

# VARIABILITE SPATIALE ET TEMPORELLE DE LA TEMPERATURE DE SURFACE POUR UN SOL A PROFIL PERIODIQUE

V. Tade<sup>\*</sup>, P. Barillot<sup>\*</sup>, C. Miesch<sup>\*\*</sup> et J.C. Loraud<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>ONERA, Département d'Optique Théorique et Appliquée, BA 701, 13661 Salon Cedex Air, France.

Tel : 04-90-17-01-38, fax : 04-90-17-01-09,

e-mail : Valentina.Tade@onera.fr, Philippe.Barillot@onera.fr

<sup>\*\*</sup> ONERA-CERT, Département d'Optique Théorique et Appliquée, B.P. 4025, 31055 Toulouse Cedex 4.

Tel : 05-62-25-25-25, e-mail : Christophe.Miesch@oncert.fr

<sup>\*\*\*</sup>Polytech' Marseille, Département de Mécanique Energétique, UMR CNRS 6595,

Technopôle de Château-Gombert, 5 rue E. Fermi, 13453 Marseille France.

Tel : 04-91-10-69-31, e-mail : Jean-Claude.Loraud@polytech.univ-mrs.fr

## RESUME

Pour la simulation de vision de nuit, notamment dans le domaine militaire, des simulateurs infrarouges sont utilisés. Afin d'en améliorer le réalisme, leur résolution spatiale doit être augmentée. Cependant le signal réel issu d'une surface subit de fortes variations, en particulier pour des surfaces à profils périodiques ; à haute résolution, la modélisation de ce signal est difficile et coûteuse en temps de calcul. Une des solutions est l'utilisation de textures, représentatives de reliefs. L'objet de cette étude expérimentale est la variabilité spatiale et temporelle de la température de surface pour un sol dont le profil est périodique : notre but est de comprendre les phénomènes prédominants, pour développer de modèles simples permettant le calcul rapide du champ de température de surface.

La présente étude a consisté dans le dimensionnement d'une maquette à profil sinusoïdal, de dimensions réduites, en plâtre recouvert de peinture noire à forte émissivité, et en la réalisation de mesures de températures à la surface de celle-ci, grâce à des thermocouples noyés dans la masse. Les mesures ont eu lieu en Août, Septembre et Octobre 2002 à Salon-de-Provence, France. Les résultats font apparaître le déplacement du maximum de température de la face Est à la face Ouest au cours de la journée ; ils montrent également que l'heure du maximum de contraste avoisine 10h30 et qu'autour de 18h celui-ci est quasiment nul. Les résultats mettent aussi en évidence un "phénomène de cavité" durant la nuit. Enfin, par temps variable, des chutes de températures notables sont constatées sur toute la surface lorsque le rayonnement incident subit de fortes variations. Il sera intéressant dans la suite d'utiliser ces mesures comme une large banque de données, permettant le développement de modèles qui permettront, par exemple à partir d'une température moyenne, de calculer une texture de températures de surface.

**Mots clés :** température, variabilité spatiale, variabilité temporelle, sol périodique, texture thermique.

## 1 INTRODUCTION

Avec les progrès des simulateurs infrarouges, servant notamment dans le domaine militaire pour la simulation de vision de nuit pour les chars ou la simulation de vol, des scènes complexes peuvent maintenant être simulées. Afin d'améliorer ces simulateurs, des textures sont souvent utilisées, représentatives d'un relief ou de toute autre réalité physique. Mais dans le cas des sols à profils périodiques (de type sillons de labour) aucun modèle n'est actuellement satisfaisant. En effet, à résolution spatiale fine, le signal issu d'une surface varie beaucoup, rendant la modélisation de la température de surface difficile, alors que cette donnée est essentielle pour toute modélisation dans l'infrarouge. Afin de développer des modèles simples permettant le calcul rapide du champ de température de surface à injecter dans les simulateurs, il est indispensable de comprendre les phénomènes physiques entrant en jeu dans la variabilité spatiale de la température des sols.

