

# Etude numérique d'un récupérateur d'eau de pluie géothermique.

## Numerical study of a geothermal rainwater tank.

Jean-Baptiste BOUVENOT<sup>1,2\*</sup>, Benjamin LATOUR<sup>1,2</sup> et Angélique FERRY<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire ICube UMR 7357, 300 bd Sébastien Brant - CS 10413 - F-67412 Illkirch

<sup>2</sup> INSA de Strasbourg, 24 Boulevard de la Victoire 67000 Strasbourg

\* (auteur correspondant : [jean-baptiste.bouvenot@insa-strasbourg.fr](mailto:jean-baptiste.bouvenot@insa-strasbourg.fr))

**Résumé** – Les réservoirs de récupération d'eau de pluie de grande taille (plusieurs m<sup>3</sup>) enterrés sont assimilables à des sondes géothermiques uniques mais de grande surface d'échange qui peuvent être « activées » thermiquement par l'immersion d'un échangeur de chaleur. Cette publication présente un modèle numérique 2D réalisé sous tableur en coordonnées cylindriques axisymétriques couplant la méthode des volumes finis pour le sol et un double modèle zonal pour les cavités d'air et d'eau. Ainsi, l'objectif est de définir les performances du système géothermique de surface ici couplé à une centrale de VMC double flux. L'énergie soutirée au système *via* une boucle d'eau glycolée servant en hiver à préchauffer l'air neuf et à recharger le sol en frigories en vue de l'été quand son fonctionnement est inversé (rafraîchissement de l'air neuf et chargement du sol en calories).

**Mots-clés** : Récupération d'eau de pluie ; Géothermie de surface ; Geocooling ; Confort d'été

**Abstract** – Large (several m<sup>3</sup>) buried rain water recovery tanks are similar to single but large superficial geothermal probes that can be “thermally activated” by immersion of a heat exchanger. This publication presents a spreadsheet 2D numerical model in axial symmetrical cylindrical coordinates combining the finite volume method for soil and a dual zonal model for air and water cavities applied to a system. The study presents the performance of the geothermal system coupled with a double-flow mechanical ventilation unit. Finally, the energy taken from the system *via* a loop of glycol water is used in winter to preheat the air and to reload the soil in frigories for the summer is determined, as well as the energy used in summer.

**Keywords**: Rain water harvesting ; Surface geothermal energy ; Geocooling ; Summer comfort

### Nomenclature

$c_p$  capacité thermique massique,  $J.kg^{-1}.K^{-1}$

$d$  diamètre, m

$E$  efficacité,-

$h$  coefficient de convection,  $W.m^{-2}.K^{-1}$

$Nu$  nombre de Nusselt, -

$pitch$  pas entre 2 spires, m

$Pr$  nombre de Prandtl,-

$q_v$  débit-volume,  $m^3.s^{-1}$

$Ra$  nombre de Rayleigh,-

$Re$  nombre de Reynolds

$S$  surface d'échange,  $m^2$

$T$  température, K

$US_{regard}$  conductance thermique du regard,  $W.K^{-1}$

$V$  volume,  $m^3$

*Symboles grecs*

$\alpha$  diffusivité thermique,  $m^2.s^{-1}$

$\beta$  coefficient de dilatation,  $K^{-1}$

$\delta$  coefficient binaire de régulation

$\Delta t$  pas de temps, s

$\Delta T_{LM}$  écart de température logarithmique, K

$\phi$  flux de chaleur,  $W$

$\nu$  viscosité cinématique,  $m^2.s^{-1}$

$\rho$  masse volumique,  $kg.m^{-3}$

*Indices et exposants*

- en référence au pas de temps précédent

$a/as$  air intérieur/ air soufflé à l'intérieur

$air$  air de la cavité

$coil$  spire/anneau

$crit$  critique

$ext$  extérieur

$g$  eau glycolée

$geo$  géothermique

$int$  intérieur

$lat$  surface verticale latérale

$low$  surface horizontale basse

$p$  paroi

$top$  surface en partie haute

$w$  eau

## 1. Introduction

Dans le contexte actuel, de par les changements climatiques (vagues de chaleur fréquentes et intenses) [1] couplés aux nouvelles réglementations thermiques (RE2020), le confort d'été dans l'habitat devient une problématique essentielle. Or dans ce cadre, les systèmes actifs de climatisation sont à proscrire dans la mesure du possible afin d'éviter :

- d'importantes émissions de GES (fluides frigorigènes, consommations électriques,...),
- la dégradation du bilan énergétique du bâtiment,
- l'amplification du phénomène d'îlots de chaleur urbain (condenseurs).

