

Thermomécanique des matériaux pour construction de bases lunaires

travail de recherche inachevé

Christophe Fond et tous ceux qui contribueront significativement

ICube, 2 rue Boussingault, F67000 Strasbourg et les labos de ceux qui...

Abstract

A finite element model is used to analyse the thermomechanical behaviour of materials designed for lunar buildings. Heat flows, maximum and minimum principal stresses are computed.

Keywords: frittage, régolithe, thermomécanique, base lunaire, dilatation thermique, modélisation numérique,...

1. Préambule

Les paramètres utilisés ici pour illustrer les capacités du modèle sont passablement folkloriques dans l'attente de résultats expérimentaux et/ou issus de biblio.

2. Introduction

L'étude se focalise sur les dilatations différentielles, celles liées aux gradients de température ainsi qu'éventuellement celles liées à des différences facteurs de dilatation thermique ainsi que sur les flux thermiques. Parmi les objectifs on peut citer l'optimisation des propriétés des matériaux, l'optimisation des géométries et des dimensionnements des structures, l'alimentation en données des futures études de fatigue thermomécanique (Molaro et al., 2016), (Mazrouei et al., 2016), (El Mir et al., 2016a), (El Mir et al., 2016b), des matériaux de constructions lunaires (MCL) (Ceccantti et al., 2014), (Ghent et al., 2016).

L'enterrement (l'enlunement ?) diminue les problèmes liés aux fluctuations thermiques, aux rayonnements solaires nocifs et aux risques d'impact de micrométéorite.

3. Modélisation

3.1. Modèle géométrique à trois couches

Le modèle à 3 couches est schématisé en Fig. 1. La couche inférieure (couche numérotée 1) représente l'étanchéité à l'air et l'isolation thermique. La couche intermédiaire (couche numérotée 2) représente le matériau de construction obtenu par frittage de régolite. La couche supérieure (couche numérotée 3) représente le régolite "remanié" déposé sur la construction. Les couches sont supposées d'épaisseur constante.

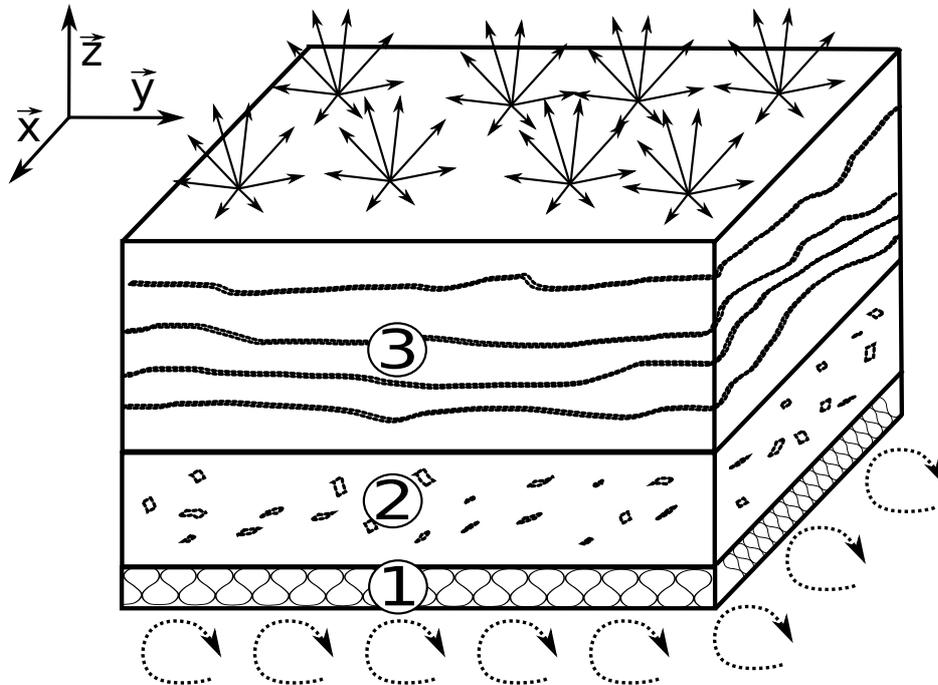


FIGURE 1: Modèle à 3 couches pour l'étude thermomécanique.

