

Impact thermique de l'injection du courant de foudre dans un sol abritant les postes haute tension: Application au poste HT de Lingwala à Kinshasa en RDC

[Thermal impact of lightning current injection in a ground sheltering high voltage stations: Application at the high voltage station of Lingwala in Kinshasa, RDC]

Mwanamputu Mbwanzo Clément, Nsongo Timothée, Pasi Bengi Masata André, and Lidinga Mobonda Flory

Institut Supérieur des Techniques Appliquées (ISTA), Kinshasa, RD Congo

Copyright © 2021 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: To avoid any risk of electrocution and damage to equipment due to an insulation fault or lightning discharge in the HV electrical network consisting mainly of HV transmission stations and lines, all equipment in these energy infrastructures must be earthed through an earth electrode which must maintain its performance over time following the recurrent flows of the shock wave.

As this aggressive discharge flows to the ground, the resulting thermal effects can lead to ionization of the soil and reduce the performance of the earth electrode by changing the characteristics of the soil. This publication aims to establish the cause and effect relationship between the thermal effects due to the injected lightning current and the electrical characteristics of the ground through its resistivity.

This analysis will allow energy infrastructure designers to take into account these performance changes when injecting lightning current and properly size the earth connections of HV substations.

KEYWORDS: Thermal impact; injection; Lightning current; Ground; Job; High tension.

RESUME: Pour éviter tout risque d'électrocution et détérioration des matériels dus à un défaut d'isolement ou à une décharge de foudre dans le réseau électrique HT constitué principalement de postes et lignes de transmission HT, tous les équipements de ces infrastructures énergétiques doivent être mis à la terre à travers une prise de terre qui doit conserver ses performances dans le temps à la suite des écoulements récurrents de l'onde de choc.

Lors de l'écoulement de cette décharge agressive au sol, les effets thermiques qui en découlent peuvent conduire à l'ionisation du sol et réduire les performances de la prise de terre par la modification des caractéristiques du sol. Cette publication se fixe pour objectif d'établir la relation de cause à effet entre les effets thermiques dus au courant de foudre injecté et les caractéristiques électriques du sol à travers sa résistivité.

Cette analyse permettra aux concepteurs des infrastructures énergétiques de pouvoir tenir compte de ces modifications de performances lors de l'injection du courant de foudre et bien dimensionner les prises de terre des postes HT.

MOTS-CLEFS: Impact thermique; injection; Courant de foudre; Sol; Poste; Haute tension.

1 INTRODUCTION

L'analyse de caractéristiques du sol dans un site devant abriter une installation électrique HT (ligne de transmission, un poste de transformation) est une première exigence dictée par la norme. Cette étude permet de connaître la capacité du sol à

conduire le courant électrique par la mesure de sa résistivité et de dimensionner et choisir le dispositif de mise à la terre en vue de faciliter l'écoulement du courant de défaut, quel que soit son origine, à la terre.

Lorsque le site d'implantation donne la possibilité de choisir l'emplacement de la prise de terre, la mesure de résistivité permet de qualifier le sol et ainsi de déterminer l'endroit où la résistance de terre sera la plus faible (optimisation des coûts de construction).

2 EFFETS THERMIQUES LORS DE L'INJECTION DU COURANT DE Foudre AU SOL

S'agissant des effets thermiques se produisant dans le sol lors de l'injection du courant de foudre, il est donc indispensable de noter qu'une augmentation de la température du sol jusqu'à 100° C entraîne une évaporation d'eau du sol et donc une augmentation de sa résistivité. Lorsque la température tombe au-dessous de 0° C comme le cas des régions froides, la conductivité de γ de l'électrolyte diminue et ainsi un accroissement rapide de la résistivité se produit.

Outre la température du sol, il existe aussi d'autres facteurs qui contribuent à cette formation d'électrolytes il s'agit notamment de: la porosité; le pourcentage d'eau contenu dans le sol; le pourcentage de sels solubles, d'acides et de bases.