Le principe est alors de s'inscrire dans une stratégie de sobriété énergétique basée entre autre sur des systèmes passifs à basse technologie dits « Low-tech ». De plus, le contexte climatique tend vers une diminution de la pluviométrie dans une majeure partie du globe (dont la France) et une augmentation des températures, principalement en été [2]. Des solutions passives et à basse technicité s'avèrent alors des solutions pertinentes en milieu urbain pour à la fois limiter l'effet d'îlot de chaleur et maintenir le confort thermique dans les bâtiments pendant des vagues de chaleur intenses sans l'amplifier. De plus, l'ADEME précise que dans un contexte réglementaire et institutionnel favorable au développement des énergies renouvelables, la géothermie très basse énergie est un domaine sous-développé et souhaite ainsi favoriser le dynamisme de la filière [3]. Ainsi, nous nous intéresserons ici aux réservoirs de récupération d'eau de pluie provenant d'une toiture ou d'un réseau d'évacuation dont les intérêts sont multiples. En effet, ils permettent une certaine autonomie quant aux besoins en eau douce et permettent de soulager les réseaux d'eaux usées en cas d'épisodes pluvieux ainsi que la ressource d'eau potable publique (nappes phréatiques) dans un contexte de sécheresses estivales plus fréquentes en France. Ces réservoirs peuvent être en surface ou enterrés. Les réservoirs enterrés de grande taille (plusieurs m<sup>3</sup>) sont alors assimilables à des sondes géothermiques uniques mais de grande surface d'échange qui peuvent être « activées » thermiquement par l'immersion d'un échangeur de chaleur. Il s'agit alors d'une solution semi passive de geocooling et à faible technicité qui permet de limiter le recours à des systèmes de climatisation actifs. De plus, un préchauffage de l'air neuf peut aussi être réalisé en hiver pour éviter le givre de l'échangeur double flux et pour recharger le sol en frigories en vue de l'été. Ainsi, un échangeur immergé dans le réservoir et relié à un échangeur gainé dans un réseau aéraulique double flux permettrait de réaliser un rafraîchissement gratuit (rain-geocooling). Il s'avère que ces systèmes ont été peu étudiés dans la littérature, les seuls dispositifs étudiés intègrent directement des conduites aérauliques immergées dans des réservoirs [4-6]. La problématique scientifique traitée ici porte alors sur la caractérisation de l'ensemble des transferts de chaleurs, permettant d'évaluer les performances énergétiques d'un tel dispositif.

## 2. Méthode

Afin de modéliser numériquement le système géothermique de surface, constitué d'une cuve enterrée couplée à un échangeur de chaleur, un modèle numérique de ce système dans un cas d'étude en utilisant un modèle simplifié 2D en coordonnées cylindriques axisymétriques a été développé sous tableur (Excel). Celui-ci consiste à décomposer le système étudié comme suit :

- la cuve : représentée par un double modèle zonal sur le volume d'eau et celui d'air ;
- le sol : représenté par un modèle discrétisé par la méthode des volumes finis ;
- l'échangeur immergé eau/eau : représenté par un modèle analytique.

Au final, le couplage des trois parties permettra de déterminer les performances du système couplé à une centrale de VMC double flux. Celles-ci seront évaluées :

- en conditions hivernales : par la quantité d'énergie soutirée au système *via* une boucle d'eau glycolée servant à préchauffer l'air (évitements des problèmes de givrage de l'échangeur) et à recharger le sol en frigories en vue de l'été,
- en conditions estivales : par la quantité d'énergie cédée au système servant à rafraîchir l'air neuf pour éviter le recours à la climatisation active, et à recharger le sol en calories en vue de l'hiver.

