



20_PROJET_HEI4ESEA0910

PROJET HEI4 ESEA

Année Universitaire 2009/2010

Projet N° 2010/ Sujet N°20

COMMANDITAIRE

RTE

SUJET

Utilisation de l'effet Corona dans le cadre de la surveillance et de la maintenance préventive des Réseaux HTB (Transport d'Electricité).

RESUME

Réalisation d'un document de référence

- Décrivant de manière précise les caractéristiques physiques et électriques de l'effet Corona et ses effets sur des installations dimensionnées pour le transport d'Electricité.
- Faisant un état de l'art (*référentiel documentaire, retour d'expérience sur les pratiques des opérateurs de Réseaux HTB dans le monde*) sur la mise en œuvre d'outils de mesure/surveillance et les méthodes de maintenance des installations HTB basés sur l'effet Corona.
- Proposant une méthodologie, les moyens techniques et un plan d'action de maintenance préventive des réseaux de Transport en France, utilisant ce phénomène.

ELEVES INGENIEURS HEI

Sébastien DUFOUR (ESEA) ; Marc-Antoine DUFOUR (ESEA)

SUIVI

Superviseur(s) : Bernard HURBIN (RTE) ; Stéphane BOIS (RTE)

Résumé



HAUTES ETUDES D'INGENIEUR

Domaine Energies, Systèmes Electriques et Automatisés

Résumé

L'objet de ce travail de recherche était d'étudier l'utilisation de l'effet couronne dans le cadre de la surveillance et de la maintenance préventive des réseaux de transport HTB.

Il regroupe un travail d'une durée de cinq mois réalisant une description et une analyse approfondie de l'effet couronne et de ses conséquences technologiques et environnementales sur les ouvrages aériens des réseaux HTB.

Il effectue également un état de l'art des moyens utilisés dans d'autres pays pour réaliser une maintenance conditionnelle sur le réseau électrique en utilisant l'effet couronne. Puis ce projet propose différentes solutions applicables en France afin de mettre en place un système de maintenance similaire.

L'effet couronne est un phénomène d'ionisation de l'air situé autour d'un objet porté à un fort potentiel cela provoque l'apparition de différentes manifestations telles qu'une gaine bleuâtre autour de l'objet, l'apparition d'un grésillement ou le dégagement de composés polluants.

Ce phénomène capacitif permet également une visualisation de défauts n'étant pas liés aux pertes par effet joule. C'est pourquoi une utilisation de celui-ci peut se révéler intéressante afin de rendre compte de l'état d'usure des composants du réseau.

Nous avons donc répertorié les différentes techniques employées dans les autres pays afin d'utiliser les pertes par effet couronne dans le but de prévenir d'éventuelles défaillances sur le réseau. Ceci nous a ensuite conduit à justifier le bien fondé de la mise en place d'un système similaire en France puis à la proposition de différentes solutions afin de permettre l'implantation d'un moyen de maintenance semblable dans notre pays.

Abstract

**HAUTES ETUDES D'INGENIEUR**

Domaine Energies, Systèmes Electriques et Automatisés

Abstract

Our project of studies and research is untitled: using of the corona effect under the surveillance and preventive maintenance of ultra high voltage transport network.

It includes a five months work conducting a description and analysis of corona effect and its technological and environmental effects on ultra high voltage air network.

It also carries a state of the art of methods used in other countries to conduct a preventive maintenance using the corona effect on the grid. Then, this project offers different solutions for France in order to implement a similar maintenance system.

The corona effect is a phenomenon of ionization of the air located around an object raised to a potential that causes the emergence of different phenomena such as a blue sheath around the object, the appearance of crackling or the release of polluting compounds.

This also allows a display of capacitive defects which are not related to losses by Joule effect.

Therefore, using of this display may be interesting to account for the wear of network components.

We conducted a state of the art of techniques used in other countries to use the losses by corona effect in order to prevent possible failures in the network.

This then leads us to the proposal of different solutions and to develop an action plan to help the implement of a similar means of maintaining in our country.



Projet HEI4 ESEA
RTE Nord-Est
Année Universitaire
2009/2010



Utilisation de l'effet Corona dans le cadre de la surveillance et de la maintenance préventive des Réseaux HTB (Transport d'Electricité)

Contexte de l'étude

Travail réalisé en binôme sur une durée de 5 mois et supervisé par un intervenant de RTE et un professeur de l'école.

Objectifs visés

La finalité est de faire un état des lieux des méthodes de maintenance préventive et des outils de surveillance, mis en œuvre par les opérateurs de Réseaux de Transport d'Electricité, dans le monde et s'appuyant sur l'observation de l'effet Couronne (Corona) particulièrement présent sur les ouvrages aériens des réseaux HTB.

Travail réalisé

Réalisation d'un document de référence :

- Décrivant de manière précise les caractéristiques physiques et électriques de l'effet Corona et ses effets sur des installations dimensionnées pour le transport d'Electricité.
- Faisant un état de l'art (*référentiel documentaire, retour d'expérience sur les pratiques des opérateurs de Réseaux HTB dans le monde*) sur la mise en œuvre d'outils de mesure/surveillance et les méthodes de maintenance des installations HTB basés sur l'effet Corona.
- Proposant une méthodologie, les moyens techniques et un plan d'action de maintenance préventive des réseaux de Transport en France, utilisant ce phénomène.

Points particuliers exemples Déroulement, Méthodologie utilisée, Techniques ou Technologies employées.

Une particularité appréciable de ce sujet a été sa complétude. Nous avons du effectuer un long travail de recherche et de compréhension du phénomène d'effet couronne, pour en suite nous intéresser à l'intérêt qu'il peut avoir dans la maintenance préventive. Et ce n'est qu'après ces phases d'étude que nous avons pu nous plonger dans les parties concrètes et commerciales de notre projet qui ont été l'étude du marché des détecteurs d'effet couronne et la comparaison de leur rentabilité et de leur fiabilité, ainsi que la prise de contact avec les fournisseurs et leur mise en relation avec RTE.

Bilan pour l'entreprise

Bilan pour les étudiants

Ce projet fut très enrichissant sur différents points. Nous avons acquis des connaissances et des compétences techniques dans le domaine de la haute et très haute tension. Nous avons découvert le principe de RTE, qui est d'utiliser les technologies les plus performantes, afin de garantir la sûreté de ses installations. Ce projet a également été pour nous l'occasion de nous intéresser à un marché sur le plan international, et de ce fait de rentrer en contact avec des entreprises du monde entier.

Etude réalisée par
Sébastien DUFOUR
Marc-Antoine DUFOUR

Etude supervisée à HEI par
Arnaud DAVIGNY

Etude suivie en entreprise par
Bernard HURBIN
Stéphane BOIS

Remerciements

Nous souhaitons remercier Messieurs Bernard HURBIN et Stéphane BOIS nos maîtres de stage et correspondants chez RTE pour l'aide qu'ils nous ont apportée et les conseils qu'ils nous ont donnés pendant la période durant laquelle ils nous ont supervisés.

Notre gratitude va également à Monsieur Arnaud DAVIGNY notre professeur responsable et responsable de domaine pour le temps qu'il a bien voulu nous consacrer.

Nous désirons remercier particulièrement Monsieur Jean-Christophe ERNOUX pour l'aide précieuse qu'il a su nous apporter notamment pour nous avoir permis d'accéder à la proposition d'une solution concrète au problème qui était posé.

Nos remerciements sont également adressés à Messieurs Pierre CAMPAGNA et Adam CRICK, nos interlocuteurs respectifs des entreprises OFIL et SYMBION POWER, pour l'intérêt qu'ils ont portés à notre projet.

Finalement, nous remercions le personnel de l'école des Hautes Etudes d'Ingénieur et également toutes les personnes ayant contribué à l'avancement de ce travail d'étude et de recherche.

APPLICATION DE L'EFFET COURONNE DANS LA MAINTENANCE PREVENTIVE DES LIGNES HAUTE TENSION

Table des matières

Page de garde	1
Résumé.....	2
Abstract.....	3
Poster	4
Remerciements	5
Table des matières.....	6
INTRODUCTION.....	9
A) Notions élémentaires d'électricité.....	9
B) Le transport de l'énergie électrique.....	11
I. PRESENTATION DU PHENOMENE D'EFFET COURONNE.....	16
1) LES DIFFERENTS TYPES DE DECHARGES.....	16
A) L'influence du champs électrique.....	16
B) Le régime de décharges non autonomes.....	17
C) Le régime de décharges autonomes.....	18
2) L'IONISATION DE L'AIR, PRINCIPE EXPLIQUANT L'EFFET COURONNE.....	19
A) Observation élémentaire.....	19
B) Origine de l'ionisation gazeuse aux abords d'un conducteur.....	19
C) Les différents processus entraînant l'ionisation gazeuse.....	20
D) L'avalanche de Townsend.....	23
E) Les différents moyens de créer un effet couronne autour d'un conducteur électrique..	23
3) L'ETABLISSEMENT DE L'EFFET COURONNE AUTOUR D'UN CONDUCTEUR ELECTRIQUE SOUS DIFFERENTES POLARITES.....	25
A) Les causes d'une irrégularité du champ électromagnétique.....	25
B) L'établissement d'effet couronne en polarité négative.....	26
C) L'établissement d'effet couronne en polarité positive.....	27
D) L'établissement d'effet couronne en polarité alternative.....	30
E) Les causes de l'établissement de l'effet couronne autour d'un conducteur électrique réel.....	32

II.	LES CONSEQUENCES ENGENDREES PAR L'EFFET COURONNE.....	36
1)	PERTES ENGENDREES PAR EFFET COURONNE.....	36
A)	Généralités.....	36
B)	Calcul et estimation des pertes.....	37
2)	CONSEQUENCES DE L'EFFET COURONNE.....	42
A)	Perturbations radioélectriques.....	42
B)	Bruits acoustiques.....	43
C)	Vibrations mécaniques.....	44
D)	Dégagements gazeux.....	45
III.	LE FONCTIONNEMENT DES DISPOSITIFS UTILISANT L'EFFET COURONNE POUR UNE MAINTENANCE PREVENTIVE.....	48
1)	LA MAINTENANCE PREVENTIVE.....	48
A)	En quoi consiste la maintenance préventive.....	48
B)	Présentation des défauts rendant une telle maintenance nécessaire.....	49
C)	Protection environnementale.....	53
2)	PRESENTATION DES DIFFERENTES TECHNOLOGIES UTILISEES AFIN DE REPERER CES PERTES.....	54
A)	Le repérage via caméra infrarouge.....	54
B)	La détection ultrasonore.....	56
C)	La localisation par vision ultra-violette.....	59
3)	ETAT DE L'ART DE L'UTILISATION DES CAMERAS UV.....	63
A)	L'utilisation de caméra UV chez Bonneville Power Administration.....	63
B)	L'utilisation de camera UV chez Symbion Power.....	65
IV.	SOLUTION RETENUE ET PROPOSITION COMMERCIALE ADAPTEE.....	67
1)	LA CAMERA UV, SOLUTION RETENUE.....	67
A)	Les raisons pour lesquelles ce choix a été retenu.....	67
B)	Mode opératoire d'une inspection au sol.....	71
C)	Mode opératoire d'une inspection à bord d'un hélicoptère.....	72
2)	RENTABILITE DE CE CHOIX.....	73
A)	Les dépenses matérielles que peuvent engendrer une mauvaise maintenance préventive.....	73
B)	Les risques qu'une telle négligence peut entraîner.....	74
C)	La caméra UV, un investissement d'actualité pour RTE.....	75
3)	LES ENTREPRISES CONTACTEES.....	77
A)	L'entreprise Ofil : 	77
B)	Synergys Technologies : 	78
C)	L'entreprise Symbion Power : 	78
	CONCLUSION.....	80
	PERSPECTIVES.....	82
	BIBLIOGRAPHIE.....	84
	ANNEXES.....	86

« Il se montre des étoiles dans la mer et sur la terre. J'ai vu, la nuit, pendant les factions des sentinelles devant les retranchements, briller à la pointe des javelots des lueurs à la forme étoilée. Les étoiles se posent sur les antennes et sur d'autres parties des vaisseaux avec une espèce de son vocal, comme des oiseaux allant de place en place. Cette espèce d'étoile est dangereuse quand il n'en vient qu'une seule ; elle cause la submersion du bâtiment ; et si elle tombe dans la partie inférieure de la carène, elle y met le feu. Mais s'il en vient deux, l'augure en est favorable; elles annoncent une heureuse navigation : l'on prétend même que, survenant, elles mettent en fuite Hélène, c'est le nom de cette étoile funeste et menaçante. Aussi attribue-t-on cette apparition divine à Castor et à Pollux, et on les invoque comme les dieux de la mer. La tête de l'homme est quelquefois, pendant le soir, entourée de ces lueurs, et c'est un présage de grandes choses. La raison de tout cela est un mystère caché derrière la majesté de la nature. »

Pline l'Ancien (23 après J.-C., 79 après J.-C.), *Naturalis historia*, livre II.

INTRODUCTION.

L'effet Corona ou effet couronne se manifeste sous une forme connue depuis bien longtemps qu'est le Feu de Saint-Elme, un phénomène qui est visible sous forme de lueurs apparaissant aux extrémités des mâts des navires dans des conditions orageuses. Ce phénomène bien souvent rattaché au mystique a pourtant une explication bien rationnelle.

Tout d'abord notons que ces phénomènes nécessitent un champ électrique non uniforme pour se produire.

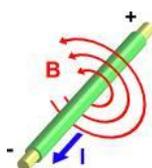
C'est cette variation du champ qui permet l'existence de décharges couronnes, au contraire dans un champ uniforme les tensions d'apparition de l'effet Corona conduiraient à un claquage complet de l'isolant séparant les deux conducteurs portés à des potentiels différents.

Pour bien comprendre ce phénomène d'effet Corona nous allons dans un premier temps rappeler certaines notions d'électricité élémentaire.

Il sera, ensuite intéressant de bien différencier les modes de transport de l'électricité à haute tension.

A) Notions élémentaires d'électricité.

Tous mouvements d'électrons (électricité) dans un conducteur (fil ou ligne par exemple) donnent naissance à un champ magnétique perpendiculaire au fil, formant des cercles concentriques proportionnels à l'intensité (I Ampérage) du courant qui traverse le conducteur.



Le courant qui circule dans les fils de lignes HT et THT est un courant alternatif.

C'est-à-dire, que pour une fréquence de 50 Hertz le courant change de signe 50 fois par seconde. Etant donné que le champ magnétique est directement lié au courant électrique, nous avons affaire également à un champ magnétique alternatif de fréquence 50 Hz (un champ magnétique pulsé).

Par conséquent, sous une ligne THT nous pourrions détecter un champ magnétique pulsé de fréquence 50Hz en France et Europe et 60 Hz aux Etats-Unis.

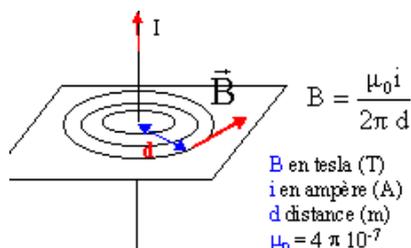
Dans un câble ou une ligne électrique le passage d'un courant engendre indubitablement un champ magnétique. Avec les courants continus, il se forme un champ magnétique statique linéaire, semblable au champ magnétique terrestre ; au voisinage des

lignes de transport de courant électrique alternatif par contre, les champs magnétiques formés sont alternatifs ou pulsés.

Nous savons que, placée dans un champ magnétique, une aiguille aimantée s'oriente suivant une direction et un sens particulier. Par exemple si nous déposons une boussole sur une table loin d'un aimant ou d'un objet de fer, l'aiguille va s'orienter dans le sens nord sud qui correspond aux lignes du champ magnétique terrestre. D'autre part, si nous approchons un aimant de l'aiguille de la boussole, l'aiguille s'orientera de façon différente et subira une action d'autant plus brutale qu'elle sera proche de l'aimant. Nous pouvons en déduire que le champ magnétique est plus intense près de l'aimant.

Pour décrire le champ magnétique, il nous faut donc une grandeur indiquant une direction, un sens et une intensité : ce sera une grandeur vectorielle de symbole $|\vec{B}|$. Le champ magnétique s'exprime dans le système international d'unités en Tesla (T) en hommage au physicien serbe Nicolas TESLA (1856-1943).

Le vecteur champ magnétique décroît au fur et à mesure que l'on s'éloigne du câble qui le produit lors du passage d'un courant. En un point A à une distance X d'un fil parcouru par un courant électrique il est possible de calculer le champ magnétique selon l'équation :



μ_0 : constante de perméabilité du vide.

I : intensité du courant qui circule dans le fil.

d : distance du point A du fil.

Comme nous venons de le voir un courant électrique produit un champ magnétique autour des lignes THT, mais il produit également un champ électrique proportionnel à la tension électrique (exprimé en volts) et perpendiculaire au champ magnétique nous pouvons maintenant parler de champ électromagnétique.

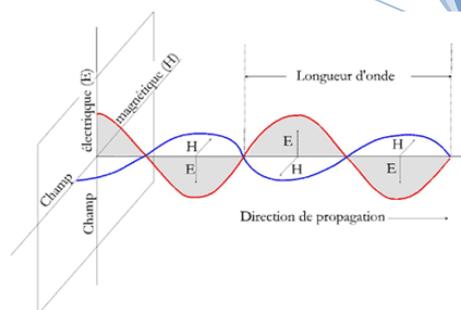
En effet, entre le sol et une ligne THT apparaît un champ électrique exprimé en volt par mètre. Le champ électrique est aussi une grandeur vectorielle de symbole $|\vec{E}|$ pour calculer sa valeur nous pouvons écrire :

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon d}$$

$\lambda = \frac{Q}{L}$: charge linéique en C.m⁻¹

Q étant la charge d'un portion (élément de longueur) du fil et L est la longueur de cette portion.

Le champ électrique, comme le champ magnétique est également un champ qui vibre à la fréquence de la tension de la ligne électrique qui l'engendre. Le champ électrique et le champ magnétique se propagent perpendiculairement entre eux et à la direction de propagation. A des fréquences très basses ces deux champs sont considérés séparément, à haute fréquence ils sont indissociables et sont appelés champ électromagnétique.



Ondes électromagnétiques

B) Le transport de l'énergie électrique.

Les lignes à haute tension sont utilisées pour transporter l'électricité de la centrale électrique jusqu'aux consommateurs. Ces lignes peuvent être aériennes, souterraines ou sous-marines, nous nous intéresserons plus particulièrement aux liaisons aériennes.

La haute tension est utilisée depuis 1882 à Munich mais quels sont ses avantages?

La haute tension devient avantageuse pour transporter de l'énergie électrique dans le sens où elle permet de réduire les chutes de tension en ligne, les pertes en ligne et le volume de métal conducteur utilisé.

Les pertes en ligne sont dues à l'effet Joule, aux pertes par effet couronne, et aux pertes dans les postes de transformation.

Les pertes joules (P), représentant la plus grande partie de ces pertes quand on considère tous les domaines de tension, elles dépendent de la résistance (R) et du courant transité (I), selon la relation :

$$P = R.I^2$$

A puissance transportée équivalente ($P = U.I$), la haute tension permet d'augmenter la tension (U) et ainsi de diminuer le courant et donc les pertes.

D'autre part, la résistance, dépend de la résistivité, qui est fonction du matériau utilisé et de la section du câble.

L'influence sur la quantité de métal conducteur utilisé est aussi très importante puisqu'en faisant passer moins de courant on a besoin d'une section de conducteur moins importante pour transporter la même puissance.

Par conséquent l'augmentation de la puissance ou de la longueur de la ligne conduira à une augmentation de la tension U si on veut garder la section de la ligne dans des valeurs réalistes et mécaniquement supportables.

Les causes des pertes par effet couronne sont la nature de la ligne, la tension à laquelle elle est portée, les conditions climatiques environnantes et l'état surfacique de la ligne.

Les pertes dans les postes de transformation (pertes en charge et pertes à vide des transformateurs, consommation des auxiliaires) sont presque constantes.

Les lignes à haute tension sont classées dans le domaine haute tension B, très haute tension et ultra haute tension. Ces domaines s'étendent de 50 kV à plus de 800 kV.

Ces différentes tensions sont utilisées à des fins spécifiques, ainsi les tensions allant de 63 à 90 kV sont utilisées pour de la distribution urbaine ou régionale, celles de l'ordre de 110 à 220 kV pour les échanges entre régions, et celles comprises entre 345 et 500 kV sont réservées aux grandes distances à savoir les principales interconnexions nationales et internationales. Dans des pays ayant un territoire plus vaste et donc des distances plus grandes à parcourir pour les lignes, des tensions plus hautes sont utilisées. Par exemple au Canada, on utilise du 735 kV, ou en Chine du 100 kV.

Intéressons nous dans un second temps aux différents composants utilisés dans le transport de l'électricité.

Les lignes aériennes reposent sur des pylônes fabriqués en treillis d'acier. Ils supportent et maintiennent les conducteurs à une distance suffisante du sol et des obstacles, d'une part pour des raisons de sécurité et d'autre part pour l'isolement par rapport à la terre. Les inconvénients de ceux-ci sont la pollution visuelle qu'ils engendrent, les conséquences sur l'avifaune en migration et leur exposition aux intempéries pouvant les endommager.

L'électricité est transportée en triphasée, en HTB pour une phase, les simples conducteurs sont remplacés par des faisceaux de conducteurs (de deux à quatre), cela permet de limiter les pertes et d'augmenter la puissance transitée.

Les câbles conducteurs des lignes aériennes à haute tension sont constitués d'un alliage d'aluminium, de magnésium et de silicium appelé Almélec. La résistivité de cet alliage est d'environ $32,5 \cdot 10^{-9} \Omega/m$, soit le double de celle du cuivre, mais d'autres caractéristiques lui sont plus favorables comme sa résistance mécanique, son poids ou encore son coût.

L'isolation entre chaque câble est réalisée par l'air dont la perméabilité est proche de celle du vide (μ_0).

L'isolation entre les conducteurs et les pylônes se fait par le biais d'isolateurs en verre, en céramique, ou en matériaux synthétiques. Ces isolateurs en forme d'assiette sont associés entre eux pour supporter des tensions importantes, ils forment ainsi des chaînes d'isolateurs.

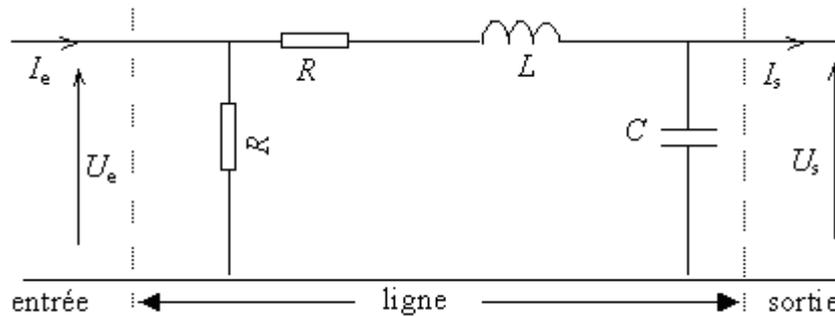
Plus la tension de la ligne est élevée, plus le nombre d'isolateurs dans la chaîne est important. Un isolateur en verre supporte une tension d'environ 20 kV, l'addition d'assiettes fait augmenter la tension supportable de façon linéaire.

L'une des causes les plus fréquentes de court-circuit sur les lignes haute tension est la rupture d'isolation due à une surtension causée par la foudre. Afin d'éviter que la foudre

ne s'abatte sur les lignes, des câbles de garde ne transportant pas de courant, situés au-dessus des conducteurs, jouent un rôle de paratonnerre.

Ces câbles sont également réalisés en Almélec. Cependant le coût de cet équipement fait qu'il n'est pas présent sur l'ensemble du réseau haute tension.

Une ligne électrique parfaite est assimilable à un fil d'impédance nulle. En réalité la ligne électrique est soumise à différents phénomènes, comme l'effet de peau (le courant circule uniquement en périphérie du conducteur en alternatif), l'hystérésis magnétique, les courants de Foucault, l'hystérésis diélectrique et l'effet couronne. On peut, en négligeant ces paramètres, représenter une ligne électrique ainsi :



Ce modèle constitue une approximation utilisable pour l'étude de lignes dont la longueur n'excède pas 300 km. Pour l'étude de lignes plus longues il suffira d'ajouter ces éléments de ligne.

