# **PROCESSUS DE FORMATION DES STRUCTURES DE COMBUSTION**

# **DU SITE « LES SABLINS » : UNE APPROCHE EXPÉRIMENTALE**

Hélène MIALLOT<sup>1</sup>, Ramiro-Javier MARCH<sup>1</sup>, Édouard CANOT<sup>2</sup> et Renaud DELANNAY<sup>3</sup>

**Résumé :** Cette étude présente l'intérêt d'une approche expérimentale dans la compréhension des processus de formation des structures de combustion du site : « Les Sablins ». Nous analyserons les possibilités de cet outil méthodologique pour reconstruire l'histoire thermique des foyers et leur mode de fonctionnement, au travers de l'étude des changements occasionnés par le transfert thermique sur différents supports : le sol sableux et les roches siliceuses.

**Mots clés :** structures de combustion, transfert thermique, oxydation thermiques, modélisation informatique, roches siliceuses, mode de fonctionnement.

**Abstract :** This study introduces the purpose of an experimental approach in the understanding of the fire structures processes of the site : « Les Sablins ». We will analyze the possibilities of this methodologic approach to build the thermal history of the fire structures and their functioning mode, by the study of changes caused by thermal transfers on differents materials : sandy soil and siliceous stones.

Les structures de combustion sont des éléments essentiels à la compréhension du mode de vie et de la structure des habitats du Néolithique. Elles jouent un rôle central dans les habitats, et un grand nombre d'activités sont regroupées autour de ces structures comme la taille du silex, le séchage, le fumage ou la réalisation des repas. Il est donc essentiel de les étudier afin de mieux cerner leur importance et le mode de vie de ces sociétés.

**Keywords :** fire structures, thermal transfers, thermal oxydation, computer model, siliceous stones, mode of fonctioning.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> UMR 6566 CNRS CREAAH Centre de Recherches en Archéologie, Archéosciences et Histoire, Université de Rennes 1 Bât. 24-25 35042 Rennes cedex, <helene.miallot@gmail.com> <ramiro.march@univ-rennes1.fr>

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Équipe Sage, INRIA Centre de Recherches Bretagne-Atlantique, Campus de Beaulieu 35042 Rennes cedex <edourd.canot@irisa.fr>

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Institut de Physique de Rennes Université de Rennes 1 UMR CNRS 6251 263, av. général Leclerc 35042 Rennes <renaud.delannay@univ-rennes1.fr>

L'objectif de notre travail est de comprendre les processus de formation du site de « Les Sablins », (néolithique moyen) dont la fouille est dirigée par M. Michel PHILIPPE (Figure 1).



FIGURE 1: SITUATION GÉOGRAPHIQUE DU SITE "LES SABLINS", NORD-PAS-DE-CALET (DAO MICHEL PHILIPPE)

Ce site est particulier car il contient des sols d'occupation bien conservés. Ces niveaux néolithiques recèlent d'importantes potentialités susceptibles de contribuer à l'avancée des connaissances archéologiques. En l'état actuel de leur documentation archéologique, ils posent cependant de nombreuses interrogations : la fonction précise du site n'est pas clairement identifiée, sinon dans sa composante d'atelier d'exploitation des matières premières siliceuses. De nombreux indices d'activité domestique ont été relevés par l'équipe de J.F. Piningre, sans qu'il soit possible d'attester cette fonction, ni de la mettre en perspective avec le reste du site. Les faciès culturels qui s'y sont succédé ne sont pas clairement identifiés, sur l'Horizon inférieur. Des indices certains de multiplicité d'occupations ont y ont été relevés ; l'Horizon intermédiaire pourrait de même en comporter. La source d'approvisionnement et le mode d'acquisition des matériaux siliceux exploités ne sont pas clairement identifiés. Mais, le site présente la particularité de posséder des structures de combustion utilisant des galets de silex (Figure 2). (Philippe et al. 2011)



FIGURE 2: EXEMPLE DE FOYER ARCHÉOLOGIQUE DES SABLINS - ICI LE CG16 (DAO MARCH)

Les structures de combustion découvertes et fouillées ont permis de poser des questions sur le fonctionnement de ces structures, à la fois en ce qui concerne les transferts de chaleur dans le sol (zone rubéfiée identifiée), les déchets lithiques qu'elles fournissent, ainsi que les éléments organiques conservés (charbons, graines, graisses brulées...).

L'objectif de notre étude est d'étudier les processus de transformation des matériaux supports sols et roches (galets de silex).

## LE TRANSFERT THERMIQUE

Pour comprendre les processus de formation liés à la transformation des sols du site Les Sablins, il faut déterminer le comportement thermique des sols, mais aussi étudier les phénomènes de transfert thermique qui se produisent dans ces types de structures particulières sur des supports intermédiaires, comme les roches qui sont employées pour la confection de structures. Nous voulons réaliser un modèle mathématique permettant de prédire les effets de ces structures sur le milieu et les traces qui sont laissées suite à leur fonctionnement. Pour construire ce modèle, il nous faut déterminer les valeurs d'une série de paramètres tels que la diffusivité thermique de sols.

#### MATÉRIEL ET MÉTHODE

Pour évaluer le comportement des foyers et pouvoir déduire ces paramètres, nous avons réalisé un travail d'expérimentation en laboratoire, complété par un travail de terrain effectué dans des conditions réalistes. Les campagnes d'expérimentation sur le terrain réalisées en 2009 étaient destinées à reproduire des formes hypothétiques de foyers à partir des modèles construits sur les foyers archéologiques et à tester certaines hypothèses émises, mais en isolant les variables à analyser dans le contexte du laboratoire. Ces expériences ont pour but de reproduire les effets thermiques observés sur les différents constituants du foyer, de façon à pouvoir inférer le mode de fonctionnement de ces structures.

