



## Les tempêtes solaires et leur impact sur les réseaux électriques

### Sommaire:

- Editoriaal, Raf Steyaert, Jean Louis Van Eck, SRBE/KBVE
- De verschillende vormen van zonneactiviteit en hun invloed op de mens en zijn technologie, Jan Janssens, Petra Vanlommel, Solar-Terrestrial Centre of Excellence, Brussel, België
- Earth's magnetosphere and ionosphere, J. De Keyser, Space Physics Division, Belgian Institute for Space Aeronomy; S. Stankov, T. Verhulst, Geophysical Department, Royal Meteorological Institute, Brussels
- The Geomagnetic Field: an Actively Changing Global Phenomenon, T. Verhulst, S. Stankov, J. Rasson, Geophysical Department, Royal Meteorological Institute, Brussels
- Mathematical relationship between geomagnetic field time variations and the corresponding induced currents in HV power grids, J. A. Van Baelen
- GIC Influence on Power Systems calculated by Carson's method, Daniel Van Dommelen, Albert Van Ranst, Robert Poncelet
- Influence du géomagnétisme sur les réseaux et sur le réseau belge en particulier, J. Hoeffelman, J. Rimez – Elia

### Prix de l'IBE:

- Les mécanismes de lumière naturelle: analyse des bibliothèques d'Alvar Aalto, Jean-Denis Thiry, Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme (LOCI), Université catholique de Louvain (UCL), et Belgium Interdisciplinary Laboratory of Performance-Integrated Design (LIPID), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Suisse

## Editorial

Raf Steyaert, Jean Louis Van Eck, SRBE/KBVE

Depuis quelques années et encore récemment, la grande presse, plusieurs revues scientifiques de vulgarisation et la NASA ont attiré l'attention sur le phénomène des tempêtes solaires et sur les multiples conséquences qu'elles pourraient avoir dans nos sociétés modernes très dépendantes de l'électricité [1, 2, 3, 4]. La présente revue tombe à point nommé pour illustrer et expliquer les conséquences désastreuses que ces tempêtes pourraient avoir sur tous les circuits électriques terrestres. En particulier les effets sur les réseaux électriques sont analysés à fond et quantifiés. Ces effets consistent en des perturbations plus ou moins importantes pouvant conduire à une destruction partielle des transformateurs à l'extrémité des lignes. Ils sont donc susceptibles de causer des pannes d'électricité de plus ou moins longue durée dans une partie de la planète.

Les tempêtes solaires sont connues depuis le milieu du dix-neuvième siècle, mais c'est à partir du milieu du vingtième siècle que les astrophysiciens et les géophysiciens les ont étudiées en détail. Le but de cet editorial est de donner une première idée générale du sujet et par là même de justifier ce numéro spécial. Chacun des différents aspects sera traité de manière approfondie dans les autres articles de la revue.

Le soleil émet naturellement un flux de plasma constitué essentiellement d'ions et d'électrons; c'est le vent solaire. Il émet aussi des radiations électromagnétiques (rayons UV et X). A certains moments l'émission est beaucoup plus intense. Il s'agit alors d'une tempête solaire due à des explosions ou à des émissions coronales. Les particules émises arrivant au voisinage de la terre ainsi que les rayons, sont susceptibles de modifier considérablement les couches ionosphériques et la répartition du champ magnétique terrestre. Une conséquence immédiatement visible est l'apparition d'aurores boréales à des latitudes plus ou moins élevées.

La plus connue de ces tempêtes solaires et probablement la plus intense qui ait été observée est celle dite «de Carrington». A la fin du mois d'août 1859 des taches solaires particulièrement grandes étaient visibles sur le soleil. Une première éruption solaire eut lieu le 28 août, une deuxième le 1er septembre. Les astronomes anglais R. Carrington et R. Hodgson les observèrent en détail [5]. Le 1er septembre dans la journée R. Carrington observa aussi un éclair très brillant venant de ces taches qui traduisait une éruption encore plus violente.

Les conséquences dans l'hémisphère Nord furent de trois ordres. Les populations purent observer de magnifiques aurores boréales jusqu'au tropique en Europe et en Amérique. La presse de l'époque rapporte qu'il était possible de lire son journal la nuit à la lumière de ces aurores. Les observatoires de géophysique enregistrèrent des perturbations intenses du champ magnétique terrestre. Enfin les liaisons télégraphiques furent rendues tout-à-fait inopérantes pendant des heures.