La résistance effective d'un conducteur est définie par :

$$R = Pp/I^2 \quad \text{avec } Pp \text{ la puissance perdue lorsque le courant } I \text{ circule dans la ligne.}$$

$$R > R_{cc} \quad \text{avec} \quad R_{cc} = \rho * l / S$$

Avec l la longueur de la ligne, ρ la résistivité du matériau conducteur et S sa section.

La résistance dépend de la température : $R(T) = R(T_0) * (1 + \alpha(T - T_0))$ avec α le coefficient de variation de la résistance avec la température.

Comme précisé précédemment, le matériau utilisé pour transporter l'électricité à haute tension est l'Almélec, un alliage aluminium, magnésium et silicium, d'une résistivité de l'ordre de $32,5 \cdot 10^{-9} \Omega/m$.

On peut penser, à première vue, que la résistance linéique est inversement proportionnelle à la section du câble, cependant cette relation n'est plus exacte si on prend en compte l'effet de peau.

En effet le courant n'emprunte qu'une épaisseur réduite du conducteur située à sa périphérie lorsqu'il le traverse. Par conséquent, à la fréquence de 50 Hz, il est avantageux

d'utiliser deux conducteurs de 500 mm² en remplacement d'un de section 1000 mm² à cause de l'effet pelliculaire ou effet de peau.

La section d'une ligne à haute tension est de l'ordre de 500 mm² : il n'est pas avantageux d'utiliser une section de conducteurs plus grande.

D'autre part, les lignes de tension supérieure ou égale à 345 kV, sont portées à une tension linéique supérieure à 30kV/cm, à un tel niveau de tension les pertes par effet couronne deviennent assez importantes et la réponse technologique visant à réduire ces pertes est d'utiliser, non plus un conducteur par phase, mais des faisceaux de conducteurs, de section plus petite diminuant ainsi la quantité de matériau inutilisé dans le transport de l'énergie, et divisant par le nombre de faisceaux la tension linéique à laquelle aurait été porté un conducteur simple.

Pour les lignes à haute tension, les valeurs des résistances linéiques sont comprises entre 0,01 Ω/km (ligne 735 kV d'Hydro-Québec d'une section de 570 mm²) et 0,060 Ω/km (ligne 230 kV d'une section de 570 mm²). La norme américaine IEEE C37.06-1997 indique des valeurs allant de 0,012 Ω/km (800 kV) à 0,031 Ω/km (362 kV).

L'inductance linéique de la ligne dépend de la présence du sol, de sa conductivité, de la disposition des conducteurs entre eux et de l'effet de peau dans les conducteurs et dans le sol.

L'inductance dépend de l'effet mutuel entre les conducteurs des différentes phases, pour des lignes longues, dans le but d'équilibrer l'impédance des trois phases, les conducteurs permutent leur emplacement à un tiers et deux tiers de la ligne, cela équilibre l'influence de la terre.

La réactance linéique due à l'induction est comprises entre 0,418 Ω/km (ligne 230 kV d'une section de 570 mm²) et 0,270 Ω/km (ligne 400 kV d'une section de 570 mm²), donc nettement supérieure aux résistances linéiques.

La capacitance linéique dépend de la présence du sol et de la disposition des conducteurs entre eux.

Elle est proche de 229 000 Ω/km pour une ligne 400 kV d'une section de 570 mm² et de 368 000 Ω/km pour une ligne 230 kV d'une section de 570 mm².

Le champ électrique produit autour d'un conducteur est une des causes de l'effet couronne.

La seule solution pour diminuer cet effet a été de diminuer ce champ électrique.

Celui-ci s'exprime avec la formule de Gauss vue précédemment :

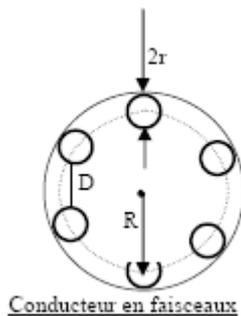
$$E_s = q / (2 * \pi * \epsilon * d)$$

Il est donc inversement proportionnel au diamètre du conducteur.

Cependant la réduction de la section du conducteur entraînerait une réduction de la tension à laquelle l'électricité serait transportée, ce qui est inenvisageable.

La solution adoptée est l'utilisation de faisceaux de conducteurs, une ligne d'un conducteur est remplacée par plusieurs faisceaux de diamètre bien inférieur. Cela a de multiples avantages :

- Diminuer le champ électrique est donc l'effet couronne.
- Diminuer la section des conducteurs et donc la contrainte mécanique à supporter par les pylônes.
- Diminuer la section et donc la quantité de matière de conducteur pour transporter l'énergie.
- Diminuer les pertes et donc transporter plus de puissance.
- Augmenter le rapport périmètre sur section des conducteurs et diminuer ainsi grandement l'effet de peau.



Conducteur en faisceaux :

$$R_{\text{éq}} = R \sqrt{\frac{nr}{R}} \text{ avec } D = 2R \sin \frac{\pi}{n}$$

avec n nombre de conducteurs ;

$R_{\text{éq}}$ rayon équivalent qu'aurait un conducteur central dans cette cellule.

I. PRESENTATION DU PHENOMENE D'EFFET COURONNE.

1) LES DIFFERENTS TYPES DE DECHARGES.

L'isolation par gaz est largement utilisée dans les équipements haute tension. La rigidité diélectrique de cette structure dépend des propriétés du gaz isolant, de sa pression, de sa température, de l'état de surface des conducteurs et des conditions météorologiques.

Le comportement de ce gaz isolant, face aux différentes contraintes auxquelles il est exposé et plus particulièrement aux décharges qui peuvent se développer à l'interface solide/gaz, au niveau de la surface des conducteurs, constitue l'un des principaux critères de dimensionnement des installations haute tension.

Par conséquent, la compréhension des mécanismes responsables de l'initiation et du développement des décharges, et plus particulièrement des décharges couronnes, à l'interface conducteur gaz isolant est primordiale.

A) L'influence du champ électrique.

Sous l'effet d'agents ionisants naturels ou artificiels, les gaz peuvent perdre leurs propriétés diélectriques et devenir plus ou moins conducteurs. Cette perte de propriétés appelée ionisation se traduit par la dissociation de molécules neutres en électrons et en ions.

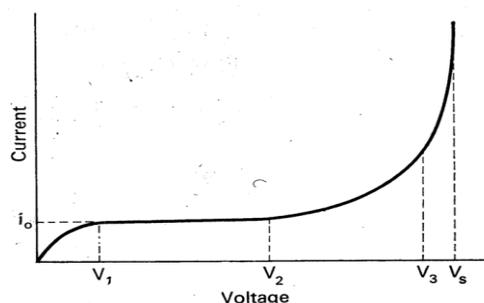
Les différents principes d'ionisation de l'air, y compris la collision électron-molécule neutre dont le chapitre suivant fait référence, seront abordés plus loin.

En l'absence de champ électrique, il existe un équilibre dans lequel le taux de production d'électrons et d'ions positifs est compensé.

En présence d'un champ électrique entre deux conducteurs portés à un potentiel différent, le nombre de porteurs de charges augmente et leur mouvement donne naissance à un courant ionique.

La variation de ce courant en fonction de la tension (caractéristique courant - tension) a été étudiée pour la première fois par Townsend.

La variation du courant d'ionisation en fonction de la tension appliquée à un intervalle de gaz comporte différentes zones correspondant chacune à un régime de décharges donné.



Caractéristiques courant – tension pour différents régimes de la décharge sous tension continue

Il convient toutefois de noter que la présence d'un champ électrique peut donner lieu, à une décharge de type non-autonome ou autonome selon la valeur du potentiel à laquelle est porté le conducteur.

B) Le régime de décharges non-autonomes.

Le régime de décharges non-autonomes, sans multiplication électronique est caractérisé par l'absence de tout phénomène lumineux et des courants extrêmement faibles.

Le champ électrique est trop faible pour provoquer une ionisation par collisions. L'air ne peut devenir conducteur qu'en présence d'une source extérieure assurant cette ionisation (rayons cosmiques, sources radioactives, émission photoélectrique).

La décharge ne pouvant s'entretenir d'elle-même, est dite " non-autonome ".

En augmentant progressivement la tension V , et donc le champ électrique dans l'air, le courant ionique croît linéairement jusqu'à une certaine valeur I_0 dite de saturation. Nous entrons dans la partie où les décharges sont encore non-autonomes mais où il y a multiplication électronique.

I_0 se maintiendra à cette valeur tant que V reste inférieur à la tension d'ionisation V_2 du gaz considéré. A ce stade, la décharge dépend encore des sources extérieures d'ionisation.

Le nombre de collisions est d'autant plus important que le champ électrique est intense. Il est caractérisé par un coefficient (ou pouvoir) d'ionisation α appelé "premier coefficient d'ionisation de Townsend".

Celui-ci représente le nombre moyen de chocs ionisants qu'un électron produit par unité de longueur dans la direction du champ.

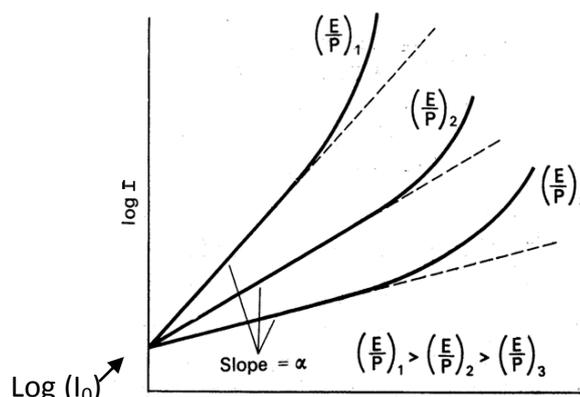
Le coefficient d'ionisation dépend de l'état dans lequel se trouve le gaz ainsi que de l'énergie des électrons. En d'autres termes, α dépend de l'intensité du champ électrique E , l'état du gaz est déterminé par sa pression et sa température. Or la température reste pratiquement constante lors de l'ionisation par les électrons car le transfert d'énergie vers l'air est trop faible. α ne dépendra finalement que de E et p .

La formule proposée par Townsend reliant le courant par unité de temps (I), le courant régnant dans l'air sous l'effet de la photoionisation (I_0), la distance entre le conducteur

considéré et un autre conducteur porté à un potentiel différent (a) et le premier coefficient d'ionisation de Townsend est :

$$\ln(I) = \ln(I_0) + \alpha \cdot a$$

Les courbes logarithmiques du courant en fonction de la distance séparant ce conducteur et un autre sont des droites de pentes α .



Variation du courant en fonction de la distance inter électrode

C) Le régime de décharges autonomes.

Dès que V dépasse V_2 , le courant se remet à croître de façon très rapide, la décharge dans ce cas devient autonome.

Si $(e^{\alpha \cdot a})$ est le nombre d'électrons libres produits par un électron dans une avalanche de longueur a, $(e^{\alpha \cdot a} - 1)$ est le nombre d'ions positifs produits simultanément.

Le nombre d'électrons présent dans l'air séparant notre conducteur d'un autre est noté (Nc). Ils donnent naissance à $Nc \cdot (e^{\alpha \cdot a} - 1)$ ions positifs, qui entraînent à leur tour la libération d'électrons bombardant à leur tour la cathode, cela libèrent $Nc \cdot (e^{\alpha \cdot a} - 1) \cdot \gamma$ électrons supplémentaires en faisant intervenir un nouveau coefficient d'ionisation γ , le "deuxième coefficient d'ionisation de Townsend".

La condition de décharges autonomes pour un gaz donné à température constante est:

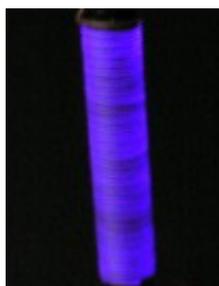
$$\gamma(e^{\alpha a} - 1) > 1$$

Les décharges couronnes visibles sont autonomes, c'est donc de ce type de décharges qu'il sera question par la suite.

2) L'IONISATION DE L'AIR, PRINCIPE EXPLIQUANT L'EFFET COURONNE.

A) Observation élémentaire.

L'effet Corona, à proprement parler, est l'ionisation de l'air à proximité d'un conducteur électrique quand celui-ci est porté à une tension supérieure à une valeur critique. Ce phénomène est visible sous forme d'un halo lumineux de couleur bleuâtre apparaissant à la périphérie du conducteur dans le cas idéal :



Effet couronne sur une bobine portée à haut potentiel.

Cette ionisation peut se produire dans des conditions naturelles sous forme de Feux de Saint-Elme, comme rappelé précédemment. Dans ce cas l'ionisation de l'air est due au champ électrique généré par les charges électriques d'un nuage orageux allié à un principe détaillé par la suite, appelé le pouvoir des pointes. Il se forme alors, au sommet de toutes les pointes ou aspérités, tels que les mâts des navires, des décharges électriques communément appelées aigrettes ou effluves.



Dessin représentant des Feux de Saint-Elme aux sommets des mats d'un navire.

Intéressons nous alors à l'origine de cette ionisation gazeuse rendant l'air conducteur et entraînant ce halo de lumière.

B) Origine de l'ionisation gazeuse aux abords d'un conducteur.

Du fait de la radioactivité naturelle et du rayonnement cosmique l'air comporte des ions positifs ainsi que des électrons libres. Les radiations naturelles libèrent entre 7 et 20 électrons libres par cm^3 par seconde à la surface du sol.

Ces électrons sont, en partie, à l'origine de l'ionisation de l'air responsable de l'effet Corona.

Il existe cependant différents moyens d'ioniser l'air avoisinant un conducteur.

Un conducteur électrique parcouru par un courant crée un champ électromagnétique, dans lequel l'air qui l'entoure est immergé. Ce champ confère à l'air une certaine quantité d'énergie, proportionnelle à l'intensité du champ électromagnétique, et donc à la tension à laquelle le conducteur est porté.

L'atome d'air ayant absorbé cette énergie voit :

- Soit son énergie cinétique augmenter.
- Soit un ou plusieurs de ses électrons migrer vers un niveau énergétique supérieur, il devient excité.
- Soit son état de gaz neutre devenir gaz ionisé.
- Soit cette énergie être échangée avec d'autres atomes sous forme d'électrons.

Nous nous intéresserons aux différents processus conduisant à l'ionisation des particules d'air neutres.

Ces différents processus sont la collision électron-molécule neutre, la photoionisation, la collision ion positif-molécule neutre et la formation d'ion négatif. Nous développerons ces différentes méthodes dans cet ordre.

C) Les différents processus entraînant l'ionisation gazeuse.

- La collision entre électrons et molécules neutres.

L'énergie qu'absorbent les particules de l'air quand elles sont dans le champ électromagnétique peut devenir de l'énergie cinétique. Lorsque cette particule est un électron, cette augmentation de son énergie cinétique lui donne une vitesse assez grande étant donné sa faible masse.

Cet électron va donc se déplacer rapidement et indubitablement entrer en collision avec d'autres électrons, leur donnant à leur tour une grande énergie cinétique et donc plus de vitesse.

L'électron va également rencontrer des molécules. Etant donné la grande différence de masse entre ces deux particules, la plupart de ces chocs sont de nature élastique et ne font qu'augmenter l'énergie cinétique de l'électron. Mais quand celui-ci a acquis une assez grande vitesse, après plusieurs chocs élastiques, un choc avec une molécule neutre va ioniser ou exciter cette molécule.

La capacité qu'ont les électrons à accumuler de l'énergie cinétique résultant de plusieurs chocs élastiques consécutifs, fait qu'une ionisation par collisions entre électron et molécule peut se réaliser sous un champ électromagnétique relativement faible.

D'après Loeb, dans des conditions normales de pression et de température la tension critique, valeur à laquelle démarre l'ionisation de l'air par collision électron-molécules, est de 15 kV/cm.

- La photoionisation.

Cette théorie, émise par L. B. Loeb et J. M. Meek, repose sur le fait que les molécules neutres de l'air captent de l'énergie émise sous forme de radiations par le soleil. Cette énergie radiante est proportionnelle à la fréquence des photons émis par la source de lumière, dans notre cas le soleil. En captant l'énergie solaire émise par radiation les molécules d'azote, entre autre, vont passer à un état excité.

Dans l'air, une molécule d'azote excitée émet des photons ayant une énergie supérieure à 13 eV et le potentiel d'ionisation de l'oxygène est de 12,2 eV.

Aux vues des niveaux d'énergie nous pouvons en conclure qu'il existe une photoionisation dans l'air.

Ce phénomène n'est pas responsable à lui seul de la création d'effet couronne mais l'énergie qu'il fournit aux molécules favorise leur ionisation lorsqu'elles sont soumises à un champ électromagnétique. D'autre part, seul ce phénomène explique la propagation d'aigrettes assez loin du conducteur, où l'intensité du champ électromagnétique est plus faible.

- La collision entre ions positifs et molécules neutres.

L'énergie cinétique, engendrée par un champ électromagnétique, se transmet également aux ions positifs baignant dans ce champ, leur conférant ainsi une certaine vitesse. Etant donné que leur masse est comparable à celle des molécules neutres de l'air, une collision avec celles-ci ne sera pas élastique, mais aboutira directement à l'ionisation de ces molécules.

L'énergie cinétique que va transmettre cet ion positif à une molécule neutre sera acquise sur une distance d'un libre parcours uniquement, contrairement à un électron pouvant accumuler l'énergie cinétique de plusieurs libres parcours consécutifs avant d'ioniser une molécule. Cette impossibilité d'effectuer des chocs élastiques fait que la tension critique d'un conducteur, entraînant l'ionisation par collision entre ions positifs et molécules neutres dans l'air avoisinant, est de 1000 kV/cm selon Loeb.

- La formation d'ions négatifs.

L'air est un gaz électronégatif, les ions négatifs y constituent une forme stable de transporteurs de charges négatives.

Il y a deux ionisations différentes possibles :

- L'ionisation moléculaire : (attachement direct) $O_2 + O_2 + e + (0,3 \text{ eV}) \rightarrow O_2^- + O_2$
- L'ionisation atomique : (dissociation) $O_2 + e + 3,67 \text{ eV} \rightarrow O^- + O$

Ce phénomène n'est pas responsable d'une ionisation à proprement parler, mais il fournit un grand nombre d'électrons qui vont ensuite entrer en jeu dans ces différentes ionisations.

- Les phénomènes de surface.

Des électrons peuvent être émis de la surface d'un conducteur métallique et participer à la conduction du gaz avoisinant. L'extraction de ces électrons se fait sous l'effet d'un saut de potentiel, celui-ci peut être causé par un champ électrique.

L'ionisation de l'air avoisinant un conducteur électrique, est donc en partie réalisée par le passage d'électrons métalliques dans l'air sous l'effet du champ électrique engendré par la circulation du courant.

Ce phénomène de surface peut être accentué par un principe appelé le pouvoir des pointes.

Afin de bien comprendre ce principe il est important d'introduire le terme de rayon de courbure.

Le rayon de courbure est l'inverse de la courbure, une mesure quantitative du caractère plus ou moins courbé d'un objet. Le rayon de courbure d'une droite est infini (les portions de cercles de rayon se rapprochant de l'infini ressemblent de plus en plus à des droites).

Le pouvoir des pointes, ou effet de pointes, est un principe selon lequel, en considérant une pointe comme une boule de diamètre infiniment petit, donc à faible rayon de courbure, le champ électromagnétique créé au voisinage de cette pointe a une valeur qui tend vers l'infini.

Pour illustrer le pouvoir des pointes nous pouvons prendre l'exemple de deux boules de rayon respectif r et $2r$. Nous allons porter ces deux boules à la même tension. La charge de chaque boule est donnée par cette relation :

$$q_e = V * 4\pi\epsilon_0 r$$

Nous remarquons donc que la boule de rayon $2r$ (q_2) est deux fois plus grande que celle de la boule de rayon r (q_1). Le champ électrique de chaque boule est donné par cette relation :

$$E = \frac{q_e}{4\pi\epsilon_0 d^2}$$

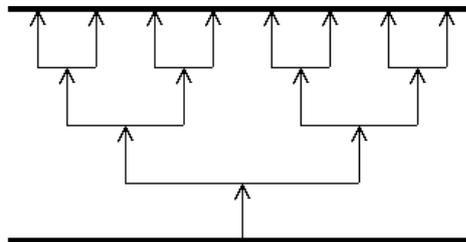
q_1 est deux fois plus petite que q_2 donc E_1 est deux fois plus petit qu' E_2 . Cependant r_1 étant deux fois inférieur à r_2 la distance d_1 entrant en compte dans la formule de E est deux fois plus petit que d_2 . Finalement nous avons donc un champ électrique autour de la petite boule E_1 deux fois plus grand que celui de la grosse boule E_2 .

Ce champ électrique décuplé à cause de ce principe va contribuer à l'ionisation de l'air par contact électron-molécule neutre.

Cette ionisation de l'air est initialisée par ces différents processus et se propage par effet d'avalanche dit avalanche de Townsend.

D) L'avalanche de Townsend.

L'avalanche de Townsend est le fait que l'ionisation des molécules neutres de l'air provoque la création de nouveaux électrons libres. Ceux-ci, soumis au même champ, vont également ioniser des molécules, et ainsi de suite.



Avalanche de Townsend entre deux électrodes.

La propagation d'une telle avalanche nécessite deux choses :

- Qu'elle ait atteint une taille critique.
- Que la valeur du champ électromagnétique soit suffisante.

Dans des conditions normales de pression et de température cette valeur du champ est de 30 kV/cm. Ce champ est appelé champ critique, le calcul de ce champ sera détaillé ultérieurement, par le biais de la formule de Peek.

E) Les différents moyens de créer un effet couronne autour d'un conducteur électrique.

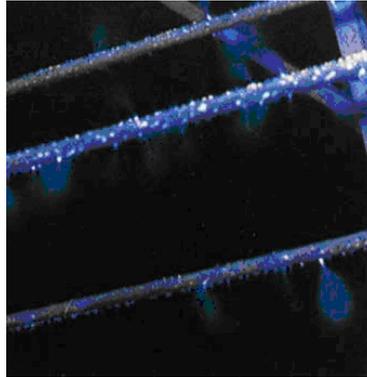
Il existe donc de multiples moyens d'ioniser l'air, dans le cas de l'effet couronne les processus les plus actifs sont :

- l'impact électron-molécule : sous l'effet d'un champ électrique des électrons de l'air accélèrent et acquièrent ainsi de l'énergie cinétique qu'ils cèdent aux molécules qu'ils heurtent, provoquant ainsi leur ionisation.
- la photoionisation : ionisation des molécules d'oxygène par les photons émis par des molécules excitées d'azote.
- les phénomènes de surface : transfert d'électrons métalliques à l'air avoisinant avec une certaine vitesse, provoquant ainsi une ionisation par impact électron-molécule.

Un conducteur produit un champ électromagnétique qui diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne de celui-ci, ce champ est donc non-uniforme. Il se produit donc une ionisation là où le champ est porté à une intensité supérieure à 30 kV/cm.

Nous avons vu précédemment que le rayon de courbure directement lié à l'état de la surface du conducteur influait grandement sur la valeur de ce champ par le pouvoir des pointes.

C'est pour ces deux raisons que l'effet couronne apparaît sous cette forme à la périphérie d'un conducteur :



Décharges couronne produites sur des conducteurs non lisses

3) L'ETABLISSEMENT DE L'EFFET COURONNE AROUND D'UN CONDUCTEUR ELECTRIQUE SOUS DIFFERENTES POLARITES.

A) Les causes d'une irrégularité du champ électromagnétique.

L'effet couronne tient son nom de la couronne lumineuse bleuâtre qui apparaît autour d'un fil de faible diamètre lorsqu'il est porté à une tension supérieure à sa tension critique.

Ce phénomène s'éloigne un peu du nom que l'on lui a attribué lorsque l'étude se porte non plus sur des fils mais sur des lignes électriques. Cette gaine lumineuse uniforme n'est plus retrouvée. L'effet couronne se manifeste sous la forme de pics lumineux localisés appelés aigrettes.

Cette irrégularité et discontinuité de l'effet couronne sur une ligne électrique a de multiples raisons.

La cause principale est bien sûr la tension qui est alternative et donc entraîne une variation constante du champ électrique entourant le conducteur.

