

Comportement des transformateurs de puissance sous l'effet des courants géomagnétiquement induits

Mohammed NAIDJATE¹, Nicolas BRACIKOWSKI¹, Nicolas MOREIERA BRANCO²,
Mircea FRATILA², Manuel MARTINEZ DURO²

mohammed.naidjate@univ-nantes.fr, nicolas.bracikowski@univ-nantes.fr

¹ IREENA, Institut de Recherche en Énergie Électrique de Nantes Atlantique, Saint-Nazaire, 44600 France,

² R&D EDF, centre de recherche Electricité de France, Paris-Saclay, 91120 France.

RESUME – Un réseau non-linéaire de réluctances, couplé avec un circuit électrique, est utilisé pour étudier l'impact des courants géomagnétiquement induits sur les transformateurs triphasés de puissance. Il s'agit d'une approche maillée qui permet de considérer différentes topologies de transformateurs. Ce modèle s'adapte, afin de respecter la distribution des forces magnétomotrices et des forces électromotrices, même en cas de défauts. Ce modèle est tout d'abord défini sous MatLab, puis implémenté automatiquement sous EMTP. Le comportement du modèle obtenu a été comparé à des calculs effectué par éléments finis. Finalement, une étude du comportement des transformateurs de puissance sous l'effet des courants géomagnétiquement induits a été réalisé.

Mots-clés—Courants Géomagnétiquement Induits, Réseau de Réluctances, Régime Transitoire, Transformateur de Puissance, Calcul du Champ Electromagnétique, Non-linéarité.

1. INTRODUCTION

Les courants géomagnétiquement induits peuvent résulter des tempêtes géomagnétiques, lorsque la Terre est bombardée par des particules d'origine solaire. Ces tempêtes induisent des changements rapides du champ magnétique terrestre, créant des courants induits. Ces courants sont appelés « courants géomagnétiquement induits » (CGI) [1]. Les CGI peuvent notamment apparaître dans : les voies ferrées, les oléoducs et gazoducs, ainsi que dans les réseaux électriques [2].

Dans les réseaux électriques, ils peuvent avoir des impacts importants. En mars 1989, la société Hydro-Québec a connu une panne totale de ses systèmes lors d'une tempête géomagnétique sévère [3]. La conséquence a été une interruption de service pour plus de 6 millions d'habitants, pendant une durée de 9 heures. Les surtensions, résultant des ouvertures de ligne, ont engendré des dégâts matériels. Le coût de ces dégâts matériels a été estimé à 6,5 M\$. Les pertes financières totales se sont quant à elle élevées à 13,2 M\$ [4].

Durant une perturbation géomagnétique, les courants géomagnétiquement induits peuvent causer des saturations magnétiques au sein des transformateurs [5]. Les conséquences de ces saturations peuvent mener à :

- Une génération et une propagation d'harmoniques dans le réseau électrique,
- Un dysfonctionnement des systèmes de protection,
- Une augmentation du besoin en puissance réactive, pouvant entraîner une perte des sources de puissance réactive,
- Une élévation globale de la température du transformateur et à une apparition de points chauds dans le transformateur.

Les CGI peuvent s'étendre sur plusieurs dizaines ou centaines de kilomètres [6]. Cela impose un caractère multi-échelles à la modélisation. Ainsi, une étude précise des CGI nécessite une approche holistique, pouvant prendre en compte simultanément les différents organes connectés au réseau. Une telle approche est difficilement envisageable avec les techniques de modélisation numérique classique, tels que les éléments finis. En effet, ces modélisations induisent des temps de calcul non compatibles avec une approche holistique.

Dans ce travail, nous examinerons l'impact des CGI sur les transformateurs de puissance. À cette fin, nous proposons ici un modèle basé sur les réseaux de réluctances. Cette méthode s'intègre naturellement dans les logiciels de simulation des transitoires électromagnétiques, tels que le logiciel EMTP. Le couplage fort avec le circuit électrique nous permet d'étudier le fonctionnement du transformateur dans son environnement. Cela signifie que le modèle obtenu peut être intégré dans les logiciels de simulations de réseau électrique. Le transformateur est donc directement en interaction avec les éléments du réseau électrique. Cela permet notamment d'étudier des défauts qui peuvent apparaître, tels que les CGI. Dans le cas spécifique du CGI, le comportement non-linéaire du cœur magnétique est donc pris en compte au niveau local. Les impacts de la saturation au niveau globale sont donc intrinsèquement considérés, comme : la propagation d'harmoniques due à la saturation magnétique, l'augmentation de la consommation de puissance réactive, ou bien encore l'étude du comportement des dispositifs de protection.