### 3. Système

Le modèle se base sur un dispositif de référence défini sur les schémas suivant (Figures 1 et 2). Il considère un réservoir enterré cylindrique en béton avec un regard de visite (échangeur de chaleur non représenté) :



Figure 1 : Perspective du réservoir d'eau (cf. Fig. 3 pour l'intégration de l'échangeur immergé)

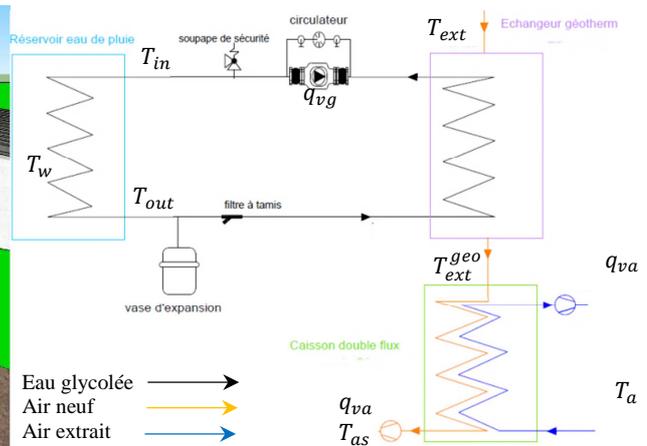


Figure 2 : Schéma de principe fluïdique

La forme du réservoir s'inspire de réservoirs commerciaux (cf. Figure 3). L'eau glycolée circule depuis le réservoir d'eau de pluie vers un échangeur air/eau type batterie (serpentin aileté) pour préchauffer ou rafraîchir l'air selon la saison. Cet air est ensuite aspiré dans une centrale VMC où selon la régulation utilisée il transitera soit dans l'échangeur air/air de récupération soit dans le by-pass.

### 4. Modèle numérique

#### 4.1. Boucle d'eau glycolée

L'objectif est de déterminer les températures d'eau glycolée d'entrée et de sortie du réservoir en fonction des caractéristiques géométriques des échangeurs. Pour cela, on applique la conservation de l'énergie au niveau des échangeurs couplée à la définition des efficacités des échangeurs. Soit le flux échangé :

$$\phi_a = \rho_a c_{pa} q_{va} (T_{ext}^{geo} - T_{ext}) = \rho_g c_{pg} q_{vg} (T_{out} - T_{in}) = \phi_w \quad (1)$$

Pour l'échangeur eau/air dit géothermique gainé, on fait l'hypothèse que :

$$E_{wa} = \frac{T_{ext} - T_{ext}^{geo}}{T_{ext} - T_{out}} \text{ car } \rho_a q_{va} c_{pa} \approx 100 \frac{W}{K} < \rho_g q_{vg} c_{pg} \approx 400 \frac{W}{K} \quad (2)$$

L'échangeur géothermique eau/eau immergé a été dimensionné (longueur du tube) de façon à obtenir une efficacité supérieure à 0,8. Cette efficacité sera recalculée à chaque pas de temps en fonction des paramètres du système (débit et températures principalement). Soit :

$$E_{ww} = \frac{T_{in} - T_{out}}{T_{in} - T_w} > 0,8 \quad (3)$$

Au final :

$$T_{ext}^{geo} = T_{ext} - E_{wa}(T_{ext} - T_{out}) \quad (4)$$

$$T_{in} = \frac{T_{out} - E_{ww}T_w}{1 - E_{ww}} \quad (5)$$

Et :

$$T_{out} = \frac{\rho_a c_{pa} q_{va} E_{wa} T_{ext} + \frac{\rho_g c_{pg} q_{vg} E_{ww} T_w}{1 - E_{ww}}}{\rho_a c_{pa} q_{va} E_{wa} + \frac{\rho_g c_{pg} q_{vg} E_{ww}}{1 - E_{ww}}} \quad (6)$$

## 4.2. Echangeur eau/eau du réservoir

L'échangeur hélicoïdal est composé d'un tube en PEHD. L'objectif est d'atteindre une efficacité élevée (>0,8) tout en respectant des contraintes d'encombrement pour le maintien de l'immersion de l'échangeur dans le volume de garde et pour son insertion aisée par le regard de visite. Pour déterminer sa conductance, les corrélations suivantes ont été utilisées :