Walczac et Usowicz [1], Vauclin et al. [2], Pierson et Wight [3] et Davidoff et al. [4] [5] ont effectué des mesures dans des champs cultivés et/ou nus et apportent des ordres de grandeurs, grâce aux géostatistiques, à cette variabilité spatiale et temporelle de la température, selon l'humidité des sols ou le type de culture. Shaw et Buchele [6] ont effectué des mesures de températures pour un sol à crête et sillon mais à 7.6cm de profondeur et non à la surface, et Burrows [7] des mesures de températures sur des sols nus et cultivés à différentes profondeurs, mais ne présente que des résultats à 10 cm de profondeur. Mahrer [8] a réalisé une étude théorique de l'effet de la forme du sol (crête, sillon, ou sol plat) sur sa température avec validation expérimentale, mais les effets de convection au niveau du sol sont trop sophistiqués, et le rayonnement est trop simplifié, ce qui ne convient pas pour l'application dans l'infrarouge.

Notre démarche a par conséquent consisté à vouloir approfondir la compréhension des phénomènes conduisant à une forte variabilité de température en surface. Nous avons donc mis en place une campagne expérimentale et réalisé des mesures de température de surface, sur une maquette de dimensions réduites. Ces résultats, à comparer avec ceux des auteurs cités, servent de base pour analyser les phénomènes existants et les facteurs prédominants, et constitueront par la suite une banque de mesures de validation pour le développement de modèles de températures de surface de sols. Dans la suite sont présentés le dimensionnement de la maquette et le plan de la campagne d'essais ainsi que le dispositif expérimental. Puis les principaux résultats sont exposés et analysés.

## 2 MATERIELS ET METHODES

Afin de conduire à des mesures de températures sur une surface à profil périodique, sont présentés ici le dimensionnement de la maquette et le dispositif expérimental mis en place. Afin de maîtriser le plus possible l'environnement des mesures, la maquette est de dimensions réduites par rapport à un environnement de champ labouré ; de plus, les simulations et les mesures sont conduites en environnement extérieur.

### 2.1. Dimensionnement de l'expérimentation

L'objectif du dimensionnement de la maquette est d'une part d'obtenir des différences de températures facilement mesurables, donc les plus élevées possibles, et d'autre part d'avoir une mise en œuvre "facile" de cette expérimentation. Les paramètres étudiés pour la maquette sont la géométrie et la forme du profil, les conditions aux limites des faces, l'orientation cardinale, et le matériau. Cette étude a été réalisée avec le code thermique 3D MISTRAL [9] : avec un pas de temps de 15 minutes on effectue une simulation sur 48h de temps physique (environ 8h de calcul) de façon à atteindre la convergence souhaitée sur les températures. Il faut d'autre part faire des choix quant à l'instrumentation de la maquette.

Afin de limiter les effets de bord, les faces latérales de la maquette seront isolées. Pour la face inférieure, les simulations montrent que la laisser à l'air libre conduit à des écarts de température plus importants en surface que si elle était isolée, c'est donc la solution retenue. Les simulations pour différentes émissivités de surface révèlent des différences de températures maximales croissantes avec l'émissivité ; il faudra par conséquent recouvrir la surface de la maquette avec une peinture noire dont l'émissivité soit la plus proche possible de l'unité. Deux orientations pour les crêtes ont été testées : Est-Ouest et Nord-Sud. Cette dernière a l'avantage d'ombrer les faces Ouest le matin et les faces Est l'après-midi, augmentant ainsi les différences de températures maximales.

Concernant la forme du profil, deux types de géométries ont été testés : sinusoïdal et triangulaire. Pour ce qui concerne les dimensions, le point de départ est une tôle ondulée de type construction, de période 177 mm et d'amplitude 51 mm.. Les simulations ont montré que les différences de températures maximales, de l'ordre de 12°C dans le cas du profil triangulaire, sont au maximum supérieures de 2°C à celles dans le cas du profil sinusoïdal. Cet écart n'étant pas très important, nous avons opté pour le profil sinusoïdal, afin de faciliter la réalisation de la maquette. De plus, trois périodes sont suffisantes pour réduire les effets de bord.

Enfin, quatre matériaux ont été testés : du polystyrène, du bois, du plâtre et de la résine PEEK. Ceux donnant les meilleurs écarts de températures sont la résine et le plâtre, avec un léger avantage pour ce dernier. Le plâtre a par conséquent été choisi, tant pour ses propriétés thermiques que pour sa facilité de mise en œuvre.

Le choix de ce matériau a orienté celui de l'instrumentation de la maquette vers des thermocouples de type K, bien adaptés aux types de mesures et aux gammes de températures désirés.

