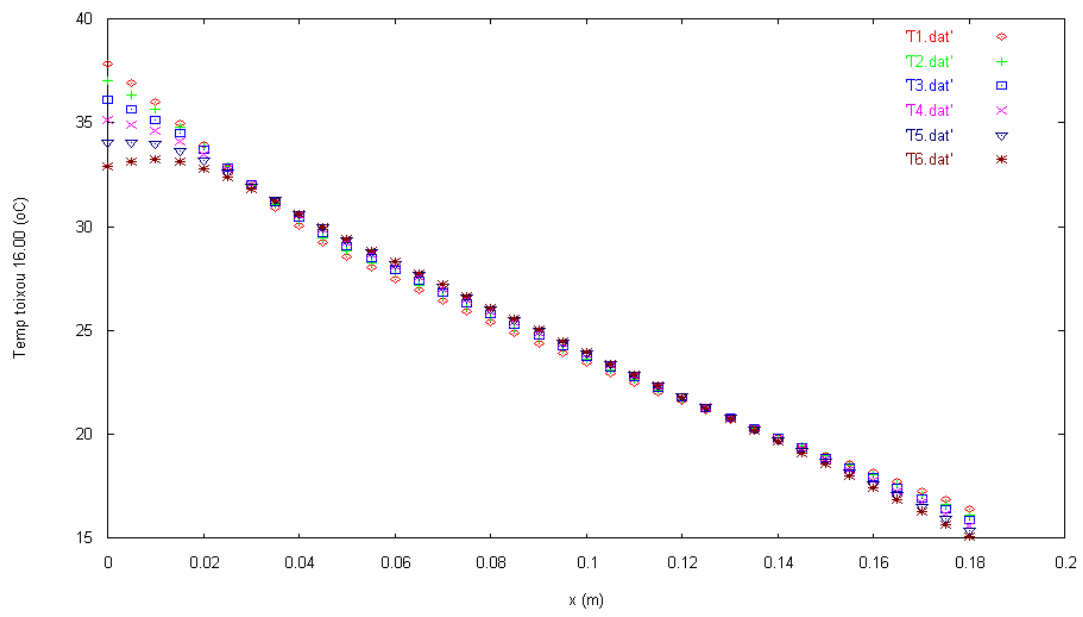
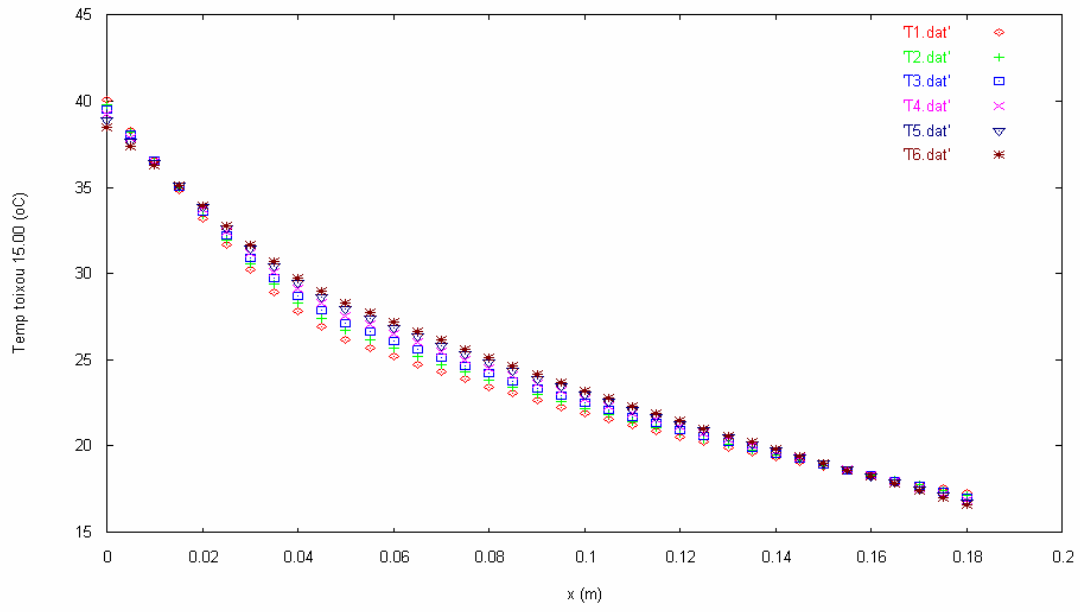


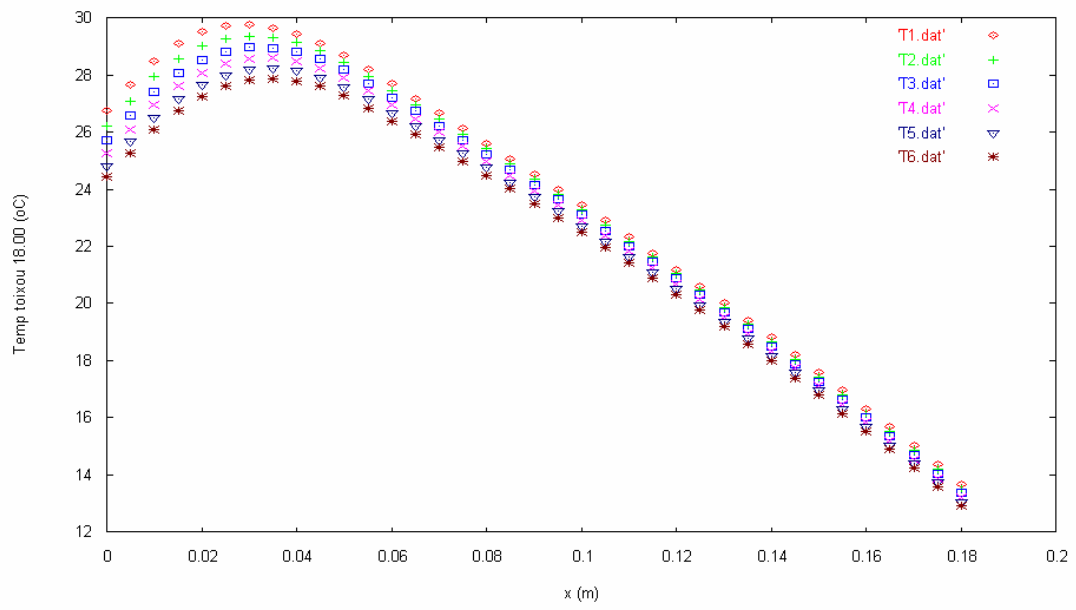
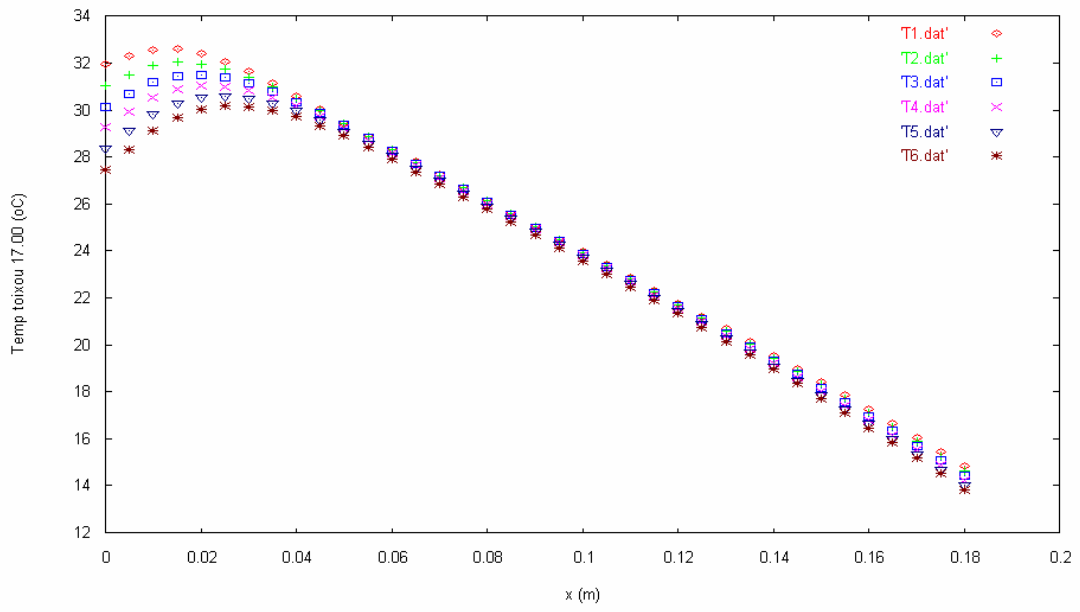
Εικόνα 127: Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος του τοίχου κατά την διάρκεια του 24 ωρου, ακολουθούν τα διαγράμματα των υπόλοιπων ωρών

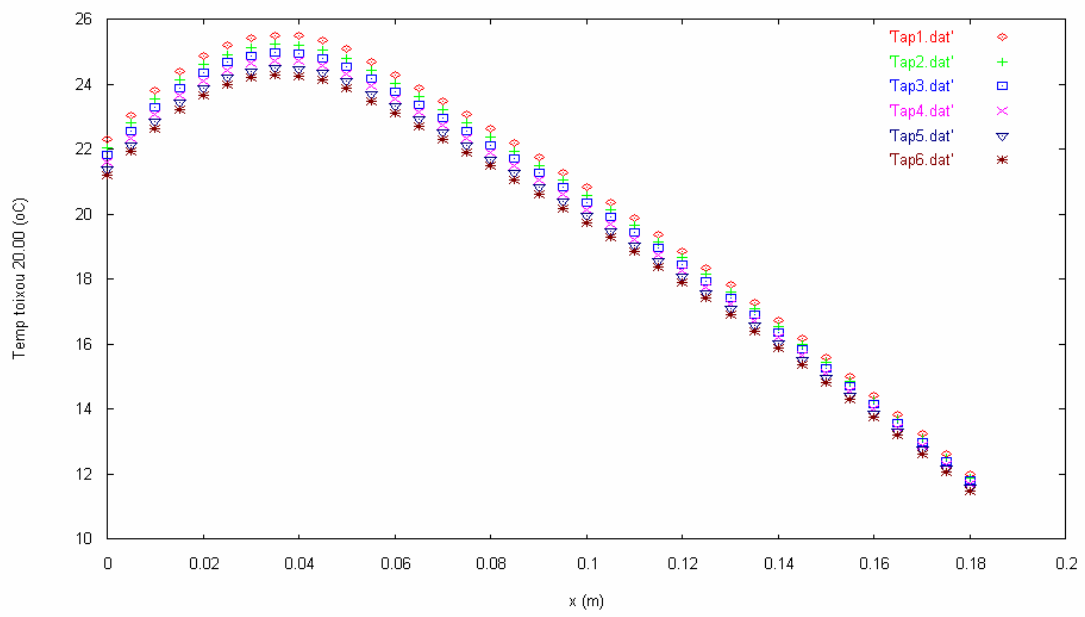
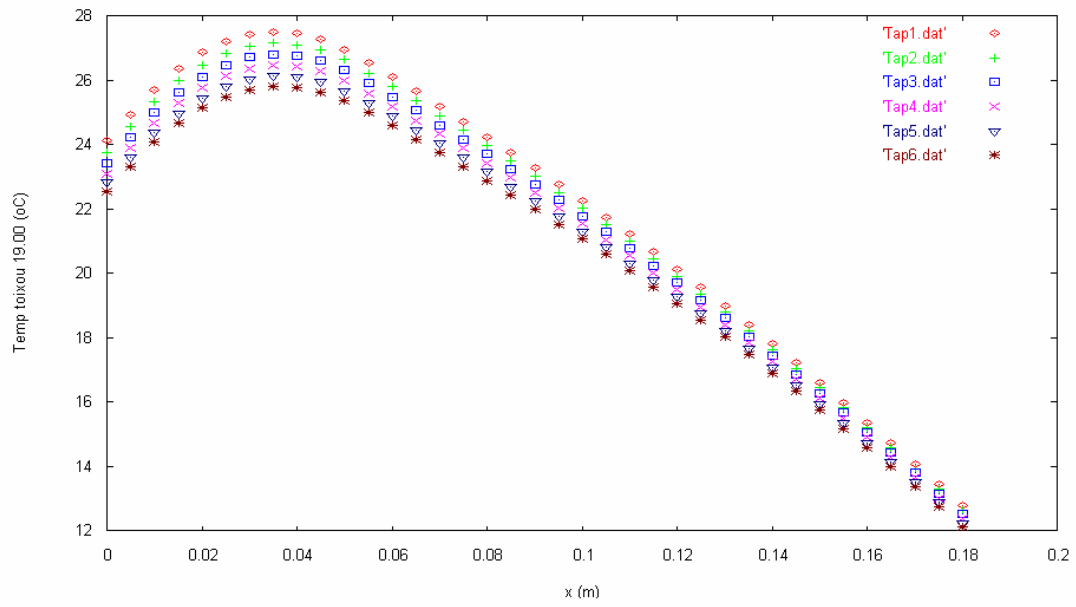


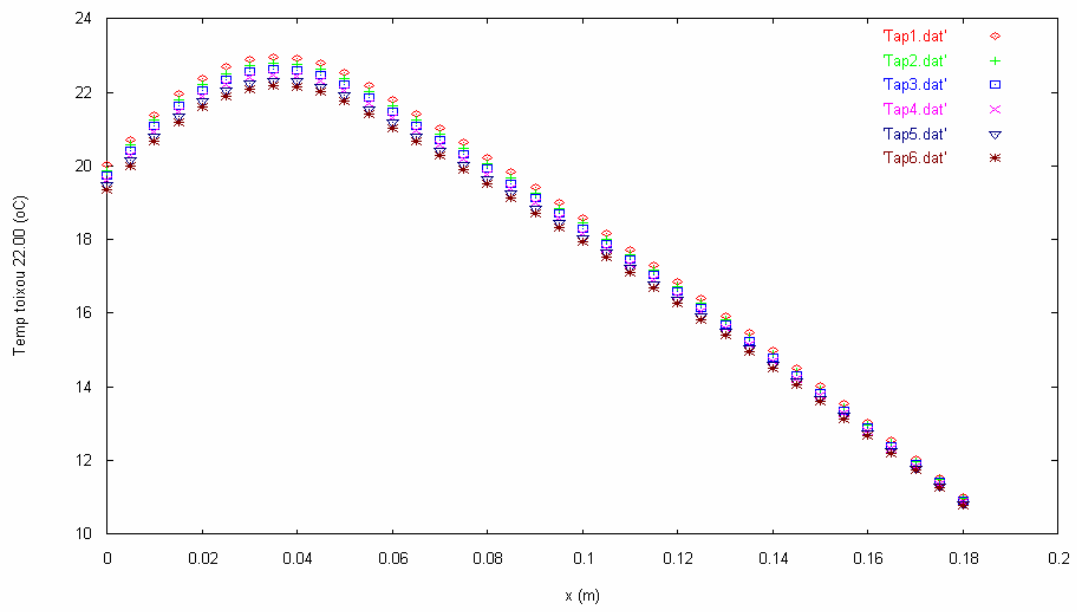
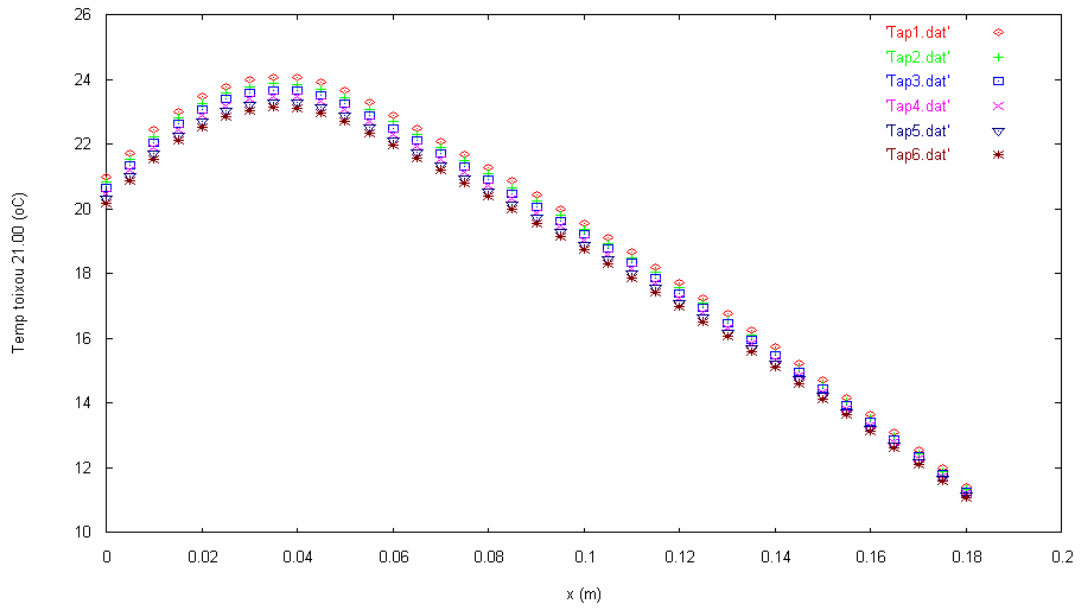


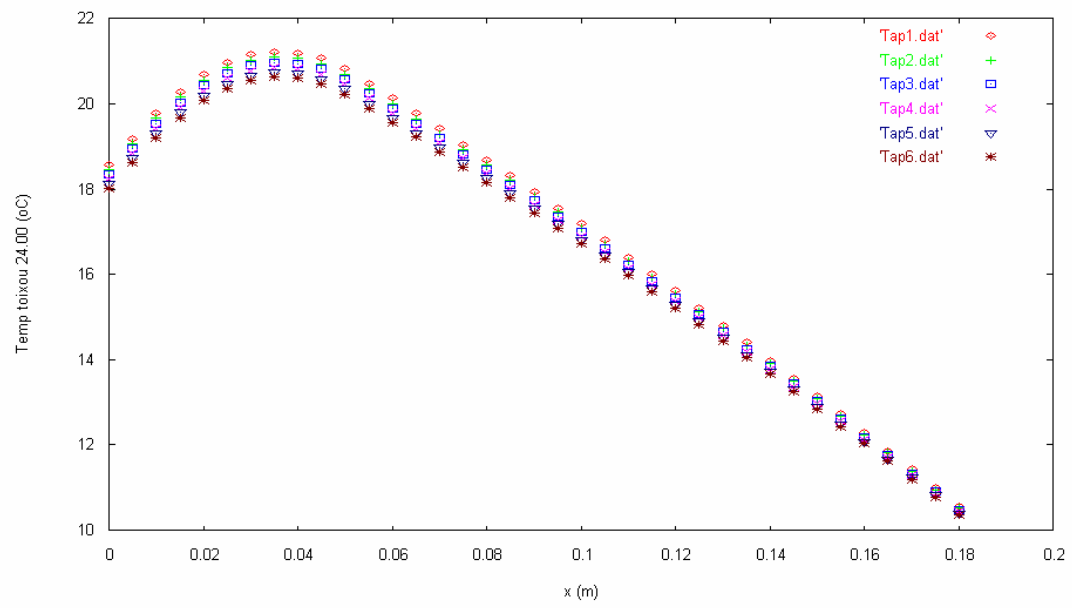
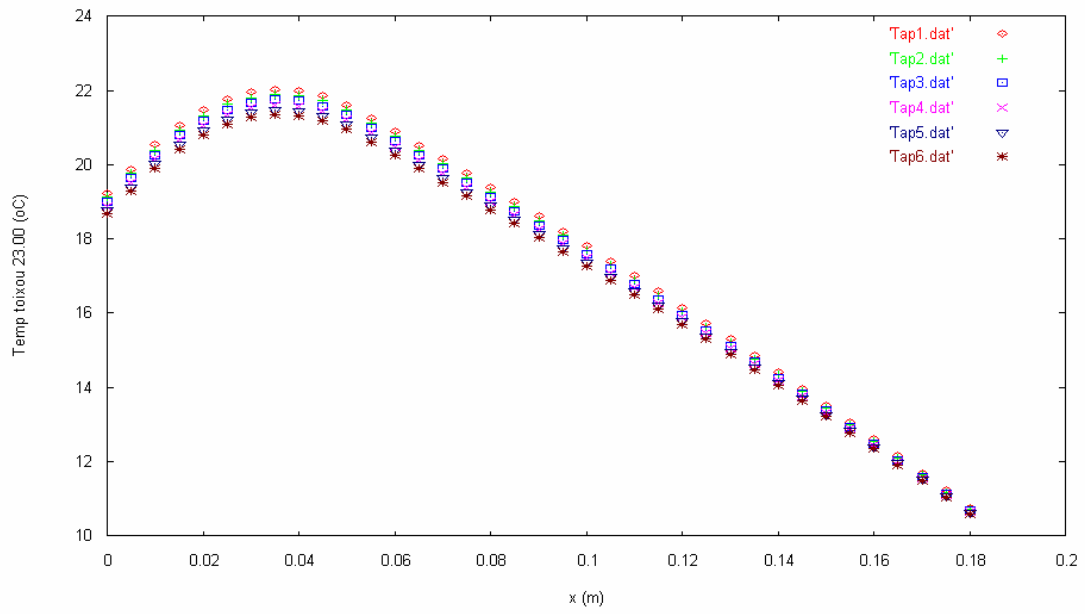


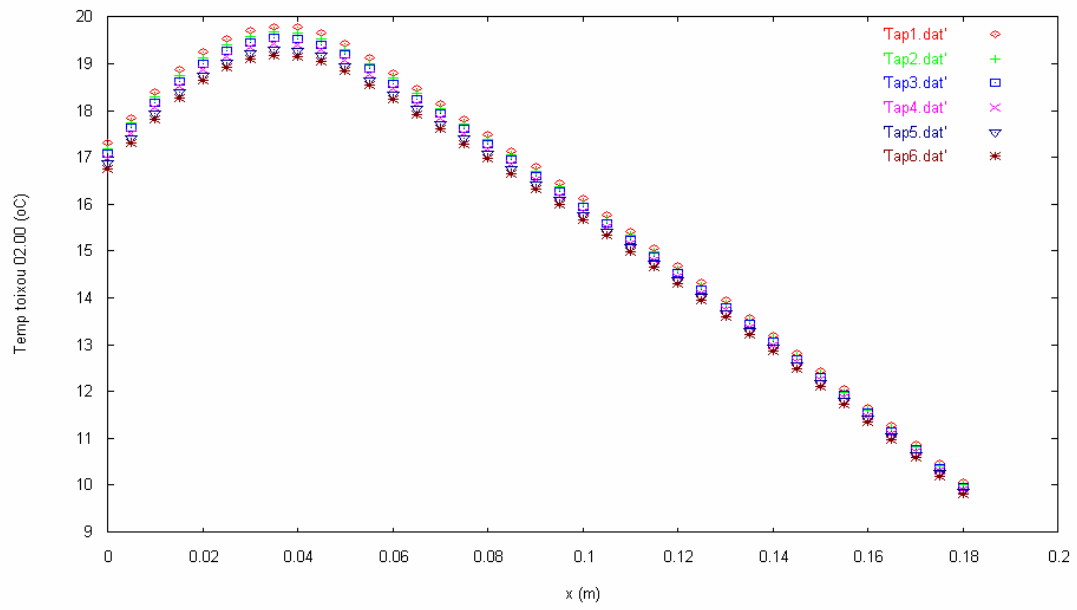
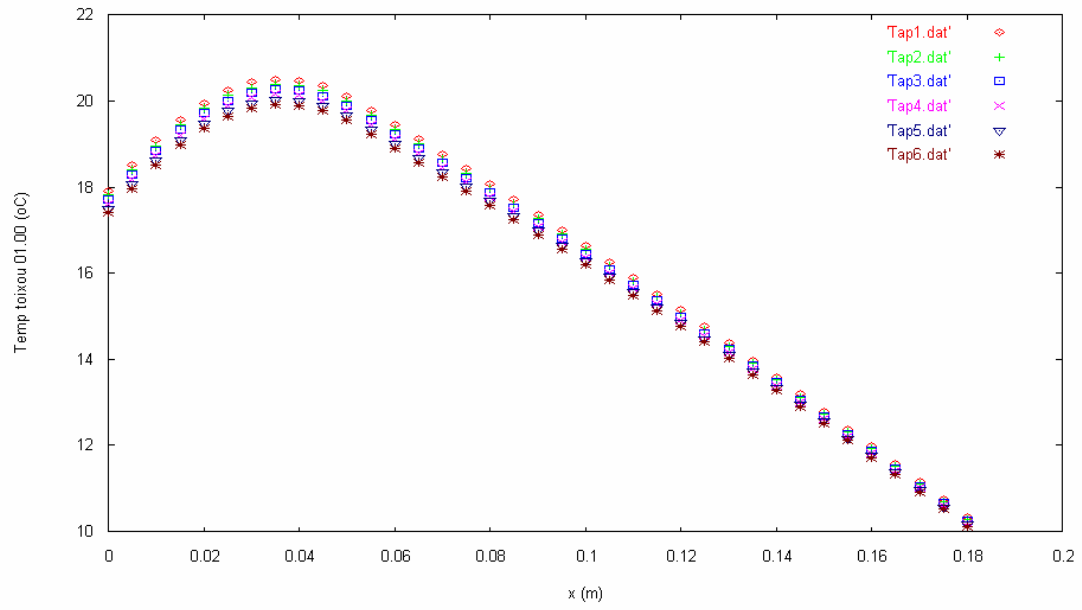


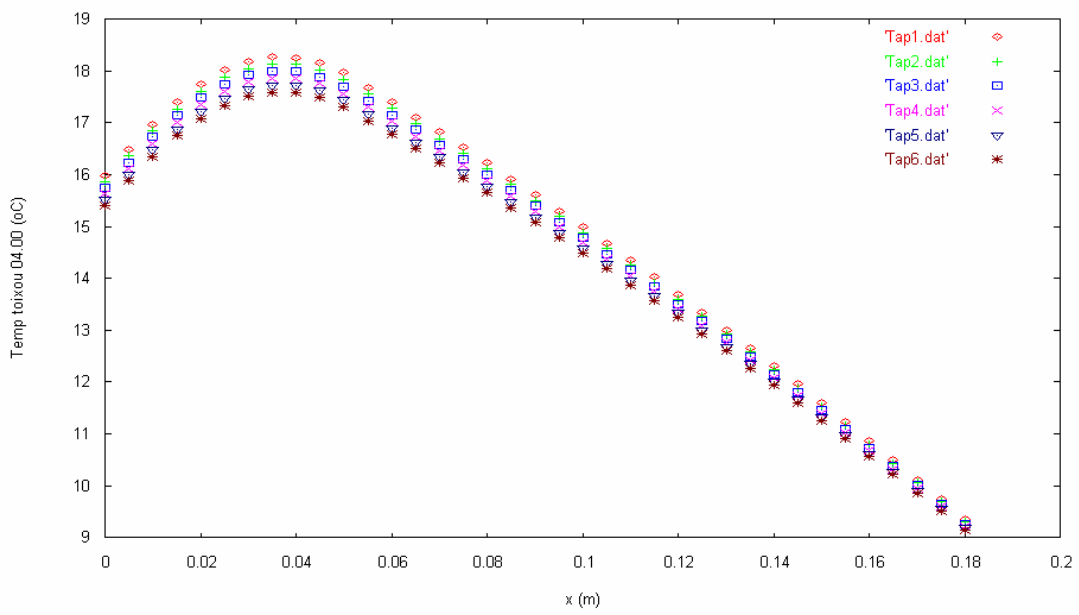
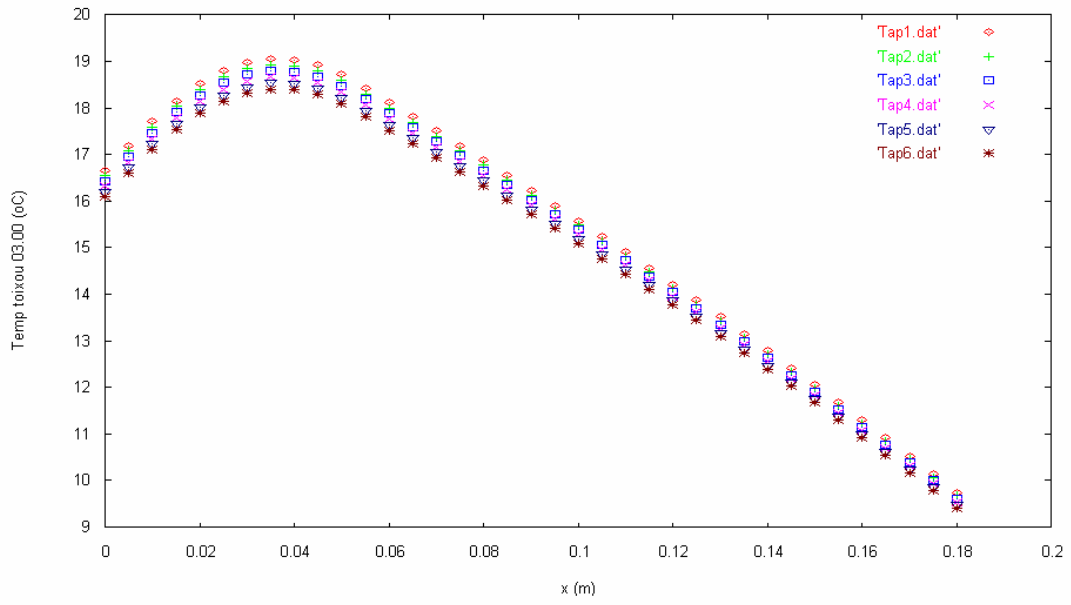


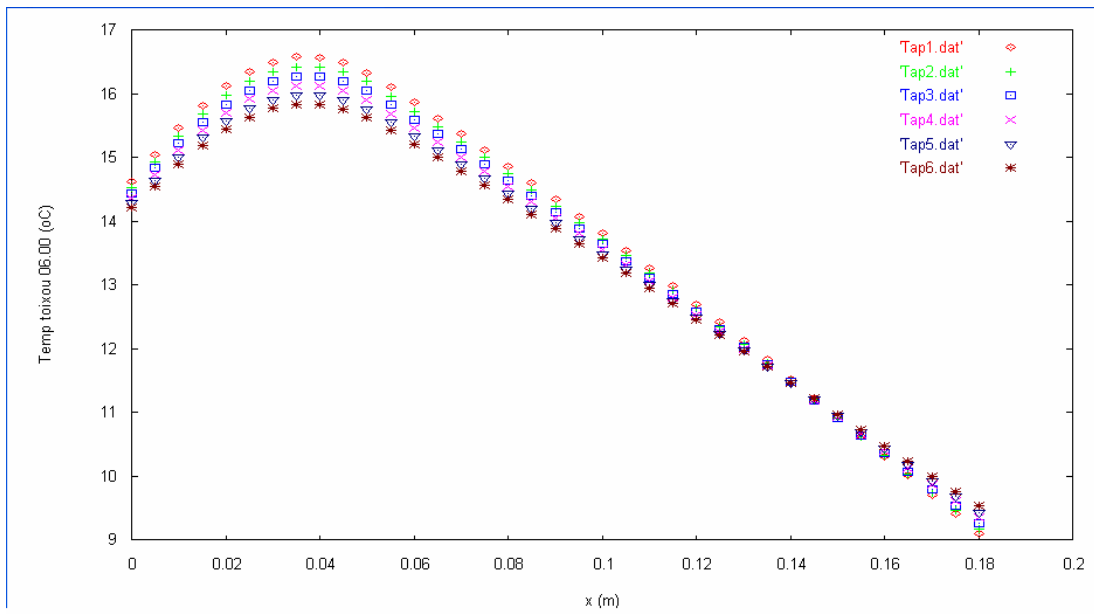
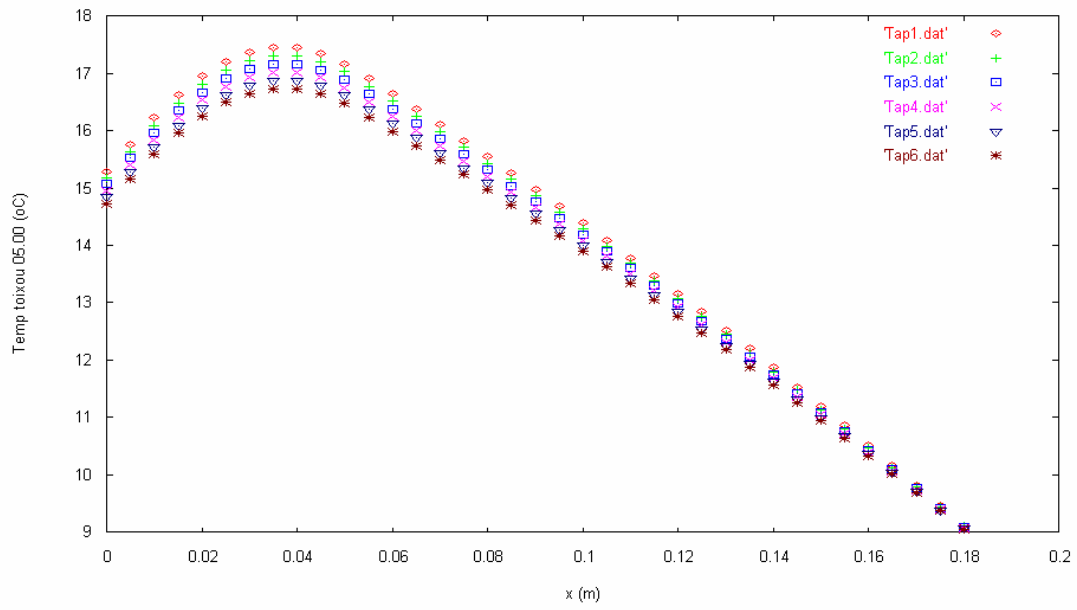




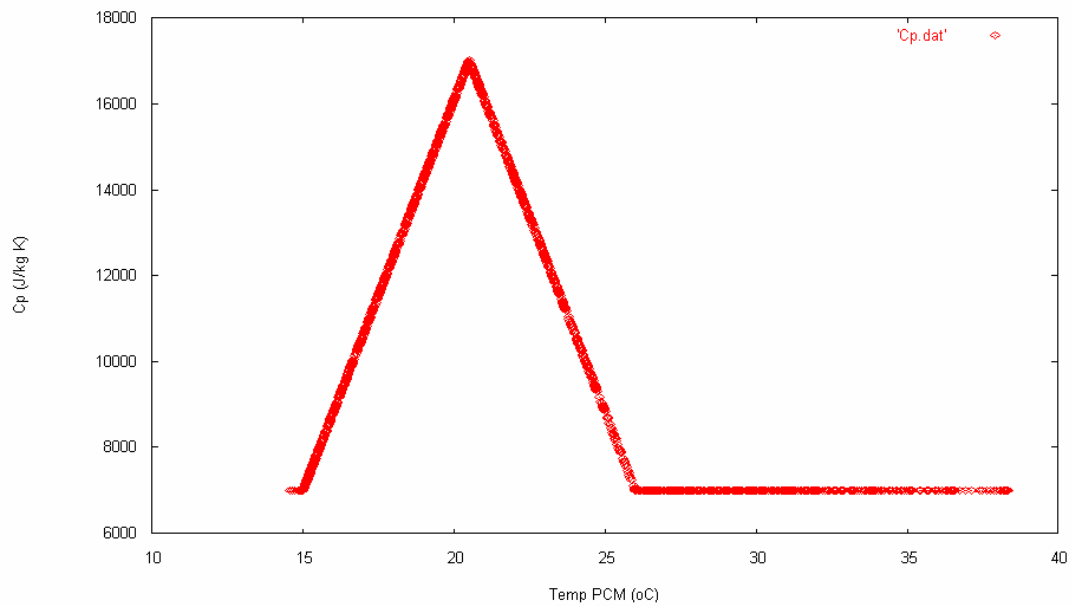








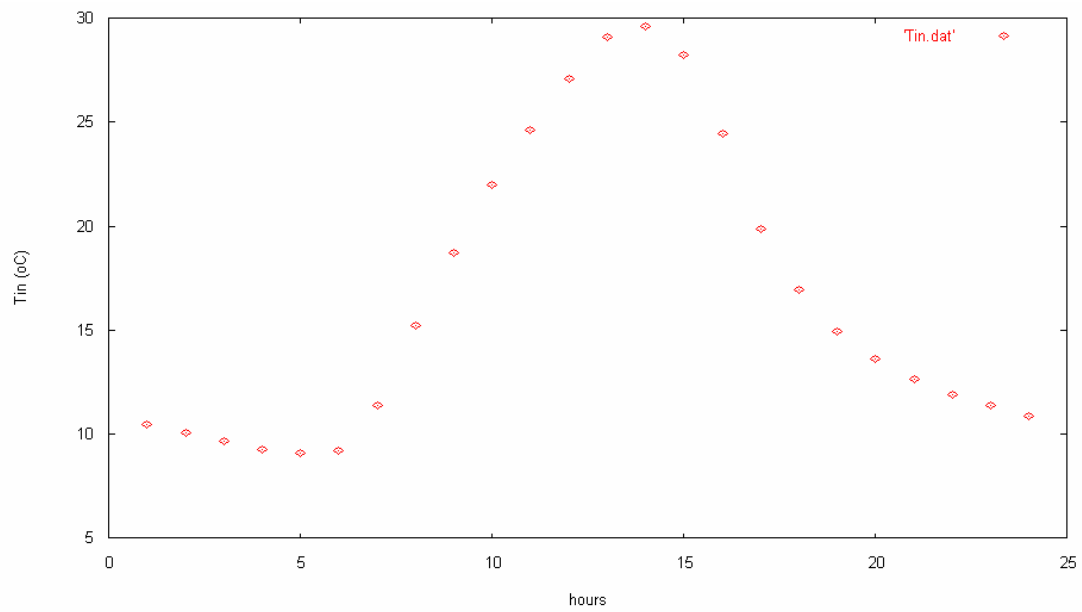
Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM συναρτήσει της θερμοκρασίας του



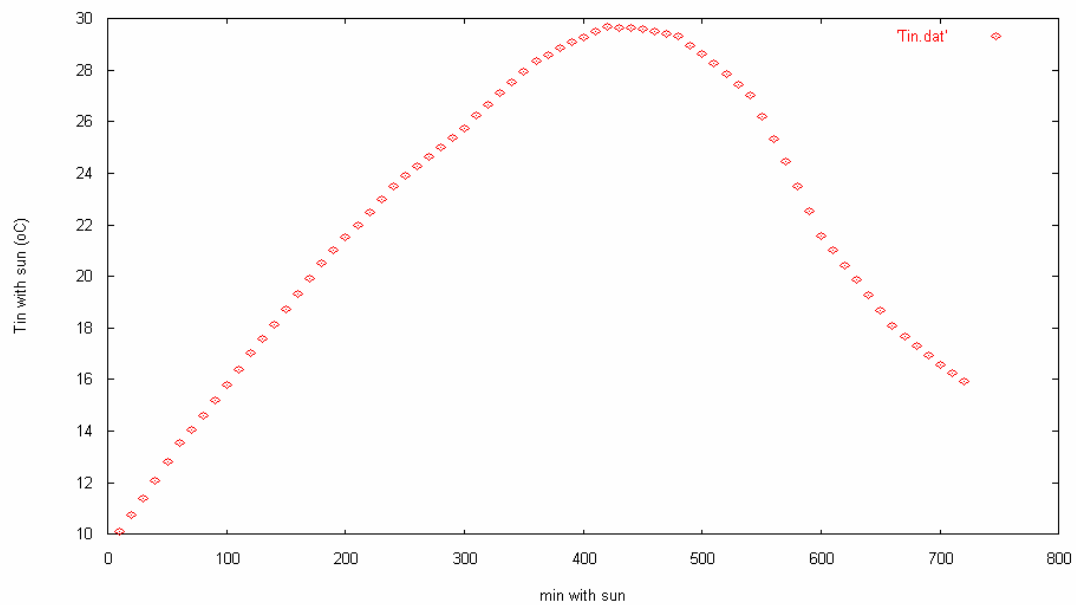
Εικόνα 128: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM συναρτήσει της θερμοκρασίας του

