

Energie géothermique : efficacité de son utilisation dans le chauffage des bâtiments dans le Vakinankaratra, Madagascar

1 RAKOTONINDRAINY- Zakanirina

*Ecole doctorale Ingénierie et Géosciences (INGE),

Université d'Antananarivo

2- RANDRIANJA Roger

Professeur Titulaire à l'IESSI

Université d'Antananarivo

3- Docteur RALIJAONA HERILALA TAFITASOLONIAINA

Ecole Doctorale Ingénierie et Géoscience (INGE)

Université d'Antananarivo

4- HERITAHINA RAMBELOSON

Maitre de Conférences

Ecole Doctorale Ingénierie et Géoscience (INGE)

Université d'Antananarivo

Résumé

D'une part, il existe un besoin de chauffage et de refroidissement dans les logements de la région du Vakinankaratra, Madagascar. D'autre part, le secteur du bâtiment et la consommation énergétique résultante est en croissance constante. Une solution efficace est donc nécessaire pour adresser ces besoins. Notamment, nous avons étudié l'efficacité sur le volet énergétique, écologique et financier de l'utilisation d'une pompe à chaleur géothermique dans les bâtiments de la région. Nous avons créé un bâtiment typique sur ArchiCAD, puis sa modélisation thermique multizone a été faite sur EcoDesigner STAR pour obtenir les indicateurs de performance énergétique y afférents. Nous avons découvert que malgré de bonnes performances, donc efficace, sur le plan énergétique et écologique, le chauffage par pompe à chaleur géothermique n'est pas une solution financièrement soutenable dans la région.

Mots-clés : efficacité énergétique ; géothermie ; Vakinankaratra

Abstract

On the one hand, there is a need for heating and cooling in housing in the Vakinankaratra region, Madagascar. On the other hand, the building sector and the resulting energy consumption is constantly growing. An effective solution is therefore necessary to address these needs. In particular, we studied the energy, ecological and financial efficiency of the use of a geothermal heat pump in buildings in the region. We created a typical building on ArchiCAD, then its multizone thermal modeling was done on EcoDesigner STAR to obtain the related energy performance indicators. We discovered that despite good performance, and therefore efficient, in terms of energy and ecology, geothermal heat pump heating is not a financially sustainable solution in the region.

Keywords: energy efficiency; geothermal energy; Vakinankaratra

1. Introduction

La région du Vakinankaratra est celle où on peut enregistrer des températures minimales pouvant descendre jusqu'à 0 [°C] à Madagascar pendant la période hivernale [1]. De ce fait, atteindre les températures de confort thermique dans les bâtiments de la région n'est seulement possible que durant 24 à 28% de l'année [2]. Il existe alors un besoin en chauffage à satisfaire. Pourtant, répondre à ce besoin nécessite des solutions efficaces sur plusieurs plans, car le secteur du bâtiment consomme beaucoup d'énergie [3] [4], pollue beaucoup [3] et le parc de bâtiments existants se renouvelle lentement [5]. Mais nous pensons que par sa présence dans la région [6], son applicabilité pour le chauffage [7], le fait qu'elle soit renouvelable, durable et verte [8], l'énergie géothermique peut être une solution efficace sur le plan énergétique, écologique et économique pour le besoin en chauffage des habitations dans le Vakinankaratra. Plus précisément, nous voulons évaluer cette efficacité lors de l'emploi d'une pompe à chaleur géothermique, dans le cas où on utiliserait les sources chaudes de surfaces ou quand les températures fournies par un réseau de distribution géothermique sont très basses.

Nous nous proposons alors de modéliser une habitation représentative de la région et d'effectuer une simulation thermique multizone de ce bâtiment utilisant une pompe à chaleur géothermique pour pouvoir analyser les indicateurs de performance énergétique résultants.

