

Analyse et modélisation des transferts thermiques dans un sol de vignoble. Effets des techniques culturales.

E. PRADEL, P. PIERI

*Laboratoires de Bioclimatologie et d'Agronomie
Domaine de la Grande Ferrade
33883 Villenave D'Ornon*

INTRODUCTION

Les facteurs naturels tels que le milieu dans lequel est cultivée la vigne jouent un rôle important sur la qualité du vin. Si on veut élaborer un bon vin, il est en effet essentiel de produire un raisin de qualité. Pour cela, il faut valoriser et optimiser l'effet terroir qui, pour l'instant, joue un rôle qui n'est pas très bien connu. Il est donc indispensable, par exemple, de disposer de relations scientifiquement établies et bien quantifiables pour faire admettre le système des aires d'origines contrôlées. R. Morlat (1989) et G. Seguin (1970) ont déjà réalisé des études sur le rôle de certains facteurs du sol sur la qualité du raisin. Ils ont notamment montré l'importance de la température du sol et du contenu en eau. Les relations entre la qualité et le terroir doivent cependant encore être clarifiées et surtout quantifiées afin d'être intégrées dans un système d'aide à la décision permettant d'optimiser les systèmes de conduite en fonction des facteurs naturels du site étudié.

Nous avons choisi, dans un premier temps, de nous intéresser principalement aux températures du sol. Ce facteur est en effet très important car il conditionne la croissance de la plante et certaines propriétés physiques du sol. La plupart de ces processus ne réagissent pas linéairement avec la température, il est donc indispensable de disposer de nombreuses données pour pouvoir évaluer les effets journaliers des températures du sol sur ces mécanismes. La mesure de la température du sol pose de gros problèmes car elle nécessite un dispositif qui est très lourd au niveau de l'installation, surtout dans les sols de vignoble, généralement hétérogènes. De plus, la mise en place des capteurs perturbe le milieu introduisant ainsi un biais dans les grandeurs qui seront mesurées.

C'est pour ces raisons que nous avons choisi de développer un modèle de transfert thermique applicable aux sols de vignobles. L'utilisation de lois physiques décrivant les échanges et des méthodes d'analyse et de modélisation micrométéorologiques paraissent aptes à apporter des réponses au problème posé par la recherche des facteurs jouant un rôle dans la qualité du raisin. Il en est de même pour l'explication des effets de différentes méthodes culturales (désherbage, travail du sol, enherbement).

Il est bien évident qu'il existe d'autres facteurs influant sur la qualité du raisin qui peuvent aussi caractériser l'effet "terroir". Par exemple, la nutrition azotée et minérale de la plante joue aussi un rôle important, il est donc nécessaire d'étudier la disponibilité de ces éléments dans le sol, ainsi que leurs modes de transfert. De même, le climat de la région concernée est capital, il influe sur la plupart des grandeurs qui sont étudiées. Ces facteurs sont donc, dans un premier temps, étudiés séparément, l'objectif étant à terme la construction d'un modèle complet de l'élaboration de la qualité du raisin, où sont inclus tous les paramètres du climat, du terroir et du système de conduite.

Les transferts thermiques et hydriques sont étroitement liés, ils interagissent, on peut donc difficilement envisager des études séparées de ces deux phénomènes. On peut cependant considérer, du moins dans un premier temps, l'état hydrique comme une variable d'entrée.

Le but de l'étude entreprise est donc de comprendre et de quantifier les effets de différents types ou états de sols et de différents mode de culture sur l'évolution de la température en profondeur. Pour cela, une

bonne connaissance physique des transferts thermiques est nécessaire pour arriver à relier les caractéristiques thermodynamiques du sol à la propagation et au stockage de la chaleur.

THEORIE DU MODELE

Beaucoup de modèles de transfert thermique dans le sol ont été développés en utilisant des équations à une seule dimension. Ces modèles classiques décrivent très bien les phénomènes de transfert de chaleur dans le sol nu ou recouverts d'une végétation homogène. La vigne n'entre pas dans ce cadre car dans la majorité des cas un système de conduite en rangs est adopté.

L'alternance de zones d'ombre et de soleil provoque une hétérogénéité énergétique spatiale au niveau de la surface du sol. On ne peut donc pas utiliser des équations monodimensionnelles. Par contre, on considère que les flux de chaleur dans le sol, dans les directions parallèles aux rangs sont négligeables, ce qui permet de limiter l'étude à l'utilisation de deux dimensions.