Dans un premier temps afin de contrôler la chaleur diffusée dans le sol, une première série d'expérimentations a été faite, à partir d'une plaque chauffante posée sur le sol avec des thermocouples placés à des points stratégiques, pour pouvoir contrôler et enregistrer la température tout au long de l'expérience.

Les thermocouples sont enterrés à différents niveaux allant de la surface à quelques centimètres de profondeur. Ils sont disposés à différents endroits : au centre de la zone délimitée par la plaque ainsi qu'aux

points cardinaux dans cette même zone. D'autres sont disposés plus loin afin d'obtenir des informations sur la température ambiante au soleil comme à l'ombre. Enfin, un dernier capteur est positionné sur la plaque chauffante afin d'enregistrer et de contrôler la température de chauffe.

Une série de quatre expériences similaires a été réalisée. En raison de difficultés dans l'acquisition des données, nous nous pencherons seulement sur les expériences 2 et 4.

## Expérience 2

Cette expérience a été réalisée sur un sol humide. Sur la plaque, une casserole remplie d'eau a bouilli pendant toute la durée de l'expérimentation (T4). Le début a été enregistré à 14h35 et le chauffage a continué jusqu'à 16h35 (120 minutes). Vers 14h55, le thermocouple 12 a eu des problèmes de fonctionnement. Il a de nouveau fonctionné à 15h09 et les mesures suivantes ont pu être enregistrées. Le Tableau 1 et la Figure 3 montrent l'emplacement des thermocouples. La durée totale de l'expérience a été de 4 heures et 15 minutes (250 minutes).

N°	Position	Zone	État
1	Enterré plus profond à l'Ouest		zone humide
2	Enterré en superficie Nord		zone sèche
3	Enterré en superficie Ouest		zone sèche
4	Température dans la casserole		
5	Enterré en superficie Sud		zone sèche
6	Température ambiante à l'ombre		
7	Enterré plus profond au Sud		zone humide
8	Enterré plus profond au Centre		zone humide
9	Enterré plus profond au Nord		zone humide
10	Enterré en superficie au Centre		
11	Sur la plaque au Centre		
12	Enterré en superficie Est		zone sèche
13	Superficiel au Sud	Zone noire	
14	Superficiel à l'Ouest	Zone noire	
15	Enterré à 1 cm au Centre		zone sèche
16	Superficiel à l'Est	Zone noire	
17	Enterré plus profond à l'Est		zone humide
18	Superficiel au Centre	Zone noire	
19	Superficiel au Nord	Zone noire	
20	Enterré à l'extérieur à l'Ouest		zone sèche

TABLEAU 1: POSITION DES THERMOCOUPLES EXPÉRIENCE 2

Une vingtaine de thermocouples ont été disposés pour cette expérience (Tableau 1). Trois capteurs sont disposés au niveau de chacun des points cardinaux. Le premier sur la surface, sous la plaque: T13 au Sud; T19 au Nord; T14 à l'Ouest et T16 à l'Est. Le second est enterré proche de la surface: T2 au Nord; T3 à l'Ouest; T5 au Sud et T12 à l'Est. Le troisième est enfoncé plus profond dans le sol: T1 à l'Ouest; T7 au Sud; T9 au Nord et T17 à l'Est. Au centre, quatre capteurs ont été placés: T18 sous la surface, T15 enterré à 1 cm, T10 également à 1cm mais décalé vers le Nord-est, le T8 est enterré plus profondément sous le centre.

Les températures extérieures ont été mesurées par différents capteurs : le T20 pour la plaque sur le sol, le T6 pour la température ambiante et le T4 pour la température de l'eau bouillante dans la casserole. Le capteur 11 était sur la plaque (Figure 3, ci-dessous).



FIGURE 3: POSITION DES THERMOCOUPLES EXPÉRIENCE 2

La température a atteint le palier des 400°C seulement 48 minutes après le début de l'expérience, elle a ensuite oscillée entre 400°C et 416°C, jusqu'au moment où l'alimentation de la plaque a été coupée. À partir de cet instant, la température est descendue brusquement jusqu'à 100°C en 25 minutes. Les courbes des différentes températures sont représentées sur la Figure 4 ci-après.



FIGURE 4: TEMPÉRATURES TOUT AU LONG DE L'EXPÉRIENCE 2

Ce graphique nous montre une montée significative et régulière des températures de surface. On remarque également un palier significatif à 100°C, sûrement dû à l'humidité contenue dans le sol. À la fin de l'expérience, une zone sèche en surface située sous la plaque chauffante a été constatée, due à l'évaporation de l'eau contenue dans le sol à cet endroit.

#### **EXPÉRIENCE 4**

Cette expérience, similaire à la précédente, a également été réalisée sur un sol humide dû à de la pluie, tombée lors de la nuit précédant l'expérience. La chauffe a débuté à 9h56 et a duré jusqu'à 13h56 (240 minutes). Les 500°C ont été atteint au bout de 1h20 de chauffe, le plafond des 600°C est atteint 1h40 plus tard. La température maximale enregistrée lors de cette expérience est de 627°C. Le refroidissement a pris plus de 3 heures. La durée totale de l'expérience a dépassé les 7 heures (398 minutes).

