

## Rapport de projet

Modélisation numérique

### Projet 1 : Pertes dans une canalisation



## **Table des matières**

Liste des figures .....	3
Préambule .....	4
I-] Présentation du problème .....	5
II-] Discrétisation .....	6
1) Discrétisation spatiale .....	6
2) Représentation sur les mailles .....	8
3) Discrétisation temporelle.....	9
III-] Expressions des flux .....	9
IV-] Implémentation : .....	12
1) Conditions opératoires :.....	12
2) Dans le code : .....	12
V-] Interprétation physique.....	13
.....	17
Conclusion .....	18
Bibliographie.....	19

## **Liste des figures**

Figure 1 : schéma fonctionnel de la conduite sans MCP .....	6
Figure 2 : schéma de la conduite avec MCP .....	7
Figure 3 : Schéma du bilan dans les différentes couches.....	8
Figure 4 : Evolution de la température au robinet.....	14
Figure 5 : Evolution de la température au robinet avec MCP .....	15
Figure 6 : profil de température au robinet pour où le fluide est au repos pendant une nuit.....	16
Figure 7 : profil de température pour des prélèvements successifs d'eau .....	17

## Préambule

Répartition du temps de travail :

50% BRUTO

50% JANIN

Pour toutes les tâches exécutées

R

## **I-] Présentation du problème**

Nous nous intéressons ici à la possibilité de réaliser des économies, d'eau et d'énergie, sur une distribution d'eau chaude sanitaire. Nous avons pour cela, modélisé en langage FORTRAN une canalisation calorifugée dans laquelle s'écoule de l'eau provenant d'un ballon d'eau chaude. Dans celui-ci, l'eau est stockée à 65°C. L'air ambiant est à 20°C. Serait-il intéressant d'inclure entre le tube et l'isolant une petite quantité de matériau à changement de phase (MCP) ? Lequel ? Où ? Combien ? Comment ? Et pour quel gain ?

Dans un premier temps, nous avons étudié le cas où :

- le flux advectif est présent au temps  $t = 0s$  et est arrêté à  $t = 60s$
- le MCP n'est pas présent

On constate dans cette première approche que, pour avoir de l'eau chaude au robinet il faut que s'écoule l'eau froide présente dans la conduite, c'est la source des pertes hydriques.

De plus, lorsque l'advection est arrêtée, l'eau refroidit dans la conduite, c'est la source des pertes thermiques. On considèrera ici que, l'énergie est perdue par convection avec le milieu ambiant.

Dans un second temps, nous nous sommes intéressés à la situation suivante :

- le flux advectif est présent au temps  $t = 0s$  et est arrêté à  $t = 60s$
- le MCP est présent
- Puis on répète la simulation à  $t = 1000s$

## II-] Discrétisation

### 1) Discrétisation spatiale

Nous avons considéré le problème en 2D, de ce fait, nous avons associé les indices 'm' et 'n', pour respectivement, la direction horizontale et verticale. La canalisation, de longueur L, est divisée en M segments tels que, le pas  $\Delta x = \frac{L}{M}$ .

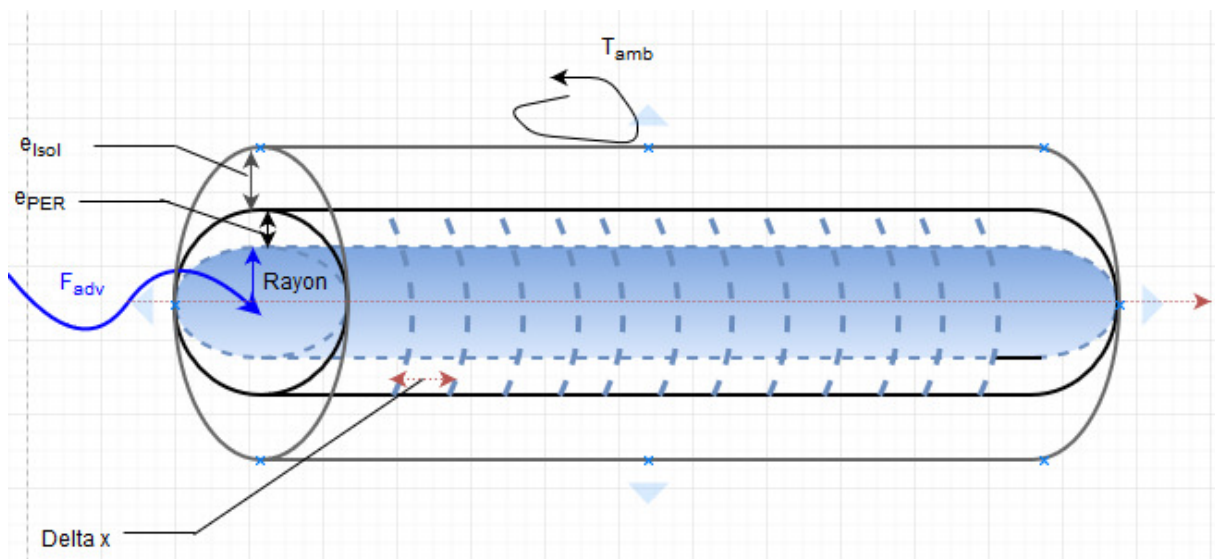
En outre, le système se divise verticalement en 3 ou 4 zones :