L'équation utilisée dans le modèle pour régir les transferts thermiques est :

$$\frac{\partial (c(x,z,t)T(x,z,t))}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(x,z,t) \frac{\partial T(x,z,t)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(x,z,t) \frac{\partial T(x,z,t)}{\partial z} \right)$$

où T est la température, t le temps, z la profondeur (comptée positive vers le bas), x la distance perpendiculaire aux rangs, c la capacité calorifique volumique et λ la conductivité thermique. Ces derniers paramètres ne sont pas supposés constants, ni dans l'espace, ni dans le temps; On peut les faire varier entre chaque résolution, en relation avec les changements d'humidité à chaque position.

La capacité calorifique volumique et la conductivité thermiques sont deux paramètres très importants dans l'étude des transferts thermiques dans le sol, c'est grâce à eux que les caractéristiques physiques du milieu au sein du modèle vont être déterminés. Ils sont dépendants de plusieurs grandeurs intrinsèques au sol telles que l'humidité et la porosité. Cette dépendance implique que dans un modèle réaliste ils ne puissent pas être constants ni dans l'espace ni dans le temps.

La justification d'un effet "terroir" peut être tentée, en partie, grâce à ces deux caractéristiques thermodynamiques du sol. En effet, dans notre cas, ce sont elles qui conditionnent les transferts de chaleur. Elles caractérisent physiquement un type de sol donné et permettent de bien quantifier les différences, au niveau des transferts de la chaleur, entre les sols de zones de production différentes.

Le domaine d'étude choisi correspond à l'intervalle entre deux rangs. Il est divisé en mailles, vingt dans le sens des x et douze dans le sens des z . Chaque cellule est identifiée par un indice, i pour les x et j pour les z . La dimension des mailles en largeur dépend de l'espace des rangs (pour un écartement de 1.3 m, la maille mesure 6.5 cm) et varie de 1 à 25 cm en profondeur.

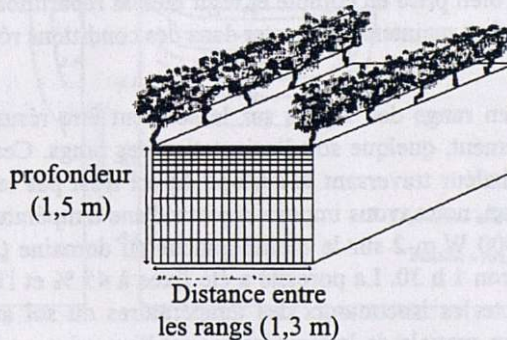


fig. 1 : Représentation du domaine d'étude

Afin de pouvoir résoudre les équations du transfert de la chaleur dans le domaine d'étude considéré, il est indispensable de disposer de quatre conditions aux limites et d'une condition initiale. Des valeurs de températures mesurées à un temps donné, représentant le début de la simulation, sont utilisées comme condition

initiale. A la surface du sol, l'évolution de la température est marquée par l'alternance de zones d'ombre et éclairées directement. Cette condition rend inutilisables les modèles classiques où la température de surface est estimée à l'aide de fonctions sinusoïdales. Une autre démarche a donc été développée en utilisant le bilan d'énergie au niveau de la surface d'échange, il est possible d'estimer le flux entrant dans le sol, c'est cette grandeur que nous utilisons comme condition à la limite supérieure.

Pour la limite inférieure, la profondeur étant de 1.5 m, on admet l'hypothèse de flux nul. Ceci revient à considérer que les températures de la dernière maille sont les mêmes que celles de la maille précédente.

La périodicité de la structure végétale implique que les températures du sol sous les rangs seront identiques quelque soit le rang considéré. On peut donc utiliser le report des températures d'une face latérale sur l'autre comme condition à ces limites.

La résolution de l'équation différentielle du transfert de la chaleur ne peut être faite analytiquement que pour un cas de propagation unidirectionnelle dans un sol homogène, nous ne pouvons donc pas utiliser cette démarche. Nous devons donc avoir recours à une méthode de résolution numérique.