16.6.3 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων για την δεύτερη παραμετρική μελέτη για τον μήνα Φεβρουάριο (σοβάς-τούβλο-μόνωση-τούβλο-σοβάς)

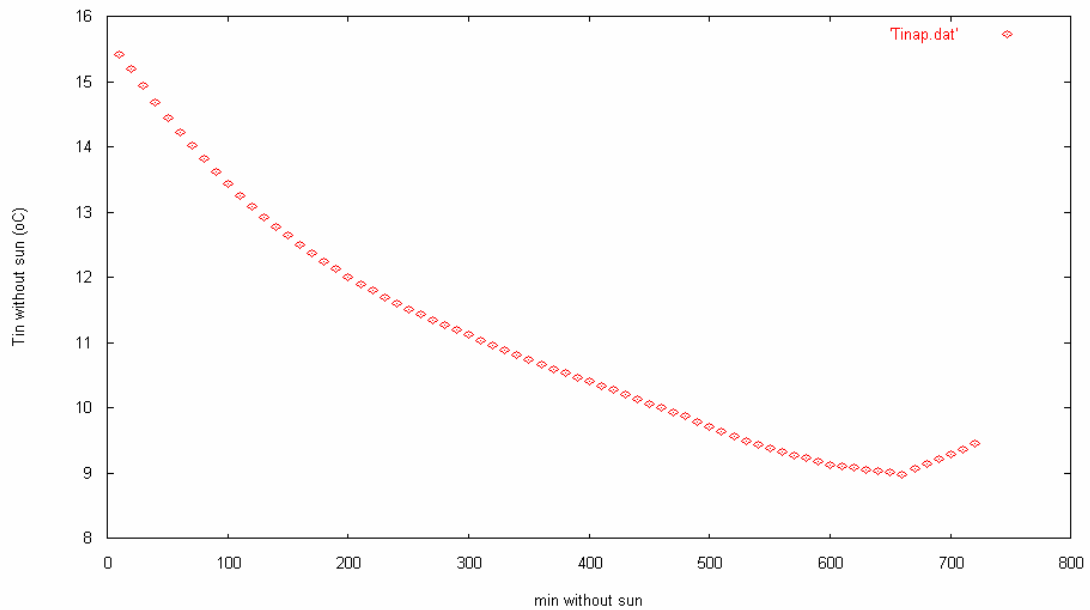
Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου



Εικόνα 129: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου κατά την διάρκεια του 24ωρου



Εικόνα 130: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου συναρτήσει των λεπτών κατά την διάρκεια των οποίων υπάρχει ηλιοφάνεια (7.00- 18.00)



Εικόνα 131: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου συναρτήσει των λεπτών κατά την διάρκεια των οποίων δεν υπάρχει ηλιοφάνεια (19.00-6.00)

Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος του τοίχου κατά την διάρκεια του

24 ωρου

Η κατανομή των υλικών κατά μήκος του τοίχου x (m) είναι η εξής:

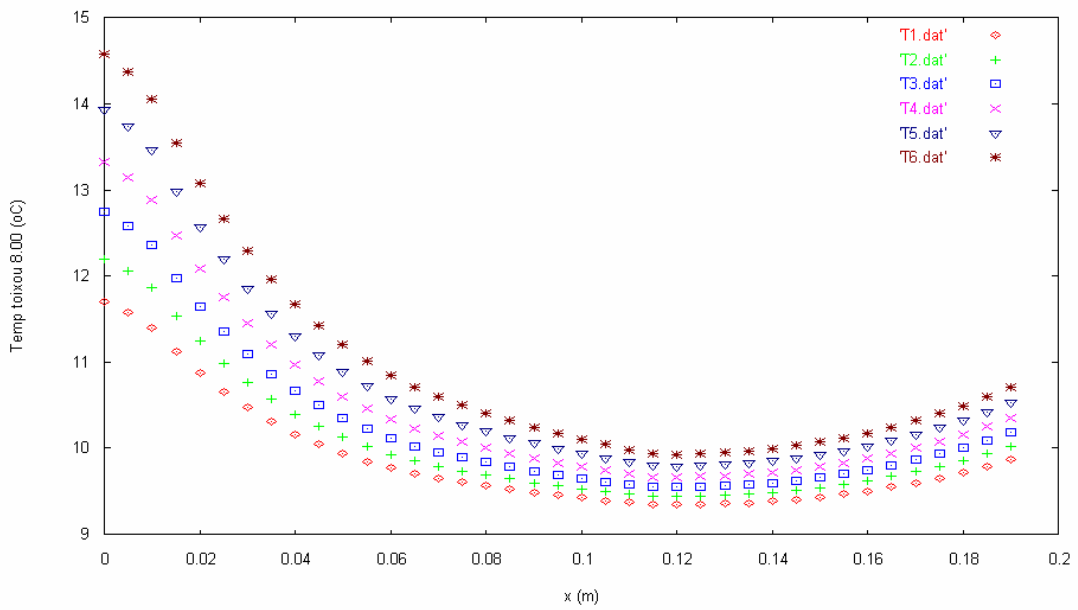
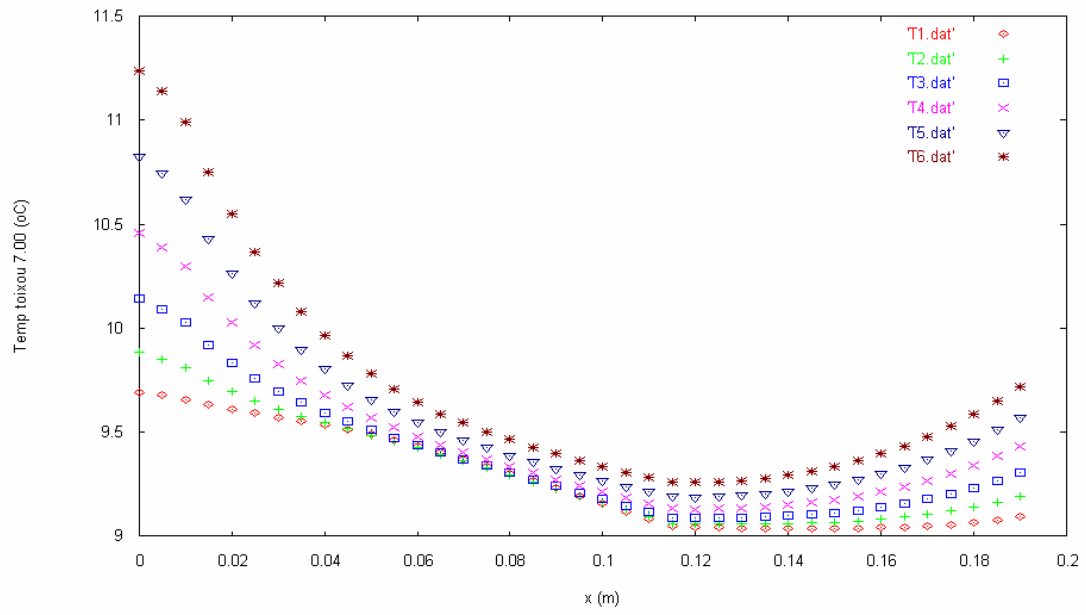
Σοβάς :0-0.01 m

Τούβλο: 0.01-0.07 m

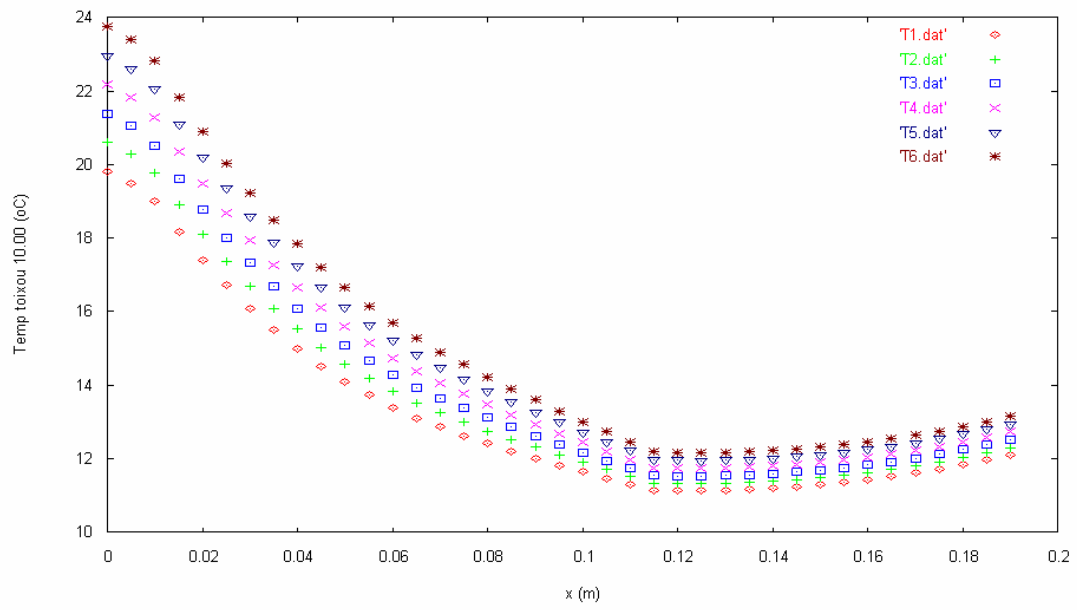
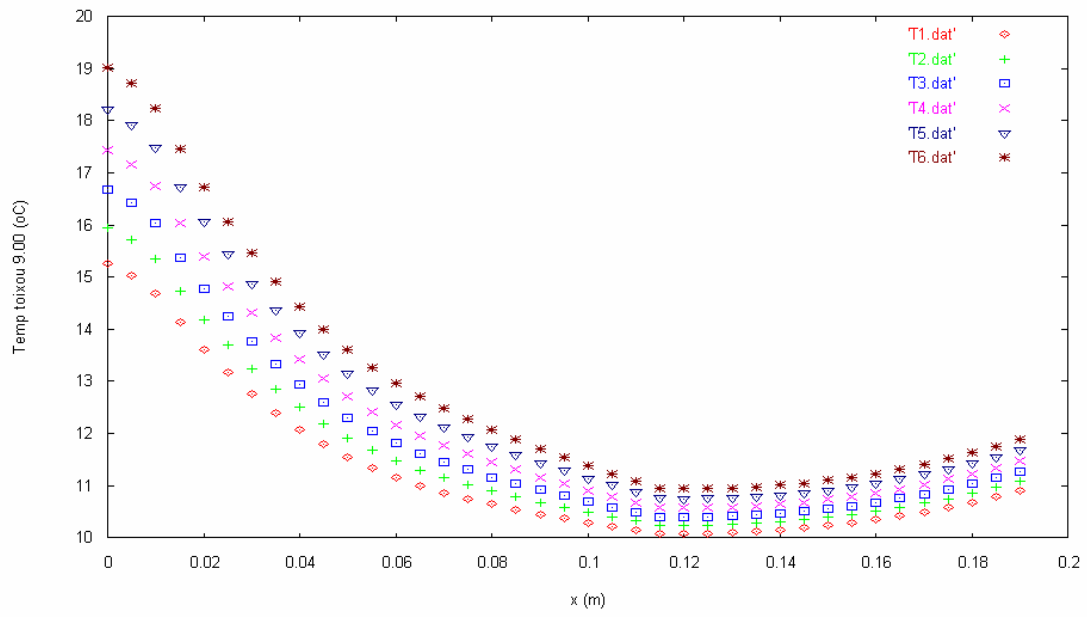
Μόνωση: 0.07-0.12 m

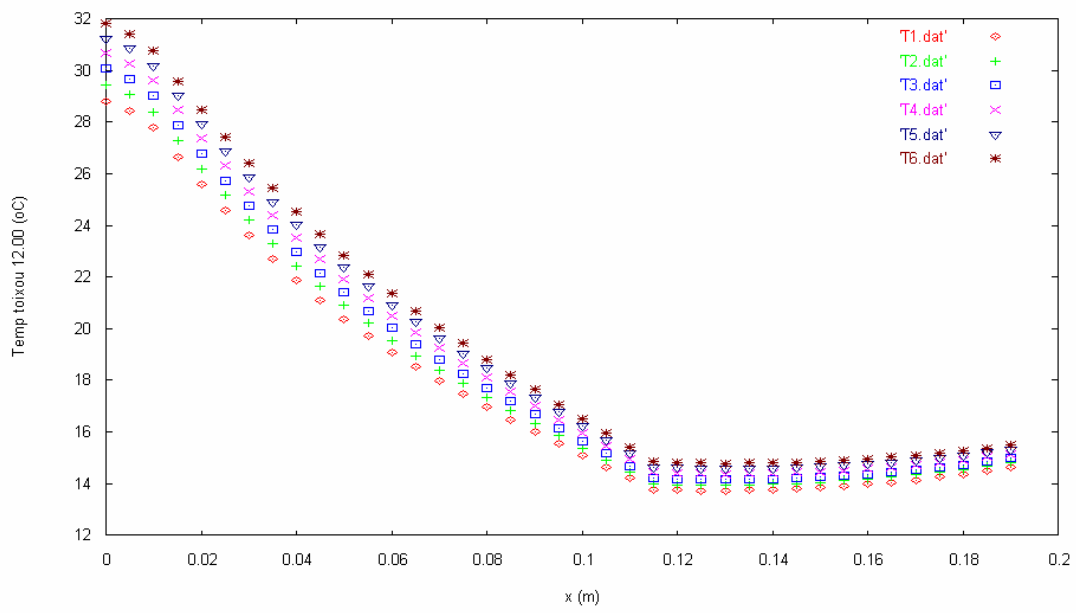
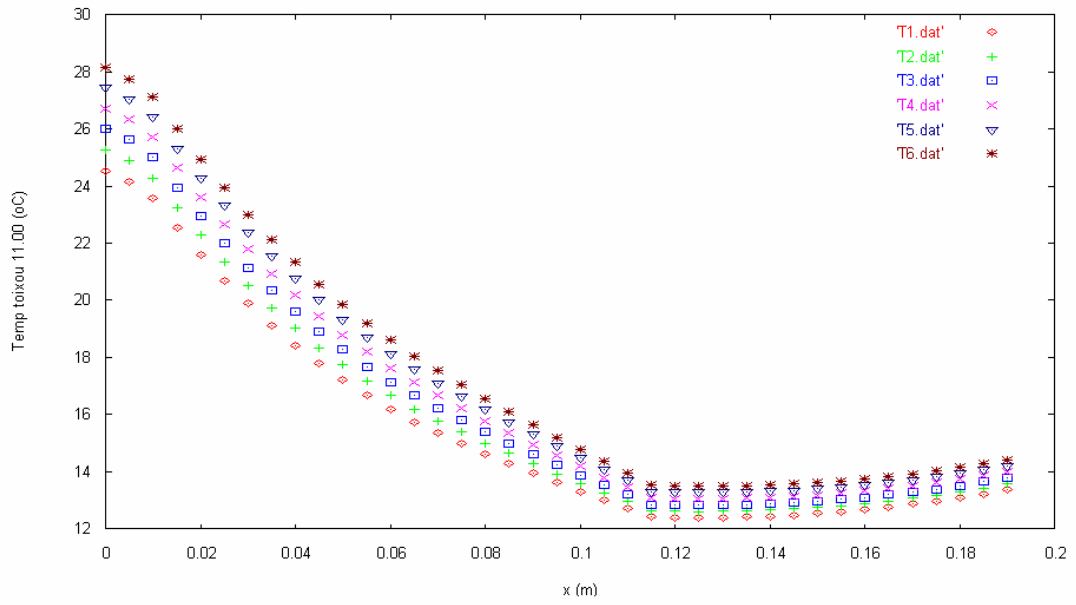
Τούβλο : 0.12-0.18 m

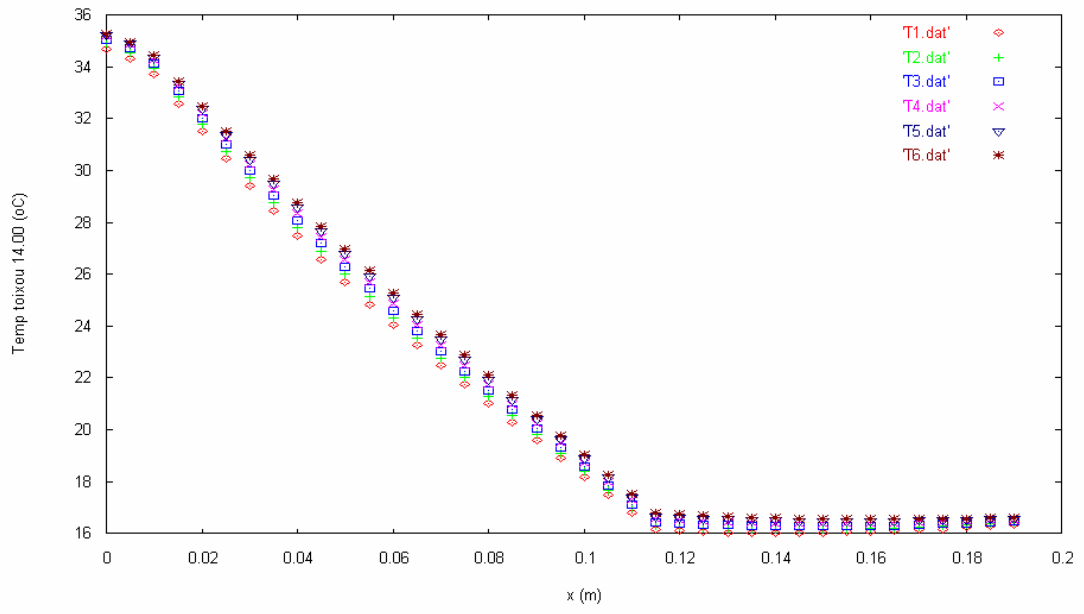
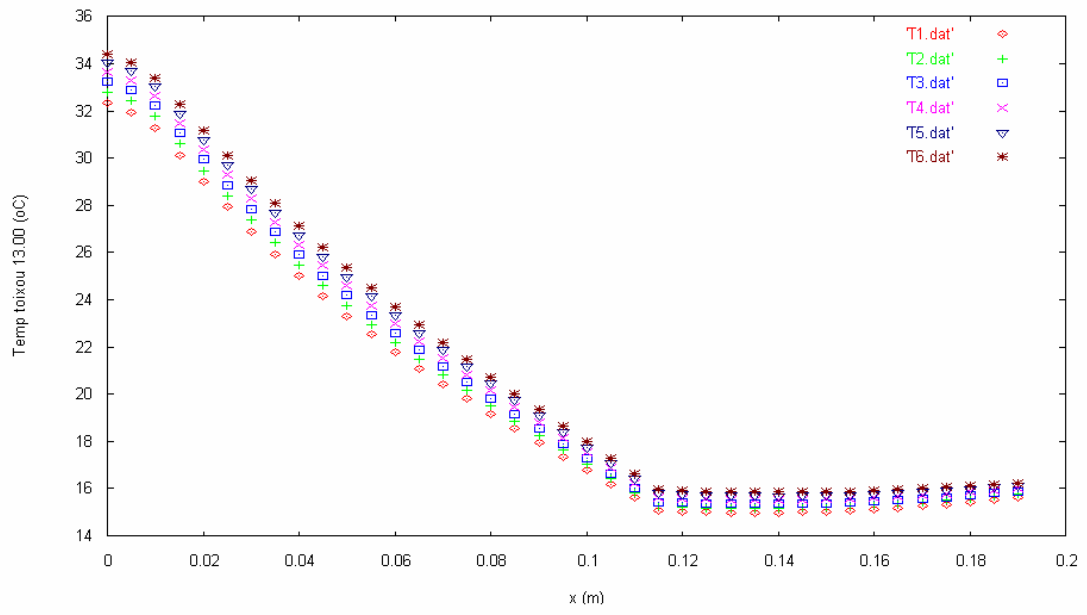
Σοβάς: 0.18-0.19 m

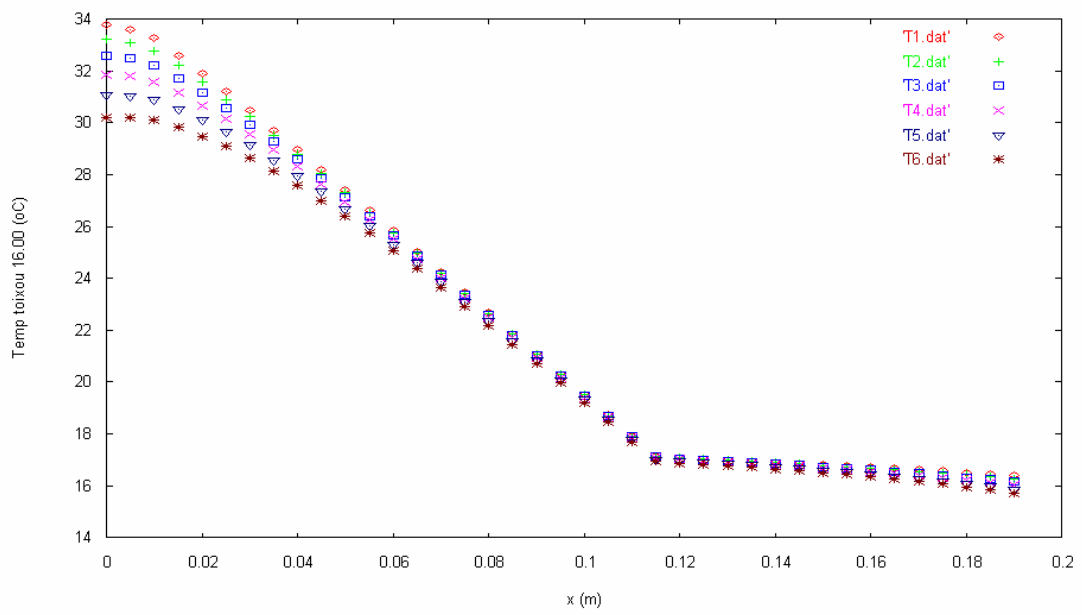
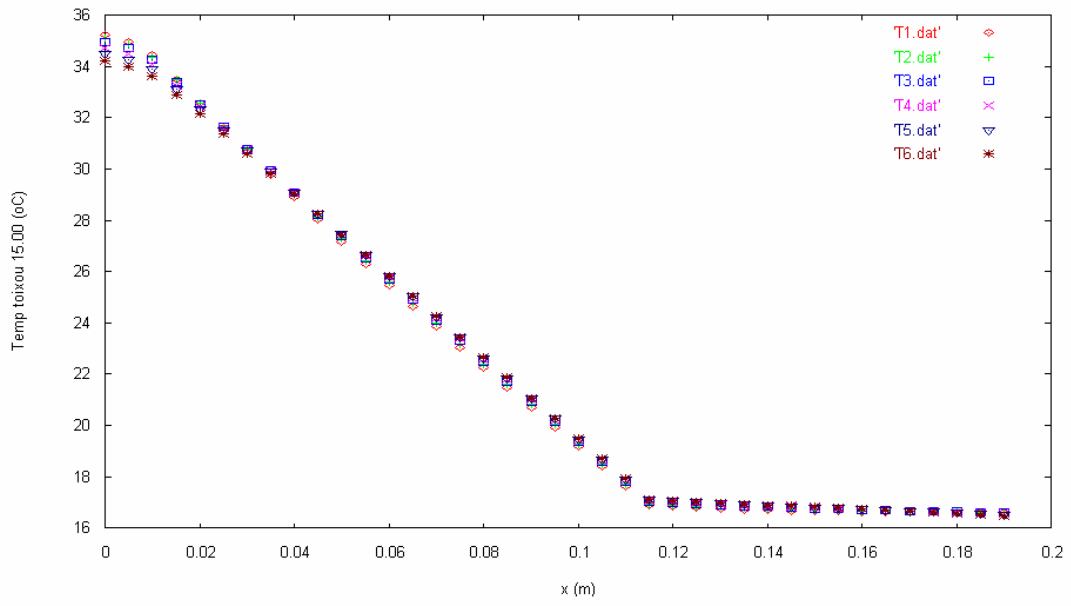


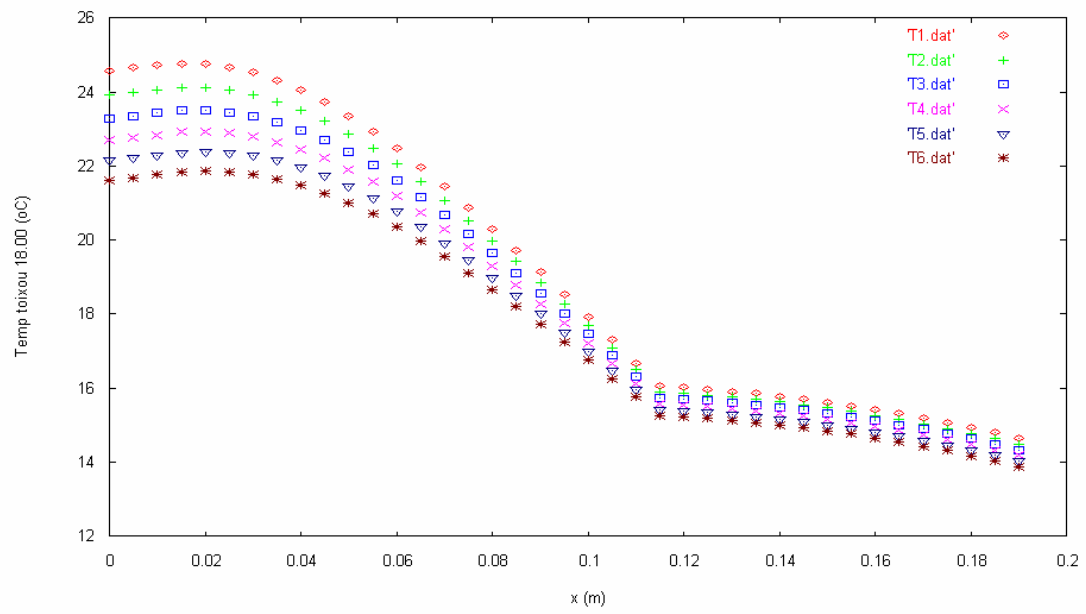
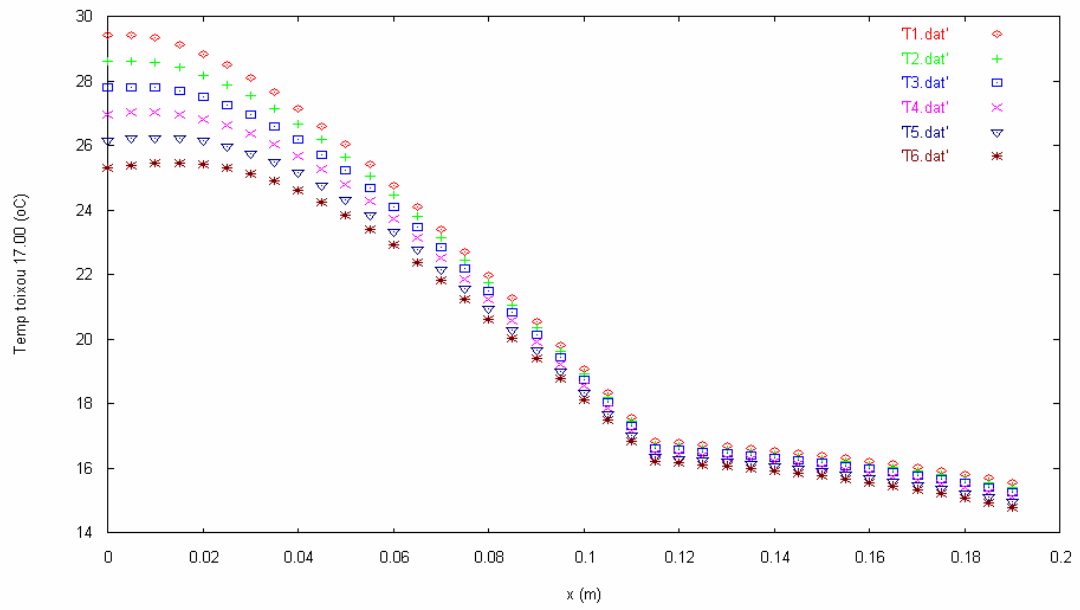
Εικόνα 132:Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος του τοίχου κατά την διάρκεια του 24 ωρου, ακολουθούν τα διαγράμματα των υπόλοιπων ωρών

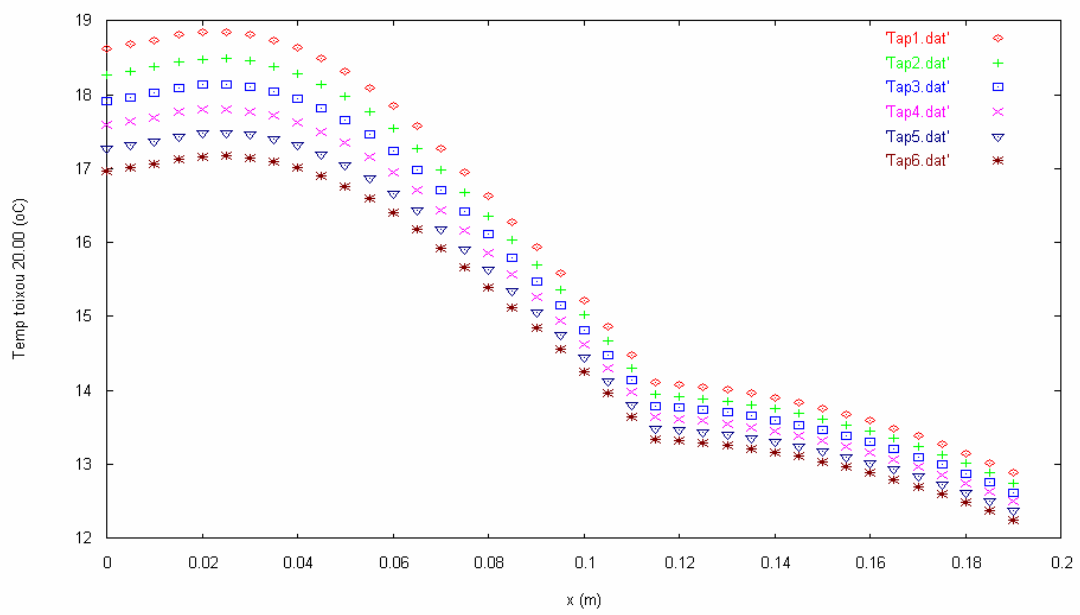
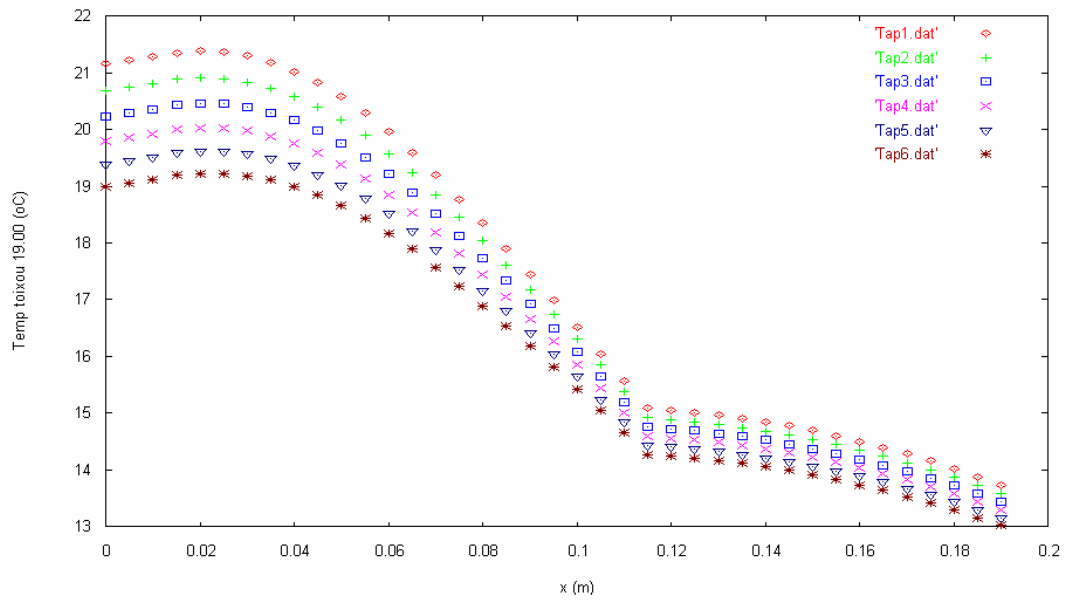


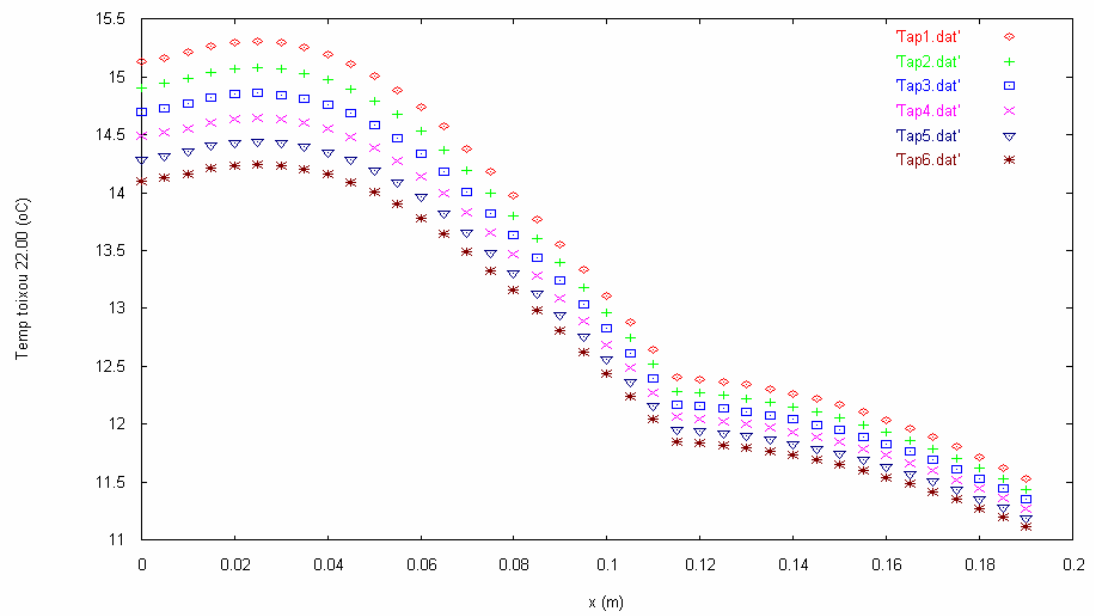
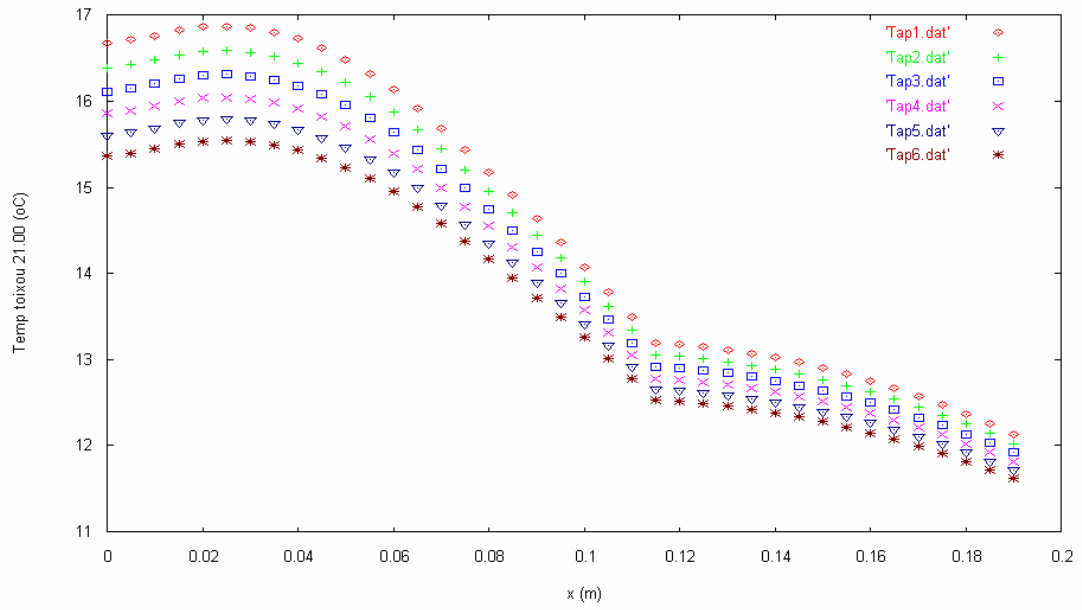


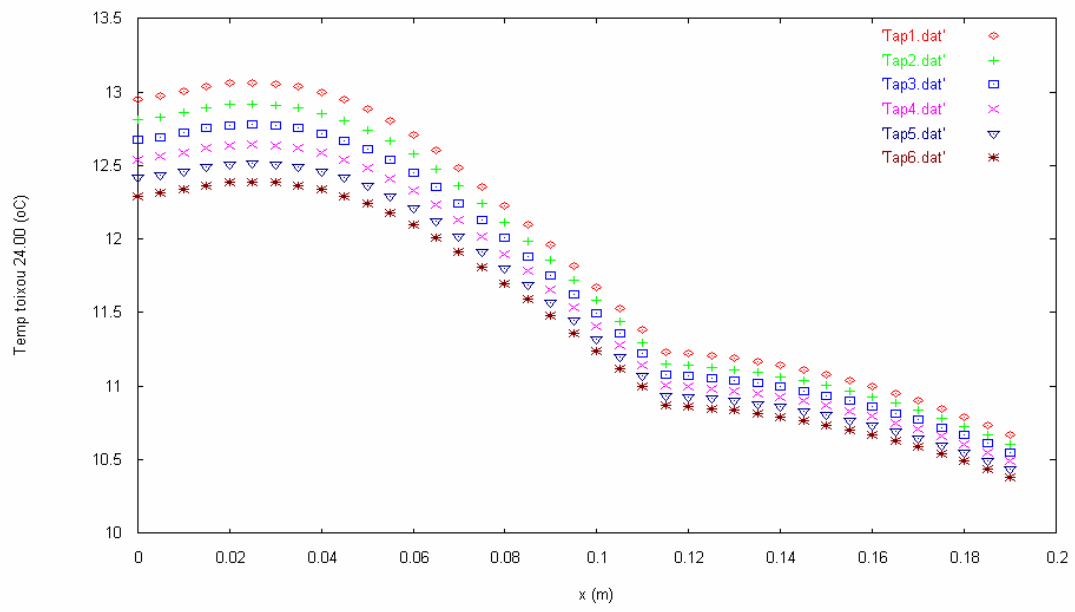
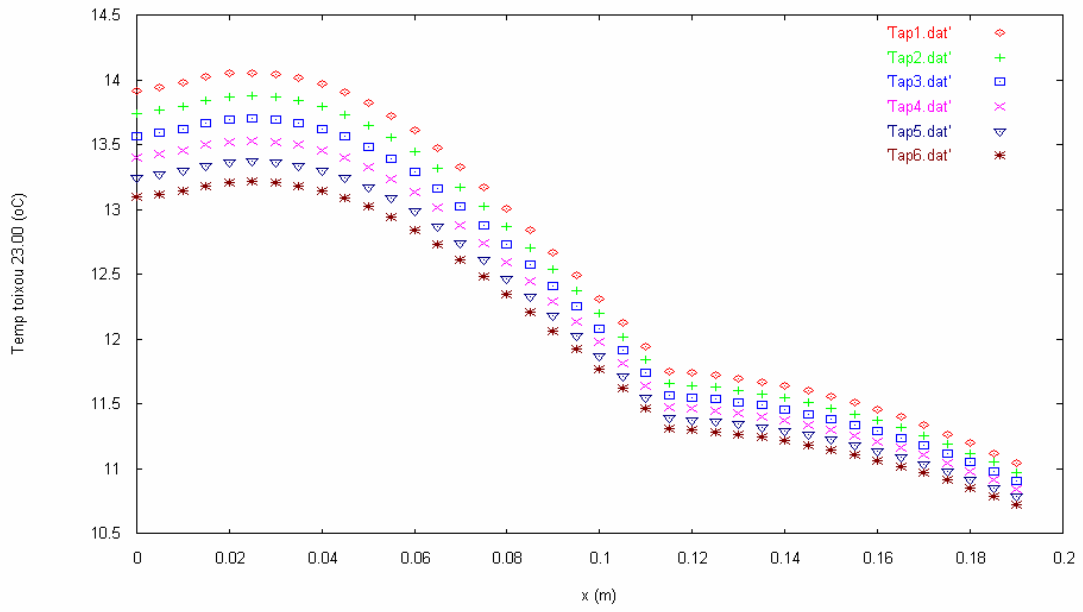