- cas n = 3 :

n=1 : fluide contenu dans la conduite

n=2 : conduite en PER

n=3 : isolant



**Figure 1 : schéma fonctionnel de la conduite sans MCP**

Remarque : l'isolant n'est pas maillé, du fait des trop forts gradients thermiques qui y sont présents

## Projet 1 : Pertes dans une canalisation

- cas  $n = 4$  :

$n=1$  : fluide contenu dans la conduite

$n=2$  : conduite en PER

$n=3$  : MCP (paraffine)

$n=4$  : isolant

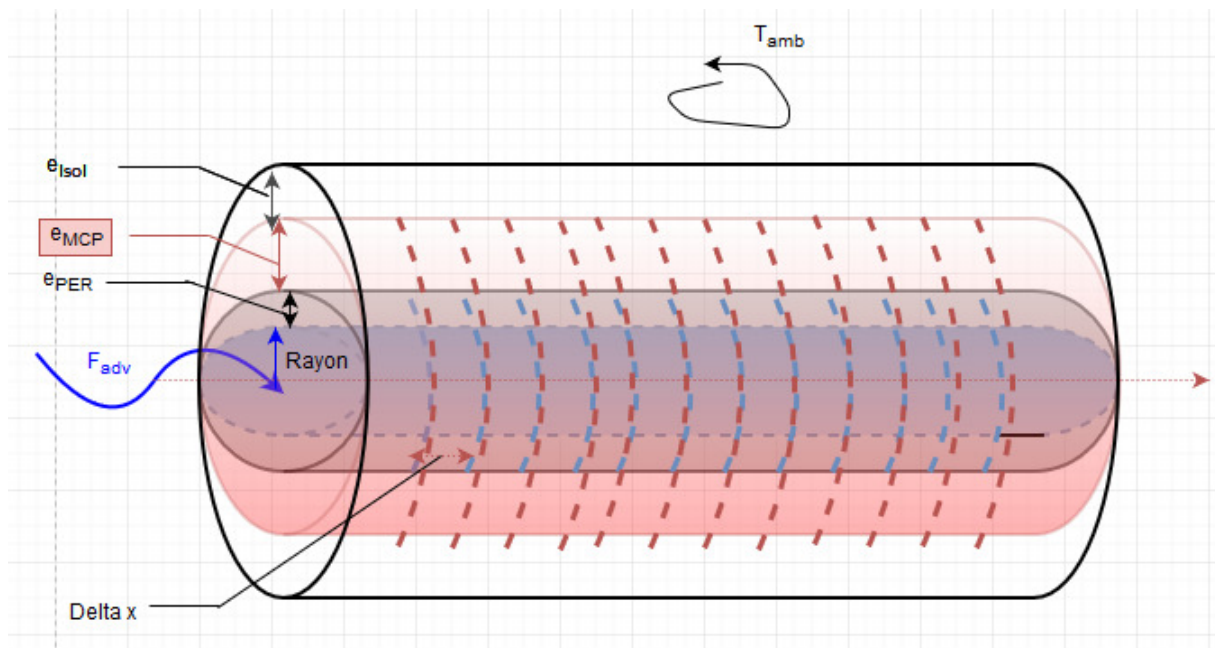


Figure 2 : schéma de la conduite avec MCP

## 2) Représentation sur les mailles

Pour chaque couche, nous effectuons un bilan des flux entrants et sortants rapporté au nœud de la maille.

