

Effet des Tempêtes solaires sur les réseaux électriques

Face à notre dépendance aux systèmes électriques et de télécommunications, et compte tenu des dégâts causés par les tempêtes solaires sur ces derniers, il m'a paru pertinent d'étudier ce phénomène afin d'anticiper ses effets et d'examiner les préoccupations ainsi que les éventuelles initiatives prises par les autorités nationales.

Ce projet s'inscrit dans le thème de l'année par la dépendance directe des phénomènes étudiés au cycle de l'activité solaire.

Le candidat atteste avoir travaillé en monôme.

Positionnement thématique (ÉTAPE 2) :

- *PHYSIQUE (Physique Ondulatoire)*
- *PHYSIQUE (Physique Interdisciplinaire)*
- *MATHEMATIQUES (Analyse)*

Mots-clés (ÉTAPE 2)

Mots-clés (en français)	Mots-clés (en anglais)
<i>Tempêtes solaires</i>	<i>Solar storms</i>
<i>Courant induit géomagnétiquement</i>	<i>Geomagnetically induced currents</i>
<i>Perturbation géomagnétique</i>	<i>Geomagnetic disturbance</i>
<i>Réseaux électriques</i>	<i>Power grids</i>
<i>Poste de transformation</i>	<i>Substation</i>

Bibliographie commentée

Les changements dans l'activité du soleil s'accompagnent d'éruptions solaires qui éjectent dans l'espace interstellaire du plasma (vent solaire). La trajectoire de ce dernier peut intercepter celle de la Terre, dans ce cas, le mouvement des particules chargées dans ce plasma autour de la Terre peut, à travers des effets électromagnétiques, endommager des satellites, perturber les réseaux de télécommunications et créer dans les stations électriques un courant d'intensité importante par effet d'induction. De cette manière, les tempêtes solaires peuvent entraîner des

dégâts importants au sein des stations électriques, voire même causer des blackouts totaux dans de grandes villes [1, 2].

Lorsqu'on observe les différents événements de tempêtes tels que celle du 13 mars 1989, qui a causé une coupure de 9 h à plus de 6 millions d'habitants au Québec, les rapports dénoncent la création d'un courant quasi continu d'intensité importante, qui a saturé une grande partie des transformateurs, au point que plusieurs ont été sévèrement endommagés et tout cela en moins de 90 secondes [3, 4].

Pour commencer, nous concentrons notre étude sur l'identification des différents paramètres dont dépendent les courants induits géomagnétiquement entrant dans les stations électriques.

La cause de ces courants étant une perturbation magnétique, on commence par étudier le cas d'une perturbation harmonique. À partir des équations de Maxwell, on explicite les champs électrique et magnétique ayant pénétré la croûte terrestre. Munis des expressions des champs électrique et magnétique, on cherche à introduire la f.e.m. d'induction dans nos circuits. Pour cela, on considère un modèle carré pour les lignes de haute tension, qui consiste à avoir quatre postes électriques reliés par quatre lignes de longueur fixée, et on explicite les expressions des courants qui nous intéressent [5].

Une résolution numérique d'un système d'équations sera nécessaire.

L'étude étant faite pour une excitation harmonique, on peut généraliser à n'importe quelle perturbation par la transformée de Fourier.

L'une des tempêtes solaires les plus extrêmes jamais enregistrées, "l'événement de Carrington", frappa la Terre en 1859. Sa puissance transforma la nuit en jour dans une grande partie du globe, à travers des aurores dues aux interactions de particules chargées avec l'atmosphère terrestre. Elle servira de référence pour la suite de l'étude. Une telle tempête, si elle frappait la Terre de nos jours, constituerait une catastrophe mondiale majeure : une coupure de courant touchant des centaines de millions d'habitants pendant de longues périodes, ainsi que des pertes économiques mondiales estimées entre 2 et 10 trillions de dollars [6].

On se place d'abord dans le réseau électrique du Québec, qui a été la cible de la tempête de 1989. Nous aurons recours à la simulation numérique, méthode la plus adaptée à notre étude.

Une comparaison entre les résultats obtenus et des données mesurées et estimées met en évidence la puissance destructive de ces courants induits, due à leur nature de courant quasi continu, à leur intensité et à leur durée.

Cependant, une visite de la plus importante centrale électrique de la Tunisie, la centrale thermique de Radès, montre une préoccupation minime des ingénieurs de la centrale envers un tel phénomène. La position géographique s'est avérée être un facteur important.

Il est alors intéressant de revenir sur l'origine même de la création des perturbations magnétiques enregistrées, afin de comprendre cette dépendance géographique de l'événement.

Une simulation numérique de la trajectoire des particules chargées autour du champ magnétique terrestre permet d'en donner une explication qualitative. Toutefois, on aura également recours à des bases de données d'observations précises des perturbations magnétiques à travers le globe, obtenues par le satellite ACE (Advanced Composition Explorer) de la NASA [7].

Problématique retenue

Comment le cycle d'activité magnétique solaire affecte-t-il un réseau électrique terrestre?