Le courant électrique qui circule dans le sol produit un transfert d'énergie par effet Joule sous forme de chaleur; ce qui entraîne une augmentation de la température du milieu. La puissance dissipée dans le sol par unité de volume devient [1]:

$$P = E J = \rho J^2 = \frac{E^2}{\rho} \quad (1)$$

Où :

E: le champ électrique dans le sol en V/m

J: La densité du courant en A/m²;

ρ : La résistivité du sol en Ωm ;

Pour la ville de Kinshasa en république démocratique du Congo, le sol est argilo-sablonneux avec $\rho = 50$ à $500 \Omega\text{m}$ [2].

Parmi les caractéristiques spécifiques d'un type de sol qui influencent particulièrement le calcul des mises à la terre, nous retenons:

La chaleur spécifique γ , exprimée en J/ (m³.°C) du sol, est la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter de 1 ° C un volume de 1 m³ de sol; elle dépend du type de sol et augmente avec son humidité relative.

Pour un sol argilo-sablonneux $\gamma = 0.42 \text{ W/m} \cdot \text{°C}$ pour un sol sec et $\gamma = 1.95 \text{ W/m} \cdot \text{°C}$ pour un sol saturé d'eau à 100 % [2].

3 DYNAMIQUE DE CHAUFFAGE DU SOL

Sachant que le transfert de chaleur dans le sol se produit par conduction et par

convection, la chaleur dégagée par le passage du courant électrique dans le sol par unité de volume est selon la loi de Joules [3]:

$$\frac{q}{v} = j^2 \rho t \quad (2)$$

Où :

q: est l'énergie thermique dégagée en joules;

v: le volume du sol en m³

j: est la densité du courant en A/m²;

ρ : est la résistivité du sol en Ωm ;

t: temps d'écoulement en s.

L'énergie dégagée q peut atteindre de grandes valeurs si la résistivité du sol ou la densité du courant sont grandes. La chaleur dégagée est en partie emmagasinée dans le sol et cause une augmentation de la température du milieu tandis que la chaleur non emmagasinée se diffuse dans le sol vers les lieux où la température est plus basse. Ainsi, la quantité de chaleur emmagasinée dépend de la chaleur spécifique du sol et la chaleur conduite dépend de la conductivité thermique.

Pour déterminer et illustrer le processus thermique dans le sol, nous analysons le cas d'une prise de terre de forme sphérique enfoncée très profondément et entourée d'un sol de résistivité ρ et qui disperse un courant I conformément à la figure ci-dessous.

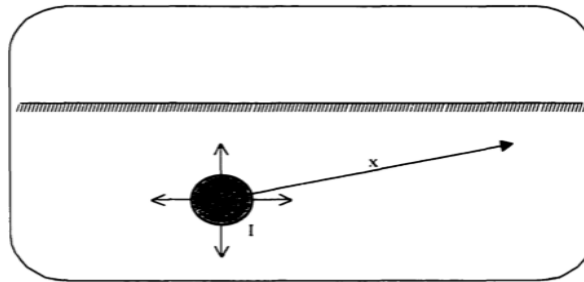


Fig. 1. Prise de terre sphérique dans le sol

Pour déterminer la densité du courant dans le sol à une distance x du centre de la de la prise de terre de forme sphérique [4], nous partirons de l'équation:

$$\iint_S n j dS \tag{3}$$

Sachant que S et x sont respectivement la surface et le rayon de la sphère, la densité du courant injecté dans le sol devient:

$$J = \frac{I}{4\pi x^2} \tag{4}$$

La chaleur dégagée est la somme de la chaleur emmagasinée et la chaleur conduite.

L'équation différentielle du bilan thermique est donnée selon l'équation ci-dessous:

$$j^2 \rho dt = \gamma d\theta - \frac{\wedge}{x} \frac{d^2(x\theta)}{dx^2} dt \tag{5}$$

Où :

θ : la température du sol en °C

\wedge : la conductivité thermique du sol

γ : la chaleur spécifique du sol en J/ (m³ °C)

Pour une prise de terre de forme sphérique, cette équation devient:

$$\rho \left(\frac{I}{4\pi x^2} \right)^2 = \gamma \frac{d\theta}{dt} - \frac{\wedge}{x} \frac{d^2}{dx^2} \tag{6}$$

L'équation ci-dessus n'a pas de solution générale lorsque la densité du courant J varie avec la distance x du centre de la sphère. Toutefois, cette équation est utilisée dans le calcul de deux cas pratiques:

Circulation d'un courant à la terre pendant une longue durée.