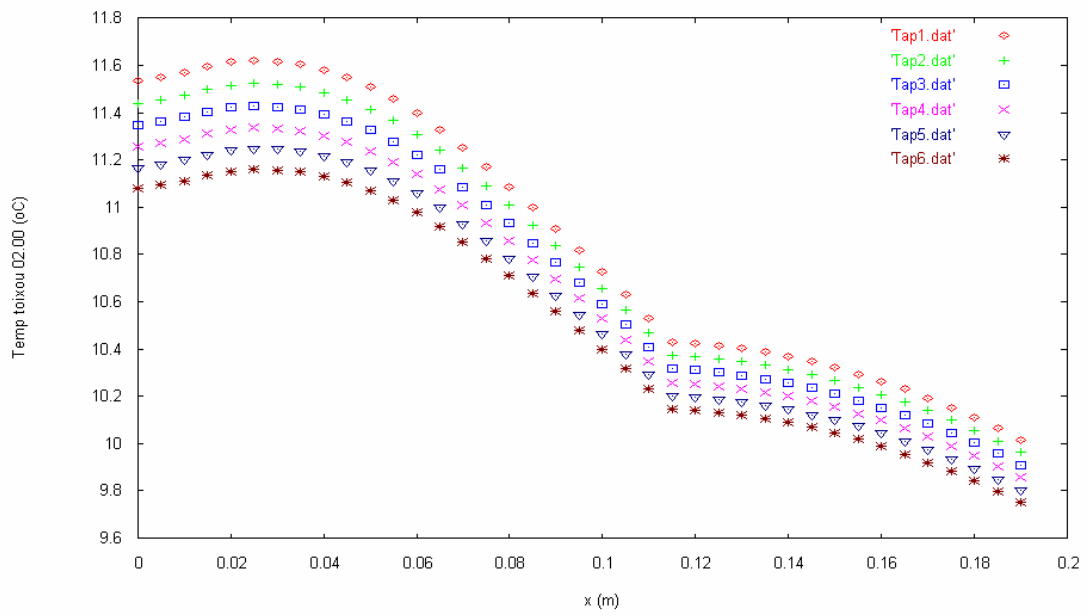
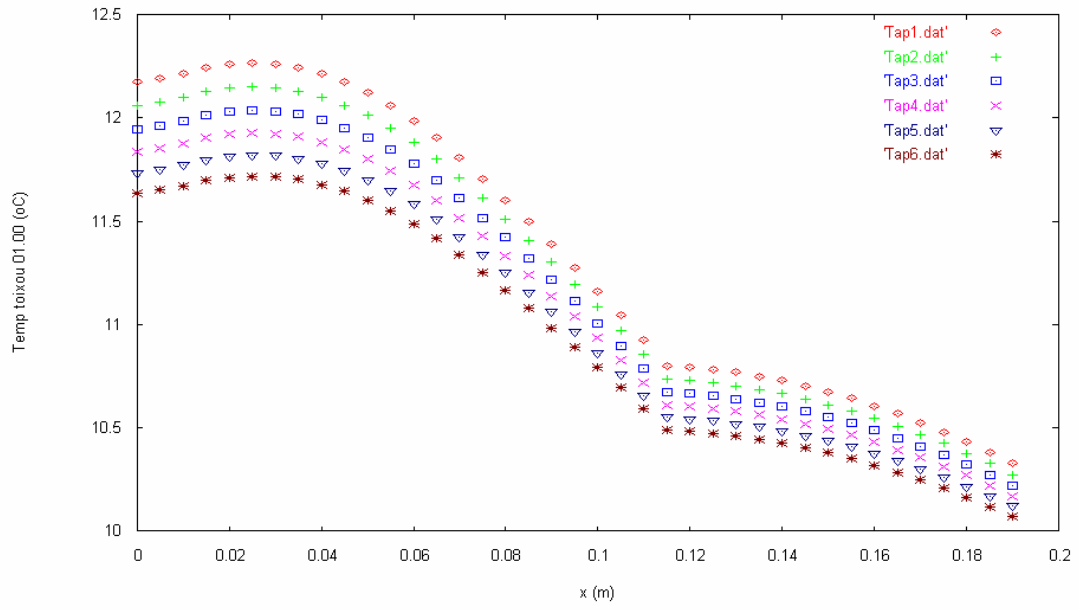


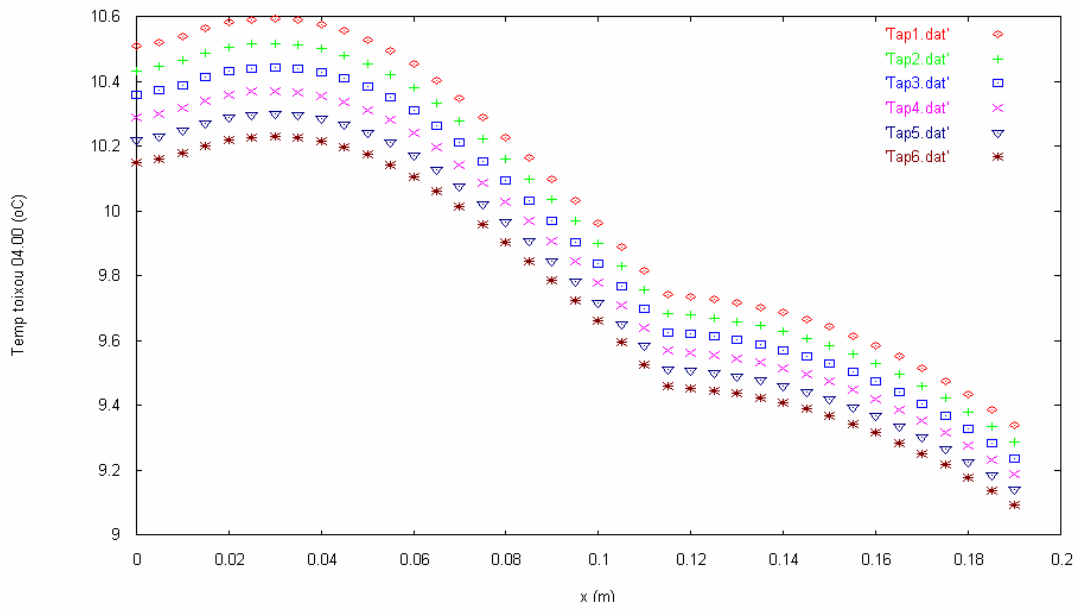
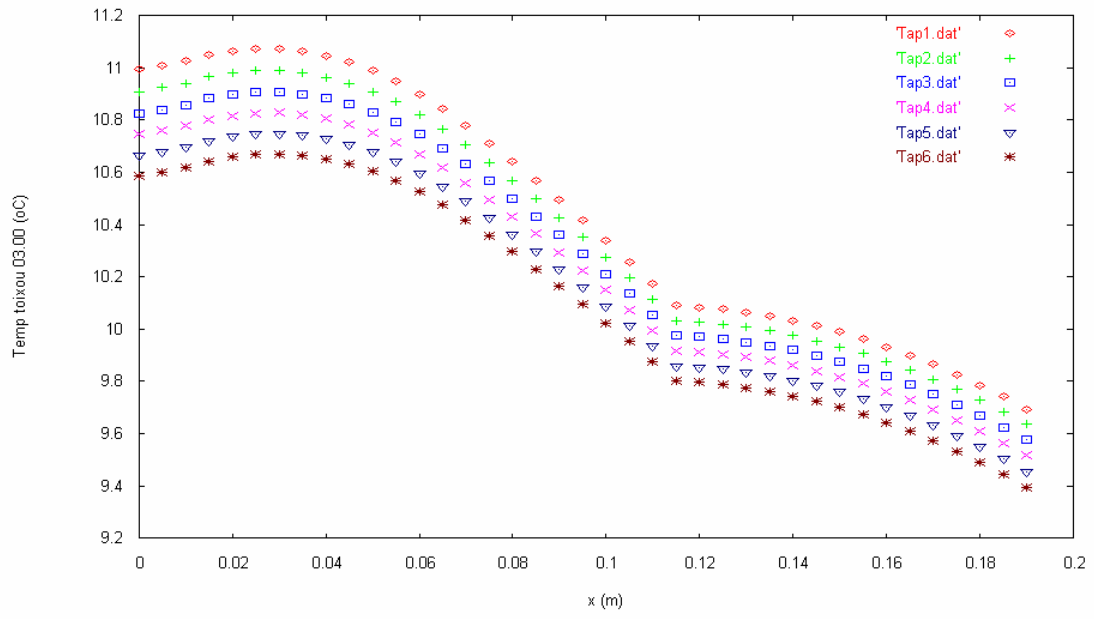


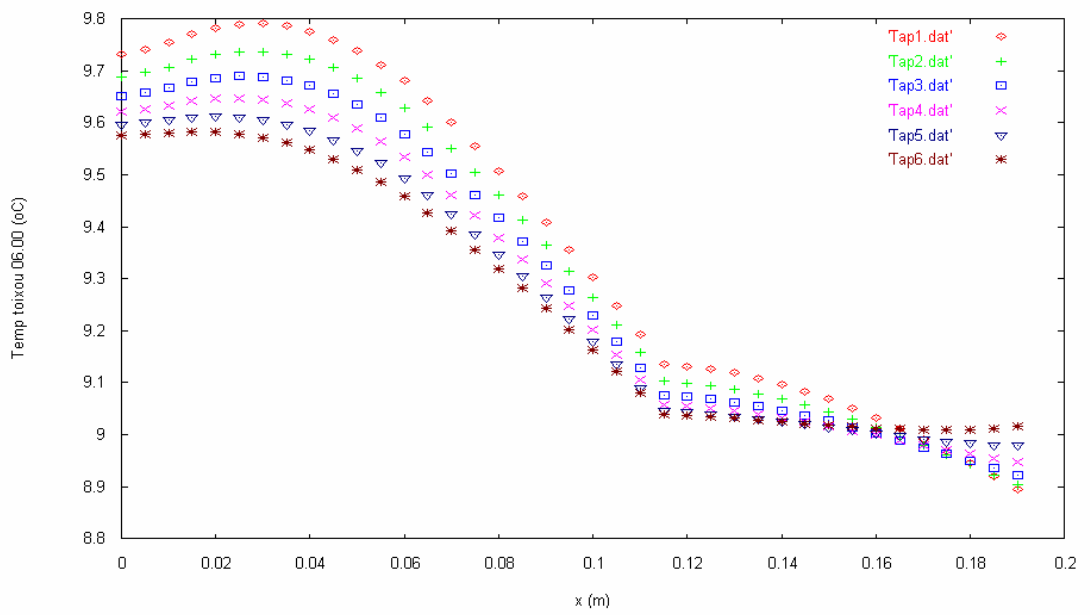
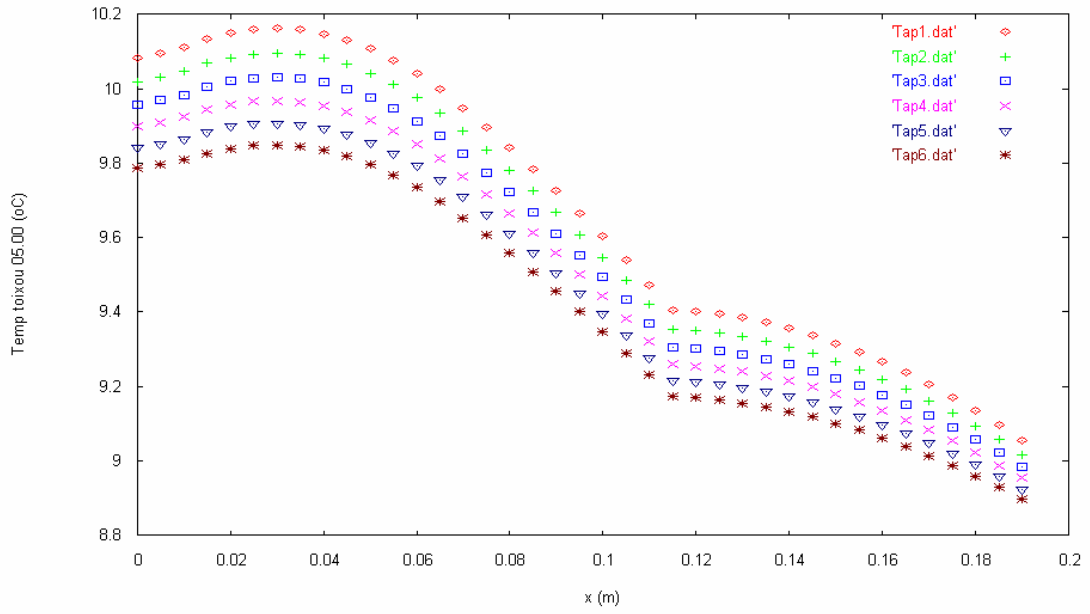












16.6.4 Σύγκριση των αποτελεσμάτων και συμπεράσματα για τον μήνα Φεβρουάριο

Η εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου για την περίπτωση τη κλασσικής κατανομής του τοίχου με PCM, κυμαίνεται ανάμεσα στις τιμές 32-16° C , όταν το αντίστοιχο εύρος για την πρώτη παραμετρική μελέτη είναι 32-13° C και για την δεύτερη, χωρίς το PCM, 30-10° C. Τα αποτελέσματα αυτά μεταβάλλονται ανάλογα προς τους άλλους μήνες που έχουν ήδη παρουσιασθεί, μόνο που οι τιμές τους για τον Φεβρουάριο είναι πιο υψηλές, γεγονός που δικαιολογείται από την σταδιακή αύξηση της εξωτερικής θερμοκρασίας, καθώς απομακρυνόμαστε από τον χειμώνα.

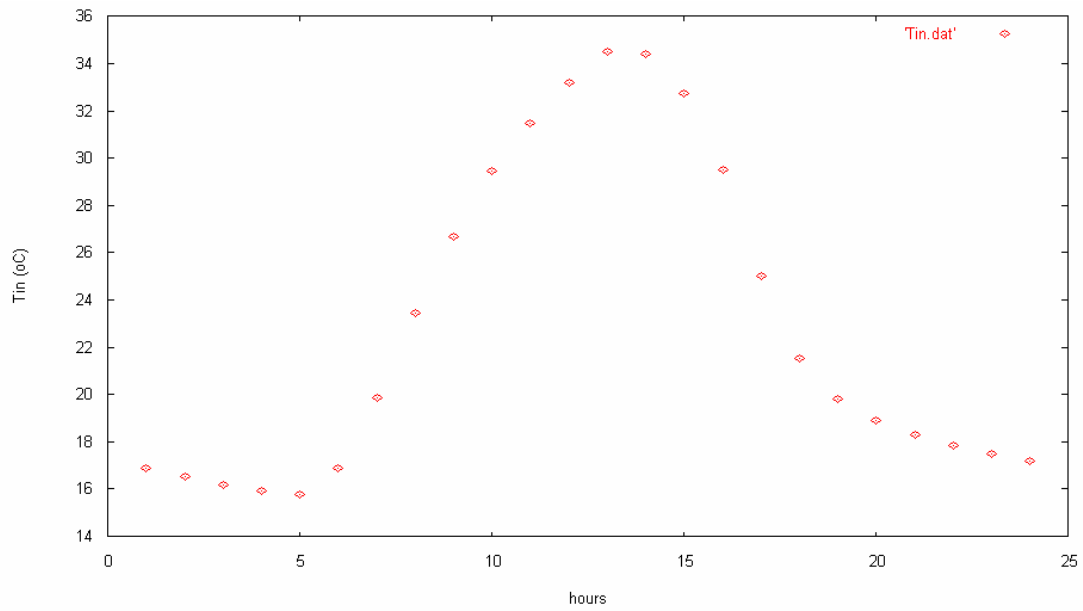
Επιπλέον, η θερμοκρασία κατά μήκος του τοίχου για την περίπτωση της κλασσικής διάταξης του τοίχου είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τις άλλες δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη παραμετρική μελέτη , όπως φαίνεται από το διάγραμμα του Cr, το PCM τήκεται και στερεοποιείται πλήρως, και επομένως σε αυτή την περίπτωση εκμεταλλευόμαστε στο έπακρο τις ιδιότητες του, μιας και επηρεάζεται πολύ πιο έντονα από τις μεταβολές της εσωτερικής θερμοκρασίας. Το γεγονός , όμως, αυτό οδηγεί και σε μεγαλύτερες απώλειες θερμότητας από το PCM, με αποτέλεσμα το θερμοκρασιακό εύρος να αυξάνεται , και οι χαμηλές θερμοκρασίες του δωματίου να είναι αρκετά χαμηλότερες συγκριτικά με την κλασσική διάταξη του τοίχου, πράγμα που αποκλίνει από τον σκοπό της εργασίας αυτής.

Επομένως, και για τον μήνα Φεβρουάριο επιλέγεται ως καλύτερη διάταξη η κλασσική με PCM.

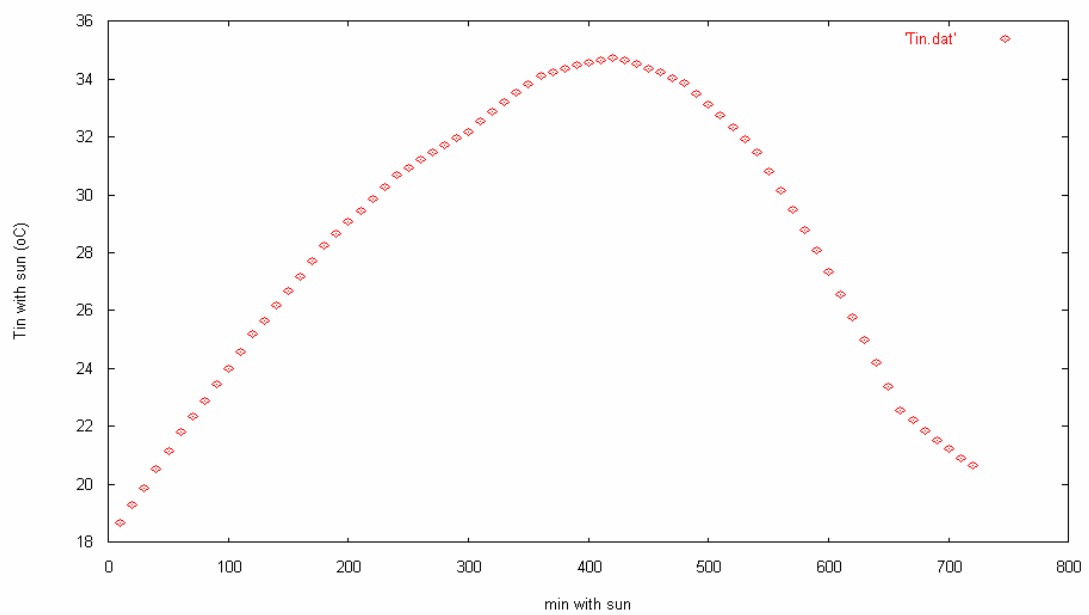
16.7 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων που προκύπτουν από την μελέτη για τον μήνα Μάρτιο

16.7.1. Παρουσίαση των αποτελεσμάτων για την κλασσική διάταξη του τοίχου με PCM για τον μήνα Μάρτιο (σοβάς-τούβλο-PCM-μόνωση-τούβλο-σοβάς)

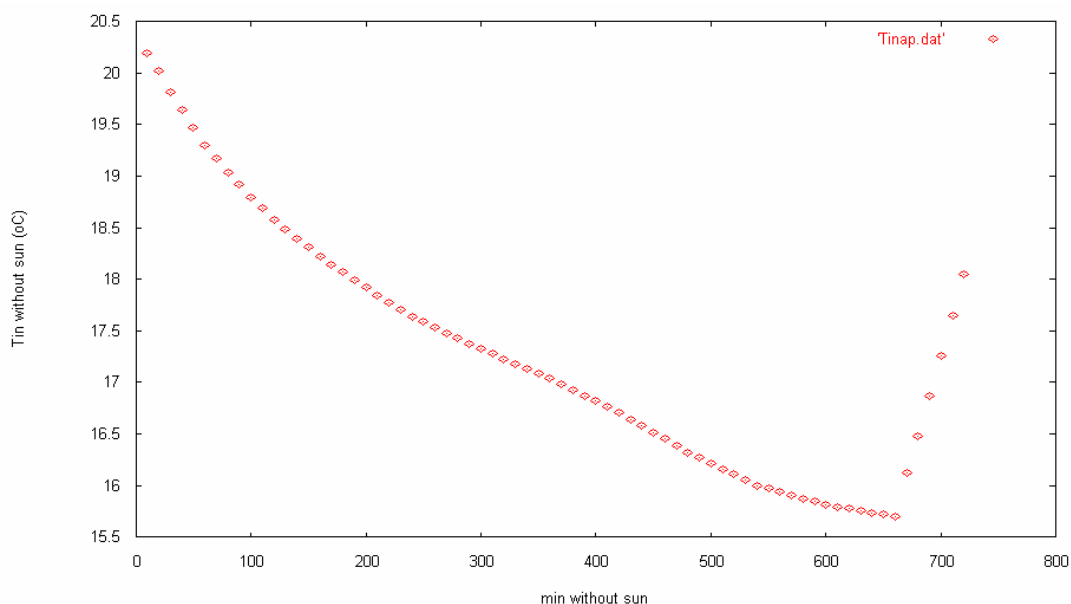
Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου



Εικόνα 133:Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου κατά τη διάρκεια του 24 ωρου



Εικόνα 134:Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου συναρτήσει των λεπτών κατά την διάρκεια των οποίων υπάρχει ηλιοφάνεια (7.00-18.00)



Εικόνα 135: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου συναρτήσει των λεπτών κατά την διάρκεια των οποίων δεν υπάρχει ηλιοφάνεια (19.00-6.00)

Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος του τοίχου κατά την διάρκεια του 24 ωρου

Η κατανομή των υλικών κατά μήκος του τοίχου x (m) είναι η εξής :

Σοβάς: 0-0.01 m

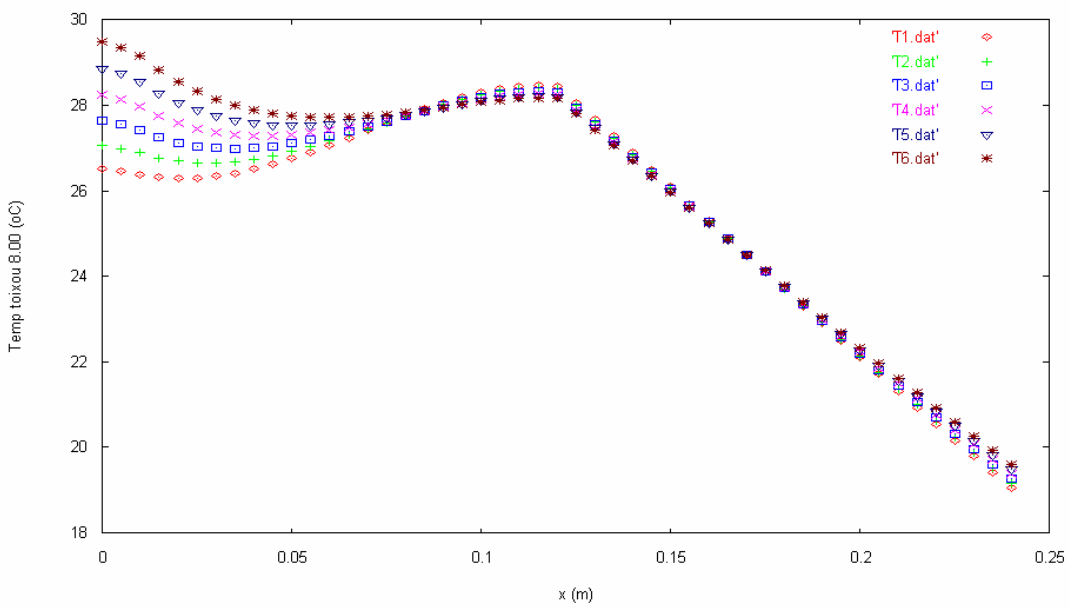
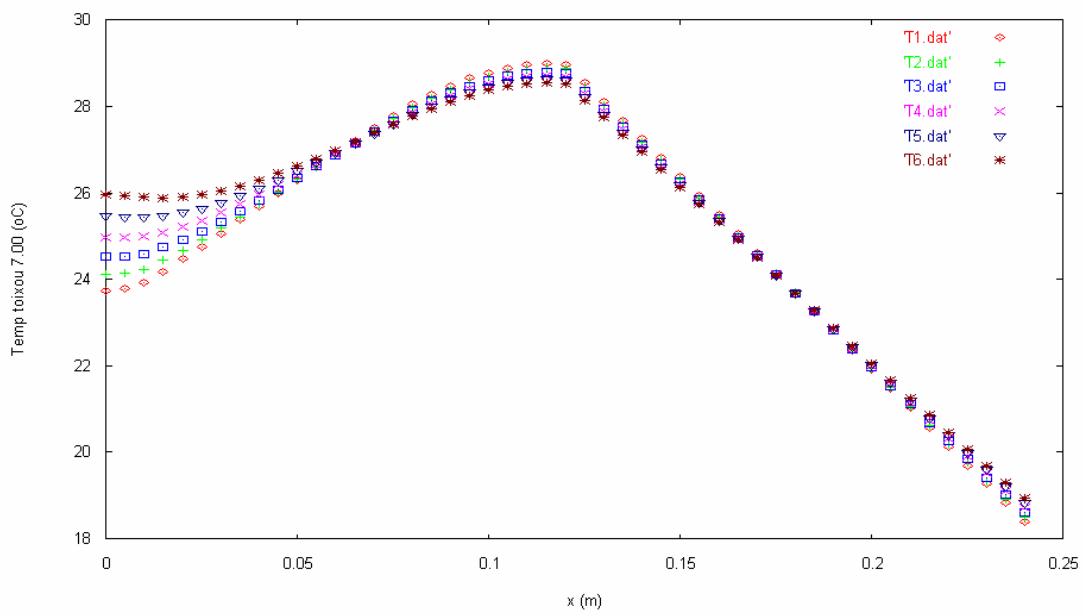
Τούβλο: 0.01-0.07 m

PCM: 0.07-0.12 m

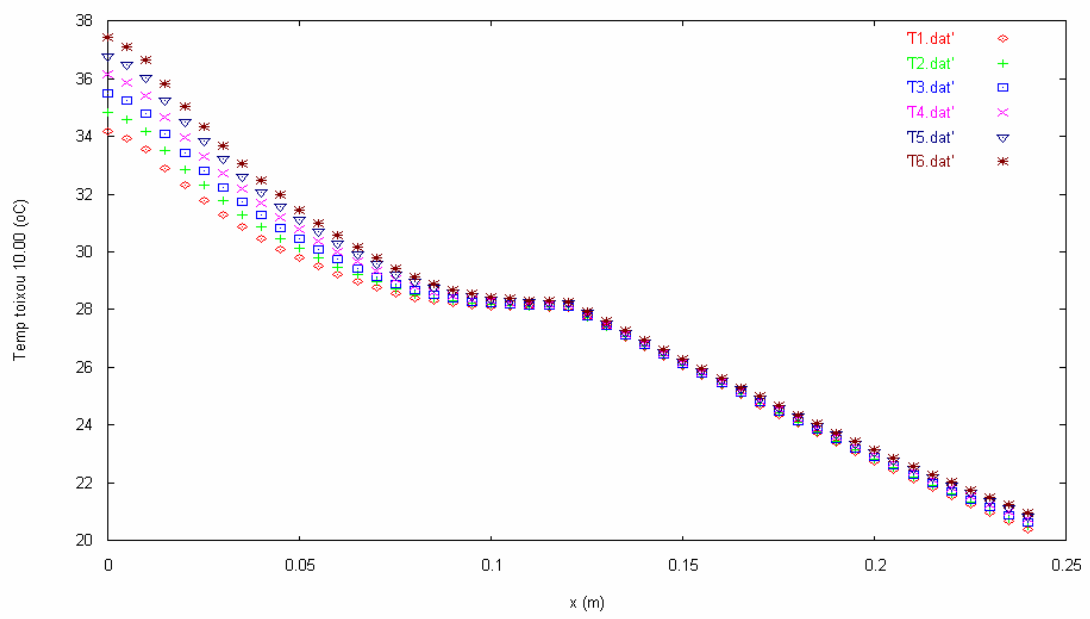
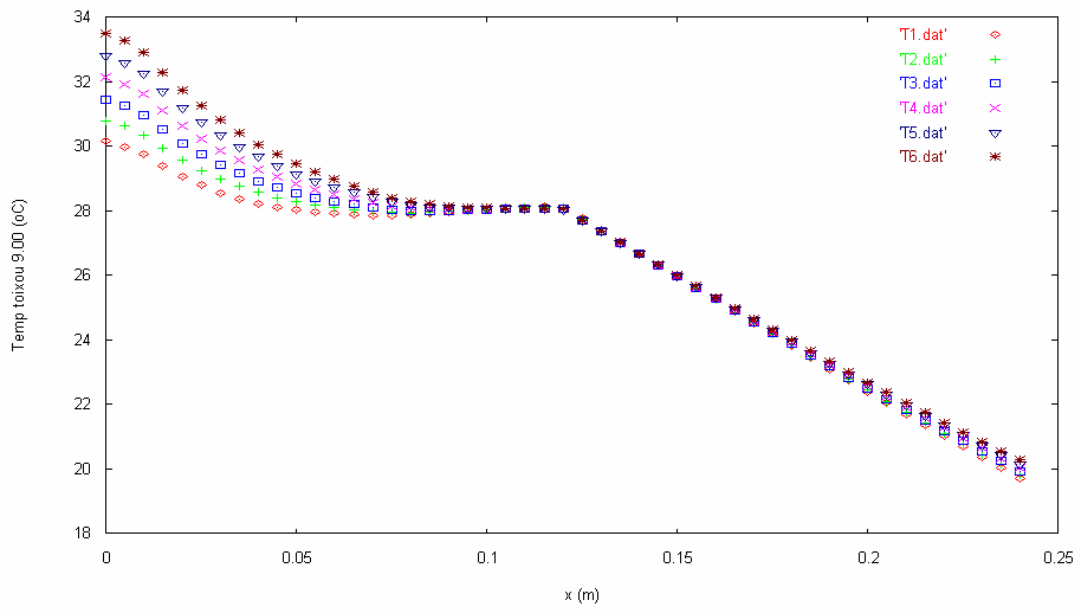
Μόνωση: 0.12-0.17 m

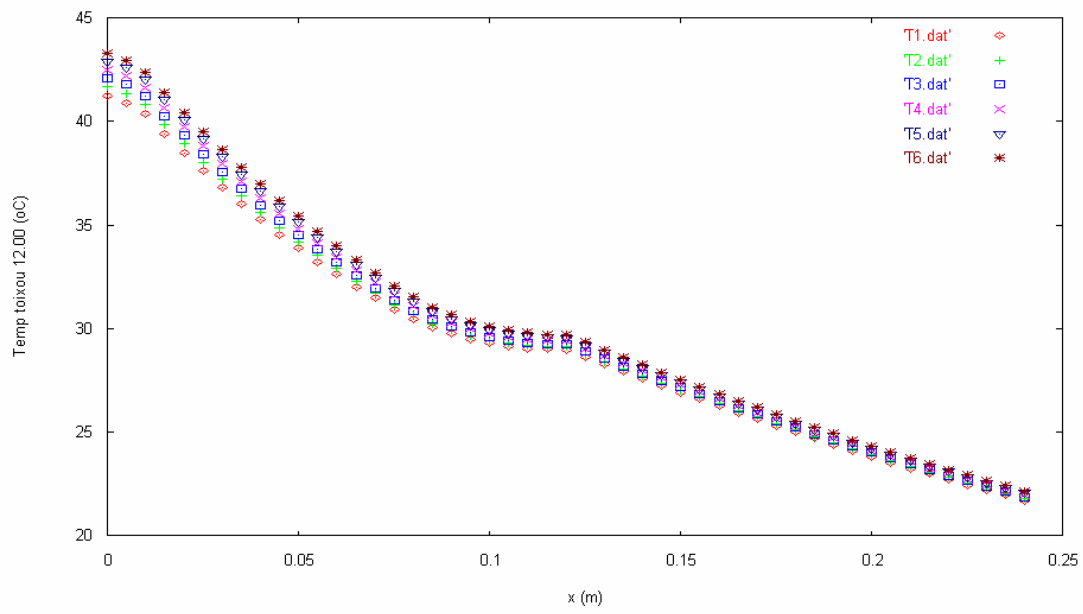
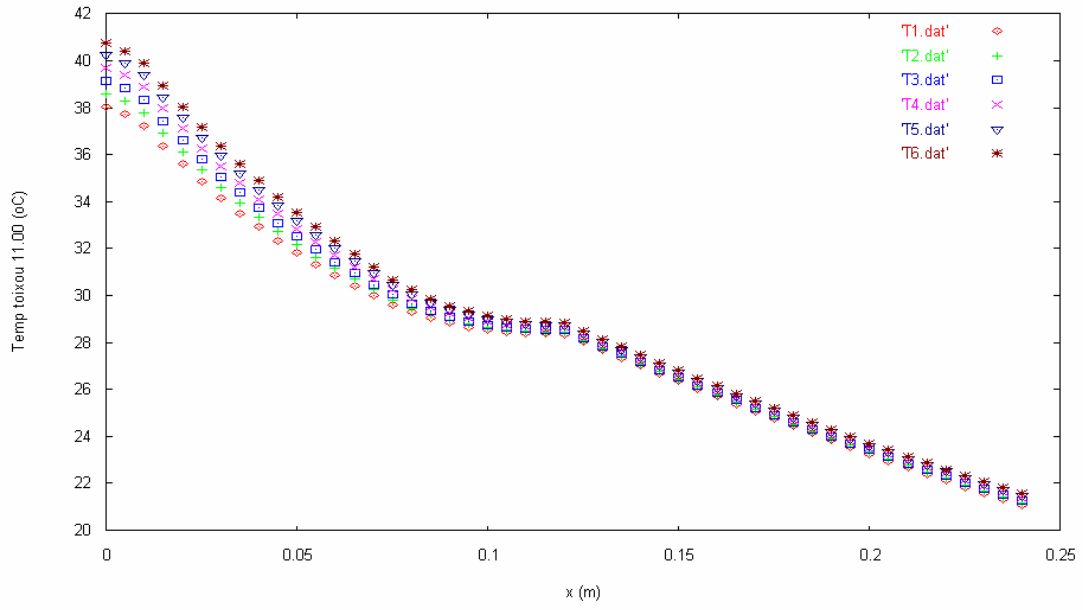
Τούβλο :0.17-0.23 m

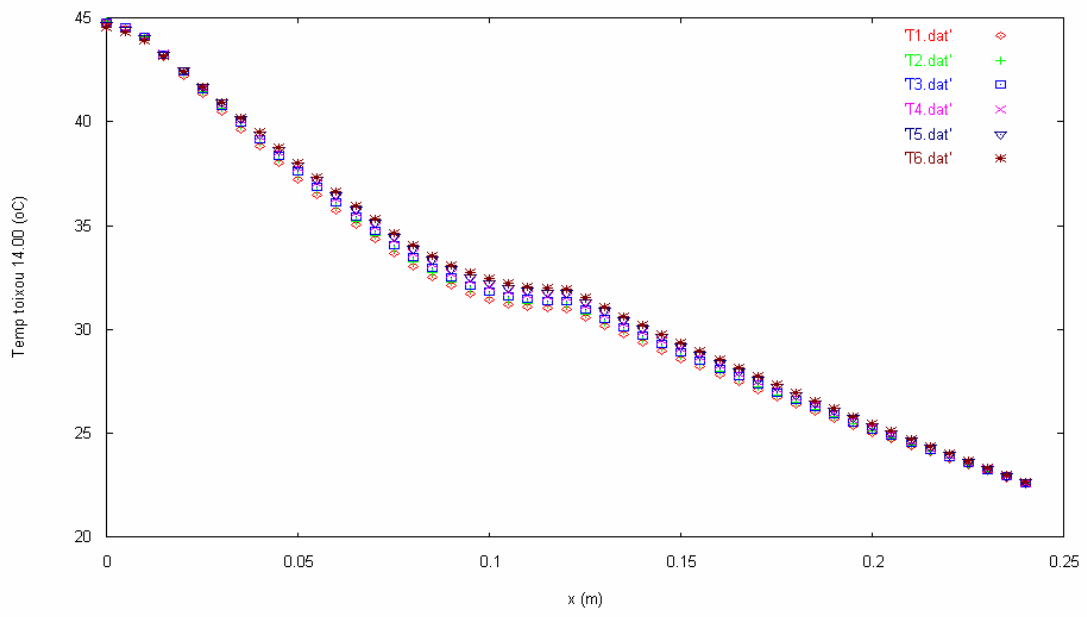
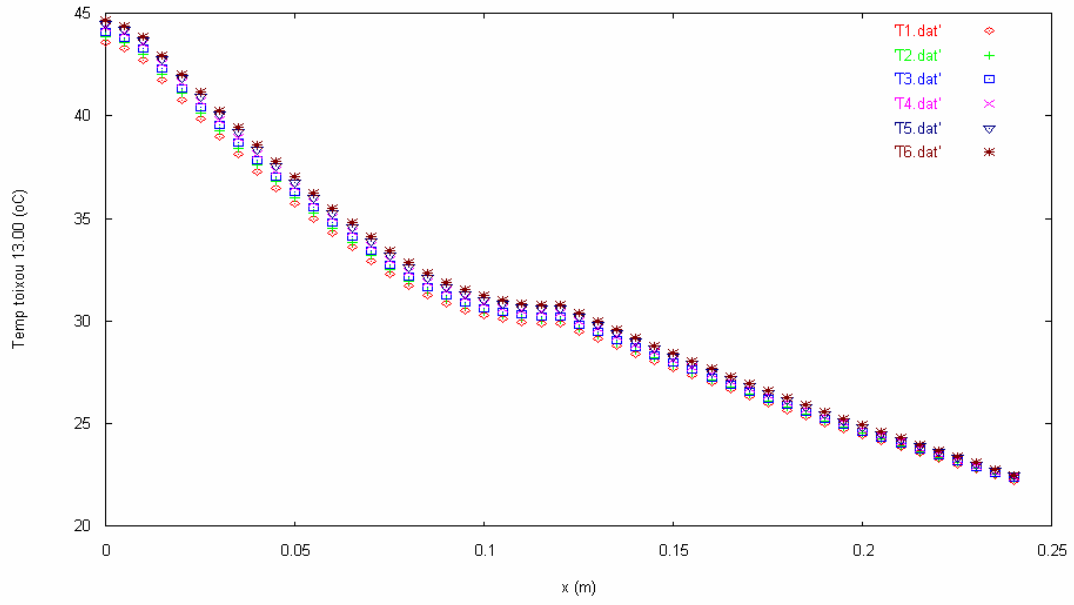
Σοβάς:0.23-0.24 m