Il existe également d'autres causes de cette irrégularité de l'effet couronne. Nous avons vu précédemment que l'ionisation de l'air avoisinant un conducteur était fonction du champ électromagnétique dégagé par celui-ci et que ce champ variait grandement selon l'état de surface du conducteur par l'effet de pointes.

Les lignes électriques voient leur surface devenir irrégulières à cause de différentes raisons, celles-ci diminuent plus ou moins leur rayon de courbure et donc plus ou moins l'effet couronne. Parmi ces causes figurent :

- Un détournement de certains brins de la ligne.
- Une modification de la pression ou de l'humidité de l'air environnant.
- De mauvaises conditions météorologiques.
- Des éraflures dues au transport ou à la pose.
- Le dépôt de poussière végétale, de pollution industrielle et de petits insectes.

Nous reviendrons plus tard sur ces causes qui bien que secondaires restent très importantes et peuvent diminuer considérablement la valeur de la tension critique, à partir de laquelle apparaissent des aigrettes.

La discontinuité de l'effet couronne est bien due au fait que le niveau de tension varie à fréquence régulière lors du transport du courant dans les conducteurs. Il sera donc intéressant dans un premier temps de détailler l'apparition de l'effet Corona pour ces deux polarités différentes.

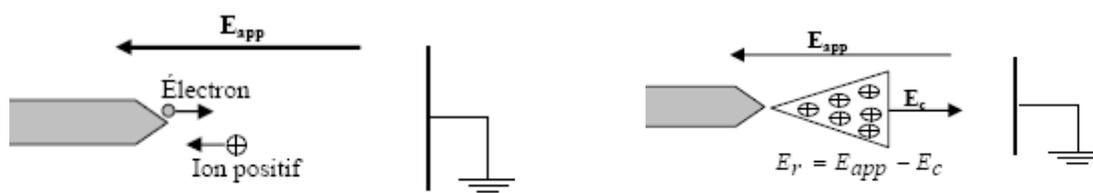
B) L'établissement d'effet couronne en polarité négative.

Nous allons tout d'abord nous intéresser à la nature du courant qui va susciter cet effet couronne alors que le conducteur autour duquel il va se créer est porté à une tension négative.

Les électrons vont engendrer l'ionisation de l'air, ou du gaz électronégatif, qui l'entoure, selon les principes développés précédemment, dès lors que le conducteur est porté à une tension supérieure à la tension critique. Ainsi le courant électrique devient dans l'air un courant ionique, provoquant une avalanche de Townsend.

Cette avalanche se développe depuis le conducteur vers l'extérieur et se stoppe à une distance limite, où le champ électromagnétique et l'effet de photoionisation ne sont plus suffisants pour assurer l'effet multiplicateur.

Expliquons succinctement la notion de charge d'espace. Dans une avalanche, les électrons forment un nuage négatif qui s'éloigne rapidement du conducteur, repoussé par sa polarité alors que les ions positifs restent pratiquement immobiles en raison de leur faible mobilité. La pression environnante influe directement sur la charge d'espace (E_c), celle-ci s'oppose au champ électromagnétique appliqué (E_{app}) en polarité négative, c'est pourquoi l'effet couronne (E_r) se déroule dans un champ décroissant.



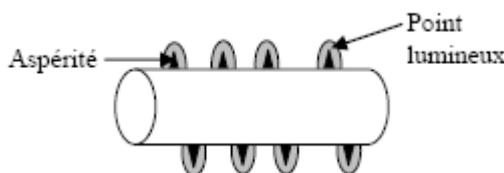
Ionisation au niveau d'une aspérité d'un conducteur en polarité négative

Champ de l'effet couronne.

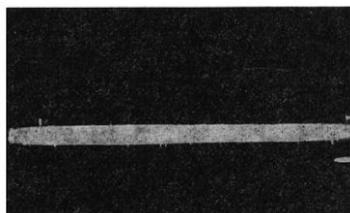
L'aspect lumineux se limite donc à une couronne d'une épaisseur propre quand le conducteur est porté à une tension supérieure à la tension critique, et si on considère un conducteur ayant une surface de rayon de courbure infini.



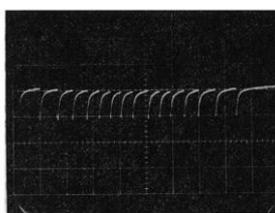
Dans le cas où la tension est inférieure à cette valeur et que les aspérités en surface du conducteur augmentent la valeur du champ électrique, par effet de pointe. Ceci jusqu'à ce qu'il provoque l'ionisation de l'air soumis à ce champ, alors l'aspect lumineux créé prend la forme de points lumineux au niveau de ces aspérités ou, sous plus forte intensité, de cônes lumineux dont le sommet est posé sur l'irrégularité.



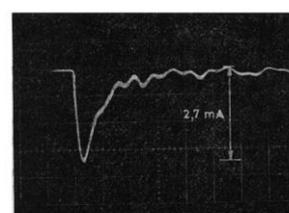
Ces aigrettes en polarité négative ont une amplitude relativement faible, de l'ordre du milliampère et des fréquences de relaxation grandes et régulières, comprises entre 2 et 50 MHz. Ces impulsions sont d'autant plus petites et rapprochées que le rayon de courbure du conducteur à l'endroit de l'effet est faible. Ces aigrettes sont appelées impulsions de Trichel, elles sont caractérisées par des fronts de montée très raides, d'une durée de l'ordre de la dizaine de nanosecondes.



*Impulsions de Trichel
(aigrettes négatives)*



*train d'impulsions
(vitesse de balayage : 0,2
ms/carreau)*



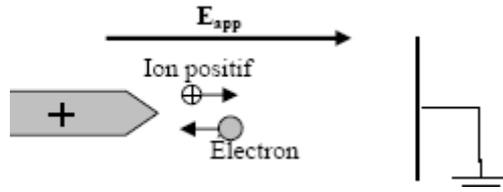
*détail d'une impulsion
(vitesse de balayage : 50
ns/carreau)*

Quand le conducteur est élevé à une tension plus forte en polarité négative, les charges d'espace s'accumulent et les impulsions de Trichel, effet couronne partiel et intermittent, sont remplacées par un effet couronne continu. On observe ainsi un autre mode d'effet Corona : la lueur négative. Si la tension est encore plus élevée il peut y avoir l'apparition d'effluves négatives mais c'est peu probable sur des lignes haute tension.

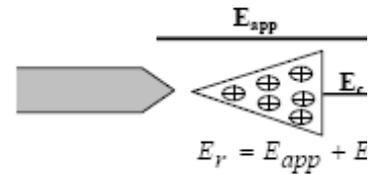
C) L'établissement d'effet couronne en polarité positive.

En polarité positive, à une tension faible, des impulsions de courant faible se manifestent au niveau des irrégularités. A ces impulsions s'ajoutent des streamers préliminaires s'étendant loin de la pointe.

Dans le cas où le conducteur électrique est porté à une tension positive supérieure, en valeur absolue, à la tension critique, ce sont les ions positifs traversant le conducteur qui créent un courant ionique. En polarité positive le champ de la charge d'espace à même sens que le champ électromagnétique. Par conséquent le processus d'ionisation s'étend bien plus loin que les avalanches sous une tension négative autour du conducteur. Ce prolongement de l'ionisation est dû au fait que l'avalanche de Townsend débute dans l'air, où le gaz électronégatif, avoisinant le conducteur et non plus dans le conducteur lui-même. Cette avalanche se développe ensuite vers le conducteur puisque sa charge positive attire les électrons de l'air aux endroits où le champ électromagnétique est le plus fort, c'est-à-dire au niveau des aspérités et défauts de surface du conducteur. Les électrons sont donc absorbés par le conducteur ce qui laisse dans l'air, à la verticale de ces défauts de surface un nuage d'ions positifs très peu mobile. Ce phénomène s'apparente à une prolongation radiale du conducteur par un pic de polarité positive créant ensuite une nouvelle avalanche à sa périphérie, l'effet couronne se développe dans un champ croissant. Cette succession d'avalanches explique la prolongation du processus d'ionisation à des distances plus importantes que pour une tension négative.

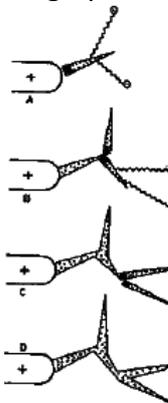


ionisation au niveau d'une aspérité d'un conducteur en polarité positive



Champ de l'effet couronne.

Ces pics de polarité positive peuvent se développer à intervalles réguliers autour du conducteur lorsque celui-ci est porté à une tension supérieure à la tension critique. Ces pics ont l'apparence de longs filaments et forment dans ce cas une décharge-brosse ou décharge-plume.



Développement schématique d'un effluve positive



Avalanche : électrons et ions positifs



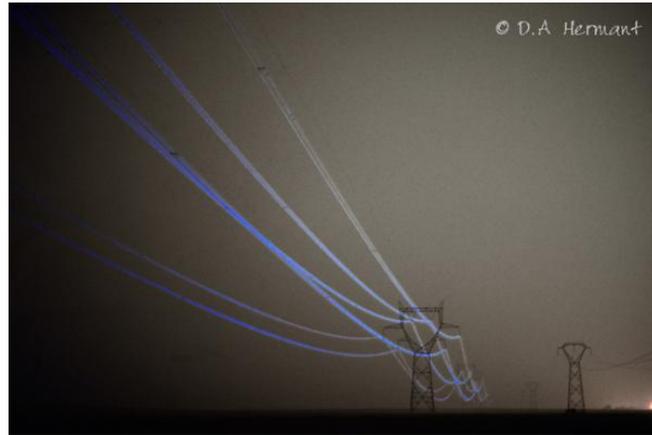
photon



Electron produit par photoionisation

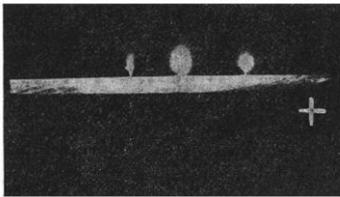
Quand la tension à laquelle est porté le conducteur est encore augmentée il apparaît la lueur d'Hermstein. Cette lueur stable est obtenue pour un intervalle de tension assez grand et est la principale responsable des pertes dues à l'effet couronne. Cette lueur apparaît lors d'un régime parfaitement stabilisé dans lequel subsiste un courant continu, sans impulsion ; cette région est appelée zone de conductivité d'Hermstein ;

Cette zone d'Hermstein apparaît comme une couronne lumineuse entourant le conducteur.

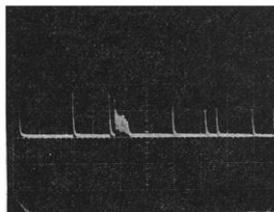


La lueur d'Hermstein est le principal responsable de l'effet couronne.

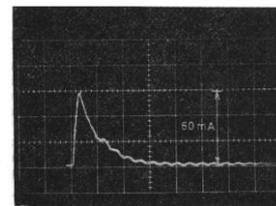
Lorsque le conducteur est soumis à une tension encore supérieure des pics de polarité positive se forment, ils sont appelés streamers. Ces effluves positives ne sont pas très différentes de celles apparues à une tension plus basse hormis qu'elles sont beaucoup plus longues et plus puissantes.



Streamers (aigrettes positives) à la surface d'un conducteur toronné



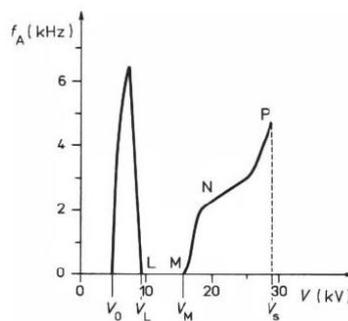
train d'impulsions (vitesse de balayage : 0,2 ms/carreau)



détail d'une impulsion (vitesse de balayage : 200 ns/carreau)

Ces streamers sont des aigrettes très lumineuses, se propageant comme une arborescence en partant d'une aspérité jusqu'à plusieurs centimètres.

L'humidité entraîne une augmentation de la tension disruptive, la tension électrique minimale qui rend conducteur un isolant.



Fréquence d'apparition des streamers dans l'air en fonction de la tension appliquée V en polarité positive

D) L'établissement d'effet couronne en polarité alternative.

Intéressons nous désormais à l'effet couronne en tension alternative, il peut être considéré comme la synthèse des deux polarités précédentes à première vue puisque le passage d'une polarité à l'autre n'entraîne pas une augmentation de la tension en valeur absolue mais il existe en réalité quelques différences. L'oscillation de la tension entraîne un mouvement oscillatoire de la charge d'espace développé par l'effet couronne mais celui-ci à une fréquence plus petite.

La grande différence avec l'addition successive des deux polarités est qu'il n'y a pas d'impulsions au début de la demi-alternance positive, la zone d'Hermstein débute dès le passage en polarité positive. Cela est due au fait que les ions positifs accumulés pendant la polarité négative près du conducteur n'ont pas le temps d'être évacués pendant l'alternance positive. Leur présence augmente la valeur du champ électrique existant, le faisant passer directement aux valeurs de la lueur d'Hermstein.

Les impulsions de Trichel se comportent en courant alternatif comme en courant continu.

La forme d'émission de l'effet couronne ayant le plus de conséquences est le streamer, en provoquant des perturbations radioélectriques et acoustiques. Elles s'accompagnent d'un claquement sec dont la répétition à grande fréquence engendre le bruit d'abeilles bien connu au voisinage des lignes à haute tension.

Expliquons donc plus précisément ce phénomène.

Nous avons précisé dans la partie traitant de l'ionisation que l'émission d'électrons par effet de surface au niveau du conducteur joue un rôle fondamental dans l'amorçage de la décharge autonome. Mais que cette théorie ne peut expliquer les temps de développement de la décharge mesurés (10^{-9} à 10^{-7} s). Ces temps sont beaucoup plus faibles que ceux nécessaires à l'apparition d'effets secondaires à la cathode conditionnant le passage des décharges non-autonomes en autonomes (10^{-5} à 10^{-4} s). Nous avons vu que seule la photoionisation, résultant des phénomènes d'excitation et de recombinaison dans l'air entourant le conducteur et la charge d'espace peuvent expliquer ce développement de la décharge.

Selon ce modèle, la décharge se développe sous forme d'un canal très conducteur appelé streamer (canal de plasma).

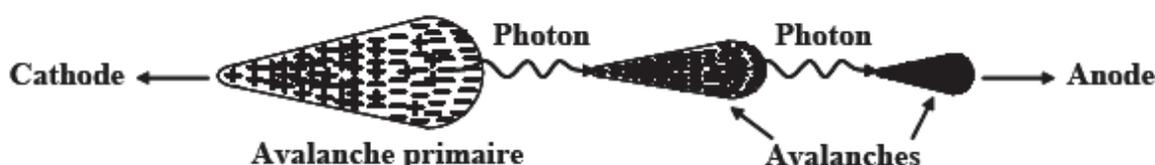


Schéma de développement de la décharge par avalanches photo ionisantes.

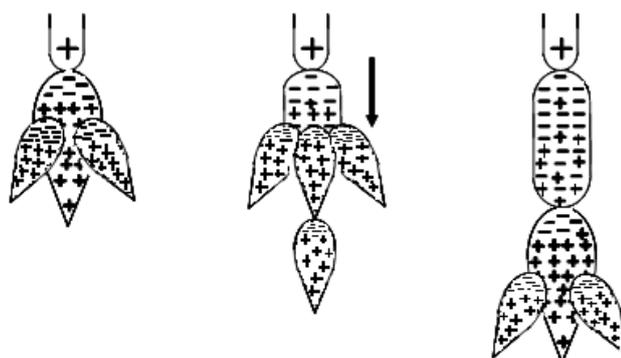
L'initiation de ce streamer correspond à la création d'une avalanche de Townsend. Celle-ci prend naissance, suite à des collisions électrons-molécules neutres ou cations-molécules neutres présents dans l'air suite à la photoionisation, alors qu'ils sont soumis à une valeur critique du champ électrique.

Cette avalanche est accompagnée de la création d'une charge d'espace. Les électrons forment un nuage négatif qui progresse rapidement vers le conducteur et les ions positifs restent immobiles. Le champ devient alors hétérogène et plus intense près du conducteur et surtout au voisinage des aspérités qui jouent le rôle de pointes conductrices. Le champ sur les flancs de l'avalanche diminue. Quand la charge d'espace de l'avalanche de Townsend atteint une taille critique (soit environ 10^8 électrons), elle va contribuer à intensifier les collisions ionisantes sur le front et la queue de l'avalanche.

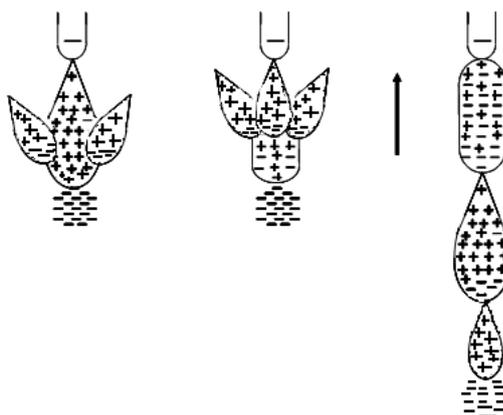
Dans l'avalanche, les électrons et les ions se recombinent en partie, ils se rassemblent pour reformer une molécule neutre. L'énergie rayonnée peut provoquer la photoionisation d'autres atomes de l'air, se trouvant à l'intérieur et à l'extérieur de l'avalanche, par le principe vu précédemment. Les électrons nouvellement créés peuvent, si le champ électromagnétique auquel ils sont soumis est suffisamment intense, conduire par chocs électrons-molécules neutres, à la naissance de nouvelles avalanches, dites secondaires qui à leurs tours créeront une charge d'espace positive en avant de la charge de la première avalanche.

Ces avalanches successives entretiennent l'effet couronne, qui devient ainsi autonome et augmente également le nombre de porteurs de charges libres. Cette amplification va s'effectuer surtout dans l'axe du champ et de l'avalanche précédente. Chaque avalanche continue à se développer d'elle-même et de façon très rapide. La première n'a pas fini de croître que déjà toute une chaîne se crée. Les avalanches se transplantent par rayonnement lumineux et non par migration d'électrons et d'ions par conséquent l'évolution de cette ionisation, création d'un streamer, est très rapide.

Le champ extérieur nécessaire à son entretien est inférieur à celui conditionnant l'ionisation par collisions. Le champ moyen du streamer dans l'air est d'environ 15 kV/cm et peut descendre jusqu'à 5 kV/cm alors que le champ critique est d'environ 30 kV/cm dans les conditions normales de pression et de température.



Etapes successives de développement d'un streamer lors de la demi-alternance positive.



Etapas successives de développement d'un streamer lors de la demi-alternance négative.

Ce champ critique, champ d'apparition de l'effet couronne, dans des conditions normales de température et de pression, se calcul grâce à la formule de Peek.

E) Les causes de l'établissement de l'effet couronne autour d'un conducteur électrique réel.

- Formule de Peek.

J.W Peek fut un chercheur américain, il révéla le principe de l'effet couronne en 1915, et travailla sur une formule permettant de calculer la valeur du champ électromagnétique à partir de laquelle l'effet couronne apparaît autour d'un conducteur cylindrique parfaitement lisse en fonction de son rayon (r en cm) et de la densité relative de l'air (d), sachant que $d=1$ à une pression de 1013 hPa et une température de 25°C.

Cette formule a pour expression :

$$E_c = E_p \delta \left(1 + \frac{K}{\sqrt{\delta r}} \right)$$

$$E_p = 31 \text{ kV/cm}$$

$$K = 0,308$$

$$\delta = \text{densité relative de l'air} = 3,92P/(273 + t)$$

$$(\delta = 1 \text{ pour } P = 76 \text{ cm Hg et } t = 25^\circ)$$

$$t = \text{température en } ^\circ\text{C}$$

$$r = \text{rayon du conducteur en cm}$$

$$E_c = \text{champ critique en kV/cm}$$

$$P = \text{pression de l'air en cm Hg}$$

La relation précédente n'est vérifiée que pour des surfaces parfaitement lisses, or l'état de surface du conducteur est très important.

- Influence des aspérités en surface d'un conducteur.

Les aspérités superficielles du conducteur diminuent la valeur du champ critique. Cette influence de la rugosité surfacique est prise en compte en attribuant au conducteur

un coefficient expérimental, appelé coefficient d'état de surface (m). Le champ critique E_0 d'un conducteur non poli s'exprime alors sous la forme :

$$E_0 = m \cdot E_c$$

Ainsi, le toronnage d'un conducteur de ligne aérienne introduit un coefficient d'état de surface de l'ordre de 0,9.

Nous avons énuméré précédemment les différents facteurs qui peuvent influencer sur ce champ critique. Ceux-ci sont des critères environnementaux, météorologiques et humains aléatoires dont il est difficile d'estimer un coefficient de leur influence.

Il est important de rappeler comment ces différents phénomènes arrivent à modifier l'état de surface d'un conducteur et ainsi augmenter l'effet couronne sur celui-ci.

Premièrement il arrive que, par usure, un brin d'une ligne toronnée casse, sous les forces mécaniques de traction et de son poids auxquelles il est soumis, et se détorse. Il reste alors sur la périphérie du conducteur et crée ainsi une irrégularité importante à la surface de celui-ci.



Une seconde cause influençant la valeur du champ critique est une modification de la valeur de la pression de l'air. Une diminution de celle-ci s'accompagne en général d'une diminution de la tension d'apparition de l'effet couronne.

La température de l'air est également très influente sur la valeur du champ critique. La densité relative de l'air est inversement proportionnelle à sa température et donc selon la formule de Peek à pression constante on obtient une variation du champ critique de 5,26 kV/cm pour une variation de 50°C. Ainsi l'effet couronne apparaît à une tension plus faible lorsque la température augmente.

Les impuretés de l'air sont une autre cause. Dans le terme impuretés on entend vapeur d'eau, oxygène, particules solides, etc. Celles-ci participent à la création d'ions négatifs lourds qui peuvent très facilement libérer leur électrons supplémentaires à l'intérieur de la zone soumise à un champ critique et contribuer ainsi de manière sensible à l'abaissement de la tension disruptive. L'humidité (ou vapeur d'eau) est considérée comme l'impureté du gaz la plus pénalisante pour une isolation à l'air. Sous tension alternative, elle privilégie l'apparition de couronne stabilisée où couronne d'Hermstein.

Au niveau des isolateurs et des éléments de chaîne, leur rupture entraîne une forte modification de la linéarité de la ligne et donc une grande augmentation du champ

électromagnétique à ses abords. Cette détérioration peut avoir des causes diverses (usures naturelles, foudre, projectiles en tous genres, etc).



Elément de chaîne fêlé



Isolateur rigide cassé

D'autre part, la graisse du conducteur qui suinte à température élevée et la faible pression atmosphérique alliée à l'attraction du champ magnétique favorisent le dépôt de poussières, de particules végétales et d'insectes. Les pluies d'automne ont tendance à laver les conducteurs, par conséquent l'effet couronne est en général un peu plus élevé sur une ligne pendant l'été que pendant l'hiver, par temps sec.

Il est important de noter que quand un conducteur est neuf sa surface porte de multiples petites aspérités différentes, des traces de graisse, des petites éraflures laissées après la pose. Après avoir été mis sous tension le conducteur se recouvre rapidement d'une fine couche de poussière végétale et industrielle qui masque ces différentes aspérités d'origine.

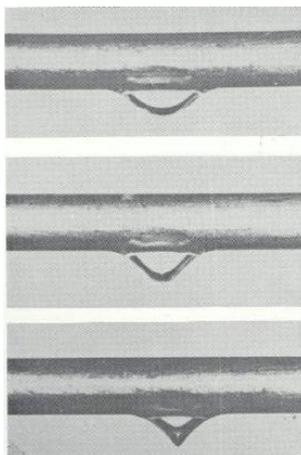
Cette couche noirâtre est formée par des aérosols attirés électrostatiquement et ayant carbonisé à la surface du conducteur. Ce vieillissement qui ne dure que quelques mois, entraîne une augmentation de la valeur du champ critique du conducteur, il diminue donc l'effet couronne.

A titre d'exemple un conducteur ayant des pertes par effet couronne de l'ordre de 2 kW par kilomètre peut, sous l'effet de fortes chaleurs l'été voir ces pertes monter jusqu'à plus de 20 kW/km. Nous voyons bien que la pollution atmosphérique, les particules végétales, des insectes pouvant se déposer sur le conducteur, modifient considérablement l'état de surface du conducteur et donc l'effet couronne.