N°	Position	Zone	État			
1	Enterré plus profond au Sud		zone sèche			
2	Enterré superficie au Sud	zone noire				
3	Enterré superficie à l'Est		zone sèche			
4	Superficiel à l'Est	zone rouge				
5	Enterré plus profond à l'Est		zone humide			
6	Superficiel à l'Ouest	zone noire				
7	Enterré superficie au Nord	zone sèche				
8	Température ambiante au soleil					
9	Enterré plus profond au Nord		zone humide			
10	Sur la plaque					
11	Superficiel au Nord	zone rouge				
12	Enterré plus profond à l'Ouest		zone humide			
13	Température ambiante à l'ombre					
14	Enterré plus profond au Centre		zone humide			
15	Enterré à 1cm au Centre	zone marron	zone sèche			
16	Superficiel au sud	zone noire				
17	Enterré superficie à l'ouest	Zone marron	zone sèche			
18	Enterré à l'extérieur à l'Ouest					
19	Enterré à 4 cm au Centre		limite entre les zones (sec/humide)			
20	Superficiel au Centre	zone noire				

TABLEAU 2: POSITION DES THERMOCOUPLES EXPÉRIENCE 4

Placement des thermocouples pour l'expérience :

- en surface, sous la plaque: T16 au Sud; T11 au le Nord; T6 à l'Ouest et T4 à l'Est ;
- proche de la surface: T7 au Nord; T17 au l'Ouest; T2 au Sud et T3 à l'Est ;
- plus profondément dans le sol: T12 à l'Ouest ; T1 au Sud ; T9 au Nord et T5 à l'Est ;
- au centre : T20 à la surface, le T15 enterré à 1cm, T19 à 4 cm et T14 plus en profondeur (Tableau 2).

Des mesures de la température ambiante à l'ombre (T13), au soleil (T8) et de la plaque (T10) ont également été réalisées (Figure 5).



FIGURE 5: POSITION DES THERMOCOUPLES - EXP. 4





Contrairement aux données précédentes, ces courbes sont plus régulières. On remarquera en particulier celle représentant la chaleur de la plaque. Malgré des conditions d'expérience proches, un plus grand nombre de thermocouples a atteint des températures élevées situées entre 350°C et 450°C. Cela nous conforte dans l'intérêt de passer à une campagne d'expérimentation en laboratoire. Ces expériences visent à reproduire une forme hypothétique de foyers, déterminée à partir de modèles construits sur les foyers de terrain. Elles permettront d'isoler les variables à analyser, de maîtriser le contexte des expériences de façon précise et de tester les hypothèses émises.

Un modèle mathématique estime la distribution des températures dans le milieu grâce à l'équation suivante (Muhieddine 2009) :

$$\int_{t}^{t+\Delta t} T dt = [\alpha T - (1-\alpha)T^{0}] \Delta T$$

Cette équation dépend du facteur  $\alpha$  représentant la diffusivité thermique du milieu, qui doit être définie précisément afin d'obtenir une estimation correcte (March, Muhieddine, and Canot 2010). Les expériences réalisées en laboratoire sont faites avec un « sol » dont les caractéristiques sont connues : le sable de Fontainebleau. Ce sable est constitué exclusivement de grains de quartz dont la granulométrie est constante. La chauffe est contrôlée au moyen d'une plaque électrique et les thermocouples sont disposés de manière précise et constante en profondeur, afin de pouvoir comparer les résultats obtenus. Les expériences sont réalisées soit dans un tube de 20cm de profondeur et de diamètre de 13cm environ, soit dans un bac de 50cm de côté et de 30cm de profondeur, nous permettant de simuler un milieu semi-infini plus proche de la réalité que le tube de pyrex.

Une première série d'expériences a été réalisée dans le tube en pyrex afin d'obtenir le flux de chaleur passant dans le sol suivant la méthode de Laloy et Massart (Laloy and Massard 1984). La paroi en pyrex du tube et l'obligation de l'isoler afin d'obtenir une chauffe sans perte ne représentant pas la réalité, les premiers résultats n'ont pas été concluants. Le modèle informatique utilisé pour modéliser ce type

d'expérience ne prenant en compte qu'une dimension, l'altitude z des capteurs, notre réalité 3D n'est pas représentée (Muhieddine, Canot, and March 2008.).

Nous avons donc décidé de passer à un modèle plus proche de la réalité : le modèle 3D axisymétrique. Il prend en compte les trois dimensions dans une situation idéalisée de symétrie cylindrique. Deux paramètres sont alors pris en compte : l'altitude z et le rayon r par rapport à l'axe central du point de chauffe, ici la plaque en fonte (March, Muhieddine, and Canot 2010).

La seconde série d'expériences à été réalisée dans un bac représentant un milieu dispersif semi-infini plus proche de la réalité : la plaque chauffante a un diamètre de 12cm et le bac fait 50cm de côté. Il est suffisamment grand pour que la chaleur diffusée par la plaque et conduite par le sable se perde dans le milieu sans atteindre les bords, éliminant ainsi les effets de bords que nous avions avec le tube en pyrex. Les expériences ont était réalisées dans un cas simple de milieu sableux, homogène et sec afin de pouvoir constater les traces laissées par la chauffe sur le sol (rubéfaction).

Une série de trois expériences a été réalisée, deux similaires et une introduisant une perturbation due à la présence du cylindre de pyrex enterré dans le bac.

Méthode expérimentale :

- Chauffe à 600°C avec une montée en température brutale (moins de 10min pour arriver à 600°C);
- Chauffe de 6h ;
- Positionnement des thermocouples à 0cm, 1cm, 2cm, 3cm, 4cm, 7cm et 10cm environ, sur l'axe central de la plaque pour la première, deux séries pour la seconde une sur l'axe et une un peu excentrée à environ r=2cm ;
- Relevé de la zone de rubéfaction et fouille minutieuse afin d'obtenir les rayons et profondeurs de manière la plus précise possible.