Nous avons choisi la méthode des différences finies qui est bien appropriée à la géométrie du problème et qui reste simple à mettre en oeuvre. Les équations sont discrétisées selon le schéma des directions alternées. Il offre l'avantage de simuler la propagation de la chaleur dans deux directions distinctes et surtout de ne pas être instable. En effet, certaines méthodes de discrétisation imposent des conditions sur la taille des mailles et le temps de calcul entre chaque itération. Si ces conditions ne sont pas respectées, le modèle peut apporter des solutions qui divergent complètement de la réalité. La méthode des directions alternées offre donc une grande liberté quant au choix des dimensions et du pas de temps de résolution du modèle.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Le modèle a été testé dans des conditions simplifiées où l'on a seulement considéré la propagation dans une seule direction et dans un sol homogène. Dans ce cas particulier, qui n'est pas réaliste mais qui permet de tester la validité du code numérique, on peut calculer une solution analytique exacte de l'équation de transfert de la chaleur. Après avoir imposé une température uniforme de 10 °C à tout le domaine, on fixe la température de la surface à une valeur différente de 11 °C. Les écarts constatés entre les températures calculées par le modèle et les solutions exactes sont de l'ordre du centième de degré aussi bien pour la propagation horizontale que verticale.

On peut aussi tester le modèle en calculant l'énergie mise en jeu lors des transferts thermiques de deux façons différents. On calcule tout d'abord l'énergie qui entre au niveau du sol en intégrant le flux de chaleur Q pendant le temps de la simulation sur toute la surface d'échange. Parallèlement on calcule l'énergie qui s'est répartie dans le sol en faisant la différence de température pour chaque maille entre le début et la fin de la simulation. Ces deux termes doivent avoir la même valeur car ils représentent la même énergie qui est entrée par la surface du sol et qui s'est ensuite stockée dans ce sol. La plus grande différence constatée entre ces deux calculs est de 2 Joules sur une énergie totale de $0.3 \cdot 10^6$ Joules.

Les résultats de ces deux tests nous permettent d'affirmer que le modèle fonctionne correctement. L'équation du transfert thermique est bien prise en compte et régit bien la répartition de la température dans une direction et dans un sol homogène. Il faut maintenant le tester dans des conditions réelles. Des tests de sensibilité ont auparavant été réalisés.

L'influence de la structure en rangs des vignes sur le sol peut être résumée à l'alternance de zones d'ombre et de zones éclairées directement, quelque soit l'orientation des rangs. Ces variations de rayonnement incident impliquent que le flux de chaleur traversant la surface du sol n'est pas le même sur tout le domaine d'étude. Afin de simuler cette condition, nous avons imposé, à partir d'une température uniforme arbitraire de 10 °C sur tout le domaine, un flux de $400 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ sur la moitié gauche du domaine ($x < 1 \text{ m}$) et un flux nul sur l'autre moitié ($x \geq 1 \text{ m}$) pendant environ 1 h 30. La porosité a été fixée à 45 % et l'humidité à 20 % afin d'avoir un cas réaliste. La figure 2 représente les isocontours des températures du sol au bout d'un temps de 5000 secondes de simulation. L'organisation spatiale de la température est bien mise en évidence par cette figure, on n'obtient plus une répartition de la température suivant des lignes parallèles comme dans le cas d'une propagation unidirectionnelle. Ceci montre l'influence non négligeable des ombres portées au sol.