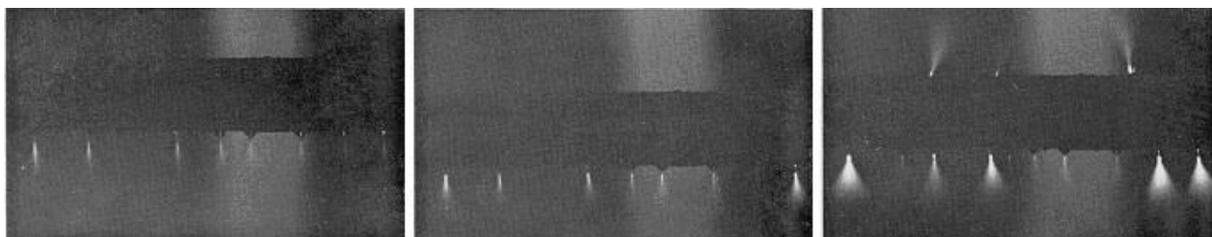
Le brouillard, la pluie ou la neige l'affectent encore d'avantage en raison des aspérités que créent des gouttelettes suspendues en-dessous de la ligne.

Les coefficients d'état de surface représentatifs de la pluie peuvent descendre jusqu'à 0,4 cela signifie que la valeur du champ critique diminue de 60%.

Les gouttes d'eau suspendues à la génératrice inférieure des lignes sont des sources privilégiées d'effet couronne compte tenu de l'intensité du champ électrique régnant à l'aplomb de celle-ci. Nous expliciterons lors de la présentation des conséquences de l'effet couronne d'autres problèmes engendrés par la suspension de gouttes d'eau en-dessous d'une ligne soumise à une tension alternative.



*Modification de la géométrie de la goutte par le champ électrique.
Lui donnant un très faible rayon de courbure.*



Aspect de l'effet couronne pendant une averse de pluie simulée de 1,2 cm/h en fonction de l'intensité du champ électrique de gauche à droite 12,4 ; 16,6 et 21,1 kV/cm.

On se rend bien compte que l'état de surface d'un conducteur est une notion essentielle pour l'estimation du champ critique et donc de la tension maximale à laquelle nous allons pouvoir porter ce conducteur tout en évitant la création de trop d'effet couronne.

L'enjeu économique est très important car cette estimation conditionne le dimensionnement des lignes et ne pas prendre en compte de tels facteurs peut avoir de lourdes conséquences.



*Ligne électrique présentant un état de surface inattendu en Cote d'Ivoire.
Les pertes couronnes de cette ligne sont exceptionnellement élevées.*

II. LES CONSEQUENCES ENGENDREES PAR L'EFFET COURONNE.

- Introduction.

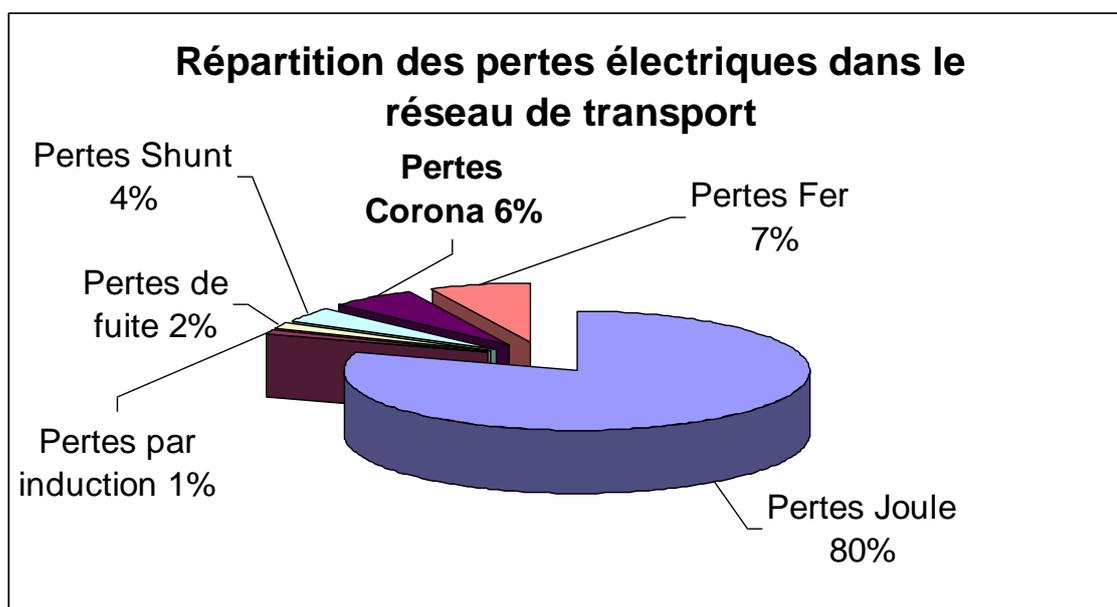
L'ionisation de l'air provoquée par l'effet couronne entraîne d'une part une dissipation d'énergie et est également à l'origine de perturbations radioélectriques et de la création de polluants.

Nous allons revenir sur ces différentes perturbations en abordant premièrement les pertes puis les perturbations radioélectriques et enfin les conséquences sur l'environnement que ce phénomène génère.

1) PERTES ENGENDREES PAR EFFET COURONNE.

A) Généralités.

L'estimation des pertes par effet couronne dépend des différentes conditions climatiques et de qualité des câbles, cependant on peut estimer les pertes sur le réseau électrique via le diagramme suivant :



On voit à travers ce document que les pertes par effet couronne représentent autour de 6% des pertes globales lors du transport d'énergies. Ces pertes se manifestent sous la forme d'une gaine lumineuse bleue qui apparaît autour d'un fil lorsqu'il est porté à un potentiel suffisamment élevé (autour de 30 kV/cm dans des conditions normales et uniformes de l'air).

Comme expliqué précédemment, le mécanisme de formation des pertes par effet couronne provient d'une dissociation des atomes en électrons et en ions positifs. Le mouvement de ces ions dans le champ électrique est la cause physique des pertes.

Les pertes dépendent donc principalement de la quantité de charges électroniques produites, en valeur moyenne annuelle ce pourcentage est relativement faible mais lorsque les conditions climatiques sont défavorables, on peut atteindre une valeur maximale plus de vingt fois plus grande que la valeur moyenne. Ces fluctuations peuvent avoir une influence sur le transport d'énergie surtout durant les périodes de pointe (qui coïncident souvent avec les périodes de mauvais temps). Pour cette raison le dimensionnement des lignes tient compte du champ critique d'apparition de l'effet couronne.

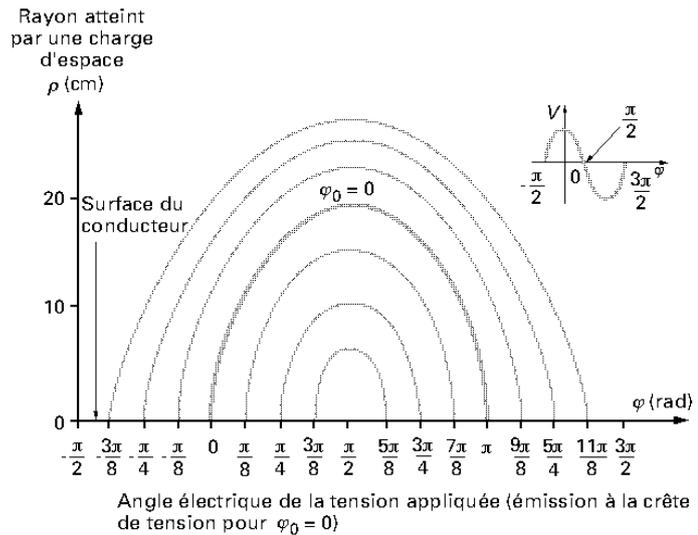
Rappelons que dans les trois modes d'émission principaux de pertes et de perturbations, la zone de conductivité d'Hermstein est le mode principal d'émission de pertes couronnes et le mode provoquant de grandes aigrettes positives (streamers) est quant à lui responsable des perturbations radioélectriques et acoustiques.

B) Calcul et estimation des pertes.

- Régime de pertes localisées

Lorsque le nombre de points générateurs d'ions, donc le nombre d'aspérités, est faible, le champ principal n'est quasiment pas perturbé. On est alors dans un régime dit de pertes localisées. Ce régime apparaît à des tensions très inférieures à la tension critique, un calcul des pertes est alors très difficile car les variations d'état de surface du câble masquent fortement les paramètres électriques et géométriques des conducteurs.

Néanmoins, il est possible de calculer la trajectoire d'une charge dans la périphérie proche du conducteur et de trouver l'énergie qu'elle dissipe au cours de ce mouvement. Le calcul de trajectoire montre que le rayon à travers lequel peuvent se déplacer des charges d'espace est de quelques dizaines de centimètres pour un conducteur simple et peut atteindre l'ordre du mètre pour de plus gros faisceaux de lignes soumises à de très hautes tensions.



Trajectoire d'une charge en champ non modifié autour d'un conducteur simple

Le calcul de l'énergie dissipée montre une relation de proportionnalité entre rayons des conducteurs et quantité de charges émises par alternance ($q = q_0 * r$). Ce qui aboutie à la formule suivante :

$$P_0 = w q_0 r 2 f$$

avec : f : fréquence de la tension alternative

w : énergie dissipée par une charge q pour une alternance de tension

r : rayon du conducteur

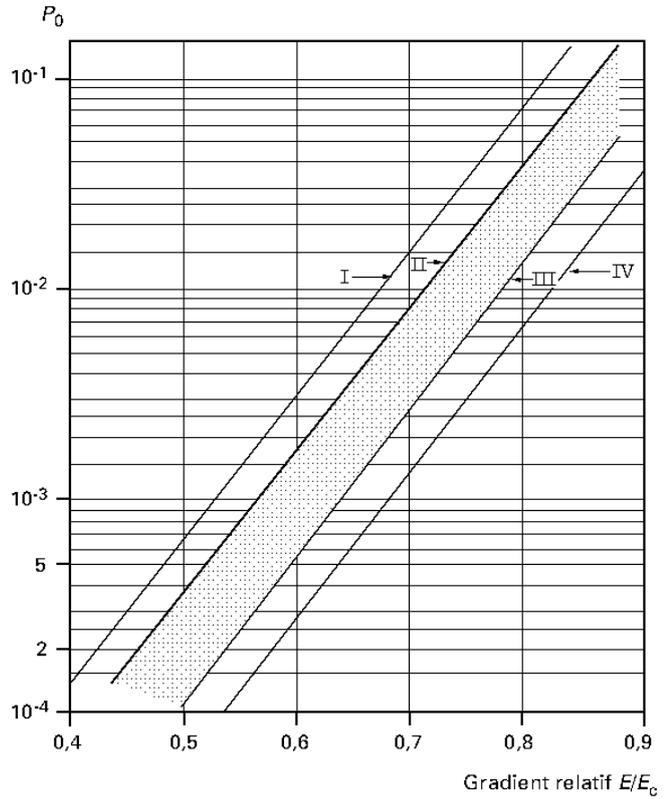
Suite à des ajustements après mesures, cette formule conduit à la suivante :

$$P = P_0 [r^{1,8} (n + 6)^2]$$

avec : n : nombre de conducteurs élémentaires

La combinaison des diverses relations obtenues et des résultats expérimentaux permet d'établir l'abaque en coordonnées réduites suivant :

Abaque de prédétermination des pertes de conducteurs secs



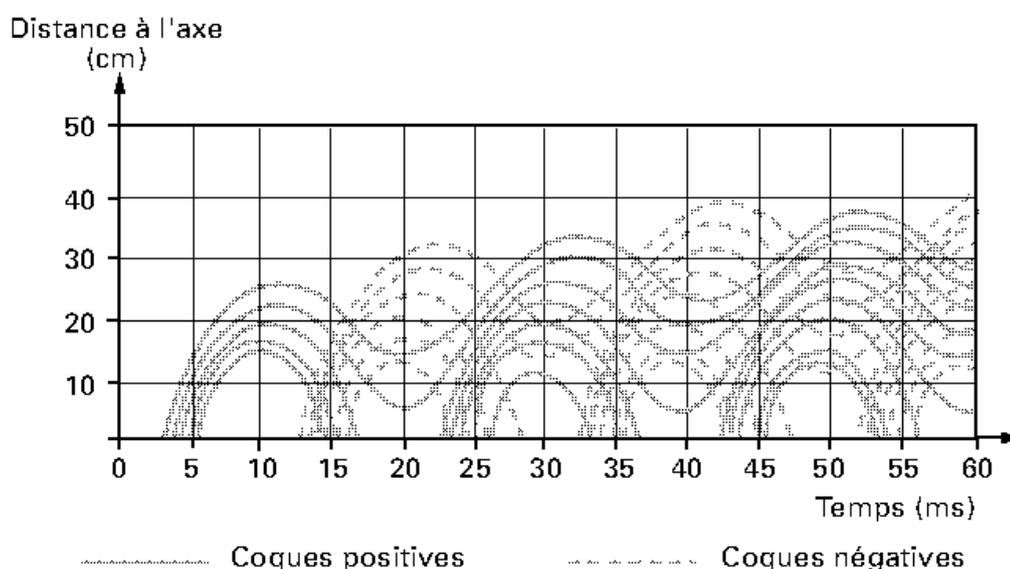
- I Conducteurs sales ou gras
Zone tramée entre II et III : état de surface moyen
- IV Conducteurs propres et vieillis
 $P (W/m) = P_0 [r^{1,8} (n + 6)^2]$

- Régime de pertes généralisées.

Lorsque la tension appliquée s'accroît ou que les conditions climatiques ou de propreté du câble augmentent le nombre d'aspérités le long du conducteur, le nombre d'aigrettes va augmenter on va alors passer dans le régime de pertes généralisées.

Dans ce régime, la quantité de charges d'espace émise ne dépend plus de la caractéristique de la ligne mais du champ superficiel créé. Ce champ superficiel ne peut dépasser une certaine valeur critique, toute tendance au dépassement a pour conséquence la génération de nouveaux ions qui vont tendre à le limiter (c'est par ailleurs cette propriété qui explique le fait que l'effet Corona atténue les surtensions de lignes, notamment celles liées à la foudre). De plus les charges d'espace sont émises en quantité suffisantes pour considérer que le conducteur émet des charges de façon uniforme sur toute sa longueur. Un calcul des pertes est alors possible. Pour ce faire, on utilise un modèle de calcul élaboré chez EDF : le modèle EF COR.

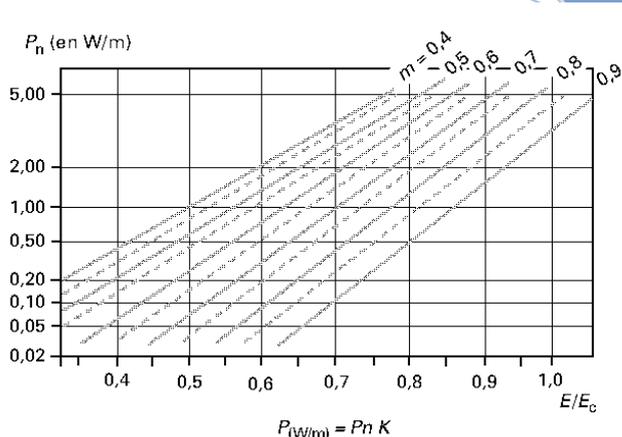
Ce programme simule le mouvement des charges en prenant comme hypothèse une limitation du champ superficiel à sa valeur critique E_0 . Il effectue alors une itération afin de déterminer la valeur du champ superficiel du conducteur en observant le déplacement des coques de charges positives et négatives.



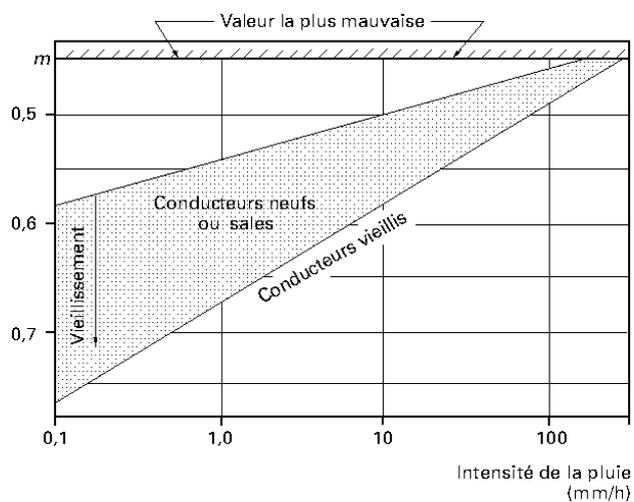
Mouvement des coques de charges autour d'un conducteur de 1 cm de rayon lorsqu'on est 25% au dessus de la tension critique.

Ce modèle de calcul permet de déterminer avec précision les pertes sous pluie, il se fait via les abaques suivants.

Il faut ajouter que pour des conducteurs neufs ou gras, la précision de la mesure baisse car la détermination du coefficient d'état de surface représentatif de la pluie sera plus difficile à trouver.



Abaque de prédétermination des pertes sous pluie.



$$K = (nr\beta)^2 \frac{\lg \frac{R}{r_e} \times \lg \frac{\rho}{r_e}}{\lg \frac{R}{\rho}}$$

- m coefficient d'état de surface représentatif de la pluie
- n nombre de conducteurs
- r (cm) rayon des conducteurs
- r_e (cm) rayon équivalent du faisceau
- R (cm) rayon du cylindre équivalent de potentiel nul.

On pose $R = 350$ cm

$$\beta = 1 + (0,3/\sqrt{r})$$

$$E_c \text{ (kV}_{eff}\text{/cm)} = 21,2 \times \beta$$

$$\rho = 18\sqrt{r} \text{ pour conducteur simple}$$

$$\rho = 18\sqrt{nr+4} \text{ pour faisceaux}$$

Pour une fréquence de réseau différente de 50 Hz, prendre $K' = (v/50) K$ avec v fréquence de la tension appliquée.

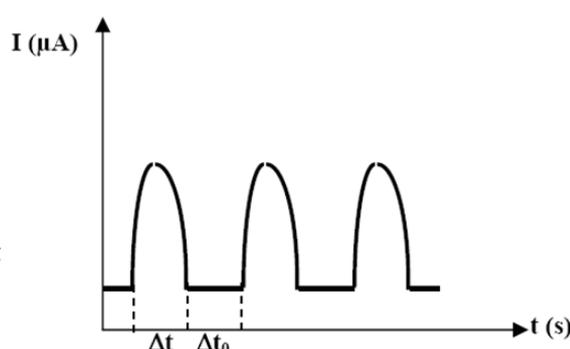
2) CONSEQUENCES DE L'EFFET COURONNE.

La conséquence la plus gênante engendrée par les pertes par effet couronne est la génération de perturbations radioélectriques. Nous nous intéresserons donc dans un premier temps à ces perturbations. Dans le but de limiter ces dernières, on a séparé les câbles en faisceaux de conducteurs. Cependant, multiplier le nombre de conducteurs permet d'une part d'assurer un niveau de perturbations acceptable mais crée d'autre part des niveaux sonores de plus en plus élevés. Ce deuxième problème sera abordé ensuite. Enfin nous verrons comment l'effet couronne est à l'origine de gaz néfastes pour l'environnement et capables de détériorer les conducteurs à plus ou moyen terme.

A) Perturbations radioélectriques.

Les pertes par effet couronne sont produites sous forme de décharges qui sont à l'origine de parasites pouvant être captés par les antennes se trouvant aux alentours des lignes, cela crée des interférences électromagnétiques.

Les charges créées par ionisation de l'air autour du conducteur sont brusquement mises en mouvement par le champ superficiel. Les ions et électrons se déplaçant rapidement, cela va provoquer une modification de la distribution des potentiels électrostatiques, et donc un courant qui va ensuite entraîner l'émission d'une onde électromagnétique. La tension étant alternative, le courant produit aura une fréquence élevée et les perturbations sur les ondes radio seront une combinaison d'impulsions positives (qui ont une intensité plus élevée) et négatives (qui ont un spectre fréquentiel plus étendu).



Courant à haute fréquence (environ 1MHz) délivré pendant les intervalles de temps Δt

Le champ électromagnétique variable créé va se propager dans l'air dans la bande de fréquence [150 kHz ; 30 MHz].

Cette bande couvre la bande des émissions grandes ondes (bande des 200 kHz, ex : France Inter : 162 kHz) et la superposition du bruit radioélectrique créé par l'effet couronne avec l'onde porteuse du signal utile génère la nuisance sur la qualité de réception du signal

Le niveau des perturbations se calcule via un récepteur radio fonctionnant en voltmètre, on étudie alors le rapport signal sur bruit. Le niveau de perturbation peut alors être évalué avec le tableau suivant :

Echelles du rapport S/B		Code	Qualité du récepteur
Logarithmique dB	Linéaire		
30	32	5	Perturbations non audibles
24	16	4	Perturbations juste perceptibles
18	8	3	Perturbations audibles – Perception parfaite de la parole
12	4	2	Mauvais pour la musique – Parole intelligible
6	2	1	Compréhension avec effort de concentration
0	1	0	Brouillage total

Une méthode approximative est possible afin de calculer le champ perturbateur maximum. Elle consiste à relever les champs utiles des principaux émetteurs nationaux et en périphérie établir le diagramme des fréquences cumulées des champs. On détermine alors un champ minimum E_0 (dépassé par 80% des champs par exemple).

Le niveau perturbateur admissible par temps sec sera alors :

$$E = E_0 - 30 \text{ ou } 24 \text{ dB}$$

Ceci dépendant de la position démographique de la ligne (la limite ne sera pas la même pour une ligne traversant une région peuplée et une région éloignée des centres urbains)

B) Bruits acoustiques.

L'effet couronne est à l'origine d'une onde sonore produite par une variation locale de la pression qui se propage dans l'air environnant.

Il existe deux composantes acoustiques principales dans ce bruit, la première est à fréquence élevée et ressemble à un bruit de friture ou à un sifflement, la seconde est un bourdonnement à plus basse fréquence.

Lorsque les conditions climatiques sont humides ou pluvieuses, le niveau sonore produit par le réseau devient audible. En effet, ce niveau est lui aussi lié aux gouttes d'eau qui pendent sous le conducteur, mais d'autres facteurs sont également responsables de l'amplification de ce bruit : l'intensité du champ électrique (mais cette composante est à saturation dans la plupart des cas), le diamètre des conducteurs et leur nombre (un faisceau de quatre conducteurs sera plus gênant qu'un faisceau de deux)

Le calcul de la gêne acoustique d'un faisceau est donc très difficile à faire car même dans le cas d'une étude de câbles secs les valeurs de pertes et de perturbations changent fortement au cours du temps. C'est pour cela qu'il est préférable de comparer les

conducteurs entre eux. Un calcul peut donc s'effectuer par comparaison avec la gêne produite par un faisceau connu (pour des conditions climatiques similaires).

On calcule:

$$\delta = E_1 n_1^{0,3} d_1^{0,6} - E_2 n_2^{0,3} d_2^{0,6}$$

Avec : E : intensité maximale du champ électrique
n : nombre de conducteurs du faisceau
d : diamètre des conducteurs

La valeur δ renseignera sur l'état acoustique du faisceau 2 par rapport au faisceau 1.

La gêne acoustique apparaît comme un des principaux obstacles à l'implantation d'un réseau de transport à plus forte tension que celui actuellement en place.

C) Vibrations mécaniques.

Ce phénomène intervient lorsqu'une pellicule d'eau se dépose sur le conducteur. La pluie, en présence d'un champ électrique va engendrer une vibration des conducteurs de l'ordre de 10 cm avec une fréquence de 1 à 10 Hz. Celle-ci est due au comportement des gouttes d'eau en présence d'un champ magnétique.

Les gouttes d'eau vont créer des aspérités, il va y avoir une intensification du champ superficiel à leurs pointes, l'effet couronne va alors apparaître. Il va alors y avoir une augmentation de la charge d'espace autour des gouttes suspendues, ceci va provoquer une diminution du champ électrique à la pointe produisant ainsi une diminution de la force attractive existant entre chaque goutte et son image. Des forces de répulsion électrostatiques apparaissent alors et le câble est repoussé vers le haut (voir schéma (a)).

