

Vergnienx R. et Delevoie C., éd. (2010),
Actes du Colloque Virtual Retrospect 2009,
Archéovision 4, Editions Ausonius, Bordeaux

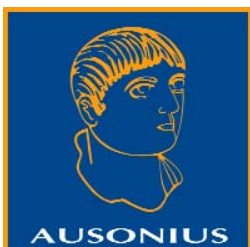
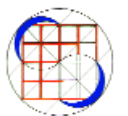
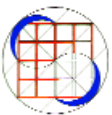
Tiré-à-part des Actes du colloque Virtual Retrospect 2009

Pessac (France) 18, 19 et 20 novembre 2009

R. J. MARCH, M. MUHIEDDINE, É. CANOT

Simulation 3D des structures de combustion préhistoriques

..... pp.19-29



Conditions d'utilisation :
l'utilisation du contenu de ces pages est limitée à un usage
personnel et non commercial.
Tout autre utilisation est soumise à une autorisation préalable.
Contact : virtual.retrospect@archeovision.cnrs.fr

<http://archeovision.cnrs.fr>



Simulation 3D des structures de combustion préhistoriques

Ramiro Javier March*
ramiro.march@univ-rennes1.fr

Mohamad Muhieddine**
mmuhiedd@irisa.fr

Édouard Canot**

* UMR 6566 CNRS CREA AH Centre de Recherches en Archéologie, Archéosciences et Histoire
Université de Rennes 1 Bât. 24-25
35042 Rennes cedex

** Équipe Sage, INRIA Centre de Recherches Bretagne-Atlantique
Campus de Beaulieu
35042 Rennes cedex

Résumé : Ce travail présente une première simulation des structures de combustion préhistoriques en 3D, en prenant en compte les propriétés physiques du milieu où s'effectue la transmission de la chaleur. On présente les codes développés et on analyse les possibilités de cet outil méthodologique pour reconstruire l'histoire thermique des foyers, leur durée d'utilisation et leur mode de fonctionnement.

Mots-clés : foyers archéologiques, simulation 3D, mode de fonctionnement, durée de fonctionnement, histoire thermique

Abstract : This paper presents a first 3D simulation of prehistoric fire-structures which takes into account the physical properties of the porous media where heat transfer occurs. We present the numerical software and analyse the possibilities of application of this methodological tool to reconstruct the thermal history of the fire structures, their minimal duration of burning and their functioning mode

Keywords : archaeological fire structures, 3D simulation, mode of functioning, minimal time of burning, thermal history

INTRODUCTION

Ce travail fait partie du programme "L'homme et le feu, vers une compréhension de l'évolution de la maîtrise de l'énergie thermique et de ses conséquences techniques, culturelles et paléo-environnementales" qui essaie de reconstruire l'histoire de ce processus évolutif. Pour aboutir à cet objectif, il faut pouvoir reconstruire l'histoire de chaque structure de combustion préhistorique. Reconstruire cette histoire implique de pouvoir comprendre la signification de chaque élément constituant les structures de combustion. Cela pose des problèmes méthodologiques, ce qui nous a conduit à

développer une recherche interdisciplinaire, expérimentale et analytique. Cette recherche est destinée à répondre essentiellement à cinq questions :

- Quel était le mode de fonctionnement des foyers ?
- Quelle était leur forme ?
- Quelle était leur fonction ?
- Quelle était leur durée d'utilisation ?
- Quels sont les processus taphonomiques qui ont altéré le substrat d'origine ?¹

Les foyers laissent un certain nombre de traces sur les sols suite aux transformations produites sous l'effet de la chaleur sur le combustible et sur le sol lui-même. Ainsi, nous pouvons observer la formation des zones de sédiment noirci ou de sédiment oxydé en fonction des différentes formes et modes de fonctionnement des foyers (fig. 1). Ces différences dans les processus de formation des zones oxydées ou noircies contribuent à la reconstruction de leur mode de fonctionnement dans le passé².

Les foyers simples à température constante produisent, en fonction de leur durée d'utilisation, des zones d'oxydation sous-jacentes au feu d'une épaisseur variable. Par exemple, un foyer allumé pendant 3 heures, donne lieu à une zone

1. Pour une raison de place, nous n'aborderons pas ici la dernière question.

2. March *et al* 1993, March 1995, Bodu *et al*. 2006.



Fig. 1. Les zones d'oxydation et noircissement produites sur différentes formes des foyers, suite aux processus de combustion.

d'oxydation d'une épaisseur de 3,5 cm tandis qu'un foyer allumé pendant 24 heures altère entre 8 et 8,5 cm d'épaisseur (fig. 2).

Cette constatation expérimentale nous a conduit à réaliser une première modélisation des foyers en 3D axisymétrique visant à reconstruire le comportement thermique des sols limoneux de Pincevent sous l'effet de la chaleur et, par ce biais, de pouvoir déduire la durée d'utilisation des foyers dans le passé et leur mode de fonctionnement (code RA2D)³ (fig. 3). Cependant nous avons besoin de développer une modélisation en 3D pour reconstruire des formes complexes de foyer incluant leurs différents constituants. Par ailleurs, nous avons constaté un phénomène d'évaporation d'eau dans le substrat donnant lieu à l'apparition d'un palier de température à différentes profondeurs en fonction des températures atteintes par le foyer et le degré d'humidité du sol (fig. 3, vue de droite).

Par conséquent, nous avons créé le programme ARPHYMAT⁴, fondé sur trois aspects essentiels, l'expérimentation, la

Foyers Simples



Fig. 2. Différences d'altération observées entre deux foyers à plat expérimentaux de durée différente sur des limons argileux de Pincevent.

3. March & Ferreri 1989 et 1991, March et al. 1993, Ferreri & March 1996.

4. Archéologie, physique et mathématiques (UMR 6566, 6251 du CNRS et équipe Sage IRISA INRIA).

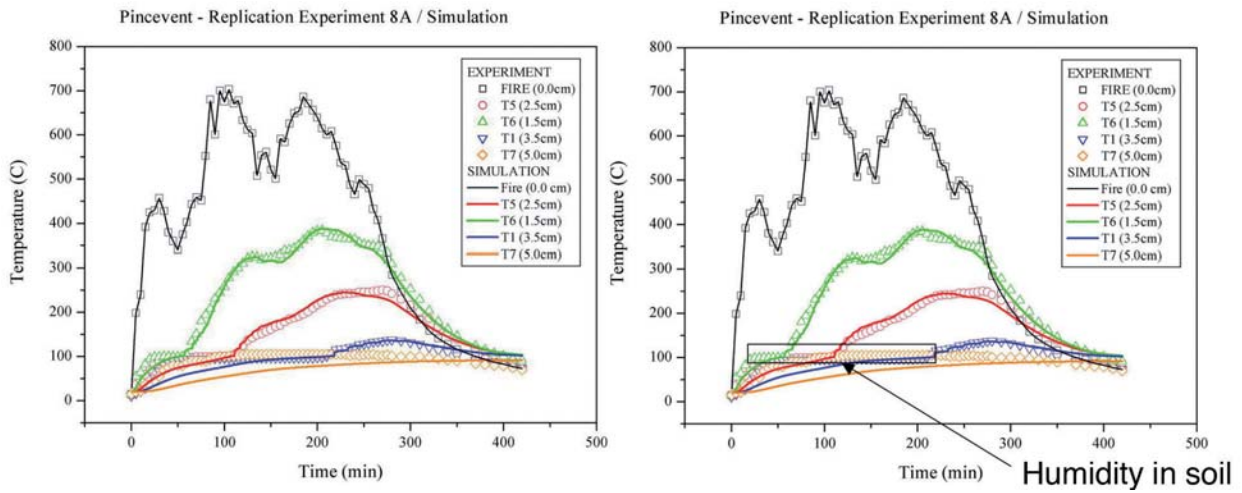


Fig. 3. Courbes de température expérimentales obtenues par la modélisation du foyer expérimental 8a de Pincevent (détail du palier d'humidité).