### 4.2.1. Calcul de $h_{ext}$

Pour modéliser les échanges sur la partie extérieure du tube, on choisit pour calculer le nombre de Nusselt la corrélation pour des cylindres verticaux en convection naturelle [7] :

$$Nu_{ext} = 0,59 Ra^{0,25} \quad (7)$$

$$Ra = \frac{g \beta d_{ext}^3 (T_{film} - T_w)}{\alpha \nu}$$

$$\text{avec : } T_{film} = \frac{T_w + T_p}{2}; T_p \approx \frac{h_{int}(T_w + \Delta T_{LM}) + h_{ext}T_w}{h_{int} + h_{ext}} \text{ et } \Delta T_{LM} = \frac{T_{in} - T_{out}}{\ln\left(\frac{T_{in} - T_w}{T_{out} - T_w}\right)} \quad (8)$$

Le calcul se fera dynamiquement en fonction des températures issues des autres modèles.

### 4.2.2. Calcul de $h_{int}$

Pour un échangeur hélicoïdal, le nombre de Reynolds critique (transition laminaire/turbulent) se calcule de la manière suivante [6]:

$$Re_{crit} = 20\,000 \left( \frac{d_{int}}{d_{coil}} \right)^{0,32} \quad (9)$$

Le calcul de ce nombre de Reynolds critique pour le diamètre de spire maximal envisageable (0,6 m  $\approx$  diamètre maximum du regard de la cuve) est d'environ 8000 avec des diamètres de tubes PEHD courants (de 2 à 4 cm). Tous les nombres de Reynolds pour les diamètres intérieurs envisagés du tube sont inférieurs à cette valeur. La corrélation donnant le nombre de Nusselt d'un échangeur hélicoïdal en régime laminaire [7] a donc été utilisée :

$$Nu_{int} = \left[ \left( \frac{48}{11} + \frac{\frac{51}{11}}{1 + \left[ \frac{1342}{Pr_{int}} \right]^2} \right)^3 + 1,816 \left( \frac{HE}{1 + \frac{1,15}{Pr_{int}}} \right)^{1,5} \right]^{1/3} \text{ avec } HE = \frac{Re_{int} \left( \frac{d_{int}}{d_{coil}} \right)^{0,5}}{1 + \left[ \frac{Pitch_{coil}}{\pi d_{int}} \right]^2} \quad (10)$$

### 4.3. Echangeur air/eau

Les performances de cet échangeur dépendent du système/fabricant choisi. On supposera une efficacité  $E_{wa}$  représentative et constante à 0,52 pour l'échangeur eau/air issue des données d'un fabricant [8]. Une étude sera menée pour évaluer l'apport d'un échangeur plus efficace ( $E_{wa} = 0,8$ ).

### 4.4. Discrétisation du sol

On modélise le sol sur un rayon de 6 m et sur une profondeur de 10 m. En effet, à cette profondeur on peut considérer que la température est constante et égale à 12°C (température moyenne annuelle du site). On suppose une cuve cylindrique (cf. Figures 3 et 4) et on modélise uniquement la moitié de la cuve grâce à la symétrie de révolution. Un schéma explicite est utilisé, un pas de temps de 15 min et un pas d'espace (selon les 2 directions r et z) de 10 cm ont été choisis en garantissant la convergence du modèle. La conductivité thermique du sol a été fixée à 1,5 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>.

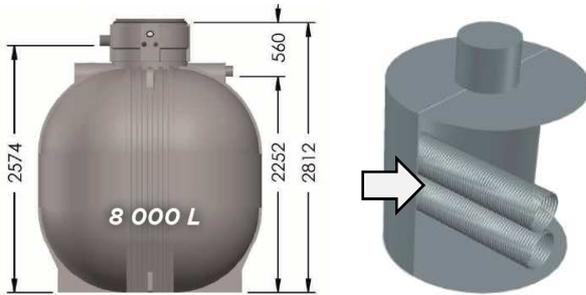


Figure 3: Simplification géométrique du réservoir avec implémentation de l'échangeur dimensionné

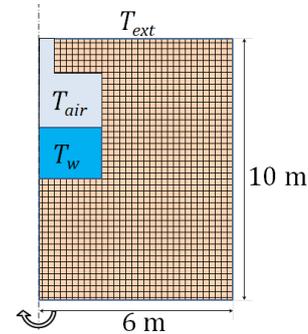


Figure 4 : Représentation du maillage du sol et des 2 zones « fluide »