3.2. Modèles de comportement

Les matériaux et leurs comportements sont supposés isotropes et répondre aux lois de Fourier et de Hooke. Toutes leurs caractéristiques thermoméca-

riques peuvent varier avec la température même lorsqu'ils sont considérés constants ici.

Selon (Hayne et al., 2017), la conductivité thermique du régolite serait d'environ $7.4 \cdot 10^{-4} W.K^{-1}.m^{-1}$ à la surface et $3.4 \cdot 10^{-3} W.K^{-1}.m^{-1}$ à $1m$ de profondeur, les masse volumiques correspondantes seraient respectivement d'environ $1100 kg.m^{-3}$ et $1800 kg.m^{-3}$. L'inertie thermique¹ serait de $55 \pm 2 J.m^{-2}.K^{-1}.s^{-1/2}$ à $273^\circ K$ sur les premiers 4 à 7 cm d'épaisseur, ce qui conduirait à $C_p = 3700 \pm 300 J.kg^{-1}.K^{-1}$.

3.2.1. Conduction thermique

Les caractéristiques de conduction thermique sont données en Table 1. k désigne le facteur de conduction thermique, C_p la capacité thermique massique et ρ la masse volumique. La Fig. 2 montre les évolutions en fonctions de la température.

| info. couche | k [$W.K^{-1}.m^{-1}$] | C_p [$J.kg^{-1}.K^{-1}$] | ρ [kg/m^3] |
|------------------------|------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| isolant, min.-max. | 6.3 – 8.4 | 80 – 90 | 100 – 100 |
| type de variation | interpol. lin. | interpol. lin. | approx. constant |
| MCL, min.-max. | 0.9 – 1.2 | 800 – 900 | 2510 – 2510 |
| type de variation | interpol. lin. | interpol. lin. | approx. constant |
| régolite, min.-max. | 1.8 – 2.4 | 480 – 540 | 1500 – 1500 |
| type de variation | interpol. lin. | interpol. lin. | approx. constant |

TABLE 1: Caractéristiques thermiques des couches entre $100^\circ K$ et $500^\circ K$.

3.2.2. Convection thermique

La variation du facteur de convection avec la température de paroi, désigné par K , est montrée en Fig. 3 et correspond à $h(T) = 1 + (1.78(T_{paroi} - 200))^{0.25}$.

1. on rappelle que l'inertie thermique vaut $I = \sqrt{k\rho C_p}$

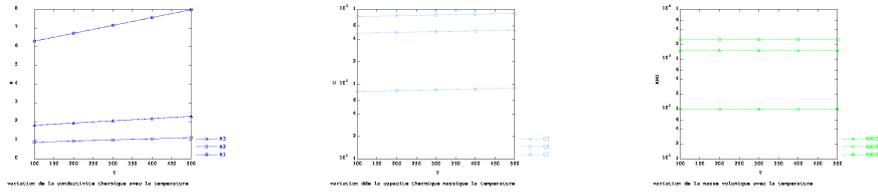


FIGURE 2: Variation des caractéristiques de conduction thermique, K , C_p et ρ avec la température du matériau.

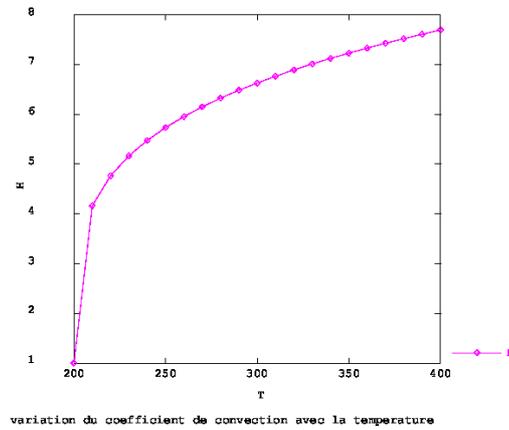


FIGURE 3: Variation du facteur de convection avec la température de paroi.

3.2.3. Rayonnement thermique

L'émissivité du matériau, désignée par e , est supposée avec la température de surface comme l'indique la Fig. 4.

3.2.4. Comportement mécanique

(Chunmei, 2009) fournit des résultats pour l'angle de talus naturel et la compressibilité d'un simulant du régolite. Selon (Goulas et al., 2016), le module du matériau fritté serait de l'ordre de 250 MPa et la contrainte d'écrasement en compression uni-axiale de l'ordre de 3 MPa.

