

Étude paramétrique de récupérateurs d'eaux pluviales enterrés géothermiques

Parametric study of underground geothermal rainwater tanks

Lucas STRIEGEL^{1,2*}, Jean-Baptiste BOUVENOT^{1,2}, Edouard WALTHER^{1,2}, Hossein NOWAMOOZ³

¹ Laboratoire ICube, Université de Strasbourg, CNRS, INSA Strasbourg, UMR7357
300 Boulevard Sébastien Brant - CS 10413- F-67412 Illkirch

² Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg
24 Boulevard de la Victoire - 67000 Strasbourg

³ Institut National des Sciences Appliquées de Rennes
220 Avenue des Buttes de Coesmes - 35700 Rennes

*(auteur correspondant : lucas.striegel@insa-strasbourg.fr)

Résumé - La généralisation des réglementations sur la gestion des eaux pluviales à la parcelle induit un essor de l'installation de récupérateurs d'eaux pluviales. En parallèle, le changement climatique accroît les phénomènes caniculaires. Ces systèmes enterrés peuvent alors être hybridés en sondes géothermiques pour la production de froid passif, améliorant la résilience dans les bâtiments. Ce travail vise alors à établir des règles de dimensionnement (volume, niveau d'eau minimum, forme, ...) pour de tels systèmes. Ces règles ont été établies grâce à un modèle Python et validées grâce à des données expérimentales in-situ.

Abstract - The widespread introduction of on-site rainwater management regulations is leading to an increase in the installation of rainwater harvesting systems. At the same time, climate change is increasing heatwaves. These underground systems can then be hybridised to become geothermal probes and provide passive cooling to improve the resilience of buildings. The aim of this work is to establish sizing rules (volume, minimum water level, shape, etc.) for such systems. These rules were established using a Python model and validated using in-situ experimental data.

1. Introduction

1.1. Contexte de l'étude

Les vagues de chaleur, de plus en plus intenses et fréquentes [1], imposent au secteur du bâtiment une augmentation de sa résilience en matière de confort estival. Santamouris [2] associe l'augmentation des vagues de chaleur et des îlots de chaleur urbains à l'augmentation de la consommation électrique des bâtiments en raison de l'utilisation croissante de systèmes de refroidissement. La réduction de la capacité d'approvisionnement en électricité en raison des pertes d'efficacité au niveau de la production et de l'augmentation des pertes au niveau de la distribution et des sous-stations participent également à la hausse de la consommation.

Pour ces raisons, l'AFPG [3] et l'ADEME [4] encouragent au développement de solutions de géothermie basse et très basse énergie, en particulier les solutions passives de rafraîchissement, moins consommatrices d'énergie et émettrices de CO₂.

En parallèle, les évènements pluvieux intenses et les sécheresses de plus en plus fréquentes [5], soulignent l'importance de la gestion des eaux pluviales. Celle-ci se traduit notamment par des réglementations de plus en plus fortes sur la gestion des eaux au niveau de la parcelle. Les récupérateurs d'eaux pluviales sont alors une des solutions mise en œuvre de plus en plus couramment.

La valorisation énergétique de ces systèmes de stockage d'eau de pluie a fait l'objet de diverses études. Upshaw et al. [6] modélisent notamment l'apport du déphasage de production d'un groupe froid réalisé par stockage journalier sur un réservoir d'eaux pluviales aérien. Des pompes à chaleurs, pour la production de chaud, sur récupérateur d'eaux pluviales enterrés ont également été testées par plusieurs auteurs, tant en modélisation [7] [8] qu'en études expérimentales [9].

Des systèmes passifs ont également été étudiés sous diverses formes. Sodha [10] fait l'étude de principe d'un réservoir d'eau enterré refroidi par évaporation en surface. L'eau stockée n'est pas de l'eau pluviale. Chourapulakkal et al. [11] font l'étude expérimentale d'un système de type puits canadien aéraulique noyé dans une cuve de récupération d'eau de pluie enterrée tandis que Kalz et al. [12] étudient le rafraîchissement d'un bâtiment par dalles actives alimentées par une boucle d'eau refroidie par un récupérateur d'eaux pluviales enterré.

Les verrous scientifiques concernent notamment l'établissement de modèles de ces systèmes dont le niveau est variable pour ensuite investiguer leur dimensionnement optimal. Cet article présente donc rapidement le concept de récupérateurs d'eaux pluviales enterrés géothermiques, le modèle établi et validé par acquisition de données in-situ pour ensuite se concentrer sur l'étude de divers paramètres de dimensionnement du stockage (profondeur, volume, ...) pour déterminer leur influence sur la production énergétique.