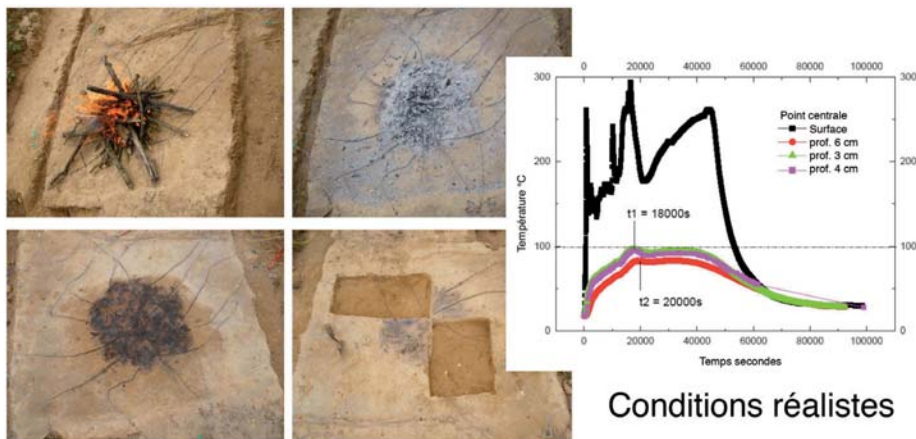


Fig. 4. Exemple de la procédure expérimental avec utilisation du bois sur le sol du niveau IV-20 de Pincevent et courbes de températures obtenues.

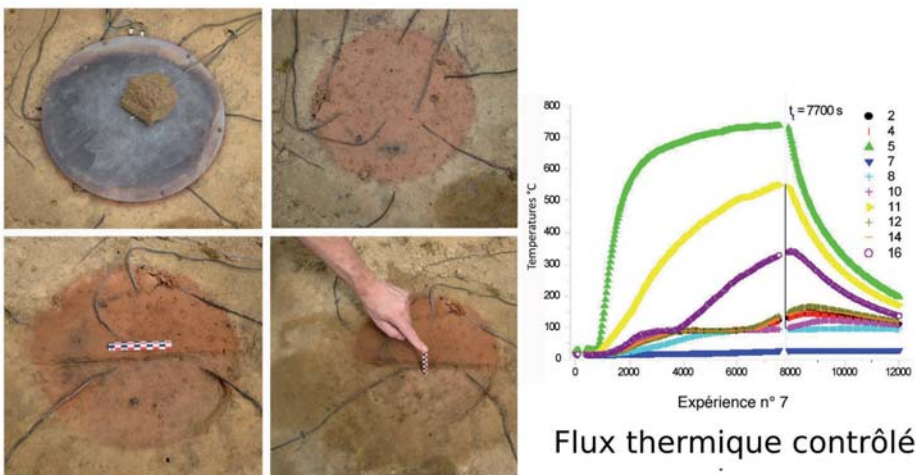


Fig. 5. Exemple de la procédure expérimental avec utilisation de plaque chauffante sur le sol du niveau IV-0 de Pincevent et courbes de températures obtenues.

modélisation et la vérification des modèles réalisés à partir des nouvelles expérimentations.

ARPHYMAT ET MODÉLISATION 3D : RÉALISATION, CARACTÉRISTIQUES ET VALIDATIONS DES CODES

Lors de ce programme nous avons réalisé deux séries de foyers expérimentaux sur des sols limoneux humides (saturés et non saturés en eau) et sableux du gisement magdalénien de Pincevent, à des emplacements correspondants aux occupations des niveaux IV-20 et IV-0⁵. Une série a été réalisée avec du bois et une deuxième en utilisant une plaque chauffante pour réduire les fluctuations de température observées sur des foyers à plat et pour mieux contrôler le flux thermique imposé (fig. 4 et 5). Nous avons reproduit les conditions d'altération du substrat et le palier de température observé au préalable sur des allumages simples (fig. 5) et nous avons travaillé aussi sur la réutilisation des foyers, fréquente dans le contexte archéologique (fig. 6). Ces dernières expériences ont contribué à comprendre le fonctionnement des sols qui étaient humides au début et qui sont devenus secs après une première utilisation. Nous avons pu constater que les paliers de température observés, même s'ils sont toujours existants à des profondeurs où l'humidité n'a pas complètement disparu, présentent une durée plus courte que lors des premières utilisations, les conditions de transfert de chaleur étant modifiées suite à la modification des propriétés du sol (fig. 6).

Pour modéliser ce phénomène de transfert de chaleur où l'évaporation progressive de l'eau dans le milieu poreux constituant le substrat du foyer se produit, nous avons adopté la méthode de capacité apparente proposée par Bonacina⁶ (fig. 7). Cette méthode est basée sur la modification des propriétés physiques du milieu en fonction de la température. Cette méthode avait été d'ailleurs déjà utilisée dans le code RA2D à cause de sa facilité d'implémentation. Cette technique a été améliorée avant d'être utilisée dans nos codes actuels en régularisant ces propriétés pour qu'elles soient moins raides surtout au niveau du front de changement de phase.

Deux codes numériques ont été développés dans le cas 3D-axisymétrique : le premier c'est le code DIFFUSE-SC qui résout le même problème physique que le code RA2D (ces deux codes ne prennent pas en compte le phénomène d'écoulement de fluide dans le sol), ce qui va nous permettre de comparer les résultats de deux approches différentes. La figure 8 représente le système de coordonnées utilisé. Le deuxième code est DIFFUSE-C qui prend en compte le phénomène de couplage avec l'écoulement de vapeur d'eau dans le sol. Ces codes utilisent la méthode des volumes finis

pour discrétiser le système d'équations en espace et utilisent un solveur algèbro-différentiel pour la discrétisation en temps. Un troisième code DIFFUSE-3D qui permet de simuler le transfert de chaleur dans les milieux poreux humides (il prend en compte le phénomène d'évaporation mais il suppose qu'il y a pas de flux de vapeur dans le sol) est développé en utilisant la méthode des éléments finis.

