

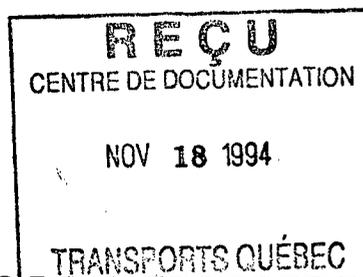
347596

ÉBAUCHE
Document de travail

RAPPORT CLIENT

pour

**Ministère des Transports
Service des Sols et Chaussées
30^e étage, Auberge des Gouverneurs
700, boulevard René Lévesque
Québec**



ABRI POUR VEHICULES DE L'AEROPORT D'AUPALUK:

FONDATION REFROIDIE PAR UNE THERMOPOMPE

par L.E. Goodrich et W. G. Cooke

Rapport final

RESUME:

MINISTÈRE DES TRANSPORTS
CENTRE DE DOCUMENTATION
700, BOUL. RENÉ-LÉVESQUE EST,
21^e ÉTAGE
QUÉBEC (QUÉBEC) - CANADA
G1R 5H1

Gen
CANIQ
TR
GE
SM
117

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES: LISTE DES FIGURES:	4
LISTE DES TABLEAUX:	5
INTRODUCTION:	6
a) Objectif:	6
b) Motivation:	6
DESCRIPTION DU PROJET:	8
TRAVAUX REALISES:	9
a) Conception:	9
B) CONSTRUCTION:	11
C) INSTRUMENTATION:	12
OPERATIONS:	15
a) Chronologie des événements:	15
B) ANALYSE DES DONNÉES:	16
RESULTATS:	17
a) Mouvement de la fondation:	17
b) Températures dans la fondation et ailleurs:	17
c) Mesures de performance énergétique:	21
PROBLEMES RENCONTRES:	23
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS:	25

LISTE DES FIGURES: LISTE DES FIGURES:

- Figure 1: Concept de la fondation refroidie par thermopompe
Figure 2: Simulation des températures sous la dalle
Figure 3: Construction: le treillis et les puits à thermocouples
Figure 4: Construction: déroulant le tuyau du serpentin
Figure 5: Construction: les virages du serpentin
Figure 6: Plan de localisation des thermocouples
Figure 7: Construction: précautions de remblayage et détails du serpentin
Figure 8: Construction: compactage de la couche de sable
Figure 9: Construction: terminaison temporaire des tuyaux
Figure 10: Construction: pose de l'isolant en polystyrène extrudé
Figure 11: La thermopompe posée par la Cie. Terre-Aire
Figure 12: Installation des thermocouples horizontaux
Figure 13: Tige pour monter les thermocouples verticaux
Figure 14: Emplacement des thermocouples verticaux
Figure 15: Localisation des thermocouples sur le plancher et dans l'air intérieur
Figure 16: Instrumentation pour déterminer la chaleur extraite du sol
Figure 17: L'équipement de mesure de la chaleur extraite du sol
Figure 18: Schéma des circuits pour évaluer la performance énergétique
Figure 19: Schéma d'instrumentation
Figure 20: L'équipement de suivi électronique
Figure 21: Localisation des repères de nivellement sur le plancher
Figure 22: Mesures de niveau a) côté sud
 b) centre
 c) côté nord
Figure 23: Température de l'air extérieur
Figure 24: Température du fluide caloporteur
Figure 25: Températures: profil vertical - sud - extérieur
Figure 26: Températures: profil vertical -nord - extérieur
Figure 27: Températures: profil vertical -nord - extérieur
Figure 28: Températures: profil vertical -sud - intérieur
Figure 29: Températures: profil vertical -nord - intérieur
Figure 30: Températures: profil vertical -nord - intérieur
Figure 31: Consommation électrique
Figure 32: Températures: profil horizontal -sud
Figure 33: Températures: profil horizontal -nord
Figure 34: Différence de température sol-tuyau
Figure 35: Température du plancher et de l'air intérieur
Figure 36: Flux de chaleur extraite du sol

LISTE DES TABLEAUX:

Tableau 1: Températures maximales à l'élévation du point VN7-6

INTRODUCTION:

a) Objectif:

Evaluation de la performance thermique et économique d'un système de pompe à chaleur utilisé pour conserver le pergélisol sous les fondations du garage de l'aéroport d'Aupaluk tout en fournissant une portion utile du chauffage requis pour ce bâtiment.

b) Motivation:

Plusieurs des aéroports qui seront construits ou qui sont déjà construits dans le cadre de la Convention de la Baie James et du Nord Québécois sont susceptibles de connaître des problèmes de fonte importante sous la chaussée de la piste d'atterrissage même et/ou dans le sol initialement gelé sous-tendant les constructions annexes, suite au déséquilibre thermique provoqué par la présence des ouvrages.

Pour les surfaces couvertes par des bâtiments chauffés, un dégel du sol est inévitable, à terme, à moins de prévoir une évacuation de la chaleur. La méthode la plus usitée consiste à surélever le bâtiment au-dessus du sol et laisser circuler l'air naturel. Seul le refroidissement mécanique est capable d'assurer que le sous-sol reste uniformément gelé et que les températures ne dépassent pas une certaine limite maximale, indépendamment des températures extérieures. Un tel contrôle est particulièrement désirable dans les conditions de pergélisol relativement chaud rencontrées près des côtes dans le Nord Québécois.

Le Conseil national de recherches (C.N.R.C.) a proposé d'utiliser une thermopompe domestique de type sol-air pour garder le sol gelé sous une fondation en dalle isolée posée à même le sol. Le principe est illustré schématiquement à la figure 1. L'épaisseur de l'isolant est choisie de telle sorte que la thermopompe fonctionne seulement durant la saison froide. Durant cette saison, la chaleur extraite du sol est rejetée en dedans du bâtiment et, ainsi, les dépenses d'opération sont, en partie du moins, absorbées par les réductions du coût de chauffage. Si l'on tient compte du fait que cette approche permet de simplifier au maximum la construction de la fondation même, il est permis de croire que son utilisation permettrait des économies importantes par rapport à d'autres systèmes de fondation sur pergélisol. Deux expériences sur ce système de fondation ont également été menées en collaboration avec le gouvernement du Yukon. Les présents travaux concernant la conception et l'utilisation des

systèmes de fondation refroidie par thermopompe peuvent servir à la conception de fondations de ce type partout sur le pergélisol sensible du Nord Québécois.

DESCRIPTION DU PROJET:

Le projet a compris plusieurs étapes s'étalant sur cinq ans. Le travail a commencé par une visite de reconnaissance du site en collaboration avec le Ministère de Transports du Québec et l'Université Laval pour compléter les informations géotechniques ainsi que pour observer la construction déjà en cours à certains des autres sites. Ensuite la conception du système comprenant le dimensionnement de l'isolation et la sélection de la capacité de la thermopompe, ainsi que la géométrie du serpentín et les modifications au plans de construction, ont été réalisées en collaboration avec Transports Canada, la firme Gendron-Lefebvre, et le Ministère des Transports du Québec. A ce stade aussi, le C.N.R.C. a planifié l'instrumentation nécessaire pour permettre une évaluation rigoureuse aussi bien des différents aspects de la performance thermique de la fondation que de la consommation énergétique nette du système.

Lorsque les travaux de construction ont débuté, le C.N.R.C. avait à sa charge, en collaboration avec le fournisseur de l'équipement de thermopompe et l'entrepreneur responsable de la construction, d'assurer la bonne pose du serpentín ainsi que de la couche d'isolation rigide. Durant cette phase, les câbles à thermocouples, préalablement fabriqués par le C.N.R.C. ont été mis en place, six dans des puits verticaux et deux intégrées avec le serpentín. Après la construction de l'édifice et la mise en service de la thermopompe par le fournisseur, le C.N.R.C. a installé un système d'acquisition de données automatique avec modem. Le restant de l'équipement, incluant celui pour déterminer les quantités relatives à la performance énergétique a été complété aussi à ce moment. La liste des actions principales effectuées par le C.N.R.C. est donnée plus bas sous la rubrique OPERATION.

Les données à analyser comprenaient les températures et les paramètres énergétiques, saisies en continue et mises en graphique à intervalles réguliers. Les déplacements éventuels de la dalle étaient relevés lors des visites au site. La période de collecte des données s'est étendue sur un peu plus de deux ans et confirme la bonne performance thermique de la fondation. Il reste à enlever le système d'acquisition de données et les autres équipements électroniques. Comme pour n'importe quelle construction sur le pergélisol, il serait souhaitable que les autorités responsables prévoient un suivi occasionnel des températures les plus critiques, et ceci durant la vie de l'édifice. Les câbles à thermocouples posés par le C.N.R.C. resteront en place et seront toujours utilisables à l'avenir. Le système de fondation refroidie par thermopompe devrait fonctionner automatiquement sous contrôle thermostatique, requérant seulement un minimum d'entretien régulier pour assurer que le sol reste gelé en permanence.

TRAVAUX REALISES:

a) Conception:

Selon l'état actuel des connaissances, la possibilité de rencontrer des sols avec une haute teneur en sel est assez élevée sur une partie importante du littoral de la Baie d'Ungava. Mais une visite du site, effectuée par le Ministère de Transports, l'Université Laval, et le C.N.R.C. en août 1989, lors de laquelle des forages additionnels ont été faits, a permis de confirmer que ce site ne posait pas de problèmes à ce chapitre. La conception de la fondation a donc débuté utilisant les données géotechniques existantes, augmentées des observations sur la profondeur du mollisol et les caractérisations du sol faites lors de cette visite, mais sans connaissance exacte des températures naturelles en profondeur.

Suivant la méthodologie établie par l'auteur, les calculs de conception nécessaires au choix des paramètres fondamentaux d'une fondation en dalle isolée refroidie par une thermopompe, comportent les cinq étapes suivantes:

- 1) Calculs grossiers en état stationnaire du flux de chaleur passant de l'air du bâtiment au sol, en fonction de l'épaisseur de la couche d'isolant, pour fixer approximativement le taux d'extraction de chaleur requis afin d'éviter le réchauffement à long terme.
- 2) Calculs avec modèle en éléments finis uni-dimensionnels dans le but de préciser les choix. La combinaison de l'épaisseur de l'isolant et du taux d'extraction de chaleur est optimisée pour assurer un temps de réchauffement suffisant pour permettre de fermer la thermopompe durant tout l'été, ceci pour empêcher de surchauffer le bâtiment inutilement et pour éviter le gaspillage d'énergie qui résulterait d'un design en marche continue. Ces calculs permettent aussi de déterminer, en cas de panne mécanique prolongée, le délai disponible avant que le dégel n'atteigne les couches de sol susceptibles de s'affaïsser, tout en minimisant l'épaisseur de l'isolant et la capacité de la thermopompe, (et donc les coûts initiaux et opérationnels).
- 3) Calculs avec modèle pour fixer l'épaisseur de l'isolant placé horizontalement à l'extérieur de la fondation. Il est essentiel qu'elle soit adéquate pour empêcher que le dégel pénètre plus profondément que la fondation durant un été "design", et ceci en supposant la thermopompe fermée.

- 4) Calculs avec modèle pour déterminer la largeur horizontale de l'isolant extérieur pour empêcher que le dégel pénètre latéralement jusqu'au bord de la fondation.
- 5) Calculs thermiques et hydrauliques pour déterminer la géométrie du serpentin. L'espacement entre chaque tuyau du serpentin est choisi pour s'assurer qu'il n'y ait pas de possibilité de dégel à long terme dans les zones entre les tuyaux. Le diamètre du tuyau ainsi que le nombre de boucles utilisées et la longueur totale du serpentin sont choisis dans le but de réduire la capacité de la pompe de circulation, et ceci en fonction des propriétés hydraulique du fluide caloporteur à la température minimale d'opération.

Le design était basé sur les suppositions suivantes:

- 1) Propriétés thermiques du sol calculées par formules empiriques basées sur la description géotechnique du site
- 2) Distribution de températures initiales calculée utilisant les données météorologiques d'Environnement Canada pour Kuujuaq.
- 3) Température du plancher 22°C.
- 4) Thermopompe en marche à partir de la mi-septembre jusqu'au début de juin, supposée arrêtée chaque fois que la température du serpentin atteint -8°C.
- 5) Construction au moment où le dégel saisonnier est au maximum.

Le choix final des paramètres s'est arrêté sur les valeurs suivantes:

- 1) Epaisseur de l'isolant de polystyrène expansé sous la dalle du plancher, 200mm.
- 2) Epaisseur de l'isolant de polystyrène expansé placé horizontalement à l'extérieur de la fondation, 200mm.
- 3) Largeur de l'isolant à l'extérieur de la fondation, 2.4 m
- 4) Taux maximal d'extraction de chaleur disponible durant 8 mois effectifs, 12 W/m³. En supposant que la zone refroidie dépasse par 1m le bord de la fondation, cela donne 5000 W de chaleur extraite. Pour un coefficient de performance de 2.4 le taux d'extraction pour une thermopompe cotée à 10kW de chauffage (3 tons, dans la nomenclature Américaine) est 8500 W, et ce choix assure une marge

de sécurité adéquate sans que la capacité soit démesurée par rapport à la demande.

- 5) Longueur totale du serpentin 740 m, espacement de 750 mm (2 1/2 pieds) entre les tuyaux

Les résultats de la simulation finale pour ces conditions sont montrés à la figure 2. On note que la zone du sol supposée initialement dégelée (jusqu'à 3 m en dessous du serpentin) se regèlerait complètement au début du deuxième cycle. Le régime deviendrait plus ou moins périodique-stationnaire à partir du troisième cycle de refroidissement, avec, par la suite, une diminution graduelle de la température maximale du sol. Au niveau 2m en dessous du serpentin, les maxima de température seraient de -2.5°C après deux ans, tombant par la suite à moins de -3°C . Finalement, en cas de panne prolongée au pire moment de l'année (l'automne) la température à 2m en dessous du serpentin ne monterait pas plus haut que -1°C en six mois, selon la simulation.

b) Construction:

Au moment de commencer les travaux de construction de la fondation deux employés du C.N.R.C. étaient présents sur le site pour guider les travaux de pose du serpentin en collaboration avec le représentant du fournisseur de la thermopompe. Une fois l'excavation complétée, le fond préparé normalement, et les limites du pourtour de l'édifice marquées, des tuyaux en PVC rigide servant de puits pour la mesure des profils verticaux de température ont été posés. La foreuse de l'entrepreneur n'étant pas en état de marche, les puits ont dû être posés dans des tranchées creusées au fond de l'excavation. La profondeur atteignable par cette méthode était un peu moins que le forage aurait permis et le nombre de puits a été réduit à six au lieu du huit prévu à l'origine. Un repère de nivellement conçu avec une gaine lubrifiée pour empêcher tout mouvement vertical provoqué par le gel-dégel saisonnier a été placé de la même manière du côté sud du site.

Un treillis métallique a été placé sur le sol pour servir de base à laquelle fixer le serpentin. La figure 3 montre ce treillis ainsi que la partie supérieure des puits en PVC rigide. Le tuyau de polyéthylène haute densité était livré au site en rouleaux d'une longueur adéquate pour éviter que les joints soudés se situent directement en-dessous de la zone construite. Le tuyau était déroulé à la main, figure 4, avec un soin particulier dans les virages pour empêcher que le tuyau ne se plie, figure 5. Cette figure montre aussi l'utilisation du treillis pour aligner le serpentin, le tuyau étant fixé au treillis au moyen de "Tiewraps". Durant la pose de la première longueur de tuyau, on s'est rendu compte que l'espacement était de 3 pieds au lieu des 2 pieds spécifiés. Eu égard à la nature granulaire des

matériaux dans les premiers mètres sous le fond de l'excavation, confirmée en creusant pour poser les puits à thermocouple, il était clair que l'espacement pouvait être élargi sans danger pour le sol en profondeur, et la décision était prise de laisser l'espacement à 3 pieds pour toute la surface. Ceci pourrait même s'avérer légèrement avantageux pour la consommation électrique puisque, avec le serpentin plus court, l'effort de pompage du fluide serait réduit. En conséquence, tel que construit, la longueur des deux boucles est de 226.5 m pour la boucle #1 et 257.8 m pour la boucle #2 (voir aussi la figure 6 pour l'identification des boucles et leur géométrie finale).

Pour réduire au minimum la possibilité de dommage durant la pose, le remblayage autour des tuyaux a été effectué à la main, comme on le voit à la figure 7. Dans cette figure, on note également que le serpentin a été doublé pour donner un circuit de recharge totalement indépendant en cas de fuite. Toute la couche de sable entourant le serpentin a été tassée manuellement, comme cela se voit à la figure 8. Les couches supérieures ont été placées et compactées à la machine par l'entrepreneur, suivant les techniques établies. Avant la pose de ces couches formant le reste du remblai, les bouts des tuyaux du serpentin ont été rassemblés à l'emplacement prévu (juste à l'extérieur du futur mur de fondation) pour être ensuite raccordés à des sections verticales et temporairement attachés ensemble, tel qu'on peut le voir à la figure 9. Le serpentin a été ensuite pressurisé avec de l'air. Il a été vérifié par la Cie. Terre-Aire que la pression s'est maintenue à une valeur de 60lb/in^2 durant la phase critique de construction. Avec la mise en place de la couche d'isolation thermique, figure 10, et du restant des câbles à thermocouples, la partie des travaux de construction impliquant le C.N.R.C. a pris fin. Le raccordement et le chargement du serpentin ainsi que l'installation et la mise en service de la thermopompe et de son thermostat électronique ont été effectués par la suite, par la Cie. Terre-Aire, une fois la construction du bâtiment terminée, figure 11.

c) Instrumentation:

Afin de vérifier la performance thermique de la fondation refroidie, deux câbles à thermocouples horizontaux et six câbles verticaux ont été posés durant la construction de la fondation en juin 1991. Les thermocouples étaient fabriqués par le C.N.R.C. à partir de câble BELDON type T à 12 paires, les joints étant soudés et la continuité de chacun vérifiée au préalable en laboratoire. La précision des mesures faites par thermocouples est normalement autour de $\pm 0.1^\circ\text{C}$.

La figure 6 montre schématiquement la localisation des points de mesure de température ainsi que la géométrie du serpentin de refroidissement et son positionnement par rapport aux bords de la fondation. Les points des câbles

horizontaux ont tous été placés au même niveau que le serpentin. Pour les câbles horizontaux, les points individuels, HA-1 à HA-12 et HB-1 à HB-12, ont été posés en les attachant directement (voir figure 12) au treillis métallique à mi-distance entre les tuyaux, ou en les coinçant sous le tuyau du serpentin. Ceci permet d'évaluer le bon réglage du refroidissement dans chaque boucle et de confirmer que les écarts de température dans les zones entre les tuyaux sont suffisamment petits.

Pour permettre de suivre l'évolution des températures en profondeur sous la fondation on a posé trois puits verticaux, V-2, V-7 et V-8, à des endroits choisis (voir figure 6) pour être représentatifs de toute la gamme de sollicitations thermiques à laquelle serait exposé le plancher. Les puits V-1, V-5 et V-6 ont été posés pour donner une appréciation de la répartition bi-dimensionnelle des températures près des bords de la fondation. Dans les profils verticaux, les thermocouples ont été fixés à une baguette (voir figure 13) en prenant soin de laisser plusieurs tours de fil à chaque point afin de réduire les erreurs de conduction le long des fils. L'élévation de chaque point est montrée à la figure 14 avec aussi une indication de la stratigraphie à chaque station. Dans le cas des stations V-2, V-7 et V-8 des thermocouples, soudés à des plaques de cuivre, ont été posés en contact avec les faces supérieures et inférieures des couches d'isolant polystyrène extrudé pour permettre leur utilisation éventuelle comme fluxmètre.

Une fois la construction du bâtiment terminée et la thermopompe posée par l'entrepreneur en août 91, on a pu compléter le restant de l'instrumentation. Dans le but d'obtenir des données nécessaires pour raffiner le dimensionnement de constructions futures ainsi que pour vérifier à quel point la température de la surface du plancher est représentée par celle de l'air, on a installé des thermocouples aux endroits indiqués à la figure 15. Ceux du plancher ont été fixés sur la paroi du caniveau de drainage tandis que ceux pour l'air ont été placés à 2-3 cm de la surface des murs et à la hauteur approximative d'un thermostat.