1.2. Concept de récupérateurs d'eaux pluviales enterrés géothermiques

Le système proposé s'appuie sur des cuves de récupération d'eaux pluviales enterrées ($\sim 10 \text{ m}^3$) utilisées pour le stockage inter-saisonnier d'eaux de pluie mais également pour la gestion de l'eau à la parcelle, une réglementation de plus en plus courante en France. L'idée est d'hybrider le stockage d'eau en un stockage thermique par l'ajout d'un échangeur eau-eau hélicoïdal. L'énergie stockée dans l'eau et le sol environnant est ensuite utilisée dans le bâtiment via un échangeur air-eau en amont du système de ventilation. L'eau est utilisée dans les toilettes ou pour le jardinage. Ce concept sera appelé Rainergy dans la suite de cet article.

2. Méthodologie et modèle

2.1. Construction d'un modèle

Une première étape a consisté à l'établissement d'un modèle numérique du système. Dans une première version [13], un modèle de stockage à température homogène mais volume variable a été couplé à un modèle de sol en différences finies (transferts conductifs uniquement). Ce modèle a par la suite été amélioré en prenant en compte la stratification 1D en température dans la cuve [14].

2.2. Validation du modèle

Le modèle a par la suite été validé par comparaison à des données expérimentales obtenues sur deux prototypes in-situ, à Haguenau et Eschbourg [15], présentées dans [14]. Deux

périodes de validation ont été choisies (été 2022 et année glissante 2023-2024). Les RMSE (racine moyenne des écarts quadratiques entre les données expérimentales et mesurées sur la période) sur les températures d’eaux stockées ou d’air soufflé dans le bâtiment sont inférieures à 1°C. Les écarts sur la production sont de l’ordre de 5%.

2.3. Hypothèses des études paramétriques

Lors des études paramétriques, les données utilisées correspondent en tous points aux caractéristiques de la cuve de Haguenau (sauf pour le paramètre investigué), pour la même implantation (propriété de sol identique). Les périodes testées correspondent aux périodes de validations du modèles. Les données météo du site ont donc été utilisées. Pour un gain de place, les résultats seront présentés sous forme de tableaux uniquement pour la période 2023-2024.

Pour chaque étude, on analysera les valeurs de l’énergie de rafraîchissement produit. Les températures maximum au fond et à la surface de la cuve seront également données.

3. Études paramétriques pour le dimensionnement

3.1. Impact du niveau d’eau

Les performances de Rainergy dépendent du volume d’eau stockée - un plus gros volume d’eau pourra contenir plus d’énergie. Pour vérifier et caractériser cette hypothèse, des simulations ont été entreprises en fixant plusieurs niveaux constants dans la cuve, voir Tableau 1.

Niveau d’eau [m]	0,6	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,2
Volume [m ³]	2,94	3,68	4,91	6,14	7,36	8,59	9,81	10,80
Taux de remplissage [-]	0,26	0,33	0,43	0,54	0,65	0,76	0,87	0,96

Tableau 1 : Paramètres du niveau d’eau fixé.

Un niveau minimum de 0,6 m, qui correspond à l’immersion de l’échangeur, a été fixé pour deux raisons : le modèle ne supporte pas une configuration d’un échangeur semi-immergé (en l’état actuel) et un tel niveau minimum existe en pratique pour conserver la pompe immergée. Les résultats sont présentés dans le Tableau 2 ci-après.

Niveau d’eau [m]	0,6	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,2
Période : septembre 2023 - septembre 2024								
E _{prod} [kWh]	354	370	3952	410	424	434	443	449
T _{surf} _{max} [°C]	23,9	23,6	23,8	23,9	23,8	23,9	24,0	24,2
T _{fond} _{max} [°C]	22,4	22,3	22,0	21,8	21,6	21,4	21,3	21,3

Tableau 2 : Variation de l’énergie produite et de la température de l’eau de la cuve en fonction de la hauteur d’eau.