Le code DIFFUSE-SC qui reproduit les conditions d'un sol sec et humide et constitue la base sur laquelle nous avons introduit après le couplage avec l'écoulement de vapeur, a été validé par comparaison avec une solution analytique de la diffusion de la chaleur et a fourni de bons résultats. Ensuite, nous avons comparé les résultats obtenus sur les données expérimentales d'expériences sur sol sec de Pincevent avec celles en provenance du code RA2D développé avec J.C. Ferreri en obtenant des résultats également satisfaisants (fig. 9). Une première simulation de la forme atteinte pour la zone oxydée en 3D d'un foyer à plat expérimental a été ainsi obtenue (fig.10).

Une fois DIFFUSE-SC validé nous avons introduit dans le code le couplage correspondant à la simulation de l'écoulement des fluides dans le sol. Ce code est essentiellement un modèle de diffusion-convection de la chaleur dans le sol couplé avec un module destiné à calculer l'écoulement. Le code DIFFUSE-C nous permet d'observer l'évolution du front d'évaporation dans les sols sous l'effet de la chaleur. Les effets de la prise en compte de ce couplage au calcul du transfert de chaleur peuvent être observés dans la fig. 11. On constate qu'une exposition à la chaleur plus prolongée est nécessaire pour atteindre une température donnée (100°) sur une coordonnée axiale XYZ (3 cm de profondeur), ainsi les mêmes épaisseurs d'altération représenteraient moins de temps d'exposition à la chaleur si le sol originnaire était sec que s'il était humide (fig. 11).

Les différents codes ont été validés par comparaison avec les résultats des expérimentations réalisées sur sable ou limon, avec et sans plaque chauffante à Pincevent (fig. 12). Nous avons ainsi pu simuler la progression du front d'évaporation de l'eau ainsi que la pression de la vapeur d'eau dans les sols limoneux de Pincevent (fig.13).

La grille de calcul de DIFFUSE-3D est adaptable en fonction des besoins et de l'importance de la zone considérée (fig. 14). Ceci permet de réduire le temps de calcul en réduisant le nombre de points à calculer en périphérie du foyer.

Ces codes étant validés, nous avons simulé les formes des zones thermo-altérées qui seront observables dans le substrat dans des foyers simples dans des conditions humides et sèches. Les zones de sédiment oxydé représentées ici en rouge seront beaucoup plus importantes pour une même

5. Leroi Gourhan & Brezillon 1972, Julien 1984 et Bodu *et al.* 2006.

6. Bonacina 1973 ; Muhieddine *et al.* 2007, 2008 et 2009.

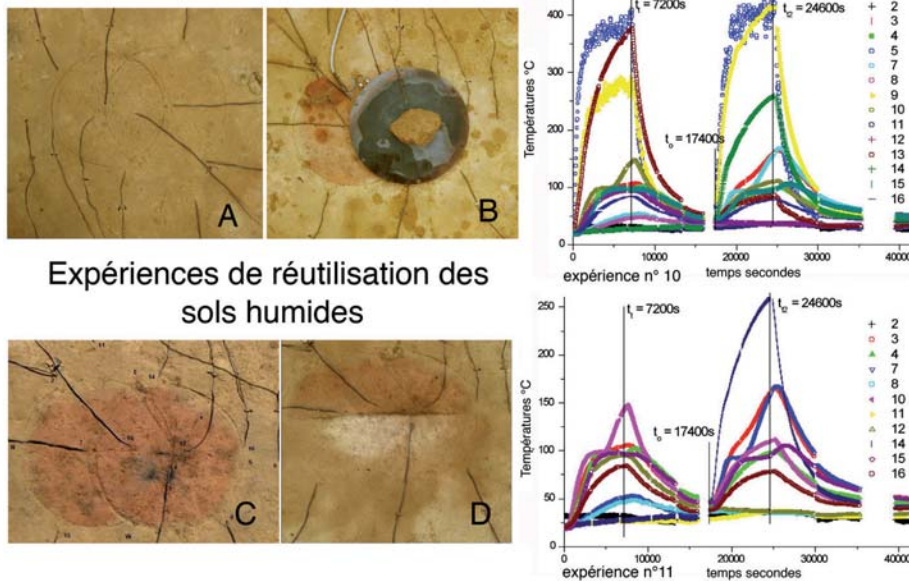


Fig. 6. Exemples de la procédure expérimental avec utilisation de plaque chauffante sur le sol du niveau IV-0 de Pincevent avec réutilisation du sol et courbes de températures obtenues.

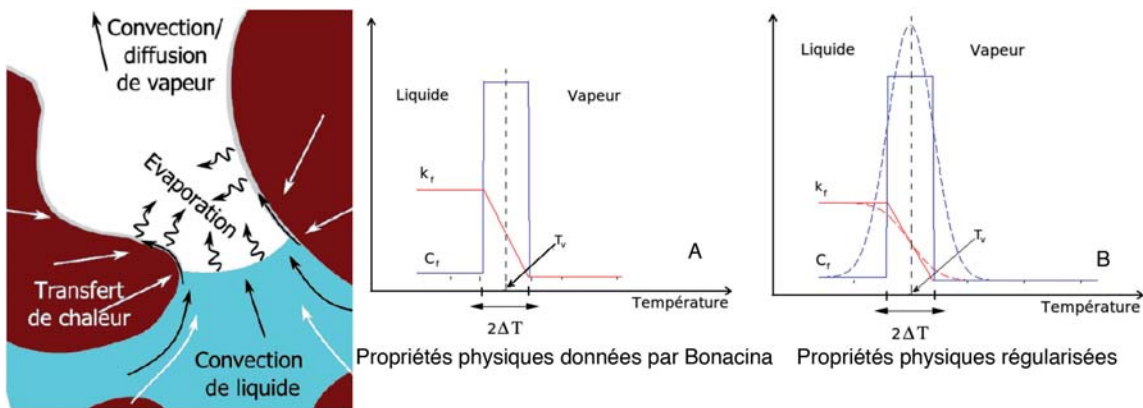


Fig. 7 Macroscopisation par prise de moyenne pour traiter le problème dans une seule région sans avoir besoin de suivre l'interface explicitement, ceci rend le problème plus facile à généraliser aux cas multidimensionnels. (A - B) : Schéma d'intégration des propriétés physiques employées suivant Bonacina en DIFFUSE- SC qui applique les équations de continuité et d'énergie aux trois phases, liquide, solide et gazeuse dans un volume élémentaire représentatif.

