

# Simulation numérique couplée des transferts thermo-aérauliques dans la grotte de Lascaux

W. TARAFT<sup>1</sup>, F. SALMON<sup>2</sup>, D. LACANETTE<sup>3</sup>, E. ABISSET-CHAVANNE<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, I2M, UMR 5295, F-33400, Talence, France, [valid.taraft@u-bordeaux.fr](mailto:valid.taraft@u-bordeaux.fr)

<sup>2</sup> Inria, Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, IMB, UMR 5251, 200 Avenue de la Vieille Tour, Talence, 33405, France, [fabien.salmon@inria.fr](mailto:fabien.salmon@inria.fr)

<sup>3</sup> Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, I2M, UMR 5295, F-33400, Talence, France, [delphine.lacanette@u-bordeaux.fr](mailto:delphine.lacanette@u-bordeaux.fr)

<sup>4</sup> Arts et Métiers Institute of Technology, CNRS, Bordeaux INP, I2M, UMR 5295, F-33400 Talence, France, [emmanuelle.abisset-chavanne@ensam.eu](mailto:emmanuelle.abisset-chavanne@ensam.eu)

---

**Résumé :** Cette étude présente une approche de simulation numérique avancée destinée à analyser les écoulements thermo-aérauliques au sein de la grotte de Lascaux. Le couplage des codes NOTUS et OpenFOAM permet de modéliser conjointement la conduction thermique dans le massif rocheux et la convection naturelle de l'air dans la cavité, tout en intégrant les phénomènes de condensation et d'évaporation sur les parois. Les premiers résultats mettent en évidence la distribution thermique ouvrant des perspectives à des zones favorables à la condensation, fournissant ainsi des éléments essentiels pour la préservation durable du microclimat et du patrimoine pariétal de la grotte de Lascaux.

**Mots clefs:** Grotte de Lascaux, simulation numérique, convection naturelle, condensation, OpenFoam, NOTUS.

---

## 1. Introduction

Classée au Patrimoine mondial de l'UNESCO, la grotte de Lascaux représente un patrimoine culturel d'une valeur inestimable. La préservation de ses peintures pariétales, vieilles de près de 20 000 ans [ref a], dépend étroitement du microclimat interne de la cavité, lui-même fortement influencé par les conditions environnementales extérieures. Dans ce contexte, la modélisation physique et la simulation numérique constituent des outils essentiels pour comprendre, anticiper et contrôler les phénomènes thermiques et aérauliques susceptibles de perturber l'équilibre du climat souterrain. La Figure 1 illustre la géométrie de la grotte de Lascaux, mettant en évidence la configuration complexe de la cavité et les zones d'intérêt étudiées dans ce travail. La première phase de cette étude a été consacrée à la modélisation de la conduction thermique au sein du massif rocheux entourant la grotte, réalisée à l'aide du code CFD NOTUS [ref b], développé au sein du laboratoire I2M (Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux). Cette approche vise à caractériser avec précision les transferts thermiques couplés entre la roche et l'air intérieur, en prenant en compte les hétérogénéités du matériau. Les travaux de Salmon et al. [1] ainsi que ceux de Lharti et al. [2], portant sur la caractérisation des propriétés thermiques du massif de Lascaux par méthodes inverses, ont constitué des références fondamentales pour la définition des conditions initiales et limites présentant la validation du modèle de conduction. Dans un second temps, les efforts se sont orientés vers la modélisation de la convection naturelle de l'air dans la cavité. La convection naturelle globale est également simulée avec NOTUS, mais les phénomènes de changement de phase nécessitant une plus grande précision aux parois, un autre code de calcul doit être utilisé. Notre choix s'est porté sur le logiciel OpenFOAM qui possède des modules permettant de résoudre les phénomènes physiques tels que la condensation et l'évaporation à proximité des parois. Cet outil permet la génération de maillages non structurés, mieux adaptés à la géométrie complexe de la grotte, et offrant une meilleure résolution des gradients locaux de température et