Une coupe en 2D donne, pour les bilans sur les nœuds, le schéma suivant :

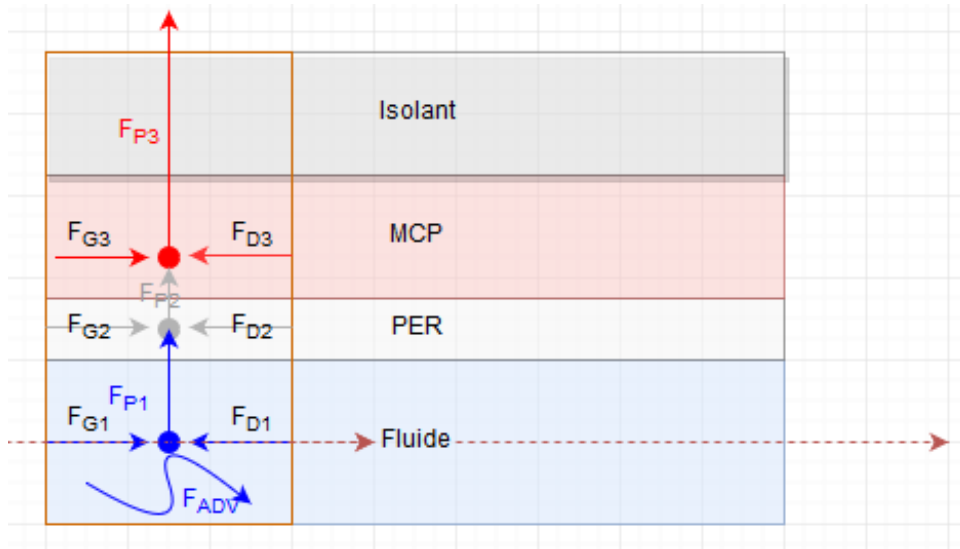


Figure 3 : Schéma du bilan dans les différentes couches

Pour chaque couche, on intègre chaque densités de flux conductifs, obtenues grâce à la loi de Fourier, sur les sections droites correspondantes :

- dans le fluide :

$$S_d(1) = \pi \cdot R(1)^2$$

- dans le PER :

$$S_d(2) = \pi \cdot R(2)^2 - \pi \cdot R(1)^2 \quad \text{avec } R(2) = R_{\text{conduite}} + e_{\text{PER}}$$

- dans le MCP

$$S_d(3) = \pi \cdot R(3)^2 - \pi \cdot R(2)^2 \quad \text{avec } R(3) = R(2) + e_{\text{MCP}}$$



Il est également nécessaire de prendre en compte les transferts sur les surfaces latérales qui sont eux, de type convectifs (dans le fluide et avec le milieu ambiant) et conductifs (dans le fluide, le PER, le MCP et dans l'isolant) :

$$S_{lat}(n) = 2\pi \cdot R(n) \cdot \Delta x$$

### **3) Discrétisation temporelle**

Pour les simulations, nous avons choisi deux paramètres permettant la discrétisation temporelle, relative à l'indice 'i' :

- la durée de la simulation DUREE
- le nombre maximal de pas de temps  $I_{max}$

Remarque : ces deux paramètres sont choisis de façon à respecter le critère de convergence donné par la relation suivante

$$v \cdot \max(S) \cdot \Delta t \ll \min(V)$$

### **III-] Expressions des flux**

Dans les différentes couches modélisées, les flux sont transférés de manière conducto-convective . En suivant le schéma de la figure 3, on obtient comme expressions :

- dans le fluide :

$$F_{G1} = \frac{k_{eau} S_d(1)}{\Delta x} (T(m-1,1) - T(m,1))$$

$$F_{D1} = \frac{k_{eau} S_d(1)}{\Delta x} (T(m+1,1) - T(m,1))$$

$F_{G1}$  et  $F_{D1}$  sont deux flux purement conductifs.

$$F_{P1} = \frac{(T(m, 1) - T(m, 2))}{R_{eq1}}$$

$$\text{avec } R_{eq1} = \frac{R_{cond,lat} \cdot R_{conv,f-p}}{R_{cond,lat} + R_{conv,f-p}} + R_{cond,PER}$$

On voit ici apparaître la prise en compte de la convection et la conduction dans le fluide, ainsi que la conduction dans le PER.