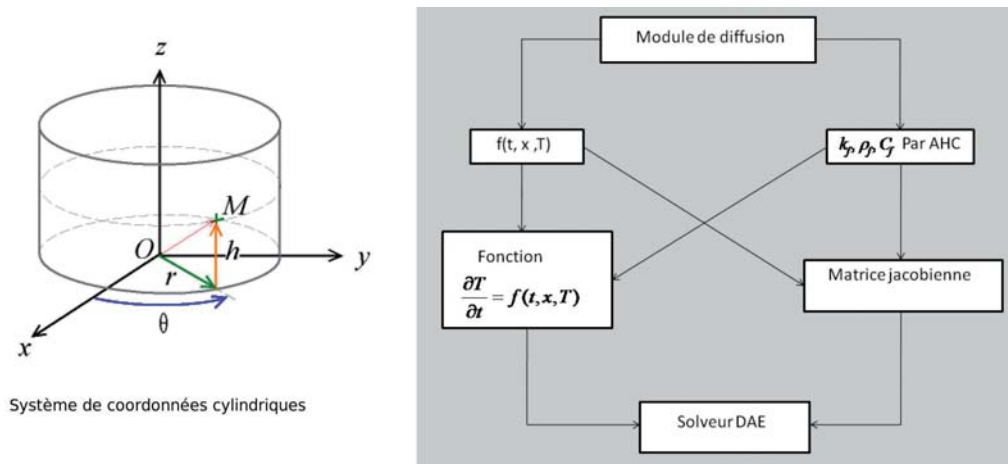


Fig. 8. Système de coordonnées cylindriques et fonctions utilisées par DIFFUSE-SC.

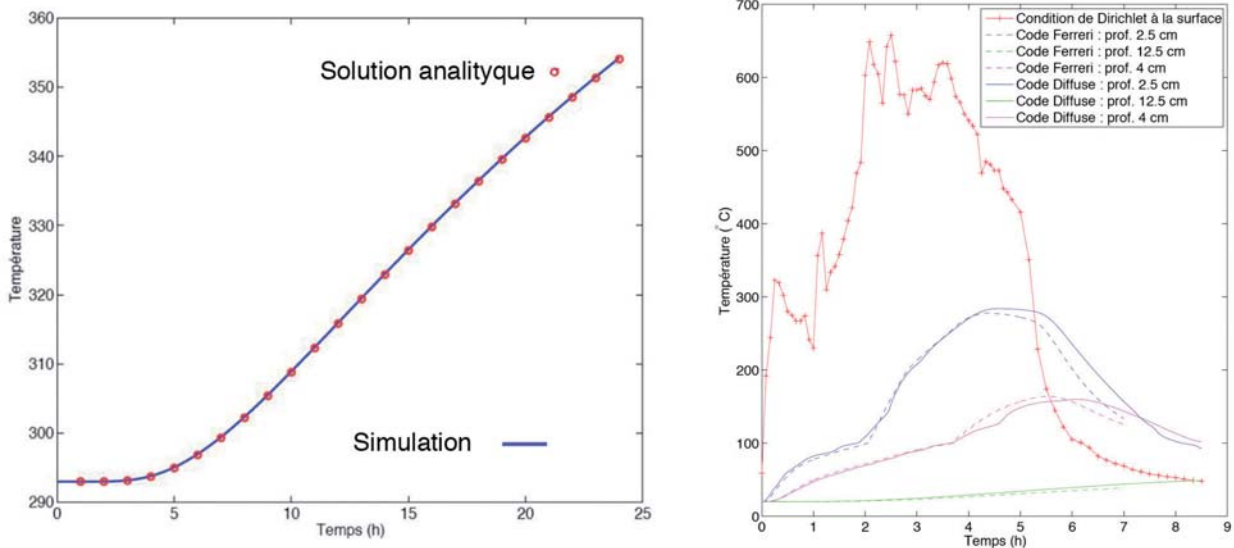


Fig. 9. Validation du code DIFFUSE-SC contre la solution analytique du problème et contre le code RA2D.

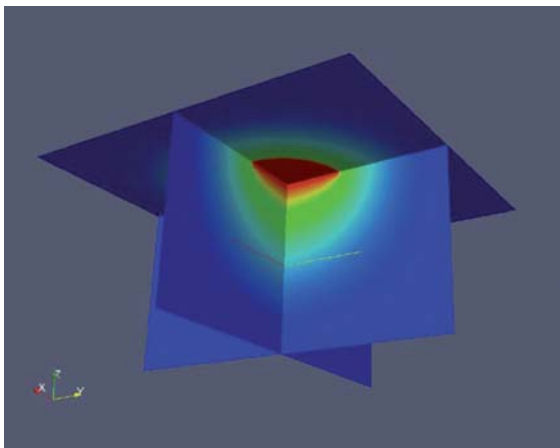


Fig.10. Simulation du transfert de chaleur en 3D avec le code DIFFUSE-SC pour un foyer à plat théorique les températures décroissent du rouge foncé vers le bleu.

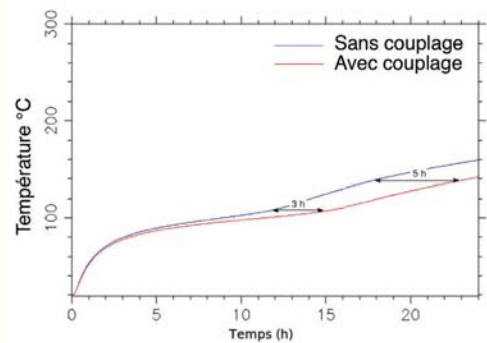
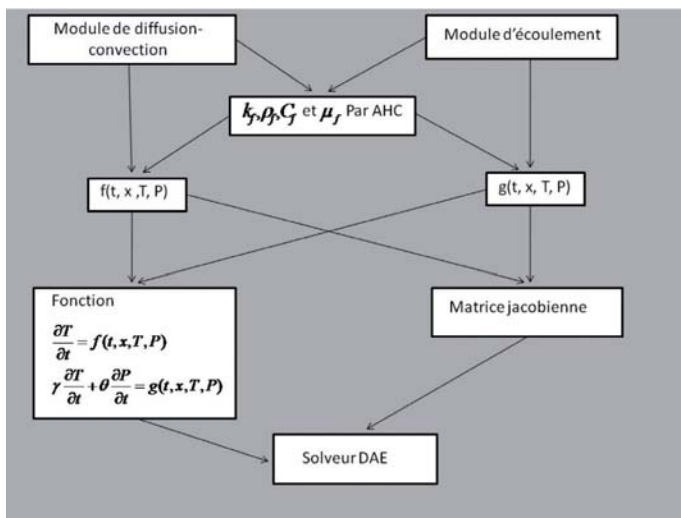


Fig. 11. Couplage dans le code DIFFUSE-C avec le solveur DASSL. Les flèches symbolisent les interactions entre les différents modules et effets du couplage de la diffusion de la chaleur avec l'écoulement du vapeur d'eau dans le transfert de chaleur dans le sol.