La dureté mesurée par indentation instrumentée vaudrait environ $HV=1245$ vickers (Fateri and Gebhardt, 2015), (Fateri et al., 2015).

Les caractéristiques élastiques des matériaux sont données en Table 2

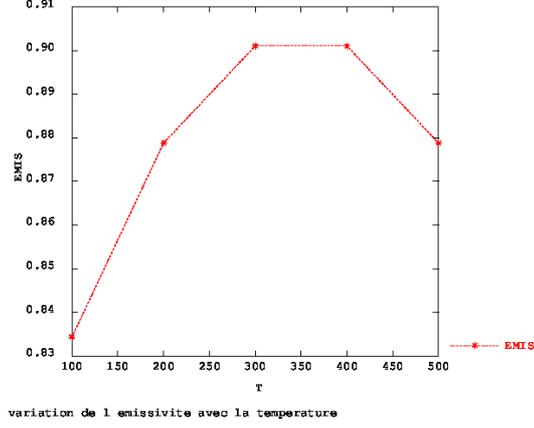


FIGURE 4: Variation de l'émissivité avec la température de surface.

E désigne le module d'Young, ν le coefficient de Poisson et α le facteur de dilatation thermique linéique. Supposer la couche de régolite élastique représente une hypothèse forte mais atténuée par la faible raideur de cette poudre et en conséquence sa faible incidence sur les sollicitations mécaniques générées dans la couche de MCL.

| info. couche | $E[Pa]$ | $\nu[-]$ | $\alpha[K^{-1}]$ |
|------------------------|-------------------------------------|----------------|---|
| isolant, min.-max. | $1 \cdot 10^9 - 6 \cdot 10^8$ | 0.32 - 0.48 | $3 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 10^{-5}$ |
| type de variation | interpol. lin. | interpol. lin. | interpol. lin. |
| MCL, min.-max. | $5 \cdot 10^{10} - 3 \cdot 10^{10}$ | 0.2 - 0.3 | $6 \cdot 10^{-6} - 8 \cdot 10^{-6}$ |
| type de variation | interpol. lin. | interpol. lin. | interpol. lin. |
| régolite, min.-max. | $5 \cdot 10^9 - 3 \cdot 10^9$ | 0.15 - 0.225 | $1.2 \cdot 10^{-5} - 1.6 \cdot 10^{-5}$ |
| type de variation | interpol. lin. | interpol. lin. | interpol. lin. |

TABLE 2: Caractéristiques mécaniques des couches entre $100^\circ K$ et $500^\circ K$.

3.3. Conditions aux limites et chargement

(Jablonski and Ogden, 2005), (Bevan M. French et al., 1991) détaillent les températures de surface et à certaines profondeurs en fonction de la situation.

Le modèle est axisymétrique d'axe \vec{z} . Les conditions en déplacements interdisent translation et rotation de solide et les dilatations globales² sont libres. Les flux thermiques dans le plan (\vec{x}, \vec{y}) , i. e. sur les faces du modèle orientées par \vec{x} et \vec{y} sont nuls. La température de l'air³ est supposée égale à $273.15 + 20^\circ K$. La température de rayonnement à l'infini varie comme l'indique la Fig. 1. Le premier cycle suit la variation :

$$T_\infty(t) = T_{\langle sun \rangle} 0.5 (1 + \sin(\omega t)) \quad \text{si } t < t_{revol.}/2 \quad \text{sinon } T_\infty(t) = 0 \quad (1)$$

où $\omega = \frac{4\pi}{t_{revol.}}$ avec $t_{revol.} 27.322 \text{ jours}$ et $T_{\langle sun \rangle} = 390^\circ K$. Cette dernière température est une moyenne sur une demi-sphère du rayonnement solaire.