Dans un second temps, lorsque les gouttes deviennent trop importantes, une partie de celles-ci est éjectée. Les gouttes changent alors de forme et redeviennent bombées, le courant de fuite chute lui également ce qui entraîne une diminution de la charge d'espace et donc une augmentation de la force d'attraction entre le conducteur et la terre, le câble se déplace alors vers le bas (voir schéma (b)).

Puis le phénomène se répète à nouveau entraînant l'oscillation du conducteur.

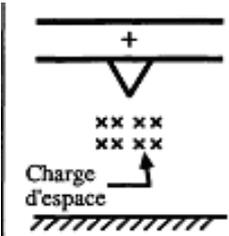
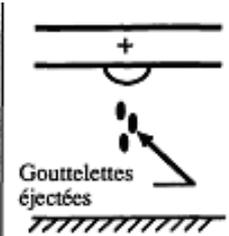
	
FORME CONIQUE	FORME HÉMISPHERIQUE
Charge d'espace considérable	Absence de la charge d'espace
Force image partiellement annulée par la charge d'espace	Force image existe
Conducteur se déplace vers le haut	Conducteur se déplace vers le bas
(a)	(b)

Schéma explicatif du phénomène de vibration des conducteurs

De même voir précédemment l'image illustrant la modification de la géométrie d'une goutte pendante soumise à un champ électrique d'intensité croissante.

D) Dégagements gazeux.

L'ionisation de l'air provoquée par l'effet couronne entraîne la création de gaz nocifs et responsables d'une corrosion des matériaux. La formule chimique mettant en évidence la formation de ces différents gaz est la suivante :

Sur des lignes extérieures les conséquences sont moins importantes mais une corrosion notamment des isolants est tout de même remarquable.



Corrosion d'un isolant



Fissure dans le ciment d'une porcelaine

III. LE FONCTIONNEMENT DES DISPOSITIFS UTILISANT L'EFFET COURONNE POUR UNE MAINTENANCE PREVENTIVE.

1) LA MAINTENANCE PREVENTIVE.

A) En quoi consiste la maintenance préventive.

La maintenance préventive consiste à intervenir sur un équipement avant que celui-ci ne soit défaillant. Elle a pour but de devancer et ainsi d'éviter une panne.

Le choix d'une maintenance préventive à divers avantages, elle permet tout d'abord d'augmenter la sûreté de fonctionnement, les conséquences d'une défaillance dans le transport de l'électricité peuvent être très conséquentes.

D'autre part, elle peut aussi être avantageuse pour des raisons économiques, en effet, le coût d'une intervention de réparation sur une ligne ou un pylône est moins important que le changement complet d'un conducteur et toutes autres conséquences pouvant faire suite la rupture de celui-ci.

D'un point de vue pratique la maintenance préventive sur une ligne permet d'assurer la continuité de l'alimentation pendant l'intervention, attendre l'apparition d'un défaut conséquent pour intervenir ne le permettrait pas.

La maintenance préventive se subdivise en différentes sous-parties:

- La maintenance systématique, englobe toutes les opérations effectuées de manière systématique, c'est-à-dire à une périodicité temporelle fixe. Cette maintenance est assez coûteuse sur des lignes haute tension du fait de la complexité des interventions.

En effet, demander à une équipe d'opérateurs de maintenance sur lignes haute et très haute tension d'intervenir sur un conducteur ne présentant pas de défaut reste à éviter.

- La maintenance conditionnelle représente les opérations de maintenance réalisées à la suite de relevés, de mesures, de contrôles révélateurs de l'état de dégradation de l'équipement.

Cette maintenance est bien plus efficace et c'est dans l'objectif d'améliorer ce type de contrôle que sont utilisés différents outils permettant de repérer l'effet couronne sur les installations à haute et très haute tension.

- La maintenance prévisionnelle est réalisée à la suite d'une analyse de l'évolution de l'état de dégradation de l'équipement.

Elle reste nécessaire pour assurer la fiabilité du réseau.

B) Présentation des défauts rendant une telle maintenance nécessaire.

Retenons que le problème le plus important pour la détection de défauts par thermographie infrarouge est que tout défaut n'entraîne pas forcément une élévation de température. Pour appuyer ce propos nous allons faire un petit inventaire des différents défauts rencontrés dans les éléments qui permettent le transport de l'électricité.

Le réseau de transport est composé de divers éléments :

- Pylônes.
- Conducteurs.
- Isolateurs.
- Câbles de garde.
- Signalisation.

Or seulement deux de ces composants transportent réellement l'électricité et nécessitent une maintenance drastique, les conducteurs et les isolateurs.

Un isolateur de ligne aérienne haute tension est formé d'un isolant auquel sont fixés deux pièces métalliques M1 et M2.

L'isolant est soit en verre, soit en céramique, soit en matériaux synthétiques.

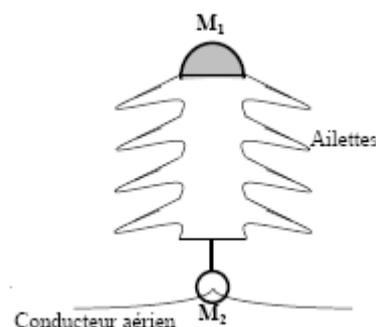
M1 se fixe au pylône ; M2 porte le conducteur.

Un isolateur possède un double rôle. Le premier est de porter le conducteur il doit donc avoir une certaine résistance mécanique pour pouvoir supporter le poids du conducteur. Son second rôle est électrique, il isole le conducteur du pylône.

Ces isolateurs sont exposés à diverses contraintes, la plus importante reste la pollution. Par temps de pluie ou de brouillard, des dépôts se fixent sur les surfaces isolantes et l'humidification de cette couche polluante réduit de façon significative la résistivité superficielle de l'isolateur et un contournement devient alors possible.

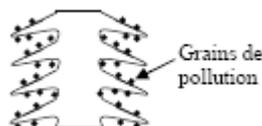
Un contournement est le fait qu'une décharge électrique s'établisse entre les extrémités de l'isolateur et contourne sa surface. Le contournement établit un court-circuit entre le conducteur et le pylône, c'est un défaut monophasé à la terre.

Le contournement cause habituellement des coupures brèves du réseau il est dans ce cas considéré comme un défaut fugitif. Ce genre de coupure anodine dans un réseau de distribution qui alimente des zones rurales peut avoir de lourdes conséquences lorsque la ligne raccorde des industries de pointes ou des hôpitaux, ou d'autres clients n'admettant pas de coupure même fugitive de l'alimentation.



Un contournement peu être séparé en quatre étapes :

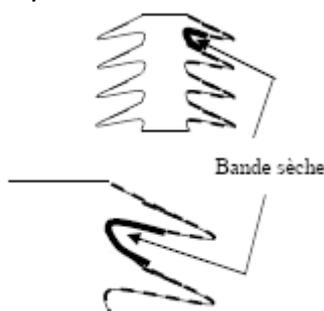
Dans un premier temps des particules de poussière se déposent à la surface de l'isolateur.



Tant que ce dépôt est sec la résistance superficielle reste élevée et l'isolateur remplit encore bien son rôle. Mais quand elle devient humide cette pollution se comporte comme un électrolyte conducteur et donne naissance à un courant de fuite superficiel I_f circulant à la surface de l'isolateur.



Dans un troisième temps la densité de courant aux endroits étroits de l'isolateur entraîne l'évaporation de cet électrolyte créant ainsi une bande sèche.



Enfin, étant donné que la résistance de la bande sèche est bien supérieure à celle du reste de l'électrolyte, presque toute la tension à laquelle est portée la ligne est appliquée d'un côté de cette zone alors que l'autre côté a une polarité nulle. La distance d'air n'est plus suffisante pour assurer l'isolation il se produit alors un claquage dans la bande sèche.

Il y a alors deux possibilités, soit la décharge s'éteint et il n'y a pas de contournement.



Soit elle progresse le long de l'isolateur jusqu'au pylône relié à la terre, il y a alors contournement.



Le dépôt responsable de ce dysfonctionnement peut avoir des origines différentes qui dépendent de l'environnement de l'isolateur. Dans les régions côtières cela peut être les embruns marins, dans d'autres régions plus sèches c'est davantage la poussière du sol. La pollution peut également être industrielle, due aux fumées d'usines ou encore aux gaz d'échappement.

Les isolateurs entrent pour un pourcentage très modeste de l'ordre de 7%, dans le prix d'une ligne aérienne. Ils sont cependant un élément essentiel pour la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité de service.

Le remède le plus efficace contre ces contournements dus à la pollution reste le lavage périodique des isolateurs.

Un contournement peut également être causé par une surtension, due dans la plupart des cas à la foudre. Pour éviter que la foudre ne s'abatte sur les conducteurs les lignes de transport sont équipées de câbles de garde.

Que ce soit à l'intérieur des isolateurs, à leur surface ou sur les conducteurs une cause importante de la détérioration de ces composants est l'effet couronne lui-même. En effet, la recombinaison chimique des molécules d'air subissant l'effet corona donne naissance à des produits chimiques hautement agressifs pour le conducteur et l'isolateur.

Le résultat de l'ionisation est la formation de différents éléments chimiques comme l'ozone, des dérivés nitrés, du salpêtre, des acides nitriques, des dérivés d'ammoniac.

Ces produits dégradent lentement les matériaux et si rien n'est fait, ils peuvent entraîner leur destruction.

Ces décharges partielles, de par leur nature capacitive et non résistive, ne sont pas génératrices de chaleur (du moins très peu), elles ne sont donc pas observables par thermographie.



Image thermographique.



Même image, filmée avec une caméra UV

Un exemple des conséquences de cet effet couronne est la perforation d'un isolateur. L'effet couronne va ronger petit à petit l'isolateur au niveau de ses imperfections (vide, inclusion, inhomogénéité) et conduire à l'explosion de celui-ci par l'établissement d'un arc électrique.

Les isolateurs comportent des inclusions de particules étrangères ainsi que des vacuoles gazeuses. Quand ces isolateurs sont soumis à une tension alternative le champ électrique est alors plus élevé dans ces vacuoles que dans le solide. Cela s'explique par deux raisons :

- La permittivité relative de l'isolateur est plus élevée que celle du gaz contenu dans les vacuoles, le champ électrique est donc proportionnellement plus élevé dans les vacuoles.
- La rigidité diélectrique d'un gaz est bien plus faible que celle d'un solide.

Des effets couronne apparaissent donc dans les vacuoles des isolateurs pour des tensions 20 à 60 fois plus faibles que celles qui entraîneraient la perforation de ceux-ci.

Les conducteurs sont aussi soumis à de rudes conditions. La pollution, les décharges partielles, le vent,... sont toutes des raisons expliquant l'usure mécanique des lignes. Cette usure se traduit dans la plupart des cas par un détournement de brins de la ligne. Une telle anomalie traduit le mauvais état d'une ligne et peut être un signal d'alarme intéressant, pour indiquer la nécessité d'une intervention de maintenance. Malheureusement le détournement de quelques brins d'un faisceau est très difficile à repérer et ce n'est qu'à quelques mètres de la ligne qu'il est décelable à l'œil nu.

De tels défauts entraînent de grosses pertes financières pour le gestionnaire de transport de l'énergie, d'une part à travers les pertes d'énergie qu'ils entraînent, des coupures fugitives, semi-permanentes ou même permanentes qui en découlent, et d'autre part à travers les interventions de maintenance qu'ils rendent nécessaires.

L'une des caractéristiques intéressantes de ces défauts est le fait qu'ils modifient la surface des conducteurs. Or nous avons vu que par effet de pointes le champ électromagnétique augmentait considérablement aux abords de ces aspérités, et que cela provoquait un effet couronne.

Les défauts au niveau des isolateurs sont également le lieu de forts effets couronne, pour un contournement le passage d'un courant entraîne un champ électromagnétique et donc un effet couronne et pour la perforation les décharges partielles en sont même les responsables.

Il est donc tout à fait sensé de repérer l'effet couronne produit à la surface de conducteurs, ou au niveau d'isolateurs afin de localiser des défauts des composants du transport d'électricité dans le cadre d'une maintenance préventive.

C) Protection environnementale.

Les défauts localisables par visualisation ultra-violette sont des défauts capacitifs émettant de l'effet couronne. L'effet couronne, nous l'avons vu précédemment, en plus de provoquer des nuisances sonores et des interférences radio-électriques susceptibles de perturber le bon fonctionnement de téléviseurs et/ou de postes radio et des déperditions d'énergies chiffrées à près de 6% des pertes totales, l'effet couronne entraîne la formation de :

- O₃ (l'ozone est un oxydant puissant, toxique)
- Nox (dérivés nitrés)
- HNO₂, HNO₃ (salpêtre, poudre blanche composée d'acide nitrique)
- NH₄, NO₃ (dérivé d'ammoniac)

L'émission dans l'air de molécules d'ozone est assez préoccupante, de nombreux organismes s'y intéressent et mesurent le taux d'ozone dans l'air (comme le système PREV'AIR), le seuil d'information à la population est de 180 µg/m³.

Cet ozone dans les basses couches de l'atmosphère, ozone troposphérique est nocif.

L'ozone irrite la gorge, les bronches et les yeux et réduit la capacité respiratoire ; il est une gêne pour les asthmatiques et les insuffisants respiratoires. A long terme, l'ozone provoque des lésions pulmonaires, de la toux, des suffocations ; il diminue la résistance au rhume, à la pneumonie, aggrave les maladies cardiaques, l'asthme, la bronchite...

De plus l'ozone en tant qu'oxydant puissant, réagit directement avec les composés chimiques présents à la surface des cellules végétales (parois et membranes). Les produits issus de ces réactions peuvent être toxiques pour les plantes. Les impacts sur les végétaux sont de deux types:

- apparition de tâches ou de nécroses à la surface des feuilles.
- perturbations du métabolisme sans dégâts apparents, mais se traduisant par une diminution de croissance ou de productivité.



Nécroses sur une feuille de tabac.

L'effet couronne émis le long des lignes du réseau électrique est donc bien un phénomène qu'il faut réduire. Une détection des anomalies, lieux d'émission intense d'effet couronne, permettrait de réduire considérablement ce phénomène.

La détection de défauts sur les éléments du réseau, outre ses avantages évidents en termes de sécurité des personnes et des biens, de maintien des performances du système, est une avancée concrète pour la protection de l'environnement.

2) PRESENTATION DES DIFFERENTES TECHNOLOGIES UTILISEES AFIN DE REPERER CES PERTES.

A) Le repérage via caméra infrarouge.

Principe de détection des caméras infrarouge.

Tout conducteur parcouru par un courant électrique perd de la chaleur par effet joule :

$$W = R \cdot I^2 \cdot t$$

Avec :

- W Energie calorifique dissipée en Joule(s);
- R Résistance électrique de l'équipement en ohm(s);
- I Courant électrique en ampère(s);
- t Temps de passage du courant en seconde(s).

Le fonctionnement d'une caméra infrarouge repose sur deux composants essentiels, son détecteur et son système de mesure. Nous allons expliquer brièvement leur fonctionnement, les différents types de détecteurs et de systèmes de mesure existants pour finir par donner quelques caractéristiques des caméras infrarouges utilisées dans l'inspection de lignes électriques.

Il existe 2 types de détecteurs :

- Les détecteurs thermiques, leur fonctionnement est fondé sur la détection d'une variation de température au niveau du détecteur. Celle-ci modifie la résistance électrique du détecteur ce qui entraîne un changement du signal délivré. Les détecteurs thermiques ont un temps de réponse assez élevé et sont plutôt utilisés dans l'industrie.

Exemple : le pyromètre pour les mesures de hautes températures dans les fours :

- Les détecteurs quantiques : ces détecteurs reposent sur le principe de rayonnement. Ils sont constitués de semi-conducteurs. Quand ces semi-conducteurs absorbent des photons émis par rayonnement depuis la source de chaleur ils envoient un signal électrique. Les détecteurs quantiques sont assez performants, ils ont une sensibilité élevée et un temps de réponse faible. Cependant ces détecteurs fonctionnent à une température proche de 70 K, ils nécessitent donc un système de refroidissement. En général c'est un refroidissement par mini compresseur.

Dans chaque cas, les détecteurs délivrent un "thermosignal" celui-ci est amplifié et ensuite converti en points lumineux sur un écran.

Il existe deux systèmes de mesure des flux électromagnétiques ou luminances :

- Le système à balayage spatial : l'appareil est muni d'un détecteur unique couplé à un système optomécanique à balayage horizontal (ligne) et à balayage vertical (trame).
- Le système à plan focal : celui-ci est équipée d'une matrice de détecteurs. L'image de chaque détecteur couvre de façon permanente une surface élémentaire dans le champ scanné. La scène thermique est ainsi quadrillée et analysée simultanément en tout point par le "détecteur matriciel".

Il existe un troisième type de détecteurs et celui-ci, comme le système à plan focal ne nécessite pas de système de mesure optomécanique, diminuant ainsi le temps de réponse.

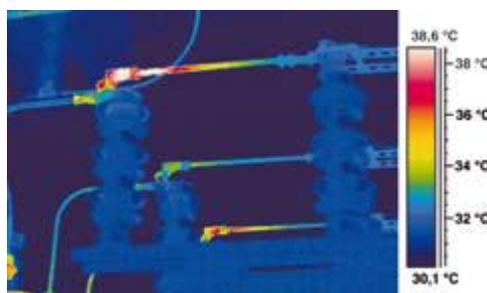
Les détecteurs FPA (Focal Plan Array) : les FPA sont des détecteurs matriciels placés dans le plan focal de la caméra. Chaque capteur de la matrice mesure simultanément le rayonnement émis par tous les points de l'image. Les FPA sont associés à des matrices microbolométriques.

Le bolomètre est un élément chimique qui varie avec la température. Une modification de la température entraîne un signal électrique. Le microbolomètre évite le refroidissement du capteur.

La thermographie infrarouge identifie des défauts ou dégradations locales en relevant des élévations anormales de température, ces anomalies sont des points chauds.

Les défauts thermiques les plus souvent détectés sont :

- 1) Problème de serrage.
- 2) Usure, oxydation ou corrosion de contacts.
- 3) Positionnement incorrect de contacts mobiles.
- 4) Problème de calibration de l'appareillage.
- 5) Déséquilibre des charges entre phases.
- 6) Ventilation insuffisante de tableaux ou locaux électriques.
- 7) Problème de conception des installations (Problèmes d'induction).



Oxydation d'un commutateur haute tension.

Une inspection avec une caméra infrarouge se fait par un opérateur muni d'une caméra portable à faible résolution. Elle se fait sur une installation en fonctionnement, ce qui est un avantage puisqu'elle ne nécessite pas d'interruption.

Cependant le contrôle infrarouge s'avère délicat sur des matériaux malheureusement très présents dans le transport de l'électricité, le cuivre et l'aluminium, du fait de leur faible émissivité et par conséquent de leur pouvoir réfléchissant élevé. En effet l'opérateur doit faire attention à ne pas confondre un point chaud avec un point chaud fantôme : réflexion d'une source de chaleur environnante.

Une autre limite à l'efficacité de la caméra infrarouge est le bruit, notamment le bruit de photons. En effet le flux de photons émis par des corps à proximité du corps à observer et celui lié à la température ambiante rendent les défauts moins flagrants. Les bruits électroniques liés à l'amplification du signal amoindrissent la résolution.

Ces problèmes restreignent le rayon d'action d'une caméra infrarouge à la vérification de parties de bonne émissivité à savoir des boulons, des isolants,...

Outre la réduction de son champ d'action à cause de ce phénomène de réflexion les caméras infrarouges, de par leur principe de fonctionnement ne relèvent que des défauts entraînant une augmentation de la température du conducteur, des pertes par effet joule.

Or certains défauts n'entraînent qu'une très légère variation de température ils ne sont donc pas décelables avec ce type de caméra et l'identification même du défaut nécessite un arrêt de la ligne et une intervention couteuse.

B) La détection ultrasonore.

- Principe de ce type de contrôle :

Le contrôle ultrasonique consiste à capter les ultrasons émis par un appareil en fonctionnement et à les transcrire dans le domaine audible afin de pouvoir les analyser et les interpréter. Le signal entendu est comme un son de friture ou de bourdonnement, qui va augmenter lorsque le détecteur passera au niveau de la source.

Cette inspection nécessite que les appareils soient sous tension mais ils ne doivent pas être nécessairement en charge comme dans le cas de la thermographie infrarouge.

- Matériel utilisé

Les ultrasons sont des ondes sonores dépassant le niveau de la perception humaine. Le seuil moyen de perception humaine se situe en général entre 50 Hz et 3 kHz. La technologie des ultrasons porte principalement sur les fréquences de 20 kHz et plus.

Les pertes par effet couronne étant à l'origine de sons et d'ultrasons, ce type de détecteur permet de les localiser et de les identifier avec précision.

Les appareils étudiés (l'ULD 40)

Nous nous sommes intéressés à un appareil commercialisé par la société canadienne NDB technologie inc., l'ULD-40. Après avoir contacté la société nous avons été mis en relation avec un ingénieur canadien qui nous a donné des informations sur ce détecteur.

- Description de l'appareil

C'est un appareil servant à détecter la présence de signaux ultrasonores ou d'impact acoustique. Il permet plusieurs applications industrielles (détection de fuites par exemple), mais il est conçu principalement pour satisfaire les besoins dans le secteur électrique. Ce secteur nécessite des appareils de pointe car la quantité d'ultrasons générée dans l'air lors d'une décharge est infime et de courte durée. L'ULD-40 est utilisé principalement pour localiser des défauts d'isolation ou pour détecter la présence de polluants sur les isolateurs.

Sur un point de vue technique, l'appareil possède un capteur ultrasonore de type piézo-céramique avec un cône d'amplification augmentant sa sensibilité. La propriété piézoélectrique de la céramique permet de générer une impulsion électrique mesurable suite à l'action sur celle-ci d'une contrainte mécanique ici la pression acoustique. Le signal électrique est ensuite amplifié (en ajoutant le moins de bruits possible).



Détail du cône et du capteur ultrasonique intégré

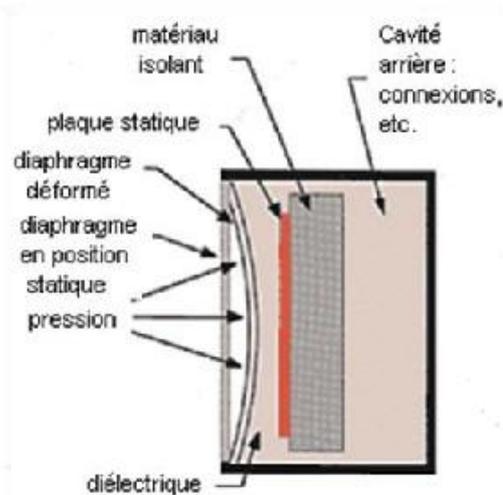
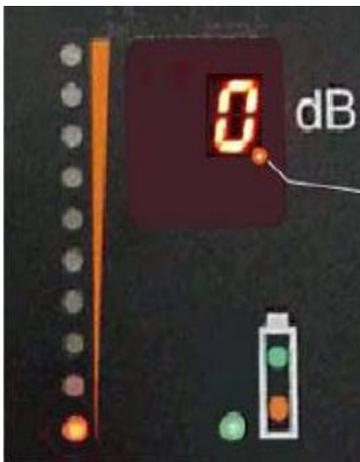


Schéma de fonctionnement d'un capteur piézoélectrique

Le capteur fonctionne à une fréquence de 40 kHz, à cette fréquence les ultrasons peuvent parcourir une grande distance sans trop d'atténuation, cela permet donc une détection possible tout en respectant les distances de sécurité vis-à-vis des composants sous haute tension.

- Fonctionnement



L'ULD converti les ultrasons à la fois en sons audibles que l'on peut écouter grâce à un casque et en intensité lumineuse avec l'allumage d'un ou plusieurs led suivant l'intensité mesurée en entrée.

Ces deux informations immédiates permettent une détection rapide de la zone à l'origine des pertes les plus importantes.

Un affichage numérique (moins rapide) permet une fois la zone de pertes détectée de la quantifier, en dB.

Valeurs en dB	Ratio réel
6 dB	2 X
12 dB	4 X
20 dB	10 X
40 dB	100 X
60 dB	1000 X
80 dB	10,000 X

- D'autres informations sur cet appareil sont accessibles en annexe 1

Complémentarité avec les caméras infrarouges.