Il faut remarquer que ces liaisons télégraphiques étaient à l'époque les seules installations électriques existantes en Europe et en Amérique. Elles étaient récentes car leur implantation datait d'une quinzaine d'années. Comme dans le reste de l'hémisphère Nord les opérateurs belges de Bruxelles, d'Anvers, de Gand et d'Ostende furent réveillés par la sonnerie de leur télégraphe alors qu'aucun appel n'était envoyé. Les liaisons entre les grandes capitales furent totalement interrompues. Fait amusant, les opérateurs des villes de Portland et de Boston aux Etats Unis eurent l'idée de couper les batteries qui alimentaient leur télégraphe. A leur grande surprise ils ont pu communiquer à certains moments en utilisant cette « électricité céleste » qui fournissait une source de tension naturelle.

Au fond la vie sur terre n'a guère été perturbée par cette gigantesque tempête solaire au dix-neuvième siècle. Aujourd'hui une telle tempête risquerait de provoquer une catastrophe dans nos sociétés totalement dépendantes de l'électricité.

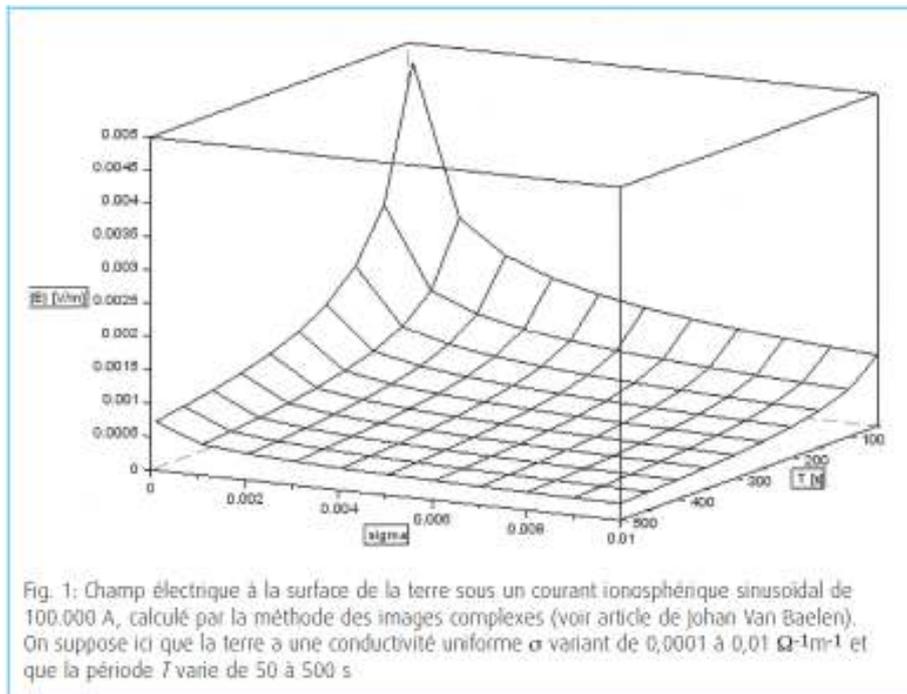
Beaucoup d'autres tempêtes solaires de moindre importance ont été observées depuis celles de Carrington [6]. Parmi les principales on relève les dates du 14-15 mai 1921, 13 mars 1989, 29-31 octobre 2003. La tempête de 1989 a causé la destruction d'un transformateur et provoqué l'effondrement d'une partie du réseau au Québec.

Trois articles détaillent successivement dans ce numéro l'activité solaire (J. Janssens, P. Vanlommel), la magnétosphère et l'ionosphère (J. De Keyser, S. Stankov, T. Verhulst) et le champ magnétique terrestre (T. Verhulst, S. Stankov, J. Rasson)

Les tempêtes solaires créent des courants électriques importants et variables dans la haute atmosphère qui génèrent un champ magnétique variable. Ce dernier induit des courants dans la terre partiellement conductrice. L'ensemble de ces courants crée un champ magnétique variable qui induit un champ électrique variable à la surface de la terre. Plusieurs méthodes de calcul de ce phénomène sont détaillées dans les deux articles suivants.