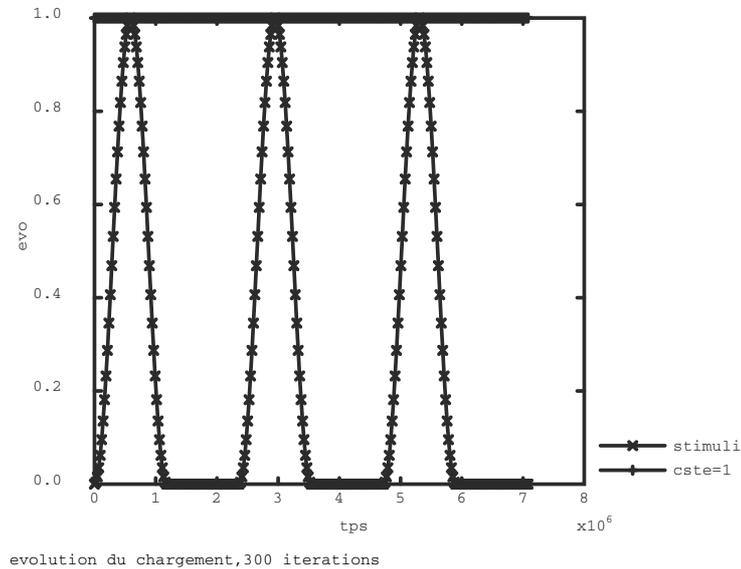


FIGURE 5: Variation de la température moyenne de l'espace imposée en fonction du temps.

3.4. Modèle numérique par éléments finis

Le logiciel utilisé est Cast3M (CAST3M, 2012). Les éléments sont des "CU20", i. e. des éléments volumiques à 20 nœuds. Convergence avec la " θ – method", procédure mécanique en grands déplacements, procédure thermique non linéaire à deux pas de temps, procédure "PASAPAS" du logiciel Cast3M.

2. toutefois des contraintes peuvent apparaître du fait de dilatations différentielles
3. on suppose de l'air à 70% d'humidité et à pression atmosphérique

4. Résultats de simulation

4.1. Analyse thermique

La Fig. 6 montre un exemple de répartition des températures au cours d'un cycle montrant que provisoirement les extrémités sont plus froides que le centre. Avec les jeux de paramètres précédents on obtient les champs de tem-

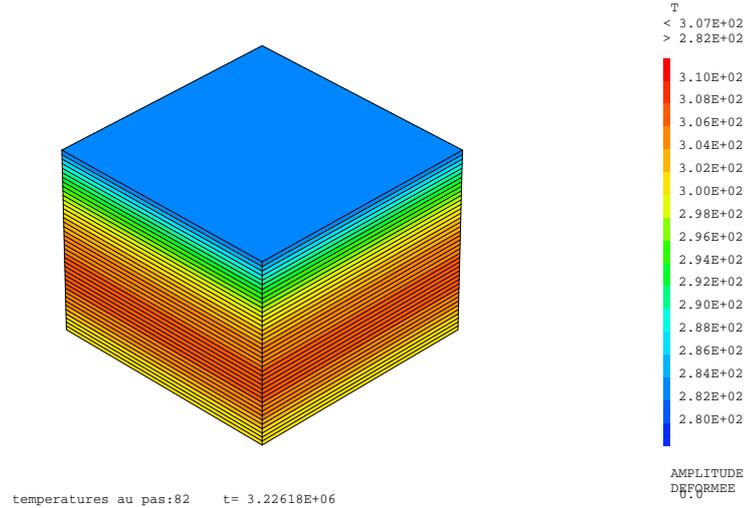


FIGURE 6: Isovaleurs des températures.

pérature et contraintes dans le modèle. La Fig. 7 montre un exemple de variation de température et contraintes dans l'épaisseur pour un instant donné. La Fig. 8 montre les températures de surface et la température moyenne du modèle. Elle indique aussi, courbe avec symboles \times en vert de légende $Q_z snmz0$, la puissance surfacique à fournir par le chauffage/climatisation pour maintenir l'air ambiant à $20^\circ C$. Il faut chauffer et refroidir, la durée de chauffe est plus longue. Le courbe couleur cyan indique que le matériau de la couche numéro 2 sera exposé à des températures comprises entre $250^\circ K$ et $330^\circ K$. Il faudrait donc procéder à des tests de caractérisations thermo-mécaniques dans cette plage de températures. La Fig. 9, courbe de couleur verte, confirme qu'il faudra plus chauffer que refroidir et donne la quantité surfacique d'énergie nécessaire.