2. CONCEPT

Le système étudié est un transformateur triphasé d'une puissance de 15 MVA. La tension au primaire est de 25.6 kV et la tension au secondaire est de 4.5 kV. Ses paramètres géométriques sont illustrés dans la figure Fig. 1, tandis que le Tableau 1 fournit les valeurs de ces paramètres.

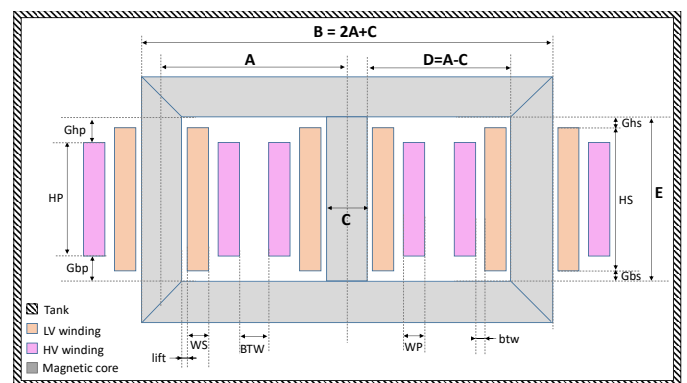


Fig. 1. Définition des paramètres du transformateur triphasé

Tableau 1. Dimensions du transformateur en millimètre

Paramètres	Dimensions	Paramètres	Dimensions
A	995	HS	1190
B	2410	Ghs	158
C	420	Gbs	143
D	575	lift	21
E	1491	WS	45.5
HP	1112	WP	60
Ghp	197	BTW	140
Gbp	182	btw	91

Dans notre étude, nous avons adopté une approche maillée qui consiste à subdiviser le système en « éléments » (Fig. 2). Chaque zone « domaine » peut avoir son propre pas de maille. Les domaines sont déterminés sur la base de deux considérations : la première étant la nature des matériaux (ferromagnétique, diélectrique, conducteur, etc.) et la seconde est la présence ou non de forces magnétomotrices (fmm) [7].

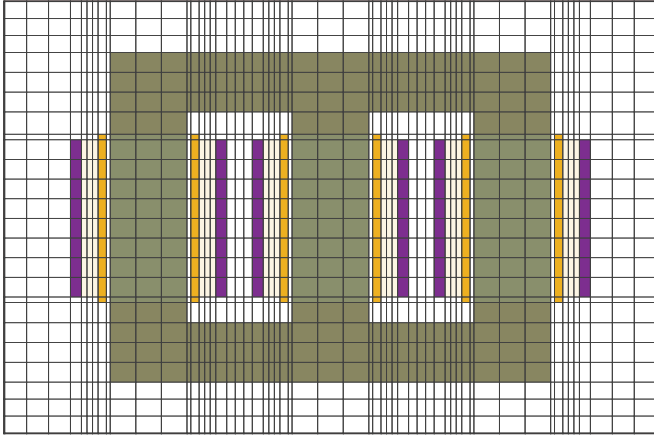


Fig. 2. Génération d'un maillage non uniforme

Pour créer le réseau de réductances équivalent à notre système, nous associons à chaque élément du maillage un circuit élémentaire « cellule ». Le choix de la cellule est déterminé par les caractéristiques physiques de l'élément. Les données du maillage sont utilisées pour générer la grille du circuit (maillage-dual). La figure Fig. 3 explique la transition « maillage ↔ grille » et les terminologies adoptées. On note que ce concept est adopté pour la génération du circuit magnétique (réseau de réductances). Une autre convention est utilisée pour le circuit électrique que nous expliquerons dans la section suivante.

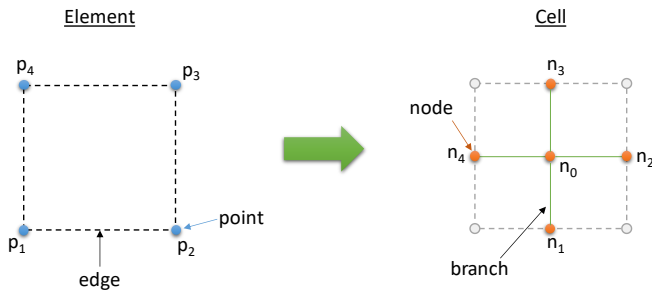


Fig. 3. L'élément avec les notions de points et d'arrêtes (primal-mesh) et la cellule avec la notion de branches et de nœuds (dual-mesh).