2. Méthodes

2.1. Description du cas d'étude

Pour notre étude de cas, nous avons analysé le bâtiment, qui est un logement de 262,53 [m²] pour une famille unique à un seul niveau, représenté par la Fig. 1 effectuée sur ArchiCAD. Le plan, les

caractéristiques du bâtiment et les propriétés thermiques de ses éléments de construction se basent sur le « type d'habitation représentative de la région d'Antananarivo en termes d'architecture et de nombre de chambres » [9], mais qui est applicable au Vakinankaratra due à la proximité et l'influence de la première sur la seconde [10]. Il sera considéré que le bâtiment sera divisé en huit zones, également montrées dans Fig. 1.

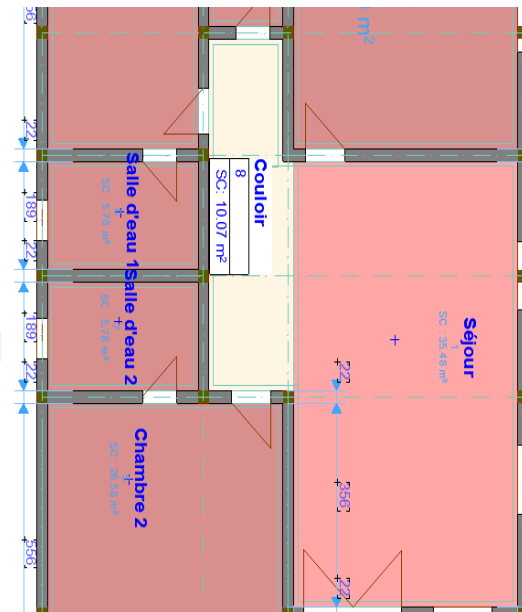


Fig. 1 Plan du bâtiment type du Vakinankaratra

Les éléments du bâtiment ont été choisis pour correspondre aux pratiques de construction dans la région [1] [9] [11] [12]. Les Tableaux 1 et 2 récapitulent les éléments du bâtiment et les caractéristiques physiques correspondantes des couches de matériaux.

Tableau 1 Structure des matériaux du bâtiment

Éléments du bâtiment	De l'extérieur à l'intérieur
Murs externes	Enduit, e=1 [cm] Briques cuites, e= 22 [cm] Enduit, e=0,5 [cm] Indice R=1,03 [m ² K/W]
Plancher	Dalle en béton armé coulé, e= 10 [cm] Parquet (uniquement pour les zones 1, 4, 5), e= 50 [cm] ou

	Carrelage, e= 1[cm] Indice R=0,74 [m^2K/W] (parquet) Indice R=0,69 [m^2K/W] (carrelage)
Murs internes	Enduit, e= 0,5 [cm] Briques cuites, e= 22 [cm] Enduit, e= 0,5 [cm] Indice R=0,98 [m^2K/W]
Toiture	Tuiles, e= 10 [cm] Air, e= 4,4 [cm] Bois lamellés, e=1 [cm] Indice R=0,31 [m^2K/W]

Tableau 2 Propriétés des matériaux du bâtiment

Matériau	Conductivité thermique [W/mK]	Densité [kg/m^3]	Chaleur spécifique [J/kgK]
Enduit	1	1800	1000
Brique	0,69	1500	950
Béton	2,3	2300	1000
Carreau	0,58	1500	840
Parquet	0,09	300	1600
Tuile	0,60	1500	840
Air	0,16	1200	1008
Bois lamellé	0,24	1000	1600

2.2. Profil opérationnel

Le profil reflète le mode d'utilisation d'un ménage de 5 personnes qui s'observe par une valeur d'occupation décroissante du bâtiment entre 6 :00 et 9 :00, nulle entre 9 :00 et 16 :00 et croissante puis stable respectivement entre 16 :00 et 19 :00, et 19 :00 et 6 :00.

Les températures de consignes, qui se trouvent dans l'intervalle de températures de confort [13], sont fixées entre 21 et 24 [°C].