Une méthode identique à celle des expériences précédentes a été appliquée à l'expérience 3, à la différence de l'enfouissement du cylindre de pyrex dans le sable afin de voir son influence sur le déroulement de la chauffe et le transfert de la chaleur. Lors de la mise en forme des paramètres requis pour la simulation afin d'y introduire le cylindre, nous avons remarqué que la diffusivité thermique du pyrex variait de manière non négligeable en fonction de la température. Cette constatation nous a imposé une nouvelle variable à prendre en compte, la diffusivité thermique, afin de réaliser un modèle dont les simulations soient toujours plus proches de la réalité. La diffusivité thermique est un des principaux éléments de l'équation sur laquelle est basé le modèle informatique. Ce nouveau paramètre avait déjà été exploré lors d'études précédentes mais n'avait pas été incorporé au modèle(Lucquin 2007). Nous avons donc intégré ces nouvelles données afin de tester notre hypothèse.

#### Résultats

Les résultats obtenus lors de ces trois expériences ont été comparés à ceux fournis par la simulation mathématique :



FIGURE 7: COMPARAISON DES COURBES DE TEMPÉRATURES ENTRE L'EXPÉRIENCE 1 ET LA SIMULATION – DIFFUSIVITÉ CONSTANTE

Pour cette expérience, les courbes obtenues étant trop différentes, la comparaison n'est pas concluante (Figure 7). Ces différences assez marquées peuvent s'expliquer par une expérience perturbée lors du relevé des positions des thermocouples. La méthode d'expérimentation a donc été réajustée afin de pouvoir obtenir des résultats fiables. Une expérience similaire a donc été réalisée afin d'obtenir des données exploitables (expérience 2).

Suite à l'expérience 2, nous avons pu tester la variation du modèle mathématique, grâce à la nouvelle hypothèse pour la diffusivité. Afin de tester la véracité du modèle ailleurs que sur l'axe central (représentant la plupart des simulations réalisées jusqu'à présent car plus facile à mettre en œuvre expérimentalement), une comparaison a été réalisée sur deux séries de thermocouples : une sur l'axe de symétrie de la plaque (Figure 8 et Figure 9) et une autre à un rayon d'environ r=2cm (Figure 10 et Figure 11).



FIGURE 8 : COMPARAISON DES COURBES DE TEMPÉRATURES ENTRE L'EXPÉRIENCE 2 ET LA SIMULATION – DIFFUSIVITÉ CONSTANTE





Dans le cas où les thermocouples sont situés sur l'axe de la plaque, on remarque une amélioration des courbes simulées se rapprochant sensiblement de la réalité expérimentale, jusqu'à être pratiquement confondues (Figure 8 et Figure 9).



FIGURE 10: COMPARAISON DES COURBES DE TEMPÉRATURES ENTRE L'EXPÉRIENCE 2 ET LA SIMULATION – DIFFUSIVITÉ CONSTANTE ET R VARIABLE



FIGURE 11: COMPARAISON DES COURBES DE TEMPÉRATURES ENTRE L'EXPÉRIENCE 2 ET LA SIMULATION – DIFFUSIVITÉ ET R VARIABLES.

On remarque également une meilleure approximation sur les courbes (Figure 10 et Figure 11) avec l'ajout du paramètre de la diffusivité variable du milieu par rapport à sa température, même si à r=2cm environ les résultats sont moins probants que lorsque les capteurs sont sur l'axe ou très proches (variables à améliorer).

La question qui se pose est la suivante : avec le paramètre de diffusivité variable, le modèle informatique peut-il reproduire plus précisément les conditions complexes de la réalité ?

Nous allons tester le modèle amélioré sur les expériences 2 et 4 du site « Les Sablins », présentées plus haut. Nous avons isolé les thermocouples situés au centre de la plaque afin d'obtenir un gradient d'altitude plus ou moins régulier, les autres thermocouples étant situés en périphérie de la plaque chauffante, donc moins bien placés pour les besoins de ce test.



FIGURE 12: COMPARAISON ENTRE LA SIMULATION (DIFF. VARIABLE) ET L'EXP. 4 DES SABLINS

La comparaison (Figure 12) met en avant plusieurs points:

- Les courbes sont totalement différentes et ne se confondent pas comme c'est le cas avec les expériences réalisées en laboratoire vues plus haut ;
- L'écart entre les courbes expérimentales et celles de la simulation reste assez constant (courbes 20 et 15) ;
- Une forte différence est observée, sûrement due au type de sol. Le sable de Fontainebleau et celui des Sablins présentant une différence de granulométrie, sa diffusivité doit donc changer par rapport à celle prise dans le modèle ;
- Enfin, la simulation a été réalisée à partir d'un modèle sur sol sec alors que l'expérience s'est déroulée sur un sol humide : on observe un palier à 100°C du à la chauffe de l'eau sur les T14 et T15 de l'expérience. Ce paramètre n'est pas pris en compte par le modèle.





Sur cette seconde série de courbe, les constatations faites sur l'expérience 2 sont confirmées avec la première série de courbes données par la simulation sur sol sec. Nous avons testé une variante du modèle qui modélise un sol humide (Muhieddine et al. 2011). Cependant le résultat n'est pas plus concluant que le précédent (Figure 13). Cette dernière version du modèle étant encore en phase de développement et de test, d'autres séries d'expériences en laboratoire seront nécessaires afin de pouvoir l'ajuster et lui permettre de se rapprocher de la réalité expérimentale sur sol réel.