4.2. Analyse mécanique

Sous l'effet des cycles de température les objets initialement plans se courbent alternativement de façon convexe puis concave comme le montre la

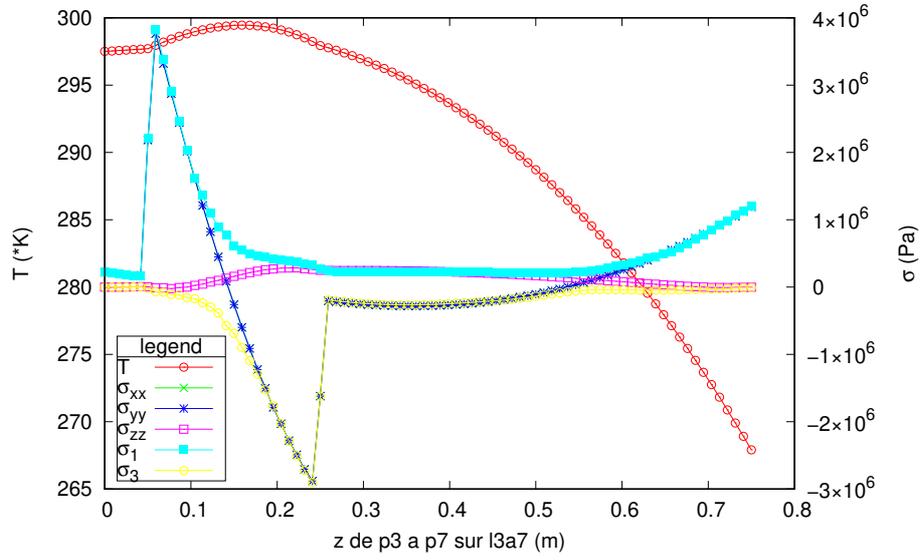


FIGURE 7: Profils de température et contraintes dans l'épaisseur pour $t \approx 3.6 \cdot 10^6$ s.

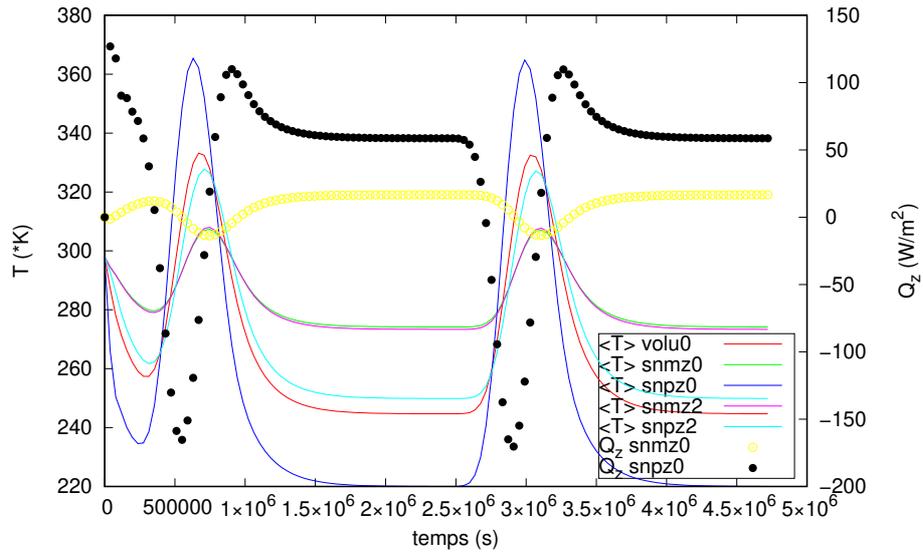


FIGURE 8: Températures et flux en fonction du temps.

Fig. 10. Les dilatations différentielles induisent des contraintes de traction et compression comme l'indique la Fig. 11.