De façon globale, l’énergie produite diminue avec le niveau d’eau, tandis que la température maximale au fond de la cuve augmente. On définit l’énergie normalisée E_{normalisée} qui représente la variation de 0 à 1 de l’énergie maximale qu’il est possible de produire (lorsque la cuve est pleine). Le niveau d’eau normalisé Heau_{normalisée} représente la variation entre 0 et 1 du niveau d’eau (0 étant le niveau minimal et 1 une cuve remplie). Ainsi, pour une hauteur d’eau donnée Heau comprise entre la hauteur d’eau maximale et minimale, il est possible d’en déduire la production attendue, comprise entre la production maximale et minimale. Cette production

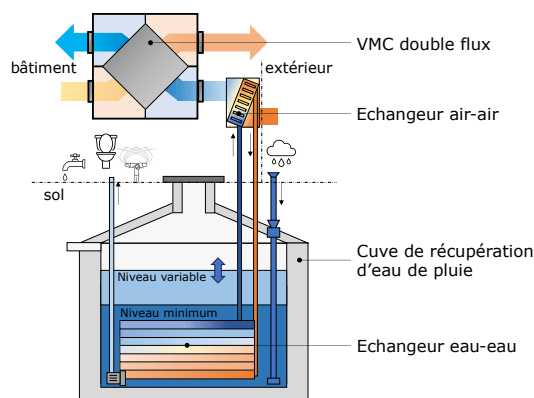


Figure 1 : Schéma de principe du système Rainergy.

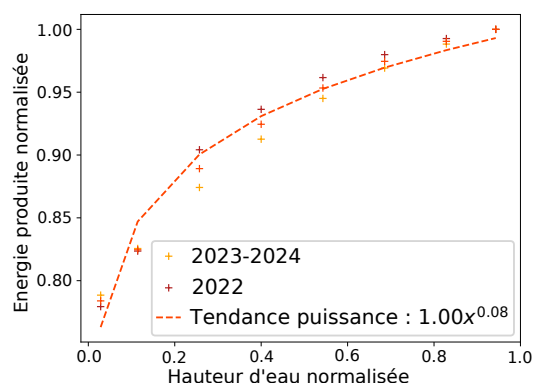


Figure 2 : Variation de la production normalisée en fonction de la hauteur d'eau normalisée.

dépend entre autres des conditions climatiques, il n'est donc pas possible d'en donner une valeur numérique.

Les deux périodes ont été analysées et une courbe de tendance de type puissance a été ajustée sur les valeurs moyennes, voir Figure 2.

Corrélation : Puissance	<i>A</i>	<i>b</i>
$E_{normalisée} = A \cdot Hauteur_{normalisée}^b$	0,998	0,075
Erreur [%]	1,4%	

Tableau 3 : Paramètres du modèle puissance pour l'ajustement par rapport à la hauteur d'eau dans la cuve et son erreur associée.

Ainsi, en période de sécheresse ou de non disponibilité d'eau, si Rainergy présente un niveau proche de son minimum, la production diminue d'environ 20%. Cependant, il faut noter qu'à partir d'une hauteur normalisée de 0,5 environ, la production est assurée à 95%. Cette hauteur correspond environ à 60% du volume de stockage.

3.2. Impact de la profondeur de la cuve

Rainergy est un système géothermique de surface, cependant il est nécessaire de s'interroger sur sa profondeur adéquate d'enfouissement. Plus la cuve est enfouie, moins elle sera soumise aux variations climatiques de surface, ce qui en principe devrait augmenter son potentiel d'énergie produite. Cependant, plus la cuve est profonde, plus il est nécessaire de mobiliser des moyens lors de son installation, ce qui augmente le coût initial. Les profondeurs testées vont varier entre 0,5 et 3 m, tous les 50 cm. Les résultats sont présentés dans le Tableau 4.

Profondeur de cuve [m]	0.5	1	1.5	2	2.5	3
Période : septembre 2023 - septembre 2024						
E_{prod} [kWh]	558	584	613	635	657	673
$T_{surf_{max}}$ [°C]	22.1	21.6	21.2	20.8	20.6	20.6
$T_{fond_{max}}$ [°C]	20.9	20.7	20.5	20.3	20.2	20.1

Tableau 4 : Variation de l'énergie produite et de la température de l'eau de la cuve en fonction de la profondeur de la cuve.

Les gains de production sont bien marqués entre un enfouissement proche de la surface et une cuve plus profonde. Le gain d'un enfouissement supplémentaire de 2,5 m est d'environ 20 à 25%. On peut tracer l'évolution de l'augmentation de l'énergie produite en fonction de la profondeur en considérant une énergie normalisée par le minimum : $E_{normalisée} = \frac{E}{E_{min}}$.