2.3. Localisation

Le bâtiment se trouvera à proximité (latitude : 19,86910700 Sud, longitude : 47.03029600 Est) de la source géothermale « Antsirabe_Lac » de 35[°C]. Cela nous permettra, en même temps, de créer les conditions d'une exploitation à petite échelle (un chauffage individuel) avec une source de 35[°C] et d'une exploitation à grande échelle

(un chauffage de district), avec une température de fluide d'arrivée au bâtiment de 35[°C].

Le fichier météo de la zone, contenant les valeurs maximales, minimales et moyennes de la température de l'air, l'humidité relative, l'ensoleillement et la vitesse du vent, est récupéré par l'outil de modélisation EcoDesigner STAR suite à l'entrée des coordonnées.

2.4. Système de chauffage

Après avoir lancé une simulation sans système de chauffage, nous pouvons connaître la charge de chauffage du bâtiment. La capacité du système de chauffage s'obtient en surdimensionnant cette charge de 25% [14].

$$\text{Capacité du système} = 8,5 \cdot 1,25 = 10,62 \text{ [kW]} \quad (1)$$

Pour se rapprocher le plus des conditions réelles, les valeurs caractéristiques (Tableau 3) d'une pompe à chaleur qui se rapprochent le plus de cette capacité ont été choisies [15] [16].

Tableau 3 Valeurs caractéristiques du système de pompe à chaleur

Rendement chaleur [W]	11459
COP*	4.06
Réfrigérant	R410A
Température de la charge [°C]	54,33
Température de la source [°C]	21,11
Pour l'eau chaude domestique (ECD)	
V _{stockage} [m^3]	0,15
T _{froid} [°C]	15
T _{chaud} [°C]	50

Nous voulons, par ailleurs, comparer la performance du chauffage géothermique à celles fonctionnant avec d'autres types d'énergies (bois, électricité, gaz) qui sont disponibles dans la région. La capacité de ces systèmes est définie par la valeur trouvée précédemment, récapitulée dans le Tableau 4.

Tableau 4 Paramètres du système de chauffage par chaudière

Pour la chaudière	
Capacité nominale [W]	10620
Demande d'énergie de la pompe à circulation [%]	1
Pour le système de distribution d'énergie	
Température d'arrivée [°C]	55
Température de retour [°C]	48
Capacité [W]	3350
Pour l'eau chaude domestique	
T _{froid} [°C]	15
T _{chaud} [°C]	50

3. Résultats

3.1. Performance par rapport aux autres sources d'énergie

Tableau 5 Valeurs annuelles spécifiques des indicateurs de performance énergétique du bâtiment pour différentes sources d'énergie de chauffage

Valeurs annuelles spécifiques	Géo.	Bois	Elec.	Gaz naturel
Consommation énergétique [kWh/m ² a]	71,11	71,77	72,78	71,77
Consommation en carburant [kWh/m ² a]	26,17	49,89	50,90	49,89
Coût carburant [Ar/m ² a]	9641,91	9917,15	18712,45	11089212,45
Energie primaire [kWh/m ² a]	138,71	134,76	187,57	132
Emission CO ₂ [kg/m ² a]	6,56	6,27	12,77	11,55

Après une série de simulations, nous obtenons les valeurs compilées sur différentes sources d'énergie de chauffage dans le Tableau 5. Lorsqu'on observe que la consommation énergétique est fondamentalement stable dans les quatre cas de conditionnement, nous nous rendons compte que la consommation en carburant est abaissée d'en moyenne 50% dans le cas du modèle chauffé à l'énergie géothermique. Ce qui veut dire qu'il suffit

d'approximativement la moitié de l'énergie ordinairement consommée dans le chauffage électrique, par bois ou par gaz naturel, pour pouvoir maintenir le bâtiment dans les températures de confort. Un système de chauffage qui utilise l'énergie géothermique est donc le plus efficace sur le point de vue énergétique et est le plus avantageux à utiliser.