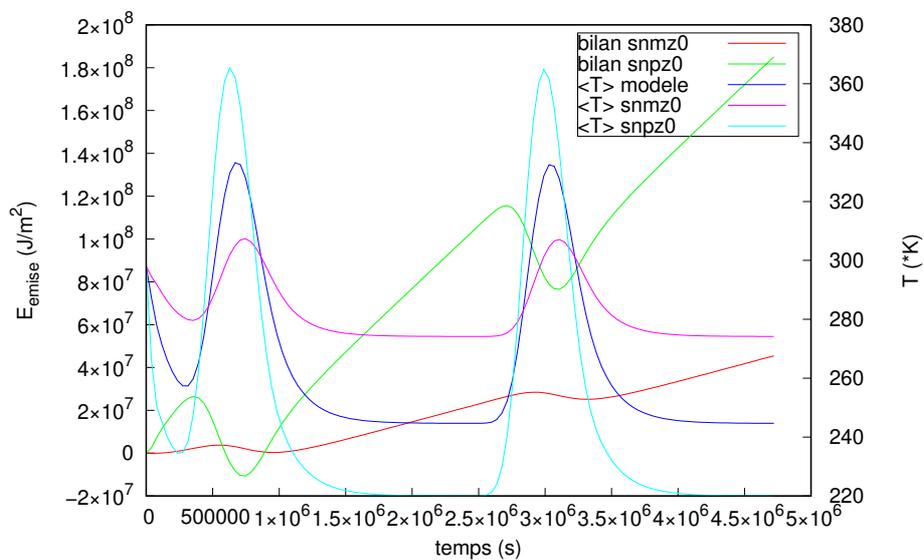


FIGURE 9: Températures de surface et bilan de l'échange thermique en fonction du temps.

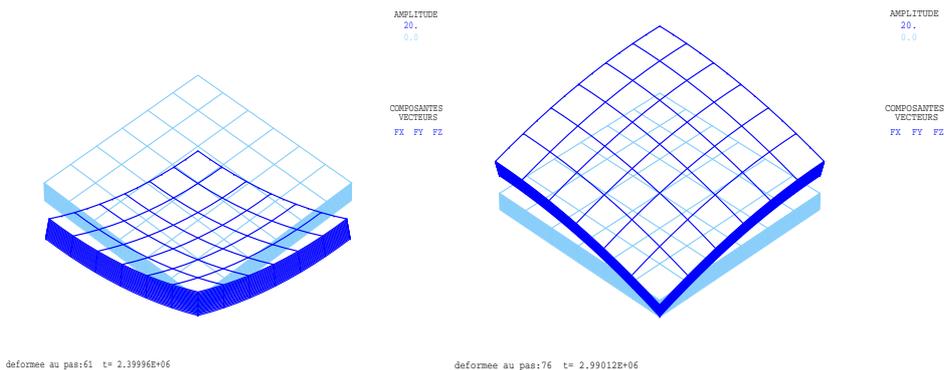


FIGURE 10: Déformées visualisant les courbures (bleu foncé) alternativement prises par des objets initialement plans (bleu clair).

4.3. Discussion

Pour l'instant ça ne correspond à rien. On peut envisager de modéliser des géométries plus complexes.

4.4. Conclusion

Il conviendrait faire des tests de caractérisations thermomécaniques dans les plages de températures estimées par les simulations lorsque la littérature est insuffisante.

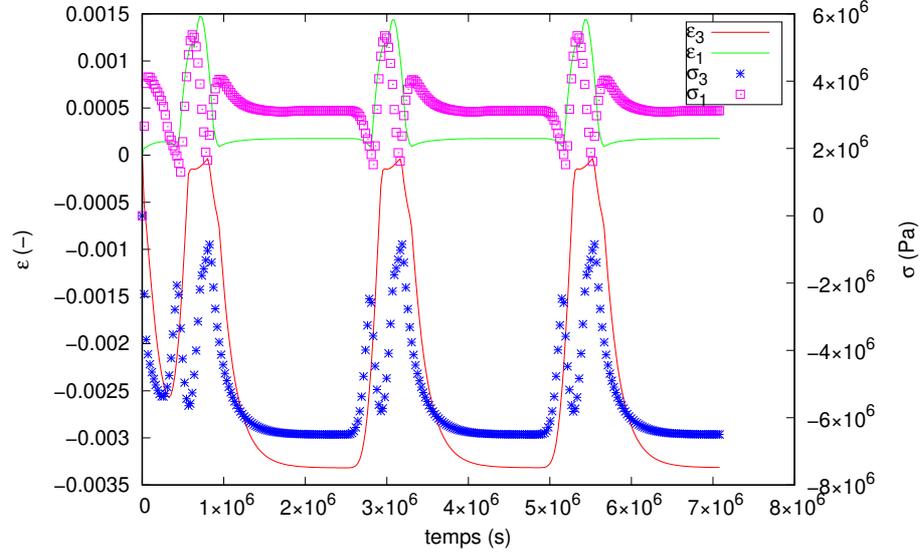


FIGURE 11: Plus grande et plus petite contraintes principales en fonction du temps.