Remarque : la résistance conductive dans le fluide, bien que ce dernier soit cylindrique, a été définie avec le modèle cartésien. Ce choix est dû à la divergence logarithmique, pour une épaisseur nulle, présente dans le modèle cylindrique.

$$F_{Adv} = C_{p_{eau}} v_{eau} h_{eau} (65^{\circ}C) S_d (1)$$

C'est

- dans le PER :

$$F_{G2} = \frac{k_{eau} S_d (2)}{\Delta x} (T(m-1, 2) - T(m, 2))$$

$$F_{D2} = \frac{k_{eau} S_d (2)}{\Delta x} (T(m+1, 2) - T(m, 2))$$

$$F_{P2} = \frac{(T(m, 2) - T_{MCP}(m))}{R_{cond}}$$

$$\text{avec } R_{cond} = \frac{\log(R(2)/(0,5(R(2)+R(1))))}{2\pi k_{PER}\Delta x} + \frac{\log((0,5(R(2)+R(3)))/R(2))}{2\pi k_{MCP}\Delta x}$$

On a ici, à nouveau, des flux conductifs.

Remarque : le MCP étant à la base présent sous forme solide, il n'y pas de phénomènes de convection interne. Par la suite, on négligera de toute manière ce phénomène s'il est présent.

- dans le MCP :

$$F_{G3} = \frac{k_{MCP} S_d(3)}{\Delta x} (T_{MCP}(m-1) - T_{MCP}(m))$$

$$F_{D3} = \frac{k_{MCP} S_d(3)}{\Delta x} (T_{MCP}(m+1) - T_{MCP}(m))$$

$$F_{P2} = \frac{T_{MCP}(m) - T_{Amb}}{R_{Eq}}$$

$$\text{avec } R_{Eq} = \frac{1}{h_{Amb} S_{lat}(4)} + \frac{\log(R(4)/R(3))}{2\pi k_{Iso} \Delta x} + \frac{\log(R(3)/(0,5(R(2)+R(3))))}{2\pi k_{MCP} \Delta x}$$

On arrive ici jusqu'à la température ambiante,  $T_{Amb}$ . Comme spécifié dans l'expression de  $R_{Eq}$ , l'échange avec le milieu ambiant se fait de manière convective.

Le calcul de  $h_{Amb}$  est déterminé par la corrélation de HILPERT pour les gaz, en considérant que l'écoulement d'air est perpendiculaire à la conduite.

Le nombre de Reynolds est évalué pour  $v_{air} = 1 \text{ m.s}^{-1}$ , à 25°C.

Ici,  $Re = 2884$ , Hilperts donne  $Nu_D = 0,615 . Re^{0,466}$ .

D'où,  $h_{Amb} = 15 \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$ . On est à la limite entre la convection naturelle et turbulente, correspondant, dans notre cas d'étude, à un léger courant d'air dans la pièce contenant l'installation.

## IV-] Implémentation :

### 1) Conditions opératoires :

Pour les conditions initiales :

$$T_{\text{ballon}} = 65^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{Amb}} = 20^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{eau}} = 20^{\circ}\text{C}$$

### 2) Dans le code :

Pour rendre compte de la variation temporelle, il est nécessaire de déterminer l'évolution des grandeurs d'état sur un nœud.