Dans l'article de J. Van Baelen une approche rigoureuse et une approche simplifiée (« méthode des images complexes ») sont exposées pour déterminer la relation entre une variation du géomagnétisme et le champ électrique induit à la surface de la terre.

Dans l'article de D. Van Dommelen, A. Van Ranst et R. Poncelet des résultats tout à fait comparables sont obtenus via une approche originale, à savoir l'application de la méthode de Carson. Cette méthode est couramment utilisée lors des analyses des réseaux électriques pour déterminer les interactions magnétiques entre liaisons électriques en prenant en compte la présence d'une terre partiellement conductrice.



Pour se faire une idée simple des phénomènes et se familiariser avec les ordres de grandeur, on prendra ici l'exemple d'un courant filaire sinusoïdal de 100 000 A, parallèle à la terre supposée plane et situé à une altitude de 100 km. C'est un ordre de grandeur réaliste pour les courants circulant dans l'ionosphère en cas de tempête solaire. Ce courant crée un champ électrique sinusoïdal à la surface de la terre fonction de la conductivité  $\sigma$

et de la fréquence de la sinusoïde ou de sa période  $T$ . La Fig. 1 indique l'amplitude de ce champ à l'aplomb du courant en supposant une terre de conductivité uniforme  $\sigma$  variant de 0,0001 à 0,01  $\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$  et des périodes variant de 50 à 500 s. L'amplitude du champ est d'autant plus grande que la conductivité est faible et que la période est courte. On remarquera qu'il s'agit là de phénomènes très lents pour un électricien (fréquences de 0,02 à 0,002 Hz).

Si une ligne haute tension triphasée, orientée dans le sens du champ (généralement orienté est-ouest), a ses extrémités mises à la terre par le neutre des transformateurs, elle est soumise à une source de tension sinusoïdale mais quasi continue vis-à-vis du 50 Hz et est donc traversée par un courant quasi continu qui déséquilibre les transformateurs en les faisant entrer en saturation. Ce courant est souvent désigné par le sigle GIC (Geomagnetically Induced Current).

Un champ électrique de 3 mV/m par exemple (voir Fig. 1,  $\sigma = 3 \cdot 10^{-4} \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ ,  $T = 70$  s) aligné sur une ligne haute tension de 100 km de long produit une source de tension de 300 V d'amplitude presque continue. Il en résulte des courants pouvant dépasser 100 A au total dans les trois phases de la ligne.

Les effets multiples de ces courants sont détaillés dans l'article de J. Hoeffelman et de J. Rimez. Des remèdes pour y faire face sont présentés et évalués. On se trouve ici en présence d'un phénomène naturel, qui se produit très souvent mais à des intensités variables. La tempête de Carrington, la plus intense observée, se reproduira mais personne ne peut dire dans combien d'années. Des estimations parlent de deux tempêtes de ce type par millénaire. D'autres tempêtes plus faibles sont plus fréquentes et ont déjà causé des dégâts. Il importe donc d'en examiner toutes les conséquences possibles et d'envisager des mesures de protection. C'est un problème difficile de gestion du risque car il est peu probable à l'échelle de temps de la vie humaine mais pourrait, s'il se produit, conduire à des catastrophes en raison de la fragilité de nos sociétés dépendant totalement de l'électricité.

Les effets des tempêtes solaires se manifestent de préférence à des latitudes élevées, d'où l'idée que les pays nordiques sont les seuls concernés par le problème. Cette conclusion s'avère être prématurée. On a en effet pu constater que le réseau Sud-Africain, situé plus près de l'équateur que la Belgique, a été endommagé par la tempête de 2003 ayant une intensité nettement plus faible que celle de Carrington. En outre, l'interconnexion accrue des réseaux Européens les rend plus vulnérables en raison des effets de cascade lors d'un effondrement d'un des réseaux.

Dans le but d'évaluer la vulnérabilité des réseaux électriques situés entre autres à des latitudes moyennes et basses lors des événements sévères et extrêmes, le CIGRE (Conseil International des Grands Réseaux Electriques) vient d'établir un groupe de travail (le GT C4.32), dont les résultats peuvent être attendus fin 2015.