Une corrélation linéaire de la forme $E_{normalisée} = A \cdot prof + b$ peut être déduite de cette évolution (Figure 3). Les valeurs de production sont moyennées pour s'affranchir de la variabilité météorologique. Une interception est définie en (0,1) pour permettre de calculer les gains potentiels en partant de la surface. Le gain estimé par mètre supplémentaire d'enfouissement est de près de 10% de l'énergie qui serait obtenue avec un enfouissement à l'affleurement de la surface du sol.

Corrélation : Linéaire	<i>A</i>	<i>b</i>
$E_{normalisée} = A \cdot prof + b$	0,098	1
Erreur [%]	R²	
0,6%	0,992	

Tableau 5 : Paramètres du modèle linéaire pour l'ajustement par rapport à la profondeur d'enfouissement et son erreur associée.

3.3. Impact du volume de la cuve

Le volume maximum de stockage de la cuve est une composante importante à la fois pour le volet de gestion des eaux pluviales mais également pour le volet énergétique.

D'après les résultats précédents, nous avons conclu que pour exploiter au mieux les capacités géothermiques de Rainergy, il est intéressant d'avoir une cuve la plus pleine possible. Cependant, une cuve remplie aux 2/3 permet tout de même de conserver des performances élevées. Il est ainsi intéressant de s'interroger sur le volume de cuve qu'il est possible de surdimensionner, mais dans une proportion "raisonnable". Les volumes testés sont issus d'un catalogue constructeur et présentés Tableau 6. Les résultats sont présentés dans le Tableau 7.

Volume total [m³]	4,87	5,97	7,23	7,85	9,33	11,29
Rayon [m]	1	1	1	1,25	1,25	1,25
Hauteur totale [m]	2,25	2,6	3	2,3	2,6	3
Hauteur de stockage [m]	1,55	1,9	2,3	1,6	1,9	2,3

Tableau 6 : Différents volumes testés correspondant à une sélection de modèles dans le catalogue de PLUVIEAU.

Volume total [m³]	4,87	5,97	7,23	7,85	9,33	11,29
Année 2021						
E _{prod} [kWh]	459	483	519	492	513	553
T _{surf} _{max} [°C]	22,3	22,2	21,9	22,1	22,1	21,8
T _{fond} _{max} [°C]	21,0	20,7	20,4	20,3	20,1	19,8

Tableau 7 : Variation de l'énergie produite et de la température de l'eau de la cuve en fonction des différents volumes totaux.

L'énergie produite n'augmente pas de façon linéaire avec le volume total. Cependant, comme nous l'avons montré précédemment, la production augmente avec la profondeur de la cuve.

Ainsi, les cuves de plus faible hauteur sont "désavantagées" par une profondeur moindre en plus de l'être en terme de volume. Pour s'affranchir de la différence de profondeur, la production des cuves a été ramenée à une profondeur de 3,3 m, grâce à la corrélation établie en 3.2 *Impact de la profondeur de la cuve*.

De plus, une cuve de plus faible volume se déchargera plus rapidement lors des soutirages (en terme de remplissage relatif). Cette observation doit rentrer en compte dans le dimensionnement de la cuve, mais l'objet de cette partie est d'analyser uniquement le gain énergétique dû à un volume total plutôt qu'à un remplissage relatif (cf. 3.1 *Impact du niveau d'eau*). En utilisant la corrélation trouvée précédemment, on ajuste la production par rapport au niveau de remplissage moyen en l'augmentant pour atteindre un niveau de production équivalent à un remplissage de 100 %.

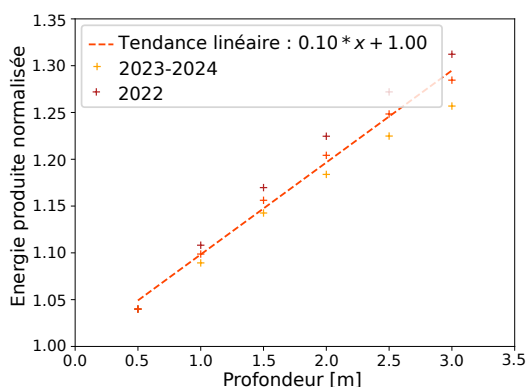


Figure 3 : Variation de la production normalisée en fonction de la profondeur.