d'humidité. Les champs simulés sous NOTUS (température et vitesse) ont été exportés au format CSV, puis interpolés spatialement à l'aide de la méthode du plus proche voisin, afin de servir de conditions initiales et limites aux simulations réalisées sous OpenFOAM. Le présent article décrit l'ensemble de la chaîne de modélisation numérique, depuis la simulation de la conduction thermique et de la convection thermique sous NOTUS jusqu'à l'interfaçage des données vers OpenFOAM. Il présente également les premiers résultats obtenus concernant la distribution thermique et la convection naturelle dans la cavité de la grotte de Lascaux, mettant en évidence des gradients de température caractéristiques des zones potentiellement propices à la condensation. Par ailleurs, la physique de la condensation dans les grottes est détaillée dans la référence [3].

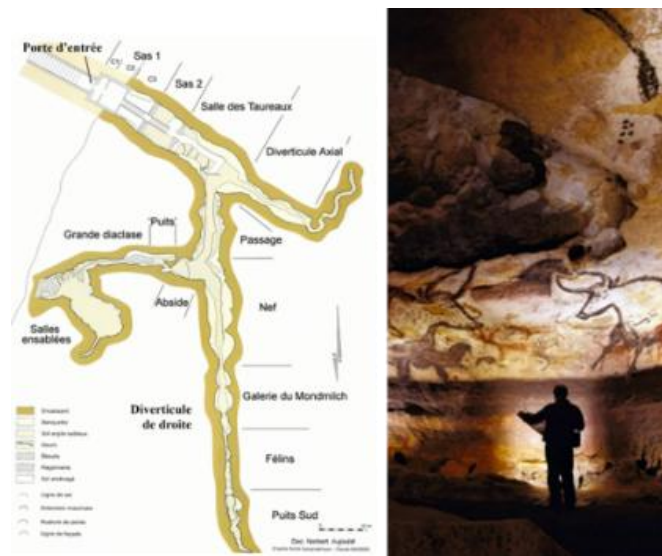


Figure 1: La grotte de Lascaux

## 2. Matériels et méthodes

### 2.1. Présentation générale de l'approche

L'étude repose sur une démarche de simulation numérique couplée visant à modéliser les phénomènes thermo-aérauliques au sein de la grotte de Lascaux. Deux environnements de calcul complémentaires ont été mobilisés :

- Le code NOTUS, dédié à la simulation des transferts conductifs dans le massif rocheux entourant la cavité ainsi que convectifs à l'intérieur de la grotte.
- Et le logiciel OpenFOAM, utilisé pour la modélisation des écoulements d'air locaux et des phénomènes de condensation/évaporation localisés proches de parois.

Cette double approche permet de relier les transferts thermiques dans la roche aux dynamiques de convection naturelle dans l'air, en garantissant la cohérence thermique entre les deux modèles.

### 2.2. Conduction à travers le massif rocheux

L'étude de la conduction thermique à travers le massif rocheux constitue la première étape de la modélisation du microclimat de la grotte de Lascaux. Cette phase vise à déterminer le champ de température transitoire sur l'ensemble des parois internes, qui servira ensuite de condition aux limites pour la simulation de la convection naturelle dans la cavité.

### 2.2.1. Modèle physique

L'équation d'énergie résolue dans chaque maille s'écrit :

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (1)$$

Avec :

- $\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}$ : terme temporel, où  $\rho$  est la densité du matériau,  $C_p$  la capacité thermique massique, et  $\frac{\partial T}{\partial t}$  la dérivée temporelle de la température.
- $\nabla \cdot (\lambda \nabla T)$ : terme diffusif, où  $\lambda$  est la conductivité thermique (W/m·K) du matériau, considérée isotrope.
- La diffusivité thermique est définie par la relation :

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (2)$$

Où  $\alpha$  s'exprime en  $m^2 \cdot s^{-1}$ .

### 2.2.2. Méthodes numériques

Les calculs sont effectués à l'aide du logiciel NOTUS, qui permet la modélisation du massif rocheux dans son intégralité, soit un volume d'environ  $1,66 \times 10^5 m^3$ , à l'aide d'un maillage cartésien, le solveur résout l'équation de la chaleur sous sa forme tridimensionnelle, permettant d'obtenir une évolution temporelle du champ thermique dans le milieu solide.