Afin de déterminer directement la quantité de chaleur extraite du sol on a installé un débitmètre magnétique dans chaque boucle du serpentin ainsi que des thermistances dans la ligne de sortie et dans la ligne de retour de chaque boucle. Étant données les propriétés thermiques du mélange d'antigel utilisé, le taux d'extraction de la chaleur peut être déterminé connaissant le débit et le gain de température du fluide caloporteur. La figure 16 indique schématiquement l'équipement utilisé tandis que la figure 17 montre une photo de l'installation. Les débitmètres étaient des SPARLING FM621 WATERHAWK, type magnétique à impulsions CC, d'une précision de $\pm 2\%$ du débit. La calibration des thermistances (précision ± 0.005 K) a été faite au laboratoire du C.N.R.C. La figure 18 montre le circuit électrique correspondant. A noter aussi, le circuit pour mesurer le taux de consommation électrique de la thermopompe au moyen d'un wattmètre électronique. Vue la mauvaise qualité du voltage disponible à

Aupaluk, on a installé aussi un moniteur de ligne. Pour assurer leur bon fonctionnement malgré des fluctuations de voltage importantes, tous les circuits de mesure étaient branchés à une alimentation inintermittible avec limiteur de surcharge et batteries en cas de panne. En plus, des canaux ont été réservés pour la vérification du bon fonctionnement du voltmètre du HP3497A utilisant une pile de référence précise et des résistances de haute précision.

Les signaux étaient saisis par un système d'acquisition de données HP3497A commandé par un ordinateur IBM-PC modèle 286, comme indiqué à la figure 19. Afin d'améliorer la précision des mesures de température faites avec les thermocouples par rapport à ce qui s'obtient normalement avec de l'équipement commercial (les modules à thermocouple), une caisse isotherme spéciale a été construite pour recevoir les jonctions *cuivre-constantan* arrivant du sol. La température de l'intérieur de cette caisse était mesurée par des thermistances calibrées à quelques mK près, et la conversion des signaux de microvoltage en température était faite par l'ordinateur. Un logiciel commercial, LABTECH NOTEBOOK a été choisi pour cette fonction. Ce logiciel puissant permet de programmer chaque canal indépendamment et supporte aussi la possibilité de re-programmation à distance par lien téléphonique avec un modem Hayes 1200 baud. L'alimentation de l'ordinateur était branchée à une minuterie qui forçait un "re-boot" une fois par jour, ceci pour s'assurer de la possibilité de reprendre le contrôle, au pis aller, le lendemain, en cas de blocage inattendu de l'ordinateur. Tous les canaux étaient échantillonnés à la fréquence d'une lecture par 6 minutes. Les calculs de conversion étaient aussi faits aux 6 minutes et les valeurs en unités physiques, comprenant températures du sol, de l'air et du fluide caloporteur du serpentin, débits de fluide, flux de chaleur extraite du sol, et consommation énergétique, étaient moyennées sur une heure et sur 24 heures et stockées sur le disque dur. L'ordinateur était interrogé à partir d'Ottawa à peu près une fois par deux semaines pour la transmission des fichiers de données journalières. Les données horaires servaient uniquement en cas de panne provoquant des erreurs dans les valeurs journalières. Cet équipement se voit sur la photo de la figure 20.

Pour suivre les déformations éventuelles de la fondation, on a marqué un total de 27 stations réparties sur le plancher (voir figure 21). Des mesures de niveau, au millimètre près, étaient faites lors de chaque visite du site au moyen d'un niveau optique d'arpenteur. Les élévations étaient mesurées par rapport au repère de nivellement situé à l'extérieur du bâtiment.

OPERATIONS:

a) Chronologie des événements:

août 1989: visite du site

- reconnaissance du site avec l'aide de l'Université Laval
- profondeur du mollisol déterminée, échantillons pris pour vérification de la granulométrie et pour l'analyse de la salinité

juin 1991- visite du site

- pose du serpentín et de l'isolation pour la fondation refroidie
- pose des thermocouples dans la structure de la fondation
- pose du repère de nivellement

août 1991-

- thermopompe installée et démarrée par l'entrepreneur

octobre 1991- visite du site

- pose des thermocouples pour la température de l'air et du plancher
- mesures manuelles des températures du sol et du fluide
- pose de l'instrumentation pour la mesure des paramètres énergétiques
- installation du système d'acquisition de données et équipement connexe
- premières mesures des élévations du plancher
- serpentín purgé d'air et modifications faites à la thermopompe

janvier 1992-

- téléphone posé 7-01-92
- découverte de la perte des données
- re-programmation de l'ordinateur à partir d'Ottawa pour régler temporairement ce problème

février 1992-

- début de l'acquisition des données 14-02-1992 mais seules des valeurs horaires partielles peuvent être sauvegardées par l'ordinateur

mai 1992- visite du site

- ordinateur changé avec nouvelles versions de tous les logiciels
- débitmètre #2 remplacé
- début de l'acquisition des données complètes 23-05-1992
- le serpentín est vérifié et trouvé rempli de fluide

octobre 1992- visite du site

- vérification de l'exactitude des débits enregistrés
- le serpentín a dû être purgé de nouveau

-courant tiré par la pompe de circulation a été mesuré

octobre 1992-nov 1993 suivie régulière à partir du C.N.R.C.

b) Analyse des données:

Cinq fichiers de données brutes comprenant les moyennes quotidiennes pour la période écoulée depuis la dernière transmission étaient transmis à chaque session d'interrogation. Ces données brutes étaient traitées par un programme spécialement élaboré pour vérifier initialement s'il y avait des données manquantes, indiquer au besoin la nécessité de corriger des erreurs, et ajouter les valeurs corrigées aux fichiers-maîtres correspondant à chaque profil de température ou aux canaux correspondant aux autres quantités mesurées. Les fichiers-maîtres étaient utilisés ensuite pour préparer des graphiques de chaque canal en fonction du temps. Ceci peut mettre en évidence des erreurs qui n'ont pas été décelées par les procédures antérieures, et, après correction, les graphiques finaux étaient préparés.

RESULTATS:

a) Mouvement de la fondation:

Le premier critère de succès d'un système de fondation sur pergélisol doit être l'intégrité de la fondation et on voit, aux figures 22(a,b,c), qui donnent les déplacements verticaux au côté sud, au centre et au côté nord du plancher, qu'il n'y a eu aucun mouvement significatif durant la période des mesures. Les courbes suggèrent des tassements qui sont au plus de quelque 3-4 millimètres, c'est-à-dire entièrement négligeables. Les autres points ne figurant pas sur les graphiques montrent un comportement identique.

b) Températures dans la fondation et ailleurs:

Pour tous les graphiques de données mesurées automatiquement, l'axe des temps est mesuré à partir du 14-02-92. Les mesures correspondantes aux cent premiers jours ne sont pas présentées.. Durant la période initiale, la majorité des données automatisées ont été endommagées par des problèmes de l'équipement. Après avoir fonctionné correctement durant le dernier jour complet où il y avait du personnel techniquement qualifié sur le site (28-10-91) l'ordinateur s'est bloqué suite à une incompatibilité de mémoire entre le logiciel de saisie et celui de communication. Malheureusement, la ligne téléphonique n'ayant pu être posée que bien après le démarrage du système d'acquisition de données (7-1-92), le problème n'a pu être détecté plus tôt. En bout de compte, il a été possible de corriger le problème partiellement et des données ont pu être enregistrées à partir du 13-02-92. Toutefois, jusqu'à la visite du 23-5-92 les valeurs des moyennes journalières n'ont pas été stockées, et un effort considérable serait nécessaire pour les reconstituer semi-manuellement à partir des données horaires partielles qui ont été saisies. Mais le manque de cette partie des résultats n'empêche pas de tirer des conclusions quant aux performances du système et ce rapport se base donc sur la période où des données complètes existent, c'est-à-dire, à partir du 23-5-92. Cette date correspond au jour 100 de l'axe des temps utilisé dans les figures.

La température de l'air à l'extérieur du bâtiment était mesurée par un thermocouple monté à peu près à 3 mètres du sol, du côté nord de l'édifice. Les valeurs de la moyenne quotidienne de la température sont portées en fonction du temps à la figure 23. On voit que la valeur de la moyenne annuelle en 91-92 (jour 100 à jour 465) est d'approximativement -8°C , et que l'été 93 était très semblable à celui de 92. Pour comparaison, la température moyenne annuelle normale à Kuujuaq est -5.8°C .

La température du fluide caloporteur à la sortie de la thermopompe ainsi que les températures de retour après son passage à travers les deux boucles du serpentin sont montrées en fonction du temps à la figure 24. Les périodes où les températures montent subitement correspondent aux moments où la thermopompe s'est fermée automatiquement sous contrôle thermostatique. Durant ces périodes, la température du fluide suit celle de l'air à l'intérieur du "pas de loup". Ceci est notamment le cas de la période entre le jour 250 et le jour 360 ainsi que de la période entre le jour 430 et le jour 500, périodes durant laquelle la thermopompe restait fermée. On voit que la température de sortie peut atteindre -11°C durant l'hiver et que, une fois les températures stabilisées, les retours sont moins de 1.5°C plus chauds. Ceci confirme que la capacité de la machine est plus que suffisante. En plus, les températures de retour des deux boucles sont, à toutes fins pratiques, identiques, ce qui indique que les débits d'écoulement sont réglés dans les deux boucles avec une bonne précision. On note aussi que, après le jour 360, (au début du deuxième hiver, donc pour des conditions représentatives de la performance à long terme) lorsque la thermopompe a redémarré, la température du fluide a baissé de -5°C à -11°C en un peu moins de trois mois. Après le jour 520, le thermostat ayant été ajusté, les températures du fluide oscillent entre -2.5°C et -7°C , ce qui est bien adéquat pour assurer la protection de la fondation. En plus, ces températures opérationnelles moins extrêmes devraient permettre une amélioration de la performance thermique ainsi que de la durée de vie de la thermopompe.

Les figures 25, 26 et 27 montrent le comportement thermique du sol à différentes profondeurs (voir figure 14) pour des sites à l'extérieur du périmètre isolé, au sud (VS1, figure 25), et au nord-est (VN5, figure 26) de la fondation ainsi que pour un site (VN6, figure 28) situé en dedans de la zone isolée. L'allure des courbes pour le profil VN6 indique que, quoique l'équipement ait généralement bien fonctionné après les difficultés initiales, de temps à autres il y a des pics transitoires qui ne sont pas physiquement plausibles, et les données correspondantes doivent être écartées. On note que le dégel saisonnier à l'extérieur de la fondation atteint presque l'élévation 31.75 (le niveau du point VS1-6), soit 2.5 m sous le niveau du plancher du côté sud, et dépasse l'élévation 32.5 (le niveau du point VN5-3), soit 1.75 m sous le niveau du plancher du côté nord-est. D'après l'allure de la courbe VN6-3 de la figure 27, qui indique que le sol est resté gelé à tous les niveaux mesurés, on peut conclure que, tout près de la fondation à l'extérieur du bâtiment, du côté nord-est, le dégel saisonnier traverse à peine l'isolant (par 10-15 cm. Il est à noter aussi que, à 1.1m sous l'isolant, (point VN6-5), les températures montent à presque -1°C . Enfin, on observe aussi que les températures du deuxième été étaient très semblables à celles du premier. A partir des câbles du côté nord, VN5 et VN6, on voit que les températures des deux hivers étaient aussi très semblables, tandis que, du côté sud, durant l'hiver 93/94 les températures du sol étaient plusieurs degrés plus élevées qu'en 92/93. Comme les moyennes annuelles restent bien négatives,

ceci ne devrait pas poser de problème. Il est probablement dû à l'utilisation de cet espace pour stocker la neige.

Sur les figures 28,29 et 30 on voit les courbes de températures du sol à différentes profondeurs en-dessous de la couche isolante pour les trois stations à l'intérieur de l'édifice (voir figures 6 et 14 pour la localisation). La différence de régime par rapport aux stations extérieures est frappante et, bien entendu reflète la présence du refroidissement mécanique ainsi que la présence de l'isolation et les variations relativement faibles de la température du plancher du bâtiment. Il est utile de confronter ces trois graphiques de température avec la figure 31 qui montre la courbe de la consommation électrique pour la même période. Entre le jour 110 et le jour 260 (été 92), les températures profondes sont restées plus ou moins stables, oscillant entre -3°C et -6°C pendant que la thermopompe s'ouvrait et se fermait à intervalles fréquents. Cette période correspond à la saison chaude et, idéalement, la thermopompe devrait rester fermée presque continuellement durant l'été. Entre le jour 250 et le jour 360, la thermopompe s'est fermée et les températures ont monté, d'abord rapidement et ensuite graduellement, pour se stabiliser toutes autour de -2°C dans les profils VS2 et VN7. Dans le profil VN8, par contre, on note que la température du point VN8-5, (situé à peu près à la profondeur du serpent, figure 14) a monté presque à -0.5°C . Néanmoins, et ce qui est le plus important, la température du point le plus profond, (le point VN8-8), étaient semblable aux autres profils et n'a pas dépassé -1.5°C . Ceci indique que le plancher est plus chaud à cet endroit que près des autres profils, peut-être à cause des fournaies suspendues. Il est possible que cela reflète, en partie, le fait que les câbles VS2 et VN7 sont situés plus proche de l'extérieur que VN8

En interpolant les données des figures 28 et 30 pour une même profondeur (celle du point VN7-6, qui est le point le plus profond de ce profil), on trouve les valeurs suivantes pour les températures maximales durant les deux premières périodes où la thermopompe s'était fermée continuellement:

Profil	Température maximale durant période 260-350	Température maximale durant période 420-510
VS2	-1.8°C	$< -2.5^{\circ}\text{C}$
VN7	-2.4°C	-3.0°C
VN8	-1.8°C	-2.8°C

Tableau 1: Températures maximales à l'élévation du point VN7-6

Les valeurs de la première colonne correspondent au début de l'hiver 1992, et on voit que VN8 est aussi froid que VS2 tandis que la deuxième colonne, qui correspond au printemps 93, montre que, encore lors de la deuxième période de fermeture prolongée, le profil VN7 est resté le plus froid. Après le jour 510, quand la thermopompe s'est remise en marche, on voit que, aux niveaux les plus profonds dans les trois profils, les températures maximales ne dépassent pas -2°C , oscillant approximativement entre -5°C et -2.5°C .

Les figures 32 et 33 donnent un échantillon représentatif des températures mesurées dans le sol au niveau du serpentín de refroidissement et à des positions à mi-distance entre les tuyaux successifs (voir figure 6 pour la localisation). A l'exception des points HB-1, figure 32, et HA-1, figure 33, qui sont, bien sûr, assez fortement influencés par les apports de chaleur venant de l'environnement, les points de mesure se suivent de très près lorsque la thermopompe est en marche. Ceci illustre bien un des avantages du système de refroidissement mécanique, à savoir, l'uniformité de refroidissement qu'il fournit. Partout immédiatement sous l'isolant, au milieu du bâtiment (HA-12 et HB-4) comme aux bords de la fondation (HA-3 et HB-10), les températures sont uniformes à moins d'un demi-degré près.

Lorsque la thermopompe se ferme pour des périodes étendues, on voit une tendance claire vers un réchauffement du centre par rapport aux bords, en été comme en hiver. Ceci est plus particulièrement le cas pour le câble HA, figure 33, et reflète le chauffage localisé produit par une fournaise suspendue. Le refroidissement rapide des points HB-10 et HA-3 (figures 32 et 33), qui sont les points situés le plus proche du bord du bâtiment, est en corrélation avec la forte baisse de température de l'air extérieur autour du jour 310. Ceci indique que, près des bords, les transferts de chaleur latéraux dans le sol immédiatement sous la couche isolante sont relativement importants. Au printemps, on voit que, du côté nord-est, la température au bord, point HA-3, monte passablement plus lentement que les points à l'intérieur. Mais, du côté sud la vitesse de réchauffement est semblable pour les trois points. Les différences entre les deux côtés du bâtiment peuvent être reliées aux conditions au sol, ou bien refléter des différences dans l'apport de chaleur émanant de l'édifice en comparaison avec l'extérieur. Dans les deux cas, ceci ne pose pas de problème en ce qui concerne la sécurité contre le dégel, les paramètres de conception ayant été choisis en fonction des conditions à l'intérieur, pendant que, pour un niveau donné, les températures restent toujours plus froides aux bords. Par contre, un tel comportement rend plus subtil le choix de la température de contrôle du thermostat électronique qui commande la thermopompe. On rappelle aussi que, avant le début du deuxième été le thermostat a été réglé dans le but d'améliorer la performance énergétique de la thermopompe, étant donné que les valeurs de -4°C obtenues le premier été étaient plus froides que nécessaires. C'est pour cette raison que les températures au niveau du serpentín oscillent autour de -3°C après le jour 510.

Un des paramètres du design est l'espacement horizontal entre des tuyaux individuels du serpentin de refroidissement. La figure 34 indique des différences typiques de températures mesurées entre la surface extérieure du tuyaux et le sol entre deux tuyaux successifs à l'élévation de ceux-ci. On voit que, dès que le régime se stabilise, ce qui prend 1-5 jours, dépendant de la durée de la période de fermeture qui précède, cette différence est de seulement 0.55°C , (voir jours 370 à 420 où la thermopompe était en marche continue), et que, même si la machine fonctionne de façon périodique, (voir jours 510 à 640), les écarts ne dépassent pas 0.6°C . En fait, un écart de l'ordre de 1°C semblerait facilement admissible sans danger de dégel localisé.

La figure 35 donne les différences de température entre la surface du plancher, (point #2 et #4, voir figure 15 pour localisation), et l'air intérieur. Il est étonnant de voir à quel point la courbe #4 de température du plancher suit celle de l'air, et parfois même la dépasse. Ceci est certainement dû aux fournaies suspendues qui, localement, dirigent un jet d'air chaud sur le plancher. La courbe #2, qui est plus représentatif de la température du plancher aux autres endroits mesurés, indique que celle-ci serait généralement au moins 2-3 degrés plus basse que celle de l'air. Mais on voit que, de toute façon, pour ce qui est des valeurs moyennes à long terme, ni la température de l'air intérieur, ni celle du plancher même n'excède 20°C , (étant plus proche de 15°C pour les points #1, #2, et #3), tandis que la valeur prise dans les calculs de conception était de 22°C . A signaler est la forte baisse de température entre les jours 190 et 230 (été 92), et encore entre le jour 550 et 610 (automne 93), périodes durant lesquelles les températures moyennes quotidiennes ont atteint 5°C ou même plus froides. Il semblerait prudent de s'assurer que de telles périodes ne se prolongent pas trop à l'avenir.

c) Mesures de performance énergétique:

La consommation électrique de la thermopompe (comprenant la pompe à circulation) et le flux de chaleur extraite du sol sont données dans les figures 31 et 36 respectivement. On distingue clairement, à la figure 31, les périodes où la thermopompe a été fermée et celles où elle a fonctionné de manière cyclique. Entre les jours 350 et 430 la machine était ouverte continuellement (sous contrôle manuel). La consommation typique se situe un peu en-dessous de 3400 Watts, étant plus faible quand la température du fluide caloporteur est basse, comme on le voit en confrontant la figure 31 avec la figure 24. De même, on voit, à la figure 36, que le léger écart qui existait au début entre le flux de chaleur extraite des deux boucles a diminué, suite aux ajustements des débits dans chaque boucle. En se référant aux figures 36 et 24, (ce dernier montre les températures du fluide), on constate aussi que le flux de chaleur extraite a

augmenté également, après le réglage du thermostat (voir période après jour 500) et se situe dorénavant autour de 1600 W dans chaque boucle.

Il avait été mentionné dans le rapport d'étape que durant la période de refroidissement continu, entre le jour 370 et le jour 440, le flux de chaleur extraite du sol avait diminué à 1100Watts. Cela correspond à un coefficient de performance de seulement 1.66. Mais durant cette même période, la température du fluide avait baissé à presque -10°C . Il est clair que l'efficacité de la thermopompe tombe rapidement à ces basses températures mais même après avoir monté la température minimale du fluide, après le jour 510, le coefficient de performance reste proche de 2.0 et ces chiffres sont inférieurs à ce qui était prévu.

PROBLEMES RENCONTRES:

Malgré des vérifications préalables en laboratoire qui se sont étendues sur plus de six mois, et qui ont compris des essais de plusieurs cartes d'interface, trois versions du logiciel d'acquisition de données, et deux logiciels de communication/contrôle par modem, il y a eu une perte importante de données durant les premiers mois de l'expérience. Le problème était exacerbé par le manque de ligne téléphonique, sans quoi il n'était pas possible de déceler la difficulté. Néanmoins, les données recueillies par la suite sont de bonne qualité et rendent bien compte du comportement thermique de la fondation et de la performance énergétique de la thermopompe. Il est clair que les températures du sol en-dessous de l'édifice sont très satisfaisantes et que la performance mécanique de la fondation est impeccable puisque les tassements mesurés étaient à peine décelables.