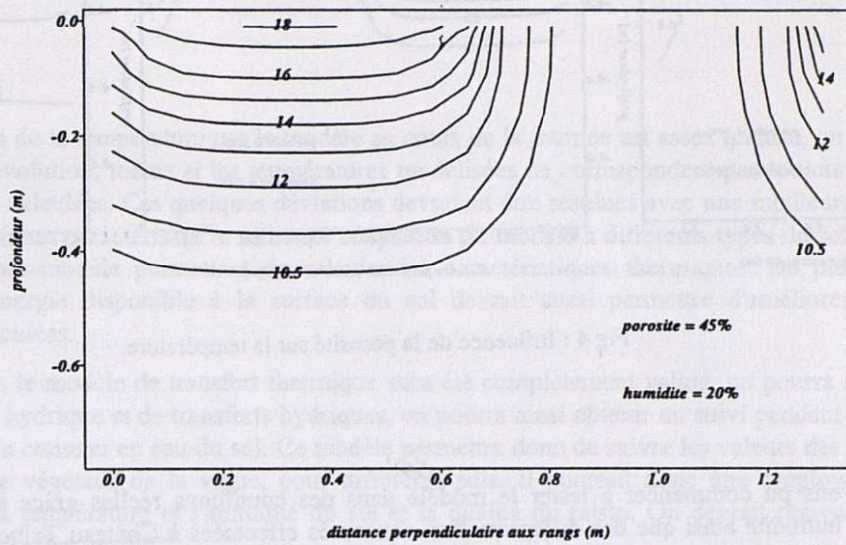


Figure 2 : Influence de l'ombre portée au sol

Nous l'avons vu précédemment, la capacité calorifique volumique et la conductivité thermique sont sensibles aux variations d'humidité et de porosité du sol. Pour mesurer l'influence de ces variations sur les températures du sol, nous avons pris les mêmes conditions que pour la simulation précédente mais en faisant varier l'humidité et la porosité. Nous avons considéré un cas de référence ($p = 30\%$ et $h = 20\%$), pour les autres nous avons reporté les différences de températures par rapport à ce cas de référence, une différence positive indique une température plus forte que le cas de référence. Les résultats ont été reportés sur les figures 3 (variations d'humidité) et 4 (variations de porosité). On remarque tout d'abord que pour les deux paramètres les écarts de température observés sont du même ordre (environ $1\text{ }^{\circ}\text{C}$), par contre, lorsque l'humidité augmente les températures ont tendance à diminuer et inversement pour la porosité. Les amplitudes de variation des températures dues à ces facteurs restent faibles en général mais il faut prendre en compte que le temps de simulation est court ($\approx 1\text{ h }30$). Ce temps a été fixé de façon à avoir une représentation assez réaliste des conditions extrêmes que l'on trouve vers le midi solaire. Si ces différences, aussi minimes soient elles, se reproduisent tous les jours lors d'une simulation sur tout un cycle végétatif, les températures finales calculées par le modèle peuvent faire apparaître des effets significatifs, qui pourraient expliquer les réactions de la vigne (en faisant une somme de degrés jours, par exemple).

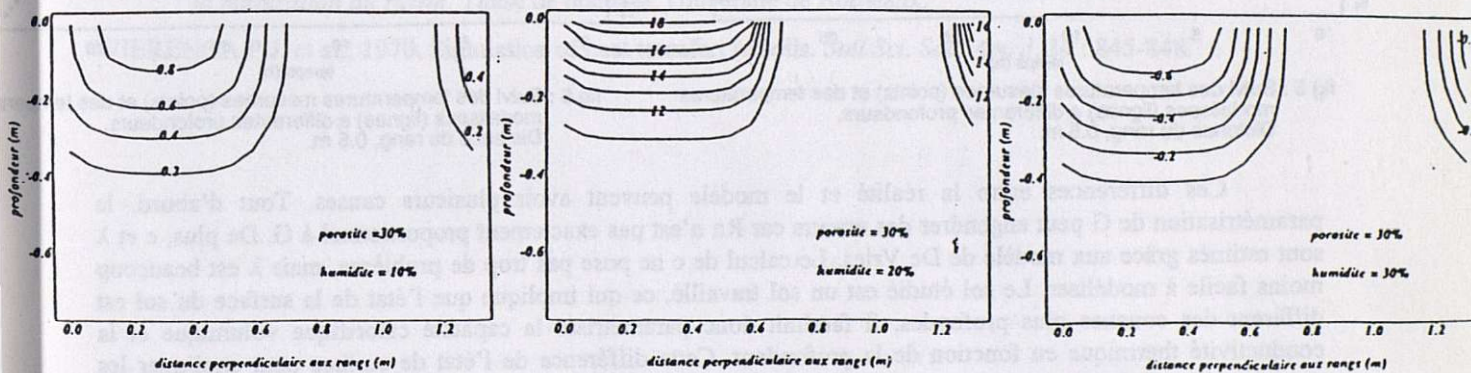


Fig 3 : Influence de l'humidité sur la température.