Nous avons créé une variable de bilan "EVOL", décrivant cette variation :

$$\text{EVOL}(m, 1) = \frac{\Delta t * (F_{\text{adv}} + F_{G1} + F_{D1} - F_{P1})}{\rho_{\text{eau}} \cdot V(1)}$$

$$\text{EVOL}(m, 2) = \frac{\Delta t * (F_{G2} + F_{D2} + F_{P1} - F_{P2})}{\rho_{\text{PER}} \cdot V(2)}$$

$$\text{EVOL}_{\text{MCP}}(m) = \frac{\Delta t * (F_{G3} + F_{D3} + F_{P2} - F_{P3})}{\rho_{\text{MCP}} \cdot V(3)}$$

Ce qui nous donne ainsi l'évolution enthalpique pour chaque couche :

$$H(m, 1) = H(m, 1) + EVOL(m, 1)$$

$$H(m, 2) = H(m, 2) + EVOL(m, 2)$$

$$H_{mcp}(m) = H_{mcp}(m) + EVOL_{mcp}(m)$$

Puis l'évolution en température :

$$T(m, 1) = T(m, 1) + \frac{EVOL(m, 1)}{Cp_{eau}}$$

$$T(m, 2) = T(m, 2) + \frac{EVOL(m, 2)}{Cp_{PER}}$$

$$T_{MCP}(m) = calcT(H_{mcp}(m))$$

Remarque : de par le changement de phase, la température dans le MCP est calculée avec une fonction définie dans le programme de calcul, qui ne sera pas expliciter ici.

De même, on calcule la fraction massique liquide de MCP :

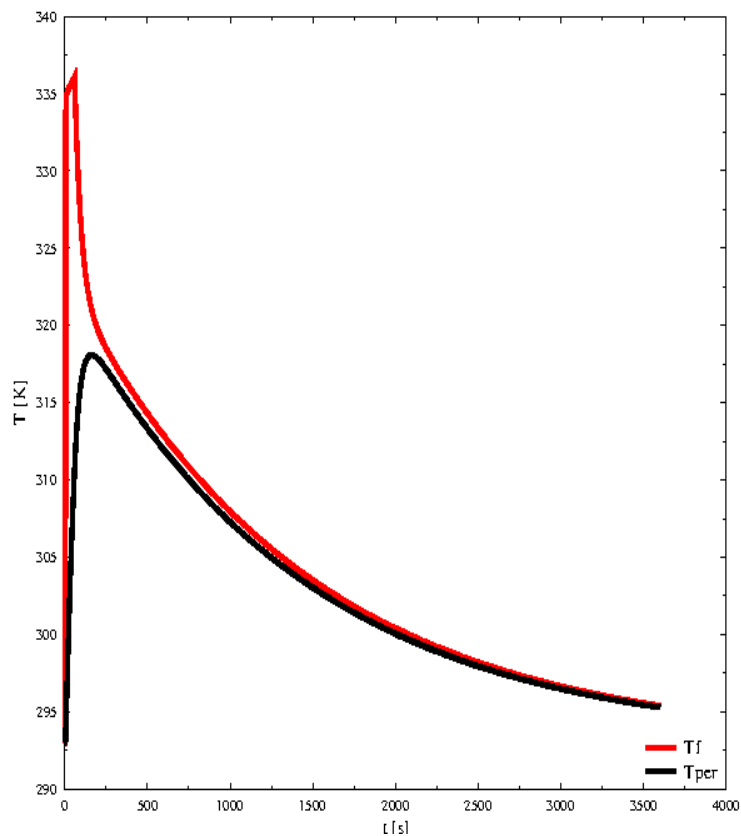
$$Y_{MCP}(m) = calcY(H_{mcp}(m))$$

Même remarque que pour le calcul de  $T_{MCP}(m)$ .

## V-] Interprétation physique

Une simulation est effectuée pendant 1 heure. Au départ, le MCP n'est pas présent :