Quelques problèmes sont survenus aussi avec le système de refroidissement par thermopompe. Quelques semaines après la mise en service initiale, lors de la visite d'octobre 91, il a été constaté que la chaleur produite par la thermopompe était anormalement faible. Suivant les instructions de la Cie. Terre-Aire, la vitesse du ventilateur a été réduite et un interrupteur de protection contre les bas voltages a été posé. Une quantité considérable d'air a dû être enlevée du serpentin. Le même problème a été noté de nouveau lors des visites de mai 92 et d'octobre 92. Ceci pourrait indiquer que l'air n'avait pas été éliminé totalement au moment de brancher la thermopompe, ou bien qu'il y ait une fuite dans le circuit du serpentin. Pendant toute la durée de chaque visite la pression statique du fluide dans le serpentin (mesurée par la jauge) a été suivie sans remarquer de baisse. Par contre, la pression ne semble pas se maintenir à long terme. Au début de chaque visite, elle était basse ou nulle, mais ceci pourrait aussi simplement refléter la baisse de température du sol et ne peut pas être considéré comme concluant.

Quand les premières données ont commencé à arriver, le débitmètre de la boucle #1 indiquait un débit d'autour de 15 l/min tandis qu'il avait été prévu une valeur de l'ordre de 25 l/min dans chaque boucle. Ceci pourrait être une conséquence aussi de la présence d'air dans les lignes. Malheureusement, le débitmètre de la boucle #2 avait été endommagé lors de l'installation mais, quand celui-ci a été remplacé en mai 92, les débits mesurés étaient semblables aux valeurs trouvées pour la boucle #1. La validité de ces mesures a été confirmée en octobre 92 en comparant simultanément avec un débitmètre ultrasonique. On a noté aussi que, une fois l'air éliminé dans le serpentin, les débits montaient à 22 l/min pour la boucle #1 et 20 l/min pour la boucle #2, mais que ces valeurs tombaient à 16 l/min et 18 l/min au bout de deux semaines.

Il a été remarqué que la surface de la pompe de circulation était excessivement chaude. Des mesures du courant tiré ont été faits en octobre 92

et, avec le voltage d'alimentation normale, la valeur était de 6.4 ampères tandis que le moteur est coté à un maximum de 5.8 ampères. Ce moteur parait donc sous-dimensionné par rapport au serpentin.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS:

Le système de fondation en dalle isolée refroidie par thermopompe surpasse les attentes en ce qui concerne sa capacité à conserver le sol sous-jacent gelé. Sous le plancher, à un niveau de 2 m en dessous du serpentín, les températures maximales durant l'été sont -2°C , ou plus froides, pendant que les moyennes annuelles se situent autour de -3°C (données de 93 après réglage du thermostat, 92 ayant été entre -4°C - 5°C). Sous le périmètre de la fondation, les températures maximales étaient -2°C , mais ces valeurs se rapportent au niveau du serpentín et il est certain qu'à 2m plus profond, les températures maximales seraient nettement plus froides. Que la performance thermique de la fondation soit plus qu'adéquate est confirmée par le fait que les mouvements de la dalle ont toujours été totalement négligeables.

Par contre, les problèmes rencontrés avec le circuit du fluide caloporteur demandent des correctifs. Il est recommandé que, si cela n'a pas déjà été fait (voir recommandations dans le rapport d'étape), du personnel qualifié fasse les révisions suivantes:

- 1) vérifier le serpentín et ses raccordements à la thermopompe en vue de confirmer s'il y a une fuite qui explique la présence d'air.
- 2) remplacer le moteur de la pompe de circulation par un plus gros.
- 3) déplacer le deuxième capteur de température du thermostat pour utiliser la température de l'air extérieur afin de fermer la thermopompe normalement en été.
- 4) il serait important de voir à ce que le manuel d'entretien du système existe et qu'il soit suivi, et qu'un programme de vérification régulière à long terme soit instauré, comprenant, au minimum, l'enregistrement manuel des températures du fluide et du thermostat, la pression du fluide, le nombre d'heures de marche de la thermopompe et la date de changement du filtre à air et de tout autre entretien recommandé par le fabricant. En plus, les points les plus profonds des câbles verticaux devrait idéalement être lus sur une base annuelle. Un tel programme de suivi n'est pas unique à ce style de fondation mais devrait faire simplement partie du programme préventif normal de tous les bâtiments importants construits sur le pergélisol partout dans le Nord.

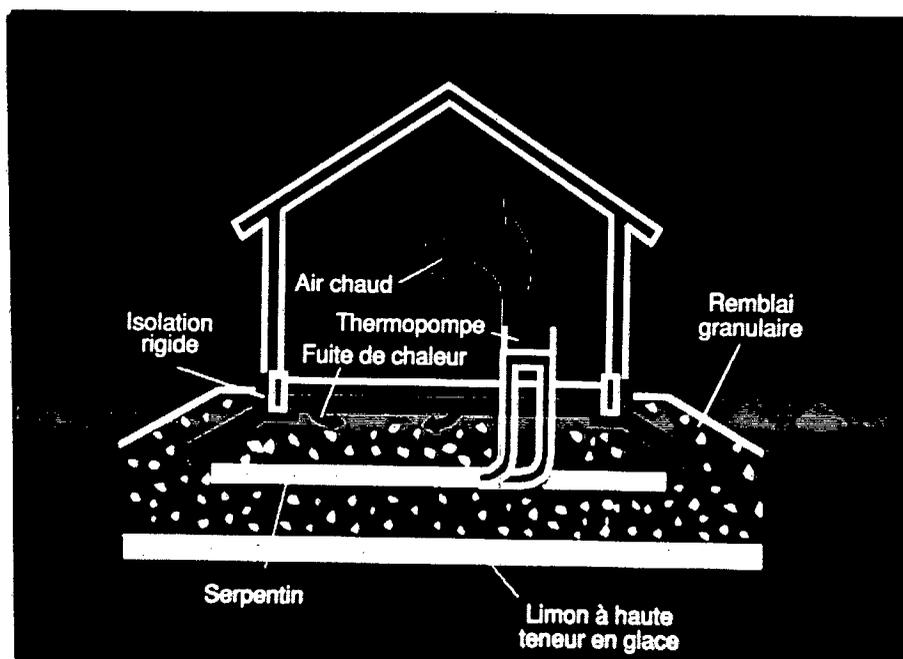


Figure 1: Concept de la fondation refroidie par thermopompe

REMERCIEMENTS:

Les auteurs tiennent à remercier le Ministère des Transports du Québec, Section Sols et Chaussées, qui a contribué, avec grand enthousiasme, son soutien morale et logisitique en plus de co-financer ce projet. Nous exprimons aussi notre sincère gratitude envers Transports Canada, Région de l'Est, La Compagnie Genrdon-Lefèvre, et La Compagnie Terre-Aire Ltée., qui ont tous collaboré si bien pour assurer le sucès des travaux. Nous remercions également l'Université Laval, Centre d'Études Nordiques, pour son rôle d'intermédiaire, aussi bien que pour sa part dans les travaux préliminaires. Nous voulons spécialement reconnaître le généreux appui qui nous a été accordé par Clément Tremblay, Nelson Rioux et Guy Doré du Ministère des Transports, et l'encouragement de Michel Allard de l'Université Laval.

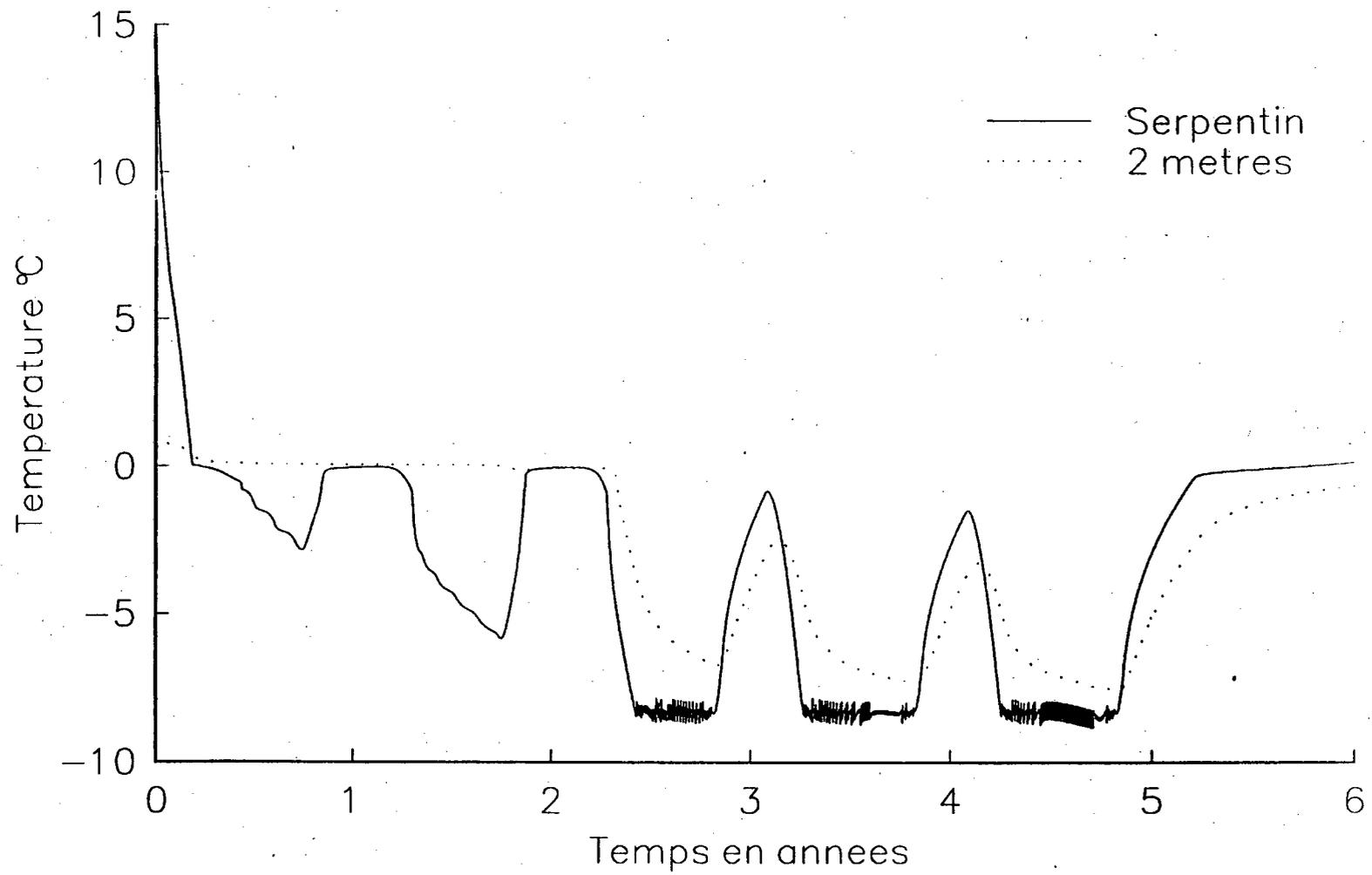


Figure 2: Simulation des températures sous la dalle

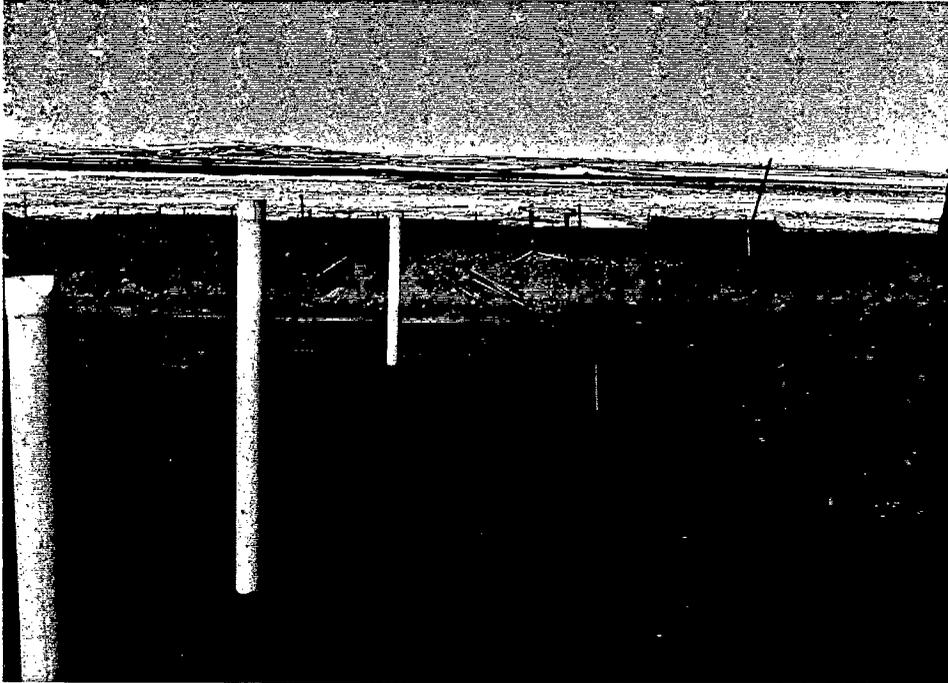


Figure 3: Construction: le treillis et les puits à thermocouples

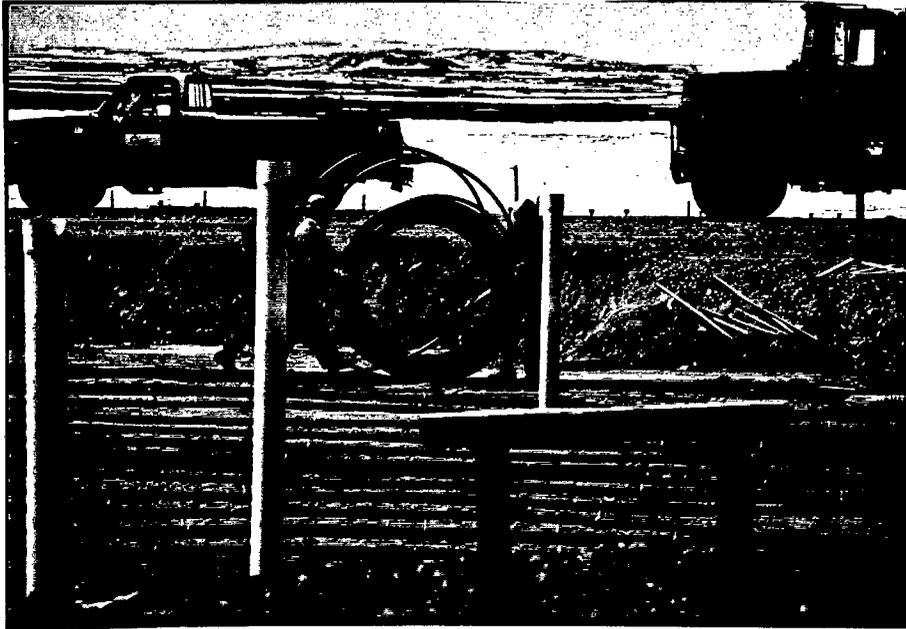


Figure 4: Construction: déroulant le tuyau du serpent

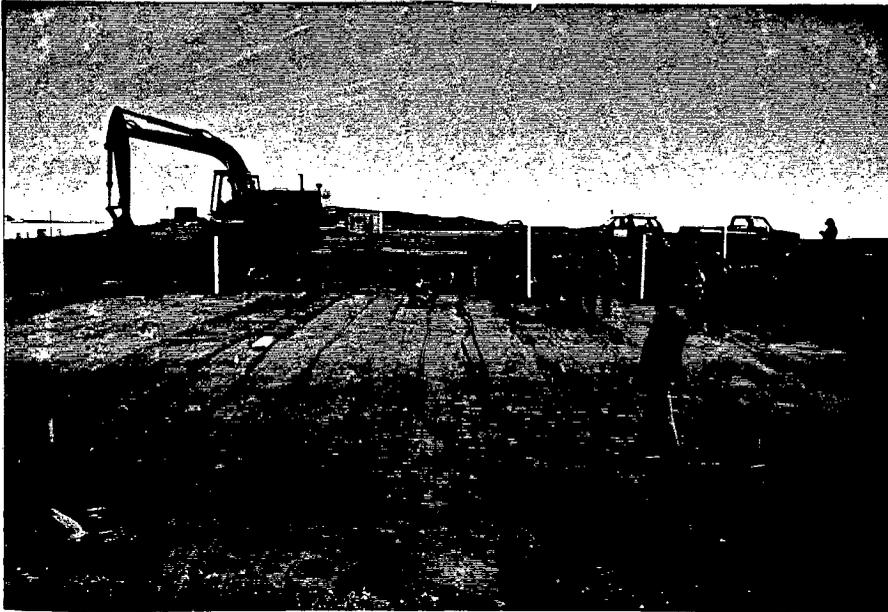


Figure 5: Construction: les virages du serpent

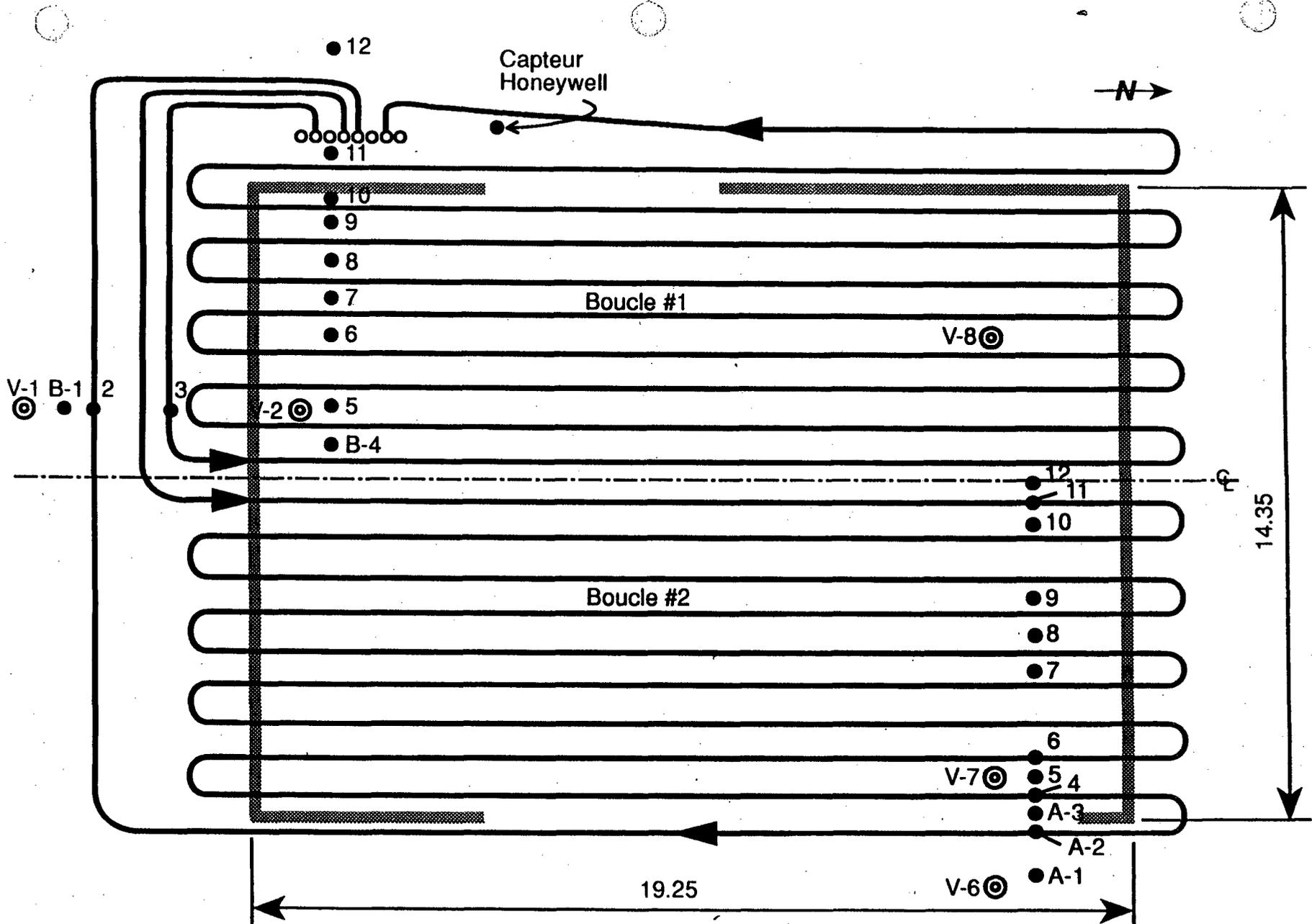


Figure 6

Aéroport d'Aupaluk, abri pour véhicules, plan de localisation des thermocouples

- ⊙ Thermocouple (verticaux)
- Thermocouple (horizontaux)