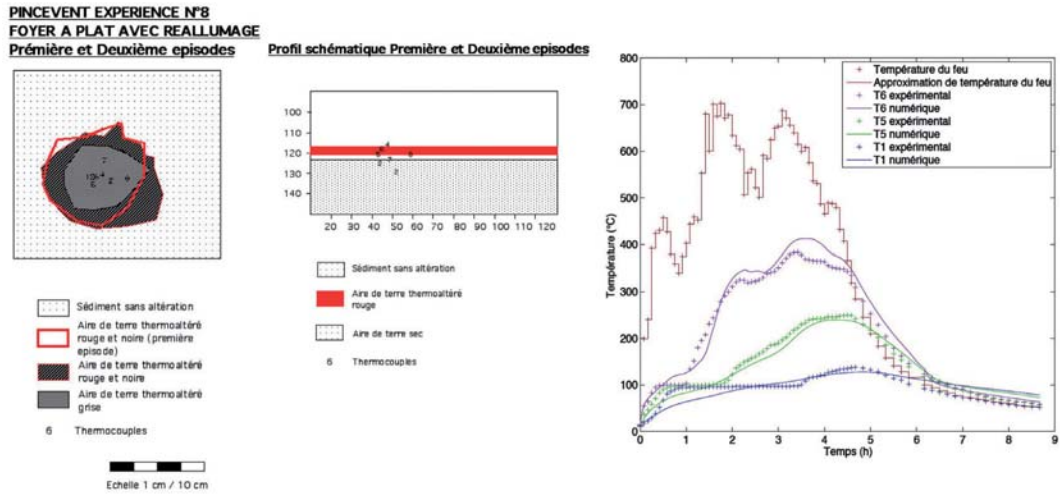


Fig. 12. Schéma de l'expérience n° 8 sur limons réalisé à Pincevent et comparaison entre les résultats numériques obtenus par DIFFUSE-C et les mesures expérimentales.

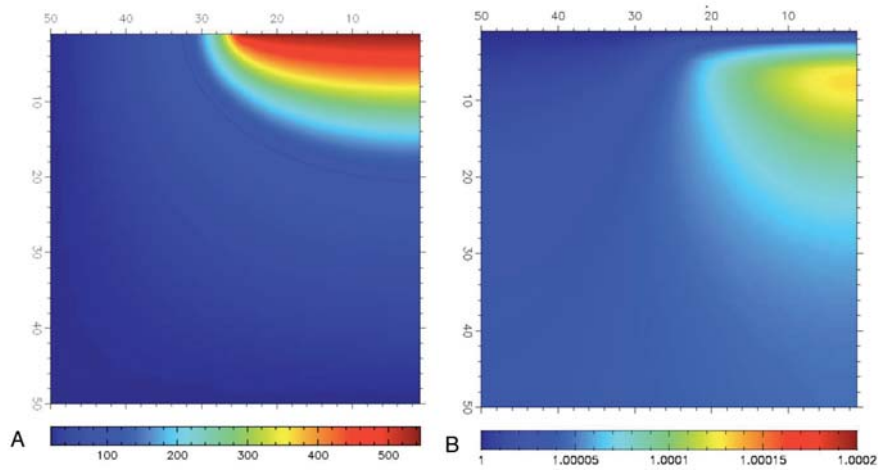


Fig. 13. Températures °C (A) et pression mb (B) de la vapeur d'eau au sein des sols sous-jacents au foyer de l'expérience 8 de Pincevent. La ligne noire montre l'emplacement du front d'évaporation.

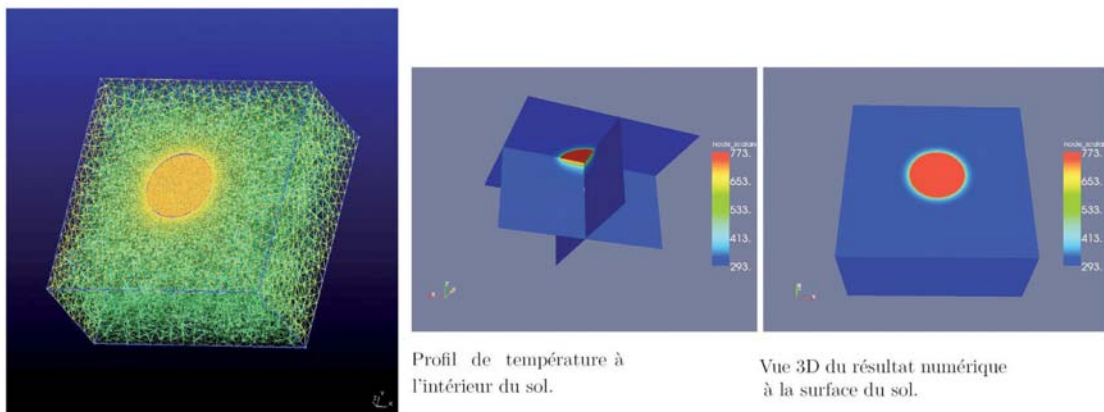


Fig. 14. Maillage 3D établie avec DIFFUSE-C et distribution de températures dans le sol et en surface en fonction de la forme du foyer.

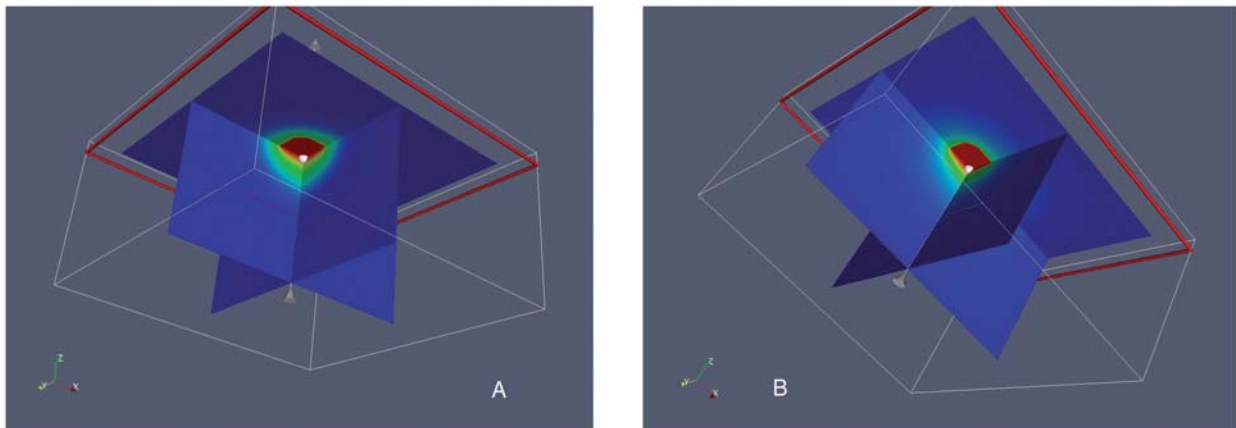


Fig. 15. Détermination des formes de l'altération en fonction de l'état du sol A sec et B humide pour un même foyer à plat sur les limons de Pincevent.

durée à température constante pour un sol sec que pour un sol humide (fig.15). De la même façon, nous pouvons les utiliser pour essayer de déduire les différences de temps nécessaires pour atteindre un même volume de sol oxydé des foyers archéologiques.

SIMULATION DE QUELQUES EXEMPLES ARCHÉOLOGIQUES

Tout d'abord nous présenterons une étude paramétrique destinée à comprendre la signification du paramètre humidité lors de la lecture des vestiges archéologiques dans la détermination de la durée minimale d'allumage (DMA) d'un foyer dans le passé⁷.

Nous avons appliqué DIFFUSE-C à la détermination des DMA des foyers à plat X127 et R126 du niveau IV-20 de Pincevent. Ces deux foyers allumés directement sur le sol présentent des épaisseurs d'altération différentes (3 et 4, 5 cm respectivement)⁸. La fourchette de températures choisie entre 350°C et 600°C pour la simulation du fonctionnement des foyers est le résultat des études analytiques (chauffage en laboratoire et analyses par diffraction X et Mossbauer) qui ont indiqué la formation d'hématite, la disparition de la kaolinite et la conservation des carbonates⁹.