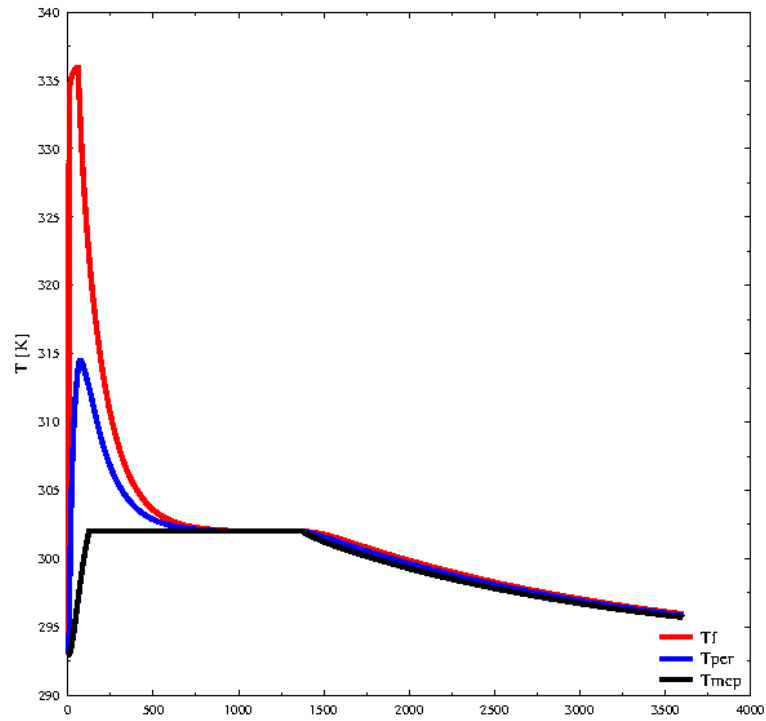
- il faut adapter les relations ci-dessus à la situation opératoire, ce qui conduit aux profils de température suivants, pour différents nœuds :



**Figure 4 : Evolution de la température au robinet**

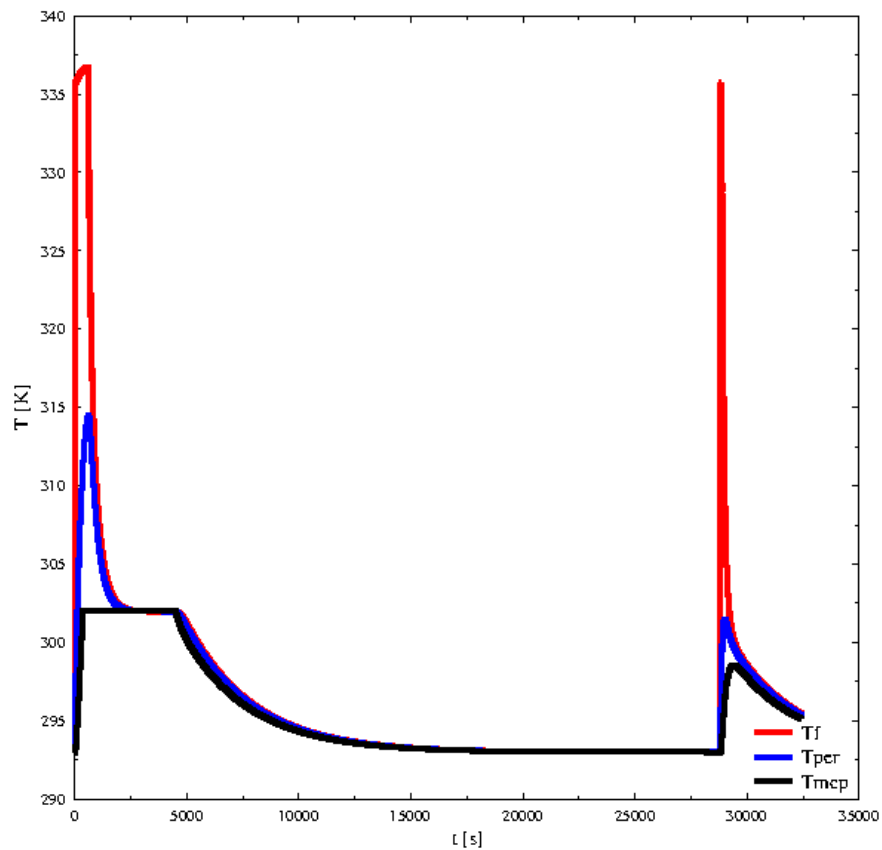
On observe ici la perte de chaleur au cours du temps à travers la diminution de température. Au bout d'un certain temps  $t = 1h$ , le fluide s'équilibre thermiquement avec le milieu ambiant. C'est cette perte que nous allons chercher à atténuer avec le MCP. On constate également l'importance du flux advectif portant rapidement (9,68s) la température du fluide dans la conduite à 65°C.

- en présence de MCP sur toute la longueur de la canalisation :



**Figure 5 : Evolution de la température au robinet avec MCP**

On observe ici que le MCP maintient la température du fluide à  $T_{\text{fusion MCP}}$  pendant environ 17 minutes.