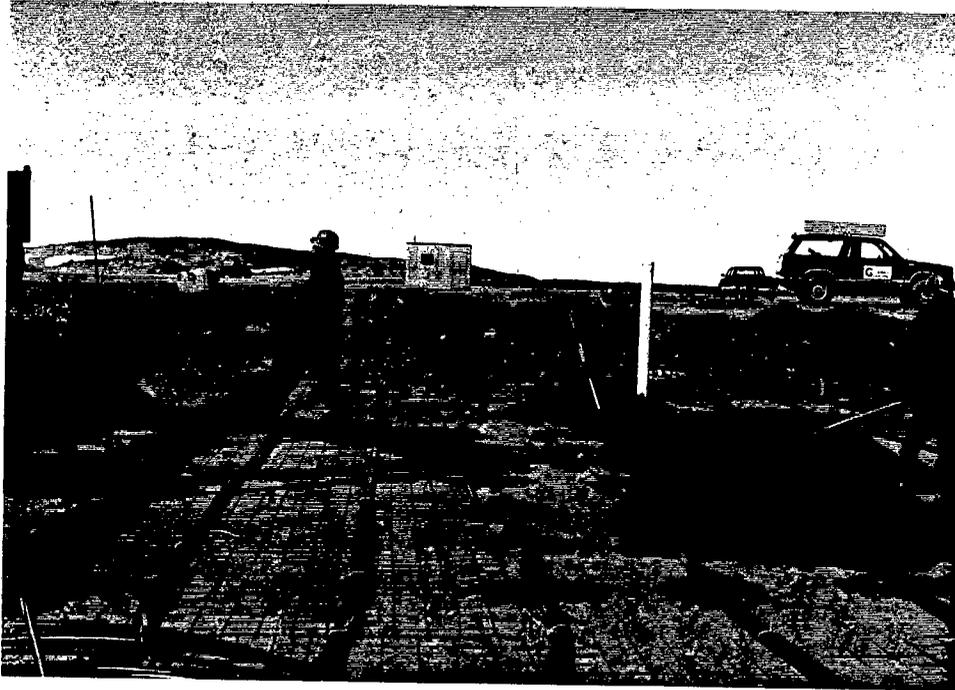


Figure 7: Construction: précautions de remblayage et détails du serpentín



Figure 8: Construction: compactage de la couche de sable

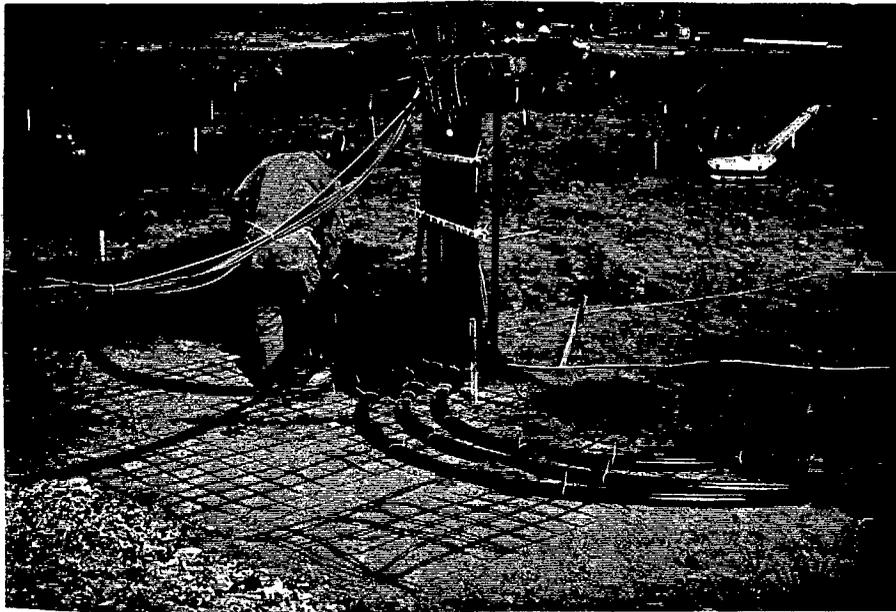


Figure 9: Construction: terminaison temporaire des tuyaux

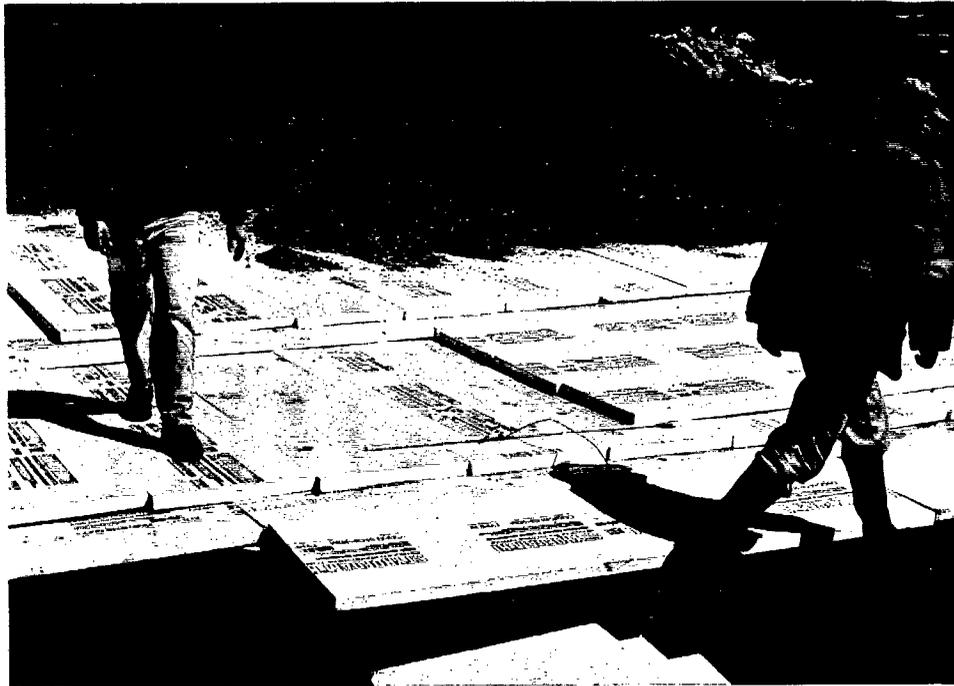


Figure 10: Construction: pose de l'isolant en polystyrène extrudé

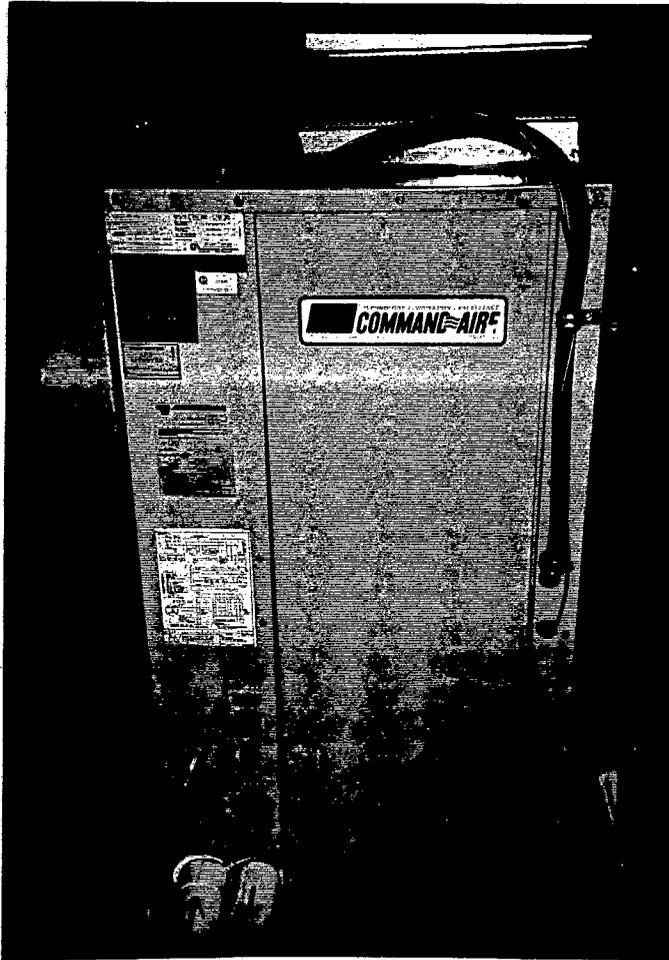


Figure 11: La thermopompe posée par Cie. Terre-Aire

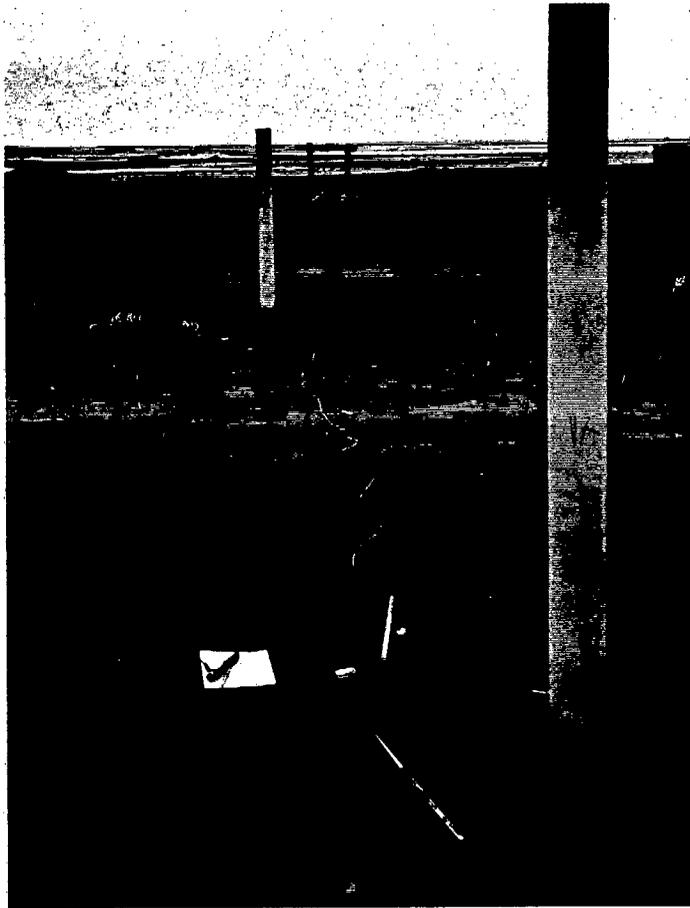


Figure 12: Installation des thermocouples horizontaux

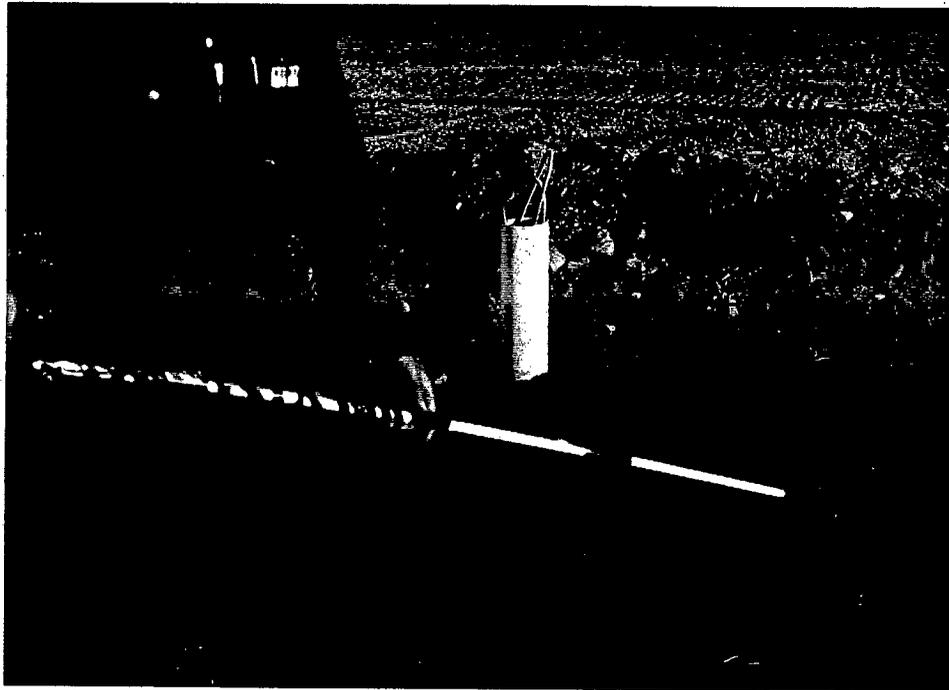


Figure 13: Tige pour monter les thermocouples verticaux

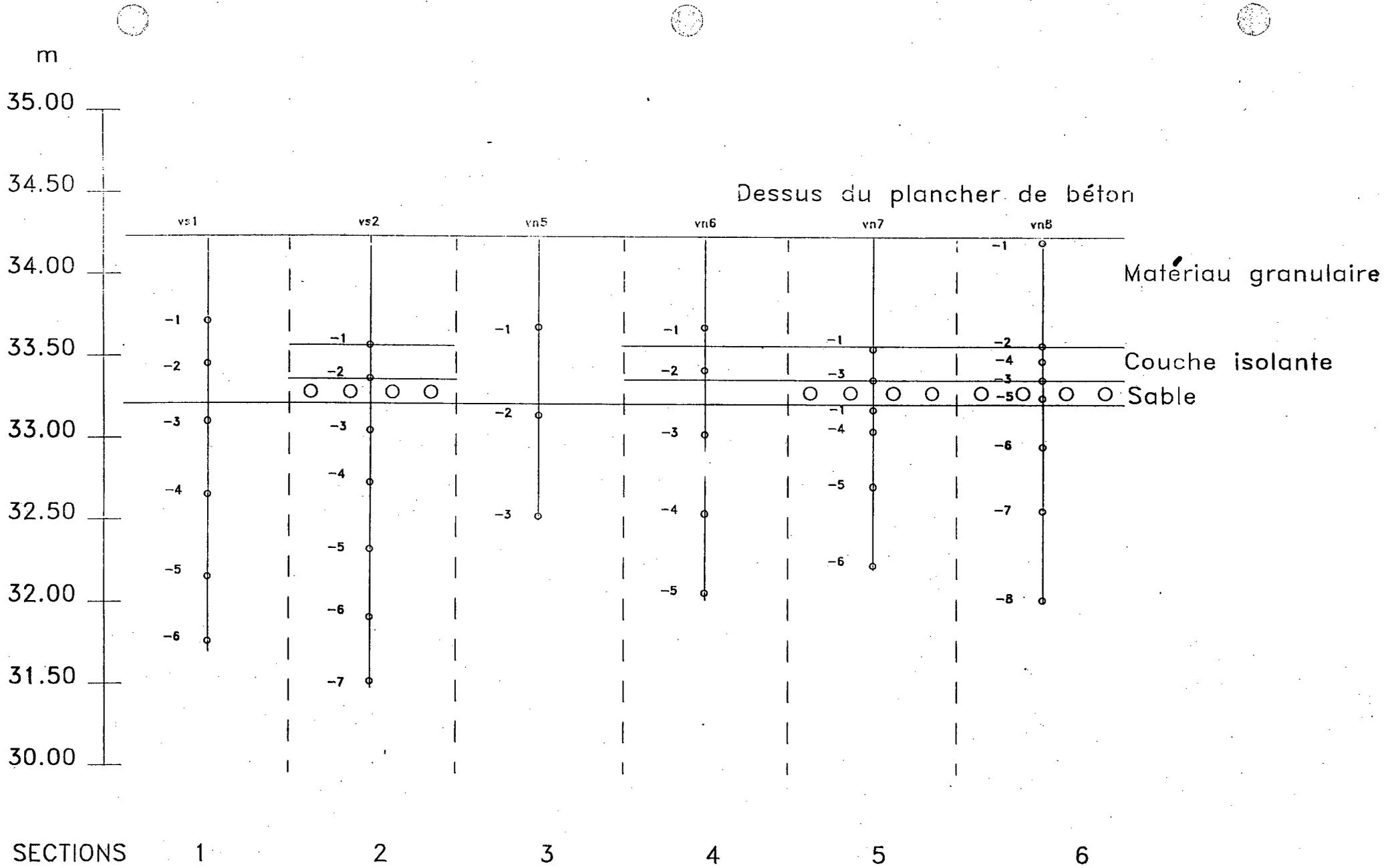


Figure 14: Emplacement des thermocouples verticaux

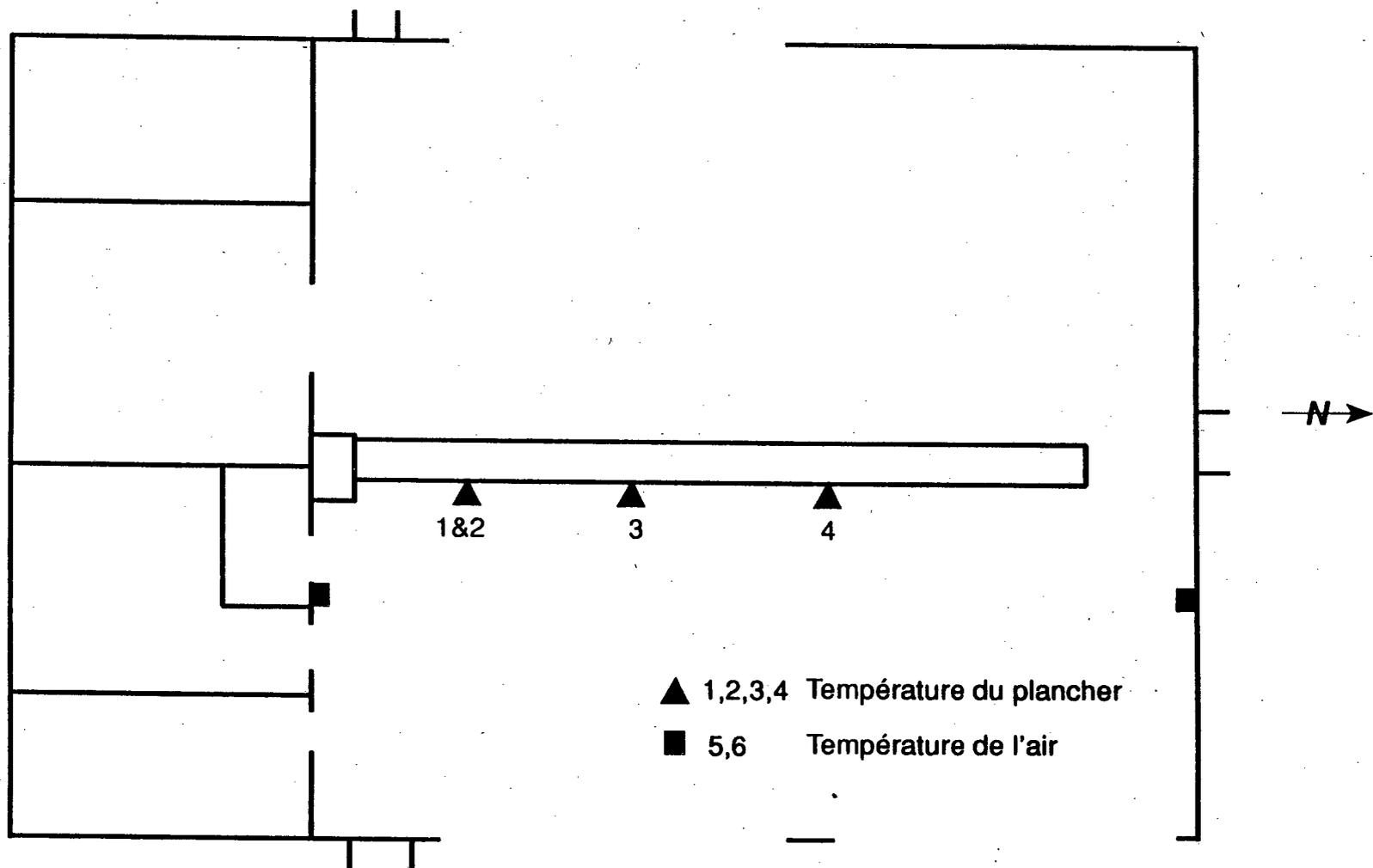


Figure 15

Localisation des thermocouples sur le plancher et dans l'air intérieur

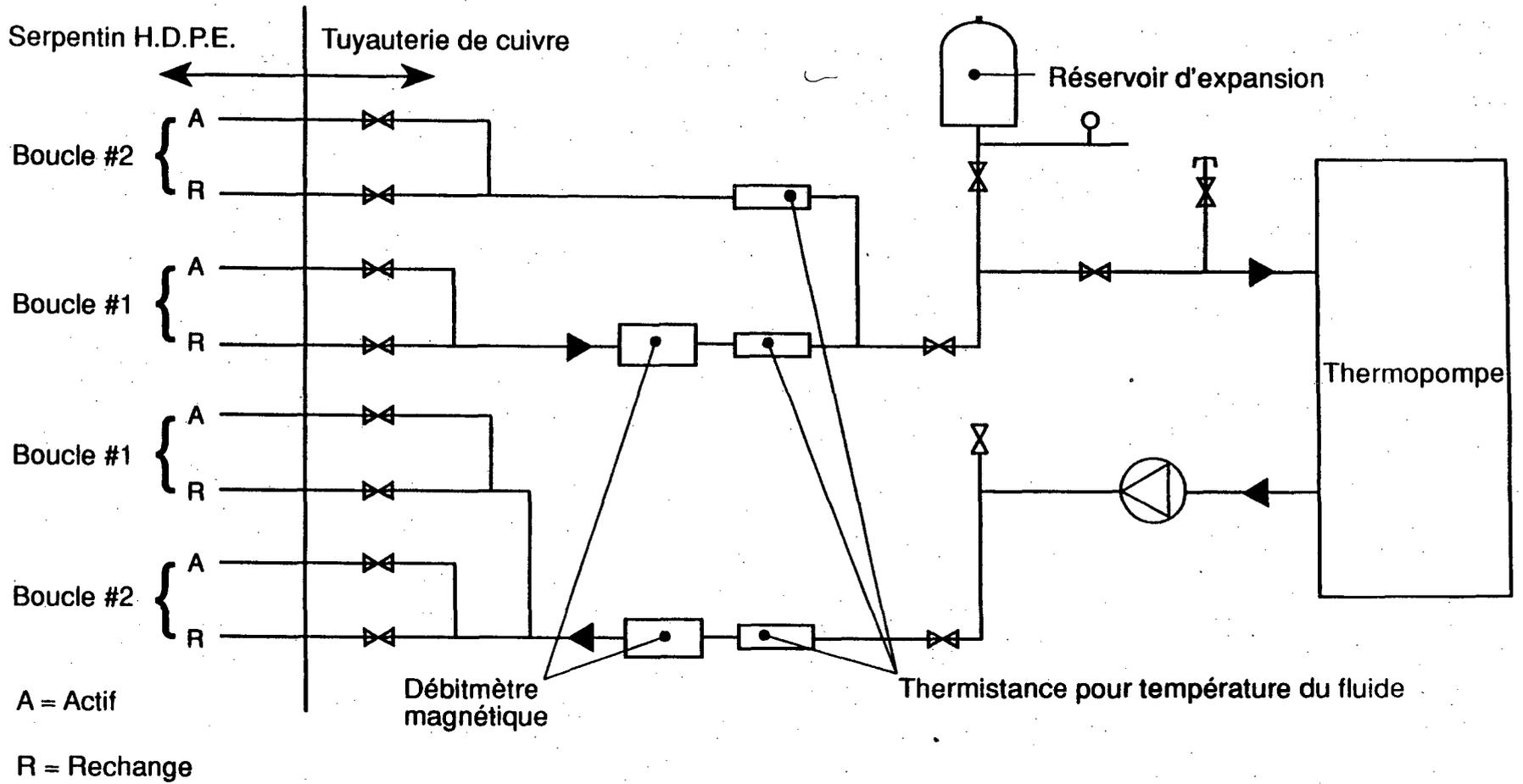


Figure 16

Aéroport d'Aupaluk, abri pour véhicules; instrumentation pour déterminer la chaleur extraite du sol



