



Zonnestormen en hun impact op elektrische netten

Inhoudstafel:

- 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

BIV-Prijs:

- 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

Editoriaal

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 éditorial 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.

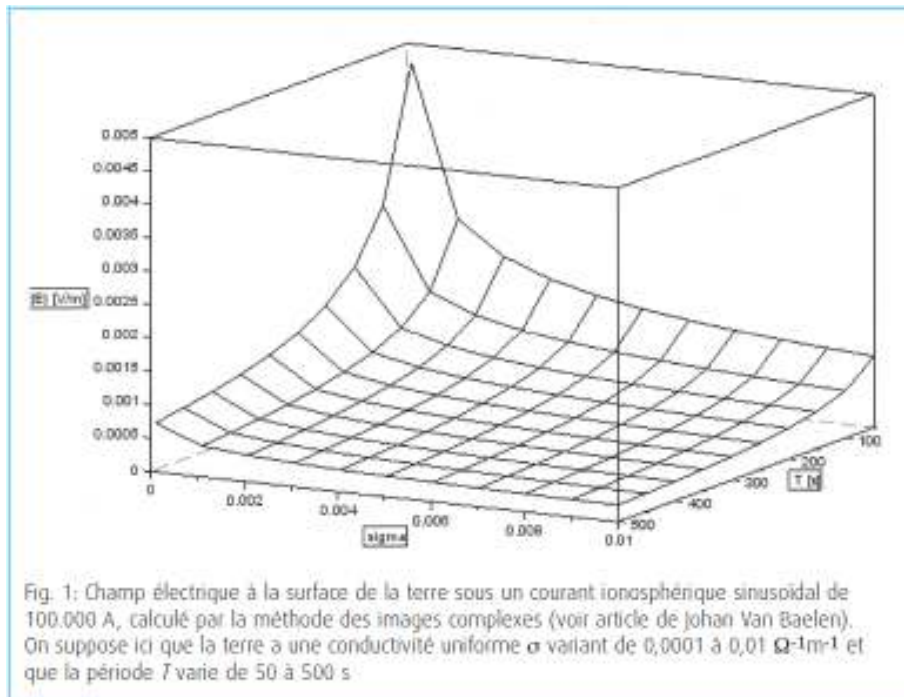
Beaucoup d'autres tempêtes solaires de moindre importance ont été observées depuis celles de Carrington [6]. Parmi les principales on relève les dates du 14-15 mai 1921, 13 mars 1989, 29-31 octobre 2003. La tempête de 1989 a causé la destruction d'un transformateur et provoqué l'effondrement d'une partie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

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 σ 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'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^e 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

Samenvatting:

De Zon, Helios, Sol, ... er bestaan vele namen voor die gele bol die dagelijks ons hemelgewelf doorkruist en onze warmte- en lichtbron bij uitstek is. Dankzij satellietwaarnemingen hebben we onze ster leren kennen als een dynamisch en explosief hemelobject dat aan de basis ligt van het zogenaamde ruimteweer dat een belangrijke impact heeft op onze 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

Samenvatting:

Het aardmagnetisch veld creëert een holte in de interplanetaire ruimte, de magnetosfeer genaamd. Processen in dit gebied in de ruimte bepalen hoe massa en energie vanuit de zonnwind terecht kunnen komen in de ionosfeer, de deels geïoniseerde hoge atmosfeer. De magnetosfeer en de ionosfeer zijn sterk gekoppeld aan elkaar. Samen moduleren ze de effecten van de zonneactiviteit op mens en technologie. Dit artikel beschrijft eerst de magnetosfeer en de ionosfeer tijdens kalme periodes, gevolgd door een bondig overzicht van de belangrijkste dynamische verschijnselen gedurende geomagnetische storingen.

The Geomagnetic Field: an Actively Changing Global Phenomenon

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

Samenvatting:

Het aardmagnetisch veld varieert op uiteenlopende tijdschalen. Processen binnenin de aarde zijn verantwoordelijk voor lange-termijn trends terwijl snelle fluctuaties veroorzaakt worden door zonneactiviteit. Vandaag de dag wordt het magnetisch veld permanent gemonitord door een wereldwijd netwerk van waarnemingsstations. Verschillende indices zijn ontwikkeld om de activiteit van het magneetveld te karakteriseren, evenals diensten om gebruikers te waarschuwen in geval van een verstoring van het magneetveld.

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

J. A. Van Baelen

Samenvatting:

Het mathematisch verband tussen een gemeten verandering van de magnetische inductie ($d\mathbf{B}/dt$) en het elektrisch veld \mathbf{E} aan de oppervlakte van de aarde kan afgeleid worden van de vergelijkingen van Maxwell. Dit verband hangt af van de stroombron die $d\mathbf{B}/dt$ teweeg brengt. Twee belangrijke bronnen worden besproken: een electrojet gemodelleerd als een stroomlaag en een electrojet gemodelleerd als een lijnstroom. Het elektrisch veld \mathbf{E} hangt ook af van de geleidbaarheid van de aarde die uniform verondersteld kan worden of veranderlijk met de diepte. Drie gevallen worden behandeld. Geval 1: "een stroomlaag met uniforme geleidbaarheid van de aarde", geval 2: "een lijnstroom met veranderlijke geleidbaarheid", geval 3: "een stroomlaag met veranderlijke geleidbaarheid". Geval 2 geeft een ondergrens en geval 3 geeft een bovengrens voor het elektrisch veld \mathbf{E} , overeenkomend met dezelfde $d\mathbf{B}/dt$ [1]. In geval 2 zijn de berekeningen ingewikkeld en tijdrovend, zodat voor real-time berekeningen vereenvoudigde formules nodig zijn zoals beschreven in [2]. Eenmaal het elektrisch veld \mathbf{E} gekend is, kunnen de geomagnetisch geïnduceerde stromen in het HS-netwerk berekend worden. Vervolgens worden enkele aspecten van het aan gang zijnde onderzoek kort samengevat en tot slot wordt een numeriek voorbeeld toegevoegd.