### 2.2. Dispositif expérimental

Les mesures ont eu lieu sur la Base Aérienne 701 de Salon-de-Provence, France, les 29 et 30/08/2002, du 10 au 12/09/2002 et du 30/09/2002 au 3/10/2002. Conformément au dimensionnement présenté précédemment, la maquette est réalisée en plâtre. La variété choisie est du plâtre de moulage Lafarge Prestia. Sa densité est de 1,15 kg/litre, sa conductivité de 0,58 W/m<sup>2</sup> et sa capacité calorifique de 1,072 kJ/kg.K.

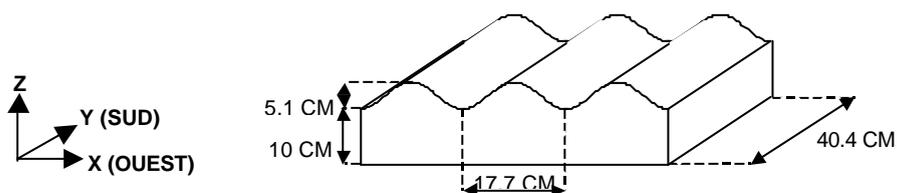
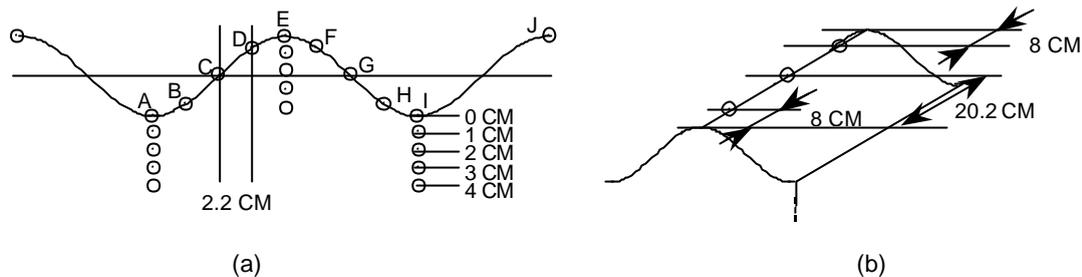


Figure 1 : Géométrie et orientation de la maquette

La maquette est réalisée aux dimensions illustrées sur la Figure 1. Les thermocouples sont placés dans la maquette suivant le schéma de la Figure 2, placés dans le moule puis noyés dans la masse lors du moulage. Après séchage en étuve à 45°C durant une dizaine de jours, la maquette est peinte avec de la peinture technique noire mate Julien®. Ses faces latérales sont recouvertes d'isolant thermique de 80 mm d'épaisseur ; les crêtes sont orientées Nord-Sud, et la maquette est placée sur des tréteaux à 75 cm du sol.

Les températures de la maquette sont recueillies grâce à une station d'acquisition 32 voies. Enfin, une station météorologique compacte permet de recueillir chaque minute les mesures instantanées de la température et de l'humidité de l'air, de la vitesse et de la direction du vent ainsi que du rayonnement global. Un panneau solaire recharge une batterie, qui alimente en 12V le PC responsable de l'enregistrement des mesures.



**Figure 2** : Emplacement des thermocouples dans la maquette

### 3 RESULTATS ET ANALYSES

Dans cette section sont présentées les mesures résultant principalement de la campagne d'Octobre 2002, celle-ci ayant disposé des conditions météorologiques les plus stables (voir Figure 3). Puis des mesures conduites en Août 2002 et en Septembre 2002 sont également présentées, à titre de comparaison entre différents états du ciel. Enfin, ces résultats sont analysés.

#### 3.1. Résultats

Sur la Figure 3 sont représentées les conditions météorologiques du 1<sup>er</sup> Octobre 2002 sur le lieu des mesures, montrant l'évolution au cours de cette journée de la température de l'air et du rayonnement solaire global. La température de l'air commence à croître dès le lever du soleil, vers 7h30, et au même moment le rayonnement global commence à avoir des valeurs positives. La température de l'air augmente avec une forte pente jusqu'à 11h, puis reste sur un palier jusqu'à 16h avant d'amorcer sa descente ; parallèlement, le rayonnement global possède un palier entre 12h et 14h, et l'on voit très nettement le soleil se coucher à 19h.