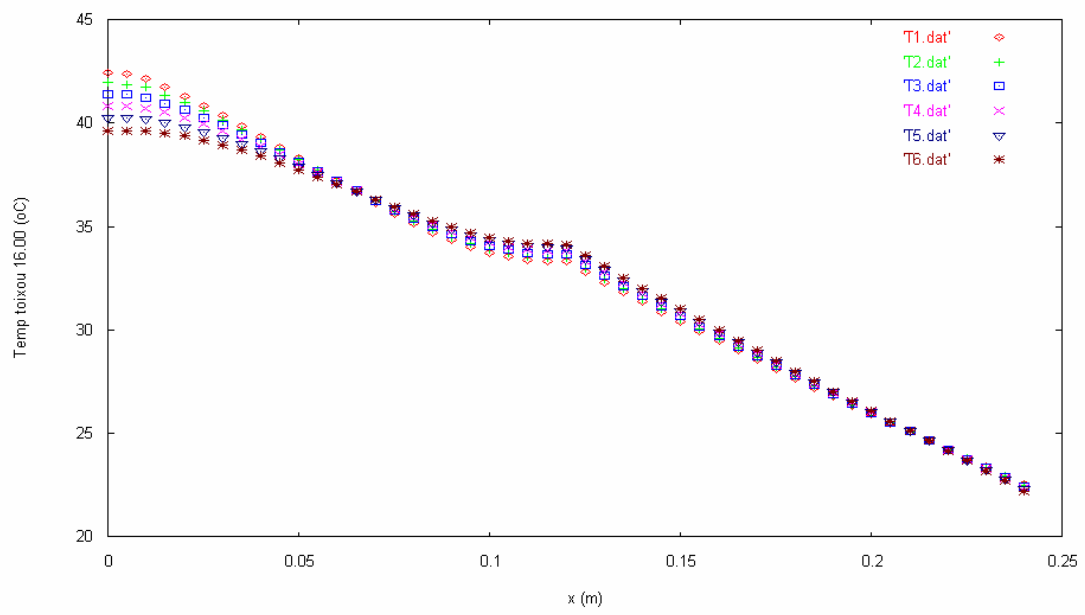
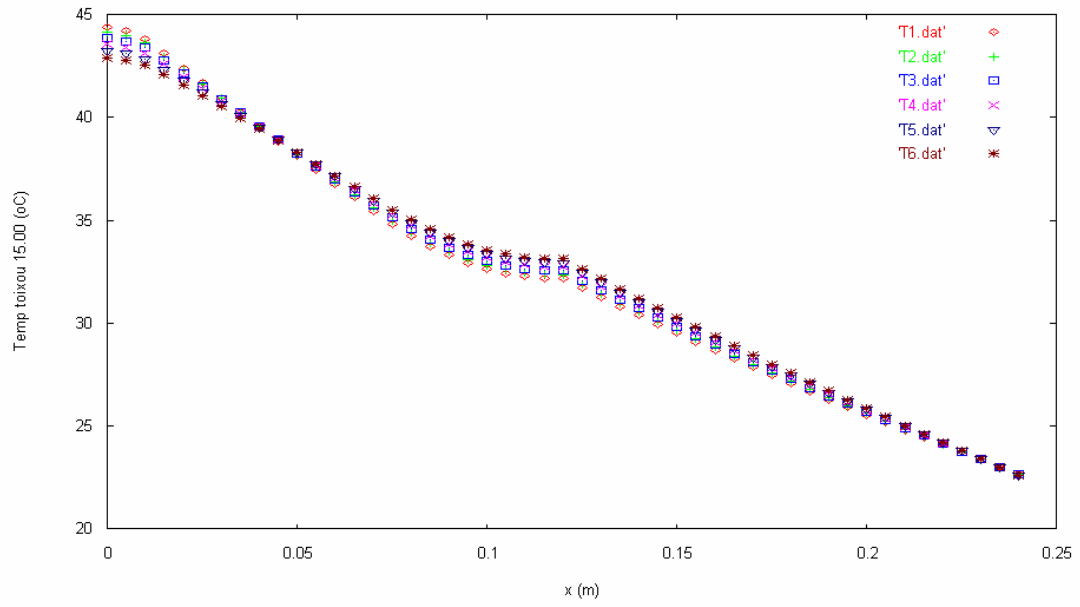


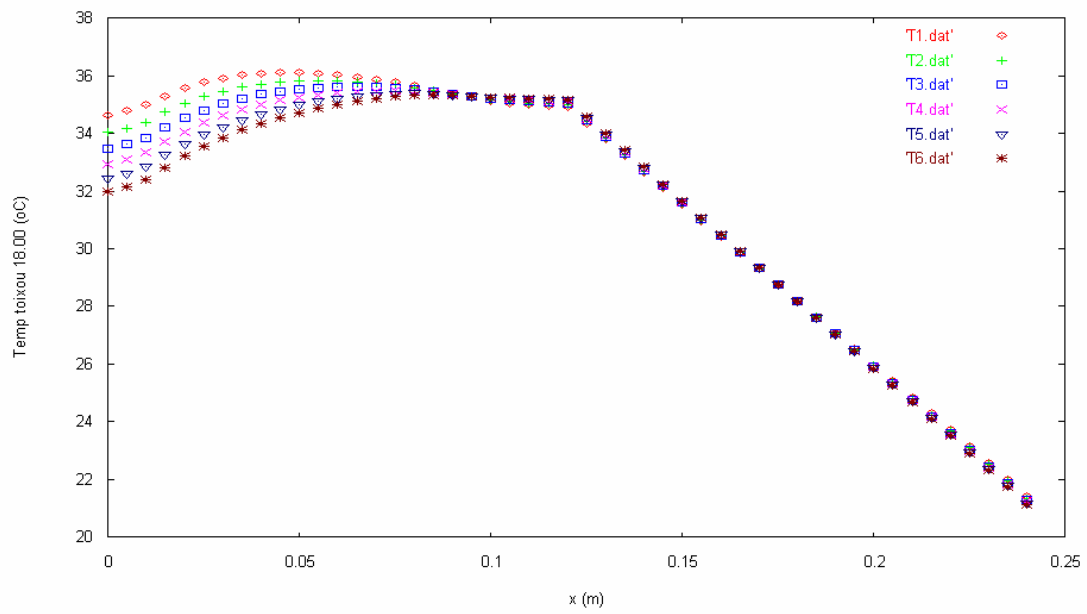
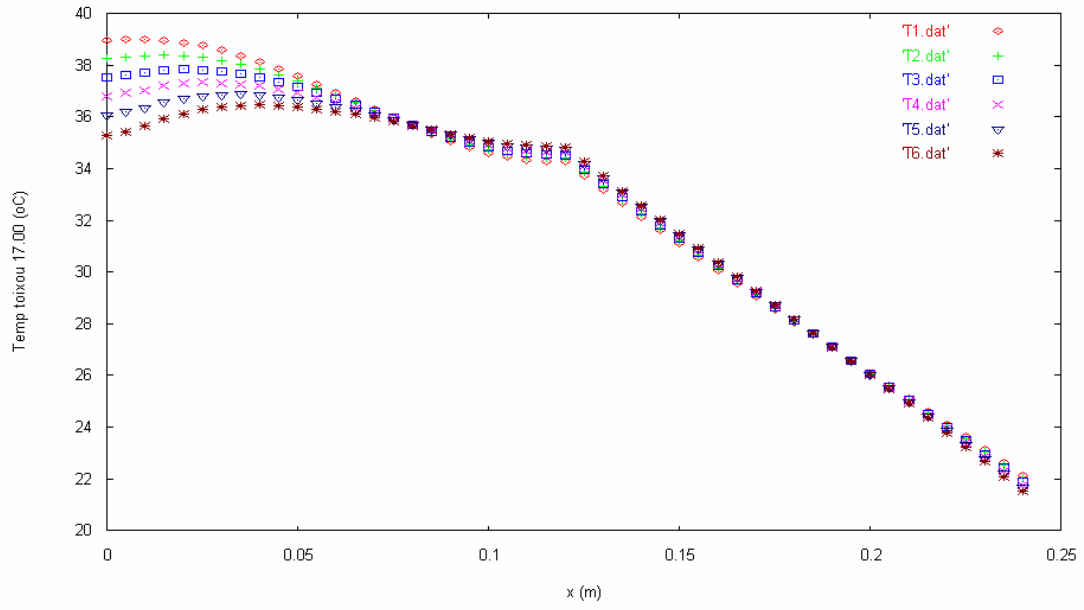
Εικόνα 136: Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος του τοίχου κατά την διάρκεια του 24 ωρου,ακολουθούν τα διαγράμματα των υπόλοιπων ωρών

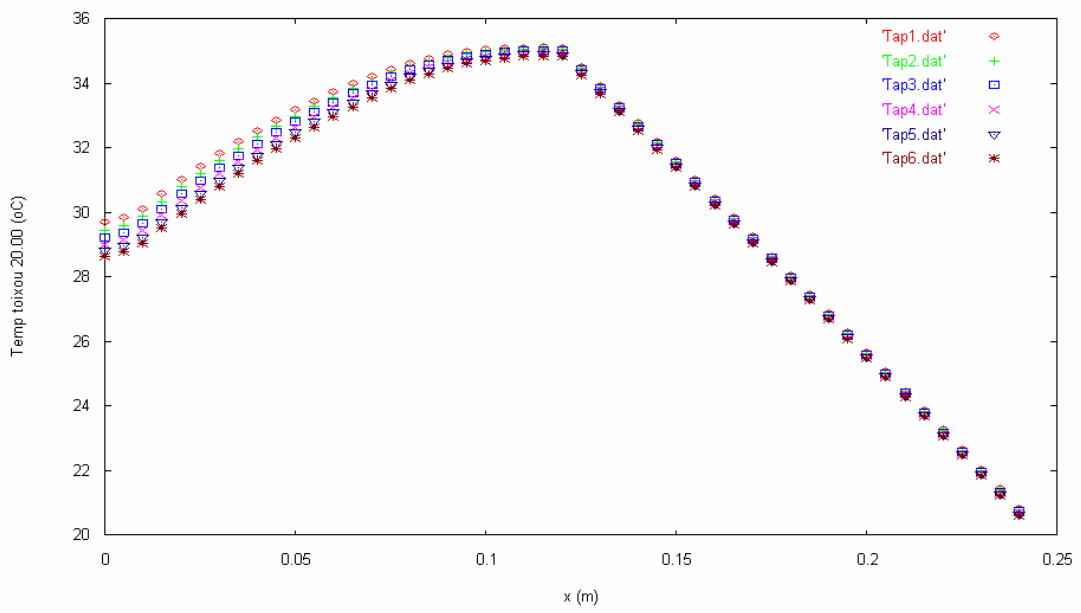
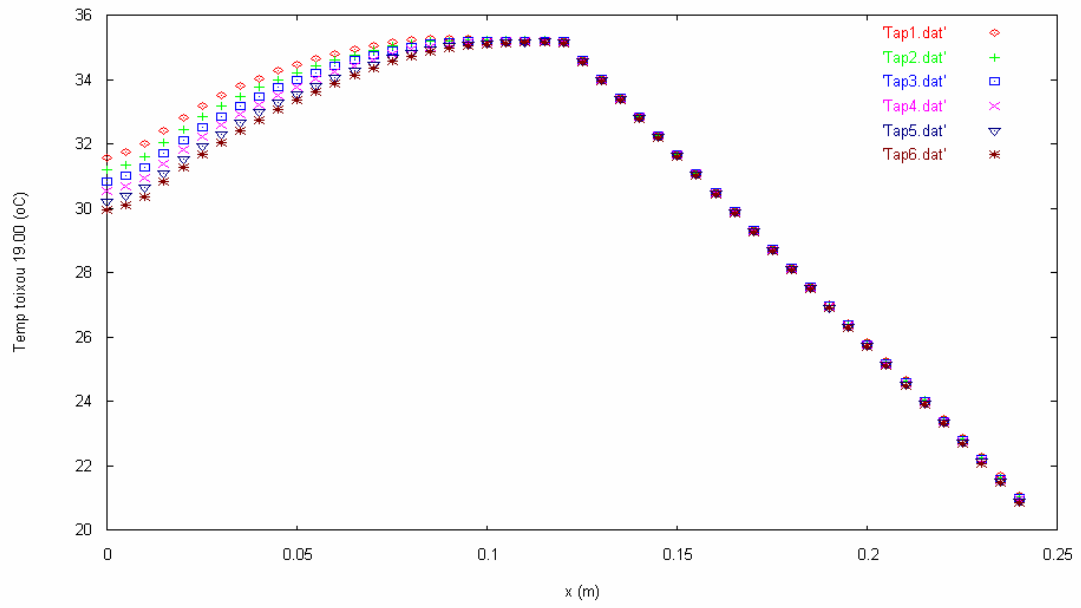


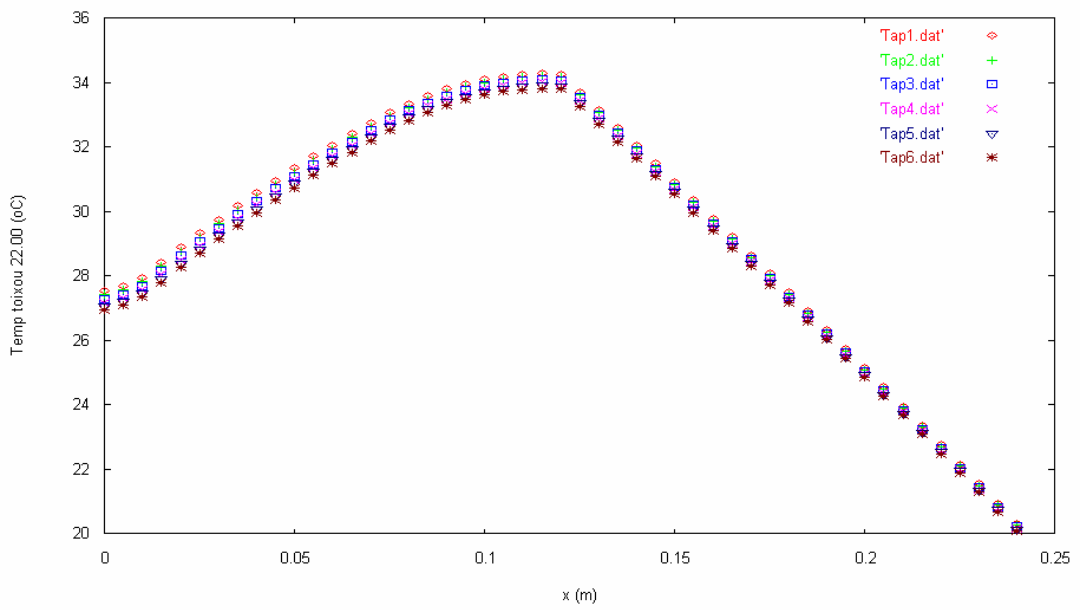
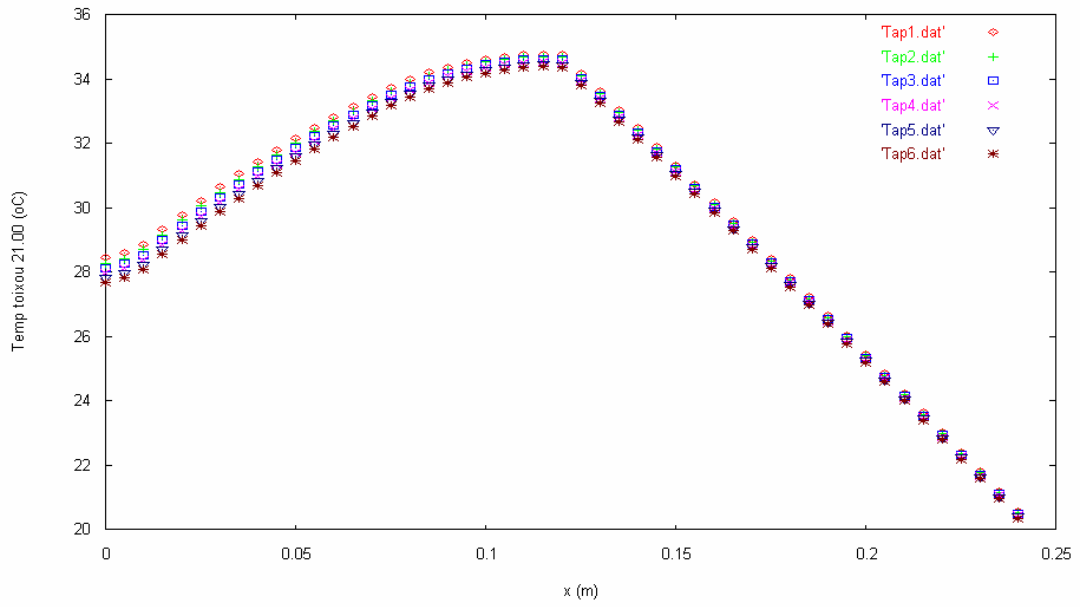


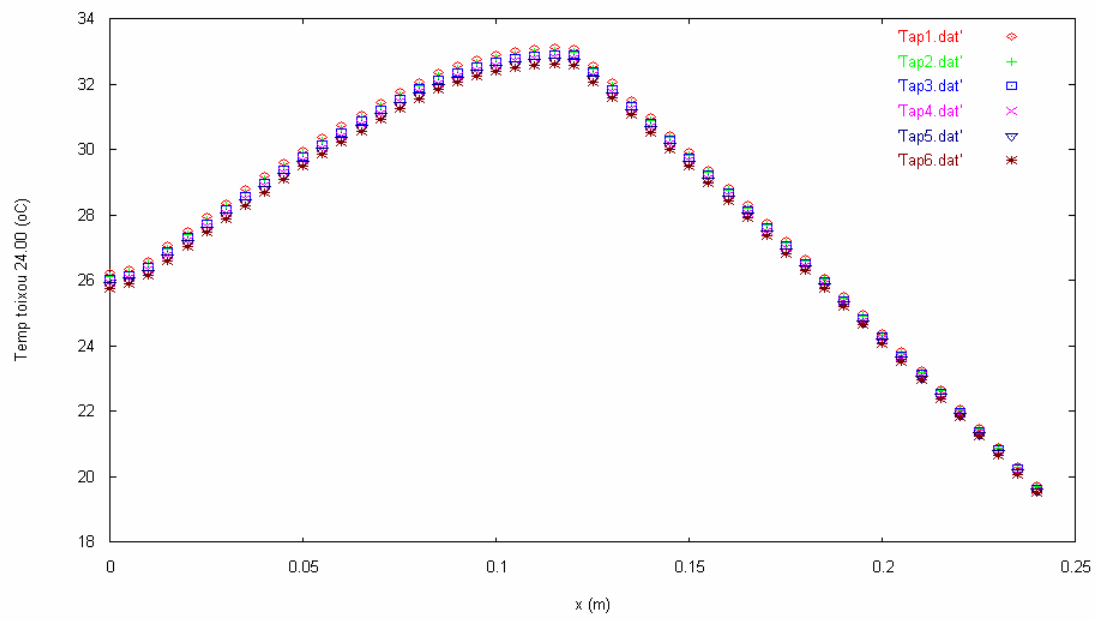
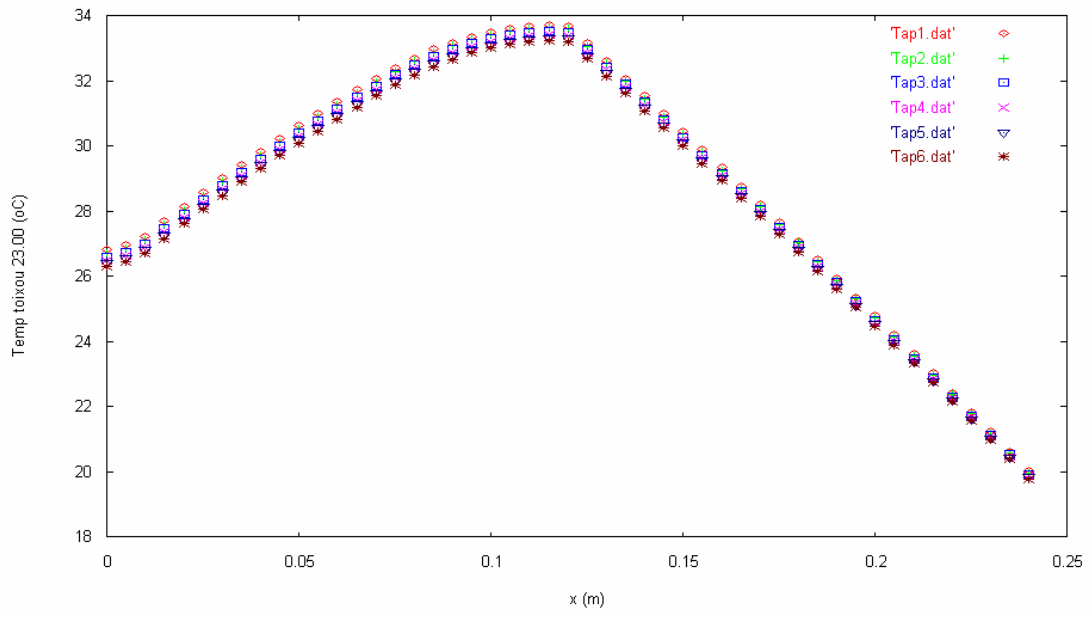


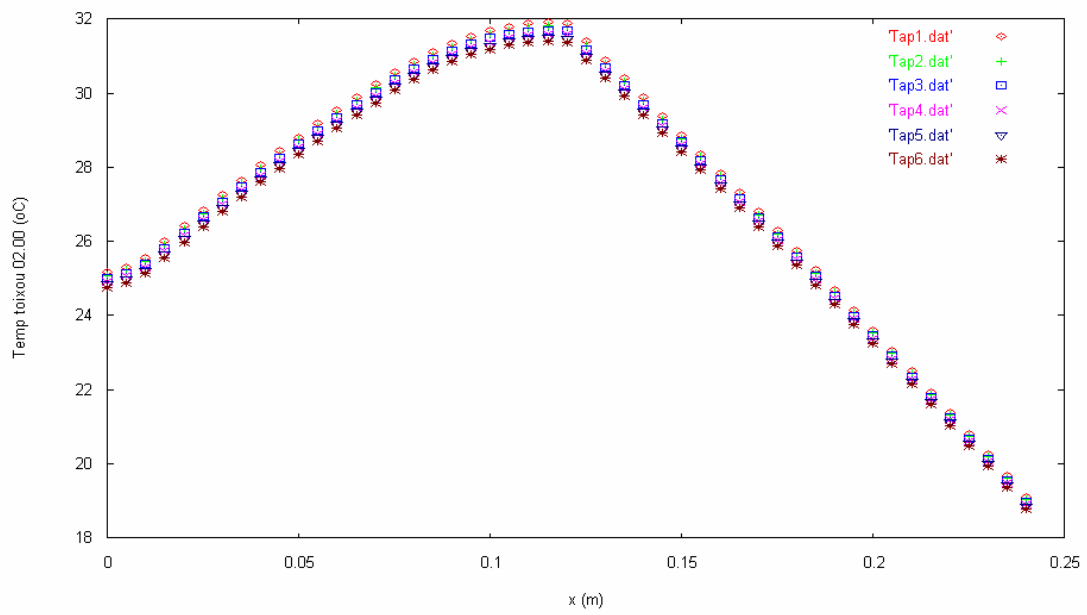
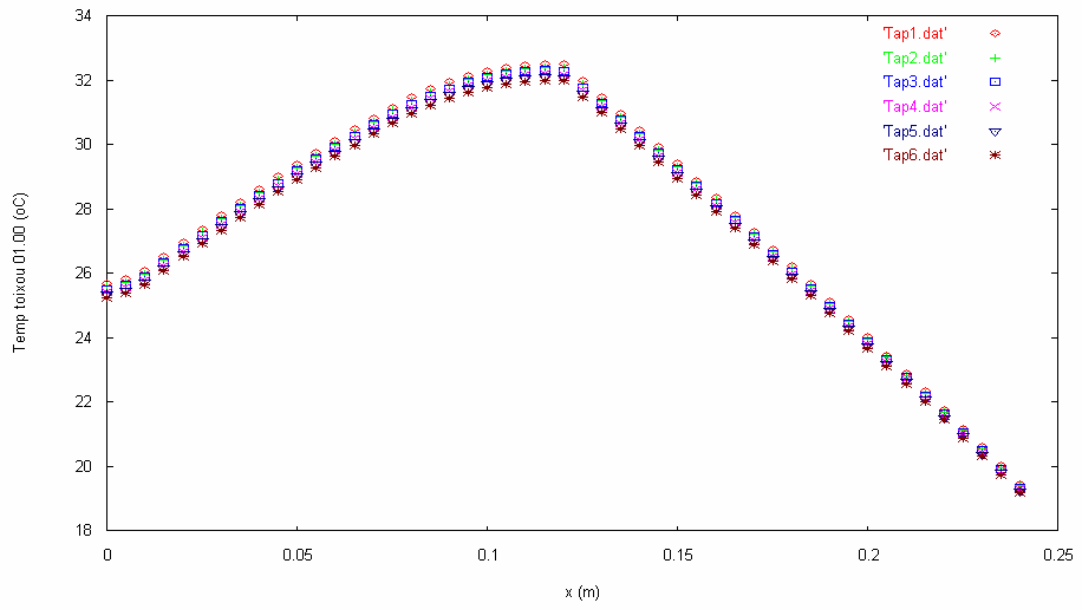


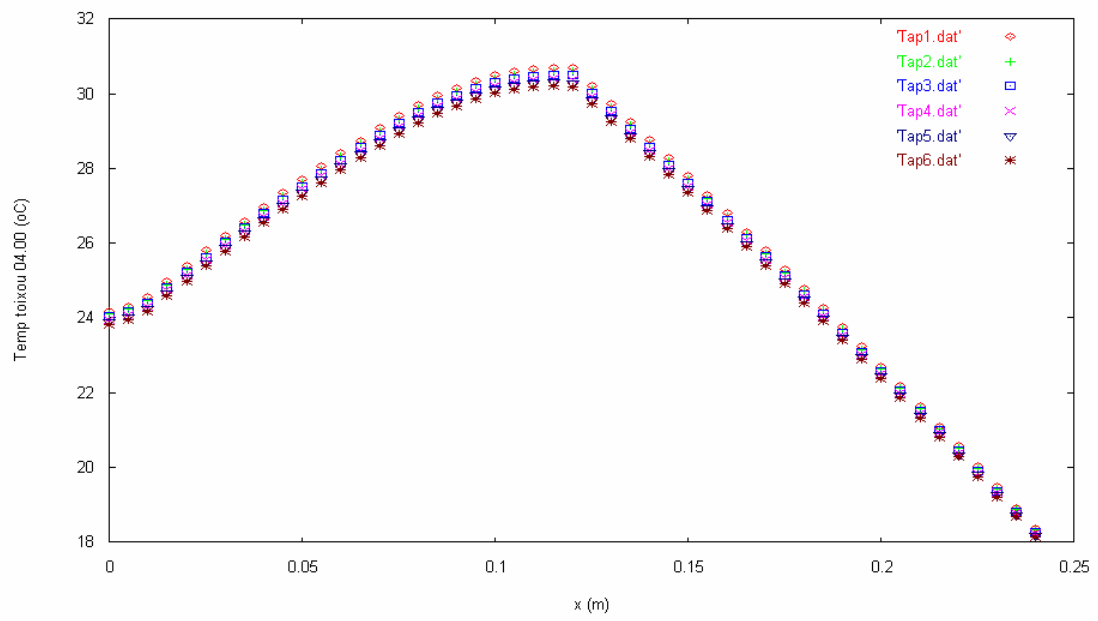
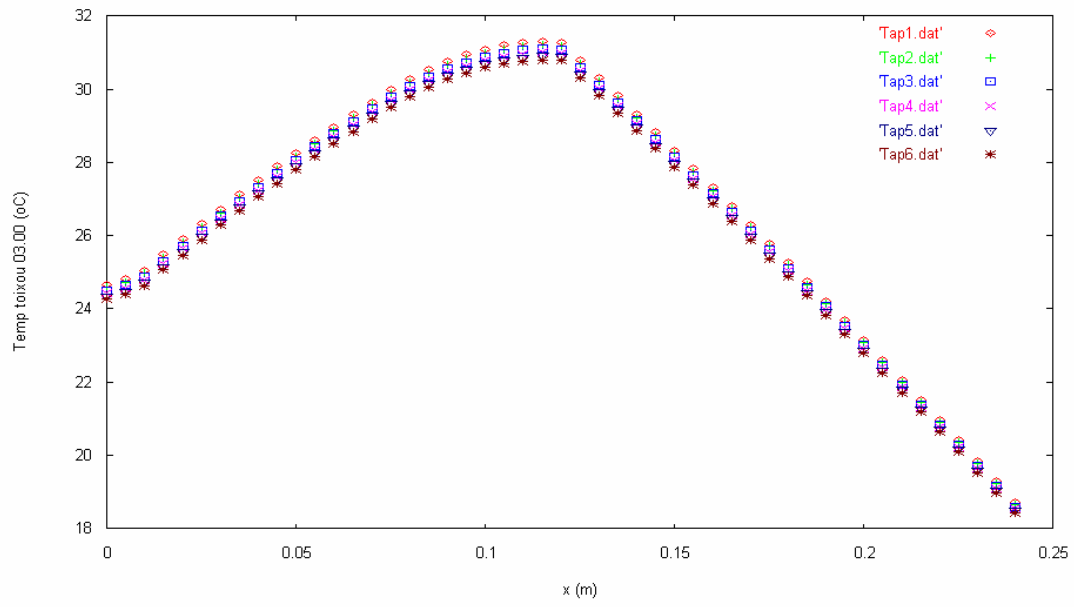


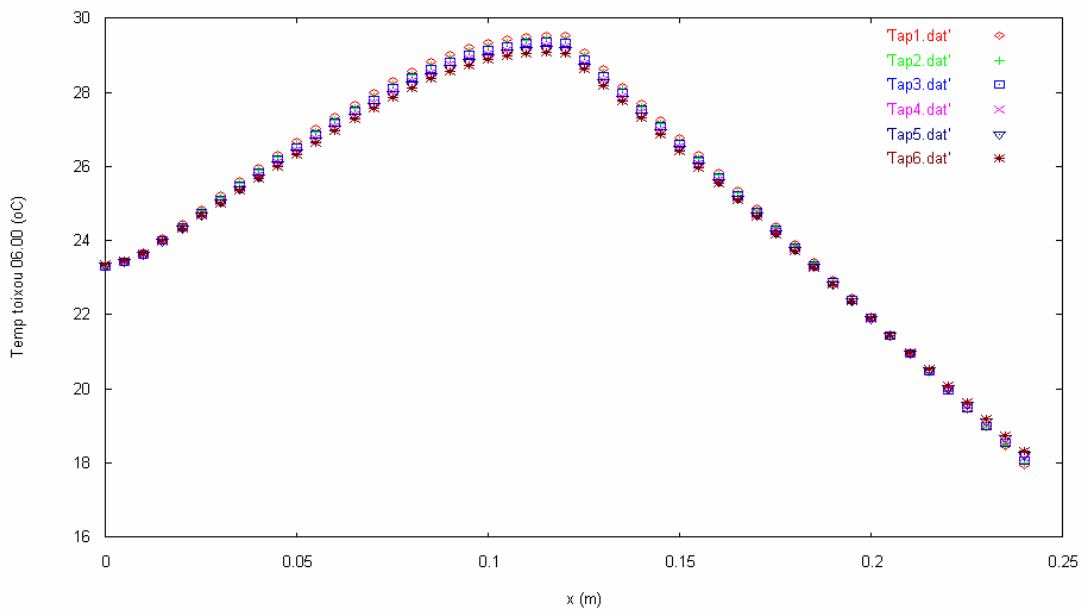
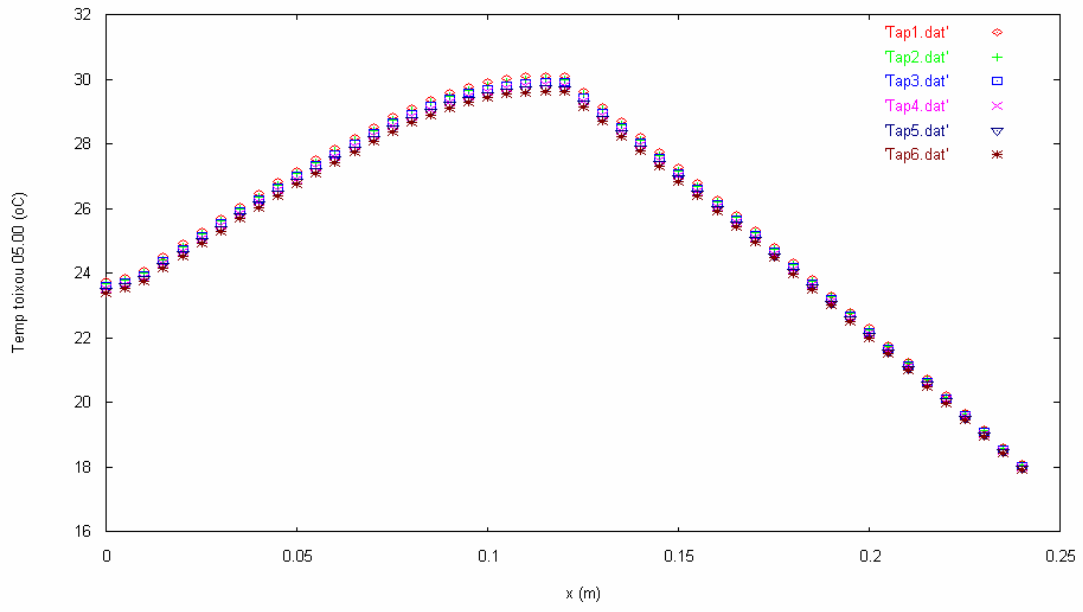




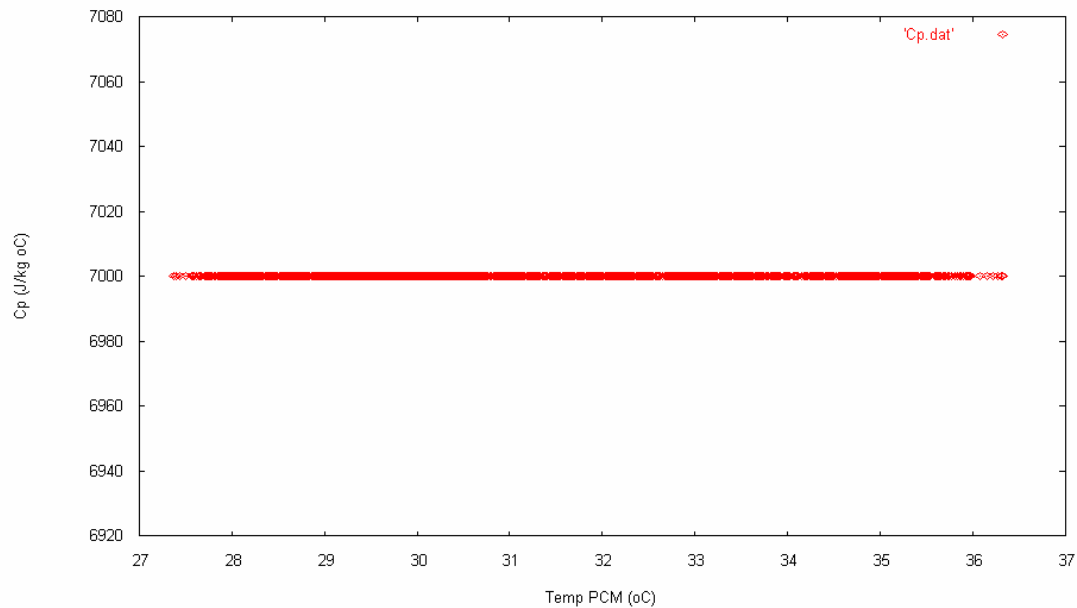








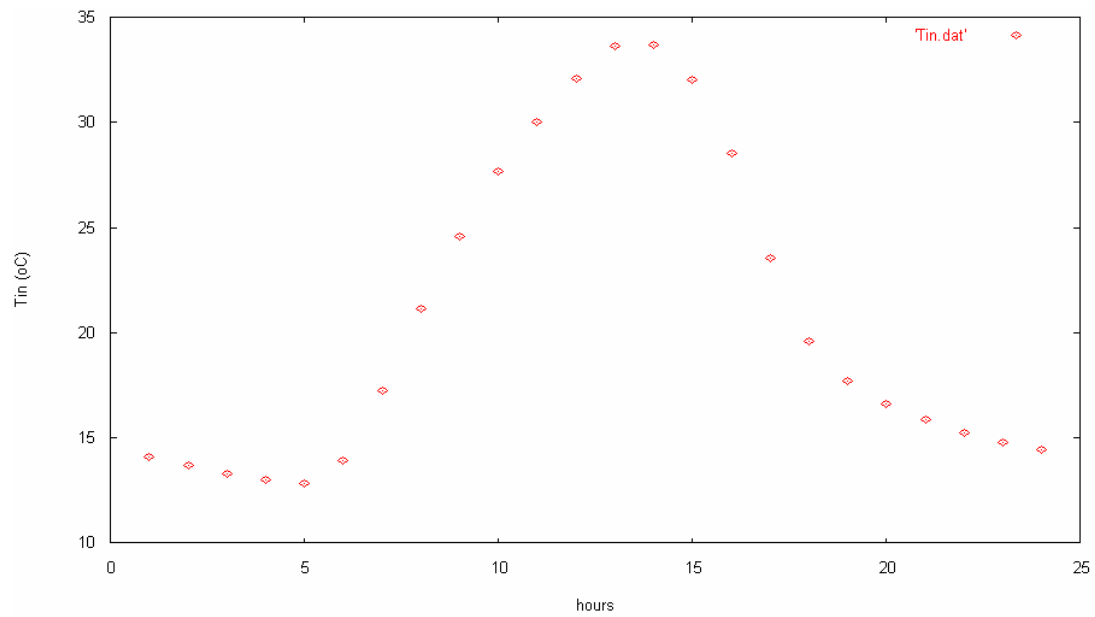
Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM συναρτήσει της θερμοκρασίας του