Par ailleurs, nous tenons compte d'une augmentation d'approximativement 3% des coûts de conditionnement du modèle chauffé au bois par rapport à celui chauffé à l'énergie géothermique, contre une augmentation d'approximativement 94% pour celui chauffé à l'énergie électrique et une augmentation très significative pour celui chauffé au gaz naturel. Cela rend, par conséquent, le chauffage par énergie géothermique, celui qui est le moins cher à utiliser.

On constate enfin qu'apparemment, le système de chauffage à l'énergie géothermique pollue légèrement plus que le bois en termes d'émission de carbone, mais ces émissions résultent plus de l'électricité nécessaire pour faire fonctionner les composants du système, comme les pompes de circulation du fluide de chauffage, que de l'utilisation de l'énergie géothermique à proprement dite.

3.2. Etiquette énergétique

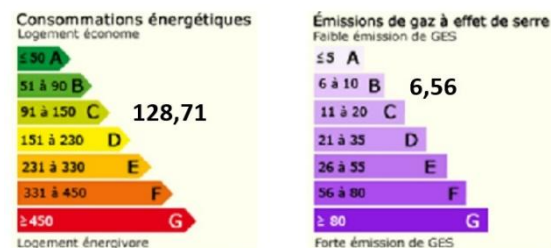


Fig. 2 Etiquette énergétique du bâtiment chauffé à l'énergie géothermique dans le Vakankarata

Prenons maintenant la consommation annuelle en énergie primaire et la quantité de carbone émise au mètre carré du tableau précédent et mettons-les en

contexte à l'aide d'une échelle visuelle. On va utiliser celle de la directive européenne de la performance énergétique du bâtiment. Nous obtenons un indicateur clair et simple de la bonne efficacité énergétique et la très bonne environnementale de l'utilisation d'un système de chauffage à l'énergie géothermique dans les logements du Vakinankaratra.

3.3. Accessibilité



Fig. 3 Accessibilité financier du ménage du groupe socio-économique le plus rémunéré

a : Consommation domestique annuelle ≈ 7 Millions Ar ;
b : Dépenses énergétiques prévues $\approx 17\%$ de consommation domestique ; *c* : Facture énergétique géothermique pour $52,6 \text{ m}^2 = 9641,91 \times 52,6 \approx 500.000$ Ar < dépenses énergétiques prévues

Les statistiques nationales [17] permettent d'estimer la consommation domestique annuelle moyenne des ménages des différents groupes socio-économiques. Pour le ménage du groupe le plus rémunéré (Fig. 3), la facture énergétique occasionnée par un chauffage géothermique (13% de la consommation annuelle totale), n'excède pas les dépenses énergétiques prévues (17%). Néanmoins, cela n'est pas le cas pour les ménages appartenant à d'autres groupes, qui sont les plus nombreux, dont les revenus sont significativement moins élevés. Un chauffage à pompe à chaleur géothermique n'est donc pas une solution financièrement soutenable pour ces types de famille.

4. Conclusion

Nous sommes conscients que dans la région du Vakinankaratra, et dans tout Madagascar, en général, la situation est celle d'un pays à faible revenu où la première priorité dans l'utilisation de l'énergie n'est pas la satisfaction du besoin de chauffage dans les bâtiments. Notre étude offre néanmoins des perspectives sur l'existence et les possibilités de l'utilisation d'une source d'énergie efficace et verte, qui est la géothermie, si d'aventure on voulait répondre à ces besoins de chauffage.

Notamment, qu'un système de chauffage géothermique est celui qui consomme le moins d'énergie, coûte le moins cher à utiliser et est celui qui pollue le moins comparé à d'autres systèmes de chauffage fonctionnant aux différentes sources d'énergie disponible dans la région.