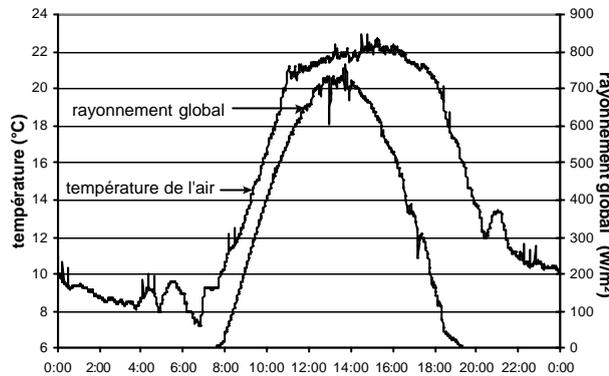
Sur la Figure 5, on voit sur le profil de la crête centrale de la maquette que la température de surface sur la face Est augmente avec l'heure, principalement sur les points C et D (Figure 2 (a)), à raison de 12°C entre 8h30 et 9h30. Le maximum de contraste se trouve entre les points C et H à 10h30 (Figure 6) : 16°C. Durant la matinée et le début d'après-midi, les températures s'élèvent, révélant un contraste de 18°C, toujours entre les points C et H, à 11h. Le contraste maximal diminue autour du midi solaire : il est de 6°C à 13h entre les points D et G, et de 3°C à 14h, entre les points C et E.

On constate également sur les figures 7 et 8 que le lieu des maxima de températures change progressivement de face : le soleil chauffe surtout la face Ouest et les contrastes se creusent à nouveau, atteignant 12°C à 16h30 entre les points C et G. A partir de cette heure, les températures chutent, ainsi que les contrastes, ces derniers atteignant leur minimum de la journée à 18h30, puisqu'on voit sur la Figure 8 qu'on a un écart maximum de 1°C sur tout le profil entre les points C et D.

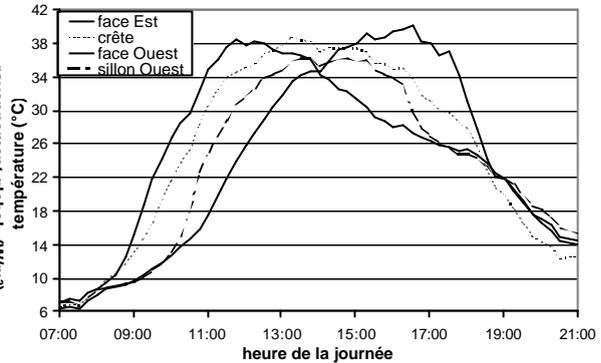
A partir du crépuscule, les contrastes réaugmentent légèrement, avec les minima non plus dans les sillons comme durant la journée, mais à la crête. Ils atteignent 3.5°C à 22h.

Le changement de la face où se trouve le maximum de température, illustré des figures 5 à 9, est également bien mis en évidence sur la Figure 4, qui expose l'évolution diurne des points C, E, G et I. On peut y voir en effet que le point C est chauffé plus tôt dans la journée, puis vient le tour de la crête au point E, puis le sillon au point I, et enfin la face ouest, avec le point G. A partir de midi, la température au point C initie sa décroissance, alors que les points E, G et I continuent à être chauffés. La crête (point E) amorce son refroidissement vers midi, et le sillon (point J) vers 15h mais leurs températures ont des allures similaires. Le point G (face Ouest) atteint son maximum de température peu avant 17h puis celle-ci décroît, de façon beaucoup plus abrupte que celle des

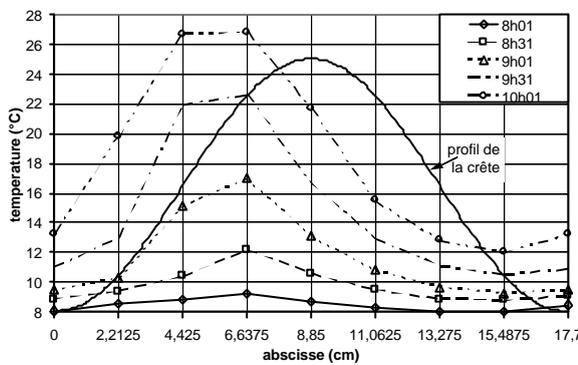
autres points. Sur cette figure sont également mises en évidence les heures de contrastes forts (autour de 11h et de 16h) et faibles (14h et 18h30). On peut noter enfin que les maxima de températures se trouvent sur la face Ouest (point G), durant l'après-midi.