Nous tenons à remercier vivement toutes les personnes qui ont permis la réalisation de ce numéro de la revue, à la fois les chercheurs de l'Observatoire Royal de Belgique, de l'Institut Royal Météorologique, de l'Institut d'Aéronomie Spatiale, ainsi que les ingénieurs de la société Elia. Au cours de multiples réunions nous avons toujours rencontré auprès d'eux à la fois un intérêt et une grande compétence. Nous remercions aussi les membres du groupe ad hoc\* auprès du Comité des Publications de la SRBE, tous auteurs ou coauteurs d'article(s) dans ce numéro, qui ont étudié les différents aspects électriques des tempêtes solaires et participé à de nombreuses réunions.

Peut-être est-il bon de rappeler ici que M. Johan Van Baelen, membre de ce groupe et auteur d'un article dans ce numéro, a publié en 1970 avec le professeur V. Albertson un article qui est considéré internationalement comme un des articles fondateur de la discipline [7].

Raf Steyaert, SRBE-KBVE

Jean Louis Van Eck, professeur émérite de l'ULB

## Bibliographie

- [1] S. Odenwald, J. Green: En attendant la tempête solaire du millénaire, *Pour la Science*, n°374, décembre 2008, p. 44-52.
- [2] J. Kappenman: A Perfect Storm of Planetary Proportions, *IEEE Spectrum*, February 2012, p. 24-25.
- [3] Task Force on Geomagnetic Disturbances: Geomagnetic Disturbances, *IEEE Power & Energy Magazine*, July/August 2013, p. 71-78.
- [4] De Morgen: Krachtige zonnestorm miste aarde op een haar, 25 juli 2014; L'Echo: On a failli retourner au XVIII<sup>e</sup> siècle, selon la NASA, 25 juillet 2014; Le Soir: Une tempête solaire a failli perturber tous les circuits électriques sur Terre, 25 juillet 2014; De Standaard: Extreme zonnestorm kon aarde lamleggen, 26 juli 2014.
- [5] D. H. Boteler: The super storms of August/September 1859 and their effects on the telegraph system, *Adv. Space Res.*, 38, 2006, p. 159-172.
- [6] A. Pulkkinen et alii: Generation of 100-year geomagnetically induced current scenarios, *Space Weather*, vol.10, 2012, SO4003.
- [7] V.D. Albertson, J. A. Van Baelen: Electric and Magnetic Fields at the Earth's Surface Due to Auroral Currents, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol.pas-89, n° 4, April 1970.

## Les auteurs



Raf Steyaert behaalde in 1970 het diploma van werktuigkundig-elektrotechnisch ingenieur aan de Universiteit Gent. Tot 1974 was hij assistent aan deze universiteit waar hij in 1972 ook het diploma van ingenieur in de nucleaire wetenschappen behaalde. Van 1974 tot 2000 was hij verbonden aan Tractebel Engineering waar hij vooral actief was in het domein van de ontwikkeling van elektrische netten. Van 1993 tot 2001 was hij ook gastprofessor in het vakgebied Elektrische Netten aan de Universiteit Gent. Van 2001 tot 2007 was hij binnen Elia, de Belgische transmissie-netbeheerder, nauw betrokken bij de technische regelgeving in het kader van de liberalisering van de elektriciteitsmarkt en als Key Account Manager verantwoordelijk voor de klantencontacten in Vlaanderen. Van 2007 tot september 2012 was hij als gastprofessor verbonden aan het Departement Elektrotechniek (ESAT) van de KU Leuven.



Jean Louis Van Eck est diplômé de l'Université Libre de Bruxelles, ingénieur civil électricien et mécanicien, ingénieur des télécommunications et d'électronique et docteur en sciences appliquées (1963). Après une carrière de chercheur impliquant différents séjours à l'étranger, il a été progressivement chargé d'une dizaine de cours à la Faculté des Sciences appliquées et à la Faculté des Sciences de l'ULB, cours portant sur l'électronique, les télécommunications et l'instrumentation. Pendant une vingtaine d'années il a dirigé le service d'électronique, microélectronique et télécommunications de la Faculté des Sciences appliquées. De 1986 à 1990 il a présidé la Faculté des Sciences appliquées. Il est actuellement professeur émérite.