Nous allons maintenant nous intéresser aux traces laissées par la chauffe lors des transformations thermiques du sol. Nous avons relevé les altérations thermiques produites sur le sol naturel et sur le sol en laboratoire :

Zone altérée	Profondeur maximum (cm)	périmètre (cm)	Surface (cm <sup>2</sup> )	
Sablins 2	0,95	95,4	708,54	
Sablins 4	1,87	90,71	643,43	
Exp bac 1	5,5	50,24	200,96	
Exp bac 2	6,2	50,868	206,0154	
Exp bac 3	5,3	47,1	176,625	

TABLEAU 3: CARACTÉRISTIQUES DE LA ZONE RUBÉFIÉE DANS LES DIFFÉRENTES EXPÉRIENCES

Dans le cas des expériences en laboratoire où le sol est sec, la rubéfaction est plus importante que lorsque le sol est humide comme dans le cas des expériences de terrain. On remarque une similarité entre les deux séries d'expériences, les zone altérées ont des caractéristiques semblables quand les expériences sont réalisées dans des conditions similaires. De plus, la limite de la zone rubéfiée dans les expériences menées en laboratoire correspond à la zone où la température arrive à 300°C environ, température particulière à partir de laquelle le sol est transformé et coloré.

## LES ROCHES THERMO-ALTÉRÉES

De la même façon que la chaleur affecte les sols, elle transforme les roches qui sont présentes dans les foyers. Pour comprendre la nature réelle de leur utilisation, nous devons d'abord comprendre comment ces roches ont été transformées sous l'effet de la chaleur et dans quelles conditions, ainsi nous devons d'abord essayer de déterminer le mode de fonctionnement de ces foyers.

Pour comparer les données obtenues expérimentalement à la réalité archéologique, une seconde série d'expériences a été réalisée avec un véritable foyer sur la base d'un foyer en cuvette afin de pouvoir étudier l'effet de la chaleur sur les roches.

L'étude a été réalisée sur une expérience de la campagne de 2009 réalisée sur le site des Sablins, nommée expérience 5 lors de cette campagne.

#### MATÉRIEL ET MÉTHODE

Pour cette expérience, une cuvette de 80 cm de diamètre et de 15cm de profondeur a été creusée (Figure 14). Au moment de l'allumage du feu le sol était humide. La procédure a été la suivante:

- le feu de bois a été allumé sur le fond de la cuvette à 10h16 et a été entretenu pendant une heure ;
- les galets de silex ont ensuite été disposés sur les braises ;
- le tout a été couvert de bois et le feu rallumé.

L'expérience a duré jusqu'à 12h10 soit presque 120 minutes. L'enregistrement a continué jusqu'à 21h20.

Position	Prof.	Zone	État
Enterré à 2 cm à l'Est	20 cm du centre	Zone rouge	
Température ambiante			
Superficiel au Sud, bord	35 cm du centre	Zone noire	
Superficiel à l'Ouest, bord	35 cm du centre	Zone noire	
Enterré à 2cm au Sud	20 cm du centre	Zone rouge	
Sur le silex			
Enterré à 2cm au Nord	20 cm du centre		zone sèche
Enterré à 2cm à l'Ouest	20 cm du centre	Zone rogue	
Sur les brasses			
Sur le silex			
Superficiel au Sud, mi-hauteur	20 cm du centre	Zone rouge	
Superficiel au Nord, bord	35 cm du centre		zone sèche
Superficiel au Nord, mi-hauteur	20 cm du centre	Zone rouge	
Sur le silex			
Enterré à 1cm au Centre	0 cm du centre		zone humide
Superficiel à l'Est, mi-hauteur	20 cm du centre	Zone rouge	
Superficiel à l'Est, bord	35 cm du centre		zone sèche
Superficiel à l'Ouest, mi-hauteur	20 cm du centre	Zone rouge	
Enterré à 4cm au Centre	0 cm du centre		zone humide
Superficiel au Centre, Fond	0 cm du centre	Zone noire	
	PositionEnterré à 2 cm à l'EstTempérature ambianteSuperficiel au Sud, bordSuperficiel à l'Ouest, bordEnterré à 2cm au SudSur le silexEnterré à 2cm au NordEnterré à 2cm à l'OuestSur les brassesSur le silexSuperficiel au Sud, mi-hauteurSuperficiel au Nord, bordSuperficiel au Nord, mi-hauteurSuperficiel à l'Est, mi-hauteurSuperficiel à l'Est, bordSuperficiel à l'Ouest, mi-hauteurSuperficiel à l'Ouest, mi-hauteurSuperficiel à l'Est, bordSuperficiel à l'Ouest, mi-hauteurSuperficiel à l'Ouest, mi-hauteurSuperficiel à l'Ouest, mi-hauteurSuperficiel à l'Est, bordSuperficiel à l'Ouest, mi-hauteurSuperficiel à l'OuestSuperficiel à l'OuestSuperficiel à l'OuestSuperficiel au Centre </td <td>PositionProf.Enterré à 2 cm à l'Est20 cm du centreTempérature ambiante</td> <td>PositionProf.ZoneEnterré à 2 cm à l'Est20 cm du centreZone rougeTempérature ambiante35 cm du centreZone noireSuperficiel au Sud, bord35 cm du centreZone noireSuperficiel à l'Ouest, bord35 cm du centreZone noireEnterré à 2cm au Sud20 cm du centreZone rougeSur le silex20 cm du centreEnterré à 2cm au NordEnterré à 2cm au Nord20 cm du centreZone rogueSur le silex20 cm du centreZone rougeSuperficiel au Sud, mi-hauteur20 cm du centreZone rougeSuperficiel au Nord, bord35 cm du centreZone rougeSuperficiel au Nord, mi-hauteur20 cm du centreZone rougeSuperficiel au Nord, mi-hauteur20 cm du centreZone rougeSuperficiel au Nord, mi-hauteur20 cm du centreZone rougeSuperficiel à l'Est, mi-hauteur20 cm du centreZone rougeSuperficiel à l'Est, bord35 cm du centreZone rougeSuperficiel à l'Ouest, mi-hauteur20 cm du centreZone rougeSuperficiel à l'Cuest, mi-hauteur20 cm du centreZone rougeSuperficiel à l'Cuest, m</td>	PositionProf.Enterré à 2 cm à l'Est20 cm du centreTempérature ambiante	PositionProf.ZoneEnterré à 2 cm à l'Est20 cm du centreZone rougeTempérature ambiante35 cm du centreZone noireSuperficiel au Sud, bord35 cm du centreZone noireSuperficiel à l'Ouest, bord35 cm du centreZone noireEnterré à 2cm au Sud20 cm du centreZone rougeSur le silex20 cm du centreEnterré à 2cm au NordEnterré à 2cm au Nord20 cm du centreZone rogueSur le silex20 cm du centreZone rougeSuperficiel au Sud, mi-hauteur20 cm du centreZone rougeSuperficiel au Nord, bord35 cm du centreZone rougeSuperficiel au Nord, mi-hauteur20 cm du centreZone rougeSuperficiel au Nord, mi-hauteur20 cm du centreZone rougeSuperficiel au Nord, mi-hauteur20 cm du centreZone rougeSuperficiel à l'Est, mi-hauteur20 cm du centreZone rougeSuperficiel à l'Est, bord35 cm du centreZone rougeSuperficiel à l'Ouest, mi-hauteur20 cm du centreZone rougeSuperficiel à l'Cuest, mi-hauteur20 cm du centreZone rougeSuperficiel à l'Cuest, m