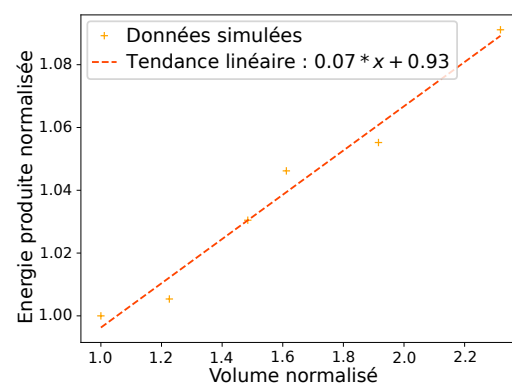


Figure 4 : Variation de la production normalisée en fonction du volume normalisé.

Après ces ajustements, le gain de production peut être réellement affecté au volume maximal stockable dans la cuve. On définit alors la production normalisée et le volume normalisé (par le minimum) pour observer le gain énergétique en fonction de l'augmentation du volume. Sur la Figure 4, on peut notamment observer qu'un doublement de volume permet une augmentation de la production de 7%, d'après la corrélation établie dans le Tableau 8.

Corrélation : Linéaire	<i>A</i>	<i>b</i>
$E_{normalisée} = A \cdot V_{normalisée} + b$	0,070	0,926
Erreur [%]	R^2	
0,4%	0,975	

Tableau 8 : Paramètres du modèle linéaire pour l'ajustement par rapport au volume et son erreur associée.

Ainsi, le dimensionnement de la cuve va surtout consister à chercher à avoir la hauteur d'eau la plus importante, pendant le maximum de temps.

3.4. Impact de la géométrie de la cuve

L'influence de la géométrie de la cuve est également importante en plus de sa profondeur et de sa capacité. La profondeur joue un rôle non négligeable, mais il peut donc être légitime de s'interroger si une forme de cuve doit être privilégiée par rapport à une autre : plutôt un petit rayon pour une grande hauteur ou l'inverse ?

Pour volume constant, différentes hauteurs de stockage d'eau sont associées à un rayon de cuve. La profondeur varie pour assurer un enfouissement de cuve identique pour tous les prototypes. Cet enfouissement a été calculé pour le modèle de cuve installée à Haguenau et vaut $haut_{tot} + prof_{cuve} = 3,30\text{ m}$.

Sept formes de cuve ont été analysées (voir Table 9) pour des hauteurs de stockage d'eau variant de 1,5 à 3 mètres. Les formes de cuve ont été caractérisées par le facteur de forme $F_{forme} = \frac{V}{S_{ech}}$ qui est le rapport du volume de la cuve sur la surface d'échange avec le sol.

Facteur forme [-]	0,78	0,73	0,68	0,63	0,60	0,58	0,55
Hauteur stockage [m]	1,5	1,75	2,0	2,25	2,5	2,75	3,0
Rayon [m]	1,55	1,45	1,35	1,25	1,2	1,15	1,1
Profondeur [m]	0,85	0,7	0,5	0,35	0,15	0,05	0,05

Tableau 9 : Différentes formes de cuves testées.

Les résultats des simulations sont données dans le Tableau 10.

Facteur forme [-]	0,78	0,73	0,68	0,63	0,60	0,58	0,55
Période : septembre 2023 - septembre 2024							
E _{prod} [kWh]	541	542	552	549	536	538	550

Tableau 10 : Variation de l'énergie produite en fonction du facteur de forme.

Les résultats sur l'ensemble des cuves sont très proches. On ne constate pas vraiment de différence sur l'énergie produite. La stratification est légèrement plus importante pour les modèles avec un faible facteur de forme : ces modèles sont les plus étroits et donc la hauteur de la surface d'eau y est plus élevée, plus proche de la surface du sol et de ses variations. Cependant, comme l'échangeur se situe au fond de la cuve, soit à la même profondeur pour les sept cuves, les températures d'eau au fond sont relativement identiques ce qui uniformise la production.

4. Discussion

Les différentes études nous permettent de classer dans l'ordre les paramètres investigués en terme d'influence : profondeur, taux de remplissage, volume total et forme de cuve. Les deux premiers paramètres influencent la production de 15 à 25%. On peut notamment en conclure que la cuve devrait être la plus profonde possible et légèrement surdimensionnée par rapport aux différents soutirages envisagés (toilettes, jardin, machine à laver, ...) pour permettre son bon remplissage et ainsi maximiser sa production. Une étude technico-économique devrait notamment être menée pour déterminer le bon compromis coût d'investissement-production.