Annexe A. Validation du modèle numérique

Annexe A.1. Solution analytique de référence

Supposons que la température de surface d'un sol, considéré comme milieu semi-infini, varie de façon sinusoïdale avec le temps. En supposant valide la loi de Fourier, i. e. modèle simpliste de conduction seule en milieu homogène et isotrope, avec des caractéristiques matériaux indépendantes du temps, de la profondeur et de la température, la température T_{sol} d'un sol à une profondeur z au temps t serait donnée par (Cuny et al., 2016) :

$$T_{sol}(z = \infty, t = 0) = T_m$$

$$T_{sol}(z = 0, t) = T_m + A \sin(\omega t) \quad (\text{A.1})$$

où T_m désigne la température moyenne du sol en profondeur et A l'amplitude du gradient thermique de surface.

$$T_{sol}(z, t) = T_m e^{-z \sqrt{\frac{\omega}{2D}}} A \sin\left(\omega t - z \sqrt{\frac{\omega}{2D}}\right) \quad (\text{A.2})$$

où $D = \frac{K}{\rho C_p}$ désigne la diffusivité thermique, K désignant la conductivité thermique et C_p désignant la capacité thermique massique à pression

constante. Avec un cycle de 27.322 jours et les caractéristiques matériaux de la Table A.3, on obtient pour le facteur d'amortissement $e^{-1.61 z}$. À 1m de profondeur l'amplitude sera de $60^\circ K$, atténuée par un facteur 5 environ d'environ pour une amplitude surfacique $A = 310^\circ K$ et déphasée d'environ $\pi/2$. Le modèle numérique, montré in Fig. A.12, suppose qu'aucun échange

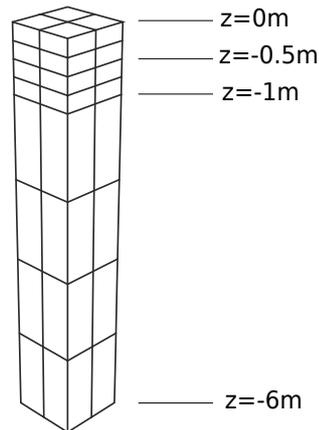


FIGURE A.12: Géométrie et discrétisation spatiale pour la validation du modèle par éléments finis. Les éléments sont à 20 nœuds ("CU20").

thermique, i. e. flux thermique nul, ne s'opère à une profondeur de $6m^4$. La température initiale est imposée uniforme et égale à T_m . On remarque sur la Fig. A.13 qu'il ne faut que 2 à 3 cycles pour restituer le régime permanent. Malgré des discrétisations spatiale et temporelle relativement grossière, on retrouve à moins de $2^\circ K$ près la valeur théorique.

Références

Bevan M. French, G., Heiken, G., Vaniman, D., French, B., Schmitt, J., Lunar, Institute, P., 1991. Lunar Sourcebook : A User's Guide to the Moon. Cambridge University Press.

CAST3M, C.E.A., 2012. Logiciel de calculs aux éléments finis, www-cast3m.cea.fr.

4. à cette profondeur le facteur d'atténuation vaut théoriquement $6 \cdot 10^{-5}$

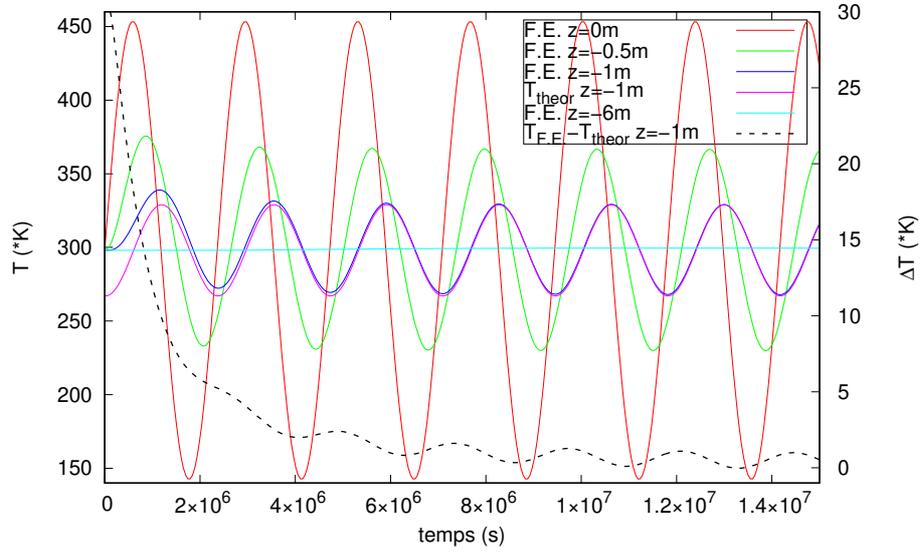


FIGURE A.13: Validation du modèle numérique. En pointillés l'écart entre le modèle par éléments finis et la théorie.