La thermographie infrarouge ne constitue pas un moyen de détection fiable pour le contrôle des lignes électriques cependant associée à l'écoute ultrasonore ces deux moyens de détection peuvent se révéler complémentaires.

La thermographie infrarouge permet comme nous l'avons vu précédemment de détecter les anomalies résistives donc productrices de chaleur par effet joule mais pour des décharges partielles, l'élévation de température reste très faible.

Les instruments de détection ultrasonore constituent un moyen de localisation nécessaire dans le cas de défauts capacitifs comme les pertes par effet couronne car ils n'entraînent pas d'élévation de température.

C) La localisation par vision ultra-violette.

- Introduction

L'effet couronne et les décharges partielles sont des phénomènes pouvant se retrouver approximativement tout au long des lignes de transport et de transformation d'énergie.

Cette activité peut être la source de nuisances audibles ou d'interférences radio mais permet également de mettre en valeur un défaut sur un composant pouvant conduire à un amorçage de la ligne. Cette possibilité de détection précise de composants nécessitant une maintenance est une solution très intéressante pour augmenter la sûreté du réseau électrique et diminuer le risque de coupures non expliquées.



Observation d'un défaut de toronnage

- Petit historique sur les caméras UV

En 1993 le laboratoire sud africain du CSIR (concil for scientific and industrial research) était à cette époque beaucoup orienté vers les applications militaires.

Un de leur sujet de recherche était en relation avec la guerre du Golf et la détection de missiles SKUD (missiles employés par les Irakiens pendant cette guerre).

La détection de ces missiles se faisait thermiquement grâce à des caméras infrarouges mais celle-ci était complexe car les missiles SKUD apparaissaient froids vus du sol.

Les militaires américains vont alors utiliser un autre type de caméra pour faire ces observations : un détecteur photonique (traitement de signaux optiques) doté d'un filtre avec amplificateur de lumière mono photonique (filtre qui amplifie en dessous de 254 nm).

C'est le CSIR qui en faisant des recherches pour tenter de s'approprier ce moyen de détection qui s'est aperçu qu'en observant les lignes de transport électrique sous haute tension avec cette caméra, il y avait une mise en évidence des pertes par effet couronne.

L'inconvénient majeur de ces caméras permettant une amplification entre 280 et 400 nm était le fait qu'on ne pouvait s'en servir que la nuit.

Quelques années plus tard, un appel d'offre fut lancé pour la réalisation d'une caméra diurne et c'est le groupe israélien OFIL qui développa en 1995 la première caméra UV permettant une visualisation de jour de l'état de dégradation sur les isolateurs composites grâce à une visualisation de l'effet couronne.

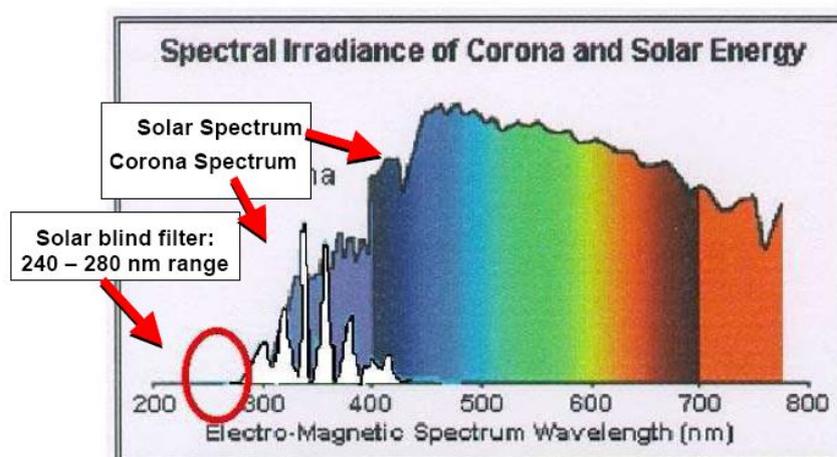
En France, les isolateurs étant en verre principalement, les recherches dans ce domaine sont restées théoriques.

Jusqu'à peu, il était donc nécessaire de travailler de nuit afin d'effectuer des observations d'effet couronne et donc de détection de défauts capacitifs sur les réseaux de distribution et de transport. C'est pourquoi un léger avantage était donné à la détection via détecteurs ultrasonores, les conditions de luminosité ne jouant aucun rôle dans ce type d'étude. Malgré ce point positif, la détection par ultrason reste difficile d'utilisation lorsqu'il s'agit d'étudier des lignes aériennes car la localisation d'un défaut devient moins précise que pour des postes clos. De plus cette technique se révèle très chronophage puisque le parcourt de la ligne avec un appareil de détection ne peut se faire qu'à pied et à une distance raisonnable.

Les récents progrès sur les caméras UV en relation avec la visualisation de l'effet couronne et de décharges partielles autorisent aujourd'hui des inspections diurne sans que le rayonnement solaire affecte la détection et l'observation de ces phénomènes. D'autre part certaines caméras permettent aussi en plus de la localisation précise d'un défaut, de le répertorier et d'ajouter son type et son importance.

- Explication technique du fonctionnement
 - Perturbation liée au spectre solaire

Les décharges par effet couronne sont à l'origine d'un rayonnement électromagnétique entre 230 nm et 405 nm. Cette bande spectrale recouvre une partie des UV et est également présente dans le domaine visible.



Superposition des spectres électromagnétiques de l'effet couronne et du soleil

Un simple filtre ne laissant passer que ces longueurs d'ondes devrait à première vue se révéler suffisant pour mettre en valeur les pertes par effet couronne générées sur le réseau de transport.

Cependant, durant la journée, l'énergie produite par le soleil dans le spectre UV étant très largement supérieure à celle produite par effet couronne (de l'ordre de 1000 fois supérieur) le rayonnement qui aurait pu être observable va être absorbée ou tout du moins fortement altérée par l'énergie solaire.

C'est pourquoi jusqu'à récemment, les inspections du rayonnement émis par effet couronne n'étaient possible que de nuit.

- Procédé utilisé

Le procédé qui a été utilisé afin de contrer ce problème consiste à diminuer la bande passante du filtre de façon à ne plus laisser apparaître les longueurs d'ondes des domaines de l'UV A et de l'UV B. Le rayonnement UV C produit par le soleil étant entièrement retenu par la couche d'ozone de l'atmosphère, un filtre à 280 nm permet de mettre en avant les pertes par effet couronne sans altération. C'est donc pourquoi, malgré le fait que l'effet couronne produise un rayonnement entre 230 et 405 nm, son observation n'est réalisable que dans la bande spectrale des UV C (entre 230 et 280 nm).

Afin d'arriver à ce résultat il faut une technologie de pointe, l'objectif de la caméra permet de capter environ 64 fois plus des photons émis par un objet. Ceci est nécessaire car pour une source faible d'effet couronne seulement $3,2 \cdot 10^{-6}$ % du flux total de photons de l'objet est émis dans la bande passante du filtre et en raison de différents facteurs ce pourcentage est à nouveau réduit par le traitement de l'image avant de pouvoir apparaître sur l'écran.

En somme, le système de détection de la caméra doit être capable d'effectuer un tri d'une précision extraordinaire pour isoler le rayonnement produit par l'effet couronne d'un composant.

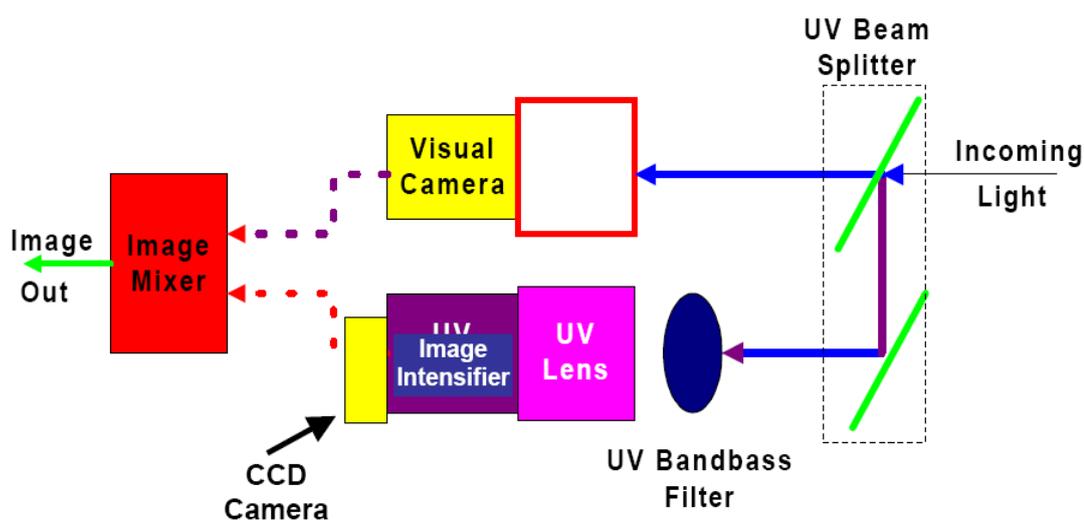


Schéma explicatif du fonctionnement des caméras UV

La seconde particularité des caméras UV est l'emploi d'une technologie bi-spectrale. Cette combinaison de deux caméras montées côte-à-côte et qui, à l'aide d'un système de miroirs, sont réglées de façon à avoir des champs de vision similaires permettant la superposition des deux images.

Le filtre et l'amplificateur d'UV décrit précédemment sont appliqués à une des deux images tandis qu'aucune modification n'est apportée à la seconde (elle est enregistrée par une caméra vidéo standard)

La recombinaison des deux images permet une visualisation des pertes par effet couronne sur le réseau de distribution.

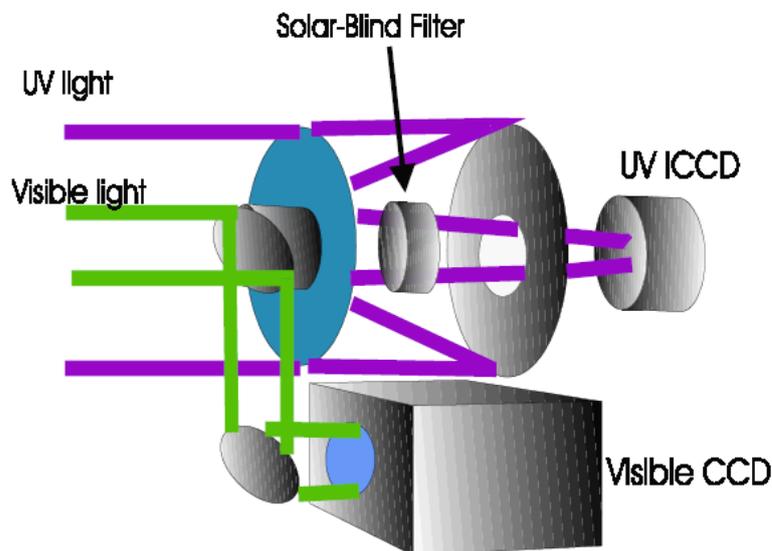


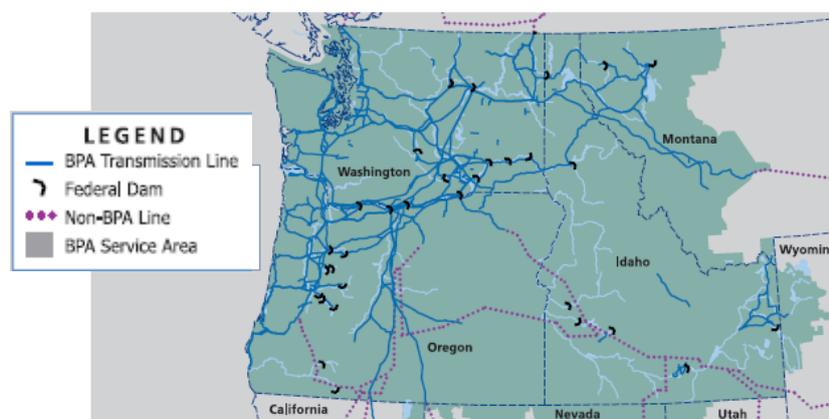
Illustration du fonctionnement des miroirs précédant le filtre solaire et l'amplificateur d'image

3) ETAT DE L'ART DE L'UTILISATION DES CAMERAS UV.

A) L'utilisation de caméras UV chez Bonneville Power Administration.

Nous parlerons de l'utilisation de caméras UV dans la maintenance préventive des réseaux de transports dans le monde avec deux exemples. Tout d'abord celui d'un gestionnaire américain du transport d'électricité, Bonneville Power Administration. Ensuite nous présenterons une entreprise d'inspection aérienne de réseaux électriques basée au Royaume-Unis.

Bonneville Power Administration avec près de 15 300 miles de lignes de transport est le leader dans ce domaine en Amérique de l'Ouest.



L'appareil de détection diurne RI corona permis au personnel de Bonneville Power Administration d'identifier un défaut sur une entretoise interphase par la détection de l'effet Corona. Ce défaut restait invisible aux inspecteurs sans l'utilisation de cette technologie.

Le remplacement du composant endommagé, au cours d'un arrêt d'entretien, permis d'éviter un court-circuit entre deux phases qui aurait provoqué une interruption du fonctionnement du réseau et donc une coupure de l'alimentation de la clientèle à travers une grande partie du Nord-Ouest américain.

Comme outil de maintenance préventive, la détection de l'effet couronne peut réduire les coûts d'entretien du réseau tout en augmentant sa fiabilité.

Selon Donald-Ruff, ingénieur chez Bonneville Power Administration, la détection de l'effet Corona grâce à une caméra UV leur a permis d'identifier et de remplacer une entretoise interphase défectueuse sur une ligne de transmission de 500kV.

Sans cette technologie, ils n'auraient pas été en mesure de voir l'effet couronne révélant la présence d'un défaut sur ce composant.

Les coûts d'entretien font partie des plus gros postes de dépenses dans l'exploitation de systèmes de transmission aérienne. La détection d'éléments défectueux,

avant qu'ils ne causent de problème permet de réduire les coûts de maintenance et d'améliorer la fiabilité du réseau.

Une inspection sans nécessiter d'interruption de fonctionnement du réseau est un avantage important pour une méthode de maintenance préventive, d'autre part la caméra DayCor permet d'effectuer ce contrôle sur les lignes à distance, ce qui est également un plus car les composants du réseau de transport sont souvent difficiles d'accès et la certitude sur la nécessité ou non d'une intervention est primordiale.

Les effets couronne peuvent, comme nous l'avons vu précédemment, causer de graves dommages sur les isolateurs, de plus ces décharges partielles sont presque impossibles à détecter de jour, sans équipement spécial.

Afin de déterminer l'état des composants utilisés pour transporter l'électricité, BPA s'est tourné vers un appareil de détection diurne par effet couronne. La caméra UV DayCor permet aux utilisateurs d'EPRI de voir en pleine journée l'effet couronne. Le personnel peut ainsi l'utiliser lors d'inspections de maintenance et identifier les composants défectueux.

BPA a récemment utilisé la caméra pour inspecter des composants d'une ligne de 500 kV, reliant le Montana à l'état de Washington.

Ces lignes traversent les canyons des Rocheuses, elles passent donc par des paysages assez accidentés ce qui oblige une longue portée entre les pylônes et un dimensionnement tenant compte du vent assez fort dans ces régions.

Dans le but de protéger les conducteurs du vent violent BPA a installé des entretoises interphases qui gardent les conducteurs séparés les uns des autres dans ces conditions. Ces entretoises sont donc essentielles pour que cette transmission fonctionne correctement, or leur emplacement géographique rendait impossible la vérification de leur état avec les techniques classiques. En effet, à de telles distances la détection de petites fissures ou d'autres défauts à l'aide de jumelles ou d'un télescope est impossible.

Pourtant de tels défauts pourraient rendre cet isolateur obsolète et mettre en défaut tout le réseau.

En utilisant l'appareil DayCor les techniciens de BPA ont facilement remarqué un champ magnétique anormalement élevé et donc une émission d'effet couronne très forte au niveau de cette entretoise.

Par conséquent lors d'un arrêt d'entretien prévu, une équipe de maintenance a remplacé ce composant qui était belle et bien fissuré.

Une nouvelle dégradation de cette entretoise aurait certainement abouti à des dommages mécaniques sur celle-ci et éventuellement à un court-circuit biphasé et donc à un déséquilibre dans le réseau.

Au lieu de cela, en supprimant le composant endommagé BPA et EPRI ont pu assurer la continuité du réseau et enquêter sur les causes de la dégradation de cette entretoise et ainsi augmenter la fiabilité de leur matériel.



Effet couronne au niveau de l'entretoise.

L'appareil de maintenance préventive DayCor détecte l'effet couronne et les arcs électriques sur une ligne aériennes de transport ou de distribution.

Elle permet de réduire les coûts de maintenance, minimiser le risque d'interruptions imprévues, et d'améliorer la fiabilité des composants du réseau.

L'appareil peut également trouver des sources d'interférence aux fréquences radio et des sources de bruits audibles, une autre méthode pour repérer les effets couronne.

L'appareil fonctionne en filtrant les rayons du soleil, puis en capturant les rayons de longueurs d'ondes UVC, qui sont émis uniquement par l'objet contrôlé.

Cette image est ensuite superposée avec l'image du même objet prise dans les longueurs d'onde visibles afin de voir de quelles parties de cet objet sont émis ces effets couronne.

Un objectif haute sensibilité et grande portée permet aux opérateurs d'effectuer une inspection à distance des composants difficiles d'accès.

B) L'utilisation de caméras UV chez Symbion Power.

Symbion Power est une entreprise spécialisée dans l'inspection des réseaux aériens de transport et de distribution d'électricité. Afin de réaliser ces inspections de façon sûre et efficace cette entreprise a opté pour le contrôle depuis les airs à bord d'un hélicoptère.

Cette méthode lui permet d'inspecter en peu de temps un grand nombre de lignes mais elle est réalisable uniquement grâce aux progrès récents dans la sensibilité des détecteurs servant à repérer ces défauts.

Symbion Power utilise différents moyens technologiques pour repérer ces défauts :

- La thermométrie.

Les caméras IR que cette entreprise utilisent ne colorent pas toutes les zones ayant des températures différentes de différentes couleurs mais illuminent uniquement les points chauds. Cette technique facilite le repérage des défauts résistifs.



Jonctions de câbles au niveau d'un poteau.



Visualisation d'une émission anormale de chaleur sur deux câbles.

- La visualisation d'effet couronne.

Symbion Power a équipé certains de ses hélicoptères d'une caméra DayCor II d'OFIL. Cette caméra ayant une grande sensibilité permet de repérer précisément un ou plusieurs défauts au niveau d'un pylône ou sur les lignes à une distance de 150 mètres.



Cette technologie permet aux équipes de Symbion Power d'inspecter entre 120 et 170 km de lignes en une journée. L'inspection aérienne permet de contrôler une zone bien plus grande qu'une inspection au sol pour le même prix et dans un délai bien moindre.

Pendant certaines lignes sont dans des zones qu'il est interdit de survoler. Il est donc nécessaire d'envoyer une patrouille au sol afin d'inspecter ces lignes. Ces inspections se font également à l'aide d'une caméra DayCor II dans cette entreprise.

Les informations obtenues par une inspection à l'aide d'une caméra UV permettent de planifier les interventions de maintenance selon le niveau de dégradation des composants. Cela permet également d'éviter la perte de matériels, en identifiant des besoins d'intervention.

Une telle technique élimine aussi le remplacement inutile de composants ou des contrôles sur des pylônes ou des lignes en bon état.



SOLUTION RETENUE ET PROPOSITION COMMERCIALE ADAPTEE.

1) LA CAMERA UV, SOLUTION RETENUE.

D) Les raisons pour lesquelles ce choix a été retenu.

La solution que nous avons choisie afin de détecter les défauts sur les différents équipements du réseau de transport de RTE et la caméra DayCor II développée et produite par l'entreprise OFIL. Nous allons maintenant présenter quelques spécificités de cette caméra, qui peuvent justifier ce choix.

- Innovation.

Les recherches techniques réalisées par l'EPRI, complétées par des essais sur le terrain, ont abouti à la réalisation de la caméra DayCor II d'OFIL, qui est aujourd'hui la caméra UV, pour la détection de l'effet couronne, la plus performante et la plus sensible du marché. En collaboration avec l'EPRI et les leaders américains du transport et de la distribution électrique, OFIL a développé une caméra répondant aux demandes spécifiques de ses collaborateurs.

La DayCor II est utilisée depuis plus de deux ans pour la maintenance préventive de plus de cinquante grandes compagnies d'électricité mondiales et les instituts de recherche.

Le mode d'utilisation de cette caméra est varié, elle peut s'utiliser au sol pour l'inspection d'une ligne en particulier, ou montée sur un hélicoptère afin de contrôler le réseau plus rapidement.

L'utilisation de cette caméra est expliquée dans le 'Guide d'inspection de lignes de transmission par effet Corona' du Dr Andrew Phillips chercheur à l'EPRI.

- Rapport coût-efficacité de la maintenance préventive des composants du réseau.

Le fait que la caméra fonctionne de jour est une innovation qui permet d'éliminer la nécessité d'effectuer les inspections la nuit et ainsi qui augmente la sécurité des opérations de contrôle.

La sensibilité de cette caméra permet d'assurer la fiabilité du réseau électrique en détectant les composants défectueux à un stade précoce de leur dégradation. Cela réduit également les coûts de maintenance et de pannes.

D'autre part, en éliminant les sources d'effet couronne trop forts la caméra UV permet aussi de réduire les interférences RF et réduit les sources de bruit audio.

Afin d'illustrer la rentabilité de cette technologie nous allons présenter un exemple d'identification de défauts sur un réseau très haute tension solutionné grâce à la caméra DayCor II.

Au cours d'une inspection périodique, l'une des équipes de maintenance d'Allegheny a noté des interférences radio sur plusieurs pylônes.

Ces pylônes, qui transportent des lignes de 500 kV depuis 28 ans, nécessitaient une petite rénovation. Mais il n'était pas évident de savoir sur quel pylône les isolateurs avaient besoin d'être changés et sur lesquels ce n'était pas le cas.

L'évaluation de ces 8 pylônes a été réalisée en 5 heures à peine par seulement 3 personnes grâce à l'utilisation d'une caméra DayCor II.

Les résultats de cette expertise ont montrés que plusieurs têtes d'isolateurs devaient être changées, leur résistance mécanique était grandement diminuée, ils risquaient un amorçage. Ces cloches d'isolateurs ont donc été remplacées.

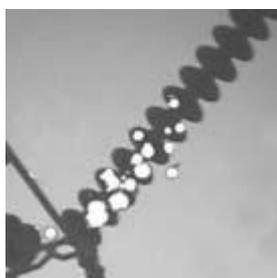


Photo réalisée avec la DayCor II d'un isolateur.

Selon le responsable de l'opération l'étude de 8 pylônes nécessitant de telles rénovations, en utilisant des techniques classiques, aurait demandé une équipe de 9 personnes pendant 3 jours.

- Une avancée technologique.

Alors que les caméras thermiques ne détectent que les points chauds, la caméra UV repère tous les endroits émettant de l'effet couronne. Comme tout type de défaut, sur un composant soumis à un champ électrique et porté à un potentiel, voit ses effet couronne se décupler cette technologie peut être très intéressante pour repérer ces défauts.

Dans cette considération, le fait qu'une inspection à l'aide d'une caméra UV ne dépende que de la tension, et non de l'intensité traversant la ligne, un contrôle à vide de la ligne est envisageable.

Il faut noter sur ce point que des éraflures, dues à une pose indélicate, peuvent émettre un effet couronne assez fort le long des conducteur. Ce ne sont pas ces sources d'effet couronne qui sont intéressantes à repérer puisqu'elles vont peu à peu disparaître plus le conducteur va se patiner.

Mais une inspection permettra de vérifier qu'il n'a pas été fait d'oublis durant la construction de la ligne.

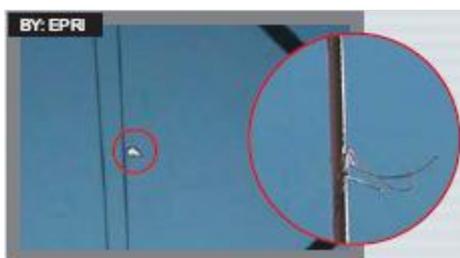
Si la technologie infrarouge est très utile pour repérer les défauts de forte résistance, la détection via les ultra-violets permet de localiser d'autres types de problèmes comme des courts-circuits au niveau des cloches des isolateurs, des isolateurs polymères défectueux, une couche de pollution trop épaisse à la surface des conducteurs, ou encore des erreurs dans l'installation de certains composants.