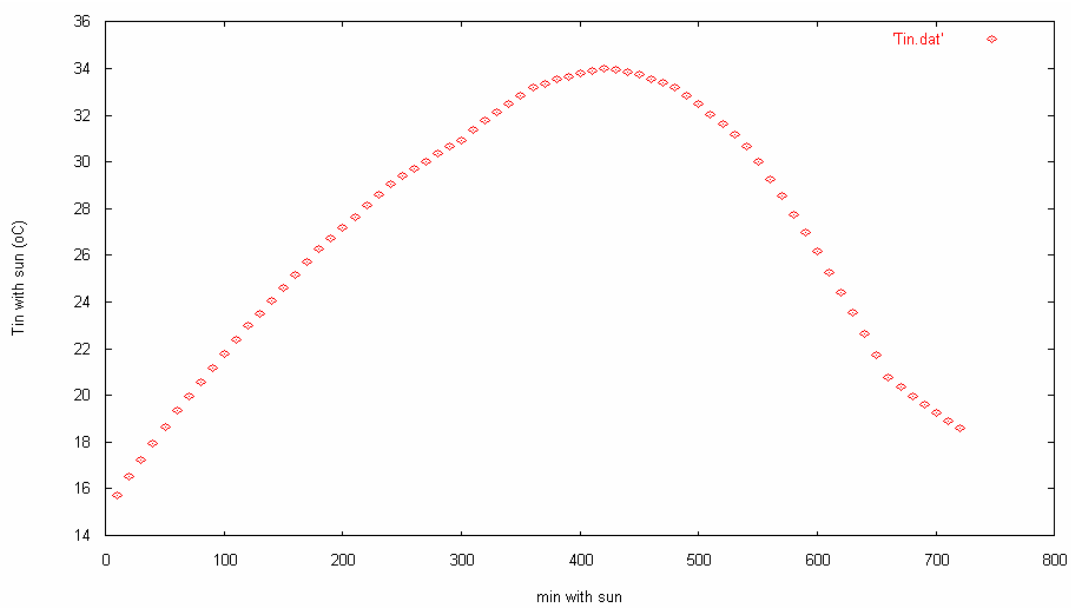
Εικόνα 137: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM συναρτήσει της θερμοκρασίας του

16.7.2. Παρουσίαση των αποτελεσμάτων της πρώτης παραμετρικής μελέτης για τον μήνα Μάρτιο (γυψοσανίδα-PCM-μόνωση-τούβλο-σοβάς)

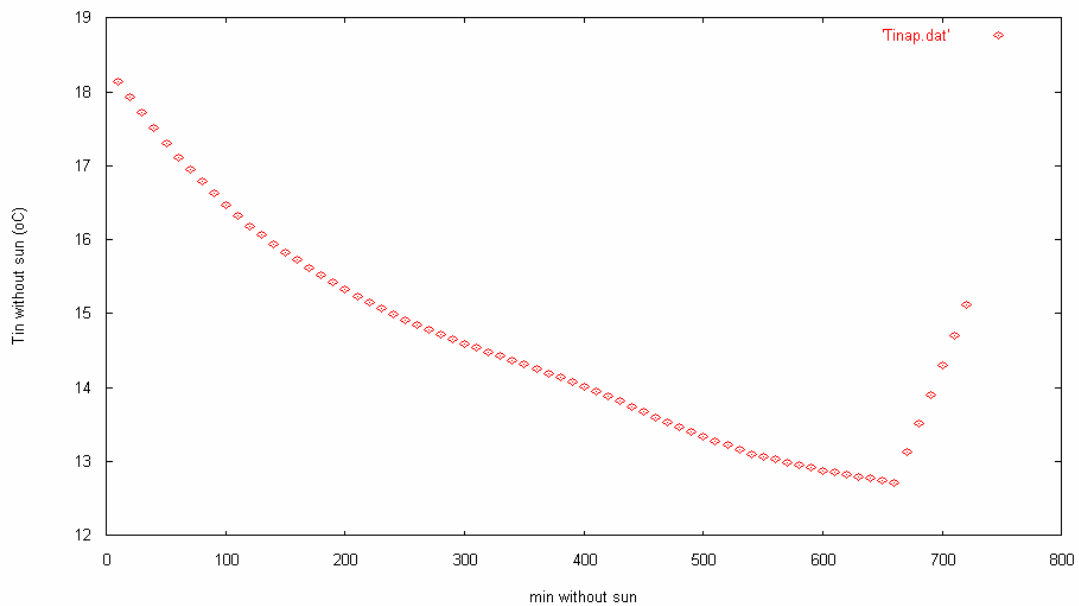
Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου



Εικόνα 138: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου κατά την διάρκεια του 24 ωρου



Εικόνα 139: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου συναρτήσει των λεπτών κατά την διάρκεια των οποίων υπάρχει ηλιοφάνεια (7.00- 18.00)



Εικόνα 140: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου συναρτήσει των λεπτών κατά την διάρκεια των οποίων δεν υπάρχει ηλιοφάνεια (19.00-6.00)

Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος του τοίχου κατά την διάρκεια του 24 ωρου

Η κατανομή των υλικών κατά μήκος του τοίχου x (m) είναι η εξής:

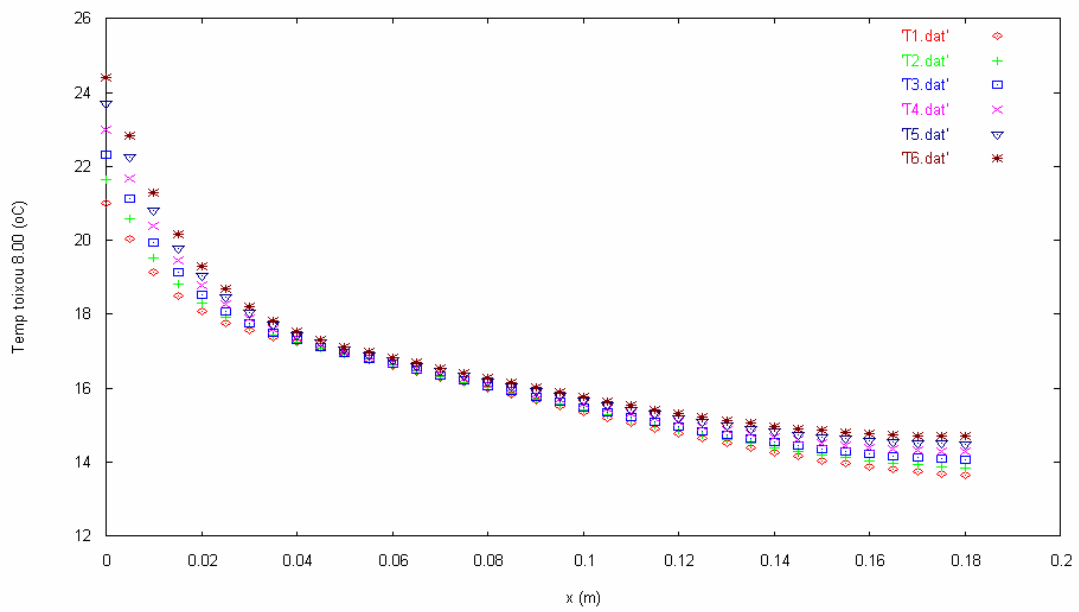
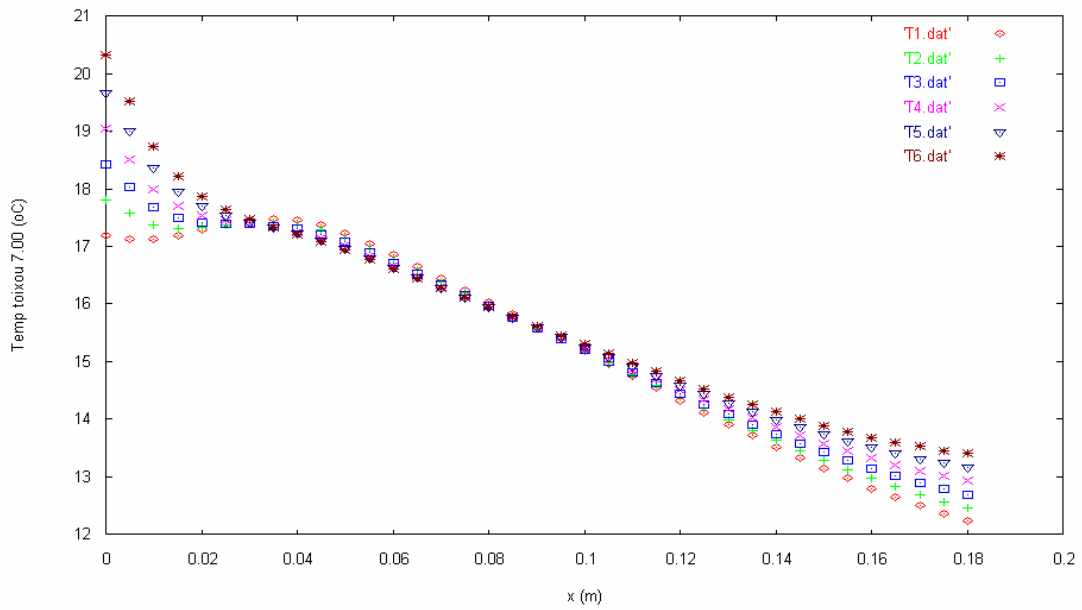
Γυψοσανίδα : 0-0.01 m

PCM: 0.01-0.06 m

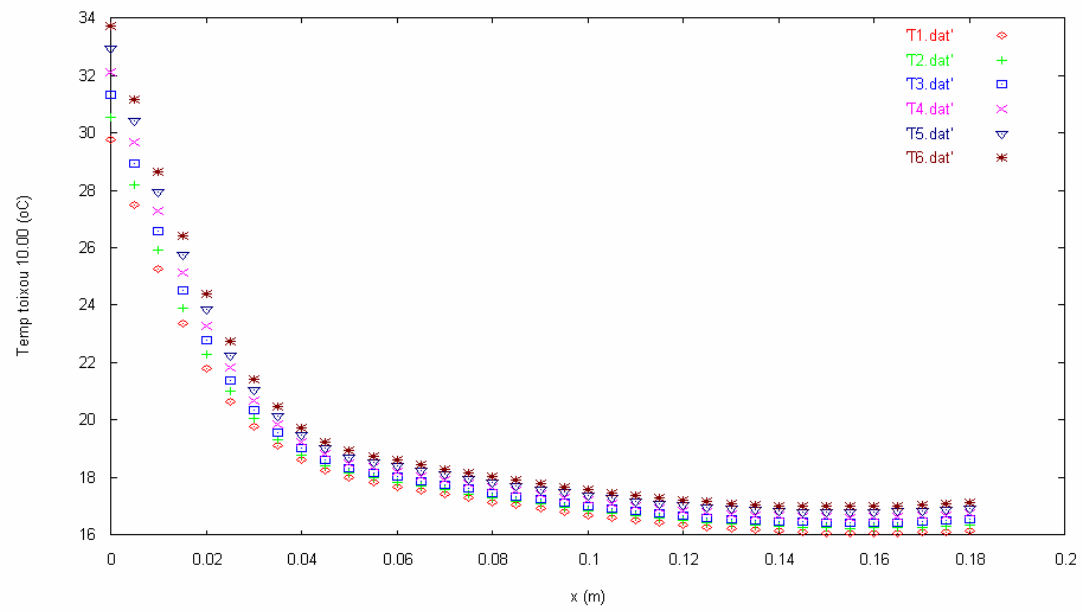
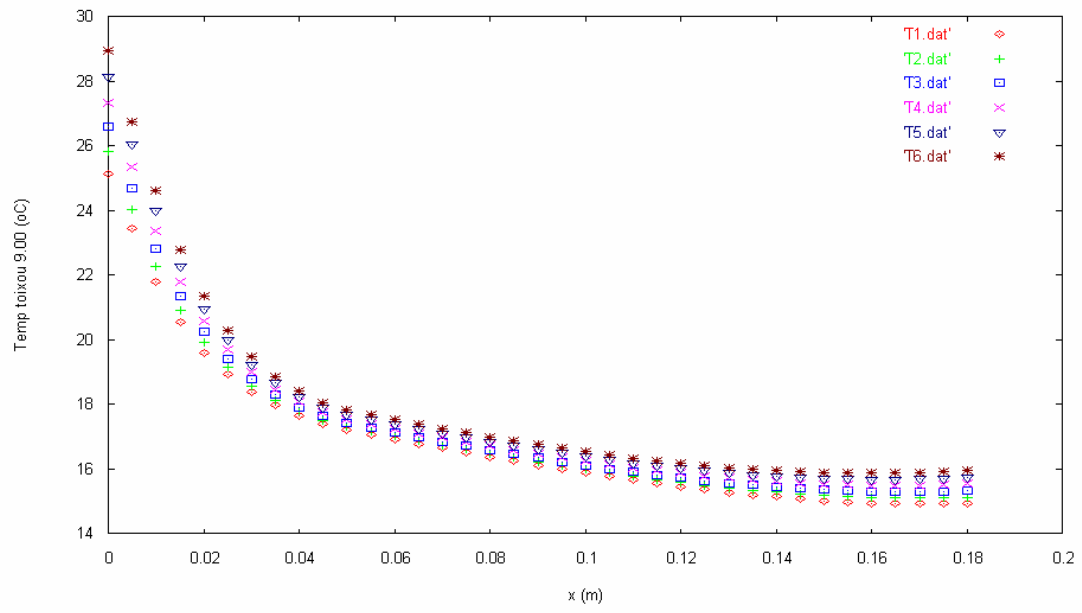
Μόνωση: 0.06-0.11 m

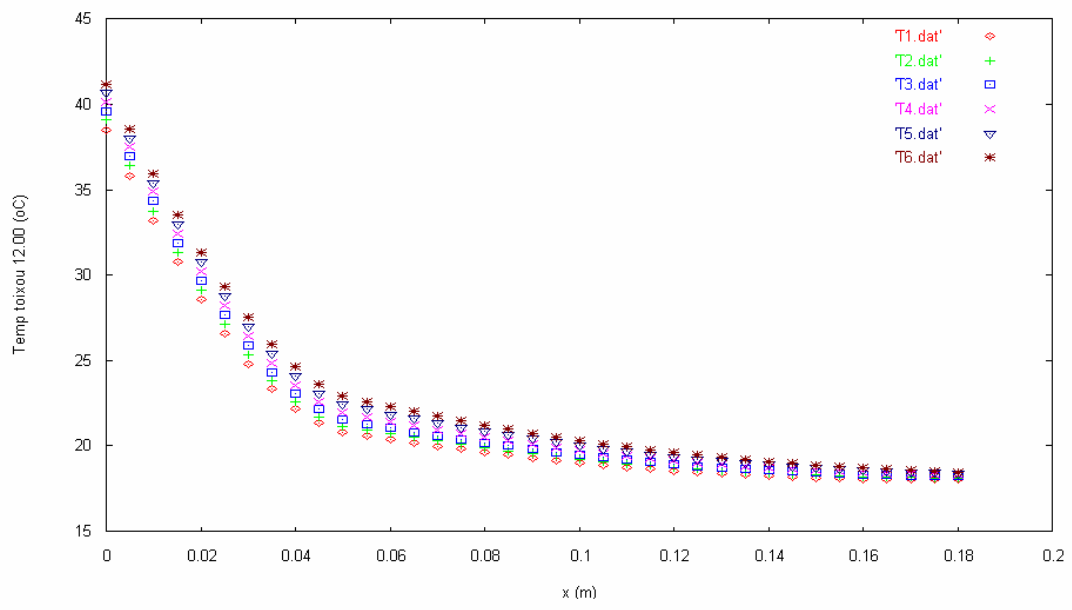
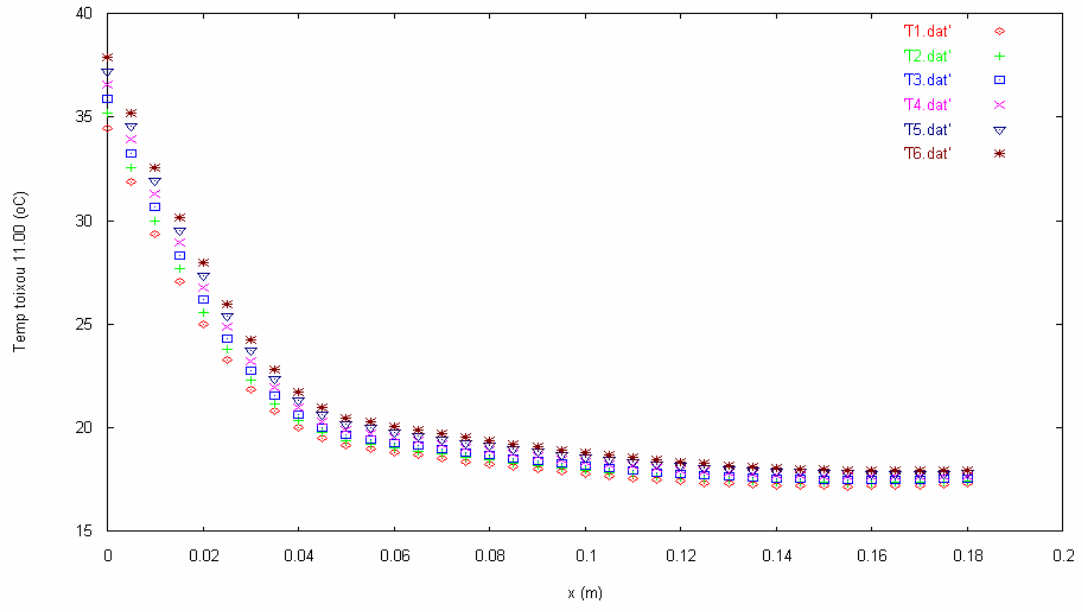
Τούβλο: 0.11-0.17 m

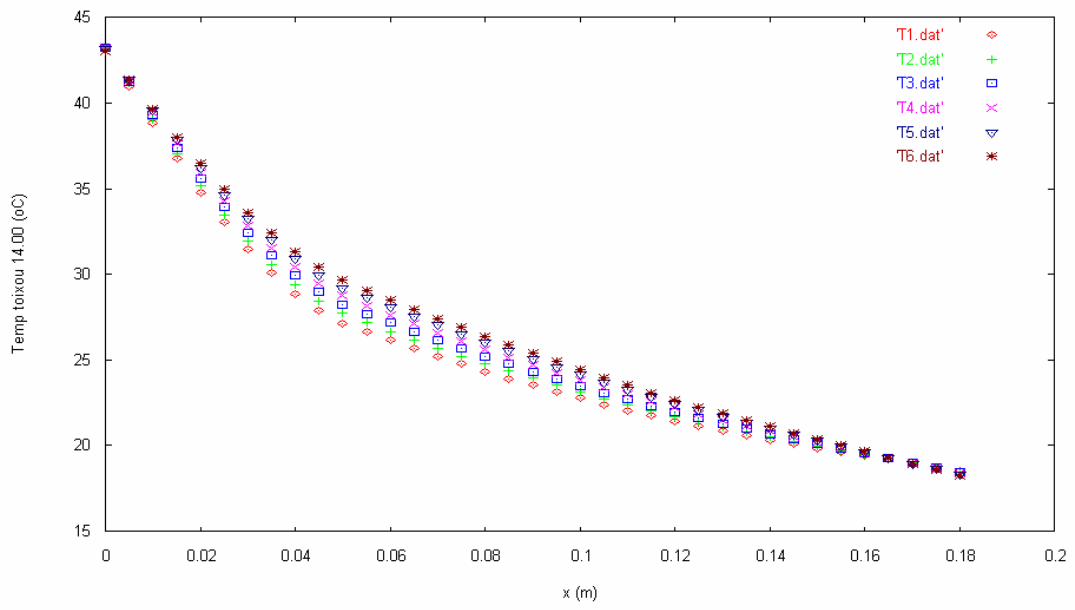
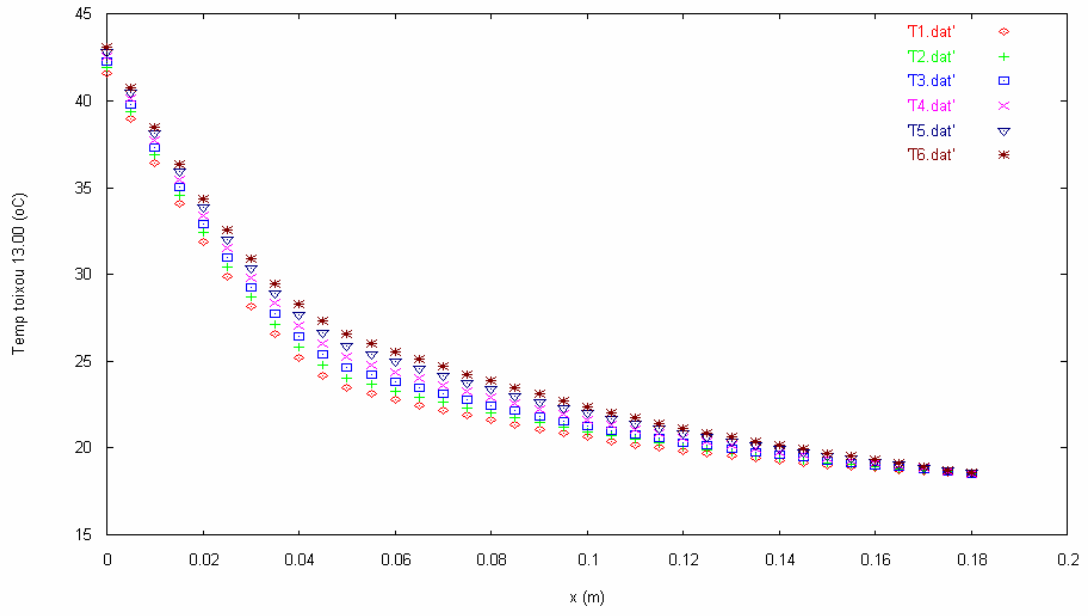
Σοβάς : 0.17-0.18 m

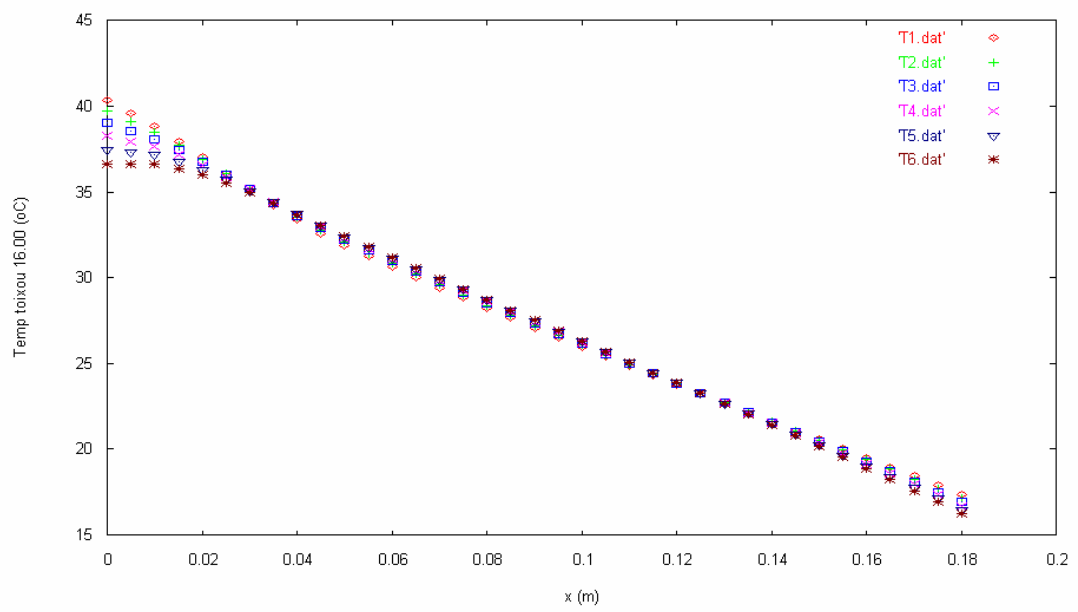
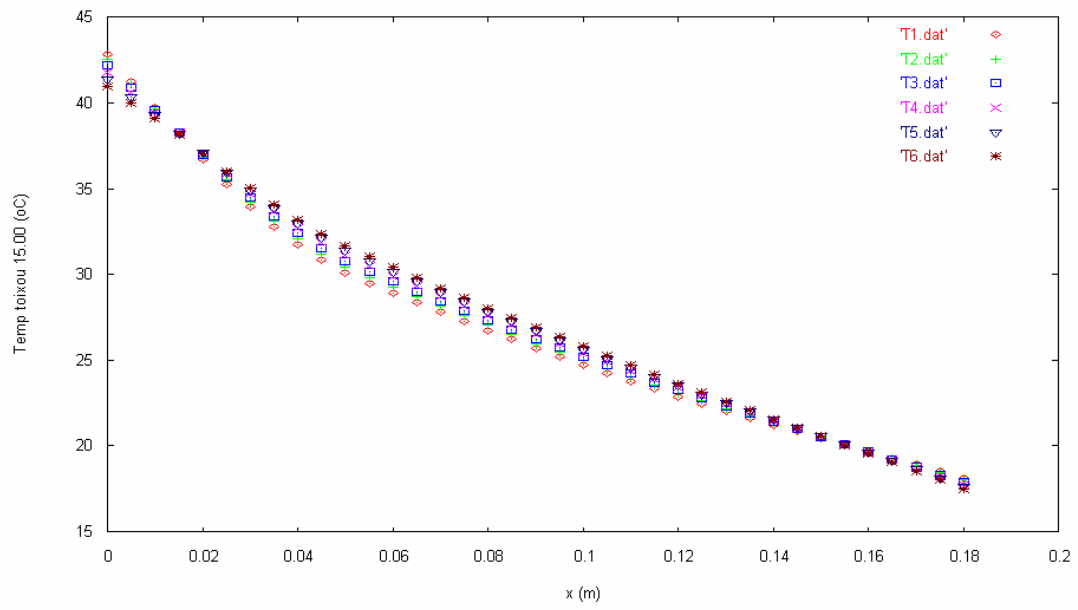


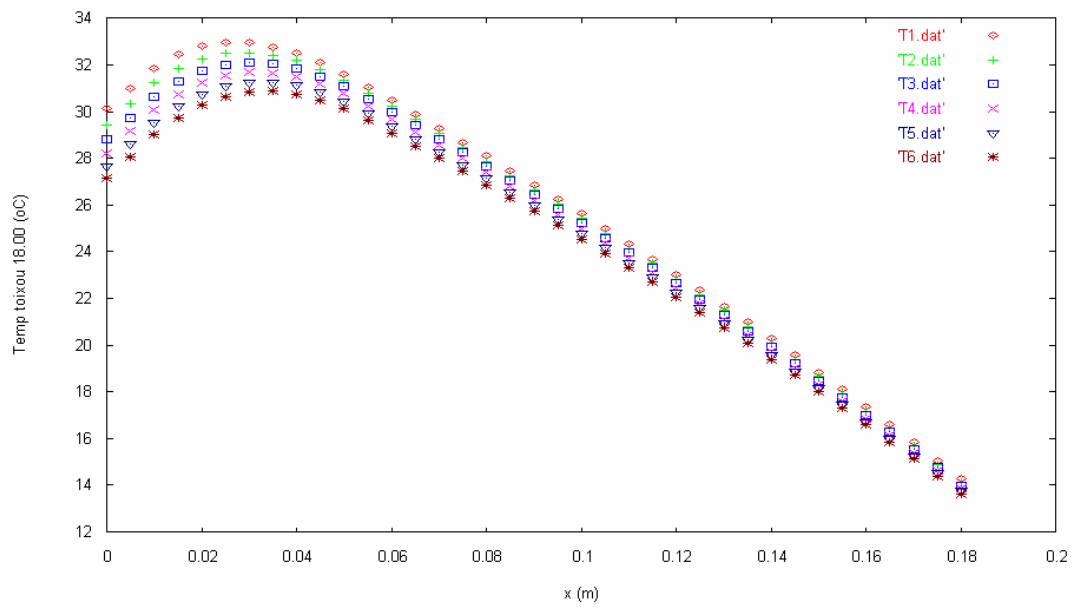
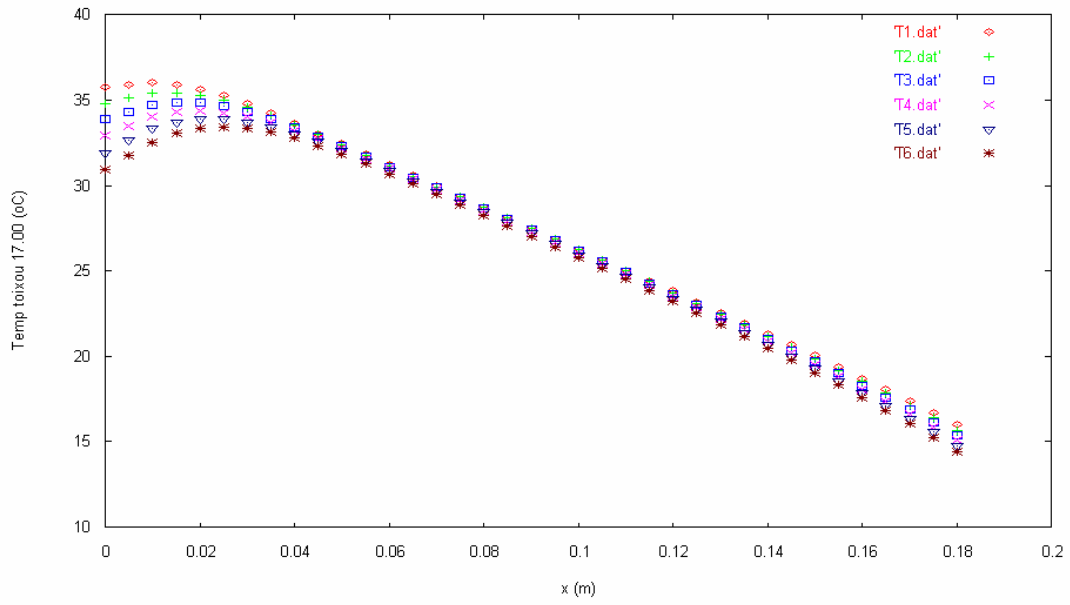
Εικόνα 141: Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος του τοίχου κατά την διάρκεια του 24 ωρου, ακολουθούν τα διαγράμματα των υπόλοιπων ωρών

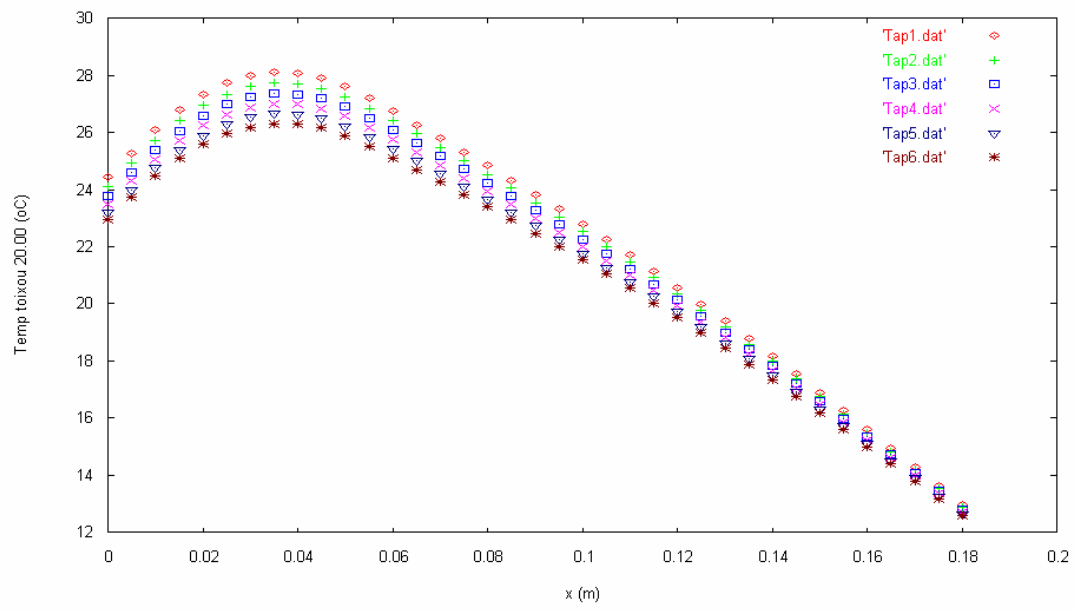
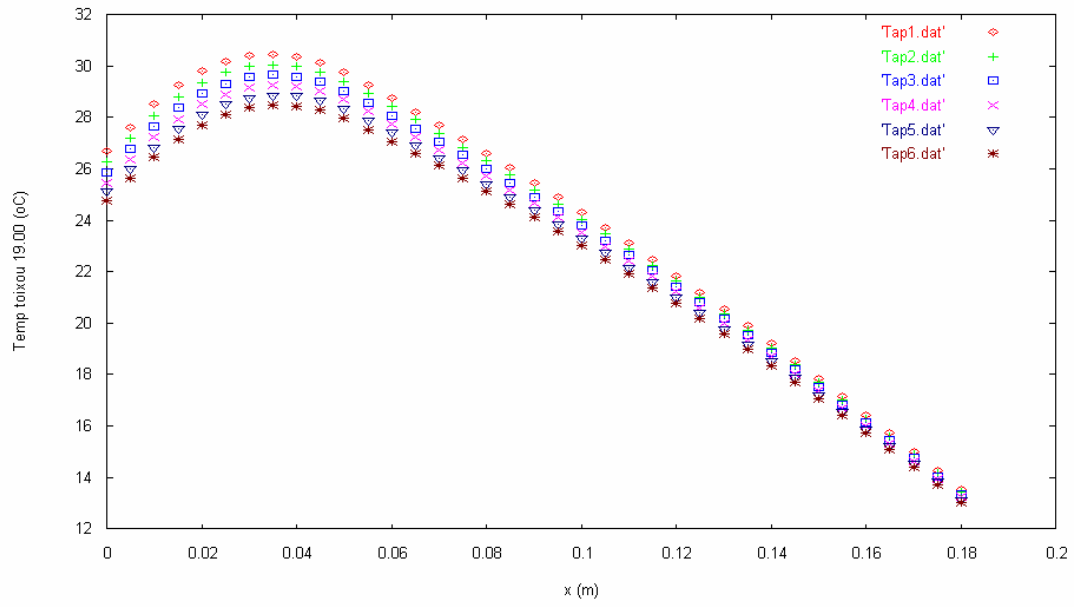


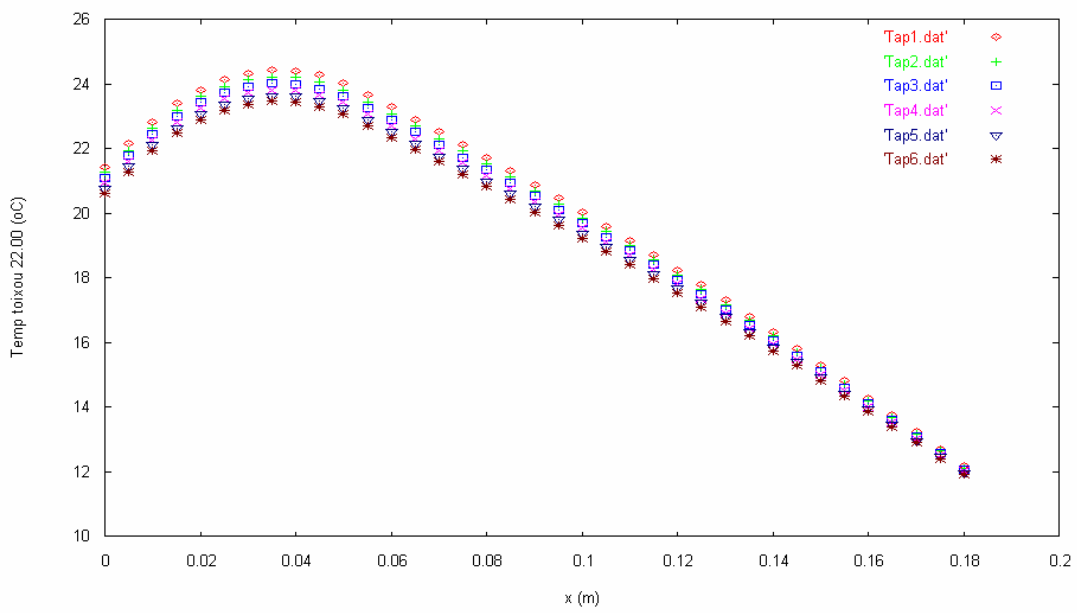
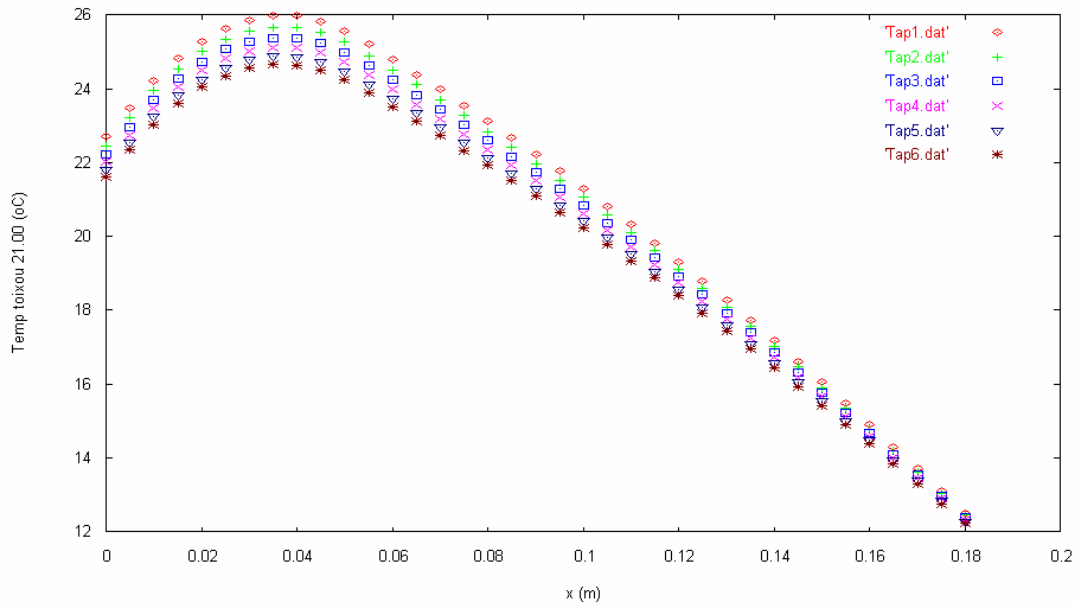