L'hypothèse d'une température constante peut être posée car le dégagement de la chaleur est de longue durée.

D'où : $\frac{d\theta}{dt} = 0$

Réévaluant l'équation (5) on obtient:

$$\wedge \frac{d^2(x\theta)}{dx^2} + \frac{\rho}{x^3} \frac{I^2}{(4\pi)^2} = 0 \tag{7}$$

La solution de cette équation est de la forme:

$$\theta = \frac{\rho}{\lambda x} \left(\frac{I}{4\pi} \right)^2 \left(\frac{2x-r}{2rx} \right) \quad (8)$$

Où r: est le rayon de la sphère

La température maximale du sol est à la surface de la terre; elle est déterminée en posant r = x et la solution de l'équation devient:

$$\theta_r = \frac{\rho}{2\lambda} \left(\frac{I}{2\pi r} \right)^2 \quad (9)$$

Cette température dépend des propriétés caractéristiques du sol λ et ρ , du carré du courant dissipé et de la géométrie de la prise de terre.

Afin d'éviter l'assèchement la température du sol en contact avec la prise de terre, cette température ne doit pas dépasser 100°C.

L'accroissement admissible de température $\Delta\theta$ est donné par:

$$\Delta\theta = \theta_m - \theta_i \leq 100^\circ\text{C} \quad (10)$$

θ_i : est la température initiale

La figure ci-dessous illustre la variation de la température du sol en fonction de la distance x mesurée à partir du centre de la prise de terre.

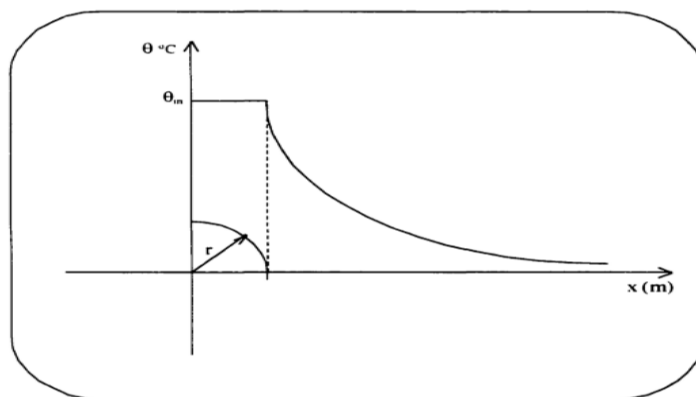


Fig. 2. Distribution de la température autour d'une prise de terre sphérique enfouie profondément dans le sol

L'équation ci-dessous est utilisée pour déterminer le courant admissible dissipé par la prise de terre de forme sphérique [5]

$$I = 4\pi r \sqrt{\frac{2\lambda\Delta\theta}{\rho}} \quad (11)$$

La résistance de terre d'une prise de forme hémisphérique étant liée à son rayon, on a:

$$R = \frac{\rho}{4\pi r} \quad (12)$$

Le courant admissible dissipé devient:

$$I = \frac{1}{R} \sqrt{2\rho\lambda\Delta\theta} \quad (13)$$

De l'équation (13), nous pouvons tirer la résistivité du sol pour donner une équation de la résistivité fonction de la température du sol lors de l'injection du courant de foudre au sol.

$$\rho = \frac{R^2 I^2}{2 \Delta \theta} \quad (14)$$

De l'équation (14), on peut donc affirmer que la variation de la résistivité du sol est fonction du carré du courant injecté et de la résistance de la prise de terre, des conditions climatiques mais aussi des effets thermiques induits au moment de l'injection de ce courant.

La chute de tension admissible sur la prise de terre lors d'une longue période de chauffage est donnée par l'équation ci-dessous:

$$V = RI = \sqrt{2\rho \Delta \theta} \quad (15)$$

Les équations (14) et (15) obtenues permettent la simulation de l'impact thermique du courant de foudre injecté au sol sur la résistivité et la répartition du potentiel autour de la prise de terre des postes Haute Tension.

4 AMPLITUDE DE LA FOUDRE ET RÉSISTANCES DE TERRE MESURÉES AU POSTE HT DE LINGWALA À KINSHASA/RDC

Il a été constaté à Kinshasa/RDC, des surtensions de foudre qui ont duré de 70 secondes à 450 secondes avec des valeurs au-delà de $4U_n$ pour des pics des courants de foudre sur les courbes de la figure 3 correspondent exactement aux amplitudes allant de 100 kA et de 20 kA [6], [7].