Dans ce contexte, nous avons développé une nouvelle bibliothèque dans le logiciel EMTP (Fig. 4). Cette bibliothèque dispose de la panoplie complète des cellules permettant de couvrir toutes les configurations rencontrées dans notre étude. Les paramètres de ces cellules sont estimés à partir des caractéristiques géométriques et physiques des éléments. La connexion entre les cellules donne le circuit global équivalent au transformateur étudié.

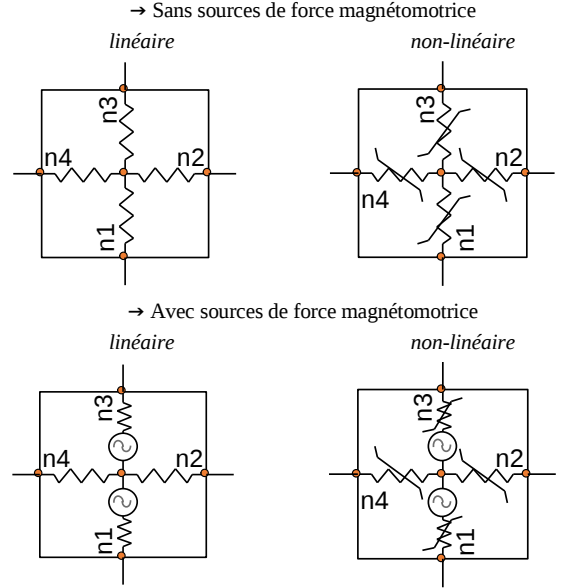


Fig. 4. Exemples des éléments de base de la nouvelle bibliothèque « réseaux de réductances » dans le logiciel EMTP

2.1. Le couplage électromagnétique

Un couplage fort est assuré par des mutateurs. Les mutateurs sont des quadripôles. Ils permettent de convertir les courants circulant au circuit électrique en des forces magnétomotrices imposées au niveau du circuit magnétique, et inversement, ils permettent de convertir les flux du circuit magnétique en des forces électromotrices induites dans le circuit électrique.

La manière d'utiliser un mutateur dépend de la manière dont le circuit électrique a été conçu. Dans notre cas, le circuit électrique est discrétisé par la superposition du maillage initial (maillage-primal) et la grille du circuit magnétique (maillage-dual). Chaque élément de ce nouveau maillage est remplacé par une résistance équivalente et une source de tension contrôlée afin d'imposer la force électromotrice adéquate. Pour passer du circuit électrique au circuit magnétique ou inversement, on utilise ce que l'on appelle des blocs de transition développés ci-après.

2.1.1. Bloc de transition « électrique → magnétique »

Le bloc a pour mission de récupérer les courants qui circulent dans le circuit électrique et de les répartir de manière appropriée sur le circuit magnétique, sous la forme de forces magnétomotrices. Il utilise des mutateurs unidirectionnels assemblés de la manière illustrée dans la figure Fig. 5.

2.1.2. Bloc de transition « magnétique → électrique »

Le circuit électrique est le siège de courants de Foucault en raison de sa nature conductrice et des flux qui passent à travers les spires de bobinage. Le bloc de transition « magnétique → électrique » collecte ces flux et les injecte dans le circuit électrique sous forme de forces électromotrices. La figure Fig. 6 en explique le principe.