| numéro de la couche | K [$W.K^{-1}.m^{-1}$] | C_p [$J.kg^{-1}.K^{-1}$] | ρ [kg/m^3] | E [Pa] | ν [$-$] |
|---------------------|------------------------------|---------------------------------|------------------------|-------------------|------------------|
| 1 | 1.11 | 860 | 2510 | $3 \cdot 10^{10}$ | 0.2 |
| 2 | 1.11 | 860 | 2510 | $3 \cdot 10^{10}$ | 0.2 |
| 3 | 1.11 | 860 | 2510 | $3 \cdot 10^{10}$ | 0.2 |

TABLE A.3: Caractéristiques thermomécaniques des couches, indépendantes de la températures.

Ceccantti, G., Dini, E., De Kestelier, X., Colla, V., Pambaguian, L., 2014. An analysis of. *Acta Astronautica* 93, 430–450.

Chunmei, H., 2009. Geotechnical characterization of lunar regolith simulants. Ph.D. thesis. Department of Civil Engineering. Case Western Reserve University.

Cuny, M., Lin, J., Siroux, M., Fond, C., 2016. Influence of surrounding soil types on the energy efficiency of earth-air heat exchanger .

El Mir, C., Hazeli, K., Ramesh, K.T., Delbo, M., Wilkerson, J., 2016a. Thermal fatigue : Lengthscales, timescales and their implications on regolith

- size-frequency distribution. 47th Lunar and Planetary Science Conference, Woodland, Texas U.S., 21-25 march .
- El Mir, C., Ramesh, K.T., Delbo, M., Plescia, J.B., 2016b. The contribution of thermal fatigue on lunar regolith evolution. Annual Meeting of the Lunar Exploration Analysis Group, Columbia, Maryland U.S., 1 - 3 Nov.
- Fateri, M., Gebhardt, A., 2015. Process parameters development of selective laser melting of lunar regolith for on-site manufacturing applications. *International Journal of Applied Ceramic Technology* 12, 46–52. <https://ceramics.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/ijac.12326>.
- Fateri, M., Gebhardt, A., Gabrielli, R., Herdrich, G., Fasoulas, S., Grossmann, A., Schnauffer, P., Middendorf, P., 2015. Additive manufacturing of lunar regolith for extra-terrestrial industry plant.
- Ghent, R.R., Carter, L.M., Bandfield, J.L., Tai Udovicic, C.J., Campbell, C.A., 2016. Lunar crater ejecta : Physical properties revealed by radar and thermal infrared observations. *Icarus* 294, 247 – 261.
- Goulas, A., Engstrøm, D.S., Friel, R.J., Harris, R.A., 2016. Investigating the additive manufacture of extra-terrestrial materials, in : *Proceedings of the 2016 Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference* :, pp. 2271–2281.
- Hayne, P.O., Bandfield, J.L., Siegler, M.A., Vasavada, A.R., Ghent, R.R., Williams, J.P., Greenhagen, B.T., Aharonson, O., Elder, C.M., Lucey, P.G., Paige, D.A., 2017. Global regolith thermophysical properties of the moon from the diviner lunar radiometer experiment. *Journal of Geophysical Research : Planets* 122, 2371–2400. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/2017JE005387>.
- Jablonski, A.M., Ogden, K.A., 2005. A review of technical requirements for lunar structures – present status, in : *International Lunar Conference*, Toronto, Canada, 18-23 sept.
- Mazrouei, S., Ali Lagoa, V., , Delbo, M., Ghent, R.R., Wilkerson, J., 2016. Does thermal fatigue play a role in lunar regolith formation? 47th Lunar and Planetary Science Conference, Woodland, Texas U.S., 21-25 march .

Molaro, J.L., Byrne, S., Le, J.L., 2016. Thermally induced stresses in boulders on airless body surfaces, and implications for rock breakdown. *Icarus* 273, 182 – 195.