## **De verschillende vormen van zonneactiviteit en hun invloed op de mens en zijn technologie**

Jan Janssens, Petra Vanlommel, Solar-Terrestrial Centre of Excellence, Brussel, België

### **Résumé:**

Le Soleil, Helios, Sol,... nombreux sont les noms qui ont été donnés à cette boule brillante qui traverse journallement les cieux et nous fournit la lumière et la chaleur indispensables. Des images satellites ont révélé notre aster comme un objet dynamique et explosif qui est à la base de la dite météorologie spatiale, ayant un impact incontournable sur notre technologie.

## **Earth's magnetosphere and ionosphere**

J. De Keyser, Space Physics Division, Belgian Institute for Space Aeronomy; S. Stankov, T. Verhulst, Geophysical Department, Royal Meteorological Institute, Brussels

### **Résumé:**

Le champ géomagnétique crée une cavité dans l'espace interplanétaire qu'on appelle la magnétosphère. Des processus dans cette région contrôlent comment de la masse et de l'énergie du vent solaire peuvent pénétrer dans l'ionosphère, la haute atmosphère partiellement ionisée. La magnétosphère et l'ionosphère sont fortement couplées. Ensemble, elles déterminent les effets de l'activité solaire sur l'homme et sa technologie. Cet article décrit d'abord la magnétosphère et l'ionosphère pendant des périodes calmes. Ensuite est présenté un résumé des effets dynamiques les plus importants des perturbations géomagnétiques.

## **The Geomagnetic Field: an Actively Changing Global Phenomenon**

T. Verhulst, S. Stankov, J. Rasson, Geophysical Department, Royal Meteorological Institute, Brussels

### **Résumé:**

Le champ magnétique terrestre varie sur une grande variété d'échelles temporelles: des tendances à long temps causées par des processus internes, jusqu'aux fluctuations rapides causées principalement par des événements solaires. Aujourd'hui, le champ magnétique est continuellement surveillé par des réseaux mondiaux d'observatoires. Différents indices sont développés pour caractériser l'activité magnétique, et divers services existent pour alerter les utilisateurs en cas d'une perturbation magnétique.

## **Mathematical relationship between geomagnetic field time variations and the corresponding induced currents in HV power grids**

J. A. Van Baelen

### **Résumé:**

Une relation mathématique peut être déduite, à partir des équations de Maxwell, entre une variation mesurée de l'induction magnétique ( $d\mathbf{B}/dt$ ) et le champ électrique  $\mathbf{E}$  à la surface de la terre. Cette relation dépend de la source de courant produisant  $d\mathbf{B}/dt$ . Deux sources importantes sont prises en considération: un électrojet modélisé comme une couche de courant et un électrojet modélisé comme un courant filaire. Le champ électrique  $\mathbf{E}$  dépend aussi de la conductivité de la terre, qui peut être supposée uniforme ou variable avec la profondeur. Trois cas sont pris en considération. Cas 1: "une couche de courant avec une conductivité uniforme de la terre", cas 2: "un courant filaire avec une conductivité variable", cas 3: "une couche de courant avec une conductivité variable". Le cas 2 donne une limite inférieure et le cas 3 donne une limite supérieure pour le champ électrique  $\mathbf{E}$ , associé au même  $d\mathbf{B}/dt$  [1]. Dans le deuxième cas, les calculs sont compliqués et prennent du temps, de façon à ce que pour des calculs en temps réel, des formules simplifiées sont nécessaires comme présentées en [2]. Une fois le champ électrique  $\mathbf{E}$  connu, les courants induits dans le réseau HT peuvent être calculés. Ensuite certains aspects des recherches actuelles ont été résumés et en dernier lieu un exemple numérique est inclus.