Objectifs du TIPE du candidat

- Établir l'expression du champ électromagnétique pénétrant dans la croûte terrestre à partir d'une perturbation magnétique harmonique provenant de l'espace.
- Modéliser le réseau électrique et expliciter les courants entrant dans les différentes stations.
- Étudier un exemple de tempête dans un réseau particulier et comparer les résultats obtenus avec les mesures réelles.
- Simuler la trajectoire d'une particule chargée autour de la Terre.
- Expliquer l'origine de la perturbation magnétique et sa dépendance géographique.

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

- [1] J. HOEFFELMAN, J. RIMEZ : Les tempêtes solaires et leur impact sur les réseaux électriques : *Elia : Bulletin de la Société Royale Belge d'Électricité. Article*
- [2] OUGHTON, E. J., SKELTON, A., HORNE, R. B., THOMSON, A. W. P., & GAUNT, C. T. : Quantifying the daily economic impact of extreme space weather due to failure in electricity transmission infrastructure : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2016SW001491>
- [3] LLOYD'S : Solar Storm Risk to the North American Electric Grid : *London: Lloyd's (2013)*
- [4] BOLDUC, L. : GIC observations and studies in the Hydro-Québec Power System : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364682602001281>
- [5] BOTELER, D. H., & PIRJOLA, R. J. : Modeling geomagnetically induced currents : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2016sw001499>

- [6] LOPER, R. D. : Carrington-class events as a Great Filter for electronic civilizations in the Drake equation : <https://doi.org/10.1088/1538-3873/ab028e>
- [7] HONGYI HU,ZHONGHUA XU : The global map of geomagnetic disturbances : <https://doi.org/10.1016/j.softx.2023.101619>

Références bibliographiques (ÉTAPE 2)

- [1] TOM S. MOLINSKI, WILLIAM E. FEERO, BEN L. DAMSKY : Shielding Grids From Solar Storms : <https://spectrum.ieee.org/shielding-grids-from-solar-storms>
- [2] NORTH AMERICAN ELECTRIC RELIABILITY COUNCIL (NERC) : Effects of Geomagnetic Disturbances on the Bulk Power System : https://www.nerc.com/globalassets/programs/rapa/gmd/reference-documents/nerc_1989-quebec-disturbance_report.pdf

DOT

- [1] : [Mai 2025] : Choix du sujet et premières recherches bibliographiques. Acquisition de certaines ressources documentaires à la suite d'un échange avec la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration).
- [2] : [Juillet–Août 2025] : Étude de l'origine des tempêtes solaires et tentatives de réalisation d'un programme simulant la trajectoire d'une particule chargée autour des lignes de champ magnétique terrestre. Les premières versions ont donné des résultats incohérents, dont l'origine est restée inconnue pendant plus de deux semaines de tentatives. Celle-ci s'est finalement avérée être l'accumulation d'erreurs numériques liée à un très grand nombre d'itérations nécessaires pour décrire le mouvement de la particule sur plusieurs dizaines de milliers de kilomètres. Le programme n'a abouti qu'après plusieurs phases d'optimisation, telles que l'utilisation de la méthode de Runge-Kutta à la place de la méthode d'Euler.
- [3] : [Décembre 2025] : Modélisation des effets des tempêtes solaires à travers une perturbation géomagnétique harmonique. Détermination du champ électromagnétique qu'il engendre dans la Terre. Modélisation électrique des réseaux de transport d'électricité.
- [4] : [Décembre 2025 – Janvier 2026] : Détermination, pour le modèle électrique développé, de l'expression des courants entrant dans les postes de transformation. Reprise du modèle établi pour le réseau électrique d'Hydro-Québec en adaptant certaines approximations afin de se rapprocher au mieux du modèle théorique.
- [5] : [6 janvier 2026] : Visite de la centrale thermique de Radès afin de m'enrichir d'avantage sur les mesures prises en pratique contre les tempêtes solaires.
- [6] : [Février 2026] : Acquisition des mesures de la perturbation magnétique associée à la tempête solaire du 13 mars 1989 et réalisation d'un premier programme Python visant à généraliser l'étude menée pour une perturbation harmonique à des perturbations réelles. Cette première approche s'est révélée inefficace en raison de sa complexité temporelle. Le programme a ensuite été optimisé à l'aide de la transformée de Fourier rapide (FFT), permettant de tracer l'évolution temporelle du courant géomagnétiquement induit ainsi que de son spectre fréquentiel pour la tempête du 13 mars 1989 sur une section du réseau électrique d'Hydro-Québec.

[7] : *[Mai 2026] : Étude géologique de la section du réseau électrique d'Hydro-Québec afin d'estimer plus précisément les valeurs des différentes grandeurs physiques nécessaires à la simulation numérique.*

[8] : *Comparaison des résultats obtenues aux mesures réelles rapportées par Hydro-Quebec et par la Société Nord-Américaine de Fiabilité des Réseaux Electriques.*