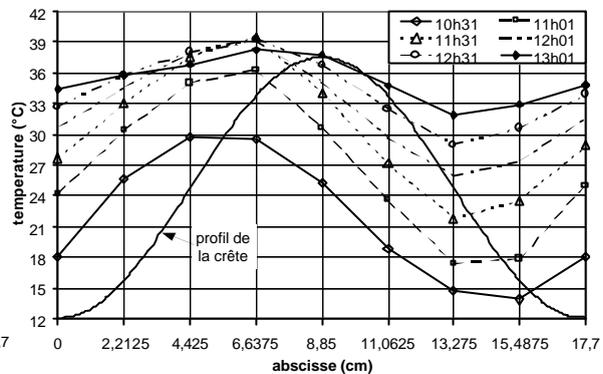
**Figure 3 :** Conditions météorologiques du 1<sup>er</sup> Octobre 2002 à Salon-de-Provence



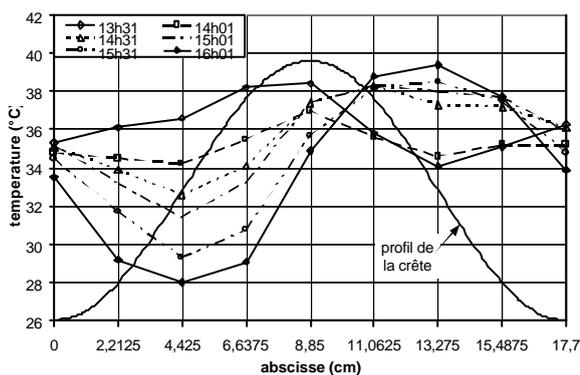
**Figure 4 :** Températures de surface aux points C, E, G et I, 1<sup>er</sup> Octobre 2002



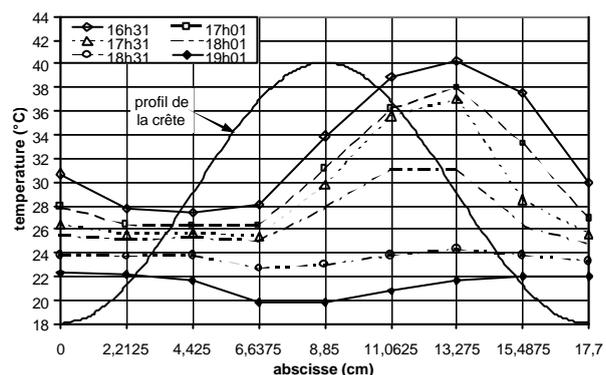
**Figure 5 :** Températures de surface sur le profil, matin, 1<sup>er</sup> Octobre 2002



**Figure 6 :** Températures de surface sur le profil, fin de matinée, 1<sup>er</sup> Octobre 2002



**Figure 7 :** Températures de surface sur le profil, après-midi, 1<sup>er</sup> Octobre 2002



**Figure 8 :** Températures de surface sur le profil, soirée, 1<sup>er</sup> Octobre 2002

En Août (figures 10 et 11), les températures sont plus élevées et les contrastes plus marqués, puisque le contraste maximal de la journée est de 19°C, entre les points D et H, à 10h30. Néanmoins, on retrouve exactement les mêmes allures de courbes au cours de la journée, excepté aux heures de lever et de coucher du soleil, qui sont différentes à cette époque de l'année. Le changement de face a lieu, comme pour la campagne d'Octobre, autour de 14h.

En ce qui concerne la campagne de mesures du 11/09/2002, on peut voir sur la Figure 12 que les mêmes phénomènes que précédemment s'y produisent : la température s'élève d'abord sur la face Est (point C), puis progressivement avec la courbe du soleil les températures maximales se déplacent du point C vers le point E, puis le point I, et enfin sur la face Ouest, sur le point G. Le maximum de contraste se trouve encore une fois autour de 10h30, atteignant 14°C entre les points D et H (Figure 13).