Figure 17: L'équipement de mesure de la chaleur extraite du sol

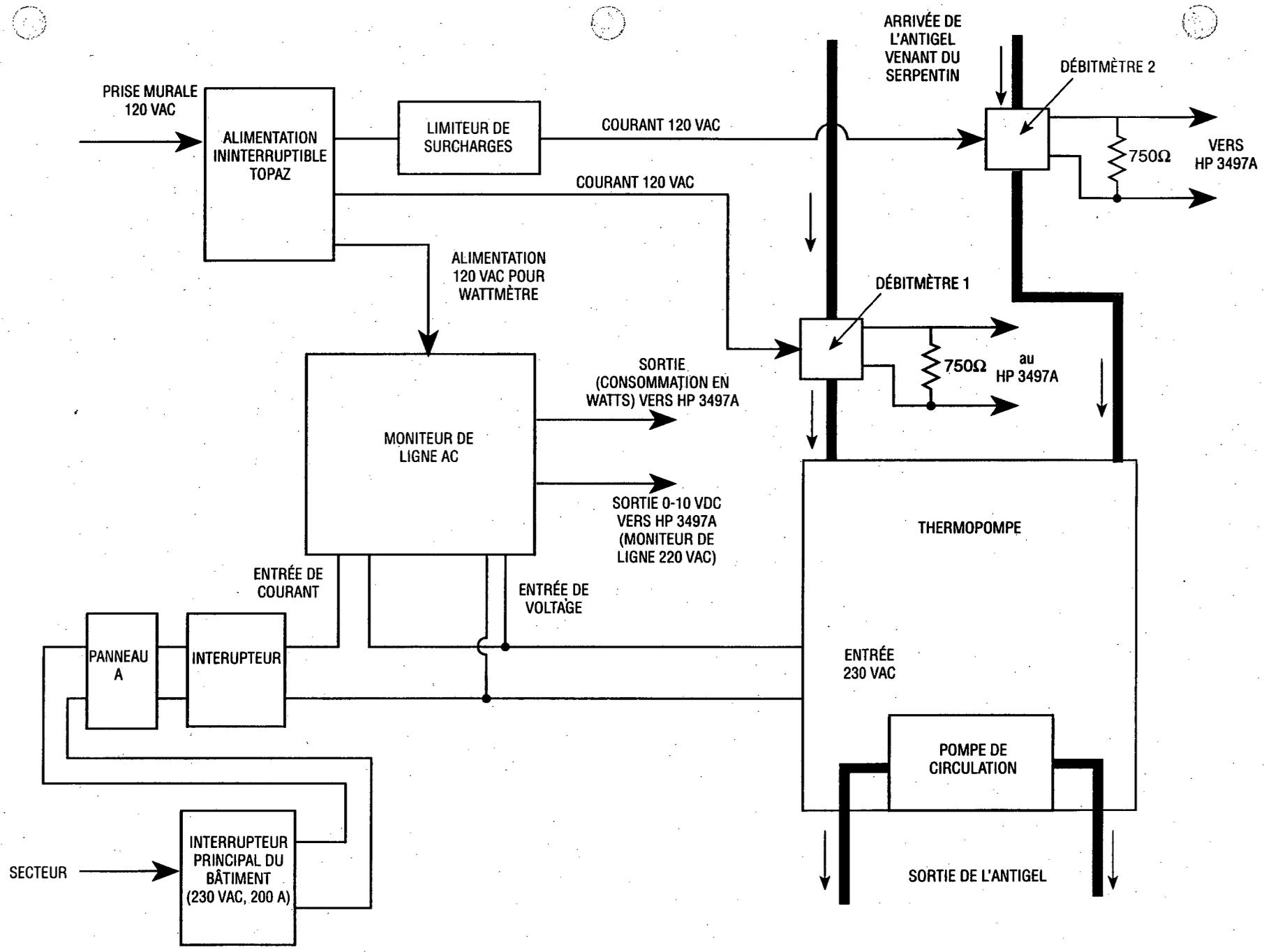


Figure 18: Aupaluk - Abri pour véhicules. Schéma des circuits pour évaluer la performance énergétique

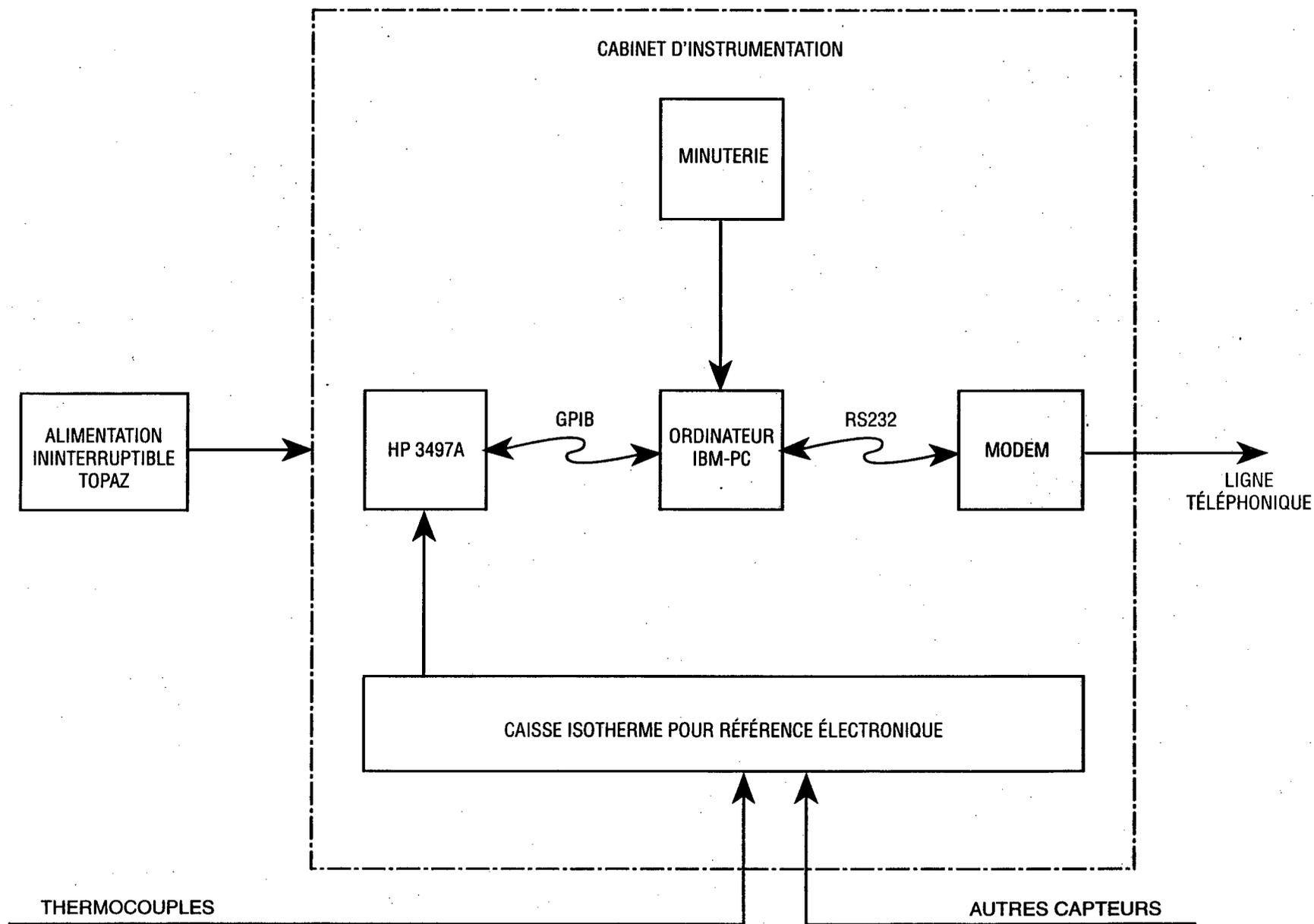


Figure 19: Aupaluk - Abri pour véhicules. Schéma d'instrumentation

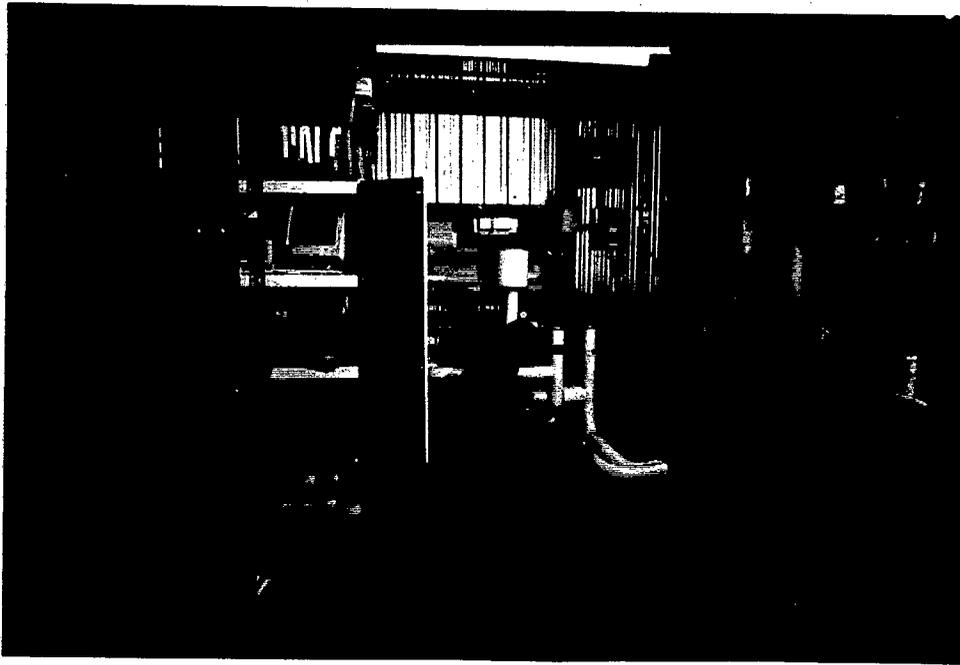


Figure 20: L'équipement de suivi électronique

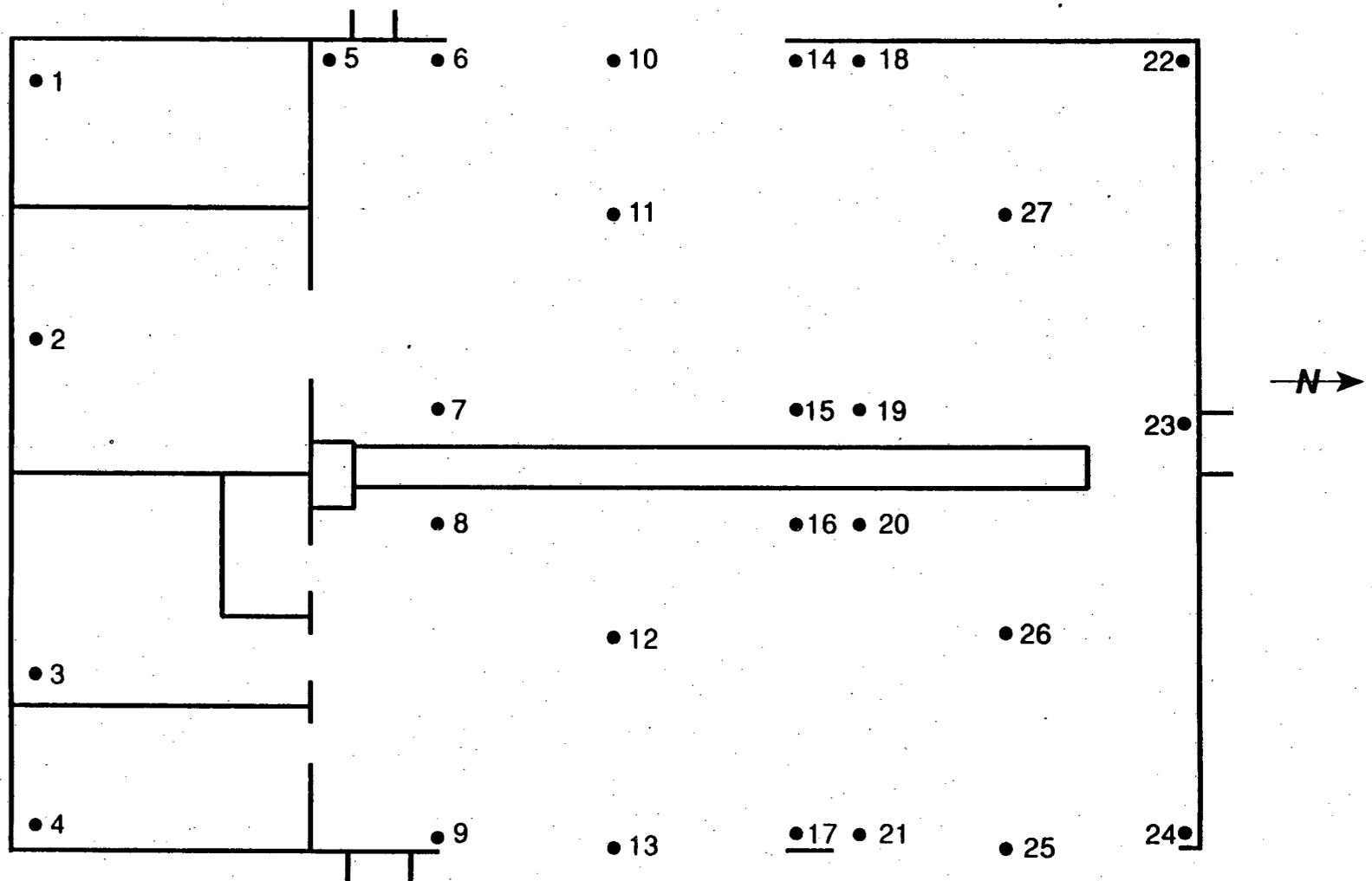


Figure 21

● points de repère

Localisation des repères de nivellement sur le plancher

Plancher du bâtiment côté sud

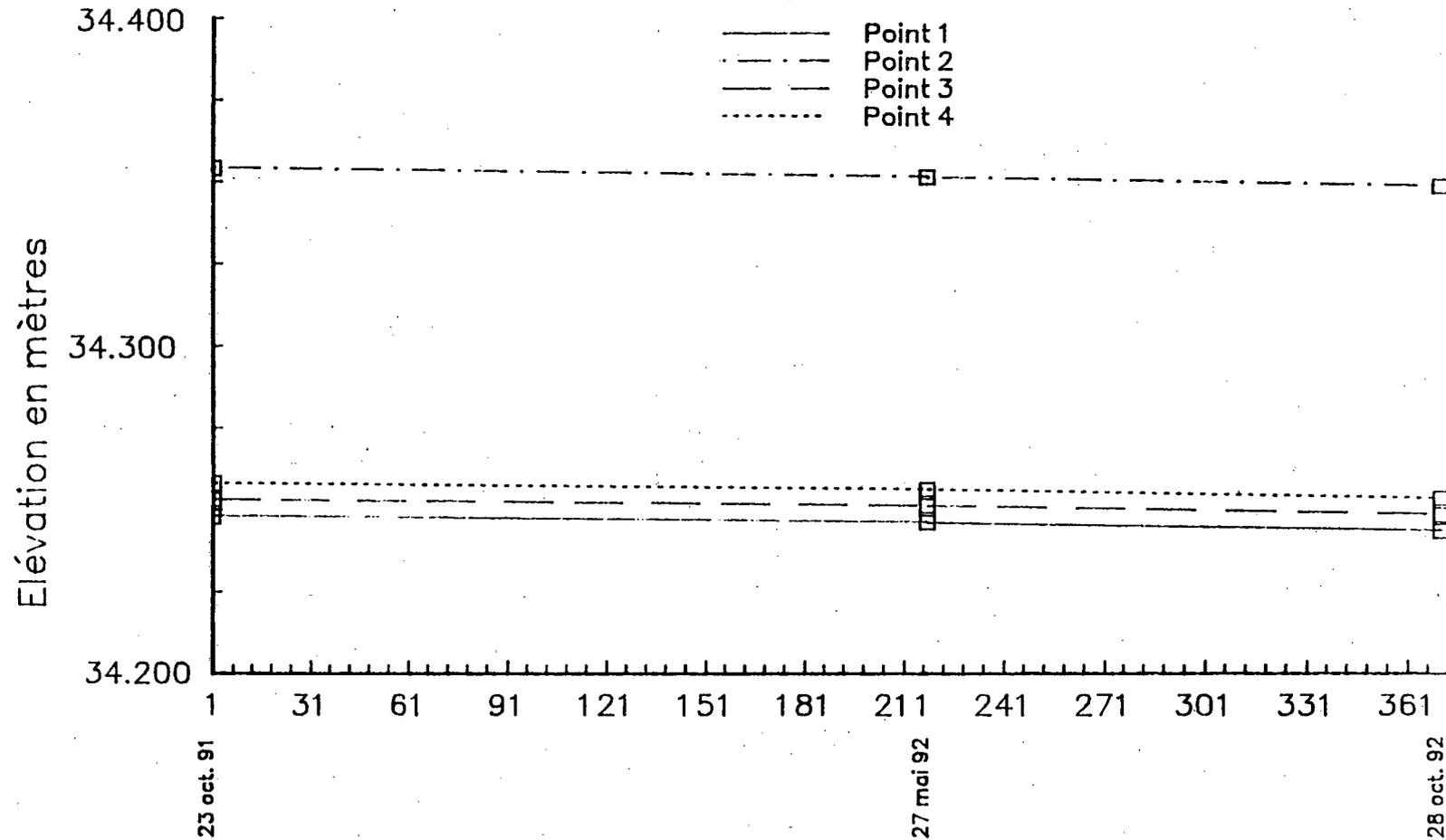


Figure 22a: Aupaluk – Abri pour véhicules. Mesures de niveau.