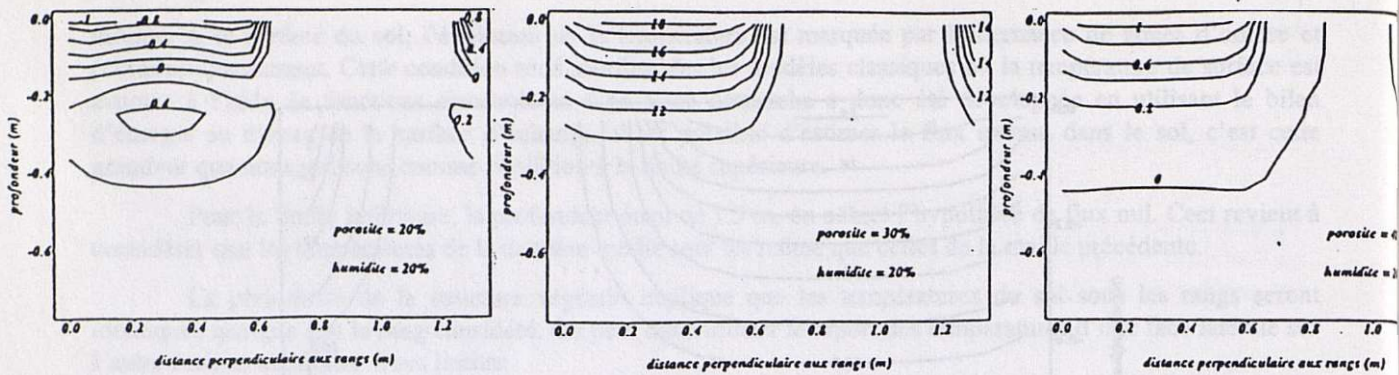


Fig 4 : Influence de la porosité sur la température.

Nous avons pu commencer à tester le modèle dans des conditions réelles grâce à des mesures de température et d'humidité ainsi que des différents flux concernés effectués à Château Talbot dans le Médoc. Les figures 5 et 6 représentent les résultats de simulations sur deux journées et leurs comparaisons avec des températures mesurées. Seules les couches superficielles du sol ont été représentées car, pour des profondeurs plus importantes, les variations de température à l'échelle journalière deviennent négligeables et présentent peu d'importance dans un but de validation du modèle. Ceci ne veut pas dire que ces profondeurs ne sont pas prises en compte par le modèle. Le flux de chaleur par conduction G entrant par la surface du sol n'a pas été mesuré directement, il a été estimé grâce à des mesures du rayonnement net (R_n) au niveau de la surface. L'évolution de la température pendant la journée est assez bien estimée par le modèle. On remarque cependant qu'il a tendance à surestimer les températures, surtout pour la profondeur de 4 cm. En surface, les températures modélisées ont tendance à être sous-estimées au moment où elles sont les plus fortes (aux alentours de 15 h.).

jour 210 simulation sur toute la journée

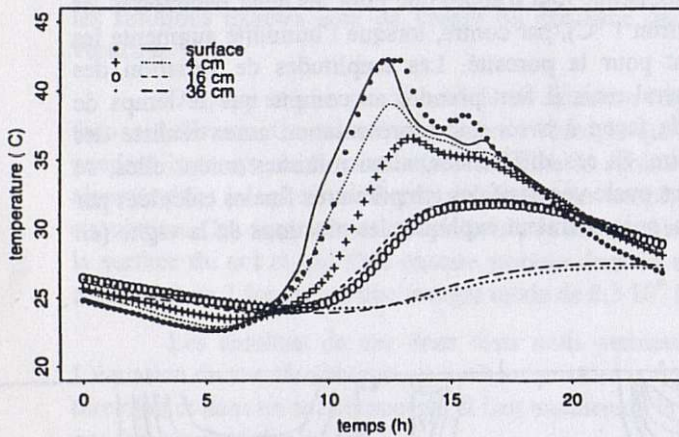


fig 5 : Suivi des températures mesurées (points) et des températures modélisées (lignes) à différentes profondeurs. Distance du rang, 0,5 m.

jour 212 simulation sur toute la journée

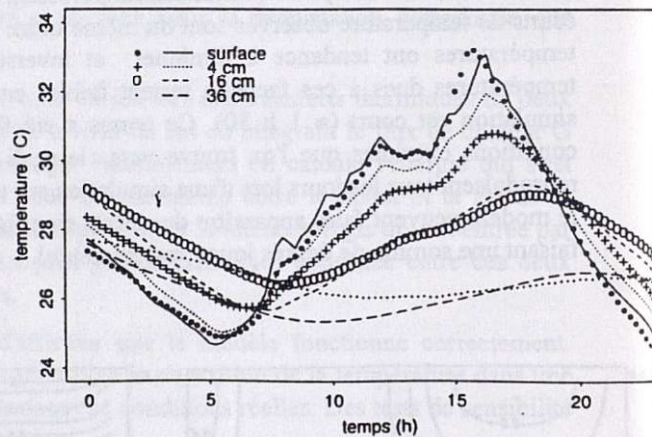


fig 6 : Suivi des températures mesurées (points) et des températures modélisées (lignes) à différentes profondeurs. Distance du rang, 0,5 m.