Les conditions aux limites et la configuration numérique sont établies en s'appuyant sur les travaux de Salmon et al. [1], qui ont étudié les transferts thermiques au sein du massif rocheux entourant la grotte de Lascaux. Leur approche a permis de définir des propriétés thermiques et géométriques cohérentes avec la réalité géologique du site, assurant ainsi la représentativité physique du modèle.

Afin de prendre en compte la nature hétérogène du massif rocheux, les valeurs de conductivité thermique et de capacité calorifique ont été ajustées selon les travaux de Lharti et al. [2], qui ont caractérisé les propriétés thermiques du massif de Lascaux par méthodes inverses. Le solveur construit à partir de cette équation un système matriciel discrétisé, puis calcule la température au centre de chaque maille par la méthode des différences finies. Ce processus est répété à chaque pas de temps, permettant de reconstituer le champ de température évolutif dans le massif et sur les parois internes de la cavité.

### 2.3. Convection naturelle dans la cavité sous NOTUS

L'étude de la convection naturelle de l'air à l'intérieur de la grotte de Lascaux constitue la deuxième étape du processus de modélisation du microclimat souterrain. Elle vise à reproduire les mouvements d'air induits par les gradients thermiques entre les parois rocheuses et le volume d'air interne, afin d'évaluer leur influence sur la distribution de température et la circulation aéraulique.

Dans NOTUS, le couplage entre la conduction thermique dans le massif rocheux et la convection naturelle dans la cavité est réalisé de manière séquentielle : le champ de température transitoire calculé dans le massif fournit les températures de paroi imposées comme conditions aux limites thermiques pour l'écoulement d'air dans la cavité. Cette approche garantit la cohérence thermique entre le milieu solide et le fluide, tout en limitant le coût numérique du calcul couplé.

### 2.3.1. Modèle physique

Le modèle de convection naturelle est basé sur la résolution des équations de Navier–Stokes incompressibles couplées à l'équation de l'énergie.

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (4)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \right) = -\nabla P + \rho(1 - \beta(T - T_0))g + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (5)$$

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (6)$$

où :

- $\rho$ : densité de l'air ( $\text{kg/m}^3$ ) à la température  $T_0$ ,
- $\vec{V}$ : vecteur vitesse du fluide ( $\text{m.s}^{-1}$ ),
- $P$ : pression (Pa),
- $\mu$ : viscosité dynamique ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ),
- $\beta$ : coefficient de dilatation thermique ( $\text{K}^{-1}$ ),
- $g$ : accélération de la pesanteur ( $\text{m.s}^{-2}$ )

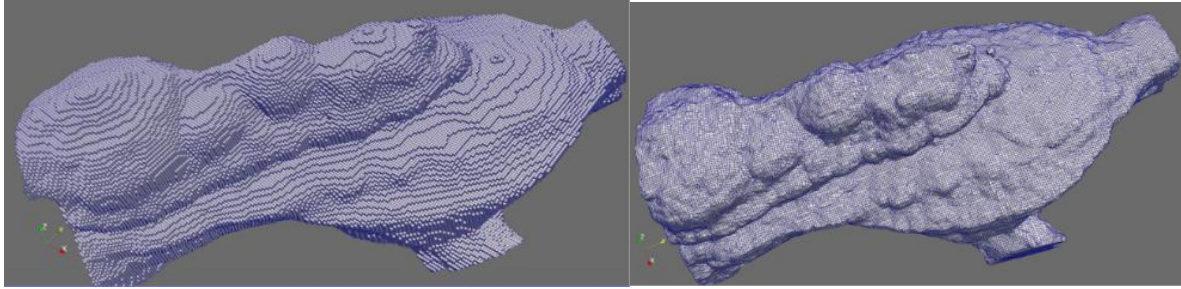
Il faut noter que la viscosité ainsi que la conductivité thermique dans ce système d'équation correspondent à la somme de la grandeur physique correspondante et de leur composante turbulente. Cette dernière est modélisée à l'aide du modèle WALE (Wall-Adapting Local Eddy-viscosity), reconnu pour sa bonne adaptation aux régions proches des parois, tandis que la conductivité turbulente est calculée à partir de l'hypothèse d'un nombre de Prandtl turbulent constant égal à 0,85 Nicoud et Ducros [4].