Plancher du bâtiment – centre

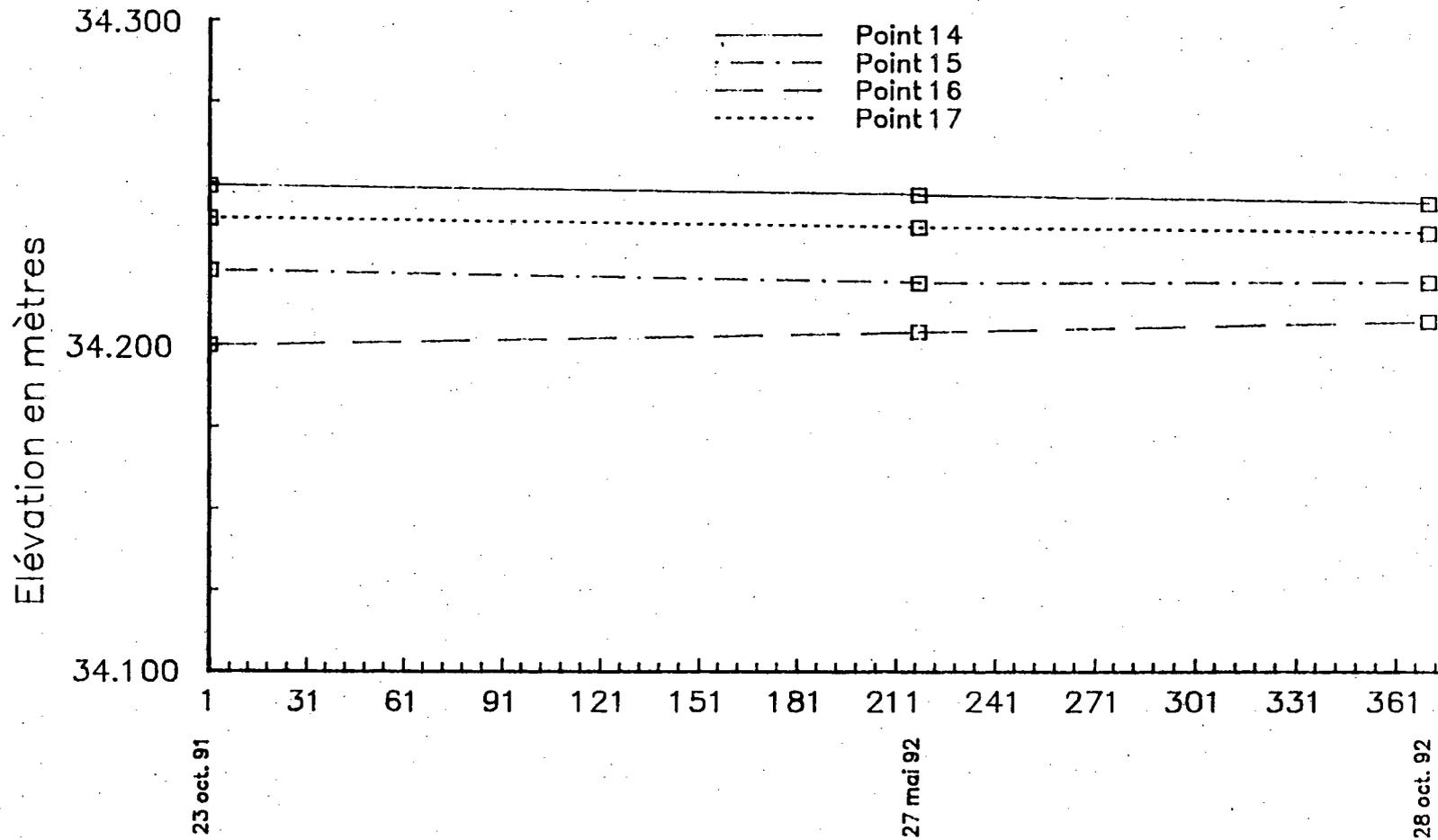


Figure 22b:Aupaluk -- Abri pour véhicules. Mesures de niveau.

Plancher du bâtiment côté nord

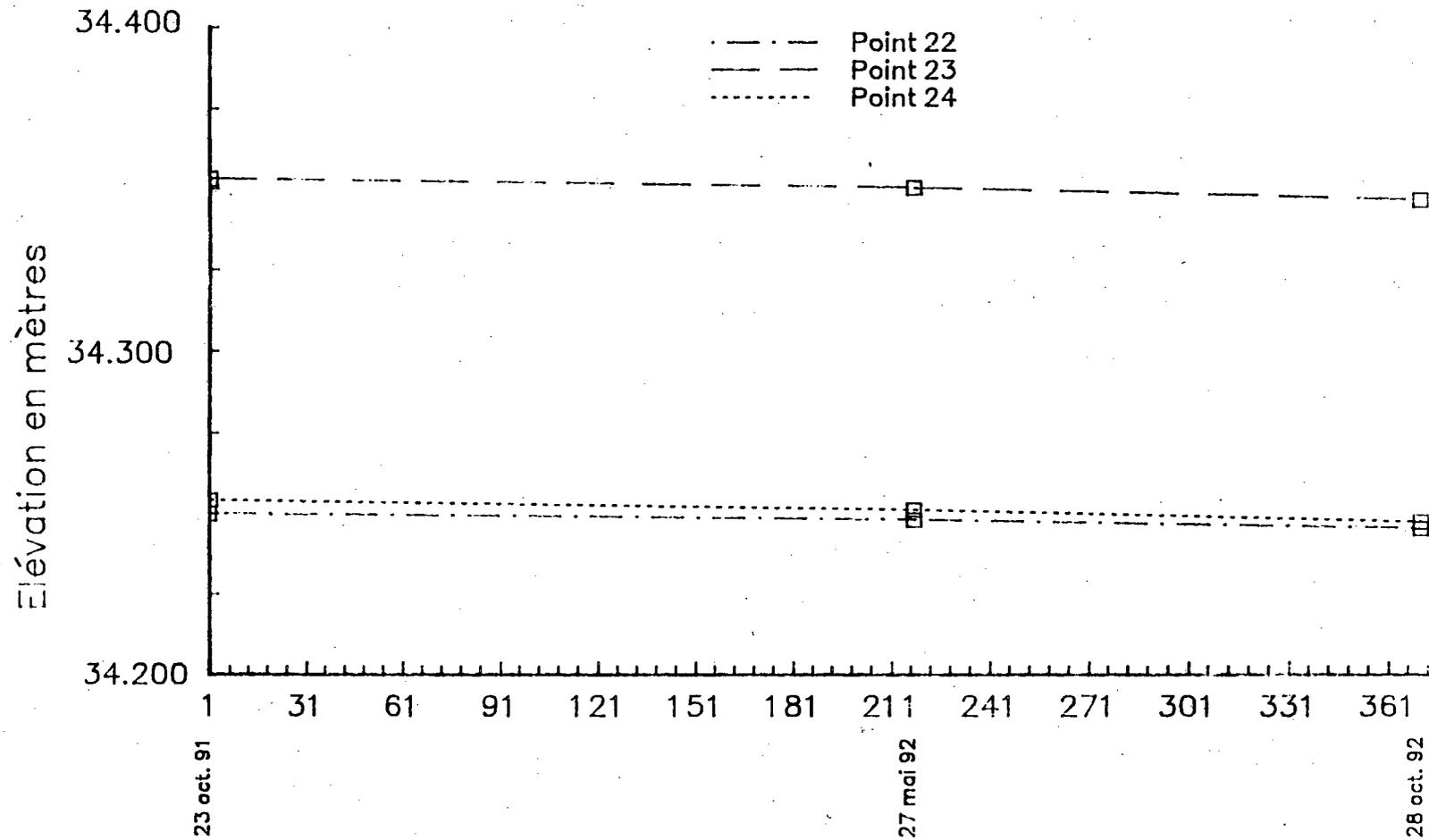


Figure 22c:Aupaluk -- Abri pour véhicules. Mesures de niveau.

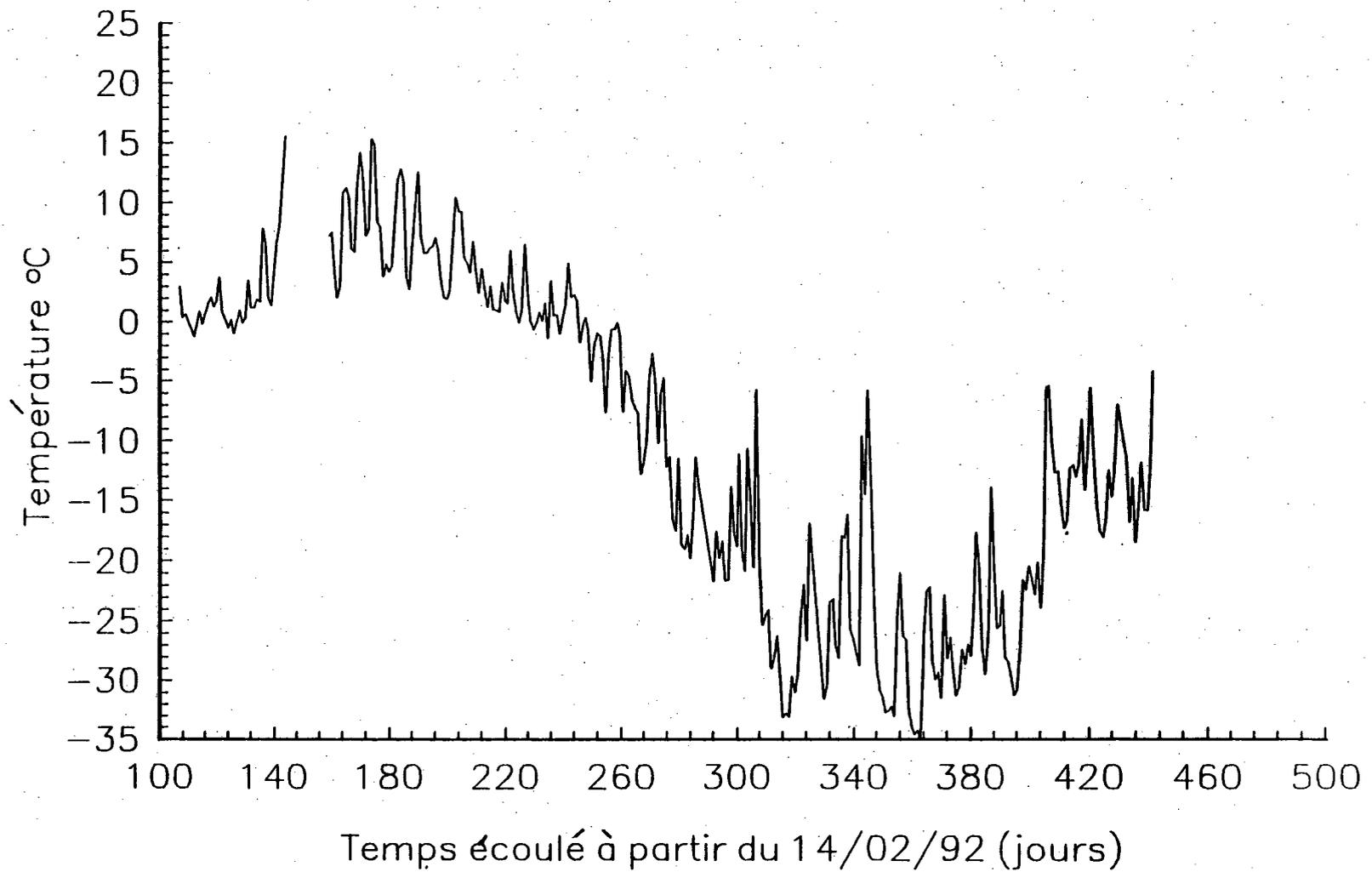


Figure 23:Aupaluk – Abri pour véhicules.
Température de l'air à l'extérieur de l'abri

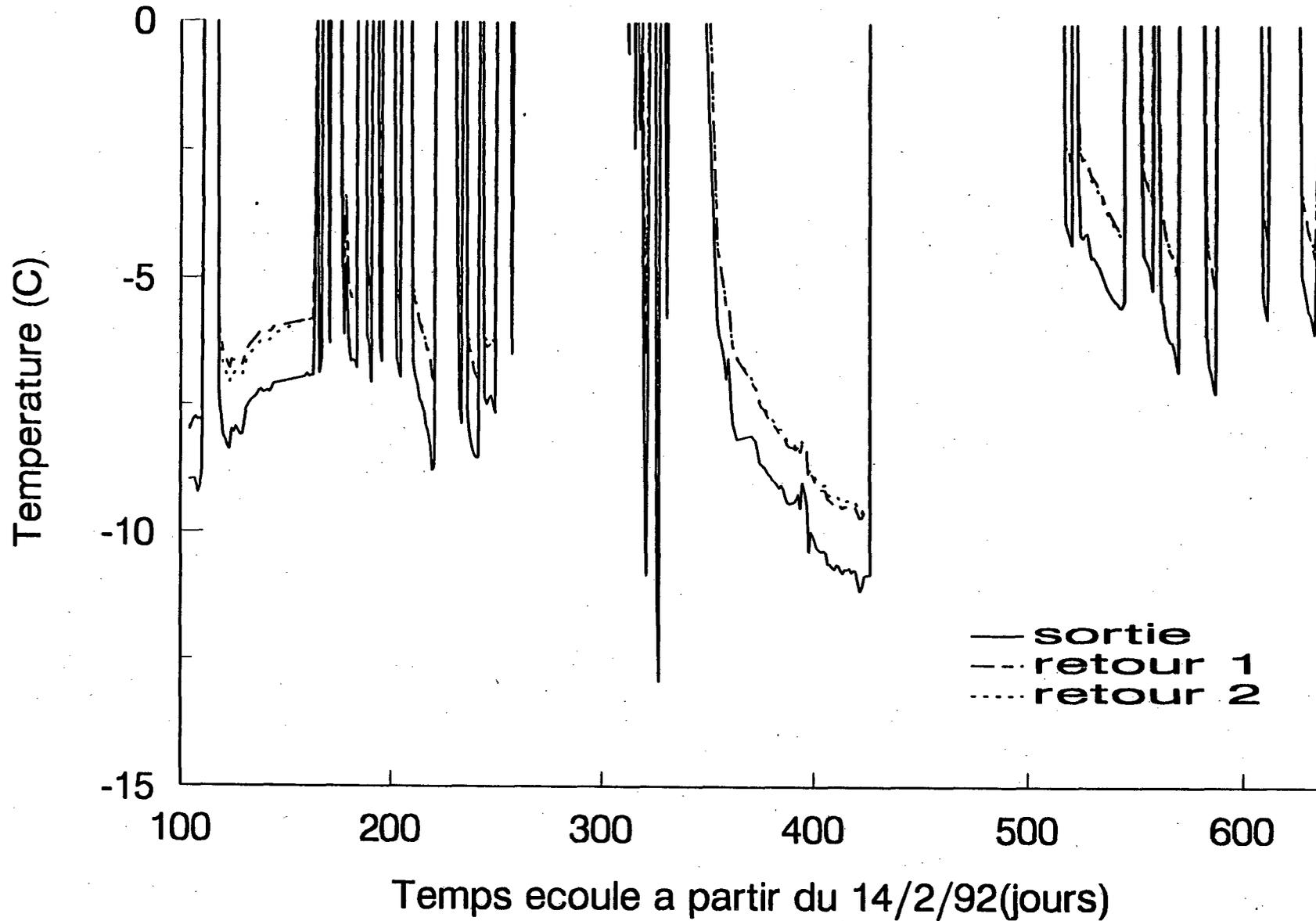


FIGURE 24: Aeroport d'Aupaluk - Abri pour vehicules
Temperature du fluide caloporteur

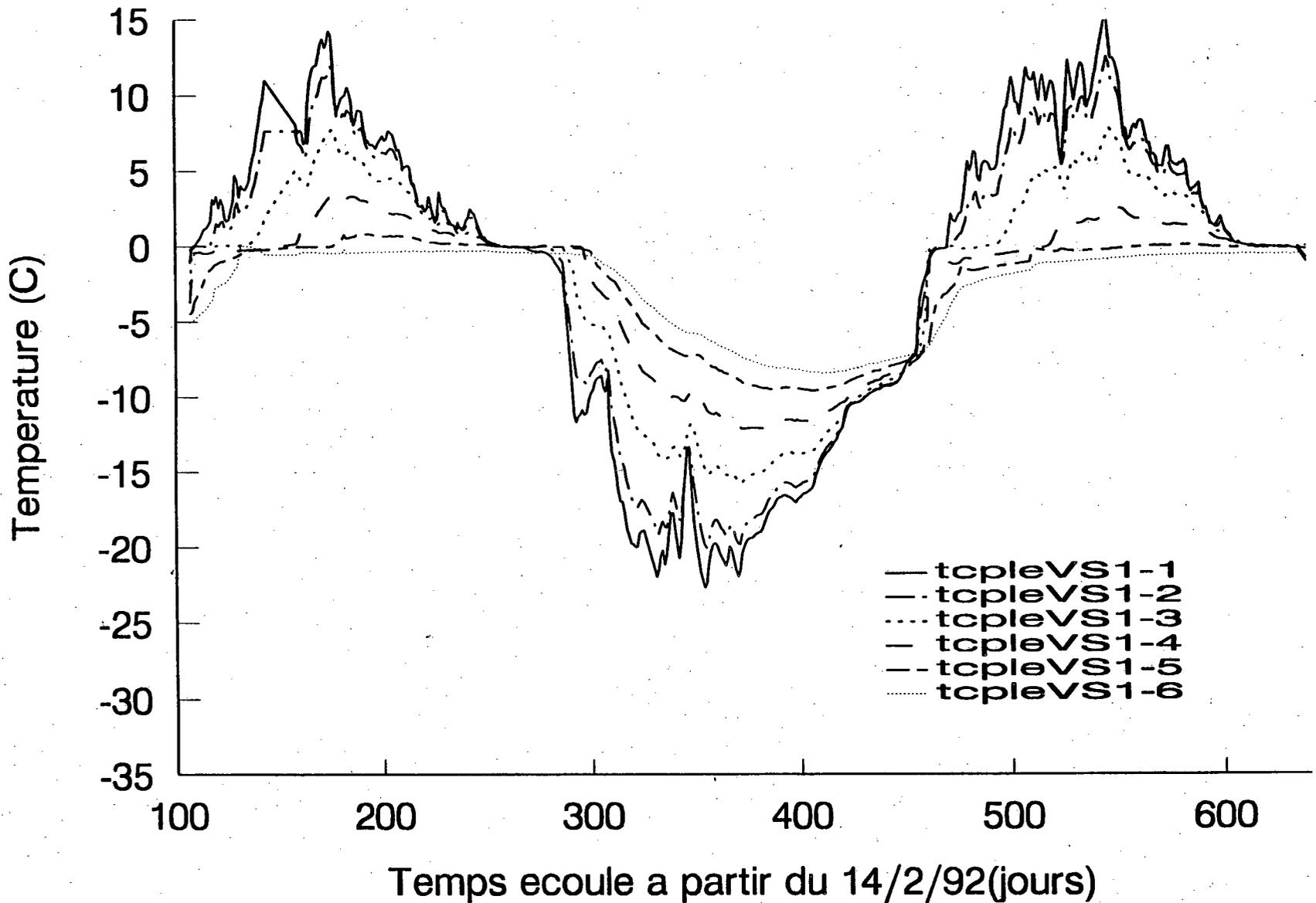


FIGURE 25: Aeroport d'Aupaluk - Abri pour vehicules
Temperatures: profil vertical - sud - exterieur