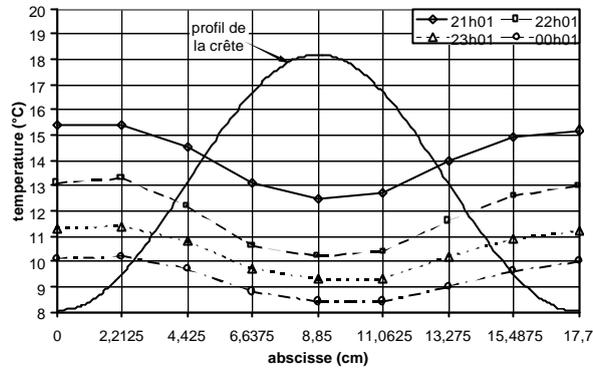


Figure 9 : Températures de surface sur le profil, nuit, 1<sup>er</sup> Octobre 2002

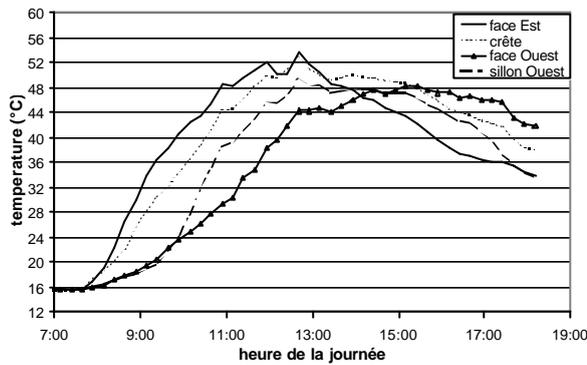


Figure 10 : Températures de surface aux points C, E, G et I, 30/08/2002

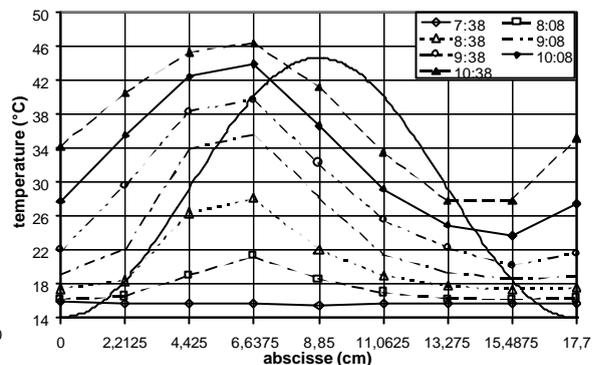


Figure 11 : Températures de surface sur le profil, matin, 30/08/2002

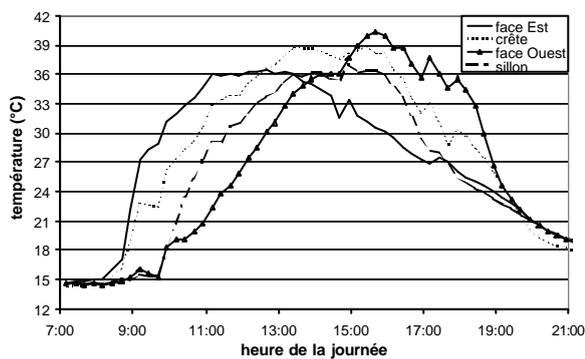


Figure 12 : Températures de surface aux points C, E, G et I, 11/09/2002

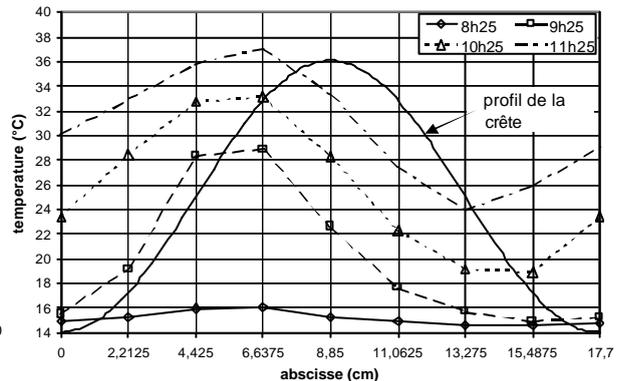
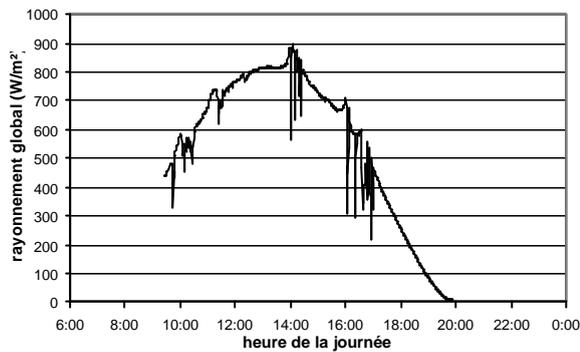