#### TABLEAU 4: POSITION DES THERMOCOUPLES - EXP. 5

Les vingt thermocouples ont été disposés autour de l'expérience (Tableau 4). Afin d'enregistrer de manière plus globale la température du foyer des capteurs ont été disposés :

- au bord de la cuvette (35 cm du fond), T12 (Nord), T3 (Sud), T4 (Ouest) et T17 (Est) ;
- à mi-hauteur (20 cm du fond), enterrés : T1 (Est), T5 (Sud), T7 (Nord) et T8 (Ouest) ;
- en surface : T11 (Sud), T13 (Nord), T16 (Est) et T18 (Ouest) ;
- au fond, T15 (enterré à 1 cm), T19 (enterré à 4 cm) et T20 (surface) ;
- on a placé également T6, T10 et T14 sur le silex, sous la seconde charge de bois, et T9 sur la première charge de braises (Figure 14).

Pour commencer le feu, 0,85 kg de branches et 6,14 kg de buches ont été brulées. Quelques minutes après 0,32 kg et 3,21 kg de bois ont été ajoutés. À 10h40, 3,06 kg de bois de plus a été utilisé. Une fois les silex placés, 9,25 kg de bois et 0,56 kg de branches ont été additionnés à la structure.



FIGURE 14: POSITION DES THERMOCOUPLES - EXP. 5

Les roches utilisées pour réaliser cette expérience se composent de:

- 27 silex dont le poids total est de 16,8 kg;
- 3 grès avec un poids total de 6,6 kg ;
- et une meulière de 2,2 kg (Figure 15).

Le poids total de roche est 25,68 kg (Tableau 5).

Nom	Surface	Périmètre	Largeur	Longueur	Matinière première	N°	Poids
Roche A	189,42	52,71	16,40	17,16	Meulière	53	2,23
Roche B	158,20	49,05	17,24	13,62	Grès	55	1,04
Roche C	191,67	52,66	16,01	17,32	Grès	56	2,79
Roche D	257,25	64,06	15,33	23,82	Grès	54	2,79
Roche E	71,14	35,57	8,08	13,49	Silex	6	0,54
Roche F	97,79	41,78	9,70	15,00	Silex	26	0,85
Roche G	28,08	19,64	5,84	6,83	Silex	19	0,39
Roche H	36,85	22,87	8,00	6,50	Silex	10	0,35
Roche I	100,12	40,40	9,86	15,57	Silex	32	0,88
Roche J	97,02	37,08	13,46	10,21	Silex	1	1,22
Roche K	40,47	22,80	7,08	7,46	Silex	38	0,36
Roche L	109,50	46,78	13,43	14,57	Silex	8	1,36
Roche M	104,24	38,64	13,26	10,74	Silex	47	1,49
Roche N	102,23	43,96	9,68	17,34	Silex	31	1,32
Roche O	131,95	52,89	12,98	20,20	Silex	2	0,71
Roche P	126,67	51,71	12,27	18,91	Silex	11	0,71
Roche Q	42,68	25,84	9,00	6,94	Silex	39	0,31
Roche R	61,53	31,57	11,42	8,02	Silex	28	0,64
Roche S	41,84	24,65	6,62	7,65	Silex	17	0,35
Roche U	41,09	23,79	8,21	6,84	Silex	9	0,35
Roche V	45,82	26,16	8,73	7,32	Silex	16	0,37
Roche W	25,65	19,81	7,99	4,29	Silex	46	0,25
Roche X	90,62	38,27	11,99	10,48	Silex	12	0,91
Roche Y	71,11	32,04	8,55	11,54	Silex	3	1,06
Roche Z	45,04	25,74	7,29	8,36	Silex	4	0,44
Roche Za	46,56	24,49	8,76	7,02	Silex	25	0,32
Roche Zb	42,96	25,00	8,99	6,59	Silex	13	0,42
Roche Zc	81,01	36,85	14,49	9,38	Silex	48	0,84
Roche Zd	38,71	23,46	8,51	6,82	Silex	7	0,48
Roche Ze	59,54	30,18	11,91	6,96	Silex	42	0,64
Roche Zf	60,19	32,75	12,67	9,46	Silex	5	0,33
Totaux	2636,95	1093,20	333,73	346,39	31	763	26,74
Moyenne	71,11	32,75	9,70	9,46		19,00	0,64
TABLEAU 5: ROCHES UTILISÉES LORS DE L'EXPÉRIENCE 5 SUR LE SITE "LES SABLINS"							

La surface totale occupée par les roches dans ce foyer est de 2.636,95 cm<sup>2</sup>, dans une cuvette de 4.639,97 cm<sup>2</sup>. La roche ayant la plus grande surface est la D (ou 54) avec 257,25 cm<sup>2</sup> et un poids de 2,79kg, et celle ayant la plus petite avec 25,65 cm<sup>2</sup> est la roche W (ou 46) avec un poids de 0,25kg. La surface moyenne des roches est de 71,11 cm<sup>2</sup>, ce qui englobe la plupart des roches utilisées et le poids moyen est de 0,64kg. La Figure 16 montre que les grès sont les roches les plus lourdes et celles qui occupent la plupart de la surface, alors qu'ils ne sont que peu nombreux (n=3).