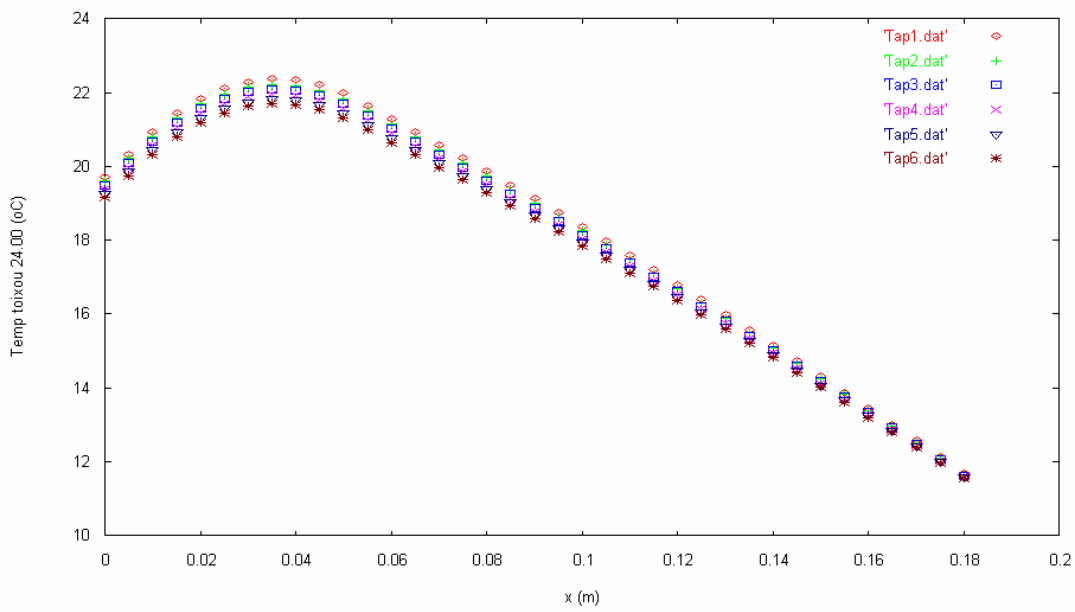
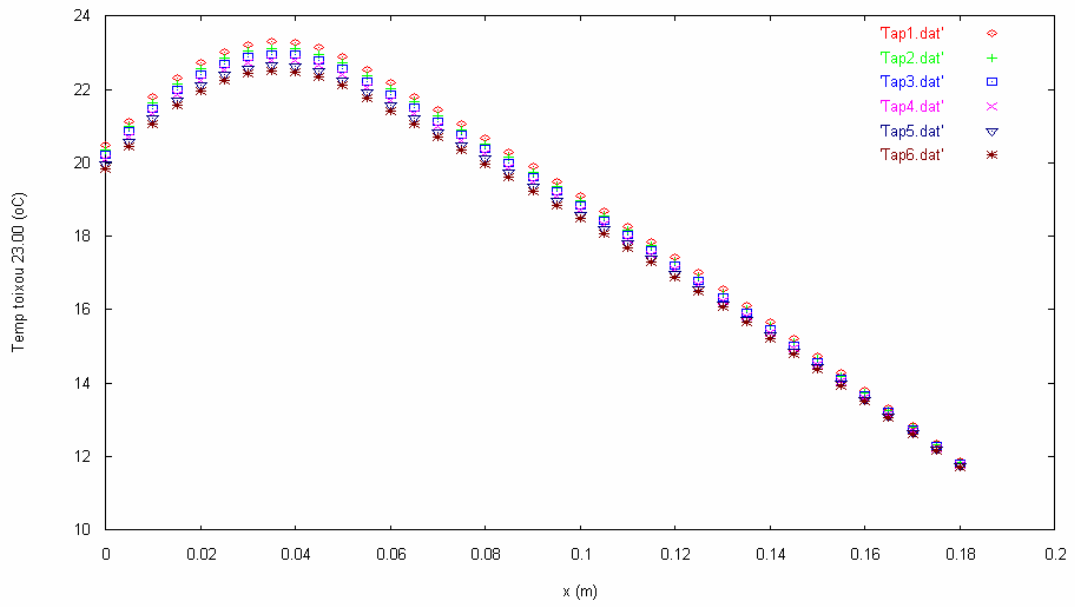


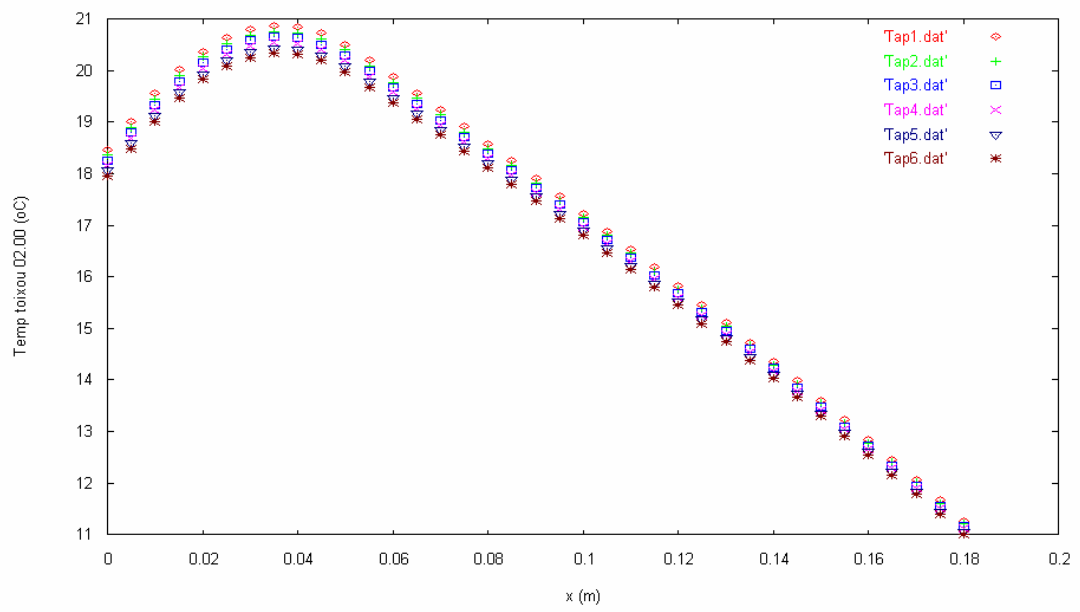
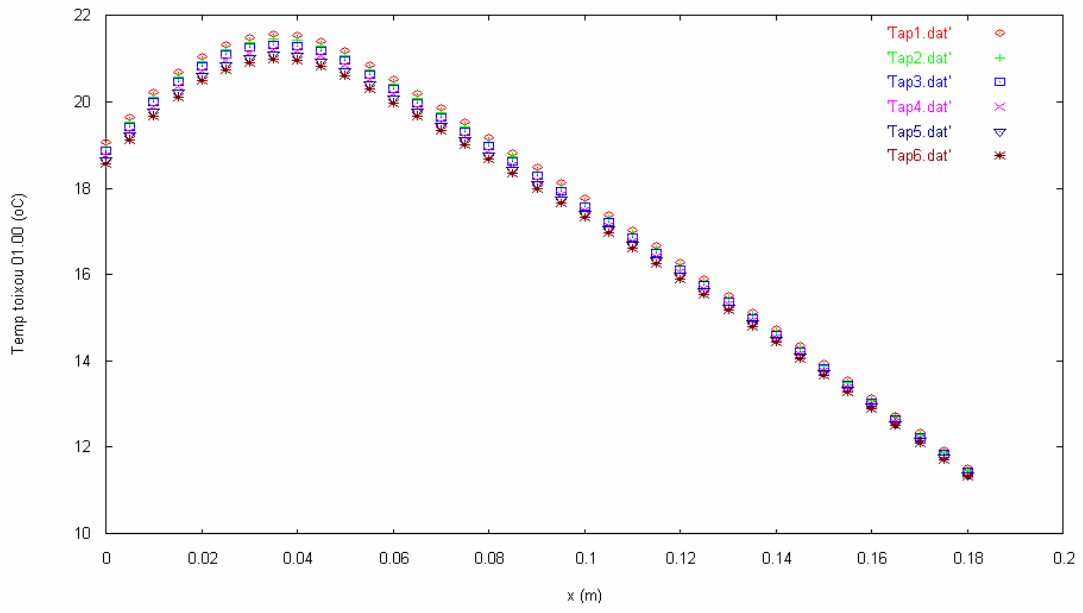


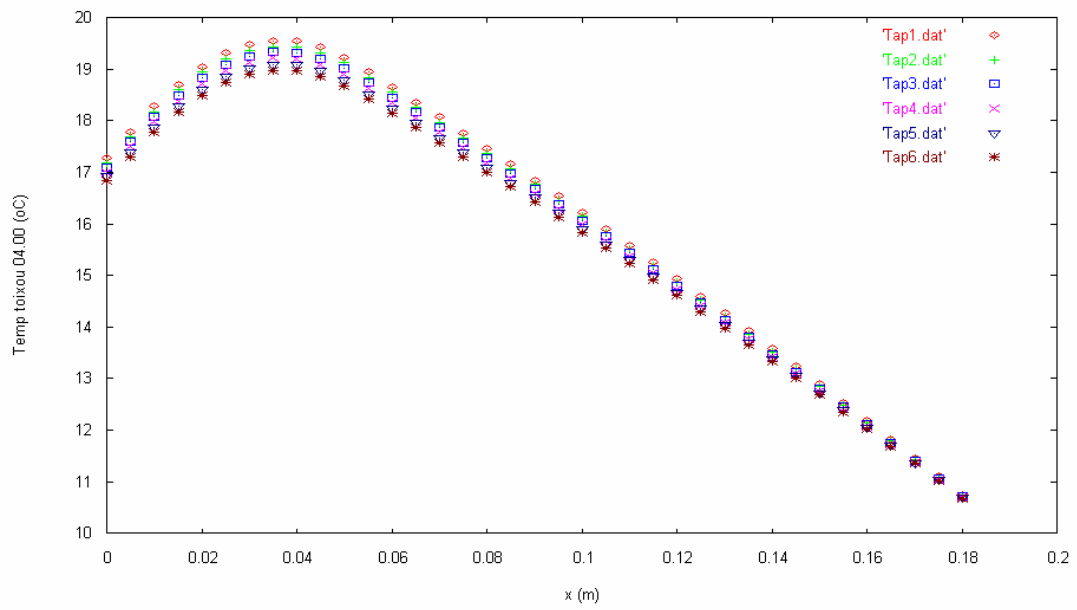
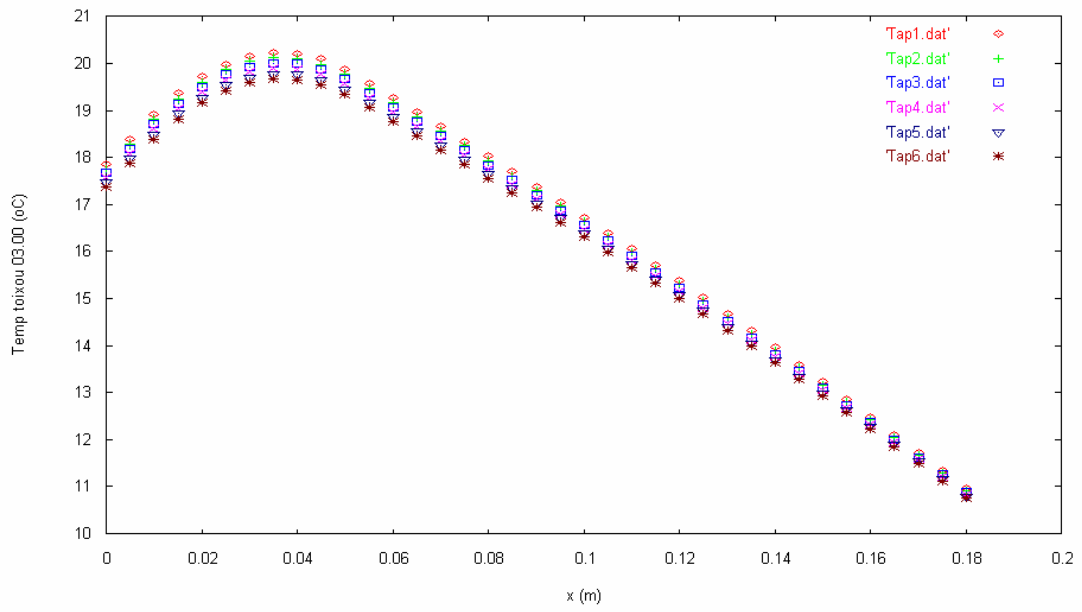


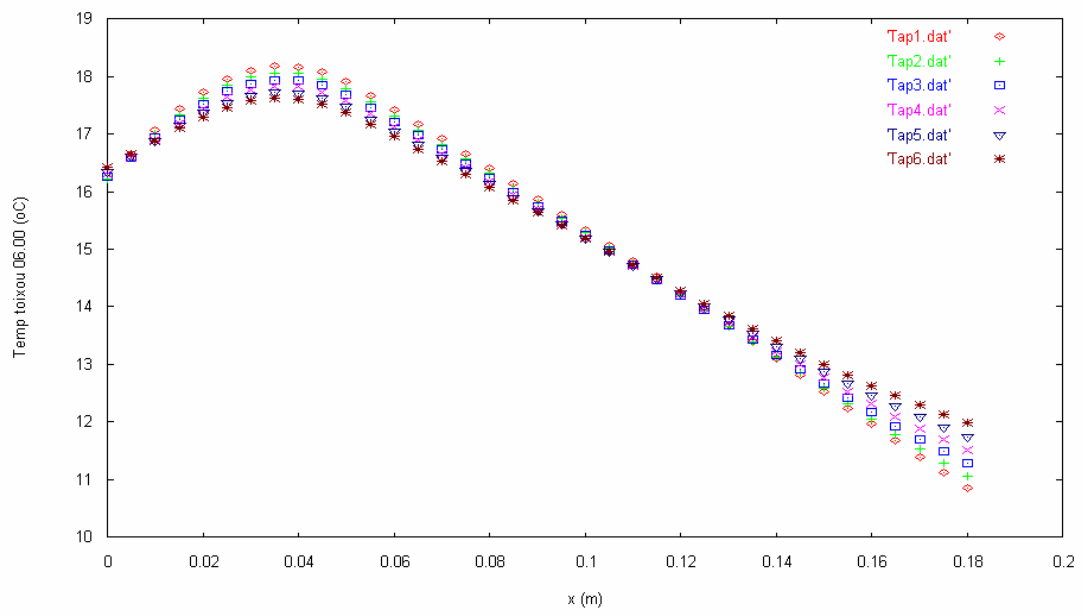
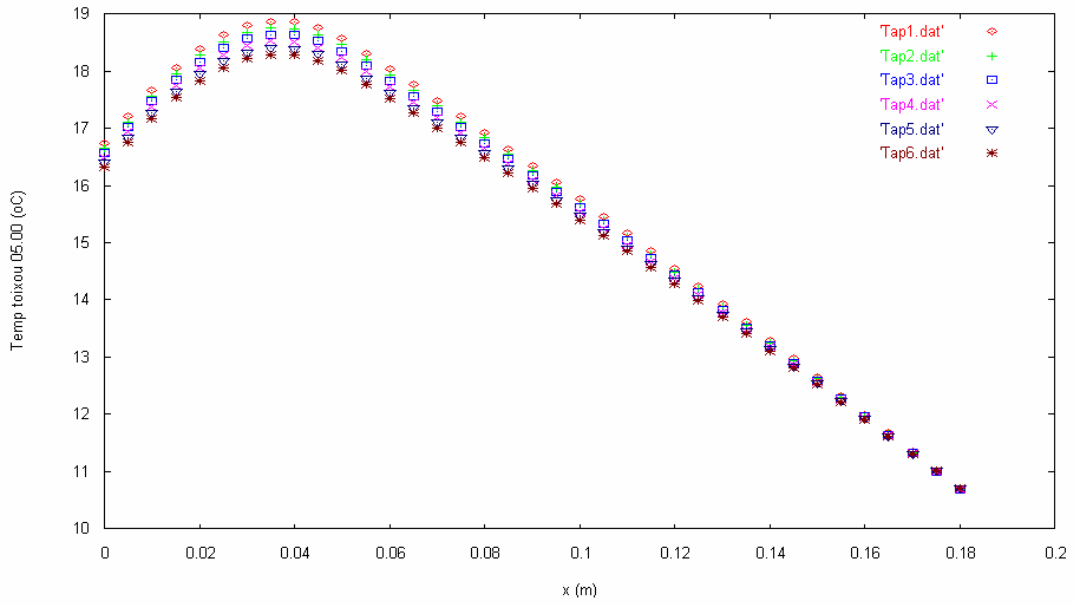




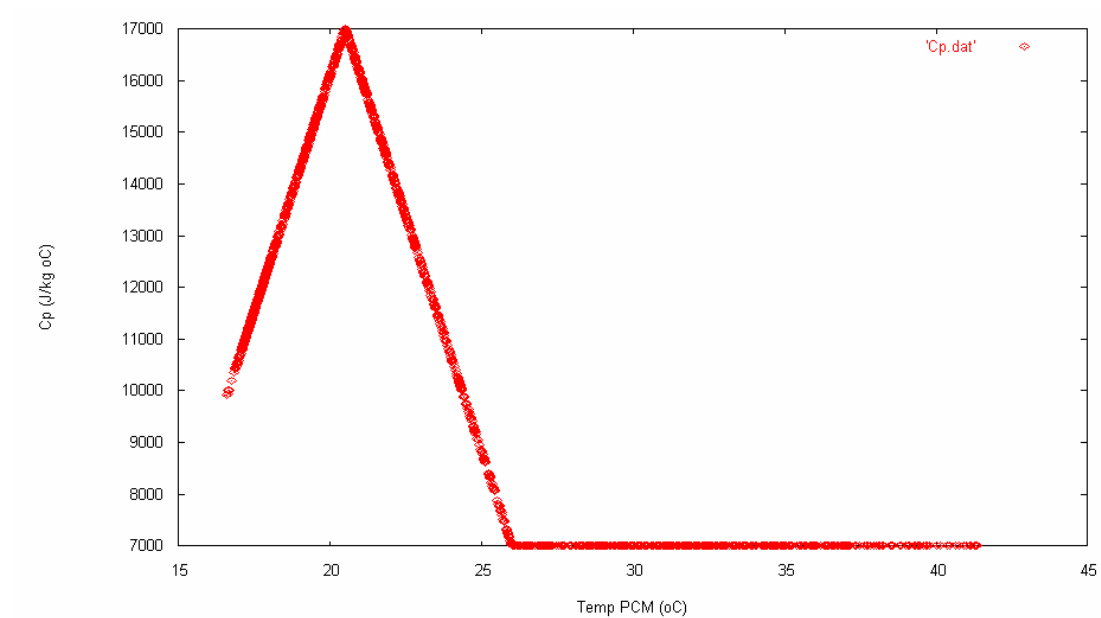








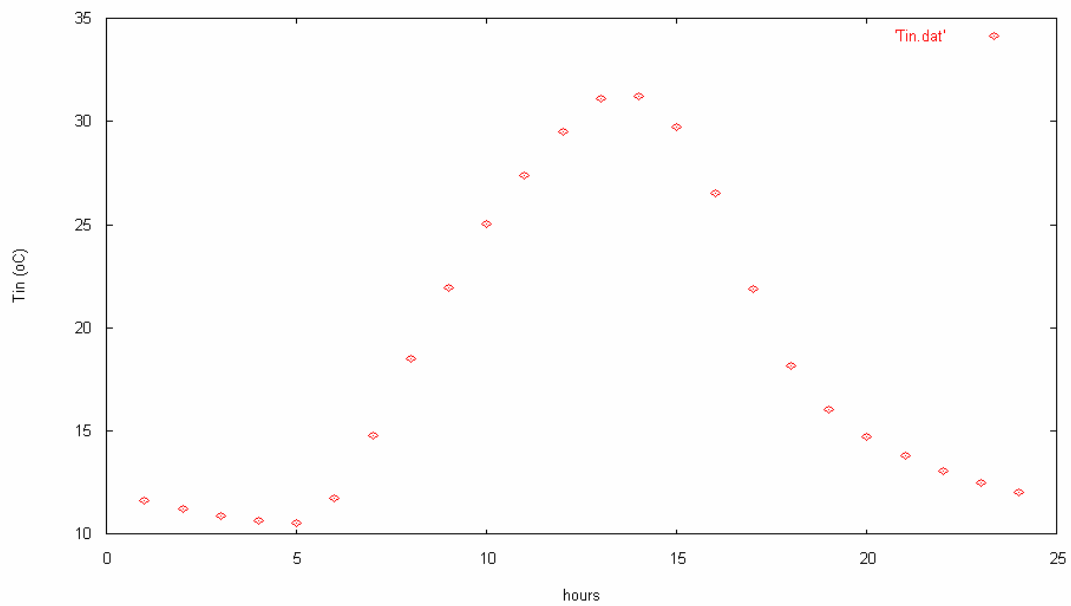
Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM συναρτήσει της θερμοκρασίας του



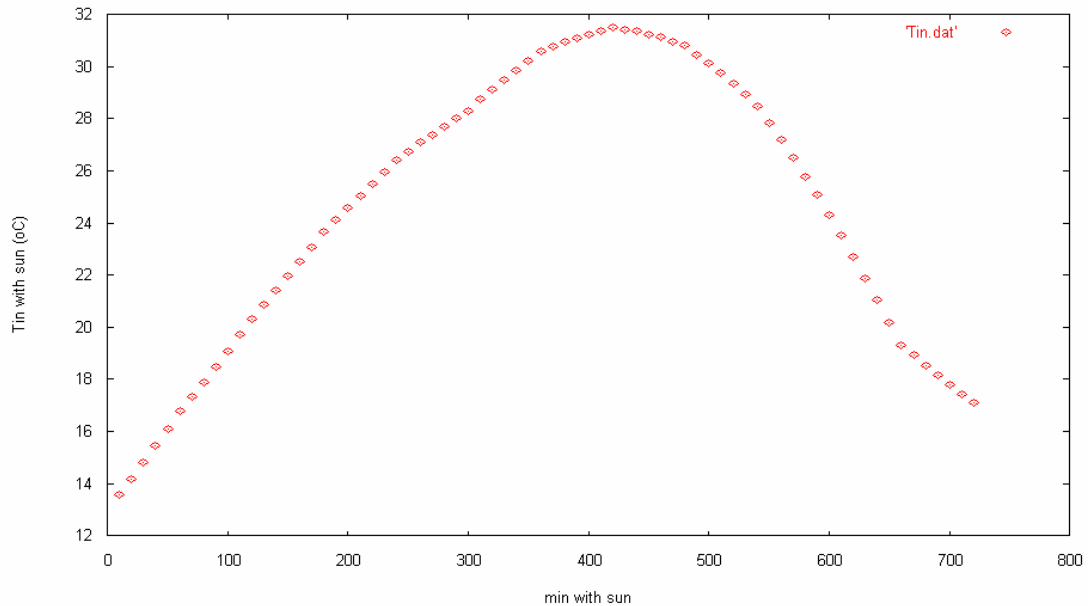
Εικόνα 142: Μεταβολή της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM συναρτήσει της θερμοκρασίας του

16.7.3 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων της δεύτερης παραμετρικής μελέτης για τον μήνα Μάρτιο (σοβάς-τούβλο-μόνωση-τούβλο-σοβάς)

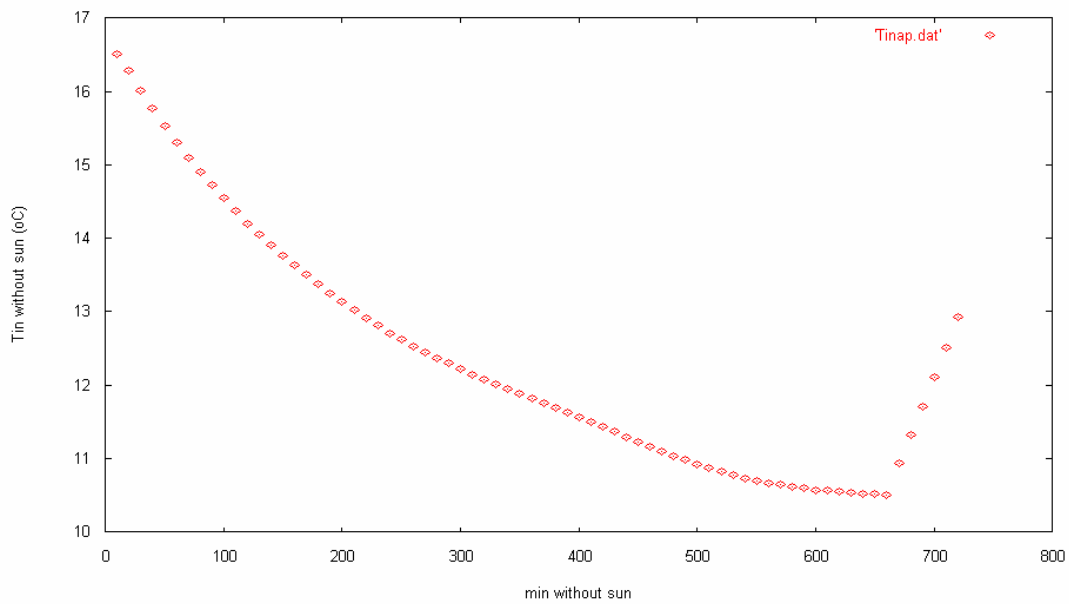
Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου



Εικόνα 143:Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου κατά την διάρκεια του 24 ωρου



Εικόνα 144: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου συναρτήσει των λεπτών κατά την διάρκεια των οποίων υπάρχει ηλιοφάνεια (7.00- 18.00)



Εικόνα 145: Μεταβολή της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου συναρτήσει των λεπτών κατά την διάρκεια των οποίων δεν υπάρχει ηλιοφάνεια
(19.00-6.00)

Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος του τοίχου κατά την διάρκεια του 24 ωρου

Η κατανομή των υλικών κατά μήκος του τοίχου $x(m)$ είναι η εξής:

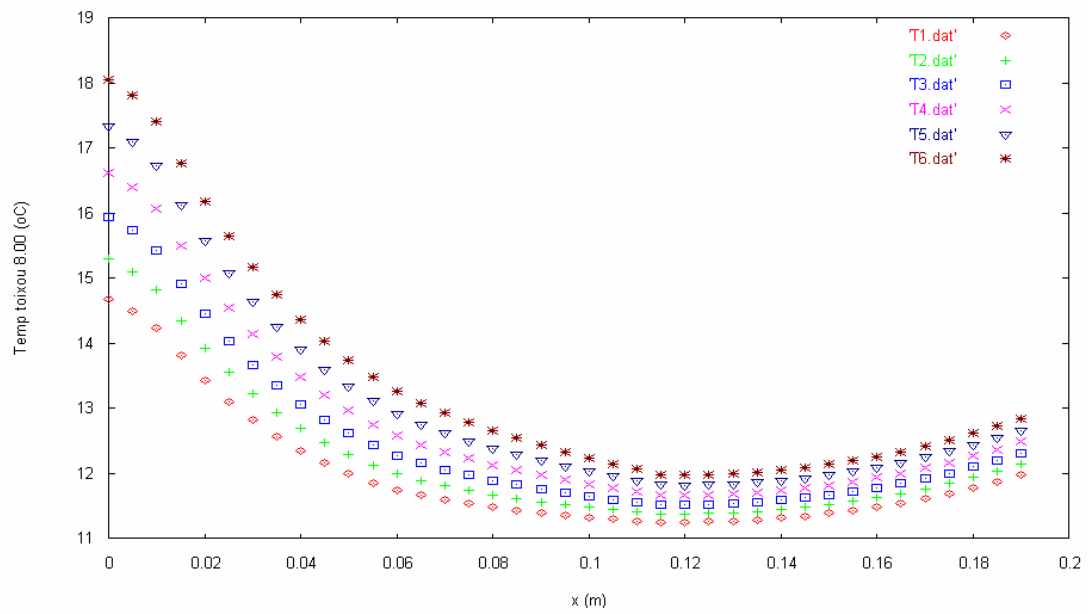
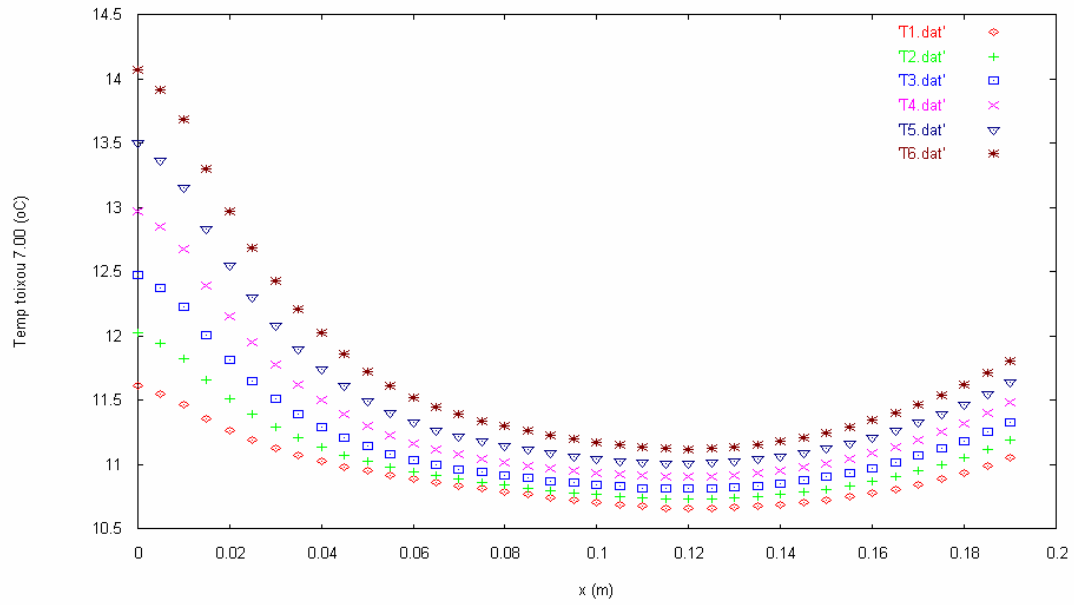
Σοβάς: 0-0.01 m

Τούβλο :0.01-0.07 m

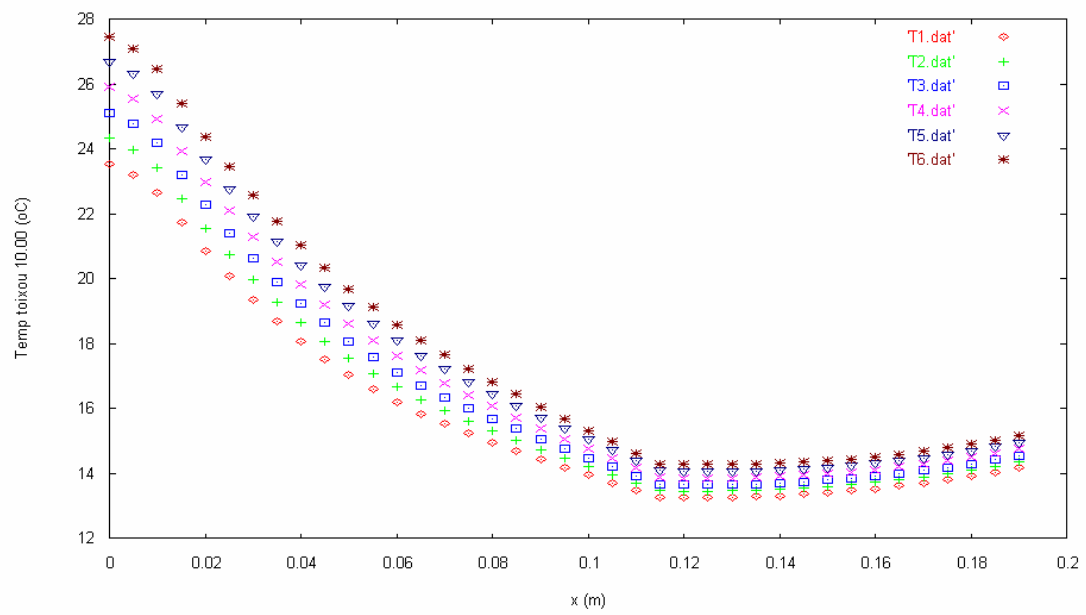
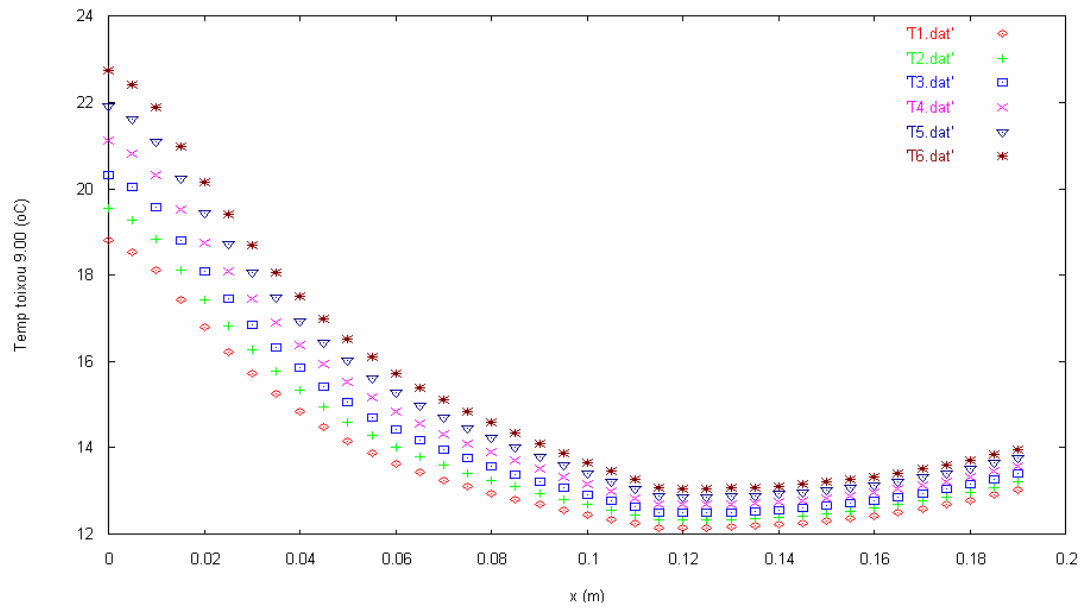
Μόνωση :0.07-0.12 m

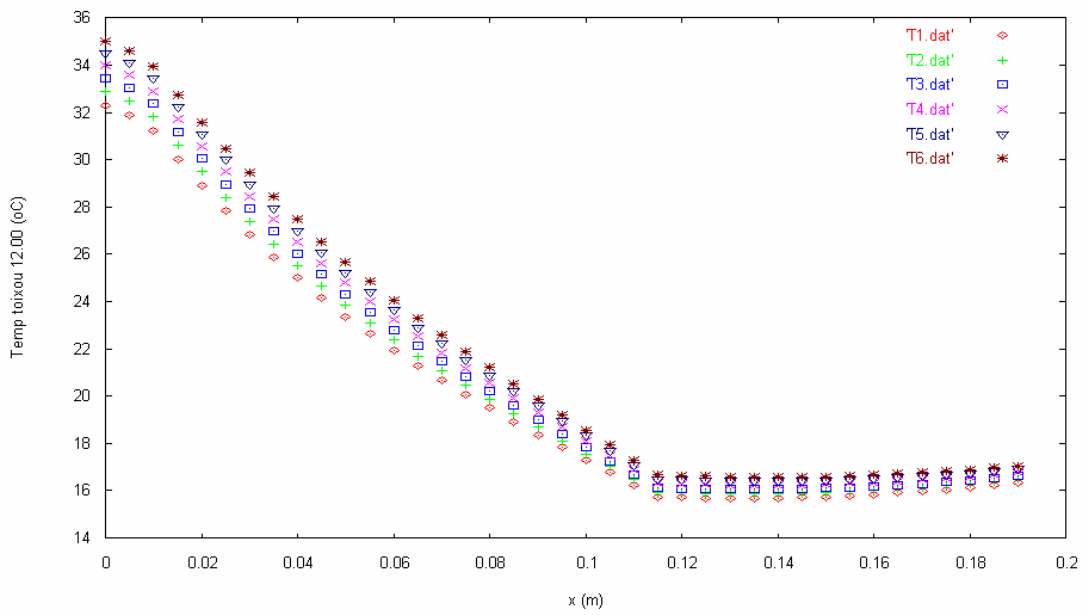
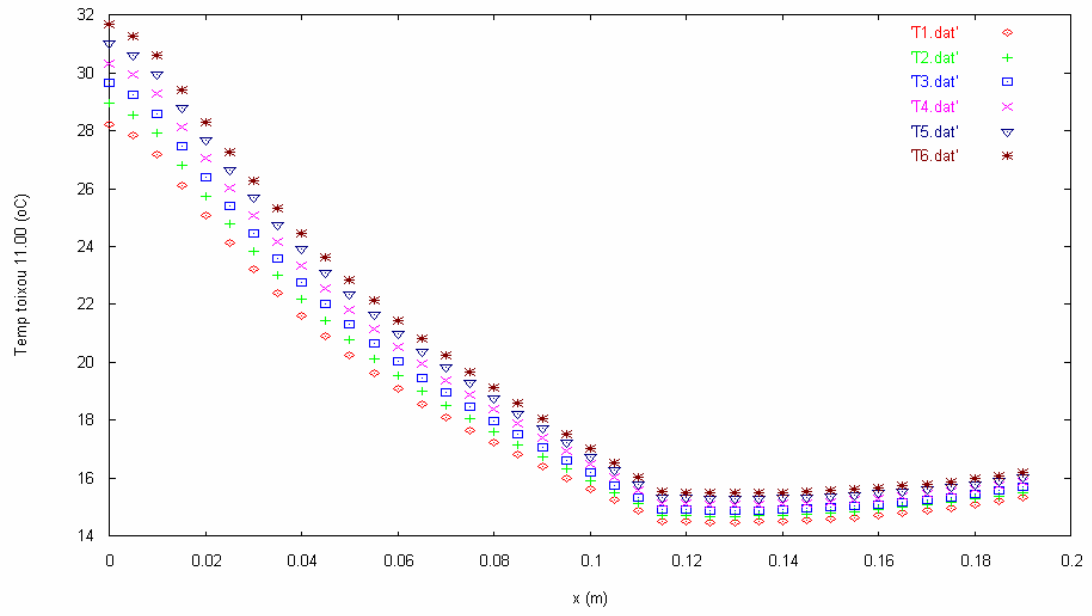
Τούβλο :0.12-0.18 m

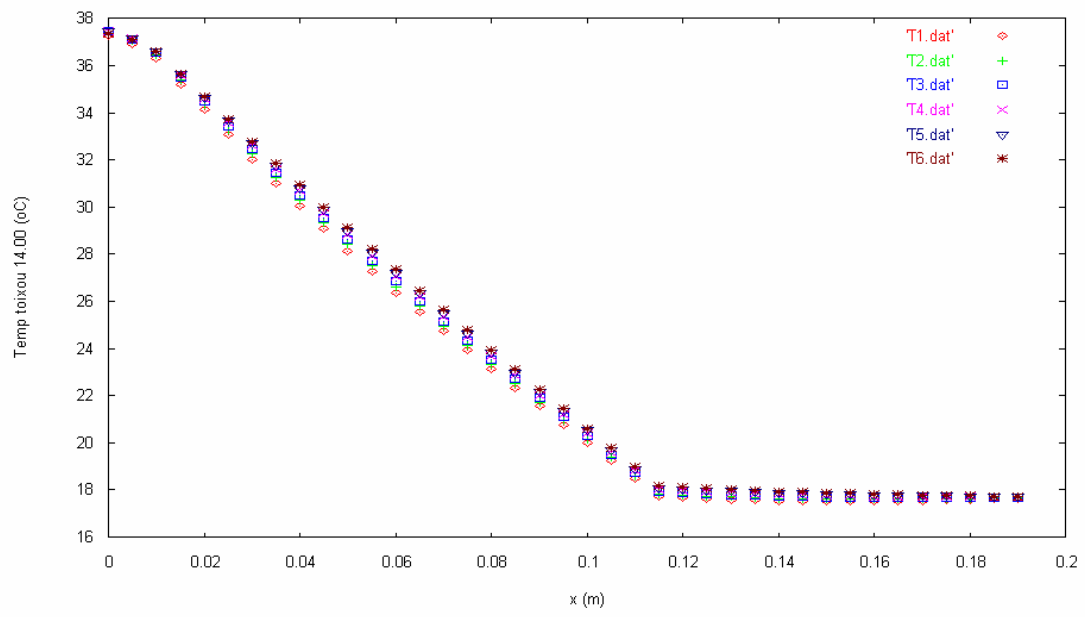
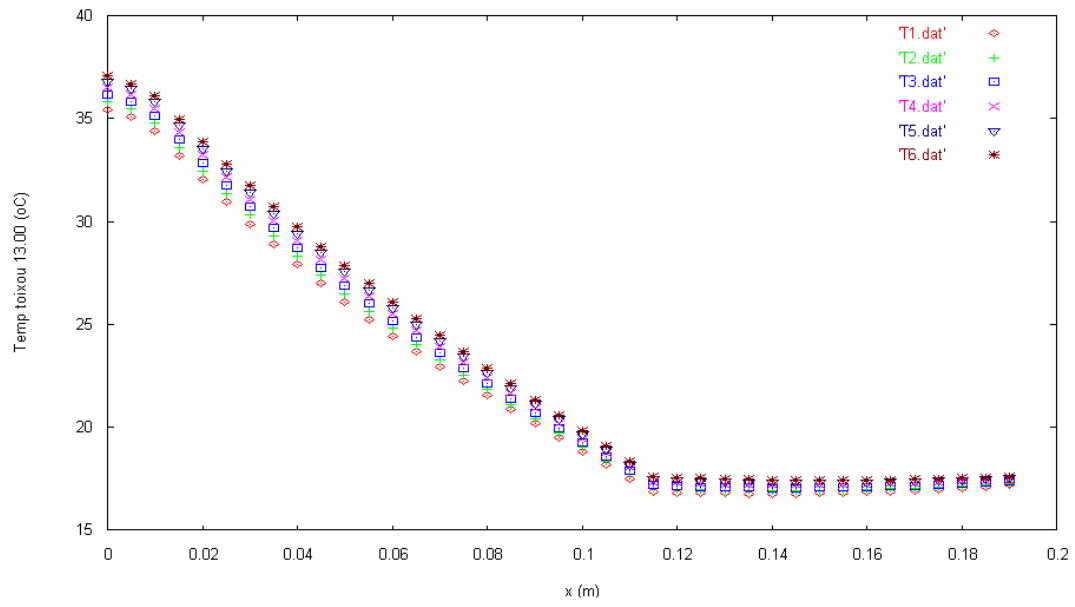
Σοβάς: 0.18-0.19 m