Figure 13 : Températures de surface sur le profil, matin, 11/09/02

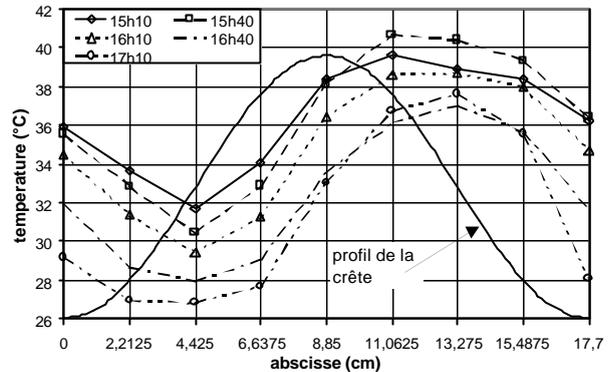
Au vu des figures 12 et 14, une remarque intéressante peut être faite entre 15h30 et 17h30 : on voit sur la Figure 14 que dans ce laps de temps le rayonnement est fortement perturbé du fait de passages nuageux. Ces brusques

changements ont un effet notable sur la température de surface de la maquette, puisqu'on voit sur la Figure 12 que la température des quatre points (C, E, G et I) connaît des variations inhabituelles.

Notons également que ces variations sont les plus importantes au point G, point dont la température est la plus élevée à ce moment de la journée. La Figure 15 montre également le résultat de ces passages nuageux sur tout le profil : au lieu d'être chronologiquement décalées comme en Août ou en Octobre, les courbes entre 15h10 et 17h10 se croisent. Ce phénomène se retrouve lors des jours de fort Mistral. De plus, au vu de la période de l'année à laquelle ont été effectuées ces mesures, on constate, lors de ces passages nuageux, que les températures chutent globalement sur tout le profil, et se retrouvent inférieures à celles du 1<sup>er</sup> Octobre.



**Figure 14 :** Rayonnement solaire global pour la journée du 11/09/2002



**Figure 15 :** Températures de surface sur le profil, après-midi, 11/09/02

### 3.2. Analyse

Pour les trois campagnes de mesures exposées dans la section précédente, on note des écarts de température importants entre le jour et la nuit, décroissants selon la période de l'année : ils sont de 40 °C en Août, 34 °C en Septembre et 31 °C début Octobre, les températures maximales atteignant 55°C en Août, 45°C en Septembre et 38°C en Octobre. Durant la journée, la température s'élève en premier lieu sur le flanc Est de la crête (point C sur la Figure 2 (a)), puis ce maximum se déplace sur la crête au midi solaire ; il se déplace sur le flanc Ouest au cours de l'après-midi (point G) alors que les trois autres points ont amorcé leur refroidissement depuis 15h.

Les contrastes maximum et minimum se retrouvent à la même heure quelle que soit la période de l'année : ils sont d'environ 1°C avant le lever du soleil, atteignent un maximum de 14 à 19°C autour de 10h30. Ils se réduisent autour du midi solaire (entre 11h et 15h) puis réaugmentent jusqu'à 17h. C'est autour de 18h30 qu'ils sont les moins élevés : moins de 2°C. Durant la nuit, les températures de surface baissent sur toute la maquette, de 2,5°C à 1°C par heure. Les contrastes s'amenuisent, passant de 3°C à 23h à moins de 1°C à 7h, et pendant la période nocturne, les températures minimales sont enregistrées aux crêtes, et non à proximité des sillons comme durant la journée. Ce phénomène de cavité peut être expliqué par le fait que le point E, au sommet de la crête, a au-dessous de lui beaucoup moins de matière que le point J, et donc évacue beaucoup plus d'énergie.