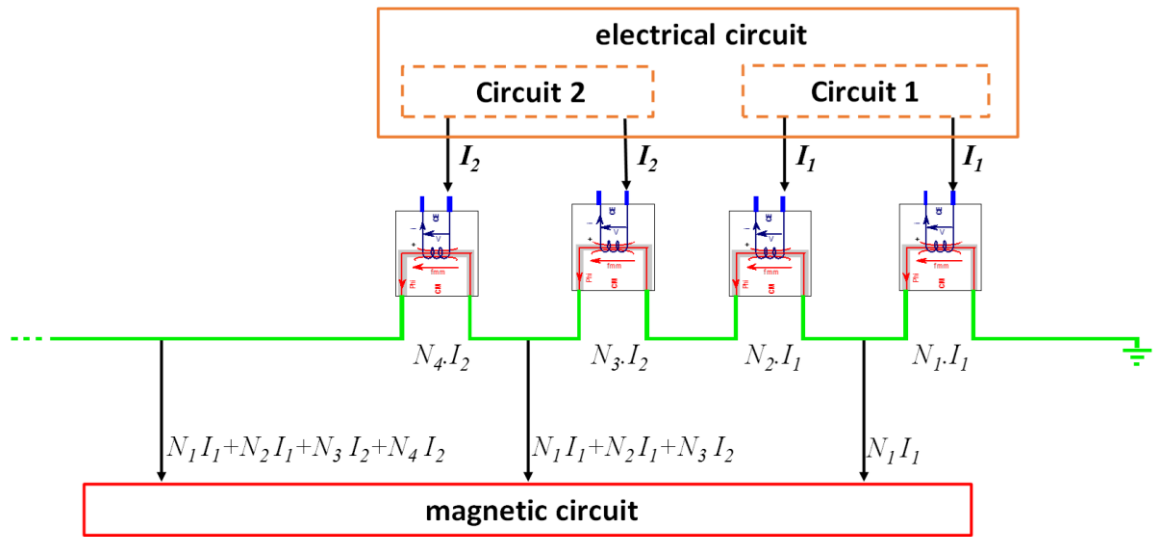


Fig. 5. Bloc de transition de l'électrique vers le magnétique

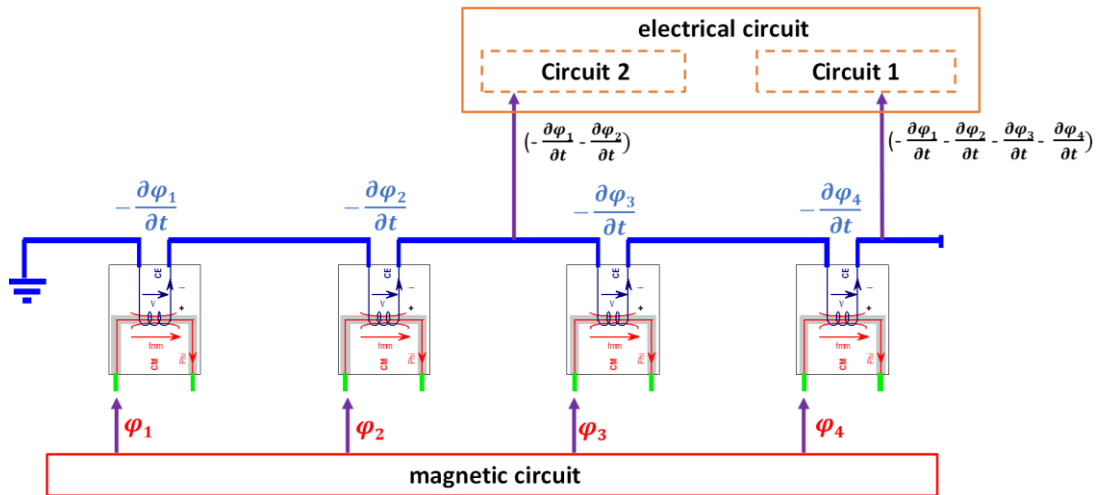


Fig. 6. Bloc de transition du magnétique vers l'électrique

3. VALIDATION DU MODELE

Dans cette section, nous donnons un aperçu de quelques résultats obtenus, ainsi que la validation de notre modèle avec des calculs éléments finis.

La figure Fig. 7 montre les résultats de l'essai en circuit ouvert. Les bobinages primaires sont excités avec différents niveaux de tension, puis le courant dans les bobinages sont évalués. Les résultats obtenus montrent une très bonne concordance avec le modèle éléments finis.

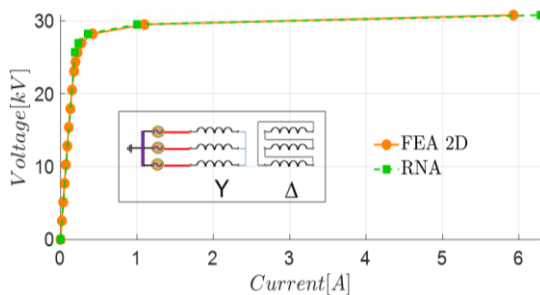


Fig. 7. Caractéristique V-I pour le test en circuit ouvert.

Pour l'essai en court-circuit (Fig. 8), nous avons fait varier la tension primaire, tout en court-circuitant l'enroulement secondaire. On mesure le courant dans le secondaire par rapport à la tension au primaire. Encore une fois, nos résultats sont relativement proches à ceux obtenus par éléments finis, avec une erreur de 7%.