**Figure 6 : profil de température au robinet pour où le fluide est au repos pendant une nuit**

On observe que qu'au bout de 1h20 le MCP commence à refroidir et ne pourra donc pas fournir l'énergie nécessaire au maintien de la température de l'eau à  $T_{fusion}$  pendant toute la nuit.



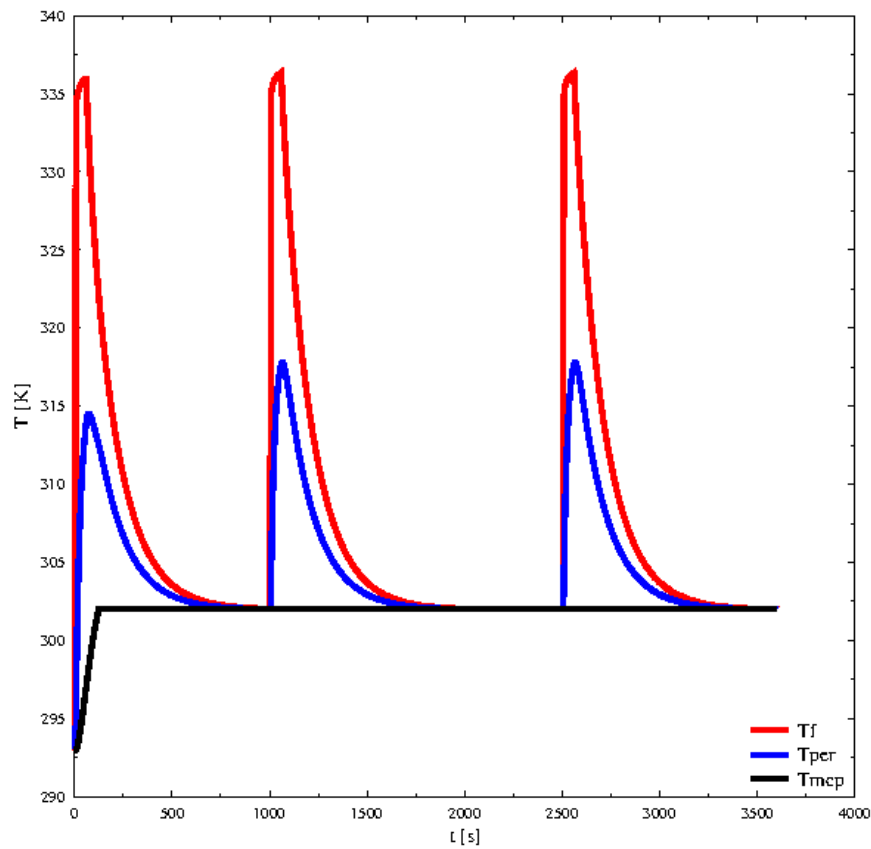


Figure 7 : profil de température pour des prélèvements successifs d'eau

Nous constatons ici que le MCP contribue bien à maintenir l'eau à la température de fusion.

## **Conclusion**

Finalement, dans autre étude sur l'efficacité d'un matériau à changement de phase sur une canalisation, nous pouvons remarquer que pour des prélèvements réguliers, le MCP permet d'économiser de l'eau et de l'énergie. En effet, après un bref calcul, quatre centilitres d'eau sont économisés à chaque tirage. L'efficacité d'un MCP dépend de ses propriétés thermo-physiques. Malheureusement, les propriétés des MCP existants sont difficiles à réunir. Il serait donc intéressant de réaliser d'autres simulations, avec d'autres composés à changement de phase.

Nous pouvons donc penser qu'il serait plus intéressant de mettre en place des matériaux à changement de phase sur les canalisations de site industriel que sur celles de maison individuelle.

## **Bibliographie**

[http://www.dynavive.eu/DocusPDF/NORMES\\_TUYAUX.pdf](http://www.dynavive.eu/DocusPDF/NORMES_TUYAUX.pdf)

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Air>

Transferts convectifs de chaleur et de matière - Pr S. ALEXANDROVA, ENSGTI

Transferts thermiques couplés - Pr J-P. BEDECARRATS, LaTEP ENSGTI