- Une technologie d'avenir.

EPRI ainsi que d'autres grandes entreprises de recherche dans le domaine de la très haute tension continuent de développer et d'améliorer cette technologie.

Les innovations et avancements dans la visualisation de l'effet couronne sont recueillies dans la newsletter 'Seeing Corona'.

- Quelques exemples de défauts sur des lignes de transport, que la caméra DayCor II a permis de détecter.



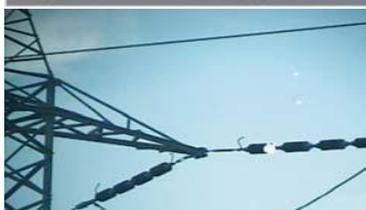
- Quelques brins d'un faisceau de ligne 345 kV sectionnés



- Des bagues de couronne mal installées



- Un isolateur polymère endommagé



- La pollution très importante d'un isolateur sur une ligne 161 kV



- Une porcelaine défectueuse sur une chaîne d'isolateurs d'une ligne 500 kV

La caméra DayCor II détecte l'effet couronne, les décharges partielles ainsi que les arcs électriques. Elle permet une inspection pratique des composants du réseau de transport, que ce soit à partir du sol ou d'un hélicoptère.

La sensibilité et la précision de la caméra DayCor II permet aux inspecteurs de travailler à une distance pouvant aller jusqu'à 150 mètres. Cette condition d'utilisation permet une inspection rapide et efficace de pylônes difficiles d'accès.



Détection de l'effet couronne sur un pylône éloigné dans le brouillard.



D'un point de vue ergonomique la caméra DayCor II est assez bien pensée puisqu'elle est munie d'une sangle permettant de la porter en ayant les mains libres.

Ceci ajouté à un grand écran LCD réduit la fatigue que ce soit physique ou oculaire de l'opérateur.

Comme souligné précédemment cette caméra est utilisable dans n'importe quelles conditions d'éclairage.

De plus elle est imperméable, par conséquent elle est utilisable de tout temps. L'observation de l'effet couronne sous pluie, dans des conditions de brouillard ou même d'averses neigeuses est donc possible.

E) Mode opératoire d'une inspection au sol.

Nous avons choisis de développer dans cette partie le mode opératoire à respecter lors d'une inspection au sol d'un réseau haute tension à l'aide d'une caméra UV, dans un premier temps.

Ce choix a été motivé par le fait que la caméra UV est selon nous l'outil le plus fiable et le plus performant pour le contrôle des installations et qu'une inspection au sol reste la technique la plus simple à mettre en œuvre.

Nous développerons ensuite les points importants sur lesquels peut différer une inspection aérienne d'un contrôle au sol.

Une inspection au sol nécessite un opérateur munit d'une caméra UV.

Ce contrôle peut tout aussi bien se réaliser alors que la ligne est en fonctionnement normal ou avant le début de son utilisation. Il n'est pas nécessaire de faire transiter du courant à travers la ligne pour repérer les pertes par effet couronne seul son niveau de tension est important.

L'opération se déroule en quatre étapes :

- La visualisation de l'émission de pertes par effet couronne le long des conducteurs et au niveau des isolateurs. L'opérateur doit observer de façon globale ces émissions sur les conducteurs, ou une variation est facilement repérable. Il doit en revanche, le faire de manière plus attentive au niveau des isolateurs, source de nombreux défauts.

- Cette observation doit être ensuite interprétée de façon comparative, en comparant la quantité de pertes émises au niveau de deux isolateurs ayant la même fonction, ou en observant deux portions de conducteur successives, portées à un même niveau de tension. Cela permet de localiser les points d'émission anormalement élevée, endroits d'un possible défaut. Cette opération est moins complexe qu'avec les technologies utilisées actuellement, puisque la détection du rayonnement UV émis par un défaut n'est pas floutée par des rayonnements de même longueur d'onde émis par des objets environnants ou par le soleil. Chaque observation doit tout de même être faite sous plusieurs angles de vision afin de bien observer le maximum de la surface des composants.

- Dans un troisième temps l'opérateur doit quantifier la fréquence d'émission d'effet couronne et son intensité afin de déterminer la criticité de ces émissions. Il doit réaliser une mesure absolue de l'état de dégradation du composant émettant trop d'effet couronne. Il doit donc prendre en compte les conditions environnementales, météorologiques et historiques afin d'estimer la gravité de ce défaut.

- A la suite de cette observation et de cette analyse l'opérateur fournira un rapport d'analyse. Ce dossier devra contenir la liste des installations contrôlées ainsi que leur niveau de tension. Il devra y figurer les équipements présentant des anomalies. Ceux-ci devront être identifiés textuellement et visuellement par une photo de l'effet couronne que ce composant dégage. Ce rapport doit également être complété par les conditions météorologiques et environnementales de cette inspection.

L'opérateur ajoutera les causes probables des défaillances, les interventions correctives qu'il recommande ainsi qu'un délai pour effectuer cette intervention. Ce délai sera fonction de la gravité des anomalies identifiées et du type d'équipement en question. Néanmoins, l'ultime décision de réparer les équipements défectueux doit-être prise par le personnel responsable des installations.

Il est important d'ajouter que la visualisation de l'effet couronne ne peut cependant pas être considérée comme une technique permettant de déterminer de façon certaine la criticité de la pollution, ou de la détérioration d'un isolateur.

Mais il est certain qu'un scintillement intense au niveau d'un isolateur signifie que celui-ci est détérioré.

F) Mode opératoire d'une inspection à bord d'un hélicoptère.

Nous allons maintenant expliquer en quoi certains équipements disponibles pour une inspection aérienne peuvent grandement faciliter ce contrôle.

Une telle analyse nécessite un pilote d'hélicoptère habilité pour travailler près de lignes haute tension, un opérateur chargé d'observer les images filmées par la caméra, de repérer les défauts possibles sur les différents composants du réseau et de les analyser. Elle nécessite évidemment aussi un hélicoptère équipé d'une caméra UV DayCor II.

Les inspections aériennes peuvent se dérouler ainsi :

- Alors que l'hélicoptère vole à coté des lignes électriques à basse vitesse, les inspecteurs procèdent à des contrôles et repèrent et identifient les problèmes qui pourraient ne pas être vu du sol. Le repérage des lignes non inspectées ou à risque peut être difficile et prendre du temps en utilisant les cartes papier traditionnelles et les plans.

- Une solution multifonctions a été trouvée à ce problème. En effet le produit Sigma 7 GeoField est un outil parfaitement adapté à ces inspections. Il fournit à l'opérateur effectuant l'inspection toutes les informations nécessaires à la localisation des lignes à contrôler et les endroits survolables pour y accéder. Cet appareil facilite également le déroulement de l'analyse de ces défauts puisqu'il permet d'enregistrer directement les résultats d'inspection dans des formulaires précis, en format informatique.

Le Sigma 7 GeoField est liée au GPS de l'hélicoptère qui permet à l'inspecteur de vérifier le bon déroulement de l'opération en ce qui concerne l'itinéraire emprunté, cela permet aussi d'enregistrer les sites inspectés et donc facilite l'archivage des opérations de maintenance préventives.

Ce matériel permet aux opérateurs d'économiser énormément du temps que ce soit sur les déplacements pour se rendre sur les sites à inspecter, pendant le contrôle lui-même puisqu'il se déroule alors que l'hélicoptère continu d'avancer le long de la ligne, et même après l'analyse puisque la rédaction du rapport d'analyse peut se faire directement sur l'écran de visualisation des défauts.

- Nous pouvons ajouter que la caméra DayCor II est équipée en série d'un large écran LCD avec un ajustement automatique du contraste, ce qui permet d'observer aisément les émissions d'effet couronne. Elle a également un zoom assez puissant ce qui lui permet de repérer de manière précise des défauts sur une ligne électrique à une distance de 150 mètres.

Elle dispose surtout d'un 'pack documentation digitale' qui peut s'installer sur la caméra. Ce pack inclut un micro et un logiciel permettant d'enregistrer des commentaires sur les films d'observations et surtout un écran tactile permettant d'ajouter des annotations écrites et d'analyser les défauts lors de l'observation. Cela évite donc de rédiger un rapport manuscrit de chaque intervention puisqu'il est possible de le faire sous format informatique directement à partir de la caméra.

Ce pack est bien entendu disponible sur les caméras dédiées aux inspections aériennes et à celles faites depuis le sol.

2) RENTABILITE DE CE CHOIX.

A) Les dépenses matérielles que peuvent engendrer une mauvaise maintenance préventive.

Comme nous l'avons vu précédemment, la maintenance préventive se divise en plusieurs sous-parties, la maintenance systématique, la maintenance conditionnelle et la maintenance prévisionnelle. L'utilisation de matériels tels qu'une caméra UV pour détecter des dysfonctionnements, pour après effectuer une opération de maintenance au niveau de ceux-ci est une de ces sous-parties, voyons pourquoi elle est la solution la plus avantageuse.

Une maintenance conditionnelle nécessite certes un investissement dans du matériel de détection et demande des inspections régulières des installations mais cela permet d'identifier les défauts précurseurs de dysfonctionnement grave sur le réseau de transport s'ils ne sont pas éliminés. Des défauts tels qu'une fissure au niveau de l'âme d'un isolateur, ou l'accumulation de pollution sous forme de bandes sèches entre ses ailettes, peuvent être repérés au cours d'inspections aériennes ou au sol, avec un bon angle de visualisation, à l'aide de technologies tels que la caméra UV. A ce stade d'usure du composant il est envisageable de ne changer que cet isolateur quand il est fissuré ou simplement de le nettoyer, ces opérations de maintenance conditionnelle, permettent d'éviter un amorçage au niveau de l'isolateur, créant ainsi un court-circuit phase terre.



Nettoyage d'un isolateur pollué.

D'autre part le remplacement d'un isolateur sur une ligne de 400 kV est assez coûteux il est donc avantageux de savoir avec certitude que l'équipement que l'on remplace est bien endommagé.

Pour les conducteurs les avantages de la maintenance conditionnelle sont encore plus évidents. L'observation au préalable de la ligne, ayant servie à déterminer précisément l'emplacement d'un défaut, ou l'état de propreté d'un conducteur, permet de cibler l'opération de maintenance à réaliser. Un détournement de quelques brins d'un faisceau n'entraînant pas une fragilité mécanique du conducteur peut alors être réparé, ou encore une portion, soumise à de rudes conditions environnementales ou ayant atteint un fort niveau de pollution peut être nettoyée ou sablée.

Ces différentes interventions de maintenance permettent d'augmenter considérablement la durée de vie des installations.

Les travaux de maintenance entrepris par RTE sur l'axe 400 kV Avelin-Weppes-Warande représentent un investissement de près de 60 millions d'euros, pour 85 km de lignes entre Warande et Avelin.

Cela nous donne une meilleure idée des enjeux de la localisation des défauts afin de cibler les opérations de maintenance.

B) Les risques qu'une telle négligence peut entraîner.

Une mauvaise maintenance des lignes de transport peut conduire à un amorçage sur une ligne et donc à une panne. Ce risque reste assez faible mais les conséquences d'une avarie sur le réseau de transport peuvent être graves.

Dans un premier temps nous aborderons les risques sur le réseau de transport d'électricité que peuvent provoquer une coupure sur une ligne, puis nous essayerons de prévoir les conséquences pour une entreprise raccordée directement au réseau d'une telle coupure.

En cas de panne d'une ligne HTB par exemple, RTE ne dispose que de très peu de temps pour limiter le report des flux d'électricité sur les autres lignes. Si cette panne arrive hors période de pointe, donc à un moment où la demande en électricité est faible alors les

lignes encore en fonctionnement pourront assurer cette demande et cet incident n'entraînera pas de gêne pour le consommateur. Cependant, si la coupure arrive au moment d'une forte demande alors des surcharges importantes vont apparaître et entraîner un dépassement de la capacité de transport des lignes environnantes. RTE sera alors dans l'obligation de procéder à des délestages. Ces coupures d'électricité sélectives, volontaires et maîtrisées vont permettre d'éviter que l'incident ne se propage sur les lignes encore en fonctionnement. Si un certain nombre de clients classés non prioritaires ne sont pas momentanément coupés, alors les lignes en surcharge vont se mettre hors tension et entraîner des reports encore plus gros sur les lignes encore en fonctionnement. Par effet de domino, si un incident tel que celui-ci se produit, cela peut conduire à un black-out total sur toute la zone géographique. Plusieurs heures voir plusieurs jours seront alors nécessaires afin de rétablir le courant.

Pour une entreprise raccordée directement au réseau, une perte de l'alimentation électrique peut avoir des conséquences désastreuses sur la production en cours et le gestionnaire du réseau peut être tenu comme responsable de cet incident. Il devra alors rembourser les dommages et pertes occasionnés.

C) La caméra UV, un investissement d'actualité pour RTE.

L'utilisation de caméras UV dans la maintenance préventive de lignes haute tension, à première vue représente, sur le plan économique, un investissement conséquent.

Cependant, un tel investissement permet une meilleure visualisation des défauts pouvant se produire sur les lignes, c'est donc un moyen efficace d'anticiper des défauts pouvant conduire à une coupure de l'électricité.

En effet l'utilisation de ce type d'appareil à de multiples avantages :

- C'est une intervention sur des conducteurs en tension.
- C'est un contrôle non destructif.
- Cette analyse est faite sans contact avec les équipements, cela assure une certaine sécurité d'intervention.
- Les mesures sont précises et rapides.
- Intervenir uniquement sur les éléments défectueux.
- Diminuer les frais d'entretien, par l'adoption d'une maintenance conditionnelle plutôt qu'une maintenance systématique.
- Augmenter la fiabilité des installations.

Sans ce moyen d'évaluation de l'état des conducteurs une intervention ne pourrait être programmée et la ligne présentera un risque de coupure inexplicée.

La maintenance préventive utilisant la visualisation ultra-violette constitue un moyen efficace de réduction des coupures d'électricité inexplicées et pour cette raison nous pouvons dire qu'un investissement dans une telle technologie est justifiable.

Le choix d'une telle technologie serait d'actualité dans la mesure où RTE contribue au plan de relance économique en investissant plus d'un milliard d'euros dans le renouvellement de ses infrastructures, le raccordement de nouvelles unités de production, l'adaptation du réseau à l'essor des énergies renouvelables et surtout au renforcement de la sûreté de son réseau.

En effet, la production d'électricité de la région Nord – Pas de Calais étant de 47,5 TWh en 2009, elle a augmenté d'environ 3 % par rapport à 2008 et représente désormais près de 9% de la production française. Il est donc évident que réduire au maximum les risques de coupure électrique sur son réseau est un objectif primordial pour RTE Nord-Est.

3) LES ENTREPRISES CONTACTEES.



A) L'entreprise Ofil :

En Janvier, après avoir cerné les enjeux du sujet qui nous était proposé. Nous avons décidé d'axer nos recherches sur les dispositifs de localisation de pertes par effet couronne via la vision ultra-violette.

Après des recherches documentaires, nous avons pris contact avec Monsieur J-C ERNOUX, dans un premier temps afin de recueillir des informations concernant les caméras UV.

M. ERNOUX est un spécialiste de la détection de l'effet couronne par caméra ultra-violette, il s'est intéressé tout d'abord à des caméras Sud Africaines, avant de travailler pendant 15 années sur les caméras DayCor et DayCor II développées par la société américaine OFIL.

OFIL est une entreprise fondée en 1993, qui est devenue le leader du développement et de la fabrication de caméras UV en utilisant un système pour filtrer les UVC solaires afin d'observer ceux émis par un objet. En quelques années OFIL est devenue une société reconnue pour sa qualité et sa fiabilité. Cette réputation lui a permis de travailler en partenariat avec l'EPRI (*Electric Power Research Institute*), pour l'amélioration de ses caméras.

Monsieur ERNOUX nous a fait parvenir de la documentation sur les caméras conçues par OFIL et nous a permis de prendre contact avec Monsieur Pierre CAMPAGNA qui doit venir dans les jours à venir effectuer une présentation et un essai sur des lignes en fonctionnement de cette même caméra commercialisée par OFIL.



B) Synergys Technologies :

Créée en 1998 par Monsieur J-M SINGER, SYNERGYS TECHNOLOGIES est une entreprise française qui vend des outils de maintenance électrique. Après avoir contacté cette entreprise afin de nous donner des renseignements à propos de l'un de leur appareil : la CoroCam 504.

Cet appareil s'inspire de la technologie utilisée par les caméras DayCor et constitue une alternative à cette dernière dans la maintenance du réseau aérien haute tension.

Nous avons dernièrement contacté un responsable commercial de l'entreprise afin d'avoir comme pour la caméra d'OFIL une présentation de la CoroCam 504

La fiche technique de cet appareil est présente en annexe.

C) L'entreprise

Symbion

Power :



Symbion Power
Utility Engineers and Surveyors

Nous avons également pris contact avec une entreprise spécialisée dans l'inspection des lignes électriques, l'entreprise Symbion Power. Cette entreprise est chargée de vérifier l'état des 300 000 miles de lignes électriques implantées en Angleterre.

Symbion Power est une filiale de PDG Helicopters, une entreprise de 40 ans, basée à Inverness, Glasgow, Aberdeen, Dublin and Wolverhampton. Elle est leader au Royaume-Unis dans les services hélicoptés, en cumulant plus de 10 000 heures de vol par ans.

Symbion Power utilise entre autre une caméra UV DayCor afin de localiser des probables défauts sur les conducteurs ou les isolateurs.

Cette entreprise effectue ces inspections à l'aide de caméras UV de deux manières :

- Un contrôle au sol, qui est adapté à une inspection détaillée d'un poste où il y a beaucoup d'éléments à vérifier. Ils utilisent également cette méthode quand l'inspection porte sur un lieu non accessible par hélicoptère (à cause notamment de la présence de bétail ou de chevaux).
- Un contrôle par hélicoptère, cette opération est effectuée à une vitesse comprise entre 35 et 50 km/h selon les niveaux de tension de la ligne inspectée. Cette technique comporte deux étapes. La première consiste à localiser un défaut, elle se fait en volant à côté des conducteurs et en les observant assez en avant de l'hélicoptère grâce au zoom de la caméra. Une fois une émission anormale d'effet couronne repérée arrive la seconde étape, qui consiste à l'analyser. L'hélicoptère se place alors à proximité du défaut en vol stationnaire pour permettre de l'observer.

C'est lors de cette étape que l'expérience est appréciable, parce que le mouvement d'air créé par les pales peut déplacer les porteurs de charge à proximité de ce défaut et ainsi le rendre temporairement invisible à la caméra UV. L'hélicoptère doit donc rester à une certaine distance de l'équipement abimé, et surtout ne pas se placer au-dessus.

Notre interlocuteur est Adam Crick le manager général de Symbion Power. Cette entreprise nous a certifié être intéressée par un partenariat avec RTE si toutefois le gestionnaire du réseau français désirait sous-traiter cette partie technique de la maintenance préventive.

Notre communication par courriels est jointe en annexe.

CONCLUSION.

L'effet couronne est un phénomène d'ionisation de l'air quand il est soumis à un champ électrique.

Le transport d'énergie électrique à des tensions avoisinant les 400 kV crée un champ électromagnétique dans lequel cette ionisation est possible.

Parmi les différentes raisons expliquant l'apparition de ces décharges partielles, le pouvoir des pointes est assez intéressant. En effet ce principe démontre que l'intensité de l'effet couronne autour d'un conducteur électrique est fonction de l'état de surface de celui-ci.

D'autre part l'effet couronne engendre entre autre un rayonnement lumineux dans les longueurs d'ondes de la lumière ultra-violette.

La continuité de l'alimentation en électricité des foyers, des industries, des établissements publics, et de tout autre bâtiment dépend directement de la sûreté des installations de transport d'électricité.

Cette sûreté repose sur la détection et l'élimination des probables défauts de ce réseau, causés par le temps, les conditions météorologiques, la pollution ou encore des erreurs humaines.

Ces défauts, quand ils sont résistifs peuvent être repérés par thermographie, mais cette méthode s'avère obsolète lorsque les défauts sont de nature capacitive, car dans ce cas ils ne sont pas exothermiques, mais ils modifient l'état de surface des conducteurs.

Ses spécificités font de l'effet couronne un indicateur utile dans la localisation des défauts capacitifs et son rayonnement dans le spectre ultra-violet s'est révélé, par hasard, être un bon moyen de le repérer et donc pour localiser les défauts sur le réseau électrique haute et très haute tension.

D'importantes recherches sont menées depuis 50 ans afin de concevoir et d'améliorer un outil de repérage de cet effet couronne en visualisant son rayonnement. Ainsi l'entreprise Ofil a développée la caméra UV DayCor II, permettant de localiser des défauts sur les composants du réseau à une distance de 150 mètre et à une vitesse de 50 km/h.

Cette technologie, déjà utilisée par les gestionnaires des réseaux de transport d'électricité étrangers, représenterait un progrès considérable dans la sécurisation du réseau électrique français. C'est la raison pour laquelle, après une étude du marché de ces caméras et de leur rentabilité, nous avons proposés à RTE, le gestionnaire du réseau de transport d'électricité français, de nous rapprocher du fabricant de la plus performante de ces caméras, la DayCor II.

Après avoir mis en relation le responsable commercial d'Ofil en France, Monsieur Pierre CAMPAGNA avec le responsable du pôle recherches et innovations dans le transport à haute tension de RTE, Monsieur Stéphane BOIS, nous avons assisté à l'accord de ces deux parties sur un essai de cette caméra d'Ofil sur une ligne du réseau de RTE.

Etant conscient que le marché du réseau de transport français est une très belle opportunité pour ces fabricants de caméras UV, nous avons contacté d'autres entreprises afin de donner à RTE la possibilité de comparer leurs services et de les mettre en concurrence.

Nous avons également pris contact avec une entreprise spécialisée dans l'inspection de lignes électriques aériennes, qui utilise cette technologie, afin d'offrir à RTE la possibilité de sous-traiter cette partie primordiale de la maintenance préventive.

PERSPECTIVES.

Le contrôle du bon état des lignes s'avère bien plus efficace et plus rapide quand il est fait depuis les airs, cependant le survol d'un lieu par un hélicoptère n'est pas toujours possible.

D'autre part le survol de lignes haute tension en hélicoptère n'est pas totalement sans risque pour les passagers et cela reste assez coûteux.

Compte tenu de ces données l'utilisation d'un hélicoptère sans pilote, commandé par ordinateur pour inspecter les lignes aériennes s'avère être la meilleure solution envisageable.

L'utilisation d'un tel équipement permettrait à la fois de réduire les coûts des opérations et d'accroître la sécurité des personnes réalisant ces contrôles tout en garantissant la meilleure inspection possible puisque l'observation des équipements serait réalisée dans les trois dimensions.

Des centres de recherche tels que celui de l'EA Technology Ltd en Angleterre se sont penchés sur ce sujet. Ils ont mis au point un drone équipé d'une caméra CCD, cependant des problèmes subsistent en ce qui concerne la commande à distance, les opérations d'évitements 'réflexes' d'un obstacle inattendu ou encore la stabilisation de l'image lors du changement d'élément observé.



Drone de l'EA Technology Ltd

L'étude la plus avancée sur ce sujet est le projet ELEVA (Electric power Line Exploration using Aerial Vehicule) réalisé par l'entreprise Red Eléctrica de España.

Ce projet a pour objectif de contrôler par ordinateur un hélicoptère sans pilote afin d'inspecter des lignes aériennes.

Le drone est sensé toujours avoir la ligne en vue afin de s'en servir pour guider son inspection. Cette partie du projet a été solutionnée en utilisant un système informatique de vision 3D qui génère la trajectoire à suivre.

Quelques conditions à respecter rendent ce guidage autonome très complexe :

- Une distance latérale minimale de 8 mètres avec la ligne
- Une hauteur minimale au-dessus de la ligne
- La trajectoire de l'hélicoptère doit rester parallèle à la ligne

Il faut donc à tout moment une identification de la ligne électrique à suivre, cela a pu être réalisé en utilisant deux caméras et le principe de parallaxe.

Le prototype réalisé est un hélicoptère à gaz d'un mètre et demi et de 4 kg, radio commandé.