Partant de ces deux valeurs extrêmes, nous prenons une moyenne de 60 kA pour montrer l'impact thermique du courant de foudre sur la résistivité du sol.

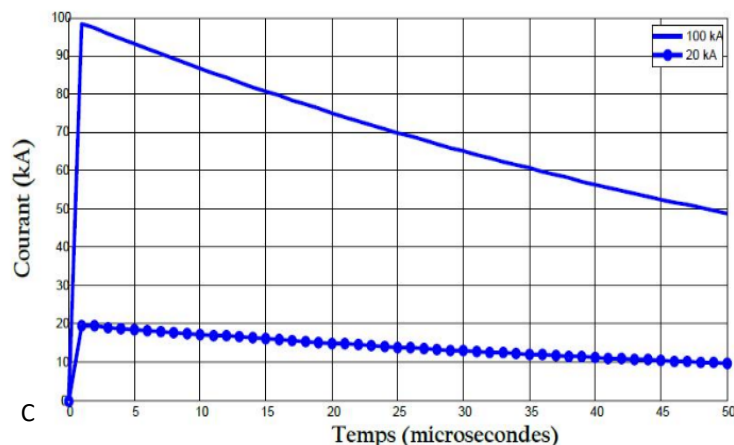


Fig. 3. Courbe de courant de foudre enregistré au poste HT de Lingwala

Pour expérimenter l'impact de la température sur les caractéristiques électriques du sol c.a.d sa résistivité et la chute de tension autour de la prise de terre conformément aux expressions (14) et (15) pour le cas du poste HT de lingwala à Kinshasa/RDC, nous prenons en compte les valeurs de résistances de terre mesurées au poste pendant les mois de mars et avril de l'année 2020, les mois fortement pluvieux de l'année pour le climat tropical.

APPAREIL DE MESURE UTILISÉ

METRIX MX 435 D

Un testeur d'installation multifonction avec caractéristiques suivantes:

- Tension de test max: 500V,
- Intensité max de test: 1ma,
- Gamme de résistance de terre max: 2000 ohms (20; 2000 ohms)
- Avec accessoires (cordons de mesure et 2 piquets de terre)



Fig. 4. Equipements utilisés pour la mesure de la résistance de terre du poste HT de Lingwala/Kinshasa

Le tableau ci-dessous donne les mesures de résistance de terre au poste HT de Lingwala pour les mois de mars et avril 2020

Tableau 1. Mesures de résistance de terre au poste HT de Lingwala pour les mois de mars et avril 2020

Date	Caractéristiques Equipement	Calibre: 20Ω	Valeur mesurée en Ω	Profondeur en m
02/03/2020	METRIX MX 435 D 500 V, 1 mA Rmax: 2000 Ω	20 Ω	11.2	0.8
09/03/2020			11.5	0.8
16/03/2020			10.7	0.8
23/03/2020			10.6	0.8
05/04/2020			9.3	0.8
12/04/2020			9.7	0.8
19/04/2020			10.7	0.8
26/04/2020			11.3	0.8

Après observation de différentes mesures de la résistance, il se dégage de petites variations dont la moyenne pour le mois de mars et avril 2020 est donnée par:

$$R_{moy1} = \frac{11.2+11.5+10.7+10.6}{4} = 11 \Omega$$

$$R_{moy2} = \frac{9.3 + 9.7 + 10.7 + 11.3}{4} = 10.25 \Omega$$

$$R_{moy} = \frac{11 + 20.25}{2} = 10.62 \Omega \cong 11 \Omega$$

Considérant que la température du sol augmente selon la profondeur de pénétration des électrodes de terre, à l'abri des variations saisonnières et à quelques mètres du sol, la température du sol est stable soit une moyenne de 14 °C dans les plaines à basse altitude [8], [9].

Dans le cadre de nos investigations, considérant que la loi de variation de la température du sol étant complexe, deux hypothèses sont possibles:

- La variation de la température du sol, dans l'intervalle de 14 à 100 °C, est due uniquement à la seule amplitude du courant de foudre; soit une moyenne de 60 kA conformément à la courbe de la figure 3.
- Le courant injecté par la foudre peut varier de 100 kA à 20 kA entraînant une variation de la température du sol dans la même plage.