Plus particulièrement pour le cas des sources chaudes de surface, dont les conditions ont été simulées par la température d'arrivée à l'échangeur de chaleur de $35 \text{ }^\circ\text{C}$ et celle de l'utilisation d'une pompe à chaleur géothermique pour pouvoir utiliser les basses températures, malgré qu'ils soient efficaces du point de vue énergétique et qu'ils sont écologiques, nous croyons qu'ils ne sont pas financièrement soutenables pour une grande partie des utilisateurs de la région. Ce qui nous pousse à tourner notre attention sur les forages et l'accès à des fluides de très hautes températures pour pouvoir rendre l'utilisation plus abordable comme ce qui est le cas dans d'autres pays utilisant l'énergie géothermique.

Références

- [1] O. Rakoto-Joseph, F. Garde, M. David, L. Adelard and Z. A. Randriamanantany, "Development of Climatic Zones and Passive Solar Design in Madagascar," *Energy Conversion and Management*, vol.

- 50, no. 4, pp. 1004-1010, 2009.
- [2] J.-P. Praene, B. Malet-Damour, M. H. Radanielina, L. Fontaine and G. Riviere, "GIS-Based Approach to Identify Climatic Zoning: A Hierarchical Clustering on Principal Component Analysis," *Building and Environment*, no. 164, pp. 106-130, 2019.
- [3] United Nations Environment Programme, "2019 Global Status Report for Buildings and Construction Sector," 11 December 2019. [Online]. Available: <https://www.unenvironment.org/resources/publication/2019-global-status-report-buildings-and-construction-sector>. [Accessed November 2020].
- [4] Innovation Energie Développement, IED, "Bilan Energétique National 2017," Ministère de l'Energie et des Hydrocarbures de Madagascar, Antananarivo, 2017.
- [5] EIA, International Energy Outlook with Projections to 2050, Washington: US Energy Information Administration, 2019.
- [6] L. Andrianaivo and E. Rasolomanana, "Geothermal Resources Direct-Use in the volcanic areas of Itasy-Antsirabe, central Madagascar," *Madamines*, vol. 2, pp. 40-50, 2011.
- [7] J. W. Lund, "Direct Heat Utilization of Geothermal Ressources Worldwide," *ASEG Extended Abstracts*, vol. 2006, no. 1, pp. 1-15, 2005.
- [8] M. Dickson and M. Fanelli, *Geothermal energy: utilization and technology*, London: Routledge, 2013.
- [9] H. Razanamanampisoa, Z. A. Randriamanantany, H. T. Rakotondramiarana, F. Garde and H. Boyer, "Simulation of a Typical House in the Region of Antananarivo, Madagascar: Determination of Passive Solutions Using Local Materials," *arXiv preprint*, vol. 1305, no. 2322, 2013.
- [10] F. R. Olisoa, "Mutation des Espaces Périurbains d'Antananarivo: Population, Habitat et Occupation du Sol," Université de Strasbourg, Strasbourg, 2012.
- [11] H. A. Rakoto, "Evaluation du Confort Thermique Généré par les Solutions Passives: Cas d'un Bâtiment Universitaire," Université d'Antananarivo, Antananarivo, 2012.
- [12] S. Robelison and B. Lips, "Influence Thermique de l'Emplacement du Toit en Chaume Sous le Toit en Tôle d'un Habitat à Antananarivo-Madagascar," *Afrique Science*, vol. 4, no. 3, pp. 318-338, 2008.
- [13] ANSI/ASHRAE Standard 55, *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, 2017.
- [14] V. Garg, J. Mathur, S. Tetali and A. Bhatia, *Building Energy Simulation: A Workbook Using DesignBuilder*, New York: CRC Press, 2017.
- [15] ENERGY STAR, "ENERGY STAR Most Efficient 2021 — Geothermal Heat Pumps," 2021. [Online]. Available: https://www.energystar.gov/products/energy_star_most_efficient_2020/geothermal_heat_pumps. [Accessed 2021].
- [16] GeoStar, *Specification catalog - Geothermal Heat Pumps - Aston Single Hydronic Unit*, 2016.
- [17] Institut National de la Statistique, "Enquête Périodique auprès des Ménages," PNUD, UNICEF, UNFPA, BAD, Antananarivo, 2011.