### 4.5. Modèle zonal de la cavité d'eau

On suppose une température d'eau homogène dans le réservoir, ce qui reste une hypothèse forte, mais une modélisation plus complexe nécessiterait un code CFD. De plus, les faibles différences de températures constatées limitent les risques de stratification. Le bilan thermique sur le volume d'eau en régime instationnaire nous permet d'obtenir sa température supposée homogène, soit:

$$\begin{aligned} \rho_w V_w c_{pw} \frac{T_w - T_w^-}{\Delta t} \\ = h_w S_{wa} (T_{air}^- - T_w^-) + h_w S_{lat,w} (T_{lat,w}^- - T_w^-) \\ + h_w S_{low,w} (T_{low,w}^- - T_w^-) + \delta \rho_g c_{pg} q_g (T_{in}^- - T_{out}^-) \end{aligned} \quad (11)$$

Le 1<sup>er</sup> terme correspond à l'échange avec l'air de la cuve, le 2<sup>ème</sup> avec le sol à travers les parois latérales, le 3<sup>ème</sup> avec le sol à travers la paroi inférieure et le 4<sup>ème</sup> le soutirage de chaleur (ou la réinjection) lié au circuit d'eau glycolée. Une régulation sur la température extérieure a été programmée grâce au coefficient binaire  $\delta$  pour faire fonctionner la pompe de ce circuit uniquement lorsqu'on en a besoin (par défaut si  $T_{ext} > 24^\circ\text{C}$  ou si  $T_{ext} < 8^\circ\text{C}$ ).

### 4.6. Modèle zonal de la cavité d'air

On suppose une étanchéité parfaite ainsi qu'un air saturé en humidité ce qui exclut tout calcul de transfert de masse. De la même façon, le bilan thermique sur l'air s'écrit :

$$\begin{aligned}
\rho_{air} V_{air} c_{p,air} \frac{T_{air} - T_{air}^-}{\Delta t} &= h_{ch} S_{wa} (T_w^- - T_{air}^-) + h_{ch} S_{top} (T_{top,air}^- - T_{air}^-) \\
&+ h_{cv} S_{lat,low,air} (T_{lat,low,air}^- - T_{air}^-) \\
&+ h_{cv} S_{lat,top,air} (T_{lat,top,air}^- - T_{air}^-) + US_{regard} (T_{top,air}^- - T_{air}^-)
\end{aligned} \tag{12}$$

## 5. Résultats

Dans un premier temps, l'hypothèse défavorable a été faite que le niveau dans le réservoir de l'eau est stable toute l'année à son niveau minimal pour notamment simuler une sécheresse estivale. Ce volume de garde permet notamment de maintenir la pompe de relevage immergée. Ici, ce volume est considéré à 5 m<sup>3</sup> sur les 8 m<sup>3</sup> maximum. La figure 5 montre le champ de température dans le sol à un instant donné influencé par le réservoir. A l'instant initial le champ de température étant inconnu, il a été uniformément fixé à 9 °C. La figure 6 montre l'évolution de la température de l'eau dans le réservoir sur 5 ans et montre qu'il faut attendre 3 ans avant d'atteindre la stabilisation du champ de température dans le sol, les années 3, 4 et 5 étant quasiment confondues. L'idée est alors de faire une simulation de 3 ans et de ne conserver que la dernière année. La simulation a été faite avec le fichier météo de Strasbourg 2010-20 généré par le logiciel *Meteonorm*. On relève également une amplitude raisonnable de 11,3 K, une valeur minimale de 5,4 °C qui permet d'éviter le gel de l'eau malgré le puisage de chaleur en hiver et une valeur maximale de 16,7 °C qui est tempérée malgré la réinjection de chaleur en été. La puissance maximum obtenue en été est de 1083 W.