Les résultats obtenus montrent que les DMA valent pour le foyer X127 entre 1 h et 5 min à 600°C pour un sol sec et un peu plus de 52 heures à 350°C sur un sol humide, tandis que pour le foyer R126 la fourchette aurait été comprise entre

un peu plus de 2,5 h à 600°C si le sol était sec et plus de 305 h à 350 °C si le sol était humide (fig. 16). Il est également possible que ces foyers ont subi de plus faibles températures pendant un laps de temps plus long, mais notre objectif est d'avoir une idée des phénomènes qui se sont déroulés dans le passé, pas d'affirmer que les durées exactes d'allumage ou d'utilisation sont exactes. Il faut signaler, que ces calculs sont réalisés en considérant un sol saturé en eau, chose qui n'est presque jamais vrai pour le sol d'un campement de chasseurs cueilleurs. Ces données pourront donc être considérées comme des données maximales de fonctionnement, dans le cas où les foyers auraient été allumés sur un sol humide saturé. Ensuite, nous savons que X127 présente deux centres de chaleur avec la même épaisseur d'altération. Ces centres de chaleur ne semblent pas avoir été contemporains donc il faudrait multiplier sa durée minimale d'allumage par deux. Ceci dévoile des différences existantes dans le mode de fonctionnement de ces deux foyers de même forme et situées de façon relativement proche dans l'espace du campement du niveau IV-20 de Pincevent, tout en nous indiquant une durée relative des occupations de ce campement.

Nous avons aussi reproduit des formes plus complexes, par exemple les foyers en fosse rectangulaire de Hauts-de-Feuilly près de Lyon (Rhône-Alpes), formes fréquemment observées à l'Âge du Bronze¹⁰. Ces fosses de 2 m de longueur par 1,60 m de largeur présentent la caractéristique d'être remplis de roches (galets de quartzite) et toute leur partie intérieure, fond et parois, est oxydée.

Les fosses ont été reproduites par un maillage de plus de 290.000 points, lesquels sont répartis de façon plus proche à proximité des parois de la structure et décroissent en s'éloignant de celle-ci (fig.17). D'après nos calculs, ces foyers

7. Bien évidemment cette lecture est conditionnée par l'étude d'autres paramètres qui sont considérés dans le code, ainsi que par la détermination des processus taphonomiques qui ont suivi la formation des foyers et qui ont pu modifier les épaisseurs du sol observées archéologiquement dont l'étude n'est pas l'objectif de cet article.

8. March 1995, March 1996.

9. March 1995, March *et al.* 1993 et Lebensky *et al.* 1993.

10. Jacquet *et al.* 2003.

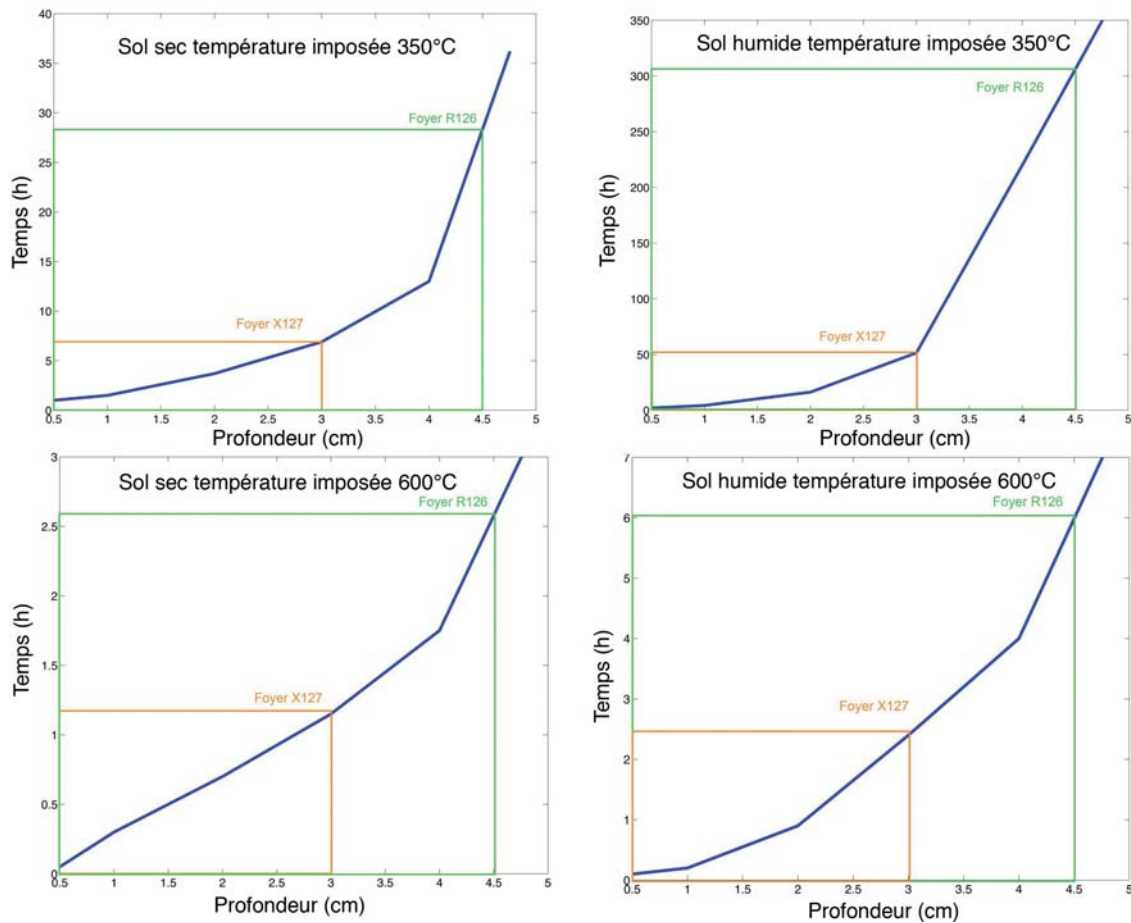


Fig. 16. Estimation de la durée minimale de fonctionnement des foyers X127 et R126 du niveau IV-20 de Pincevent, sol humide saturé en eau et sol sec si température maximale égal à 350° ou à 600° C.

ont dû être allumés pendant un bref laps de temps pour obtenir les altérations observées, entre 1 heure à 290°C avec un sol sec et 4 heures et demi avec un sol humide. Cependant la distribution des températures dans la cuvette montre la nécessité de combler complètement la fosse avec du combustible pour obtenir les altérations observées sur le substrat (limon argileux) (fig.17).