Les tableaux ci-dessous donnent les valeurs de la résistivité et du potentiel de la prise de terre du poste HT de Lingwala pour les deux cas possibles évoqués ci-haut.

Tableau 2. 1^{er} cas

	I	Δ_{H2O}	R	$\Delta\theta$	ρ	V	Observation
1	60	19.5	11	14	797.8	659.99	$\cong 660\text{ V}$
2				28	398.9	659.99	
3				42	265.9	659.95	
4				56	199.4	659.91	
5				70	159.5	659.87	
6				84	132.9	659.83	
7				98	113.7	659.2	

Tableau 3. 2^{ème} cas

	I	Δ_{H2O}	R	$\Delta\theta$	ρ	V	Observation
1	25	19.5	11	14	138.5	274.9	275
2	35			28	135.7	384.9	385
3	45			42	149.5	498	498
4	55			56	167.5	604.9	605
5	65			70	156	714.9	715
6	75			84	178	824.9	825
7	85			98	228	934.9	935

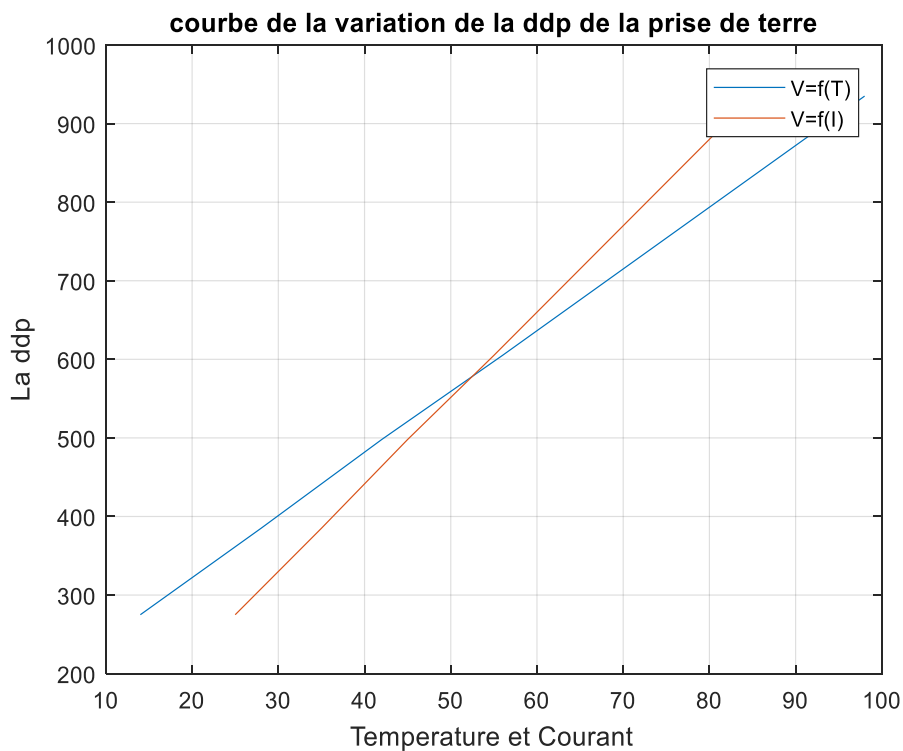


Fig. 5. Evolution de la tension de pas autour de la prise de terre du poste HT de Lingwala en fonction du courant de foudre injecté au sol et de la température