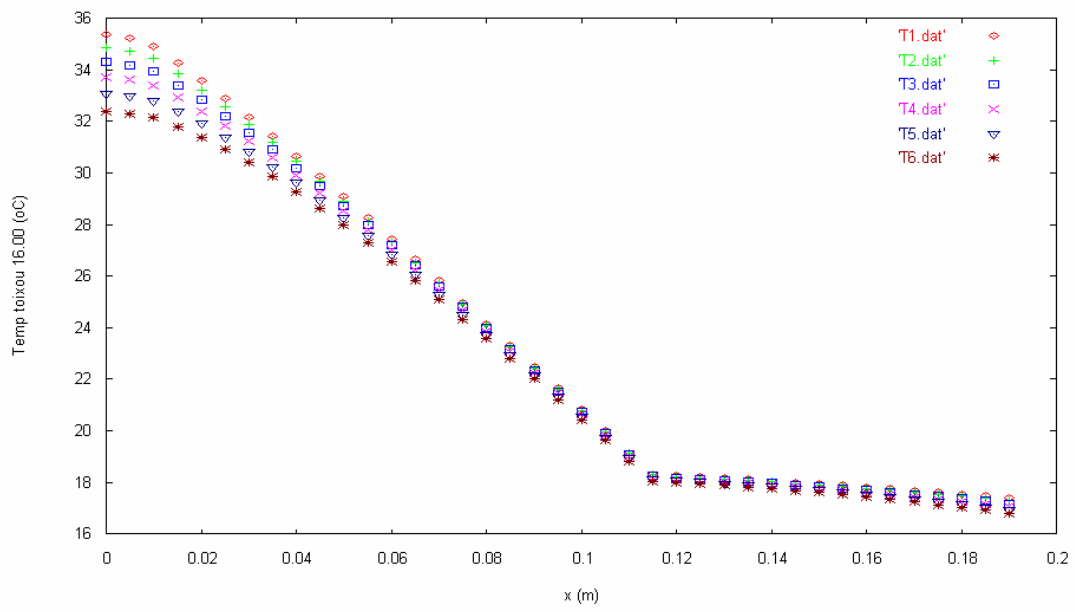
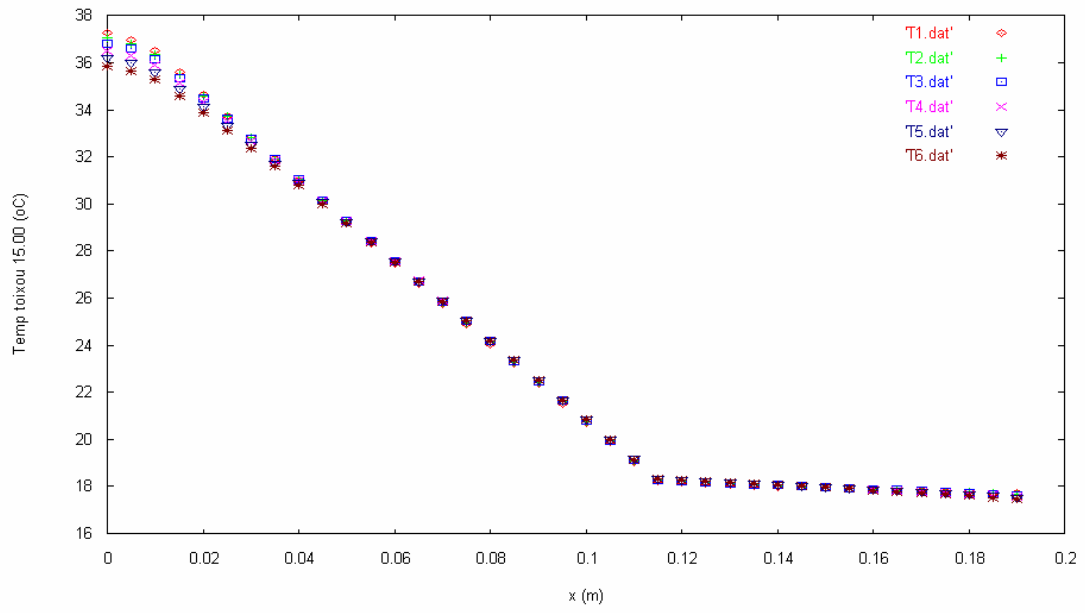


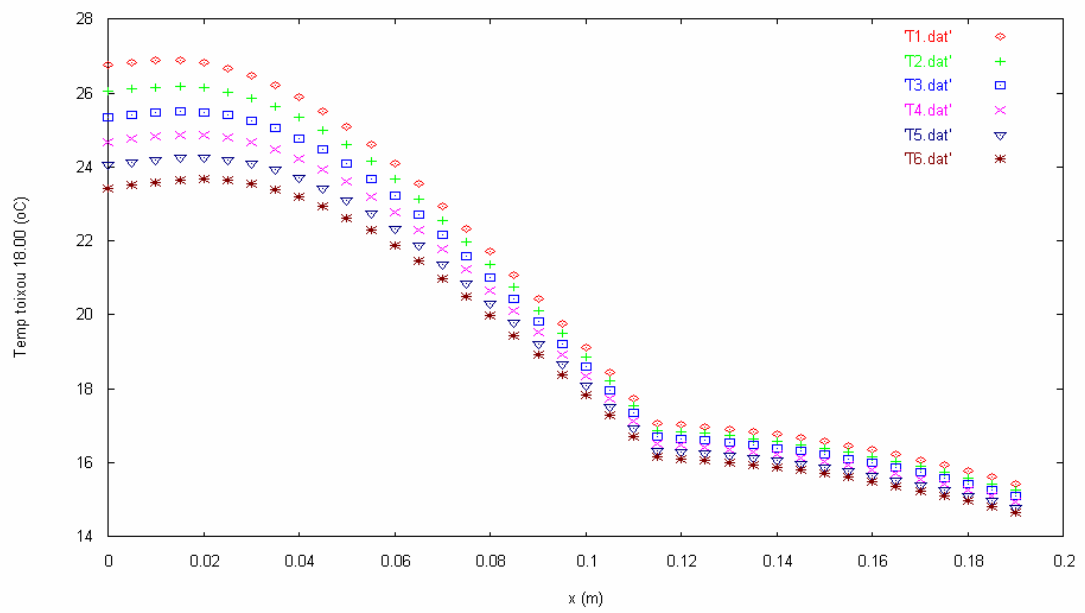
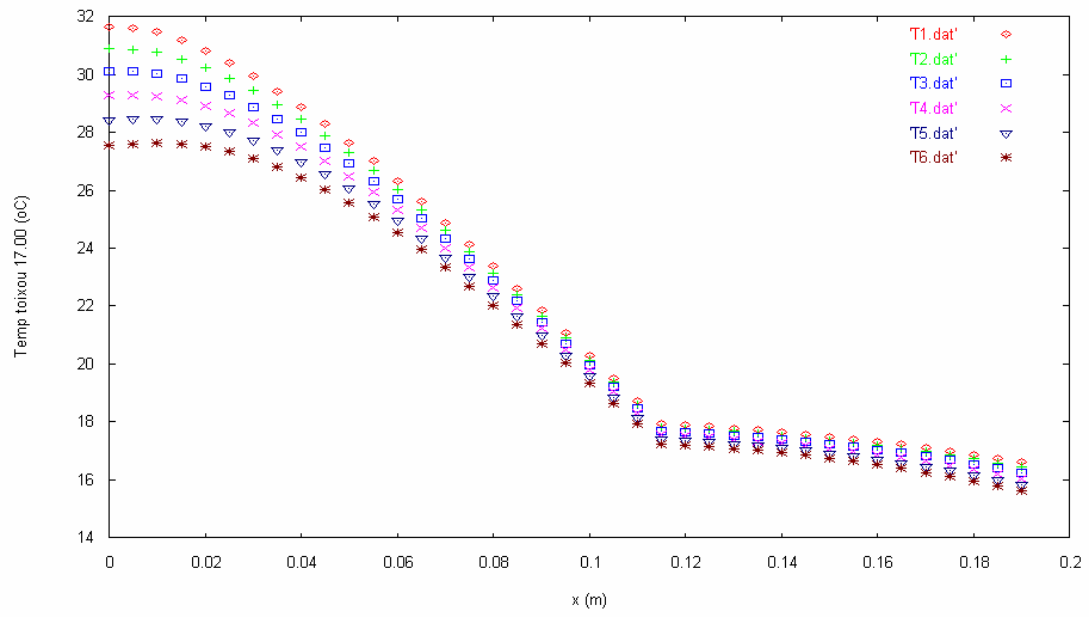
Εικόνα 146:Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος του τοίχου κατά την διάρκεια του 24 ωρου, ακολουθούν τα διαγράμματα των υπόλοιπων ωρών

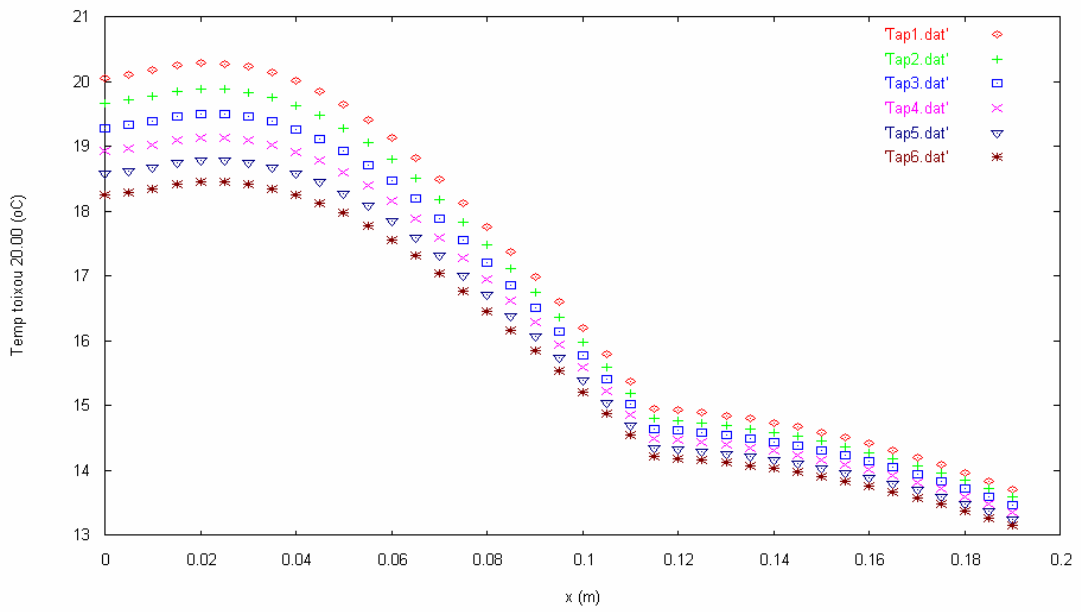
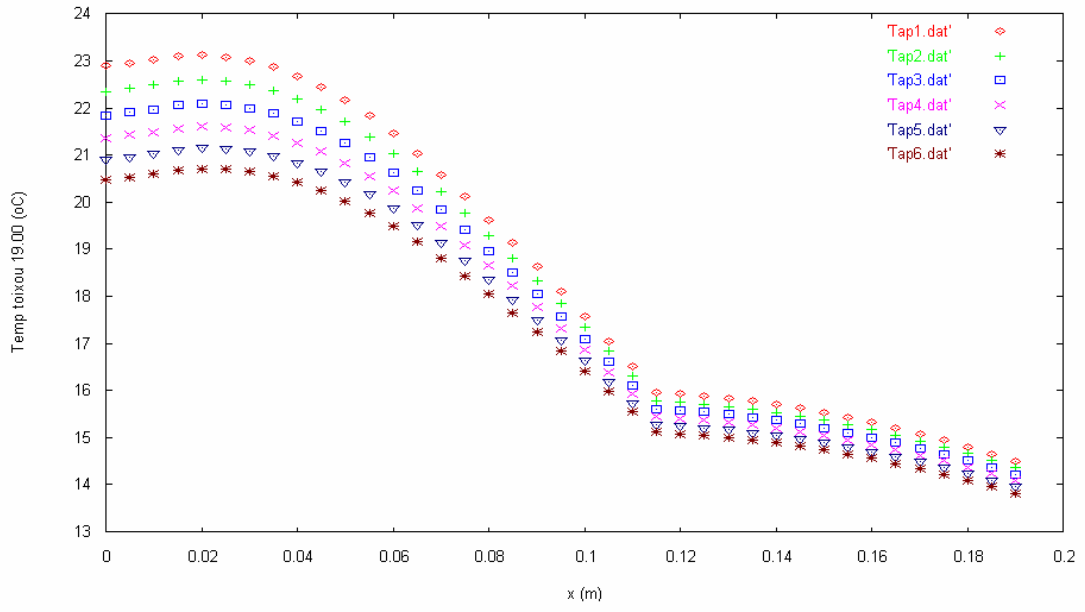


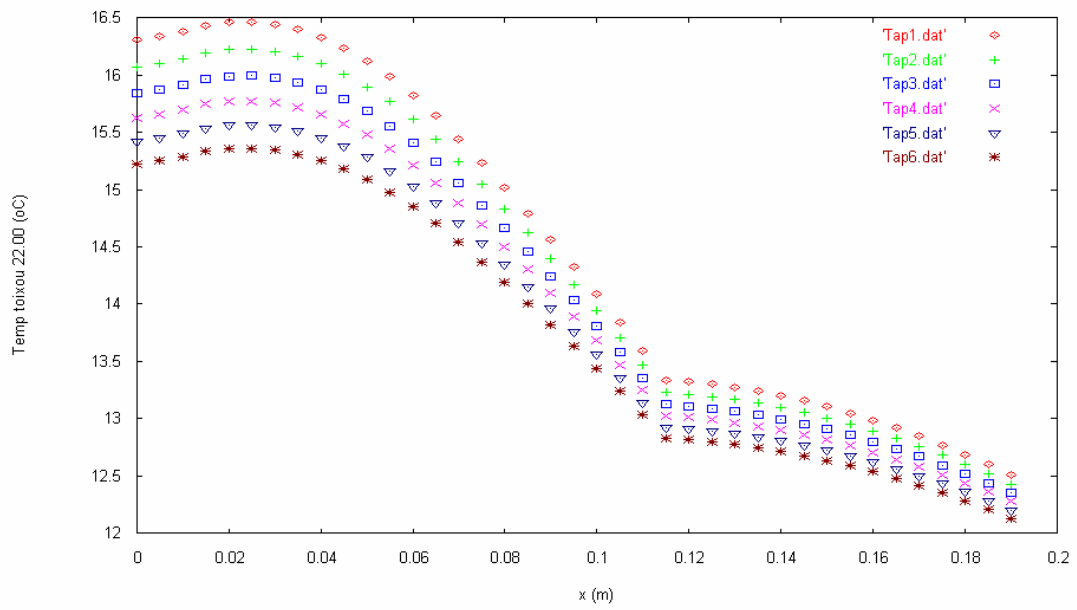
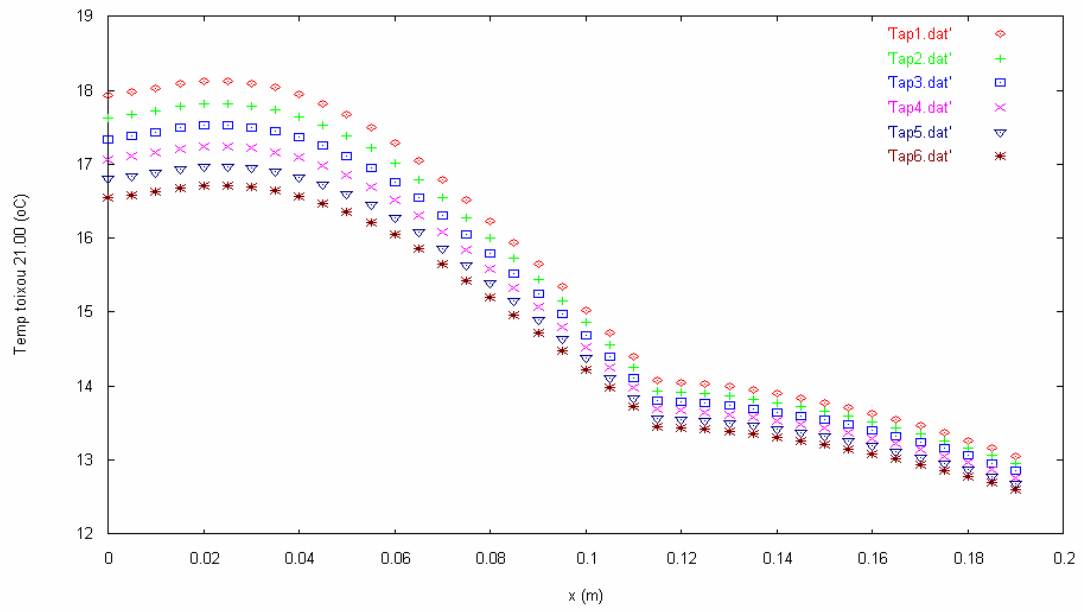


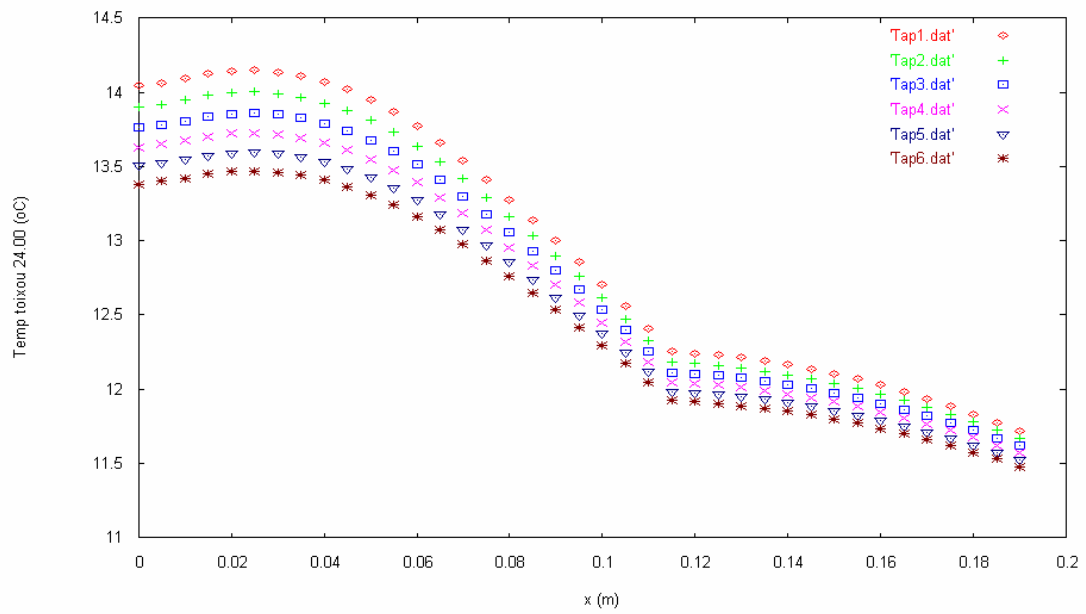
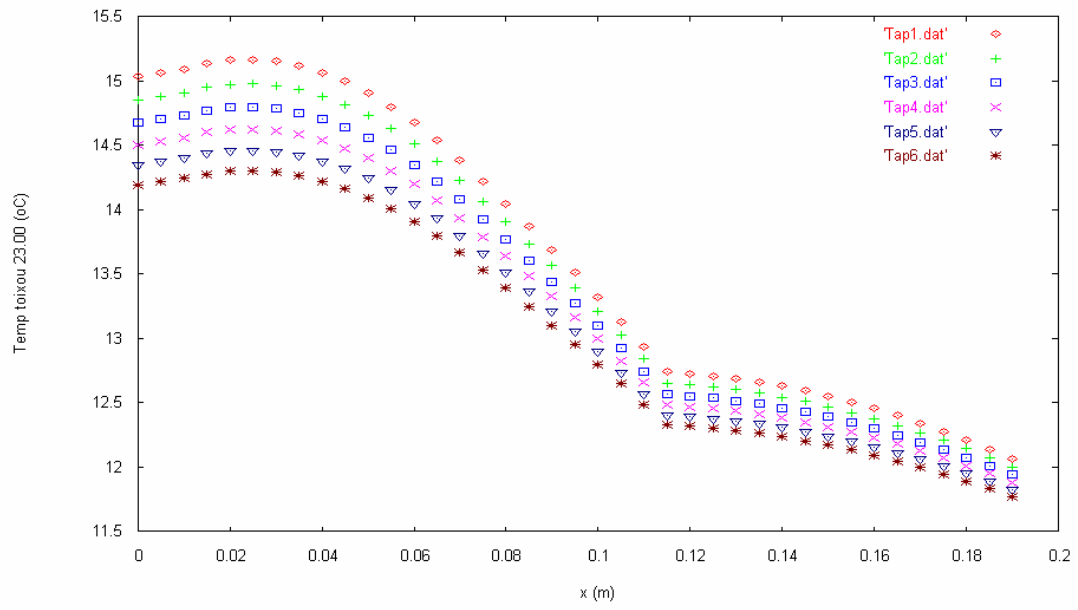


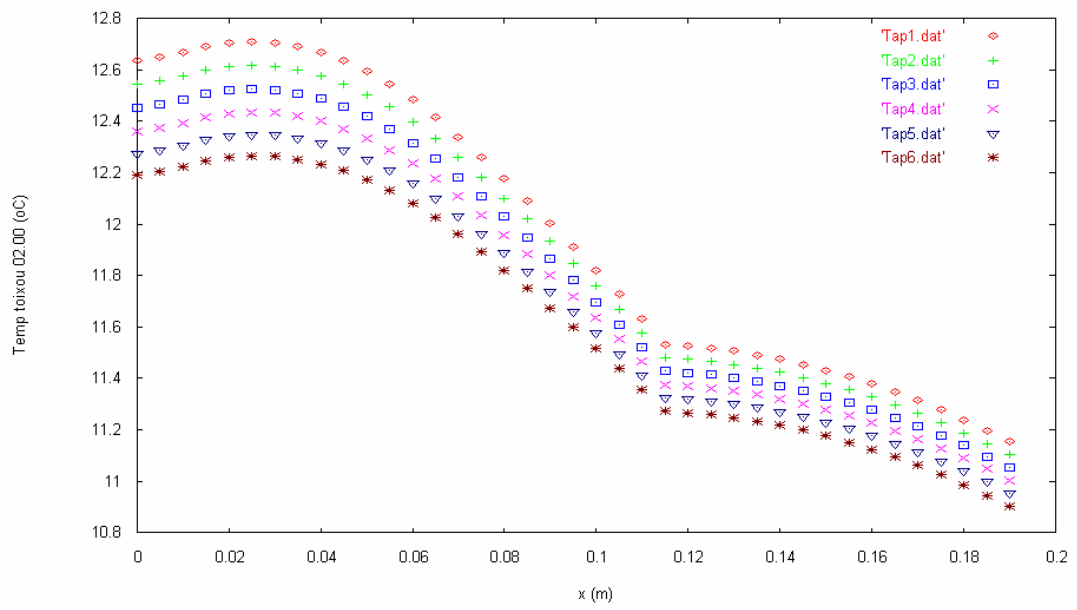
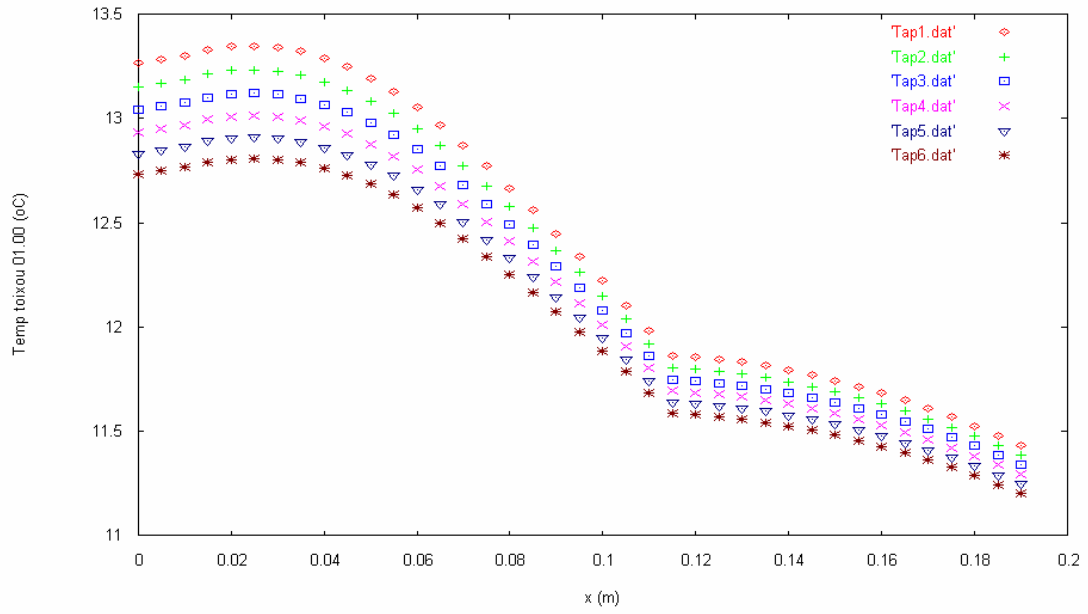


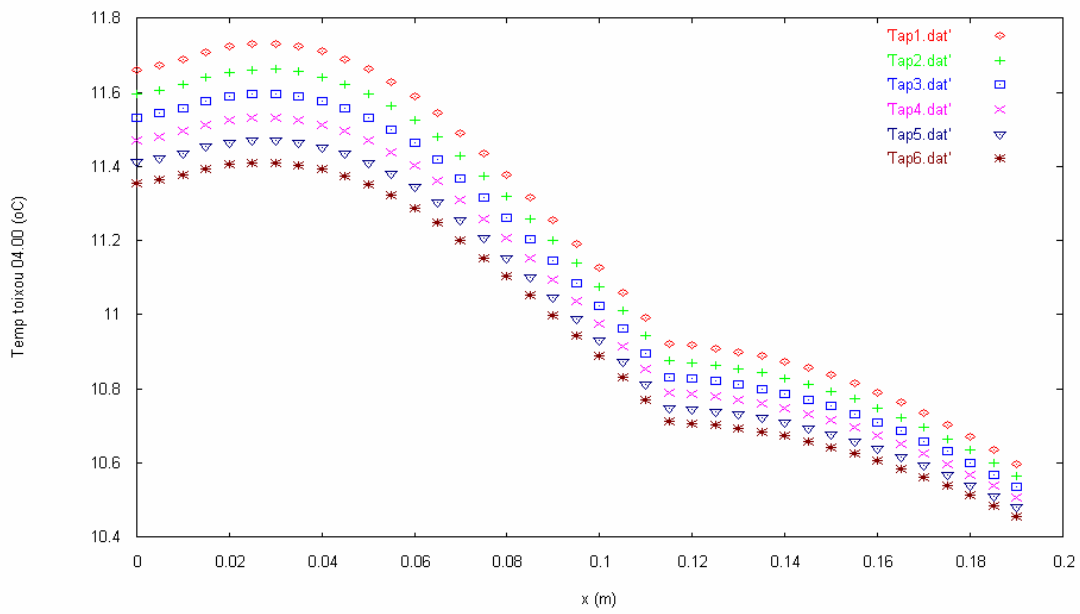
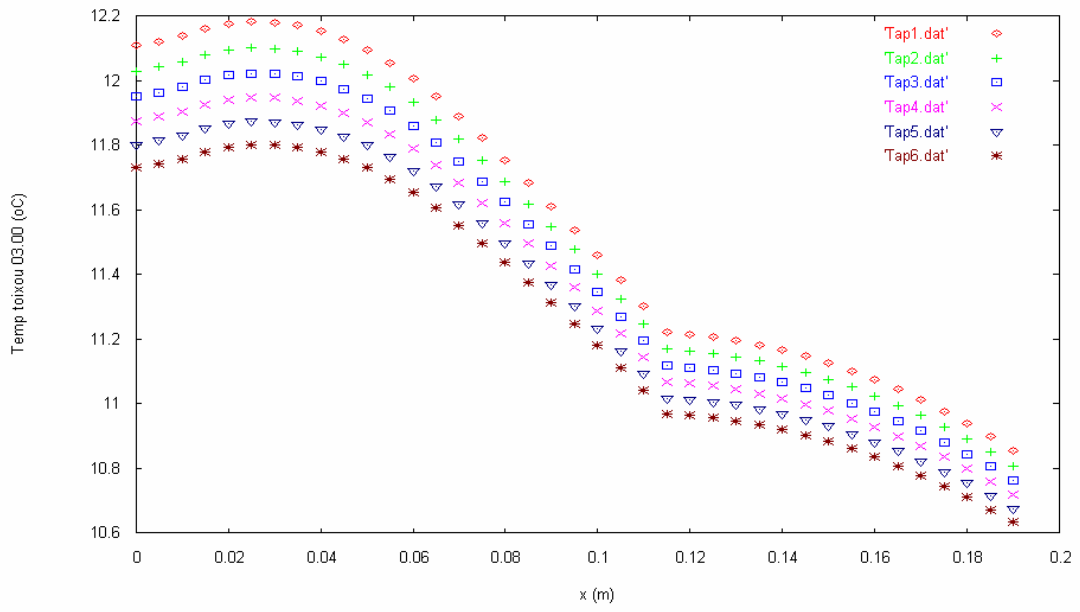


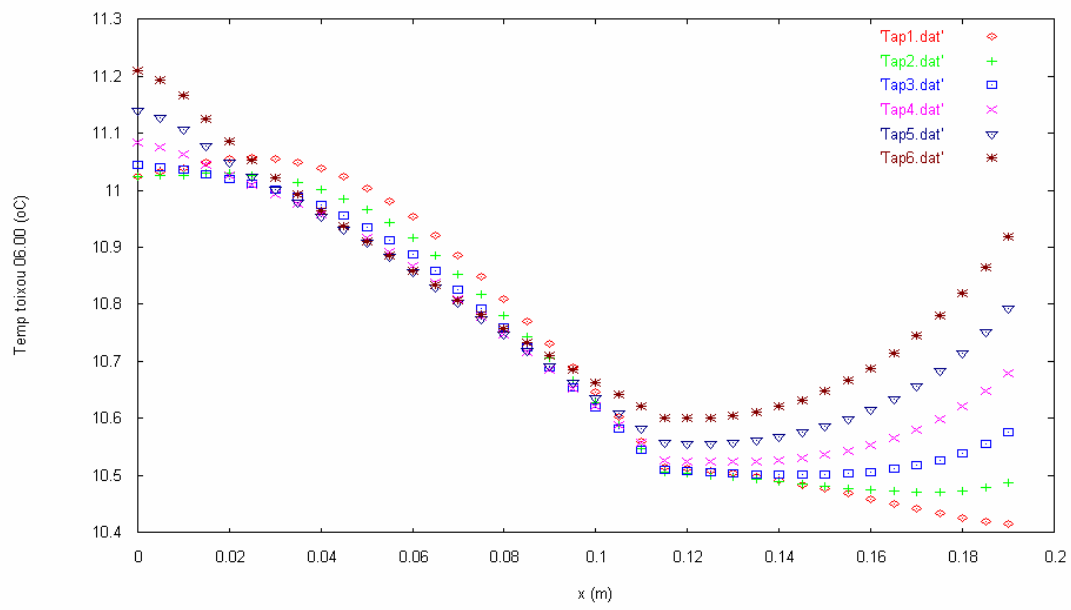
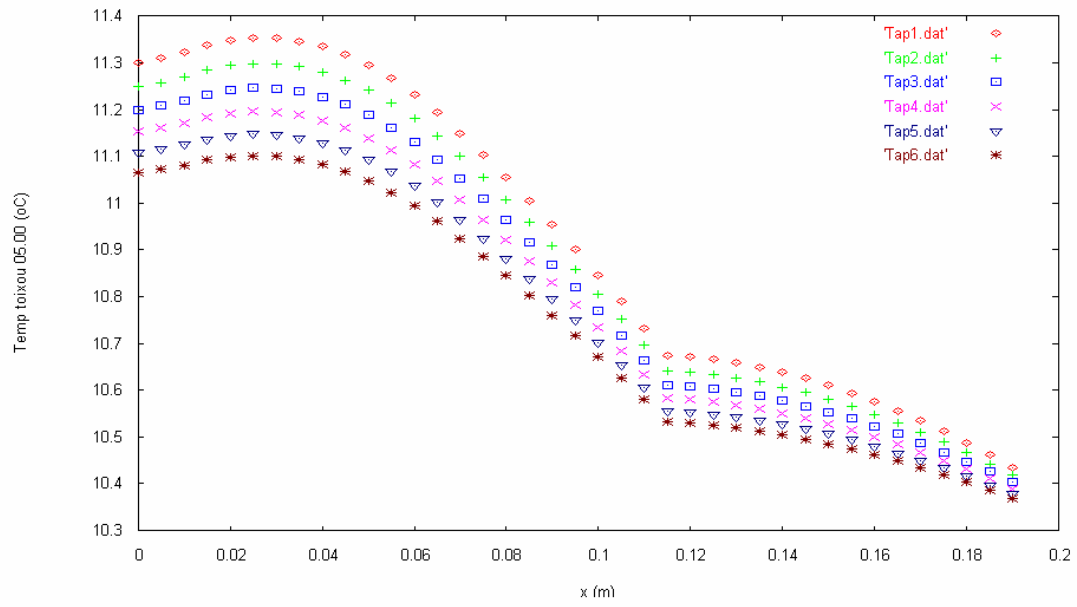












16.7.4. Σύγκριση των αποτελεσμάτων και συμπεράσματα για τον μήνα

Μάρτιο

Η εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου παρουσιάζει αντίστοιχη μεταβολή με αυτή των προηγούμενων μηνών. Πιο συγκεκριμένα, για την περίπτωση της κλασσικής διάταξης του τοίχου με PCM η θερμοκρασία κυμαίνεται ανάμεσα στις τιμές 34-20°C, ενώ στην πρώτη παραμετρική μελέτη, η θερμοκρασία αυτή λαμβάνει τιμές από 34-16 °C, αυξάνεται δηλαδή το εύρος της, πράγμα που αποκλίνει από τον σκοπό της εργασίας αυτής. Όταν δεν τοποθετούμε καθόλου PCM στον τοίχο, είναι επόμενο οι θερμοκρασίες του εσωτερικού αέρα του δωματίου να είναι μικρότερες, δηλαδή της τάξης των 30-15 °C.

Οι τιμές της θερμοκρασίας του τοίχου, για τον μήνα Μάρτιο είναι σαφώς υψηλότερες, συγκριτικά με αυτές των προηγούμενων μηνών. Φυσικά, λόγω της μορφής του τοίχου, στην κλασσική διάταξη αυτού με PCM, εμφανίζονται οι μεγαλύτερες τιμές καθ' όλο το μήκος του, γεγονός, όμως, που καθιστά το PCM ένα απλό δομικό υλικό και όχι ένα υλικό αλλαγής φάσης. Οι θερμοκρασίες του τελευταίου, παραμένουν σε τόσο υψηλά επίπεδα κατά την διάρκεια ολόκληρου του 24 ωρου, ώστε αυτό παραμένει στην υγρή του φάση, και επομένως δεν δίνεται η δυνατότητα εκμετάλλευσης των ιδιοτήτων του ως PCM, κάτι που επιβεβαιώνεται και από το διάγραμμα του Cr. Από την άλλη, η πρώτη παραμετρική μελέτη, αν και προκαλεί την μεγαλύτερη διακύμανση στις τιμές της εσωτερικής θερμοκρασίας, εκμεταλλεύεται σε πολύ μεγαλύτερο ποσοστό την λανθάνουσα θερμότητα του PCM. Συγκρίνοντας τα παραπάνω με την περίπτωση κατά την οποία δεν χρησιμοποιείται καθόλου υλικό αλλαγής φάσης, παρατηρούμε την διαφορά και στις θερμοκρασίες του τοίχου, που είναι πολύ χαμηλότερες,

Με βάση τα παραπάνω, αλλά και τον σκοπό της μελέτης αυτής, θα καταλήξουμε ότι για τον μήνα Μάρτιο, η κατάλληλη διάταξη τοίχου θα είναι αυτή που παρουσιάζεται στην πρώτη παραμετρική μελέτη, καθώς μπορεί να δίνει πιο χαμηλές θερμοκρασίες τα ξημερώματα σε

σχέση με την κλασσική διάταξη του τοίχου με PCM αλλά χρησιμοποιεί τις ιδιότητες του υλικού αλλαγής φάσης, δηλαδή και την λανθάνουσα θερμότητα του και όχι μόνο την αισθητή. Βέβαια, αν κρίνουμε τα αποτελέσματα μόνο από την εσωτερική θερμοκρασία του δωματίου, τότε θα επιλέγαμε την κλασσική διάταξη του τοίχου με PCM, στην οποία αν και αποθηκεύεται θερμότητα μόνο αισθητής μορφής, και η οποία αποδίδεται σταδιακά λόγω της διάταξης του τοίχου (ύπαρξη τούβλου και σοβά που έχουν σχετικά υψηλή θερμική αγωγιμότητα και αποθηκεύουν και αυτά θερμότητα).

16.8 Επίλογος –Γενικά συμπεράσματα

Στην συγκεκριμένη εργασία μελετήθηκε το ενδεχόμενο παθητικής θέρμανσης ενός δωματίου, το οποίο βρίσκεται στην Αθήνα, κατά τους μήνες Νοέμβριο-Μάρτιο. Προκειμένου να λάβουμε πιο αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα, επιλέξαμε το δωμάτιο αυτό να είναι λίγων τετραγωνικών, μόλις 12 m²,

ύψους 2.5 m, με έναν υαλοπίνακα 3 m² προσανατολισμένο προς τον νότο. Ο τοίχος προς εξέταση ήταν αυτός ακριβώς απέναντι από το παράθυρο, και πέραν της βασικής μελέτης, στην οποία ο τοίχος είχε την κλασσική διάταξη με το PCM τοποθετημένο μέσα σε αυτόν, ακολούθησαν δύο παραμετρικές μελέτες στις οποίες είτε το PCM ήταν τοποθετημένο κοντά στην εσωτερική επιφάνεια του δωματίου, είτε δεν το χρησιμοποιούσαμε καθόλου. Επιπλέον, ακολούθησε μία ακόμα παραμετρική μελέτη που είχε σχέση με την τιμή του συντελεστή συναγωγής θερμότητας ανάμεσα στην επιφάνεια του τοίχου και στο εσωτερικό του δωματίου.