### 2.3.2. Méthodes numériques

Notus résout les équations de la dynamique des fluides incompressibles en prenant en compte les effets de flottabilité thermique à travers l'approximation de Boussinesq. Le domaine de calcul correspond à la géométrie tridimensionnelle de la grotte, discrétisée à l'aide d'un maillage cartésien composé de cellules de 4cm de côté. Offrant un compromis entre résolution spatiale et coût de calcul. Les conditions aux limites appliquées sur les parois ainsi que le champ de température initial proviennent directement du champ thermique transitoire calculé lors de la phase de conduction. Le calcul fournit l'évolution temporelle des champs de vitesse, de température et de pression dans la cavité.

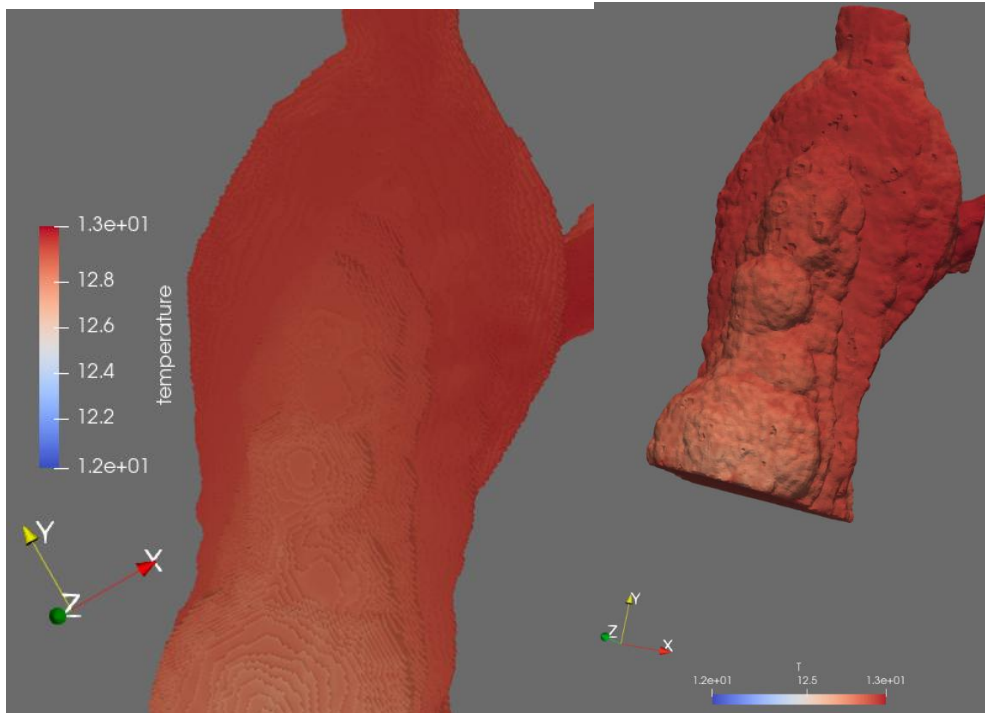
## 2.4. Passage à OpenFOAM et modélisation multiphasique

L'objectif de cette étape est de simuler les phénomènes de condensation à une échelle millimétrique, afin de représenter avec une plus grande précision les transferts de chaleur et de masse à l'interface air/paroi. Cette modélisation fine est essentielle pour comprendre les mécanismes de formation des films liquides sur les surfaces rocheuses, ainsi que leur rôle dans la régulation thermique et hygrométrique du microclimat de la grotte. Pour cette phase, le logiciel OpenFOAM a été utilisé. Ce code open source de mécanique des fluides numérique repose sur un maillage non structuré, particulièrement adapté à la géométrie complexe de la grotte de Lascaux, comme illustré en Figure 2.