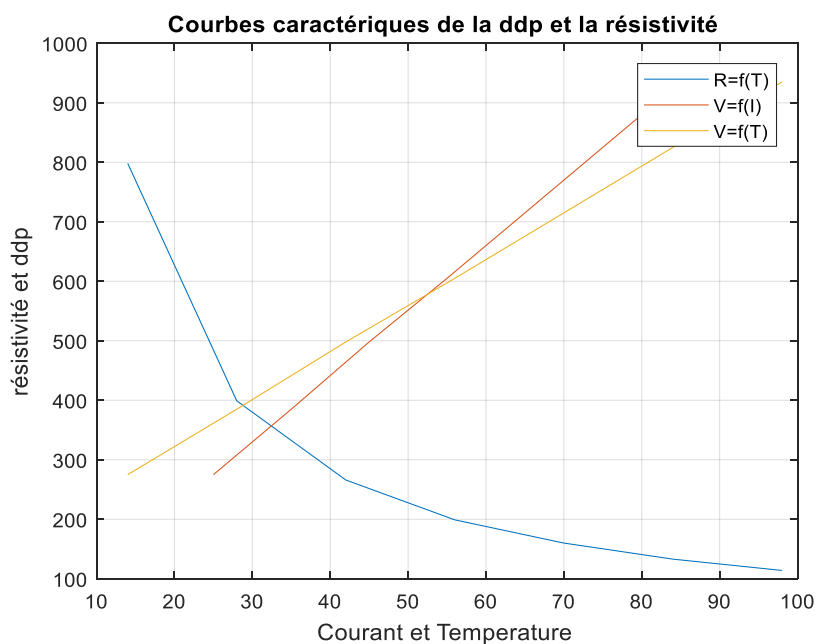


Fig. 6. Evolution de la résistivité du sol, de la tension de pas en fonction du courant de foudre et de la température

5 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Le premier cas qui cadre avec une amplitude constante du courant de foudre, soit une moyenne de 60 kA, est proche de la réalité du phénomène étudié car la résistivité du sol est liée à sa nature et décroît lorsque la température du sol augmente telle que la montre la figure ci-dessus.

Dans la gamme de température choisie, les valeurs de la résistivité ne s'écartent pas trop des valeurs moyennes consignées dans le tableau 1 pour un sol de type Sable argileux.

La différence de potentiel ou la tension de pas autour de la prise de terre du poste HT, site de référence de nos investigations, n'est pas liée aux phénomènes thermiques; elle est toujours constante conformément au tableau 3. Cette réalité reste la même pour les autres types de sol.

S'agissant du 2^{ème} cas, il est possible que lors de la décharge de la foudre le courant véhiculé par le traceur varie dans son parcours mais au point d'impact au sol, la valeur enregistrée reste toujours constante; ce qui n'est pas le cas avec la deuxième possibilité qui consiste à un courant de foudre variable.

La résistivité subit des fluctuations pour une température croissante, ce qui ne cadre pas avec la réalité des phénomènes thermiques du sol.

6 CONCLUSION

Lors de l'injection du courant de foudre au sol, la chaleur dégagée est en partie emmagasinée dans le sol et cause une augmentation de la température du milieu qui peut être ionisé par effet joule tandis-que la chaleur non emmagasinée se diffuse dans le sol vers les lieux où la température est plus basse.

Selon le modèle dynamique de chauffage du sol utilisé, seul le phénomène de la diffusion a été pris en compte dans nos investigations sur les impacts thermiques grâce à la connaissance de la conductivité thermique du sol de la ville de Kinshasa dont la nature est soit sablonneuse, argileuse ou argilo-sablonneux.

Grace aux échantillons de la résistance de la prise de terre mesurée au poste de Lingwala/Kinshasa, nous avons montré que la résistivité du sol varie exponentiellement avec la température du sol et sa nature lors de l'écoulement du courant de foudre à la terre; ce qui est différent des approximations données par l'expression de Mathiesen où la résistivité des métaux varie linéairement avec la température.

REFERENCES

- [1] A. PASI BENGI MASATA, Electricité Générale, tome 2.
- [2] Semaan Georges, Evaluation de l'effet de la mer et du contre poids sur le profil de la tension d'un système de mise à la terre d'une ligne de transport d'énergie électrique HT dans un sol résistif, thèse de doctorat, école supérieure technologique, université de Québec, 2001.
- [3] Wildi T, Electrotechnique, les presses universitaires de Laval, 2ème éd.
- [4] Sunde, Conduction effects in transmission system, New York, Dover.
- [5] Tagg.GF, Earth Résistances, George New Ness LTD, London 1964.
- [6] Pubica, 1968.
- [7] Vladimir et al, 2008], [Deguauque, 1990.].
- [8] Rapport exploitation HT, SNEL 2019.
- [9] <http://www.geo.fr/environnement/les-mots-verts/puits-canadiensmaisongeothermie> 39189
- [10] <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/geo>