Lors de passages nuageux, on constate une forte baisse des températures sur toute la surface (de l'ordre de 5°C), et les contrastes se réduisent. On peut donc en conclure une forte influence du rayonnement solaire car, dès que celui-ci n'est plus constant ou uniforme, les températures réagissent rapidement à la baisse.

Des mesures le long de la crête Ouest (Figure 2 (b)) ont montré très peu de différence (1,5°C au maximum) entre les trois points, ce qui montre que les phénomènes se produisent essentiellement en deux dimensions : dans les directions  $y$ , perpendiculaire aux sillons, et  $z$ , suivant la verticale (Figure 1). Cependant, par vent fort ces températures ne sont plus uniformes, et les transferts de chaleur s'effectuent donc dans les trois directions ; la présence de l'isolant sur les parois latérales de la maquette apparaît par conséquent comme inefficace pour limiter les transferts de chaleur à deux directions ( $x$  et  $z$ ) en présence de vent fort.

Les contrastes constatés lors des trois campagnes de mesure d'Août, Septembre et Octobre 2002 deviennent élevés dès lors que le rayonnement solaire atteint la maquette : par temps nuageux, ou de fort Mistral, les températures de surface baissent sensiblement, et les contrastes s'amenuisent jusqu'à 30%. Ces campagnes de mesures mettent donc en évidence une forte variabilité en température, aussi bien spatiale que temporelle, au cours de tout le cycle diurne, et cette variabilité semble s'effectuer en deux dimensions et être principalement reliée au rayonnement solaire atteignant la surface.

## 4 CONCLUSION

Afin de mieux comprendre les phénomènes en jeu dans la variabilité de la température surfacique d'un sol à profil périodique, une campagne expérimentale est montée et réalisée. Elle consiste en la mesure par thermocouples de la température de surface d'une maquette en plâtre peinte en noir, dont la surface possède un profil sinusoïdal. Les mesures ont notamment mis en évidence le déplacement du maximum de température de la face Est vers la face Ouest au cours de la journée. Nous avons pu également constater que l'heure du maximum de contraste avoisine 10h30 alors qu'autour de 18h celui-ci est quasiment nul.

Par ailleurs, un phénomène de cavité au pu être mis en évidence durant la nuit, expliqué en partie par la quantité différente de matière au-dessous de la crête et au-dessous du sillon. Enfin, par temps variable, des chutes de température notables se produisent sur toute la surface lorsque le rayonnement solaire incident subit de fortes variations. Ce dernier semble être le facteur prédominant influençant la température de surface.

Toutes ces mesures sont susceptibles d'alimenter une large banque de données permettant le développement futur d'un modèle simple qui permettra, par exemple à partir d'une température moyenne, de calculer les températures de surface en vue de mettre en évidence une "texture thermique".

## REFERENCES

[1] Walczac R. and Usowicz B., "*Variability of moisture, temperature and thermal properties in bare soil and in crop field*", International Agrophysics 8 (1994) pp.161-168

[2] Vauclin M., Vieira S. R., Bernard R. and Hatfield J.L., "*Spatial variability of surface temperature along two transects of a bare soil*", Water Resource Research 18 (1982), pp.1677-1686

[3] Pierson F.B. and Wight J.R., "*Variability of near-surface soil temperature on sagebrush rangeland*", Journal of Range Management 44 (1991) pp.491-497

[4] Davidoff B., Lewis J.W. and Selim H.M., "*Variability of soil temperature with depth along a transect*", Soil Science 142 (1986), pp.114-123

[5] Davidoff B. and Selim H.M., "*Correlation between spatially variable soil moisture content and soil temperature*", Soil Science 145 (1988), pp.1-10

[6] Shaw R.H. and Buchele W.F., "*The effect of the shape of the soil surface profile on soil temperature and moisture*", Iowa State College Journal of Science 32 (1957), pp.95-104

[7] Burrows W.C., "*Characterization of soil temperature distribution from various tillage-induced microreliefs*", Soil Science Proceedings 27 (1963), pp.350-353

[8] Mahrer Y., "*A theoretical study of the effect of soil surface shape upon the soil temperature profile*", Soil Science 134 (1982), pp.381-387

[9] Barillot P. "*Modélisation des fonds terrestres en infrarouge : architecture logiciel du code MISTRAL, développement 1D et 2D du module thermique TESOS*", Office National d'Etudes et Recherches Aérospatiales RTS 6/4645 PYS (1995)