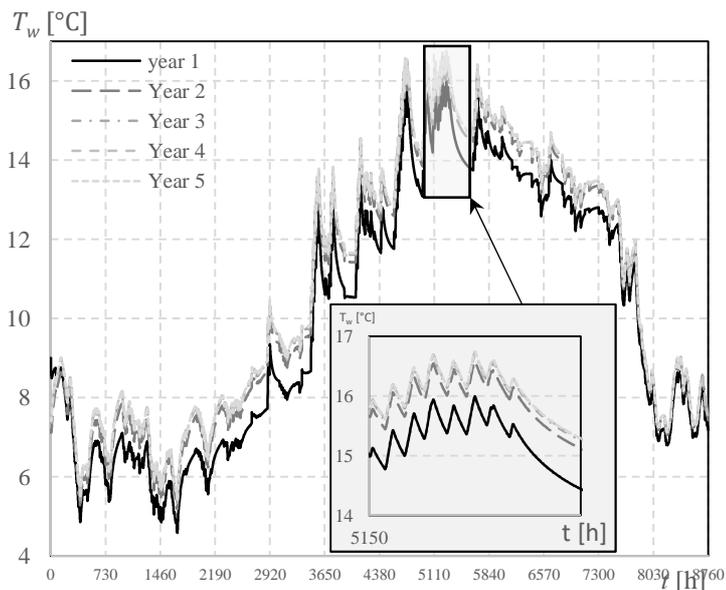
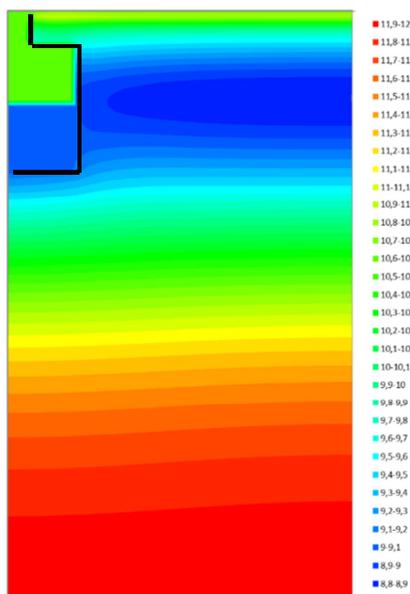


Figure 5 : Champ de température.

Figure 6 : Evolution des températures du réservoir sur 5 ans.

Les résultats sur la figure 7 ont été obtenus pour une régulation qui fait fonctionner le système pour  $T_{ext} < 8^\circ\text{C}$  ou  $T_{ext} > 24^\circ\text{C}$ . On voit que le système permet d'éviter le givrage toute l'année (et donc l'utilisation de la résistance chauffante électrique de dégivrage de la centrale double flux) et permet de rafraîchir l'air neuf en été au maximum à 26 °C. Le tableau 1 récapitule les résultats de l'étude paramétrique en considérant des fichiers météorologiques actuels et futurs générés par *Météonorm* et en considérant des stratégies de régulation différentes. L'idée étant notamment d'évaluer la pertinence du « rechargement » du sol en frigories l'hiver en vue de l'été. Pour les calculs, on considère un logement de 100 m<sup>2</sup> et une puissance de pompe de 20 W<sub>el</sub> basée sur un calcul de pertes de charges de l'échangeur

hélicoïdal et des données du constructeur de l'échangeur eau/air [8]. Le tableau présente notamment respectivement, les températures minimum  $T_{min}$  et maximum  $T_{max}$  obtenues dans l'eau du réservoir, les puissances maximum générées par saison  $P_{max}$ , la quantité d'énergie absolue  $E$  et spécifique  $E_{spé}$  récupérée du sol ou réinjectée dans le sol, le temps de fonctionnement des pompes par saison  $t_f$ , l'énergie primaire consommée par les pompes  $E_{pompe}$  et le coefficient de performance saisonnier du système  $COP$ .