Ces différences entre la réalité et le modèle peuvent avoir plusieurs causes. Tout d'abord, la paramétrisation de G peut engendrer des erreurs car R_n n'est pas exactement proportionnel à G . De plus, c et λ sont estimés grâce au modèle de De Vries. Le calcul de c ne pose pas trop de problème, mais λ est beaucoup moins facile à modéliser. Le sol étudié est un sol travaillé, ce qui implique que l'état de la surface du sol est différent des couches plus profondes, il faudrait donc paramétrer la capacité calorifique volumique et la conductivité thermique en fonction de la profondeur. Cette différence de l'état de surface peut expliquer les surestimations de la température à la profondeur de 4 cm.

Certains sols de vignobles contiennent une grosse proportion de cailloux, surtout en surface. Ce phénomène n'a pas encore été pris en compte dans le modèle, or la présence de cailloux peut augmenter de façon non négligeable la température. En effet, la diffusivité thermique des cailloux, qui est le rapport entre la conductivité thermique et la capacité calorifique volumique, est plus importante que celle d'un sol. Lorsqu'ils

sont directement exposés au soleil, ils ont tendance à s'échauffer plus vite que le milieu dans lequel ils se trouvent. Ce phénomène pourrait expliquer la tendance du modèle à sous-estimer la température lorsque G est le plus important.

CONCLUSION

Le suivi de la température par le modèle au cours de la journée est assez réaliste, on obtient une bonne estimation de l'évolution, même si les températures modélisées ne correspondent pas toujours exactement avec les températures calculées. Ces quelques déviations devraient être résolues avec une meilleure connaissance des paramètres physiques caractérisant le milieu, l'adaptation du modèle à différents types de sol sera plus facile si on a un bon sous-modèle permettant de calculer les caractéristiques thermiques. De plus, une étude plus complète de l'énergie disponible à la surface du sol devrait aussi permettre d'améliorer la précision des températures calculées.

Lorsque le modèle de transfert thermique aura été complètement validé, on pourra le coupler avec un modèle de bilan hydrique et de transferts hydriques, on pourra ainsi obtenir un suivi pendant toute l'année de la température et du contenu en eau du sol. Ce modèle permettra donc de suivre les valeurs de ces deux variables pendant le cycle végétatif de la vigne, pour différents sols. Il pourrait donc être employé pour établir des relations entre la température et l'humidité du sol et la qualité du raisin. On devrait pouvoir ainsi justifier et mieux quantifier l'effet "terroir".

REFERENCES

- DE VRIES D.A., 1963, *Physics of plant environment*, W.R. van Wijk (ed.), Amsterdam.
- GRAS R., 1994, Sols caillouteux et production végétale, INRA (ed), 175 p.
- HORTON R., WIERRENGA P.J., 1983, Estimating the soil heat flux from observations of soil temperature near the surface, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47, 14-20.
- HORTON R., WIERRENGA P.J., 1984, Observed and predicted two-dimensional soil temperature distribution under a row crop, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48, 1147-1152.
- HORTON R., WIERRENGA P.J., 1984, soil temperature in a row crop with incomplete surface cover, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48, 1225-1232.
- MONTEITH J.L., UNSWORTH M.H., 1990. *Principles of environmental physics*. Edward, Arnold, 291 p.
- MORLAT R., 1989. *Le terroir viticole : contribution à l'étude de sa caractérisation et de son influence sur les vins. Application aux vignobles rouges de la moyenne vallée de la Loire*. Thèse de doctorat. Université de Bordeaux.
- OZIZIK M. Necati, 1980. *Heat conduction*. John Willey & sons (Willey Interscience Publication).
- SEGUIN G., 1970. *Les sols de vignobles du Haut Médoc. Influence sur l'alimentation en eau de la vigne et sur la maturation du raisin*. Thèse de doctorat. Université de Bordeaux.
- WIERRENGA P.J. et al., 1970. Simulation of heat transfert in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 34 : 845-848.