Σε ότι αφορά στον συντελεστή συναγωγής, h_{in} , καταλήξαμε ότι η καλύτερη τιμή ανάμεσα στις $h_{in} = 2,4,8 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, είναι η $h_{in} = 4 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, την οποία και χρησιμοποιήσαμε για τους περαιτέρω υπολογισμούς.

Από την έρευνα που έγινε, για να αποδειχθεί το κατά πόσο το υλικό αλλαγής φάσης βοηθάει στην παθητική θέρμανση ενός δωματίου και ποιά είναι η καλύτερη θέση στην οποία εάν αυτό τοποθετηθεί θα αποδίδει περισσότερο, καταλήξαμε στα εξής: Για όλους τους μήνες η κλασική διάταξη του τοίχου με το PCM ενσωματωμένο στο εσωτερικό της είναι αυτή που διατηρεί την θερμοκρασία του δωματίου στα πιο υψηλά επίπεδα τόσο κατά την διάρκεια της ημέρας όσο και κατά την διάρκεια της νύχτας, ενώ πάντα η θερμοκρασιακή διαφορά ημέρας-νύχτας είναι η μικρότερη, συγκριτικά με τις άλλες δύο περιπτώσεις. Σε αυτό, βέβαια, πέραν του PCM συμβάλλουν και τα 60 mm τούβλο που βρίσκονται τοποθετημένα μπροστά από αυτό και τα οποία επίσης αποθηκεύουν ένα μέρος της θερμότητας που απορροφάει-αποδίδει το PCM, παρατείνοντας έτσι την διάρκεια θέρμανσης του δωματίου, αλλά και μειώνοντας τις θερμοκρασιακές διαφορές.

Ωστόσο, με την διάταξη του τοίχου στην οποία το PCM είναι τοποθετημένο αμέσως μετά την γυψοσανίδα, και ως εκ τούτου πολύ κοντά στο εσωτερικό του δωματίου, έχουμε την δυνατότητα να εκμεταλλευτούμε σε πολύ μεγαλύτερο ποσοστό τις ιδιότητες αλλαγής φάσης του PCM, μιας και είναι πιο ευαίσθητο στις θερμοκρασιακές μεταβολές του δωματίου και επομένως λαμβάνει μεγαλύτερο εύρος τιμών. Έτσι, στα περισσότερα διαγράμματα της ειδικής θερμοχωρητικότητας του PCM αυτής της παραμετρικής μελέτης, το υλικό αλλαγής φάσης αλλάζει πλήρως φάση από την στερεή στην υγρή και το αντίστροφο. Βέβαια, στο γεγονός αυτό αποδίδονται και οι σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες του εσωτερικού αέρα του δωματίου κατά την διάρκεια της νύχτας, αφού η θερμότητα που εκλύεται από το PCM, δεν αποθηκεύεται σε κάποιο άλλο δομικό στοιχείο με υψηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, και επομένως η θερμοκρασία του μειώνεται περισσότερο συγκριτικά με την προηγούμενη περίπτωση.

Ακόμα, συγκρίνοντας τα αποτελέσματά που προκύπτουν από τις μελέτες στις οποίες χρησιμοποιείται το υλικό αλλαγής φάσης σε σχέση με αυτές στις οποίες δεν χρησιμοποιείται, μπορούμε να παρατηρήσουμε

διαφορά της τάξης των 3-4 °C υψηλότερη και χαμηλότερη τόσο στην μέγιστη όσο και στην ελάχιστη θερμοκρασία του δωματίου αντίστοιχα. Έτσι, αποδεικνύεται η επίδραση που έχει το PCM στην εσωτερική θερμοκρασία ενός χώρου.

Εδώ κρίνεται σκόπιμο να τονισθεί για μία ακόμη φορά ότι οι μέγιστες τιμές της εσωτερικής θερμοκρασίας του δωματίου, όπως και του τοίχου, και για τις τρεις περιπτώσεις που μελετάμε, μπορεί εκ πρώτης όψεως να φαίνονται υψηλές, κάτι που όμως δικαιολογείται εάν αναλογιστούμε τις διαστάσεις του δωματίου, το οποίο είναι μικρό, και του υαλοπίνακα που είναι αρκετά μεγάλος και έχει προσανατολισμό προς τον νότο. Οι τιμές αυτές επιλέχθηκαν με αυτό τον τρόπο προκειμένου να είναι πιο εμφανή τα αποτελέσματα της παθητικής θέρμανσης του δωματίου.

Επομένως, καταλήγουμε ότι για την παθητική θέρμανση ενός δωματίου που βρίσκεται στην Αθήνα με υαλοπίνακα στραμμένο προς τον νότο, η καλύτερη επιλογή είναι η κατασκευή των τοίχων με την κλασική διάταξη στην οποία θα ενσωματωθεί το υλικό αλλαγής φάσης (σοβάς-τούβλο-PCM-μόνωση –τούβλο-σοβάς). Βέβαια, οι ελάχιστες θερμοκρασίες που εμφανίζονται νωρίς το πρωί, αποκλίνουν ακόμα και σε αυτή την περίπτωση από τις συνθήκες θερμικής άνεσης, οπότε η χρήση υλικών αλλαγής φάσης για την θέρμανση ενός κτιρίου θα πρέπει να συνοδεύεται και από κάποια άλλη βοηθητική πηγή θέρμανσης.

Κεφάλαιο 17

Πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για τους υπολογισμούς

Για λόγους πληρότητας της εργασίας σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθεται το πρόγραμμα σε γλώσσα Fortran για την περίπτωση της κλασσικής διάταξης του τοίχου με PCM, ο οποίος μελετάται κατά τον μήνα Νοέμβριο, με συντελεστή συναγωγής επιφάνειας τοίχου-εσωτερικού του δωματίου $h_{in}=4 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$. Σε ότι αφορά στην μελέτη των λοιπών περιπτώσεων, χρησιμοποιήθηκε ουσιαστικά το ίδιο πρόγραμμα, με κάποιες φυσικά, μικρές τροποποιήσεις κάθε φορά.

```

program noembris
real fi,delta,omega,aa,bb,Rb,z,dx,h,dt,diafth,pi,wres,kal,par
dimension x(300),B(300),C(300),Cp(300),To(300)
dimension R(300), A(300),T(300),Txpar(13),Txparap(13)
dimension Txnorth(13),Txwest(13),Txeast(13),Txsouth(13)
dimension x1(12),x2(12),x3(12), x4(12), x5(12),x6(12),x7(12)
dimension Gd(12), Gb(12), Gt(13),Txaphor(13),Txhor(13)
dimension Txapnorth(13),Txapwest(13),Txapeast(13),Txapsouth(13)
integer i,j,k,m,N,Code,dek

```

```

N=49
z=0.24
dx=z/(N-1)
x(1)=0
x(N)=z
hin=4
hout=16
dt=600
dek=3600/dt

```

```

fi=37.97
pi=3.14

```

```

open(1,file='A.dat') ! open files to save factors
open(2,file='B.dat')
open(3,file='C.dat')
open(4,file='Temp_triang.dat')
open(5,file='R.dat')
open (7,file='pepe.dat')
open (10,file='thermothta.dat')

```

```
open(11,file='Txnorth.dat')
open(14,file='Tin.dat')
open(22,file='Txwest.dat')
open(23,file='Txeast.dat')
open(24,file='Txsouth.dat')
open(8,file='Txhor.dat')
open(30,file='Cp.dat')
open(51,file='T1.dat')
open(52,file='T2.dat')
open(53,file='T3.dat')
open(54,file='T4.dat')
open(55,file='T5.dat')
open(56,file='T6.dat')
open(15,file='Txaponorth.dat')
open(16,file='Aap.dat') ! open files to save factors
open(17,file='Bap.dat')
open(18,file='Cap.dat')
open(19,file='Temp_triangap.dat')
open(20,file='Rap.dat')
open(21,file='Tinap.dat')
open(25,file='Txapsouth.dat')
open(26,file='Txapwest.dat')
open(27,file='Txapeast.dat')
open(28,file='Txaphor.dat')
open(41,file='Tap1.dat')
open(42,file='Tap2.dat')
open(43,file='Tap3.dat')
open(44,file='Tap4.dat')
open(45,file='Tap5.dat')
open(46,file='Tap6.dat')
open(40,file='Cpap.dat')
open(65,file='diafora.dat')
```

```
open(66,file='Txpar.dat')
open(67,file='Txparap.dat')
```

```
do j=1,13
  read(11,*) Txnorth(j)
  read(22,*) Txwest(j)
  read(23,*) Txeast(j)
  read(24,*) Txsouth(j)
  read(8,*) Txhor(j)
  read(15,*) Txapnorth(j)
  read(25,*) Txapsouth(j)
  read(26,*) Txapwest(j)
  read(27,*) Txapeast(j)
  read(28,*) Txaphor(j)
  read(66,*) Txpar(j)
  read(67,*) Txparap(j)
enddo
```

```
do j=1,12
  read (7,*) x1(j), x2(j), x3(j), x4(j), x5(j), x6(j) ,x7(j)
enddo
```

```
do j=1,12
  Gb(j)= x1(j)+x2(j)*sin (((360.d0/365.d0)*325-x3(j))*pi/180)
  Gd(j)= x4(j)+x5(j)*sin(((360.d0/365.d0)*325-x6(j))*pi/180)
  if (Gb(j) .lt. 0) then
    Gb(j)=0
  endif
  if (Gd(j) .lt.0) then
    Gd(j)=0
  endif
! write(*,*) Gb(j),Gd(j)
```

```

!!upologismos Rb
delta=23.45*sin(((360.d0/365.d0)*(284+325))*pi/180)
omega=0.25*(x7(j)-12)*60
aia=-sin(delta*pi/180)*cos(fi*pi/180)+ cos(delta*pi/180)
2 *sin(fi*pi/180)*cos(omega*pi/180)
baba=sin( delta*pi/180)*sin(fi*pi/180)+cos(delta*pi/180)
1 *cos(fi*pi/180)*cos(omega*pi/180)
Rb=aia/baba
Gt(j)=(Gb(j)*Rb+Gd(j)/2+ (Gb(j)+Gd(j))*0.2/2)*1000*3
if (Gt(j).lt.0) then
  Gt(j)=0
endif
enddo
!Gt(1)=0
Gt(13)=0

lapa=7
do j=1,13
write(10,*) lapa,Gt(j)
lapa=lapa+1
enddo

close (7)
close (10)

Tin0=18
do m=1,N
  To(m)=15
enddo
wres=7
kal=19
par=1

```

```

do i=1,30
m1=int(0.07/dx+1)
m2=int(0.12/dx)
do m=m1,m2
  Cp(m)=7000
enddo

```

```

Gtu=Gt(1)
Txe=Txeast(1)
Txw=Txwest(1)
Txs=Txsouth(1)
Txh=Txhor(1)
Txparath=Txpar(1)
do j=1,12
  Rn= Txnorth(j)
  diafth= Txnorth(j+1)-Txnorth(j)
  numero=0

```

```

do k=1,dek

```

```

  numero=numero+1
  Gtu=Gtu+(Gt(j+1)-Gt(j))/dek
  Txe=Txe+(Txeast(j+1)-Txeast(j))/6
  Txw=Txw+(Txwest(j+1)-Txwest(j))/6
  Txs=Txs+(Txsouth(j+1)-Txsouth(j))/6!!!Vair=30=4*3*2.5
  Txh=Txh+(Txhor(j+1)-Txhor(j))/6
  Txparath=Txparath+(Txpar(j+1)-Txpar(j))/6
  Q1=0.85*(Tin0-Txe)*10
  Q2=0.85*(Tin0-Txw)*10
  Q3=0.85*(Tin0-Txs)*4.5

```



```

Q4=1*(Tin0-Txh)*12
Q5=2.8*(Tin0-Txparath)*3
Tin=Tin0+(hin*(To(1)-Tin0)*7.5+0.1275*Gtu-Q1-Q2-Q3-Q4-Q5)*600/
1 (1.2*1004*30)

```

```

if ((i.eq.30) .and.(k.eq.3))then
write(14,*) wres,Tin
wres=wres+1
endif

```

```

B(1)=- (hin*7.5+(1.2*7.5)/dx+7.5*2588.5*dx)
C(1)=(7.5*1.2)/dx
R(1)=- (hin*7.5*Tin+7.5*2588.5*dx*To(1)+0.7225*Gtu)
A(N)=(1.2*7.5)/dx
B(N)=- (16*7.5+(1.2*7.5)/dx+2588.5*7.5*dx)
Rn = Rn + diafth/6
R(N)=- (2588.7*7.5*dx*To(N)+16*7.5*Rn)

```

```

do m=2,N-1
x(m) = (m-1)*dx
if ((m.ge.2) .and. (m.le.(0.01/dx))) then
thcon=1.2
shc=835
den=1860
A(m) = thcon/dx
R(m) = - den*shc*dx*To(m)/dt
C(m) = 0.653/dx
B(m)= -(A(m)+den*shc*dx/dt+C(m))

```

```

else if ((m.ge.(0.01/dx+1)) .and. (m.le.(0.07/dx))) then

```

```

thcon=0.653
shc=900
den=1690
if (m.eq.(0.01/dx+1))then
A(m)=1.2/dx
else
A(m) = thcon/dx
endif
R(m) = - den*shc*dx*To(m)/dt
if (m.eq.(0.07/dx))then
C(m)=0.8/dx
else
C(m) = thcon/dx
endif
B(m)= -(A(m)+den*shc*dx/dt+C(m))

```

```

else if ((m.ge.(0.07/dx+1)) .and. (m.le.(0.120/dx))) then
thcon=0.8
shc=Cp(m)
den=1019
if (m.eq.(0.07/dx+1))then
A(m)=0.653/dx
else
A(m) = thcon/dx
endif
R(m) = - den*shc*dx*To(m)/dt
if (m.eq.(0.120/dx))then
C(m)=0.04/dx
else
C(m) = thcon/dx
endif
B(m)= -(A(m)+den*shc*dx/dt+C(m))

```

```

else if ((m.ge.(0.120/dx+1)) .and. (m.le.(0.17/dx))) then
  thcon=0.04
  shc=1210
  den=25
  if (m.eq.(0.120/dx+1))then
    A(m)=0.8/dx
  else
    A(m) = thcon/dx
  endif
  R(m) = - den*shc*dx*To(m)/dt
  if (m.eq.(0.17/dx))then
    C(m)=0.653/dx
  else
    C(m) = thcon/dx
  endif
  B(m)= -(A(m)+den*shc*dx/dt+C(m))

else if ((i.ge.(0.17/dx+1)) .and. (i.le.(0.23/dx))) then
  thcon=0.653
  shc=900
  den=1690
  if (m.eq.(0.17/dx+1))then
    A(m)=0.04/dx
  else
    A(m) = thcon/dx
  endif
  R(m) = - den*shc*dx*To(m)/dt
  if (m.eq.(0.23/dx))then
    C(m)=1.2/dx
  else
    C(m) = thcon/dx

```

```

endif
B(m)= -(A(m)+den*shc*dx/dt+C(m))

else
thcon=1.2
shc=835
den=1860
if (m.eq.(0.23/dx+1))then
A(m)=0.653/dx
else
A(m) = thcon/dx
endif
R(m) = - den*shc*dx*To(m)/dt
C(m) = thcon/dx
B(m)= -(A(m)+den*shc*dx/dt+C(m))

endif
enddo

call TRIDAG(A,B,C,R,T,N,Code)

m1=int(0.07/dx+1)
m2=int(0.12/dx)
do m=m1,m2
if (T(m).lt.15) then
Cp(m)=7000
else if ((T(m).ge.15) .and. (T(m).le.20.5)) then
Cp(m)=1821.49*(T(m)-15)+7000
else if ((T(m).gt.20.5) .and. (T(m).le.26)) then
Cp(m)=-1821.48*(T(m)-20.5)+17018.18
else
Cp(m)=7000

```

```

endif
if (i.eq.30) then
write(30,*) T(m),Cp(m)
endif
enddo

do m=2,N
write(1,*)m, A(m) ! save factors to file
enddo
do m=1,N
write(2,*)m, B(m)
write(5,*)m, R(m)
enddo
do m=1,N-1
write(3,*)m, C(m)
enddo
do m=1,N
write(4,*) i,j,k,m,x(m),T(m)
enddo
if (i.eq.30)then
write(65,*) T(1)

if ((j.eq.12).and.(k.eq.1)) then
do m=1,N
write(51,*) x(m),T(m)
enddo
elseif ((j.eq.12).and.(k.eq.2)) then
do m=1,N
write(52,*) x(m),T(m)
enddo
elseif ((j.eq.12).and.(k.eq.3)) then
do m=1,N

```

```

    write(53,*) x(m),T(m)
enddo
elseif ((j.eq.12).and.(k.eq.4)) then
    do m=1,N
        write(54,*) x(m),T(m)
    enddo
elseif ((j.eq.12).and.(k.eq.5)) then
    do m=1,N
        write(55,*) x(m),T(m)
    enddo
elseif ((j.eq.12).and.(k.eq.6)) then
    do m=1,N
        write(56,*) x(m),T(m)
    enddo
endif
endif
endif

```

Tin0=Tin

```

do m=1,N
    To(m)=T(m)
enddo

```

```

enddo
enddo

```

!ipologismoi afotou pesei o ilios

```

m1=int(0.07/dx+1)
m2=int(0.12/dx)
do m=m1,m2

```

```

    Cp(m)=7000
enddo
Txeap=Txapeast(1)
Txwap=Txapwest(1)
Txsap=Txapsouth(1)
Txhap=Txaphor(1)
Txparathap=Txparap(1)
do j=1,12
    Rn= Txapnorth(j)
    diafth= Txapnorth(j+1)-Txapnorth(j)
    do k=1,dek
        B(1)=- (hin*7.5+(1.2*7.5)/dx+7.5*2588.5*dx)
        C(1)=(7.5*1.2)/dx
        R(1)=- (hin*7.5*Tin+7.5*2588.5*dx*To(1)+0.7225*Gtu)
        A(N)=(1.2*7.5)/dx
        B(N)=- (16*7.5+(1.2*7.5)/dx+2588.5*7.5*dx)
        Rn = Rn + diafth/6
        R(N)=- (2588.7*7.5*dx*To(N)+16*7.5*Rn)

    do m=2,N-1
        x(m) = (m-1)*dx
        if ((m.ge.2) .and. (m.le.(0.01/dx))) then
            thcon=1.2
            shc=835
            den=1860
            A(m) = thcon/dx
            R(m) = - den*shc*dx*To(m)/dt
            C(m) = 0.653/dx
            B(m)= -(A(m)+den*shc*dx/dt+C(m))

```

```

else if ((m.ge.(0.01/dx+1)) .and. (m.le.(0.07/dx))) then
  thcon=0.653
  shc=900
  den=1690
  if (m.eq.(0.01/dx+1))then
    A(m)=1.2/dx
  else
    A(m) = thcon/dx
  endif
  R(m) = - den*shc*dx*To(m)/dt
  if (m.eq.(0.07/dx))then
    C(m)=0.8/dx
  else
    C(m) = thcon/dx
  endif
  B(m)= -(A(m)+den*shc*dx/dt+C(m))

```

```

else if ((m.ge.(0.07/dx+1)) .and. (m.le.(0.120/dx))) then
  thcon=0.8
  shc=Cp(m)
  den=1019
  if (m.eq.(0.07/dx+1))then
    A(m)=0.653/dx
  else
    A(m) = thcon/dx
  endif
  R(m) = - den*shc*dx*To(m)/dt
  if (m.eq.(0.120/dx))then
    C(m)=0.04/dx
  else
    C(m) = thcon/dx
  endif

```


$$B(m) = -(A(m) + \text{den} * \text{shc} * dx/dt + C(m))$$

else if ((m.ge.(0.120/dx+1)) .and. (m.le.(0.17/dx))) then

thcon=0.04

shc=1210

den=25

if (m.eq.(0.120/dx+1))then

A(m)=0.8/dx

else

A(m) = thcon/dx

endif

R(m) = - den*shc*dx*To(m)/dt

if (m.eq.(0.17/dx))then

C(m)=0.653/dx

else

C(m) = thcon/dx

endif

B(m) = -(A(m) + den*shc*dx/dt + C(m))

else if ((i.ge.(0.17/dx+1)) .and. (i.le.(0.23/dx))) then

thcon=0.653

shc=900

den=1690

if (m.eq.(0.17/dx+1))then

A(m)=0.04/dx

else

A(m) = thcon/dx

endif

R(m) = - den*shc*dx*To(m)/dt

if (m.eq.(0.23/dx))then

C(m)=1.2/dx

else

```

C(m) = thcon/dx
endif
B(m)= -(A(m)+den*shc*dx/dt+C(m))

else
thcon=1.2
shc=835
den=1860
if (m.eq.(0.23/dx+1))then
A(m)=0.653/dx
else
A(m) = thcon/dx
endif
R(m) = - den*shc*dx*To(m)/dt
C(m) = thcon/dx
B(m)= -(A(m)+den*shc*dx/dt+C(m))

endif
enddo

call TRIDAG(A,B,C,R,T,N,Code)

m1=int(0.07/dx+1)
m2=int(0.12/dx)
do m=m1,m2
if (T(m).lt.15) then
Cp(m)=7000
else if ((T(m).ge.15) .and. (T(m).le.20.5)) then
Cp(m)=1821.49*(T(m)-15)+7000
else if ((T(m).gt.20.5) .and. (T(m).le.26)) then
Cp(m)=-1821.48*(T(m)-20.5)+17018.18

```

```

else
  Cp(m)=7000
endif
if (i.eq.30) then
write(30,*) T(m),Cp(m)
endif
enddo

Txear=Txear+(Txapeast(j+1)-Txapeast(j))/6
Txwap=Txwap+(Txapwest(j+1)-Txapwest(j))/6
Txsap=Txsap+(Txapsouth(j+1)-Txapsouth(j))/6
Txhap=Txhap+(Txaphor(j+1)-Txaphor(j))/6
Txparathap=Txparathap+(Txparap(j+1)-Txparap(j))/6
Qp=hin*(T(1)-Tin0)*7.5
Q1=0.85*(Tin0-Txear)*10
Q2=0.85*(Tin0-Txwap)*10
Q3=0.85*(Tin0-Txsap)*4.5
Q4=1*(Tin0-Txhap)*12
Q5=2.8*(Tin0-Txparathap)*3
Tin=(600/(1.2*1004*30))*(Qp-Q1-Q2-Q3-Q4-Q5)+Tin0

if ((i.eq.30) .and.(k.eq.3)) then
  if ((j.ge.1).and.(j.le.6)) then
write(14,*)kal,Tin
kal=kal+1
  else
write(14,*) par,Tin
par=par+1
  endif
endif

do m=2,N

```

```

write(16,*)m, A(m)
enddo
do m=1,N
write(17,*)m, B(m)
write(20,*)m, R(m)
enddo
do m=1,N-1
write(18,*)m, C(m)
enddo
do m=1,N
write(19,*) i,j,k,m,x(m),T(m)
enddo
if (i.eq.30)then
if ((j.eq.12).and.(k.eq.1)) then
do m=1,N
write(41,*) x(m),T(m)
enddo
elseif ((j.eq.12).and.(k.eq.2)) then
do m=1,N
write(42,*) x(m),T(m)
enddo
elseif ((j.eq.12).and.(k.eq.3)) then
do m=1,N
write(43,*) x(m),T(m)
enddo
elseif ((j.eq.12).and.(k.eq.4)) then
do m=1,N
write(44,*) x(m),T(m)
enddo
elseif ((j.eq.12).and.(k.eq.5)) then
do m=1,N
write(45,*) x(m),T(m)

```

```
enddo
elseif ((j.eq.12).and.(k.eq.6)) then
  do m=1,N
    write(46,*) x(m),T(m)
  enddo
endif
endif
```

```
Tin0=Tin
do m=1,N
  To(m)=T(m)
enddo
```

```
enddo
enddo
```

```
enddo
close(15)
close(16)
close(17)
close(18)
close(19)
close(20)
close(21)
close(25)
close(26)
close(27)
close(28)
close(41)
close(42)
close(43)
close(44)
```

close(45)
close(46)
close(40)
close(1)
close(2)
close(3)
close(4)
close(5)
close(8)
close(11)
close(14)
close(22)
close(23)
close(24)
close (30)
close(51)
close(52)
close(53)
close(54)
close(55)
close(56)
close(65)
close(66)
close(67)

end

Subroutine TRIDAG(A,B,C,R,U,N,CODE)

```
!*****
```

```
! Solves for a vector U of length N the tridiagonal linear set
```

```
!  $M U = R$ , where A, B and C are the three main diagonals of matrix
```

```
!  $M(N,N)$ , the other terms are 0. R is the right side vector.
```

```
!*****
```

```
REAL    BET,GAM(N),A(N),B(N),C(N),R(N),U(N)
```

```
INTEGER CODE,N,J
```

```
IF(B(1).EQ.0.) THEN
```

```
    CODE=1
```

```
    RETURN
```

```
ENDIF
```

```
BET=B(1)
```

```
U(1)=R(1)/BET
```

```
DO J=2,N           !Decomposition and forward substitution
```

```
    GAM(J)=C(J-1)/BET
```

```
    BET=B(J)-A(J)*GAM(J)
```

```
    IF(BET.EQ.0.) THEN      !Algorithm fails
```

```
        CODE=2
```

```
        RETURN
```

```
    ENDIF
```

```
    U(J)=(R(J)-A(J)*U(J-1))/BET
```

```
END DO
```

```
!U(2)=(R(1)-B(1)*U(1))/C(1)
```

```
DO J=N-1,1,-1     !Back substitution
```

```
    U(J)=U(J)-GAM(J+1)*U(J+1)
```

```
END DO
```

$$U(N)=(R(N)-A(N)*U(N-1))/B(N)$$

CODE=0

return

end

Βιβλιογραφία

- [1] Zhang YP, Lin KP, Zhang QL, Di HF, Ideal thermophysical properties for free-cooling (or heating) buildings with constant thermal physical property material. Energy and Buildings, 2006
- [2] Από το site pcmenergy.com
- [3] Asan H., Sancaktar YS.Effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor.Energy and Buildings , 1998
- [4] Yinping Zhang, Kunping Lin, Guobing Zhou, Department of Building Science, Tsinghua University, Beijing, China, Thermal Storage and non-linear heat transfer characteristics of PCM wallboard, 2008
- [5] Από τις σημειώσεις του μαθήματος «Θερμική συμπεριφορά κτιρίων», Χρήστος Τζιβανίδης
- [6] Peippo K, Kauranen P, Lund PD, Multicomponent PCM wall optimized for passive solar heating, Energy and Buildings, 1991
- [7] Neeper DA, Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage, Solar Energy, 2000
- [8] Salyer IO, Sircar AK, Phase change materials for heating and cooling of residential buildings and other application. Proceedings of the 25th intersociety energy conversion engineering conference , 1990
- [9] Banu D, Feldman D, Haghghat F, Paris J , Hawes D, Energy storing wallboard :flammability tests , Journal of Materials in Civil Engineering , 1998
- [10] A.Felix Regin, S.C.Solanki, J.S.Saini, Department of Mechanical and Industrial Engineering, Indian Institute of Technology Roorkee
- [11] Vineet Veer Tyagi, D. Buddhi, Thermal Energy Storage Laboratory, School Of Energy and Environmental Studies, Faculty of Engineering Science, Devi Ahilya University, India, 2005

- [12] Vineet Veer Tyagi, D. Buddhi, Thermal Energy Storage Laboratory, School Of Energy and Environmental Studies, Faculty of Engineering Science, Devi Ahilya University, India, 2005
- [13] A.Pasupathy, R.Velraj, Department of Mechanical Engineering , Anna Venkateswara College of Engineering, Sriperumpudur, Tamilandu, India, Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments
- [14] Bourdeau LE, Study of two passive solar systems containing phase change materials for thermal storage, In: Hayes J, Snyder R, editors Proceedings of the fifth national passive solar conference 19-26 October, American Solar Energy Society, 1980
- [15] Buddhi D, Sharma SD, Measurements of Transmittance of Solar Radiation through stearic acid : latent heat storage material, Energy Convers Manage, 1990
- [16] Buddhi D, Mishra HS, Sharma A, Theoretical performance studies of a test cell having a PCM window in south direction, India 2003
- [17] Arkar C, Medved S., Enhanced solar assisted building ventilation system using sphere encapsulated PCM thermal heat storage, Advanced thermal energy storage techniques-feasibility studies and demonstration projects 2nd workshop, April 2002, Ljubljana Slovenia
- [18] Stritih U, Novak P, Thermal storage of solar energy in the wall for building ventilation. Second workshop IEA, Advanced thermal energy storage techniques-feasibility studies and demonstration projects , Ljubljana, Slovenia, April 2002)
- [19] Feustel HE, Stetiu C., Thermal performance of phase change wallboard for residential cooling application, Lawrence Berkeley National laboratory, 1997
- [20] Kissok JK, Hannig JM, Whitney TI, Drake ML, Testing and simulation of phase change wallboard for thermal storage in buildings. Proceedings of 1998 international solar energy conference, New York, USA, 1998
- [21] Hawes DW, Banu D, Feldman D., Latent heat storage in concrete II, Sol. Energy Mater, 1990
- [22] Salyer IO, Sircar AK, Kumar A, Advanced phase change materials technology: valuation in lightweight solite hollow core building blocks, In : Proceedings of the 30th intersociety energy conversion engineering conference , Orlado, USA, 1995
- [23] Chahroudi D, Thermocrete heat storage materials: applications and performance specifications. In: Proceedings of Sharing the Sun Solar Technology in the Seventies Conference, Winnipeg, USA, 1976, Chahroudi D., Development of thermocrete heat storage materials. In: Proceedings of the International Solar Energy Congress, vol1 , New Delhi, India, 1978

- [24] Lee T., Hawes DW, Banu D, Feldman D, Control aspects of latent heat storage and recovery in concrete. *Solar Energy Mater Solar Cells*, 2000
- [25] Hadjieva M, Stoykov R, Filipova T, Composite salt-hydrate concrete system for building energy storage. *Renew Energy*, 2000
- [26] Mehling R, Krippner A, Hauer, Research project on PCM in wood-light weight concrete. In : *Proceedings of the second workshop of IEA ECES IA Annex 17, Ljubljana, Slovenia*, 2002
- [27] Meng Z, Mario AM, Jennifer BK, Development of a thermally enhanced frame wall with phase change materials for on- peak air-conditioning demand reduction and energy savings in residential buildings, *Int J Energy Res*, Greenheck Fan Corporation, Schofield, USA, 2005
- [28] A.Pasupathy, R.Velraj, Department of Mechanical Engineering, Anna University, Chennai, India- R.V.Seeniraj, Department of Mechanical Engineering, Sri Venkateswara College of Engineering, Sriperumpudur, Tamilnadu, India, Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments
- [29] Saman WY, Belusko M, Roof integrated unglazed transpired solar air heater. In : Lee T, editor. *Proceedings of the 1997 Australian and New Zealand Solar Energy Society*, Paper 66, Canberra, Australia, 1997
- [30] Hed G., Use of phase change material for change of thermal inertia. Sixth expert meeting workshop of Annex 17, advanced thermal energy storage through phase change materials and chemical reactions: feasibility studies and demonstration projects in Arvika, Sweden, 2004
- [31] Zalba B., Martin JM., Sanchez-Valverde B., Cabeza LF., Free Cooling. An application of PCMs in TES *proceedings of the third workshop of IEA ECES IA Annex 17, Tokyo, Japan*, 2002
- [32] Wakilatojjar S., Saman M., Domestic heating and cooling with thermal storage. Eight international conference on thermal energy storage, Stuttgart, Germany, 2000
- [33] Morrison, DJ, Abdel Khalik SI, Effect of phase change energy storage on the performance of air- based and liquid –based solar heating system, *Sol.energy*, 1978) kai oi Jurinak, Abdel Khalik[], (Jurinak JJ, Abdel Khalik SI, On the performance of air-based solar heating systems utilizing phase change energy storage, *Sol.Energy*, 1979
- [34] Athienities A, Chen Y, The effect of solar radiation on dynamic thermal performance of floor heating systems, *Sol.Energy*, 2000
- [35] Guthertz, JM, Schiller ME, A passive solar heating system for the perimeter zone of office buildings. *Energy Sources*, 1991
- [36] Luisa F.Cabeza, Cecilia Castellon, Miquel Nogues, Marc Medrano – Department d' informatica I Eng.Industrial, Universitat de Leida, Leida, Spain, Ron Leppers – INTRON B.V., The Netherlands, Oihana Zubillaga – Fundacion INASMET, San Sebastian, Spain, Use of

- microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings, 2006
- [37] Feldman D, Banu D, Hawes D, Ghanbari E, Obtaining an energy storing building material by direct incorporation of an organic phase change material in gypsum wallboard. *Solar Energy Materials*, 1991
- [38] Hawes DW, Feldman D, Absorption of phase change materials in concrete, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1992
- [39] Darkwa K, Kim JS, Heat transfer in neuron composite laminated phase change drywall. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A, Journal of Power and Energy*, 2004), (Darkwa K, Kim JS, Dynamics of energy storage in phase change drywall systems. *International Journal of Energy Research*, 2005
- [40] Samira Haghshenaskashani, Department of Aerospace Engineering, Tarbiat Modares University, Teheran, Hadi Pasdarshahri Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University
- [41] Esam M. Alawadhi, Kuwait University Mechanical Engineering Department, 2007
- [42] Victor delValle, Dale Bessete, Lisa Sopkov, John Zhou, Kaz Szymocha, Long- term performance of the phase change material applied for heat storage, Alberta Research Council, Canada
- [44] Manuel Ibanez, Ana Lazaro, Belen Zalba, Luisa F.Cabeza, University of Lleida- University of Zaragoza, Spain, 2004)
- [45] V.Aro-Heinila, M.Suvarnen, Simulation program for energy analysis of multiroom houses for solar energy studies, Helsinki University of Technology, 1980
- [46] J.Jokisalo, P.Lamberg, K.Siren, Thermal simulation of PCM structures with TRNSYS, in 8th International Conference on Thermal Energy Storage, Stuttgart, Germany, 2000
- [47] W.A.Beckman et al. TRNSYS, Reference manual vol.2, Solar Energy Laboratory, Madison, USA, 2001
- [48] P.Schossig, H.-M.Henning, T.Haussman, A.Raicu, Encapsulated phase change materials intergrated into construction materials, in : *Proceedings of the 9th International Conference on Thermal Energy Storage*, Futurestock 2003, Warsaw, Poland, 2003
- [49] J.A.Clarke, Energy simulation in building design, Adam Hilger, 1985
- [50] Heim D., Department of Building Physics and Building Materials, Technical University of Lodz, Poland- Clarke J.A., Energy Systems Research Unit, University of Strathclyde, Glasgow, Scotland, Numerical modelling and Thermal Simulation of phase change materials with ESP-r
- [51] Guobing Zhou, Yinping Zhang, Kunping Lin, Wei Xiao, Department of Building Science. School of Architecture, Tsinghua

University , Beijing, China,-Thermal analysis of a direct-gain room with shape-stabilized PCM plates, 2007

[52] Ibanez M, Lazaro A, Zalba B, Cabeza L, An approach to the simulation of PCMs in building applications using TRNSYS, Appl.Therm Eng, 2005

[53] C.Stetiu, H.E.Feustel, F.C. Winkelman ,Development of a model to simulate the performance of hydronic radiant cooling ceilings, ASHRAE Trans, 1995

[54] Guobing Zhou, Yinping Zhang ,Xin Wang, Kunping Lin, Wei Xiao, Department of building science, School of architecture , Tsinghua University, Beijing China, 2007

[55] Xu X, Zhang Y.P., Lin K.P., Di H.F., Yang R, Modelling and simulation on the thermal performance of shape-stabilized phase change material floor used in passive solar buildings, Energ.Build, 2005

[56] Maha Ahmad, Andre Bontemps, Hebert Salee, Daniel Quenard, Centre Scientifique et Technique du Batiment kai Universite Joseph Fourier , 2005

[57] Federick Kuznick, Joseph Virgone,Thermal Sciences Center of Lyon,Universite de Lyon, France, Jean Noel, Free-lance Scientific Software Developer, Lyon, France, Optimization of a phase change material wallboard for building use, 2007

[58] Rozanna,D.,Salmiah,A.,Chuah,T.G.,Medyan, R., Thomas Choong, S.Y., Sa'ari M

Department of Chemical and Environmental Engineering, Faculty of Engineering,Universiti Putra Malaysia , Malaysian Palm Oil Board

[59] A.Carbonari, M de Grassi- Department of Architecture ,Construction And Structures, Faculty of Engineering, Polytechnic University of Marche, Ancona, Italy, C.Di Perna, P.Principi- Department of 'Energetica', Faculty of Engineering, Polytechnic University of Marche, Ancona, Italy, Numerical and experimental analyses of PCM containing sandwich panels for prafabricated walls, 2005

[60] K.Darkwa, P.W.O'Callaghan, School of Built Environment, The Applied Energy and Environmental Engineering Group, Nottingham Trent University , UK, Simulation of phase change drywalls in a passive solar building, 2005

[61] Lv.Shilei, Zhu Neng, School of Environment Science and Technology, Tianjin University, China, Feng Guohui, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, Dongyan Li, School of Economics, Nankai University , Tianjin, China

[62] Barbara Hildergad Pause, Building conditioning technique using phase change materials in the roof structure, Longmont, Co US

[63] "Building conditioning technique using phase change materials", kai eivai patένta avayνωρισμένη από το U.S. Provisional Patent Application με αριθμό Serial No.60/041,379, από τις 26 Μαρτίου του 1997

[64] Thermal Sciences Center of Lyon, Frederic Kuznik, Joseph Virgone, Jean- Jaques Roux, 2006-2007

- [65] M.J.Huang, P.C.Eames, N.J.Hewitt, Centre for Sustainable Technologies, School of Built Environment, University of Ulster, Newrownabbey, N.Ireland, UK, 2006
- [66] Wei Xiao, Xin Wang, Yinping Zhang, Department of Building Science, School of Architecture, Tsinghua University, Beijing, China, Analytical optimization of interior PCM for energy storage in a lightweight passive solar room, 2008
- [67] Θερμικά ηλιακά συστήματα, Μέρος πρώτο, Κίμωνος Α. Αντωνόπουλου, Αθήνα 2008
- [68] Υπολογιστικές μέθοδοι φαινομένων μεταφοράς, Μέρος πρώτο, Κίμωνος Α. Αντωνόπουλου, Αθήνα, 2008
- [69] F.Alamdari and G.P.Hammond, Improved Data Correlations for Buoyancy- Driven Convection in Rooms, Building Services Engineering Research and Technology, 4 (1983), 106-112
- [70] S.Fohanno, G.Polidori, Modelling of natural convective heat transfer at an internal surface, Energy and Buildings 38 (2006) 548-553
- [71] A.J.N.Khalifa, Natural convective heat transfer coefficient-a review: I. Isolated vertical and horizontal surfaces, Energy Conversion and Management 42 (2001) 491-504
- [72] A.J.N Khalifa, Natural convective heat transfer coefficient –a review: II. Surfaces in two- and three-dimensional enclosures, Energy Conversion and Management 42 (2001) 505-517
- [73] A.J.N.Khalifa and R.H.Marshall, Validation of heat transfer coefficients on interior building surfaces using a real-sized indoor test cell, Int.J.Heat Mass Transfer 33 (1990) 2219-2236
- [74] C.Tzivanidis, K.A.Antonopoulos, E.D.Kravaritis, Parametric Analysis of space cooling systems based on night ceiling cooling with embedded pipping, accepted in Int.J.of energy research, 2010