**Figure 2:** Comparaison entre un maillage structuré (NOTUS, à droite) et un maillage non structuré (OpenFOAM, à gauche) de la Salle des Taureaux, obtenu à l'aide de la commande snappyHexMesh d'OpenFOAM, telle que décrite dans [6]

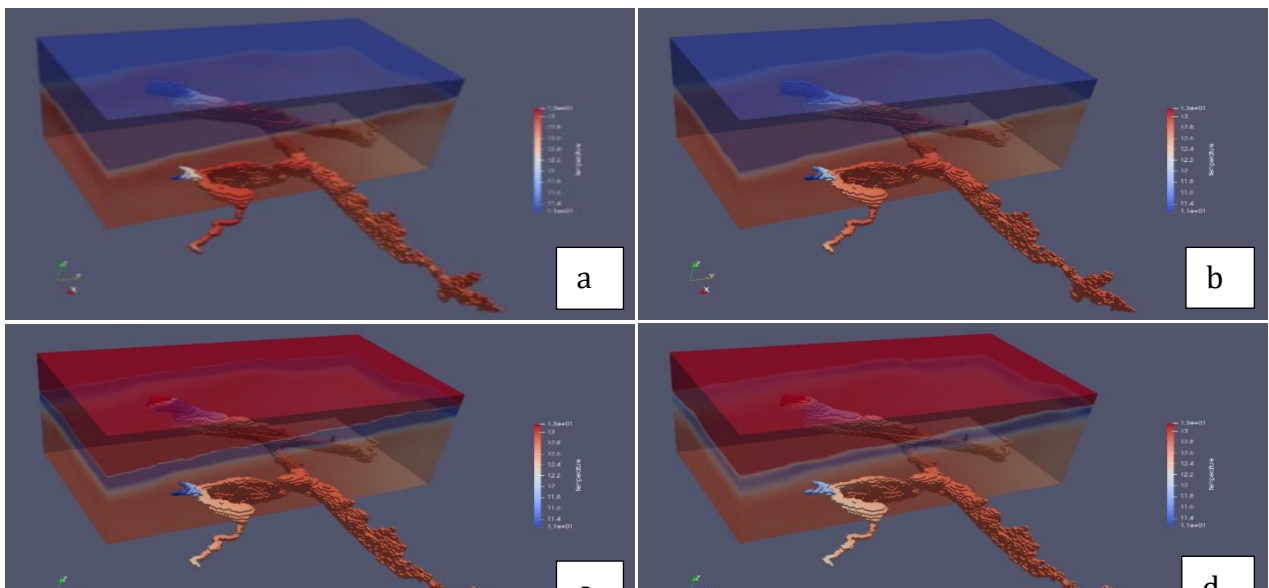
Ce type de maillage permet de mieux représenter la surface des parois par rapport à un maillage cartésien et ainsi améliorer la précision du calcul des forts gradients thermiques et hydriques locaux ainsi que les phénomènes de condensation. Les calculs sont réalisés à l'aide du solveur interCondensatingEvaporatingFoam [5], tel que décrit par Sun, spécifiquement conçu pour la modélisation des changements de phase entre la vapeur d'eau et le film liquide. Les champs simulés sous NOTUS (température, vitesse et pression) ont été exportés au format CSV, puis interpolés et transférés dans OpenFOAM afin de servir de conditions initiales aux simulations de condensation et d'évaporation. Avant le lancement des calculs, une étape cruciale consiste à vérifier la qualité de l'interpolation des champs sur le nouveau maillage non structuré, afin d'assurer la continuité physique entre les deux environnements numériques. La Figure 3 illustre cette étape : la distribution de température initiale obtenue dans OpenFOAM (à droite) est identique à celle calculée sous NOTUS (à gauche) le succès de l'initialisation et la conservation des champs thermiques lors du passage d'un code à l'autre. Cette dernière phase du travail vise à affiner la modélisation des phénomènes thermo-aérauliques et de condensation dans les zones les plus sensibles de la cavité, notamment dans la Salle des Taureaux. Elle permet d'étudier plus finement les phénomènes couplés de convection et de condensation, qui jouent un rôle déterminant dans la stabilité du microclimat et la préservation des peintures pariétales. Le code Notus, utilisant un maillage cartésien, ne permet pas une prise en compte précise des phénomènes de surface, nécessaires pour représenter finement les films liquides générés par condensation. L'utilisation d'OpenFOAM avec un maillage non structuré raffiné constitue donc une étape clé pour dépasser cette limitation et accéder à une modélisation multiphasique complète du microclimat de la grotte.