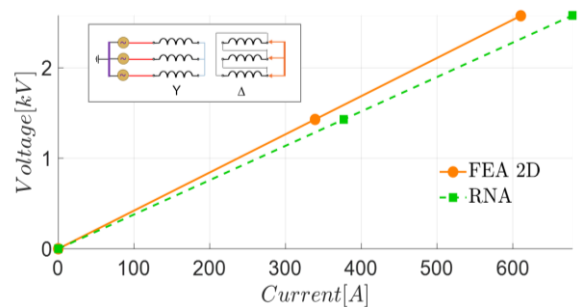


Fig. 8. Caractéristique V-I pour le test en court-circuit.

4. SIMULATION DES COURANTS GEOMATIQUEMENT INDUITS (CGI)

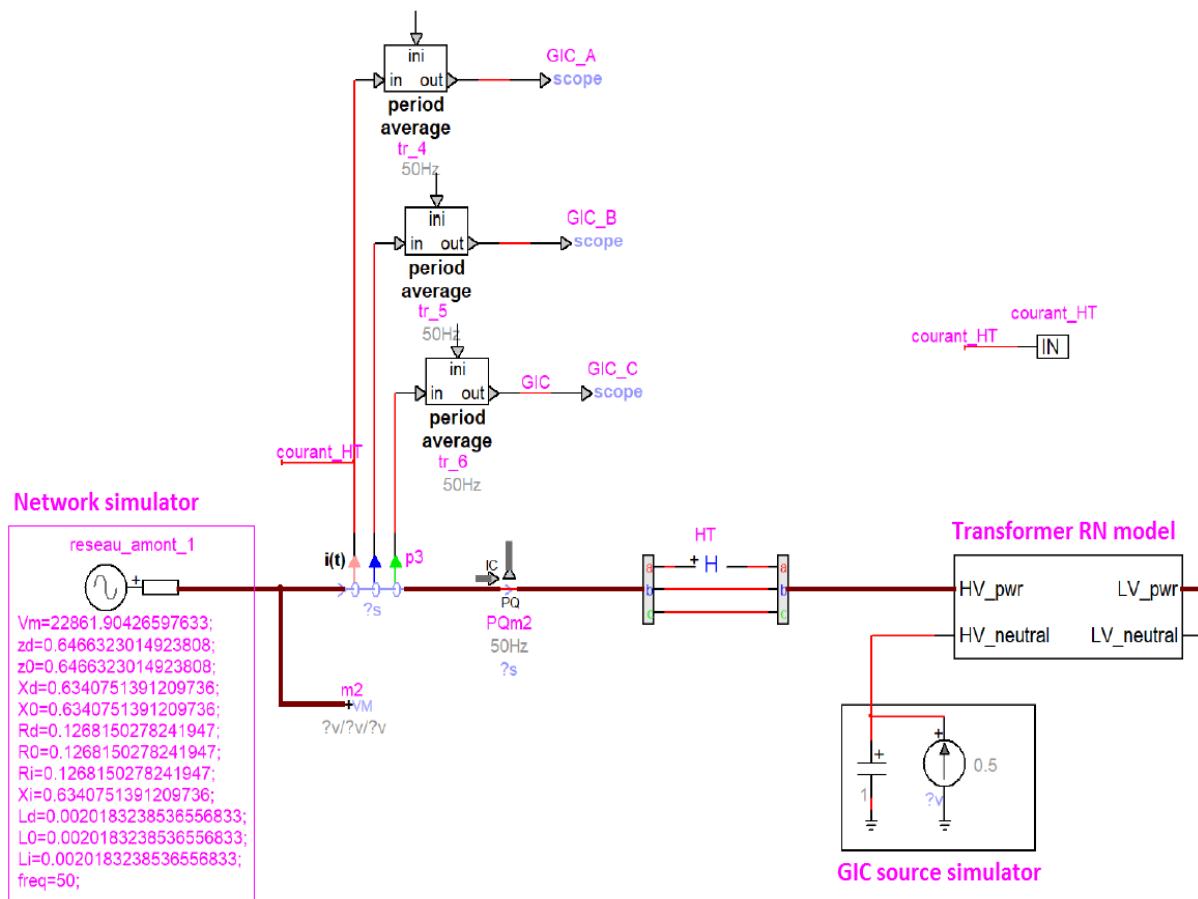


Fig. 9. La configuration adoptée pour étudier l'effet du CGI

Les CGI ont été modélisés par une source de courant en parallèle avec un condensateur connecté au neutre du transformateur (pour la partie haute tension). La figure Fig. 9 montre la configuration du système adopté pour simuler les CGI. Il se compose : d'un émulateur de réseau, d'un émulateur GIC, de notre modèle de transformateur, ainsi que des sondes. Cette configuration a été simulée pour les deux couplages « Yy0 » et « Yd11 ».