GIC Influence on Power Systems calculated by Carson's method

Daniel Van Dommelen, Albert Van Ranst, Robert Poncelet

Samenvatting:

Tijdens zonnestormen worden enorme massas geladen deeltjes de ruimte ingeslingerd en die blijken de oorzaak te zijn geweest van zware incidenten in hoogspanningsnetten. In dit artikel wordt de invloed van de uitstoot van geïoniseerde zonnemassa op de aarde voorgesteld door de koppeling van een intense stroom in de ionosfeer (electrojet) met een geleidende aarde en hoogspanningslijnen. Deze koppeling wordt bestudeerd door gebruik te maken van de formules van Carson. In een eerste deel wordt de oorsprong van deze vergelijkingen en hun toepassingsgebied opgefrist om dan in een tweede deel de spanningen en de magnetische inductie op grondniveau door afgebroken reeksen te bepalen. Tenslotte wordt een vergelijking gemaakt met de resultaten bekomen door gebruik te maken van de impedantiematrix geproduceerd als output van een elektromagnetische transiënten programma.

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

J. Hoeffelman, J. Rimez – Elia

Samenvatting:

Geomagnetische stromen zijn langzaam variërende geïnduceerde stromen die door de aardkorst lopen. Hoogspanningsnetten, door hun lagere equivalente resistiviteit, kunnen deze stromen deels overnemen via de geaarde nulpuntsaansluitingen van de vermogentransformatoren. Ernstige gevolgen die zich elders ter wereld hebben voorgedaan – interne hotspots, onherstelbare beschadiging van het isolatiesysteem, netinstorting door een te grote opname van reactief vermogen – worden voor het Belgische net echter niet verwacht. Toch worden ook hier nadelige effecten waargenomen. Door asymmetrische magnetisatie van de kern verhoogt het transformatorgeluid. Daarom worden strategische transformatoren uitgerust met systemen om deze DC of trage AC stromen te blokkeren. Elia voert ook langdurige metingen uit om de correlatie na te gaan tussen de zonneactiviteit en het binnendringen van deze lage homopolaire stromen in het hoogspanningsnet.

BIV-Prijs:

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

Samenvatting:

Vandaag vereisen de uitdagingen van duurzame ontwikkeling het herzien van alle parameters van het architectonisch ontwerp. Volgens het Internationaal Energie Agentschap werd in 2005 19% van de wereldproductie van elektriciteit aangewend voor verlichting. We weten dat de natuurlijke fotonen heel wat meer voordelen bieden dan het zachtblauwe licht van de fluorescentielampen of dan de slechte kleurweergave van de LEDs. Natuurlijke verlichting is dus één van de aspecten die in aanmerking komen om de uitdagingen van duurzame ontwikkeling aan te pakken.

Daar komt nog de menselijke dimensie van natuurlijk licht bij, als welzijnsfactor en als factor van sociale cohesie, omdat het wordt geassocieerd met het concept "licht-ruimte". Het is niet alleen een kwestie van meer natuurlijk licht opvangen, maar ook van dat licht te verspreiden doorheen de ruimtelijke dimensie. Door onvoldoende kennis en gegevens houden de benaderingen die toelaten het verlichtingsniveau van een gebouw te simuleren, te weinig rekening met de ruimtelijke en menselijke kwaliteiten die natuurlijk licht kan meebrengen. Dit onderzoek heeft tot doel de link tussen natuurlijke verlichting en architectonisch ontwerp onder woorden te brengen door het analyseren van de belangrijkste voorbeelden van de architectuur. Daarom worden bibliotheken van de Finse modernistische architect Alvar Aalto, gelegen op een noord-zuid-as, van Duitsland naar Fins Lapland [fig. 1] in detail bestudeerd. Ze worden gekenmerkt door sfeervolle verlichting van hoge kwaliteit, ondanks het lage zonlicht op deze breedtegraden. Het

subtiel spel van direct en indirect licht installeert virtuele grenzen door het creëren van volwaardige statische en dynamische ruimtes, locaties gunstig voor activiteiten en ontmoetingen tussen generaties onder het licht. Voor het eerst werden de lichtniveaus uitvoerig gemeten in een classificatie van gebouwen van Alvar Aalto, bekend om zijn beheersing van ruimte en licht. Deze aanpak maakt het mogelijk het ontwerp van efficiënte lichtopnameapparaten te overwegen, zowel kwantitatief als kwalitatief, en blijkt ook een goed uitgangspunt te zijn voor “lichtruimte”-analyses.