**Figure 3:** la distribution de température initiale obtenue dans OpenFOAM (à droite) est identique à celle calculée sous NOTUS (à gauche)

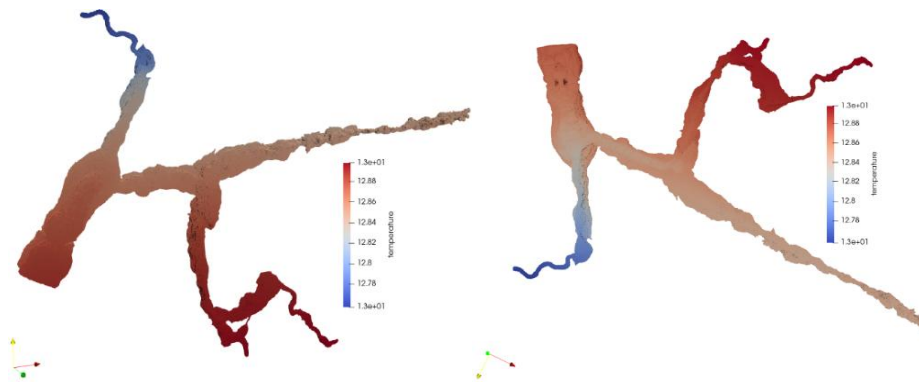
### 3. Résultats

L'analyse des résultats montre que l'onde thermique issue de la surface est progressivement atténuée et déphasée lors de sa propagation dans le massif. Un retard de phase d'environ 6 mois à 10 m de profondeur et 12 mois à 20 m est observé, avec un écart de température maximal de l'ordre de 0,6 °C. Ce comportement, illustré en Figure 4, met en évidence le phénomène de déphasage thermique, où les températures basses sont progressivement compensées par les températures élevées au fil du temps, traduisant la diffusion amortie de l'onde de chaleur dans le milieu rocheux.

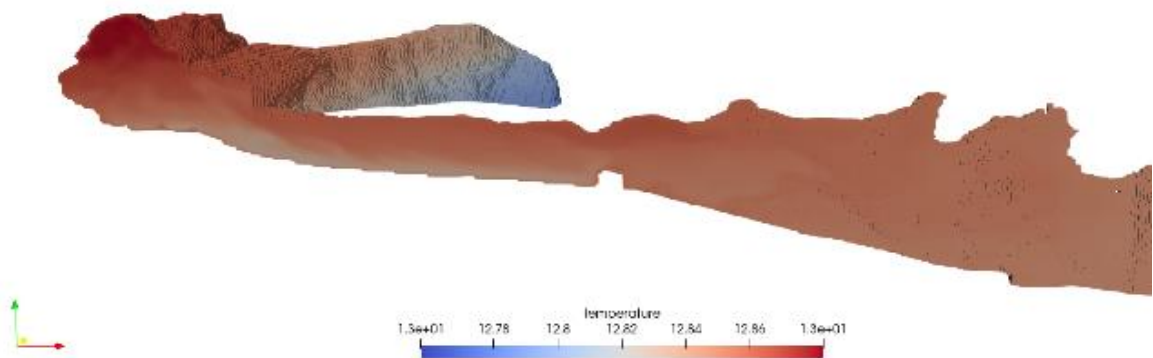


**Figure 4** Évolution de la température simulée à travers l'air et le massif rocheux, présentée à des intervalles de 30 jours :(a) 14<sup>e</sup> mois ;(b) 15<sup>e</sup> mois ; (c) 16<sup>e</sup> mois ; (d) 17<sup>e</sup> mois. Résultats obtenus à l'aide du code NOTUS

La Figure 5 illustre ces conditions initiales et aux limites utilisées dans le modèle numérique, et la Figure 6 illustre le comportement thermique de la grotte de Lascaux a été simulé à l'aide du code NOTUS pour un temps physique de 4 h. Le calcul numérique a nécessité 48 h de temps de calcul sur 256 nœuds. Afin de mener à bien cette phase de simulation intensive, le supercalculateur Curta du MCIA a été utilisé.