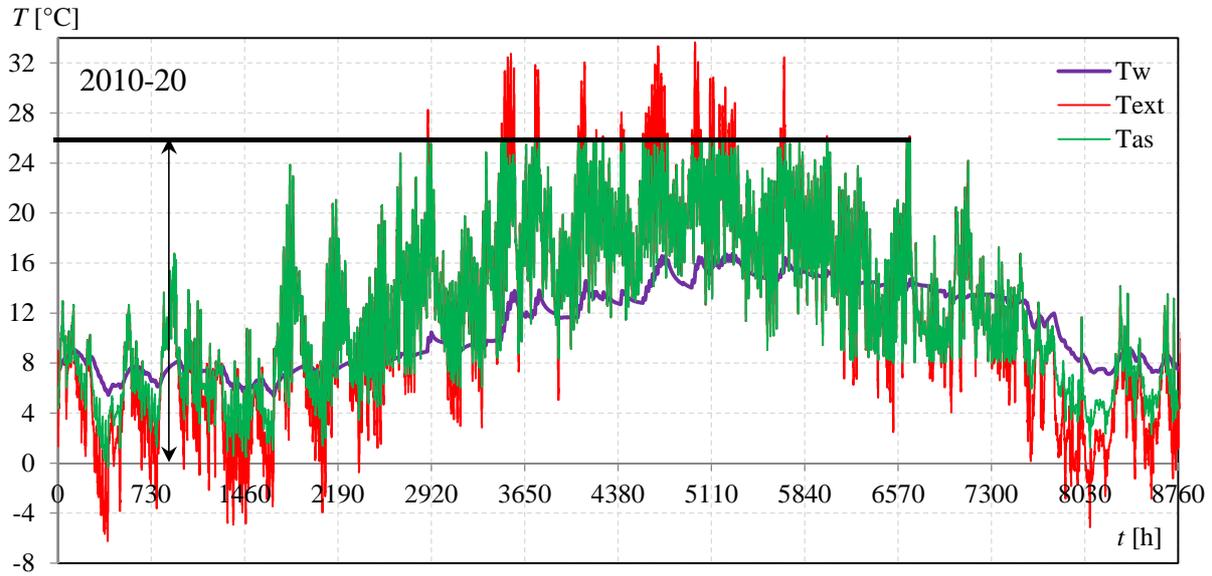


Figure 7 : Evolution de  $T_{ext}$ ,  $T_w$  et  $T_{as}$  lors de la 5<sup>ème</sup> année de simulation

Climat	Régulation (ON si...)		$T_{min}$ [°C]	$T_{max}$ [°C]	$P_{max}$ [W]	$E$ [kWh/an]	$E_{spé}$ [kWh/ m <sup>2</sup> /an]	$t_f$ , [h]	$E_{pompe}$ [kWh <sub>EP</sub> /an/ m <sup>2</sup> ]	$COP \left( = \frac{2,58 E_{spé}}{E_{pompe}} \right)$ [-]
Strasbourg 2010-2020	$T_{ext} > 24$ et $T_{ext} < 8^{\circ}C$	été	-	16,7	<b>1083</b>	229	2,3	301	0,2	38
		hiver	5,4	-	<b>-681</b>	-715	7,1	2719	1,4	13
	$T_{ext} > 24$ et $T_{ext} < 8^{\circ}C$ et ( $E_{wa} = 0,8$ )	été	-	18,2	<b>1576</b>	324	3,2	301	0,2	54
		hiver	3,9	-	<b>-908</b>	-914	9,1	2630	1,4	17
	$T_{ext} > 24$	été	-	17,0	<b>1044</b>	222	2,2	301	0,2	37
		hiver	9,9	-	-	-	-	-	-	-
Strasbourg 2100	$T_{ext} > 24$ et $T_{ext} < 8^{\circ}C$	été	-	20,7	<b>1051</b>	442	4,4	732	0,4	30
		hiver	5,9	-	<b>-772</b>	-742	7,4	2421	1,2	15
	$T_{ext} > 24$ et $T_{ext} < 8^{\circ}C$ et ( $E_{wa} = 0,8$ )	été	-	22,3	<b>1572</b>	591	5,6	732	0,4	40
		hiver	4,1	-	<b>-1166</b>	-947	9,5	2341	1,2	20
	$T_{ext} > 24$	été	-	20,8	<b>1039</b>	430	4,3	732	0,4	29
	hiver	10,8	-	-	-	-	-	-	-	