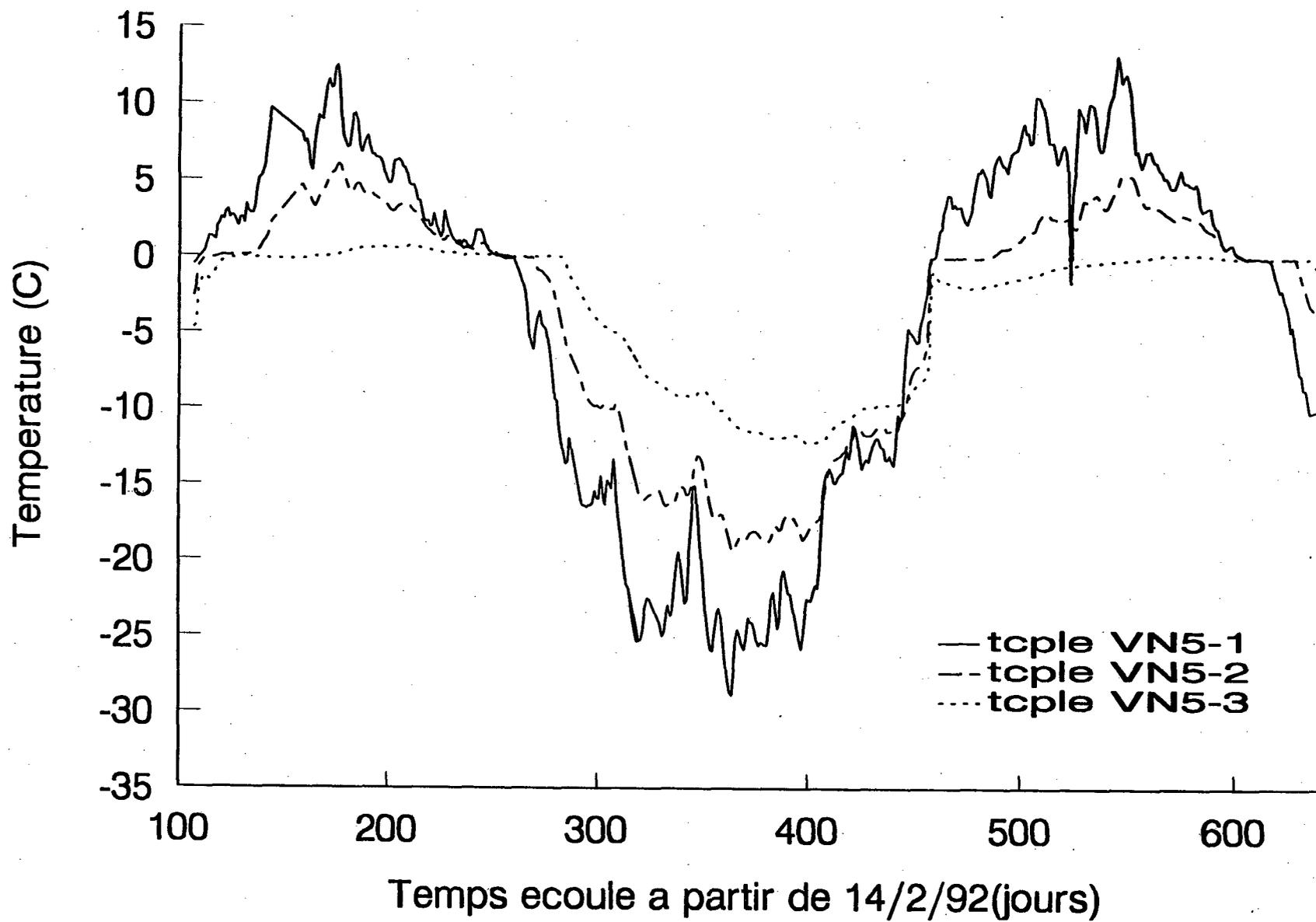


FIGURE 26: Aeroport d'Aupaluk - Abri pour vehicules
 Temperatures: profil vertical - nord - exterieur

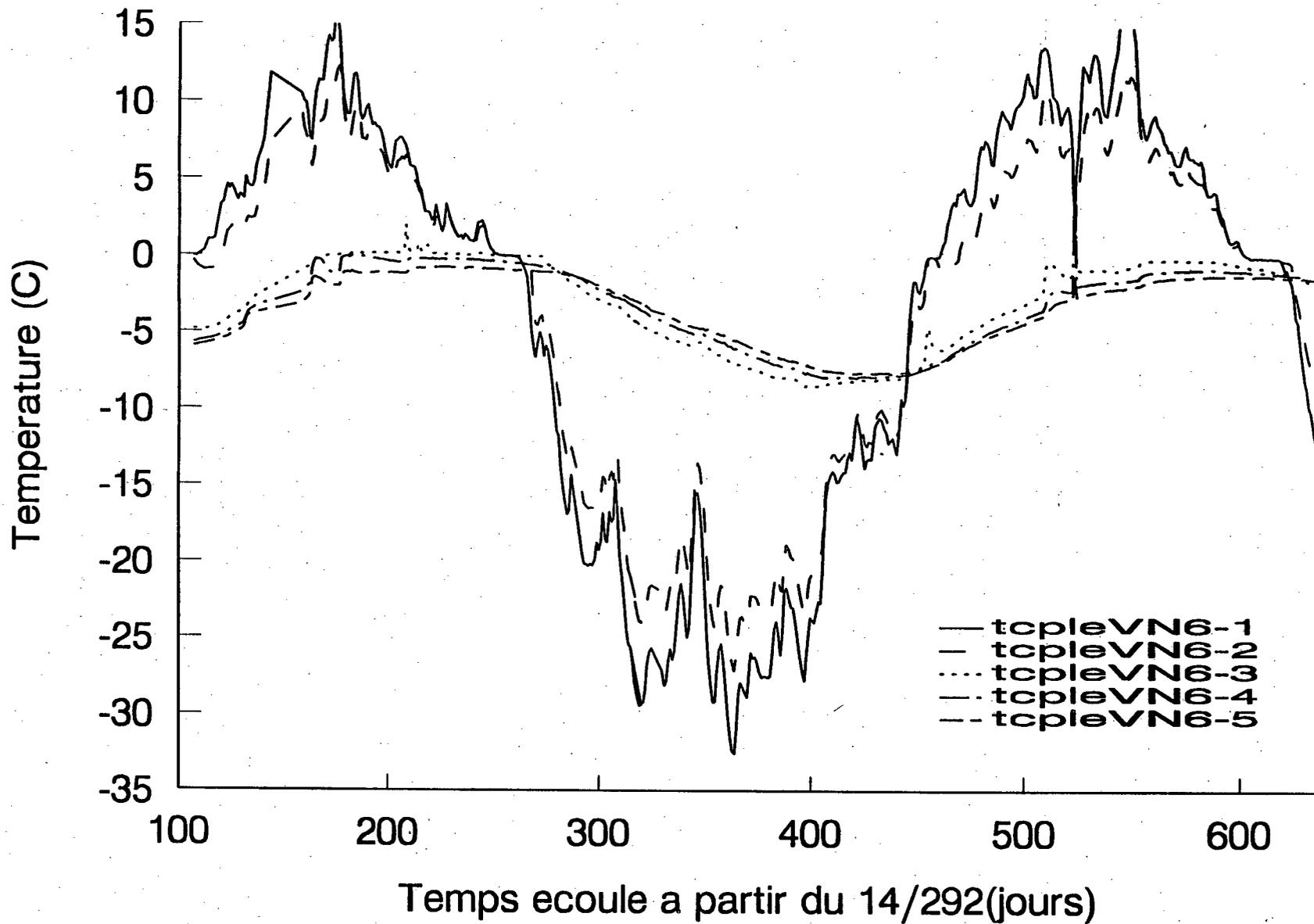


FIGURE 27: Aeroport d'Aupaluk - Abri pour vehicules
Temperatures: profil vertical - nord - exterieur

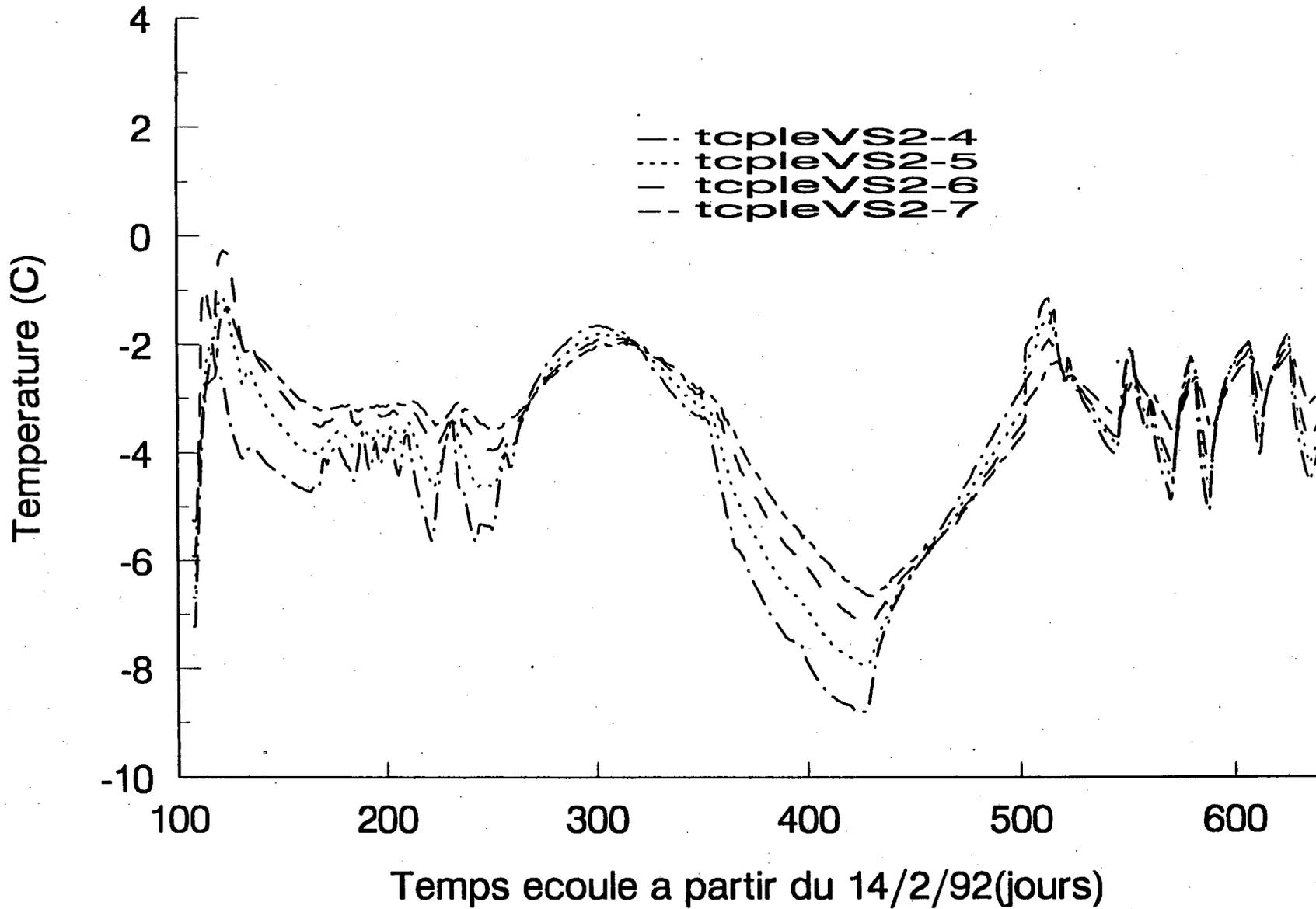


FIGURE 28: Aeroport d'Aupaluk - Abri pour vehicules
Temperatures: profil vertical - sud - interieur

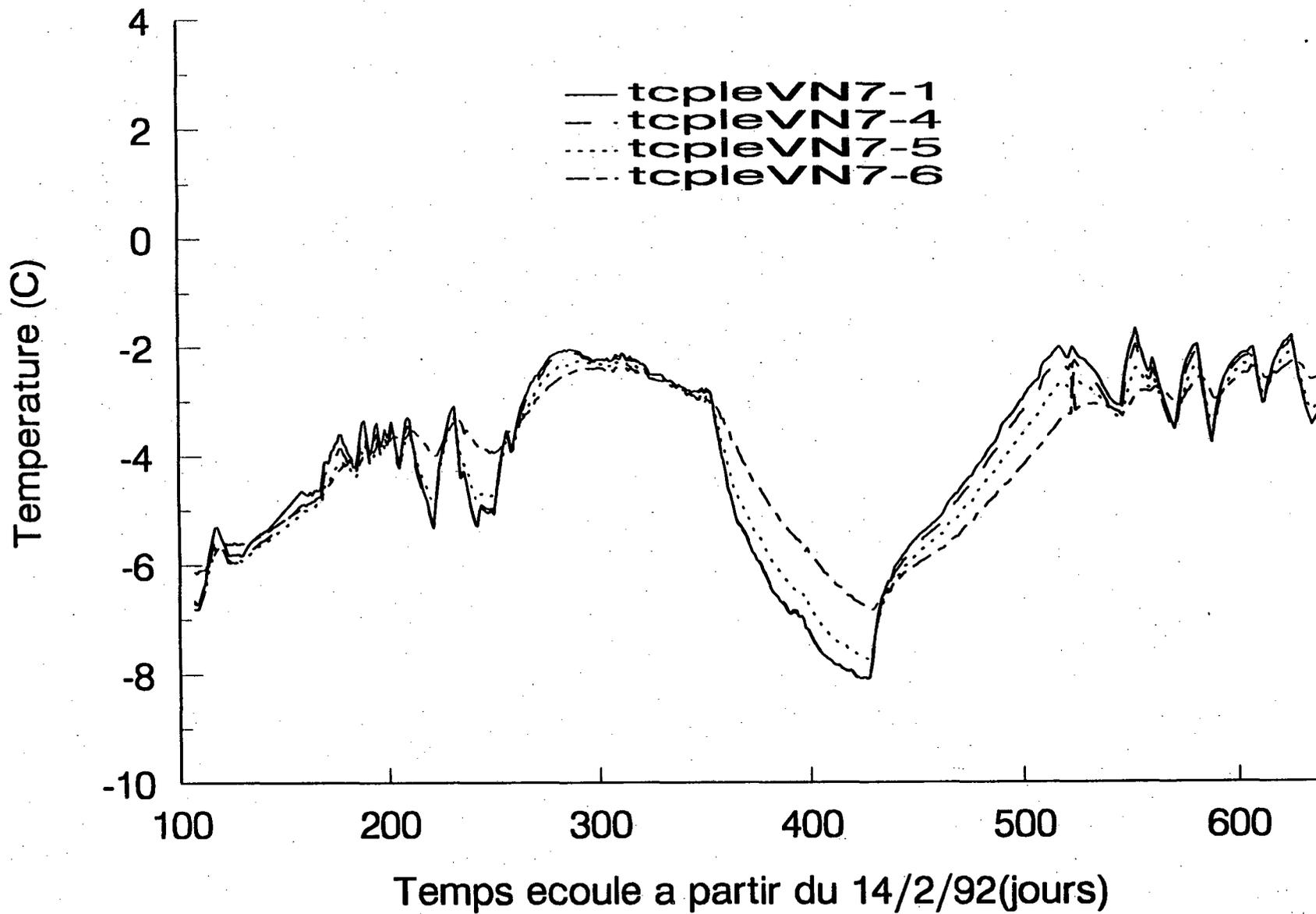


FIGURE 29: Aeroport d'Aupaluk - Abri pour vehicules
Temperatures: profil vertical - nord - interieur

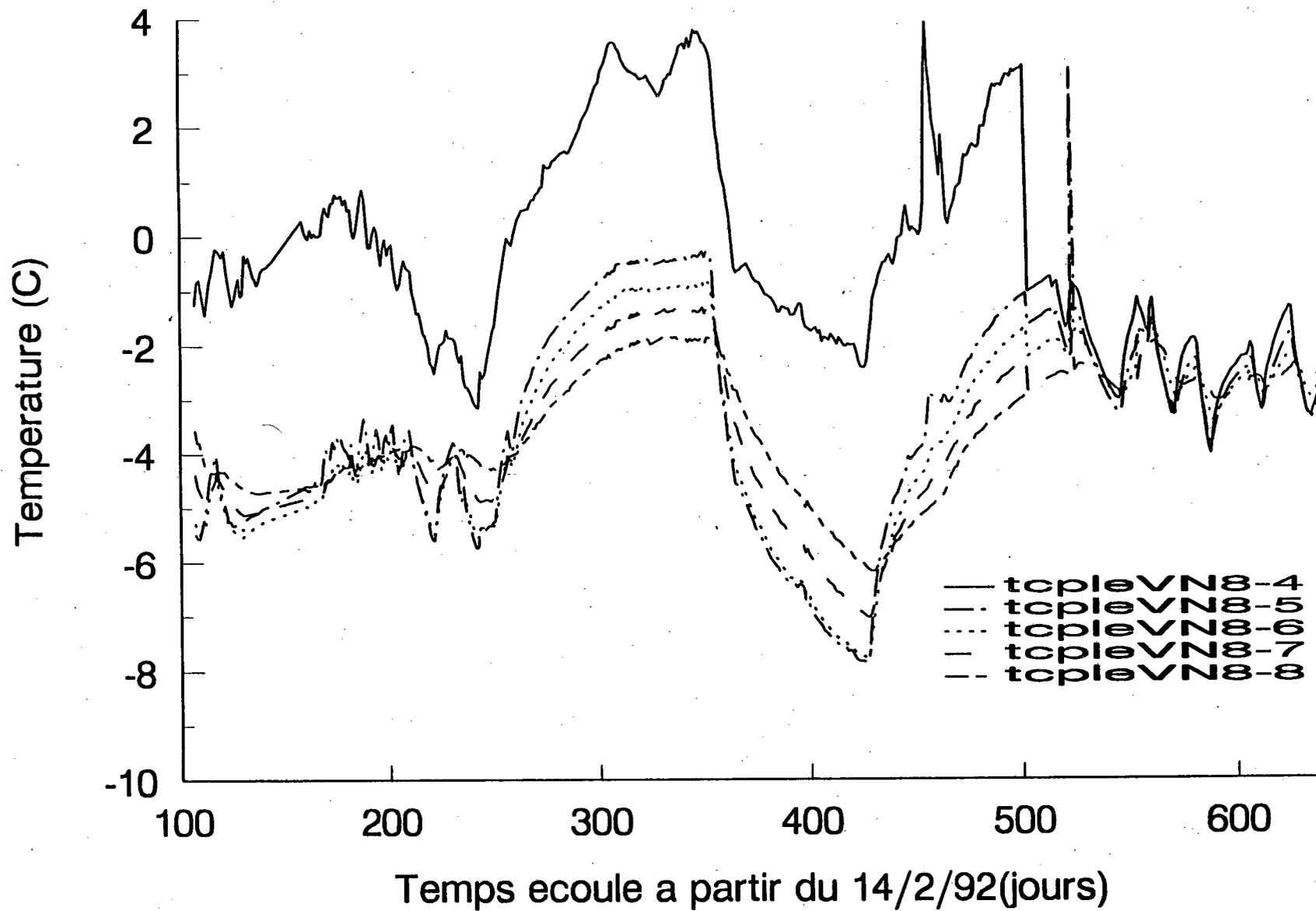
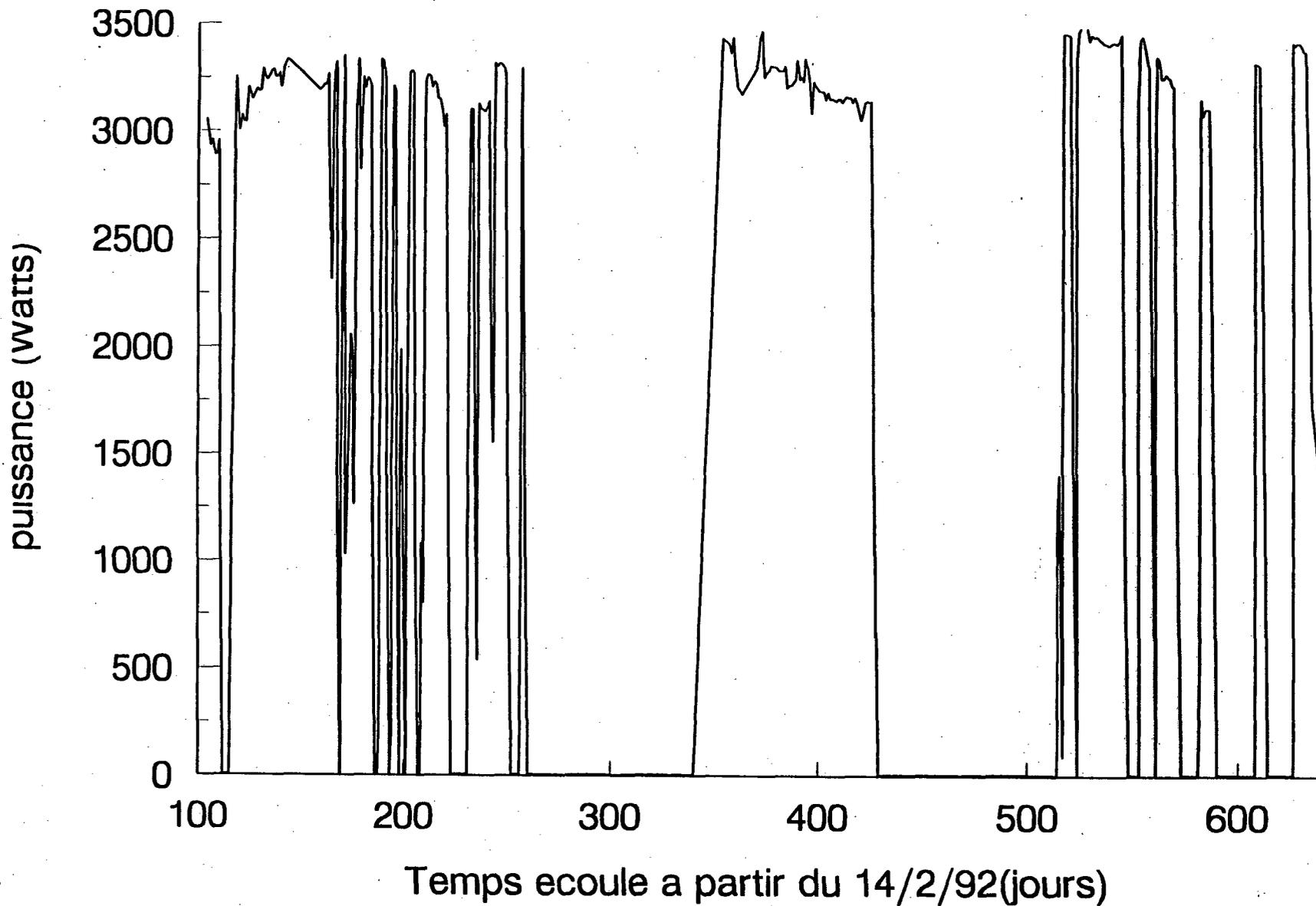