## **GIC Influence on Power Systems calculated by Carson's method**

Daniel Van Dommelen, Albert Van Ranst, Robert Poncelet

### **Résumé:**

Au cours de tempêtes solaires d'énormes masses de particules chargées sont éjectées dans l'espace et ont créé de sérieux problèmes dans les réseaux. Dans cet article l'influence de l'éjection de masse solaire ionisée sur la terre est représentée par le couplage d'un courant intense (électrojet) dans l'ionosphère avec un sol conducteur et avec les lignes à haute tension. Ce couplage est étudié en utilisant les formules de Carson. Dans un premier temps on rappelle l'origine de ces équations et leur domaine d'application pour ensuite en utiliser des approximations obtenues par développement en séries tronquées pour un calcul des tensions induites et de l'induction magnétique au niveau du sol. Ces résultats sont comparés à ceux obtenus à partir des matrices d'impédances produites par un programme pour le calcul de transitoires électromagnétiques.

## **Influence du géomagnétisme sur les réseaux et sur le réseau belge en particulier**

J. Hoeffelman, J. Rimez – Elia

### **Résumé:**

Les courants géomagnétiques sont des courants induits lentement variables qui circulent dans l'écorce terrestre. Les réseaux à haute tension, du fait de leur plus faible résistivité équivalente, peuvent partiellement détourner ces courants via la connexion à la terre du neutre des transformateurs de puissance. Les conséquences graves qui en ont découlé ailleurs dans le monde – apparition de points chauds, dégradation irréversible du système d'isolation, effondrement du réseau suite à une trop grande absorption de puissance réactive – ne sont pas vraiment craintes en Belgique. D'autres effets indésirables sont cependant aussi mis en évidence. Le bruit des transformateurs augmente suite à une magnétisation asymétrique de leur noyau. C'est pourquoi Elia équipe les transformateurs stratégiques de systèmes destinés à bloquer les courants continus ou lentement variables. Elia met aussi en place des enregistrements de longue durée pour analyser la corrélation qui existe entre l'activité solaire et la pénétration de ces faibles courants homopolaires dans le réseau à haute tension.

### **Prix de l'IBE:**

## **Les mécanismes de lumière naturelle: analyse des bibliothèques d'Alvar Aalto**

Jean-Denis Thiry, Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme (LOCI), Université catholique de Louvain (UCL), et Belgium Interdisciplinary Laboratory of Performance-Integrated Design (LIPID), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Suisse

### **Résumé:**

Aujourd'hui, les enjeux du développement durable obligent à revoir l'ensemble des paramètres de la conception architecturale. Selon l'Agence internationale de l'énergie, en 2005, 19 % de l'électricité produite dans le monde était consommée par l'éclairage. Nous savons que les bienfaits des photons naturels sont largement supérieurs à l'éclairage bleuté des lampes à fluorescence, ou au mauvais rendu chromatique des LED. L'éclairage naturel est donc un des aspects à ne pas négliger pour faire face aux défis du développement durable. A cela s'ajoute la dimension humaine de la lumière naturelle, en tant que facteur de bien-être et de cohésion sociale, quant elle est associée au concept "espace-lumière". Il ne s'agit pas seulement de capter plus de lumière naturelle, mais aussi de la distribuer en lui conférant une dimension spatiale.

Par insuffisance de connaissances et de données, les approches permettant de simuler le niveau d'éclairage d'un bâtiment, ne prennent que trop peu en compte les qualités spatiales et humaines que la lumière naturelle peut apporter. Ces recherches ont pour objectif d'articuler éclairage naturel et conception architecturale, par l'analyse d'exemples majeurs d'architecture. C'est pourquoi, des bibliothèques de l'architecte moderniste finlandais Alvar Aalto, localisées selon un axe nord-sud, de l'Allemagne à la Laponie finlandaise [fig.1], ont été étudiées en détail. Celles-ci sont caractérisées par des ambiances lumineuses de grande qualité, malgré le faible ensoleillement sous ces latitudes. Les jeux subtils de lumière directe et indirecte installent des limites virtuelles, créant des espaces statiques et dynamiques à part entière, lieux favorables aux

activités et aux rencontres intergénérationnelles, sous la lumière. Pour la première fois, des niveaux d'éclairage ont été mesurés extensivement dans une typologie de bâtiments d'Alvar Aalto, renommé pour sa maîtrise de l'espace et de la lumière. Cette approche permet d'envisager la conception de dispositifs de prise de lumière performants, tant d'un point de vue quantitatif que qualitatif, et se révèle être un point de départ pertinent pour l'analyse des "espaces-lumière".