FIGURE 15: ROCHES AVANT ET APRÈS LA CHAUFFE - EXP. 5



FIGURE 16: DISPOSITION DES ROCHES SUR LE FOYER AVANT LA CHAUFFE - EXP. 5

Chaque roche a été minutieusement relevée à la suite de l'expérience, ainsi que l'ensemble des éclats thermique occasionnés par la chauffe. Chacune des roches a été analysée, lors de l'enregistrement dans une base de données similaire à celle utilisée lors de l'étude des foyers fouillés sur ce site (Lemoine and March 2008) afin de relever par exemple :

- la couleur et la position des thermo-altérations ;
- Les caractéristiques inhérentes à celles-ci (poids, longueur, largeur,...);
- La position dans le foyer.

Il est ainsi plus facile de croiser les données afin de les interpréter et de les comparer aux données archéologiques.

#### Résultats

Un total de 306 roches a été analysé et enregistré, dont 295 sont des silex. Nous considérons comme roche tout éclat de plus de 3cm. Un grand nombre d'éclats (environ 2000) de plus de 1cm a été relevé et comptabilisé. Les esquilles ne sont pas prises en compte ici (les données n'ayant pas pu être obtenues) mais environ 1,3kg d'esquilles de moins de 1cm sur les 26kg de roches initiales ont été récupéré, ce qui représente environ 5% du poids des éléments retrouvés.

#### THERMO-ALTÉRATION

Lors de la chauffe, les roches sont altérées par la chaleur et les changements brutaux de température. Nous avons donc relevé ces altérations par couleurs indiquant une température probable de chauffe (Figure 17) :



FIGURE 17: RÉPARTITION DES THERMO-ALTÉRATIONS SUR LES ROCHES

La couleur des thermo-altérations nous indique une fourchette de températures, les silex blanchissent à haute température (+600°C) et commençant à se colorer en rouge ou gris à partir de 350/400°C. Ces domaines de températures nous permettent d'estimer la température atteinte lors de l'activité du foyer. Cela nous permet également d'identifier les zones plus ou moins chaudes car dans ce type de foyer la température n'est pas uniforme. Si la coloration est insuffisante, un autre indice peut nous aider à déterminer ces zones et à décrire l'activité du foyer : la fragmentation des silex qui est proportionnelle à l'augmentation de la température.

#### FRAGMENTATION

Nous allons voir dans un premier temps la répartition des roches et des éclats thermiques dans le foyer (Figure 18) :



FIGURE 18: RÉPARTITION DES ROCHES DANS LE FOYER

Le quart Sud-Est se démarque des autres par la grande quantité d'éclats situés à cet endroit. Nous pouvons en déduire que c'est la zone où il y a eu le plus de fragmentation dans les roches, donc les plus grands écarts en température. Cette constatation est confirmée par les températures relevées lors de la chauffe : elles montent jusqu'à 900°C et oscillent fortement, entrainant de fort changements de température, donc une fragmentation accrue (Tableau 6). On notera que plus le taux est proche de 0, plus la fragmentation est intense.

	Température max	Nombre de fragments	Poids (g)	Taux de fragmentation	Poids moyen fragment (g)
1/4 NE	850°C	11	1785,43	0,363636364	162,3118182
1/4 NO	800°C	73	4264,71	0,109589041	58,42068493
1/4 SO	650°C	68	3912,17	0,073529412	57,53191176
1/4 SE	900°C	83	5181,72	0,108433735	62,43036145
Global	900°C	295	15372,58	0,088135593	52,11044068

TABLEAU 6: DESCRIPTION DU TAUX DE FRAGMENTATION DES ROCHES EN ÉCLATS DE PLUS DE 3CM

#### COMPARAISON AVEC LES DONNÉES ARCHÉOLOGIQUES

Nous allons nous intéresser au foyer CG16 du site des Sablins. Si deux foyers ont été fouillés, seules les données de celui-ci ont été traitées, avec une méthode similaire à celle utilisée pour traiter les données expérimentales : la base de données. Sur 212 roches répertoriées, 75 peuvent être considérées comme des esquilles soit 35% de la totalité des roches relevées. Ces 135 roches ont un poids total de 5,35kg. La majorité des roches, soit 97% des éléments répertoriés, sont des silex ; un ratio similaire à celui de notre expérience dont 96,5% des éléments enregistrés sont des silex. Il est également intéressant de comparer le nombre d'éclats thermiques relevés dans ces deux foyers : dans le foyer CG16, 65% des roches sont considérés comme des éclats thermiques contre 90% pour le foyer expérimental. Cette première divergence est peut-être due à une chauffe moindre des silex du foyer CG16. Nous allons voir si cette hypothèse se confirme en comparant les thermo-altérations de roches (Figure 19) :



FIGURE 19: DISTRIBUTION DES THERMO-ALTÉRATIONS DANS LE FOYER CG16

On remarque une similarité dans la répartition des oxydations : il y a un plus fort ratio d'oxydations totales pour celles rouge et le contraire pour les grises et les blanches dans les deux foyers. Il y a plus d'oxydations globales dans le foyer CG16 (37%) que dans notre foyer expérimental (19%) et la présence d'oxydations ponctuelles est à noter dans le CG16, alors qu'elles sont presque inexistantes dans l'expérience.