Il est possible de voir à travers les figures Fig. 10 et Fig. 11 que l'effet des CGI est considérablement plus intense pour le couplage en étoile (« Yy0 »). Cela peut être expliqué par le fait que la connexion en triangle (« Yd11 ») est moins exposée aux harmoniques, spécialement au 3^{ème} harmonique.

De plus, l'oscillation de la puissance réactive s'atténue plus lentement que dans la réalité. Nous l'expliquons cela par la non prise en compte des pertes fer dans notre modèle. L'introduction de ces pertes, à travers des résistances en parallèle à chaque enroulement, pourrait améliorer le modèle proposé.

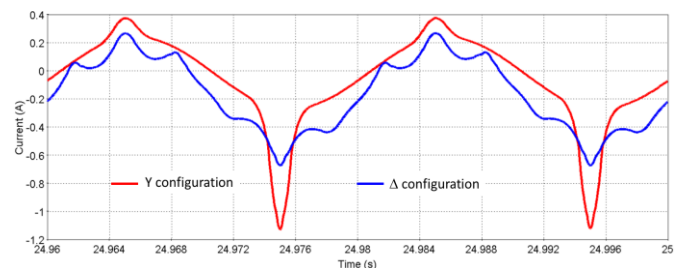


Fig. 10. Perturbations sur le courant (dues aux GIC) pour le couplage « Yy0 » et le couplage « Yd11 ».

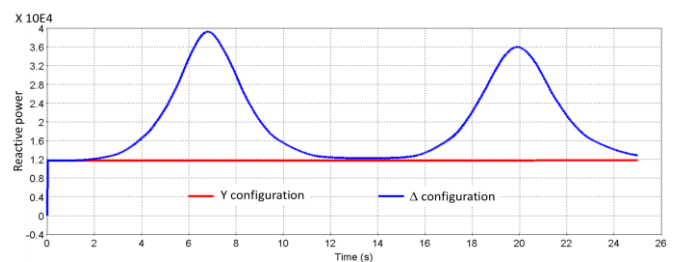


Fig. 11. Perturbations sur la puissance réactive (dus aux GIC) pour le couplage « Yy0 » et le couplage « Yd11 ».

5. CONCLUSION

A travers ce travail, nous avons développé un modèle à base de réseau de réluctances, afin d'étudier l'impact des courants géomagnétiquement induits sur les transformateurs de puissance. Il est non-linéaire et fortement couplé avec un circuit électrique. Ce modèle a été validé par des calculs en éléments finis. Les résultats obtenus montrent que les CGI sont plus nocifs dans un montage en étoile, où une forte saturation du transformateur a été constatée et avec une forte augmentation de l'énergie réactive.

6. REFERENCES

- [1] North American Electric Reliability Corporation, « Effects of Geomagnetic Disturbances on the Bulk Power System », GMDTF Interim Report, February 2012.
- [2] John G. Kappenman and William A. Radasky, Metatech Corp, « Learning to Live in a Dangerous Solar System », Space Weather Forecasting Services, Metatech, January 2000
- [3] John G. Kappenman, « Geomagnetic Storms and Their Impacts on the U.S. Power Grid », Oak Ridge National Laboratory, Metatech, January 2010
- [4] L. Bolduc, « GIC observations and studies in the Hydro-Québec power system », Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Pages 1793-1802, Volume 64, Issue 16, 2002,
- [5] H. Schrayshuen, « Geomagnetic Disturbances (GMD) of the Power System », Power Advisors, LLC, November 13, 2017
- [6] R. Horton, D. Boteler, T. J. Overbye, R. Pirjola and R. C. Dugan, « A Test Case for the Calculation of Geomagnetically Induced Currents », in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 27, no. 4, pp. 2368-2373, Oct. 2012
- [7] M. Naïdjate, N. Bracikowski, M. Hecquet, M. Fratila, M. M. Duro and J. P. Ducreux, « An intelligent reluctance network model for the study of large power and distribution transformers », 6th International Advanced Research Workshop on Transformers, Cordoba, Spain, 2019, pp. 89-92.