Le volet dimensionnement des cuves de récupération d'eaux pluviales (pour un usage exclusif de stockage et réutilisation des eaux pluviales) ne semble pas avoir dégagé de consensus clair dans la littérature scientifique ([16] ou [17]) ou sur des sites spécialisés plus "grand public" (<https://www.graf.info>, <https://www.gammvert.fr>). Cet article n'a pas vocation à explorer en détail ce dimensionnement, cependant on pourra tout de même noter ici les éléments importants :

- La surface et le type de toiture qui donnent un coefficient de captage,
- La localisation de la cuve pour estimer les apports en précipitation,
- Les usages de l'eau de pluie et le nombre de personnes.
- Le nombre de jours de réserve souhaités. Ce paramètre semble important également pour Rainergy.

Ce travail n'est qu'une des premières étapes du développement de ce système vers son déploiement opérationnel à grande échelle. D'autres études devront être entreprises, notamment sur le dimensionnement des échangeurs ou sur l'optimisation de la régulation du système.

5. Conclusion

Cet article a présenté un nouveau système hybride de stockage et de valorisation énergétique des eaux pluviales. Un modèle du système, validé grâce à des données in-situ, a permis d'étudier une partie des paramètres géométriques de la cuve. La profondeur d'enfouissement et le taux de remplissage sont deux paramètres cruciaux pour la production énergétique. Le volume total ou la forme de la cuve sont respectivement peu influents ou négligeables.

Les perspectives envisagées à court terme sont l'étude du système Rainergy à une échelle supérieure (tertiaire ou habitat collectif) ainsi qu'un couplage à des échangeurs adiabatiques qui permettrait de valoriser la partie latente du stockage en plus de la partie sensible.

Références

- [1] V. Masson-Delmonte et al, Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, *Cambridge University Press*, 2021.
- [2] M. Santamouris, Recent progress on urban overheating and heat island research. Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact. Synergies with the global climate change, *Energy and Buildings* ; 207 (2020).
- [3] AFPG, La géothermie en France - Etude de filière 2023, *Association Française des Professionnels de la Géothermie*, 2023.
- [4] F. Branchu et al, Géothermie de surface, une énergie performante et durable pour les territoires, *ADEME et BRGM*, 2020.
- [5] K. Calvin, IPCC, 2023 : Climate Change 2023 : Synthesis Report, *IPCC*, 2023
- [6] C. Upshaw et al, Modeling electric load and water consumption impacts from an integrated thermal energy and rainwater storage system for residential buildings in Texas, *Applied Energy*, 186 (2017) 492-508.
- [7] M. Marigo et al, Analysis of the thermal performance of a water storage cell with helical shaped pipe for ground source heat pumps, *Proc. Building Simulation 2021 : 17th Conference of IBPSA* (Bruges, sept. 2021).
- [8] H. Eu et al, Field experiment on performance of water source heat pump using underground rainwater tank as heat source, *Journal of Building Engineering*, 84 (2024).
- [9] H. Eu et al, Analysis of temperature behavior and prediction model for underground permeable blocks rainwater tank source heat pump system through long-term operation, *Journal of Building Engineering*, 99 (2025).
- [10] M.S. Sodah et al, Use of evaporatively cooled underground water storage for convective cooling of buildings : An analytical study, *Energy Conversion and Management*, 35 (1994) 683-688.
- [11] A. Choorapulakkal et N. Masa, A Proposed 'Water Tube Heat Exchanger' Space Cooling System Performance Analysis, *Civil Engineering and Architecture*, 2 (2014) 166-169.
- [12] D. Kalz, Novel heating and cooling concept employing rainwater cisterns and thermo-active building systems for a residential building, *Applied Energy*, 87 (2010) 650-660.
- [13] L. Striegel, Experimental and numerical study of geothermal rainwater tanks for buildings passive cooling, *Proc. Building Simulation 2023 : 18th Conference of IBPSA* (Shanghai, 4-6 sept. 2023).
- [14] L. Striegel, Etudes numérique et expérimentale de récupérateurs d'eaux pluviales enterrés géothermiques pour le rafraîchissement passif des bâtiments, *Université de Strasbourg* (à venir).
- [15] L. Striegel, Experimental study of a geothermal rainwater tank concept, *Energy and Buildings* (accepté, en révision).
- [16] C. Matos et al, Rainwater storage tank sizing : Case study of a commercial building, *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2 (2013) 109-118.
- [17] C. Okoye et Solyali O. et Akintuğ B., Optimal sizing of storage tanks in domestic rainwater harvesting systems : A linear programming approach, *Resources, Conservation and Recycling*, 104 (2015) 131-140.