On observe une forte différence entre la réalité archéologique et la réalité expérimentale. Si le taux de fragmentation roches/éclats thermiques de plus de 3cm est similaire dans les deux cas (environ 11), il y a une très grande différence avec les éclats plus petits, qui sont extrêmement nombreux dans notre expérimentation et presque inexistants dans le foyer archéologique. Le taux de fragmentation expérimental éclats/esquilles est de 7 environ alors que pour celui calculé pour le foyer archéologique est de 0,5. Si l'on considère que ces foyers ont eu un fonctionnement similaire, il manque alors environ un millier d'esquilles (1 à 3cm) qui auraient été produites lors de la chauffe du foyer CG16. Cette absence presque totale de petits éclats reste pour le moment une question sans réponse.

### **CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES**

Lors de cette étude, nous nous sommes penchés sur les processus de transformation des matériaux supports sols et roches (galets de silex) des structures de combustion du site « Les Sablins ». Afin de mieux comprendre le fonctionnement de ces structures, nous avons utilisé une approche expérimentale nous permettant d'obtenir la totalité des informations initiales et finales, contrairement aux données archéologiques.

Nous nous sommes attachés à mieux comprendre ces processus par l'étude et la modélisation du phénomène de transfert thermique dans le sol. Nous avons amélioré et précisé le modèle informatique sur un sol simple (sable de Fontainebleau) afin de pouvoir passer sur un sol réel. La prochaine étape sera d'expérimenter dans des conditions de laboratoire, sur un sol du site, afin de préciser notre modèle et d'observer de manière plus rigoureuse les transformations de ce milieu sous l'action de la chaleur. Si nous avons maintenant une compréhension globale du comportement du milieu sableux sec sous l'action d'une chauffe intense, le comportement d'un milieu humide est plus complexe et constitue une étape supplémentaire à franchir avant de pouvoir comprendre le fonctionnement des foyers réels.

Cette étude nous a également permis d'observer l'apparition de transformations visibles à partir de 300/400°C sur deux supports : le sol sableux et les roches siliceuses. Ce seuil de température apparait comme étant la température minimale nécessaire afin d'observer des transformations thermiques sur ces milieux, autre que les dépôts noirs dus à la cendre et aux charbons. Cette limite paraît intéressante et nécessite d'être mieux précisée et étudiée afin de mieux comprendre la dynamique de ces changements. Il sera nécessaire d'obtenir plus de données archéologiques afin de mieux comprendre les phénomènes de transformations des roches et le fonctionnement de ces structures. En effet, dans la dernière partie de cette étude, nous avons remarqué un phénomène étonnant laissant en suspens plusieurs questions : Le foyer CG16 a-t-il été remanié ? La chauffe a-t-elle été différente ? Plus douce ? Les roches ont-elles été déplacées chaudes ? Froides ? Dans quel but ? Autant de questions amenant vers de nouvelles hypothèses à évaluer lors d'expérimentations, ou à être mises en lumière par la découverte de nouvelles données lors de futures fouilles. Les foyers de ce site n'ont pas encore révélé tous leurs mystères.

# BIBLIOGRAPHIE

- Laloy, J., and P. Massard. 1984. "Nouvelle méthode thermique d'étude des foyers préhistoriques." *Revue d'Archéometrie* no. 8:33-40.
- Lemoine, K., and Javier Ramiro March. 2008. Les structures de combustion de l'habitat néolithique du « Clos des Gués » Pezou (Loir-et-Cher).
- Lucquin, Alexandre. 2007. Étude physico chimique des méthodes de cuisson pré et protohistoriques. Thèse de Doctorat, Science de la Matiere, Université de Rennes 1, Rennes.
- March, Javier Ramiro, Mohamad Muhieddine, and É Canot. 2010. "Simulation 3D des structures de combustion préhistoriques." In *In Actes du colloque Virtual Retrospect 2009*, edited by R. Vergnieux and C. Delevoie, 1-18. Ausonius. Bordeaux: Collection Archéovision N° 4.
- Muhieddine, Mohamad. 2009. *Simulation numérique des structures de combustion préhistoriques*, Mention « Informatique », PhD Dissertation, University of Rennes 1.
- Muhieddine, Mohamad, Édouard Canot, and Javier Ramiro March. 2008. "Numerical Solution for a 1-D Time Dependent Phase Change Problem. In " In *Proc. of the WCCM8 and Fifth ECCOMAS*, edited by Schrefler and Perego. Venise, Italy June 30-July 4, CD-ROM CIMNE B.A. Document a1317.
- Muhieddine, Mohamad, Édouard Canot, Ramiro Javier March, and R. Delannay. 2011. "Coupling heat conduction and water-steam flow in a saturated porous medium." *International Journal for Numerical Methods in Engineering* no. 85 (11):1390-1414. doi: 10.1002/nme.3022.
- Philippe, Michel, Vianney Rassart, Murielle Meurisse-Fort, Guillaume Gosselin, Javier Ramiro March, Sylvain Rassat, Colas Guéret, Jean-Paul Caspar, Claire Cohen, and Pascale Le Roy-Lafaurie.
  2011. "Les horizons néolithiques du site des "Sablins" Étaples (Pas-de-Calais) Résultats préliminaires du programme 2003-2009." *Le Néolithique du Nord de la France dans son contexte européen.* no. 28:1-10.