Si nous analysons plus en détail les thermo-altérations observées à travers les coupes réalisées, nous constatons que, même si ces fosses ont dû être complètement remplies pour atteindre les épaisseurs d'oxydation observées sur les parois, la combustion ne s'est pas produite en un seul épisode. En effet, sur chaque coupe réalisée nous observons différentes épaisseurs d'altération (fig.18) comprises entre 2 et 4 cm d'altération à plus de 290°C. Ceci montre que ce foyer a été allumé avec un système de fonctionnement qui a donné des centres de chaleur différents. Ainsi, nous avons constaté un chauffage différentiel de la fosse à des températures supérieures à 290°C et inférieures à 700°C sur le sol, ce qui a donné des zones exposées à la chaleur de façon sensiblement

différente au sein du même foyer. La durée de ces différents épisodes sont brefs et varient entre 6 min et 1 heure pour un sol sec et moins d'une heure et 4 heures et demi pour un sol humide (fig 19). Ces résultats donnent une idée beaucoup plus précise sur le mode de fonctionnement et l'histoire thermique de ces structures.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les possibilités de l'application du code DIFFUSE-3D à différentes formes de foyers provenant de différentes périodes ouvrent une nouvelle voie d'interprétation pour l'étude des structures de combustion archéologiques. Cependant, le travail n'est pas encore fini. Nous voulons, par la suite, modéliser les phénomènes de réutilisation présentant des changements de phase sèche-humide dans sa réelle continuité de façon à améliorer les déductions que nous avons présentées ici.

Nous devons intégrer la radiation au sein du code DIFFUSE-3D, parce que celle-ci joue un rôle très important au sein de chaque structure, par exemple dans le chauffage des roches

des comblements et bordures ainsi que dans les parois des cuvettes, fosses et fours. Il faut aussi incorporer la modélisation de la disparition définitive de la vapeur d'eau suite au séchage de façon à améliorer la simulation des réutilisations. De la même façon, il faut modéliser des formes complexes avec des changements de phase dans le sol, comme des litages constitués des granulométries ou compositions élémentaires différentes. Il faut aussi développer une méthode inverse, de façon à pouvoir déterminer par la voie expérimentale du transfert de chaleur sur le terrain, les propriétés physiques du milieu à étudier (porosité, conductivité, capacité thermique, etc.) réduisant ainsi les coûts analytiques. Finalement, nous devons développer les inférences sur les modalités de

fonctionnement et les cohérences entre les interprétations archéologiques sur ces modes et les processus de formation des foyers via la modélisation.

Ce travail a déjà commencé et devrait être accompagné par la mise en place d'une interface conviviale qui servirait aux archéologues qui vont utiliser le modèle pour répondre à leurs questions respectives sur les structures de combustion en leur permettant de modéliser les différentes formes retrouvées en respectant leur complexité.

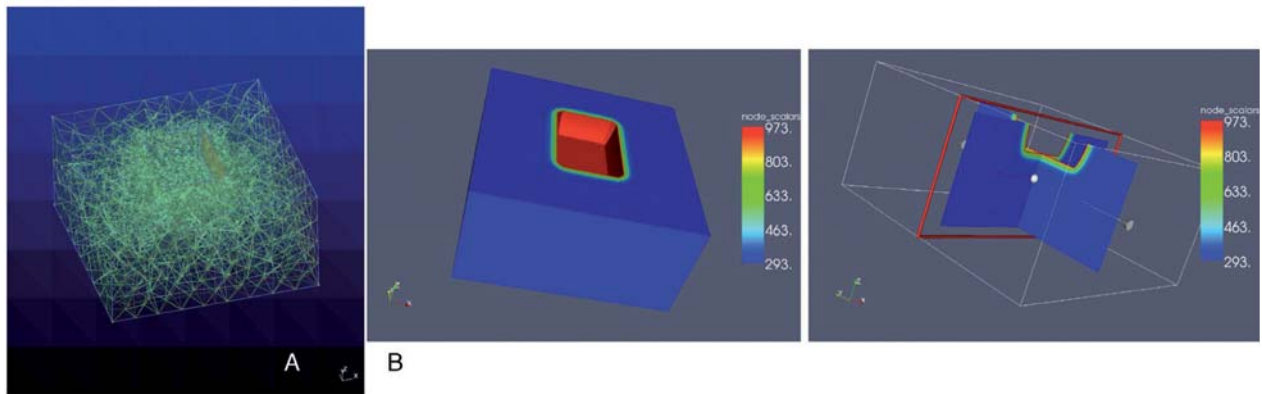


Fig. 17. Simulation du foyer en fosse rectangulaire du site des Hauts de Feuilly A : Maillage de 294514 éléments utilisé B : Simulation du comportement thermique de la structure avec le code DIFFUSE-C.

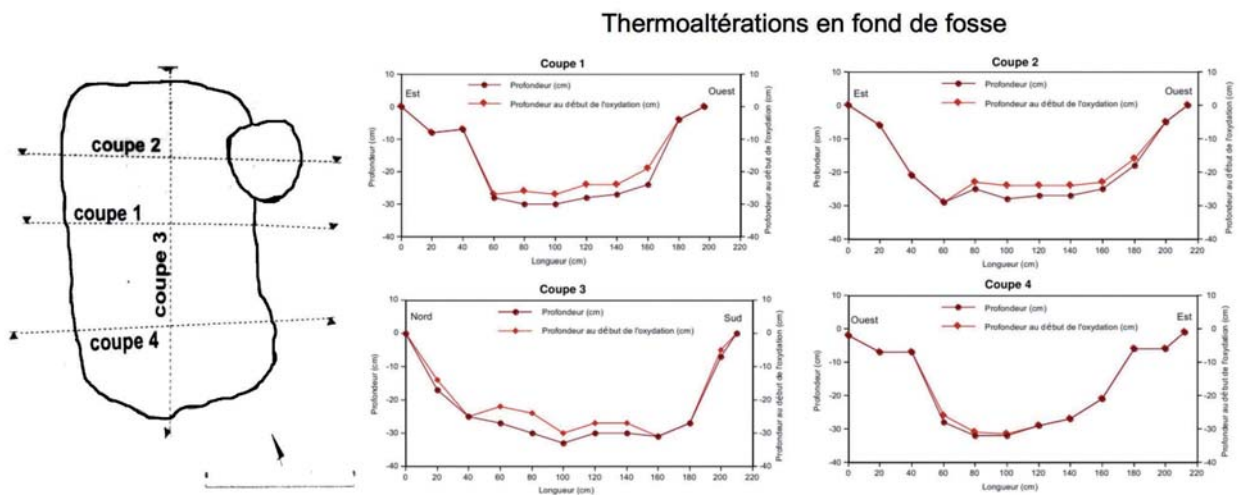


Fig. 18. 4 coupes du foyer en fosse étudié indiquant des différences d'altérations suite à un chauffage différentiel de la surface de la fosse à $< 290^{\circ}\text{C}$ et $> 700^{\circ}\text{C}$ sur le fond.