FIGURE 30: Aeroport d'Aupaluk - Abri pour vehicules

Temperatures: profil vertical - nord - interieur



**FIGURE 31: Aeroport d'Aupaluk - Abri pour vehicules
Consommation Electrique**

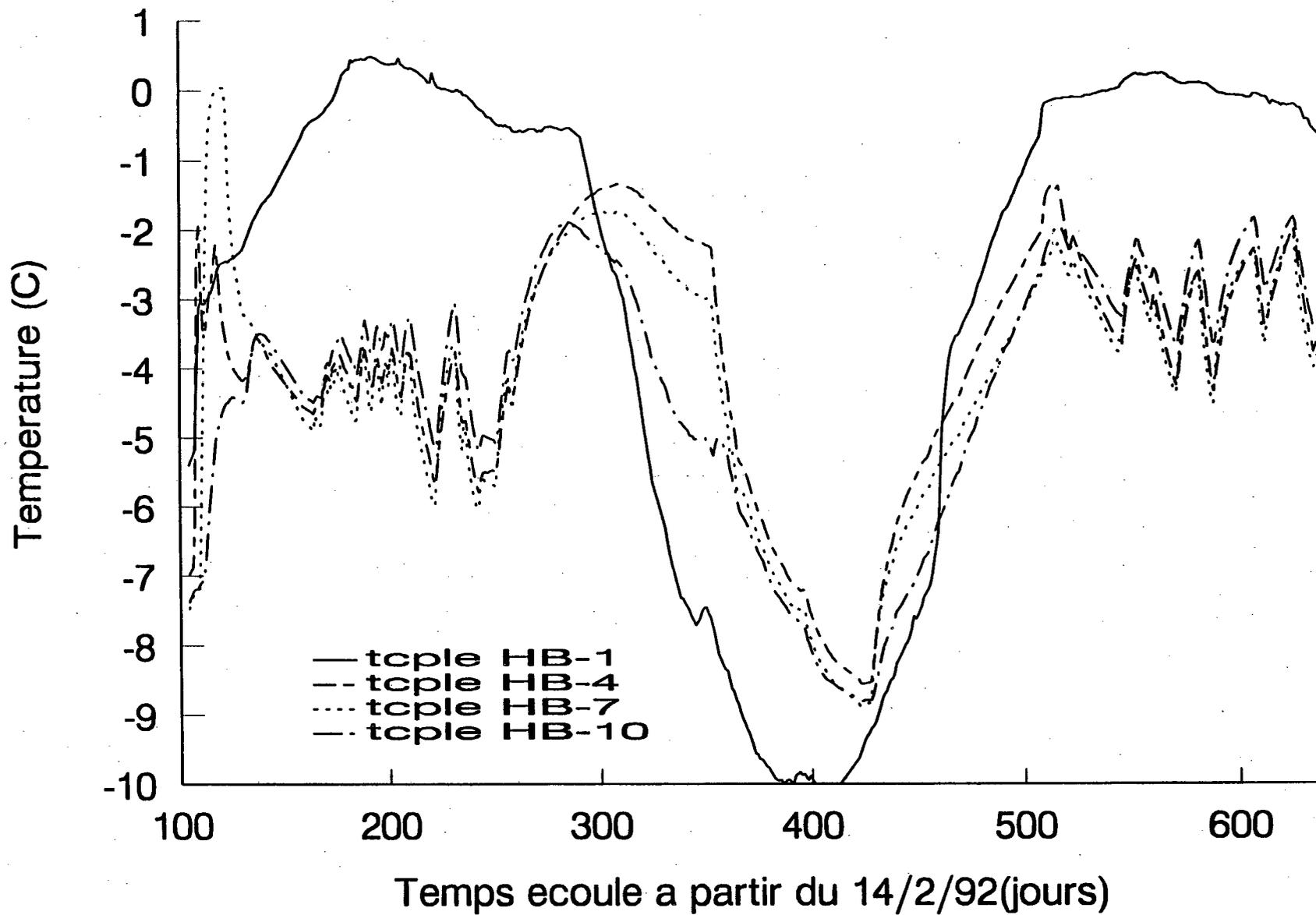


FIGURE 32: Aeroport d'Aupaluk - Abri pour vehicules
Temperatures: profil horizontal - sud

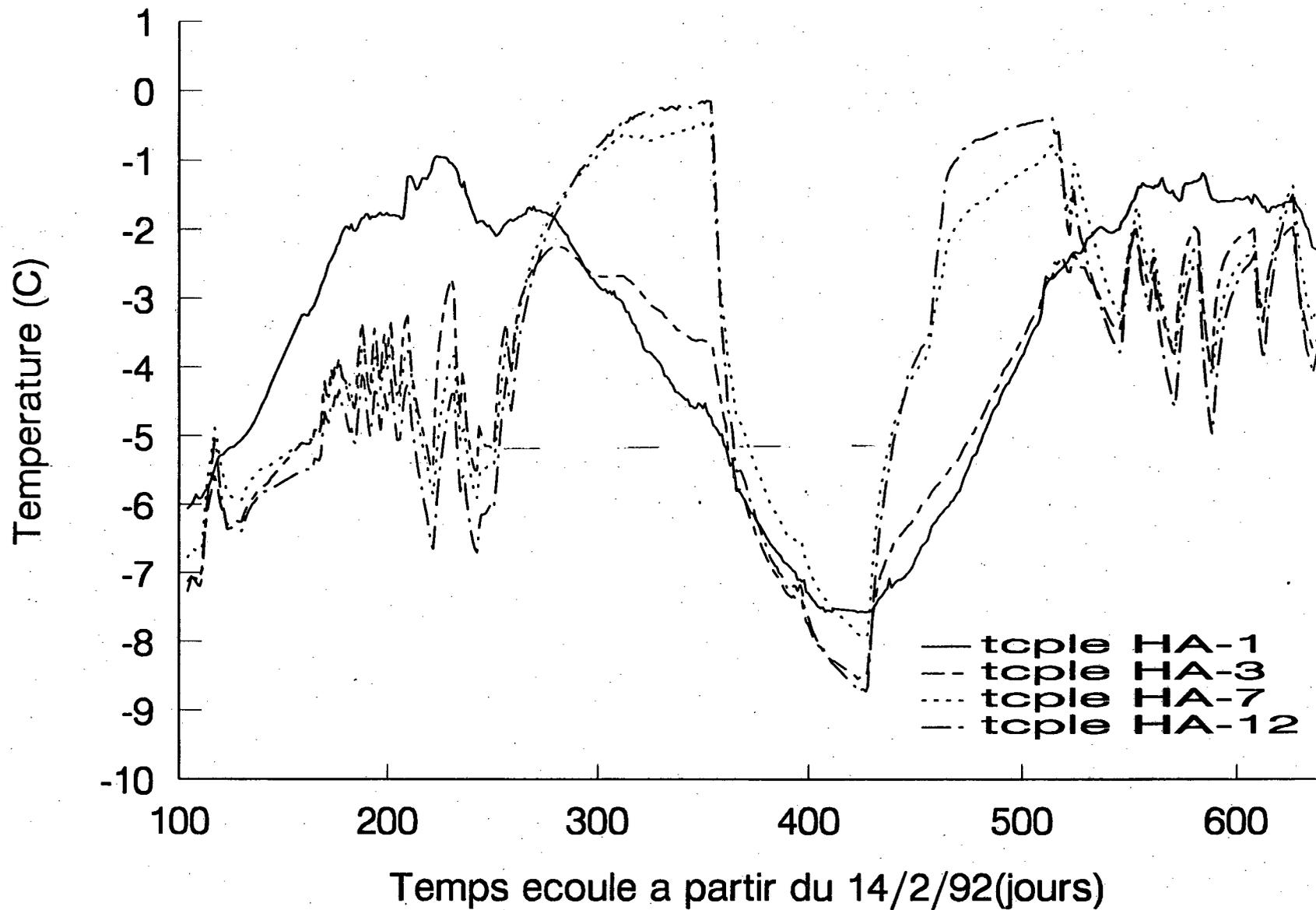


FIGURE 33: Aeroport d'Aupaluk - Abri pour vehicules
 Temperatures: profil horizontal - nord

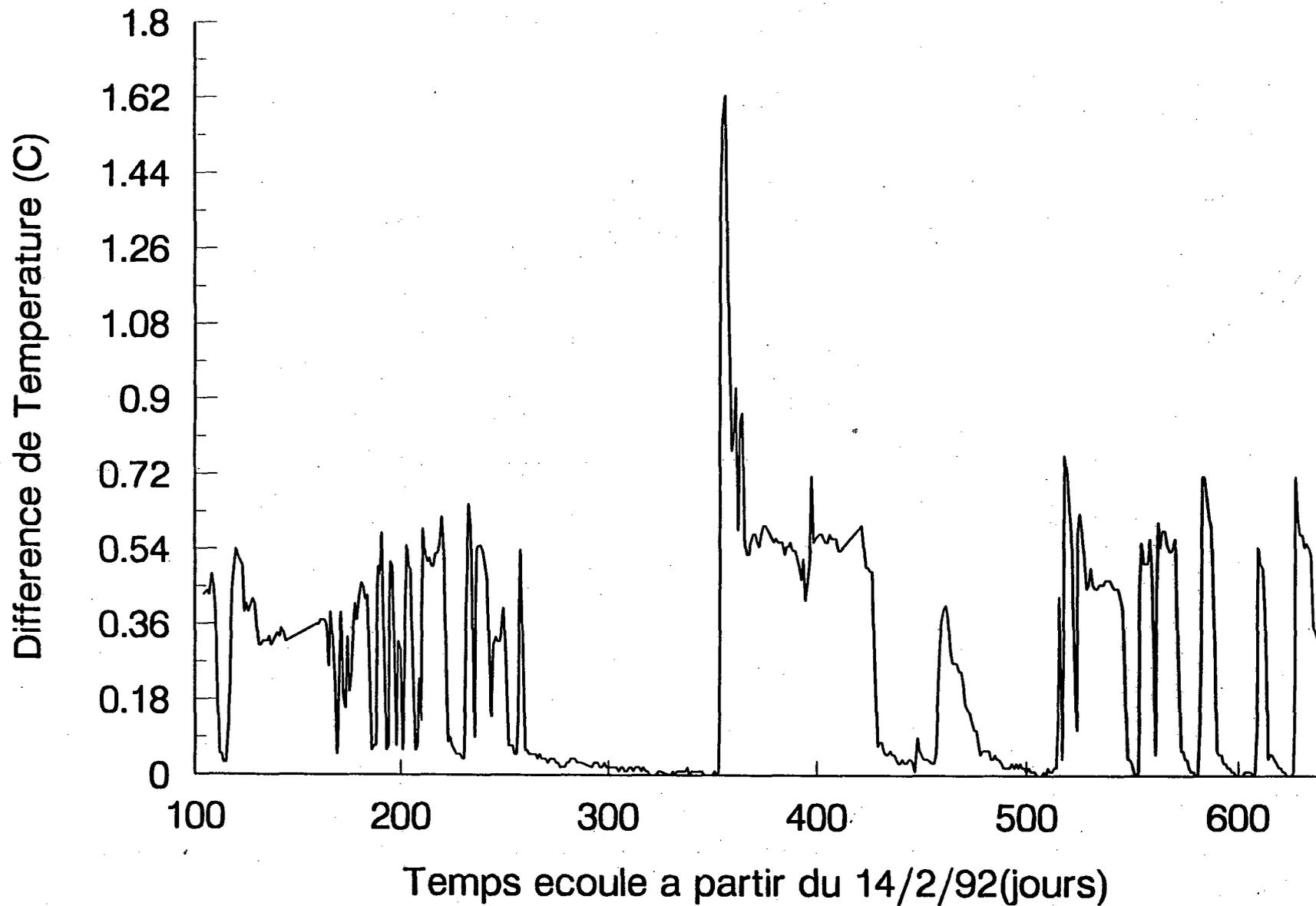


FIGURE 34: Aeroport d'Aupaluk - Abri pour vehicules
Difference de temperature sol-tuyau

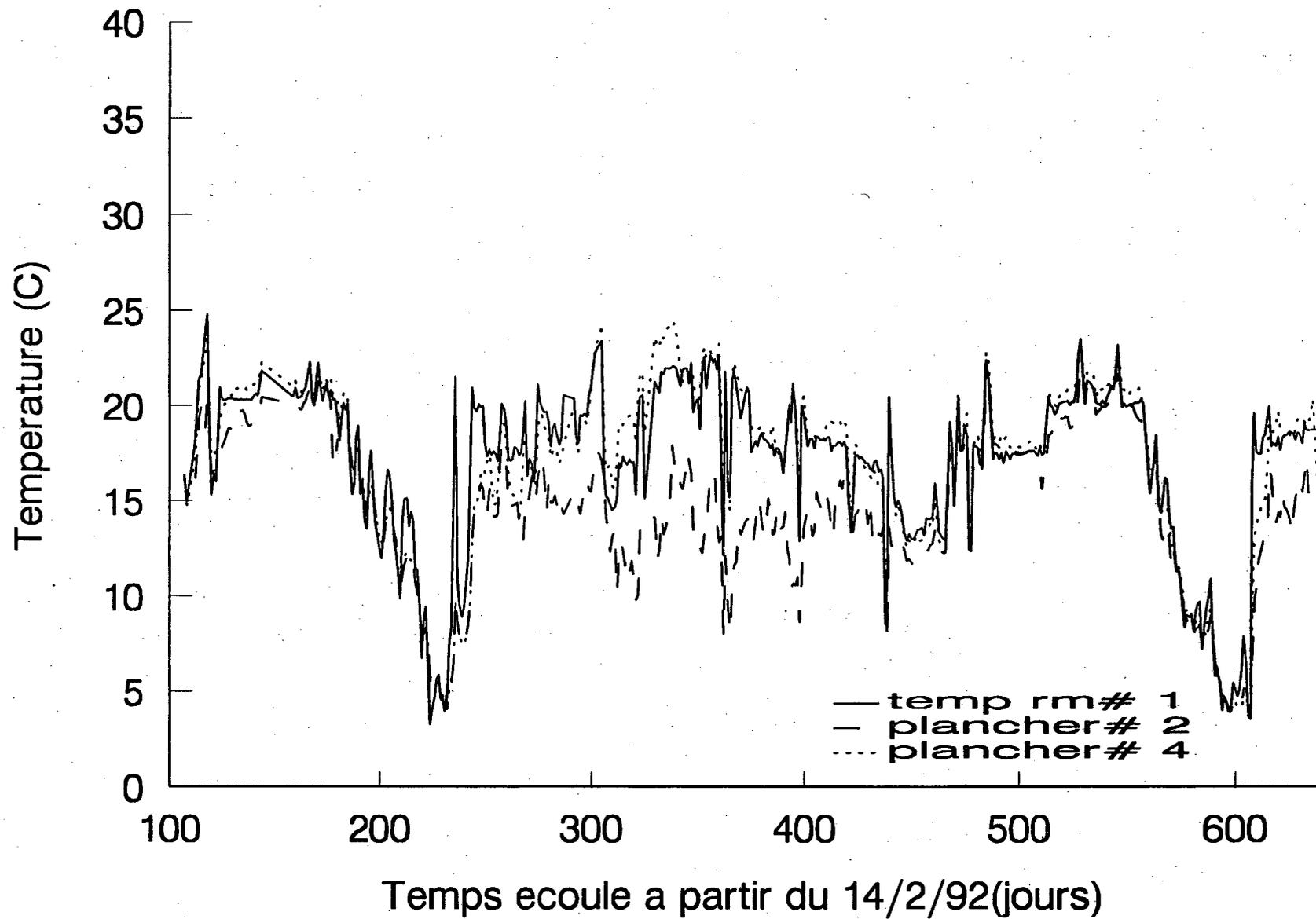


FIGURE 35: Aeroport d'Aupaluk - Abri pour vehicules
Temperature du plancher et de l'air ambiant

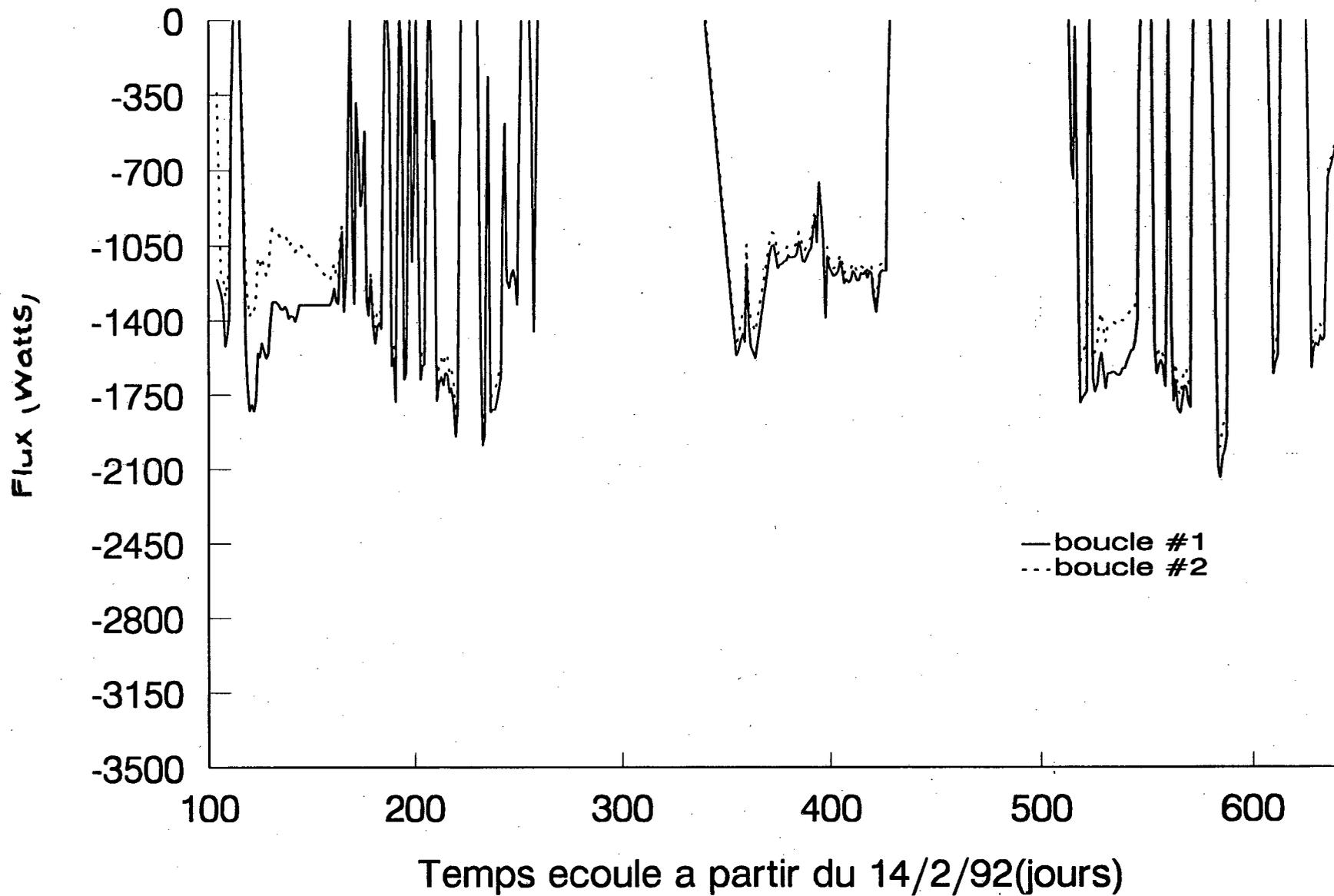


FIGURE 36: Aéroport d'Aupaluk - Abri pour véhicules
Flux de chaleur extraite du sol