**Figure 5:** Condition aux limites/initiales – Gauche : Vue dessus ; droit : Vue dessous



**Figure 6:** Champ de température en degrés Celsius obtenu sous NOTUS dans la grotte de Lascaux à 4 h de temps physique, illustrant la répartition thermique au sein de la cavité.

#### 4. Conclusion et perspectives

Les travaux menés au cours de cette première phase de recherche ont permis de poser les bases d'une chaîne de simulation numérique intégrée pour l'étude du microclimat de la grotte de Lascaux. Le code NOTUS s'est révélé particulièrement performant pour la modélisation de la conduction thermique dans le massif rocheux, grâce à sa stabilité numérique, sa robustesse de calcul et sa capacité à gérer de grands volumes à maillage cartésien régulier. Cette approche a permis d'obtenir une description précise de la distribution thermique au sein du massif et sur les parois internes, constituant ainsi une base solide pour la modélisation de la convection et des phénomènes de condensation.

La formation des films d'eau et les gradients thermiques intenses au voisinage des parois. Pour dépasser cette contrainte, l'utilisation du logiciel OpenFOAM s'impose : son maillage non structuré permet de descendre à des résolutions submillimétriques ( $\approx 0,1$  mm), indispensables pour simuler de manière réaliste les processus couplés de convection et de condensation. Cette transition ouvre la voie à une modélisation multiphasique détaillée, capable de reproduire la dynamique du changement de phase entre la vapeur et le film liquide sur les surfaces de la grotte.

Enfin, les perspectives futures incluent l'intégration de méthodes issues de l'intelligence artificielle (IA) afin de réduire les temps de calcul, améliorer la prédiction des zones de condensation et renforcer la fiabilité des modèles numériques. Les approches d'apprentissage automatique pourront notamment être exploitées pour la calibration automatique des paramètres physiques, la détection de patterns climatiques et la prévision des déséquilibres thermiques à partir de données expérimentales in situ. L'objectif global de cette recherche est ainsi de développer un outil prédictif robuste et intelligent, alliant la rigueur physique des simulations CFD à la puissance adaptative de l'IA, au service de la préservation durable du patrimoine exceptionnel de la grotte de Lascaux.

## 5. Références

[a] DUCASSE, Sylvain et LANGLAIS, Mathieu. Twenty years on, a new date with Lascaux. Reassessing the chronology of the cave's Paleolithic occupations through new 14C AMS dating. *PALEO. Revue d'archéologie préhistorique*, 2019, no 30-1, p. 130-147.

[b] <https://notus-cfd.org>

[1] F. Salmon, D. Lacanette, H. Lharti, C. Sirieix. Heat transfer in rock masses: Application to the Lascaux Cave (France), *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Elsevier, 207, 124029, 2023.

[2] H. Lharti, F. Salmon, C. Sirieix, J. Riss, D. Lacanette. Caractérisation des propriétés thermiques du massif de Lascaux par méthodes inverses, LHARTI, Habiba, SALMON, Fabien, SIRIEIX, Colette, *et al.* Caractérisation des propriétés thermiques du massif de Lascaux par méthodes inverses. In : *31e Congrès Français de Thermique Thermique et Agroressources*. 2023.

[3] Condensation Corrosion: A Theoretical Approach / Kondenzacijska Korozija: Teoretični Pristop .

[4] F. NICOUUD, F. DUCROS. Subgrid-Scale Stress Modelling Based on the Square of the Velocity Gradient

[5] Y. Sun. Description of interCondensatingEvaporatingFoam and implementation of SGS term into volume fraction equation, CFD with OpenSource Software, Chalmers University of Technology, 2022.

[6] [https://www.wolfdynamics.com/wiki/meshing\\_OF\\_SHM.pdf](https://www.wolfdynamics.com/wiki/meshing_OF_SHM.pdf)