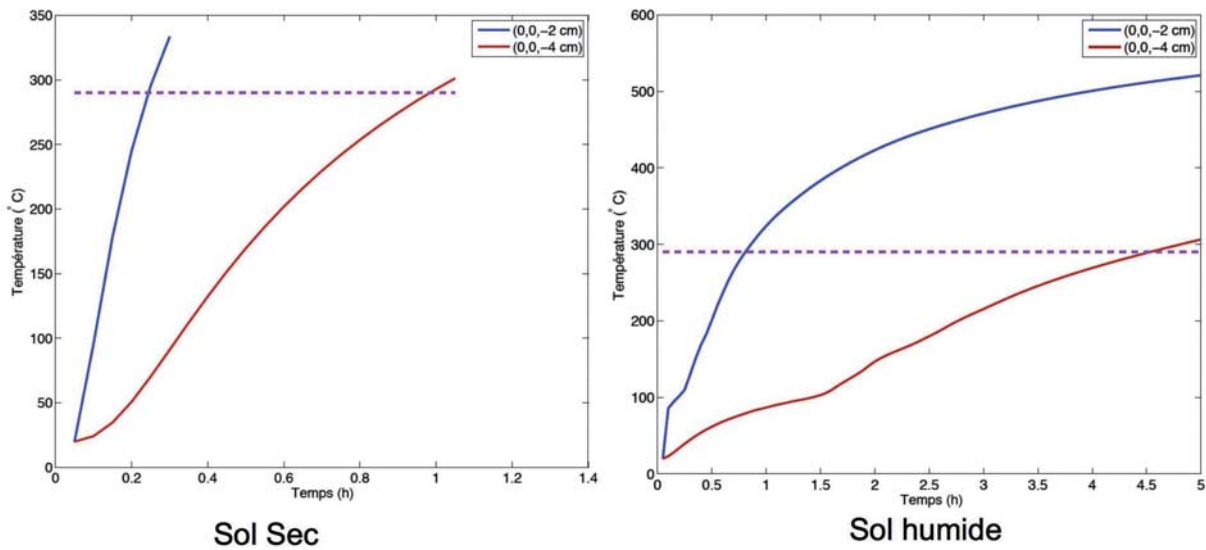


Fig. 19. Courbes de températures pour le foyer en fosse d'Hauts de Feuilly à différentes profondeurs si le foyer était allumé à 700°C.

Bibliographie

- Averbouh, A., C. Bemilli, O. Bignon, P. Bodu, G. Debout, G. Dumarcay, J.G. Enloe, D. Joly, M. Julien, A. Lucquin, R. March, M. Orliac, M. Vanhaeren et V. Valentin (2006) : "Un dernier hiver à Pincevent, Les magdaléniens du Niveau IV-0", in Bodu *et al.* 2006, 1-180.
- Berke, H., J. Hahn et C. J. Kind, éd. (1984) : *Structures d'habitat du Paléolithique supérieur en Europe, Actes du colloque de Reisenburg/Günzburg, 8-14 mai 1983*, Tubingen.
- Bodu, P., M. Julien, B. Valentin et G. Debut, éd. (2006) : *Gallia Préhistoire*, 48.
- Bonacina, C. et G. Comini (1973) : "Numerical solution of phase-change problems", in : *Int. J. Heat Mass Transfer*, 16, 1825-1832.
- Ferreri, J. C. et R. J. March (1996) : "Using numerical models to analyze archaeological simple fires structures", in : *XIII International Congress of prehistoric and protohistoric sciences Forli-Italia-8/14 September 1996 Colloquia 5 The Lower and Middle Paleolithic Colloquium*, IX, 57-63.
- Frère-Sautot, M.-C., éd. (2003) : *Le feu domestique et ses structures au néolithique et aux âges des métaux (Actes du colloque Bourg-en-bresse 7 octobre 2000 Beaune 8 Octobre 2000)*, Vol. 9, Montagnac.
- Jacquet, P., T. Bouquin, L. Kuntz et R. Sirven (2003) : "Fouille de fosses de combustion protohistoriques à Saint-Priest (Rhône, France)", in : Frère-Sautot 2003, 291-297.
- Julien, M. (1984) : "L'usage du feu à Pincevent (Seine-et-Marne, France)", in : Berke *et al.* 1984, 161-168.
- Lebensky de Kanter, F., S. Duhalde, C. Saragovi et R. J. March (1993) : "Mössbauer study of sediment alteration produced by heat treatment", in : *Hyperfine Interactions*, 1-5.
- Leroi Gourhan, A. et M. Brezillon (1972) : 1972. "Fouilles de Pincevent. Essai d'analyse ethnographique d'un habitat magdalénien. (la section 36)", 7^e supplément Gallia Préhistoire.
- March, R. J. et J. C. Ferreri (1989) : "Sobre el estudio de estructuras de combustión arqueológicas mediante replicas y modelos numéricos", in : Olive & Taborin 1989, 59-69.
- (1991) : "Aplicación de modelos numéricos para la inferencia del tiempo de quemado en estructuras de combustión arqueológicas : Influencia de parámetros", in : *Actas del IX Congreso Nacional de Arqueología Chilena*. Ed. Museo Nacional de Historia Natural, Santiago de Chile, 157-168.
- March R. J., A. Baldessari, E. G. Gros, J. C. Ferreri, O. Morello et R. Rodano (1991) : "L'étude des structures de combustion en Argentine", in : *Actes d'une journée-débat "Pour un meilleur dialogue en archéologie"*, *Bulletin de la Société Préhistorique Française*, tome N° 86, Études et Travaux 10-12, 384-392.
- March, R. J., J. C. Ferreri, et C. Guez (1993) : "Étude des foyers préhistoriques du Bassin parisien : l'approche expérimentale", in : *Actes des Journées archéologiques d'Île de France. Paléoenvironnement et actualités, Meaux, 16 et 17 mars 1991, Mémoires du Groupement Archéologique de Seine et Marne*, n° 1, 87-97.
- March, R. J. (1995) : "L'étude des structures de combustion en archéologie : un détour vers l'histoire", *Annales de la Revue Fyssen*, n° 10, Décembre 1995, 53-68
- (1996) : "L'étude des structures de combustion préhistoriques : une approche interdisciplinaire", in : *XIII International Congress of prehistoric and protohistoric sciences Forli-Italia-8/14 September 1996 Colloquia 5 The Lower and Middle Paleolithic Colloquium*, IX, 251-75.
- Muhieddine, M., É. Canot, et R. J. March (2007) : "Simulation 1-D de l'évaporation forcée de l'eau dans un sous-sol poreux saturé", *Proc. of MajecSTIC 2007*, Caen, 289-292.
- (2009) : "Various approaches for solving problems in heat conduction with phase change", in : *Int. Journal of finite volume method*, Volume 6 N 1, 1-19.
- (2009) : "Recovering thermophysical parameters of a heated saturated porous medium, NASCA 09", in : *Proceedings of the International Conference of Numerical Analysis and Scientific Computing with Applications*, Agadir, pages???
- (2009) : "Simulation of Heat Transfer With Phase Change in 3D Saturated Porous Media", in : *MAMERN 09 ; Proceedings of the 3rd International Conference on Approximation Methods and Numerical Modeling in Environment and Natural Resources*, volume 2, Pau, 701-706.
- Olive, M. et Y. Taborin Y., éd. (1989) : *Nature et Fonction des foyers préhistoriques. Actes du colloque international de Nemours (1987)*, Nemours.