Tableau 1 : Performances du système selon plusieurs configurations

On s'aperçoit que l'eau dans le réservoir ne gèle jamais et que la régénération du sol en hiver a un impact très peu sensible sur le pic de température de l'eau en été (de l'ordre de 0,1 K). Le fonctionnement hivernal, malgré les consommations énergétiques de la pompe, est pertinent malgré tout pour éviter le recours à la résistance électrique antigivrage. Les consommations en énergie primaire évitées de la résistance électrique sont de  $71 \times 2,58$  kWh<sub>EP</sub> soit 1,8 kWh<sub>EP</sub>/m<sup>2</sup>/an : valeur légèrement supérieure aux consommations hivernales de la pompe. Aussi, pour les simulations réalisées avec un climat futur, on s'aperçoit que les puissances récupérées sont légèrement plus faibles mais que la hausse des températures de l'eau augmente sensiblement de l'ordre de 4 K par rapport à des températures extérieures qui ont augmentées de 2 K en moyenne. Avec des températures extérieures plus élevées, à

régulation égale, le système est davantage sollicité en terme temporel ce qui réinjecte davantage de calories dans le volume d'eau. Ceci explique la hausse marquée de la température maximum du réservoir pour le climat futur. Enfin, les consommations en énergie primaire de fonctionnement du système en été sont négligeables mais au final le système apporte de l'énergie frigorifique spécifique sensible de l'ordre de 2 à 3 kWh/m<sup>2</sup>/an pour le climat actuel et de 4 à 6 kWh/m<sup>2</sup>/an pour le climat futur.

## 6. Conclusion

Un nouveau modèle numérique d'un récupérateur d'eau de pluie géothermique a été réalisé sous tableur afin d'en évaluer la pertinence énergétique lorsqu'il est couplé à une centrale de VMC double flux. L'objectif est d'éviter le recours à une climatisation active tout en garantissant le confort d'été. Le modèle simplifié a montré que ses performances permettaient de rafraîchir l'air neuf pendant les pics de température de 5 à 10 K avec des puissances de rafraîchissement de l'ordre de 1000 W. Cette ordre de grandeur est intéressant mais reste modeste au regard des règles usuelles de dimensionnement de climatisation requérant *a minima* de l'ordre de 50 W/m<sup>2</sup>. Cependant, ce système ne prétend pas remplacer un système de climatisation mais permet de faire du rafraîchissement pour éviter un éventuel recours à la climatisation. Le modèle montre également de bonnes performances en considérant des climats futurs plus chauds (2100). Il montre également qu'il est préférable d'utiliser le système en hiver pour d'une part éviter le recours aux systèmes anti givre, mais aussi pour recharger le sol en vue de la saison estivale. En perspectives, il serait judicieux de coupler ce modèle à un modèle dynamique de bâtiment pour quantifier le confort obtenu à l'aide de ce système. De plus, il serait intéressant d'ajouter un modèle sur les flux de précipitations afin d'évaluer l'impact du remplissage et du soutirage d'eau dans le réservoir qui doit avoir tendance à améliorer les performances théoriques du système. Ces travaux sont en cours. Enfin, d'autres études paramétriques sont en cours pour évaluer l'impact de la géométrie (taille, matériau, profondeur d'enfouissement, isolation thermique de la partie haute du réservoir), de la régulation, et des propriétés thermo physiques du sol.

## Références

- [1] Rapports du GIEC, <https://www.ipcc.ch/srccl/> (site consulté le 13/01/2020).
- [2] <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climathd> (site consulté le 13/01/2020).
- [3] A. Cardona-Maestro, Etude sur la géothermie très basse énergie afin de redynamiser la filière, Etude ADEME, 9 Juin 2016
- [4] A. Choorapulakkal, M. Noguchi, Performance Analysis Of A Proposed 'Water Tube Heat Exchanger' Space Cooling System in Kerala, *PLEA2013 - 29th Conference, Sustainable Architecture for a Renewable Future*, Munich, Germany 10-12 September 2013
- [5] T.-S. Bisoniya, Design Of Earth-Air Heat Exchanger System, *Geothermal Energy*, Sept. 2015
- [6] S.Irei et T. Asakura, US Patent US 6,227,000 B1, Air conditioning system for refreshment utilizing rainwater, Yokohama (Japan), 2001.
- [7] TESS Component Libraries, *Type 534 : Vertically cylindrical storage tank with immersed heat exchanger*, TRNSYS documentation (2012).
- [8] Zehnder, Zehnder ComfoFond-L Q – Technical specification for brine-earth heat exchangers, septembre 2018