Prototype ELEVA

Il reste des points à améliorer dans ce projet pour arriver à un hélicoptère autonome adapté à l'inspection du réseau électrique, parmi ceux-ci figurent :

- Le développement de routines d'urgence, en cas de perte de communication.
- L'adaptation de ces algorithmes à un hélicoptère plus lourd, permettant de transporter une caméra UV et augmentant ainsi son inertie.

BIBLIOGRAPHIE

- Ouvrages définissant l'effet couronne.

Claude GARY -Effet couronne sur les réseaux électriques aériens-

P. PIROTTE -Réseau d'énergie électrique et environnement (effet de couronne et champs)-

Myriam HAMEL -Influence de la variation de la température ambiante sur les vibrations induites par effet de couronne-

Said BELALI -Effet couronne-

IEEE : W.C. POKORNY / R. H. SCHLOMANN / H. C. BARNES -Investigation of corona effects from wet bundle conductors for application to UHV configurations-

R. TADEUSIEWICZ / T. WSZOLEK / W. WSZOLEK / A. IZWORSKI -Recognition of defects in high voltage transmission lines using the acoustic signal of corona effect-

IEEE : P. WANG/ G. ZHANG -The measurement method for corona discharge current under high voltage environment

IEEE : M. YOUSSEF -The use of corona phenomena to measure the voltage of transmission lines

A.TILMATINE -Chapitre 4 : Décharge couronne- -Chapitre 6 : Isolateurs des lignes aériennes haute tension-

debatpublic.fr -Effet des champs électromagnétiques sur l'organisme-

E. MAYERHOFF -Corona and its Effects-

A. ABAHAZEM -Etudes expérimentales des décharges couronne pour la dépollution des gaz-

M. BRAHAMI / A. TILMATINE / F. MEGHNEFI / H. SAYAH -Prédétermination des grandeurs liées aux conséquences de l'effet de couronne sur les lignes haute tension-

M. L. COULIBALY -Caractérisation des décharges électriques se propageant aux interfaces gaz/solide. Relation entre propriétés des matériaux et dimension fractale.

Ya LI / B. SC.A -Contribution à l'étude de l'influence des décharges de couronne sur la perte de volume d'une aspérité de glace portée à un potentiel élevé-

- Ouvrages traitant des appareils de détection de l'effet couronne.
 - Ouvrages traitant de détecteurs par ultrason :

J. C. ERNOUX -Décharges partielles ou effets corona ? Y a-t-il quelque chose de bon ?-

Manuel Usager Détecteur Ultrason ULD-40

Audit Final Report 2006 for NDB

- Ouvrages traitant de caméra infrarouge :

Institut wallon ASBL -La thermographie infrarouge en maintenance prédictive –

- Ouvrages traitant des caméras UV :

Document FMB – Effet corona les décharges rendues visibles-

Document UVIRCO Technologies –CoroCAM 504-

A. PHILIPS –Development of Daytime Corona Inspection Technology-

Document OFIL –DayCor- -DayCor II-

ANNEXES

1. Appareil d'écoute ultrasonore : ULD-40

**ndb Technologie inc.****ULD-40 Détecteur ultrason****Mode d'emploi****Description générale de l'appareil**

Le ULD est un appareil servant à détecter la présence de signaux ultrasonores ou d'impact acoustique. Il permet plusieurs applications industrielles, mais il est conçu principalement pour satisfaire les besoins dans le secteur électrique. Les besoins de ce secteur sont des plus exigeants, car la quantité d'ultrasons générée dans l'air est infime et de courte durée. Cet appareil est utilisé principalement pour localiser des défauts d'isolation ou pour détecter la présence de polluants sur les isolateurs. Il s'avère très utile pour prévenir les anomalies ou pour assurer la protection des intervenants de la maintenance.

Les Capteurs

Le ULD est muni d'un capteur ultrasonore de type piezo-céramique et d'un cône d'amplification qui lui confèrent une sensibilité exceptionnelle. Le cône permet de concentrer une plus grande part de la pression acoustique sur le capteur, ce qui a pour effet d'augmenter la sensibilité de l'appareil de façon mécanique. Il est également muni de circuits électroniques très performants afin d'amplifier les signaux électriques sans ajouter trop de bruit. La fréquence principale de ce capteur est de 40 kHz. Cette fréquence permet une bonne sensibilité dans l'air et permet une plus grande sensibilité aux autres fréquences. À cette fréquence, l'ultrason peut parcourir une grande distance sans trop d'atténuation. Cette fréquence permet des applications de détection avec de grandes distances afin de respecter les distances d'approche des composantes sous haute tension.

Utilisation et fonctionnement

Le ULD est un appareil qui converti une pression ultrasonore en signaux audibles. Il est en sorte un convertisseur de fréquences. Une vibration acoustique ultrasonore est convertie en signaux électriques de même fréquence. Ces signaux sont convertis en fréquence par un convertisseur de type numérique. Cette fonction permet à un humain de pouvoir détecter la présence d'ultrasons. Cet appareil est muni d'un deuxième cône qui permet une sortie directe du signal sonore. Une prise casque permet le branchement d'un ordinateur avec une entrée microphone.



L'affichage bar graphe permet une localisation plus rapide de la source ultrasonore. La valeur affichée est la valeur crête du signal ultrasonore. Cet affichage est 5 fois plus rapide que l'afficheur numérique. Dans le cas de recherche de défauts, ce type d'affichage est utilisé pour localiser le maximum du signal.

Dans l'affichage numérique, le niveau indiqué correspond à la puissance du signal ultrasonore. L'appareil ajuste en permanence le niveau d'amplification afin d'assurer la conversion en fréquences audibles. Le niveau affiché est en valeurs logarithmiques ce qui permet de compresser les valeurs sur deux chiffres au lieu de 5 chiffres. Les valeurs en dB correspondent au rapport entre la plus petite valeur mesurable et la valeur mesurée.

Valeurs en dB	Ratio réel
6 dB	2 X
12 dB	4 X
20 dB	10 X
40 dB	100 X
60 dB	1000 X
80 dB	10,000 X

Capteur externe de type parabolique

Nous pouvons ajouter un capteur spécialisé pour les applications grandes distances. Ce capteur permet de focaliser l'énergie ultrasonore présente à plusieurs mètres du capteur. La parabole agit comme une lentille pour concentrer l'énergie sur un capteur ultrasonore. Le capteur est muni d'un pointeur laser afin d'indiquer la position du point de mesure. Cette fonction laser est applicable dans des endroits semi éclairés. Les normes internationales ne permettent pas une plus grande puissance du pointeur laser. La parabole permet de sélectionner la zone de détection pour bien localiser la source ultrasonore.

Adaptateur de recharge

L'appareil est muni d'une pile lithium ion. Son autonomie en fonctionnement normal est de 2 à 3 heures minimum. Le temps de recharge est estimé à 3hrs dans le cas d'une recharge complète. Un adaptateur de recharge est fourni avec l'appareil et ne doit pas être échangé avec un autre type d'adaptateur. La tension nominale doit être régulée à une tension de 5 volts \pm 10%. Cet adaptateur est universel. Il peut être branché sur un réseau de 50 ou 60 cycles avec des tensions nominales variant de 110 volts à 250 volts maximum. La prise est détachable et permet le branchement d'un cordon avec prises spéciales pour différents pays.

Indicateurs d'état de la batterie

L'appareil est muni d'un indicateur lumineux pour indiquer le niveau de la batterie. Lorsque l'autonomie résiduelle est supérieure à 30 %, l'indicateur est allumé en vert. Par contre, si le niveau est inférieur à 30 %, l'indicateur passe au rouge. Dans le cas d'un niveau inférieur à 10%, l'indicateur passe en clignotement et l'appareil peut décider de s'éteindre afin d'éviter une décharge excessive. Durant l'ouverture, il vérifie l'état de la batterie, mais si le niveau est trop bas, l'appareil se ferme automatiquement après quelques secondes.



Application effet corona

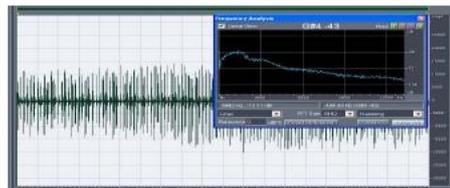
Les applications dans la haute tension sont nombreuses. Une première utilisation est la détection d'effets corona. Lorsque l'on porte un conducteur à un potentiel électrique élevé, le champ électrique à son voisinage peut devenir suffisamment intense pour provoquer l'ionisation des molécules de l'air. Ce phénomène est appelé effet corona. Ce phénomène se caractérise par une teinte bleutée riche en ultraviolets autour des conducteurs et un son parfois audible à l'oreille.

Si une surface pointue présente à sa base une très haute tension, la pointe se retrouve dans l'air avec peu de surface. De plus, une tension élevée par rapport à la surface conductrice provoque une pluie de petits arcs. Ceux-ci génèrent des éclatements gazeux qui engendrent de la lumière, des impacts acoustiques, et même une décomposition chimique qui cause une érosion des surfaces métalliques. Ces pointes conductrices peuvent être produites par la présence de polluants en surface ou par une particule métallique déposée lors d'un nettoyage par exemple. Cette présence d'arcs provoque un amoncellement de matières de plus en plus conductrices ou occasionne une détérioration des surfaces. L'ionisation dans l'air amène de petits éclatements qui engendrent des ondes de choc dans l'air. Le ULD-40 détecte, avec ces capteurs, ce type d'impact acoustique. Ces ionisations varient continuellement à cause de la variation cyclique de la tension du réseau. Un bruit caractéristique pourra être localisé par la sonde parabolique sur de grandes distances. La présence excessive des effets corona occasionne une perte électrique importance due à la tension en cause.



Application décharges partielles

Dans le cas de décharges partielles, l'ionisation d'un défaut engendre un impact dans l'air. Ces impacts de plus ou moins forte intensité peuvent être localisés à travers un panel de protection. Les fuites d'air d'un boîtier permettent aux ultrasons d'être détectés de l'autre côté du panneau. Le son de ce type de décharge est très différent des effets corona. Le son est moins répétitif que l'effet corona.



Forme typique des décharges

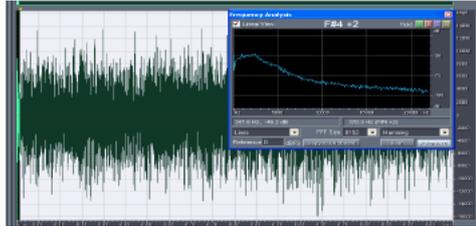
Application transformer

Dans les transformateurs de très hautes tensions, il est possible de détecter la présence d'effets corona sur les céramiques isolantes. La présence d'effets corona sur ces pièces soumises à de très hautes tensions est souvent due à la présence de polluants en surface de la céramique. Le ULD permet de localiser quel isolateur a le plus de problèmes. Il est très utile de refaire un balayage après le nettoyage des composantes pour s'assurer de la durabilité des travaux.



Application localisation de fuite d'air ou de gaz

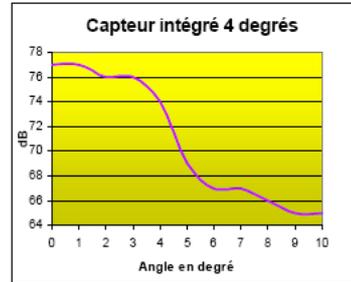
Le ULD peut être utilisé pour localiser de très petites fuites à partir d'une grande distance. Il est possible de détecter une fuite d'air ou de gaz de faible pression 5 psi avec un trou aussi petit que 0,005". Il sera très pratique dans le cas de gaz non détectable par les détecteurs de gaz conventionnels. Le bruit typique est un bruit continu et rempli de plusieurs fréquences.



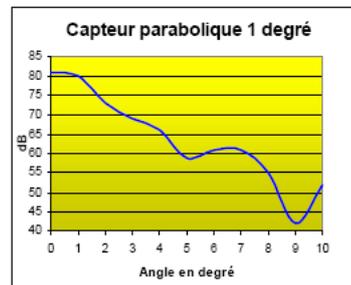
Forme d'onde typique de fuite d'air.

Sensibilité en fonction de l'angle

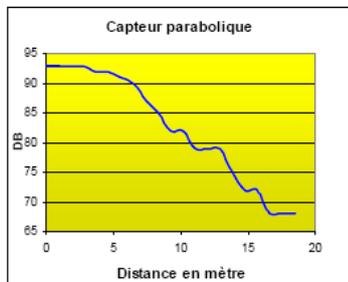
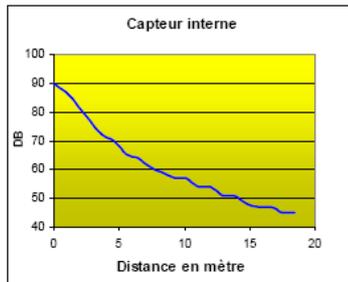
Capteur intégré avec 4 degrés



Capteur parabolique externe avec 1 degré



Sensibilité en fonction de la distance



Spécifications

- ✦ Plage dynamique 96 dB
 - ✦ Fréquence centrale 40 kHz
 - ✦ Largeur de bande 38kHz - 48 kHz
 - ✦ Fréquence de sortie pour 40kHz 2.4 kHz
 - ✦ Fréquence d'échantillonnage 120 kHz
 - ✦ Type de batterie Lithium Ion
 - ✦ Voltage batterie et capacité 3,6 Volts 750mA
 - ✦ Tension du chargeur 5 Volts ±10%
 - ✦ Autonomie 4 hrs
 - ✦ Temps de charge 2,5 hrs
 - ✦ Consommation 160 ma
- ✦ Sensitivité avec capteur intégré
 - Sur trou de 0,005 " @ 5 lbs/pouce 10 pieds
 - Sur trou 0,125 mm @ 0,35 Bar 3 mètres
 - ✦ Sensitivité avec capteur externe parabolique
 - Sur trou de 0,005 " @ 5 psi 25 pieds
 - Sur trou 0,125 mm @ 0,35 Bar 8 mètres
 - ✦ Sortie Audio
 - Impédance de sortie 32 ohms
 - Niveau de sortie 1 volts p-p
 - Fréquence de sortie avec 40 KHz d'entrée 2.4 KHz

2. Appareil de visualisation UV : CoroCam 504

CoroCAM 504

UVIRCO TECHNOLOGIES

CoroCAM™

CoroCAM 504.

THE ULTIMATE DAYLIGHT UV / CORONA VISUALISATION TOOL

The CoroCAM 504 is the latest and most up-to-date portable daylight Ultraviolet / Corona detection and visualisation system with many improvements and features. These include on-board data storage and background UV noise reduction. It features a solar blind optical system housed in a modern sleek compact and very light weight unit. The ergonomic design ensures that the control buttons fall nicely to the users' hand in the palm-strap.

FEATURES OF COROCAM 504

- Can operate in daylight or at night (with artificial light).
- Solar blind for full daylight operation.
- Low ambient light operation by automated filter removal with more sensitivity.
- Lightweight and portable.
- High quality colour viewfinder display.
- On-board data storage by CompactFlash™ card.
- Multiple high resolution video outputs.
- Integration mode to increase sensitivity and reduce noise.
- Menu selectable image-processing to enhance corona display.
- All menu driven functions easily selectable by single thumb operated joy stick.
- Photon event counting and display, colour selectable.
- UV image overlay on visible channel.
- Manual or auto focus and multiple zoom on both channels.
- GPS option.
- Interlacing to different display and recording peripherals.
- Easy software upgrade via CompactFlash™ card.
- Remote control available.
- Airborne model available for Gimbal mount.

Making the invisible visible



● SYSTEM SPECIFICATIONS

Optical System Combined Output	
Video output format:	NTSC (CC504H) PAL (CC504P)
Optical channels:	Visible and UV channels overlaid
Focus type and range:	Automatic/manual focus, 2 m to infinity
Horizontal resolution:	400 TV lines
Window aperture:	Ø=67 mm
Ultraviolet Channel	
Image type:	Mosakrona video CCR
Spectrum:	UV 240 to 280 nm
Field of view:	8° Horizontal 6° Vertical
Update rate:	50 Hz maximum
Focus type:	Auto (slaved to visible), manual
Visible Channel	
Type:	Colour video, full function
Minimum sensitivity:	0.1 Lux (user selectable)
Field of view:	Default synchronised with UV channel
Zoom factor:	25 x optical, 12 x digital
Operator Interfaces	
Application:	Handheld, single hand operation or fully remote controlled
Display:	SVGA colour micro display viewfinder - LCD option available with remote control
Alarms:	Audio, LED & Axx contacts
Control inputs:	Multi pushbutton, single hand control via onscreen multiple menus
Audio:	Headphone output, microphone input
Power System	
Power consumption:	17 watt: 7.2 V, 2.5 A (battery)
Battery type:	7.2 V, 30 Wh rechargeable Li-Ion
Battery run time:	Typical 90 minutes operation
Battery location:	On board, quick replaceable
External supply:	9-16 V 17 VA from car or mains adapter
Mains adapter:	110-240 VAC 50-60 Hz/12 VDC 3 A
Protection:	Reverse polarity, over current over temperature, under voltage
Data Storage	
Storage media:	Removable ConspicFlash™ card
Image format:	JPEG compressed still image
Data format:	Database file, all displayed fields
Audio:	Audio label, wave file
Storage capacity:	512 images per 16 M memory
File download:	External card reader or via USB
Video storage:	External via RCA & S-video output
Mechanical	
Weight:	2.3 kg including battery, excluding accessories
Size:	Length: 302 mm height: 105 mm width: 125 mm
Mounting points:	M 4 hand point - bottom, 1/4" tripod bottom
Environmental	
Operating temperature:	-15 °C to 50 °C
Storage temperature:	-25 °C to 60 °C
Humidity:	Up to 90%, non condensing
IP Rating:	IP55

* Specifications subject to change without notice.

● CONTACT DETAILS:

CoroCAM Marketing
 UVRCD Technologies (Pty) Ltd
 PO Box 39, Perskor Technopark
 0020 Pretoria, South Africa
 Tel: +27 12 349 5760
 Fax: +27 12 349 5200

Email:
 alastair@uvrco.com - Marketing
 ockan@uvrco.com - Technical
 dirk@uvrco.com - Management
 www.corocam.com
 www.uvrco.com

Supported by Eskom Holdings (Pty) Ltd South Africa



3. Extrait de la brochure de la camera DayCor II d'OFIL.

A Real-Life Solution

The DayCor®II camera detects corona, partial discharge and arcing. It allows convenient inspection of transmission lines from the ground and from an airborne platform. It is also suitable for inspection of distribution lines and substations. Applications of UV inspection for detection of partial discharge on motor coils and dry transformers are in growing demand.

Long-Range Detection - The high sensitivity and narrow field of view of the camera enable the inspector to work from a distance of up to 150 meters (450 feet) away, allowing inspection of towers that are difficult to access.

Highly Ergonomic - The unique carrying vest arrangement of the DayCor®II in addition to the large LCD screen reduces the arm and eye strain, typical to handheld cameras. The hands-free operation allows inspectors to use the DayCor®II's functions and take field notes, without having to put the camera aside.



Airborne detection in heavy foggy conditions.

All Lighting and Weather Conditions - the DayCor®II can be operated in full daylight as well as at night. In addition, it has been weatherized to allow use in inclement weather. UV corona and arcing observation can be performed under foggy conditions.

The Basic Features of the DayCor®II Camera:

- Automatic focus of both the visible and UV channels.
- LCD: large - to allow sharing with co-workers; with contrast adjustment control - to best fit illumination conditions; with angle of sight adjustment control - for observer's convenience.
- An easy to adjust UV gain control for optimizing corona detection.
- Zooming of the visible image allows to see the defects causing the corona.
- An all-metal case to prevent Electro Magnetic Interference.

Additional Features and Accessories:

- Long time integration - to extend UV channel exposure and amplify weak corona signals while suppressing unwanted background noise.
- A UV events counter - gives comparative measurements of the corona intensity.
- A remote control (RC) unit that controls all functions of the DayCor®II. The RC unit is supplied with 15m shielded-cable.
- Digital documentation package, mountable on the DayCor®II, including a digital camcorder with reflective LCD, high quality video recording on a flash media, audio pre-amp for voice notes, touch screen interface, mega pixel still capability, date and time stamps, long life battery, cables, tapes, microphone, 128MB memory stick and bundled software.

SPECIFICATIONS ARE SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE
Copyright (c) 2003, OFIL. All other brand and product names are trademarks of their respective owners.

Specifications

Optical Properties	
Solar light rejection	absolute
Field of view H x V	9° X 3.75°
UV overlay accuracy	5 cm for 50 m (1 milliradian)
Focus distance	3 m to infinity
Minimum UV sensitivity	3x 10 ⁻¹⁸ watt/cm ²
Corona detection sensitivity	1.5-2 pC at 8 m distance (Eurotest)
Video standards	full PAL/NTSC standards
Visible zoom	x2 optical and x8 digital
Dusk time operation	1 Lux

Signal Processing

- Analog UV signal enhancement
- Analog long integration - Number of integrated frames: 5, 9, 13, 16 and 20
- Digital event counting



Operation

High resolution LCD	Brightness 320 cd/m ² Resolution 320 x 234 pixels
Video output	PAL/NTSC via BNC jack
Power consumption	12VDC, 16 watt
Weight	5.5 Kg 12 lb
Dimensions L x W x H	25 x 17 x 15 cm 9.8" x 6.7" x 5.9"

Operating Controls

UV Gain level; Visible zoom; Status display; Auto/manual focus; Standby mode; Auto/manual exposure; Long integration period; Counting mode.

DayCor®II Ordering Options:

DayCor®II Basic package includes:

- DayCor®II camera
- Universal AC/12V DC adapter
- Carrying vest with battery pouch
- Two professional grade NIMH batteries 50 watt-hour (each provides more than three hours of continuous operation)
- "Smart" charger for four batteries
- DayCor®II to computer serial cable
- Hard carrying case

Accessories (optional):

- Long time integration
- UV events counter
- Remote control unit
- Digital video documentation package
- Semi rigid carrying case for on-board carrying
- Mount for camcorder
- Voice pre-amp with external microphone



Airborne Gimballed Option by PolyTech Corona (DayCor®) 390-I

A gyro stabilized system for inspection from helicopters, incorporating the DayCor®II in a gimbal, was developed by PolyTech and is available through PolyTech or OFIL.



Contact us:

Ofil Ltd.

Kiryat Weizmann Science Park, POB 4016, Nes Ziona, 74140, Israel
Tel: +972-8-9407953 Fax: +972-8-9407873 Toll Free (US) 866-279 8672
email: ofil@inter.net.il ; lindner@012.net.il ; mendelson@012.net.il
websites: www.daycor.com ; www.seeing-corona.com ; www.ofil.co.il
For worldwide distributors: www.daycor.com/contact.html

4. Communications courriel avec M. Adam Crick, manager général de Symbion Power.

vendredi 7 mai 2010 10:44



Symbion Power
Utility Engineers and Surveyors

Hi Sebastien,

Thank you for your recent enquiry into our corona discharge service.

As we are in a commercial environment, I can answer most of your questions in relative detail apart from our client list who currently use our corona services.

Question 1: Our current camera is a DayCor Corona Camera produced by Ofil. They have various names and models for their cameras now, but ours was one of the originals which can be handheld or mounted inside a gyro stabilised pod attached to a helicopter.

Question 2: Our customer list is on our website, of which some who have higher voltage lines use our services from time to time.

Question 3: We do not currently work in France, but have worked in other European Countries. This isn't to say we wouldn't work in France if the opportunity came our way.

Good luck in your findings.

--

Kind Regards

Adam Crick

General Manager
Symbion Power (a division of PDG Helicopters.)

dimanche 9 mai 2010 11:21

Hello Mr Crick,

Firstly, thank you for your response, it is good to know that you are working with Ofil's camera.

Actually we have been two students in engineering on this subject since october 2009 and we make this study for RTE the manager of French electricity transmission grid. The main objective of this study is to give them the best way to identify defects on the electrical grid.

According to our research the best solution is using a daytime UV corona detection camera, as you do.

Consequently I would like to know if you would be interested in working with RTE north-west.

Lastly, is it possible to have more details on the conduct of an overhead power line inspection?

It would be very interesting for us to know how many people require an overhead power line inspection and if this inspection is done while the helicopter is moving or if it must be hovering to make observations.

Thank you for all,

Best regards,

Sebastian Dufour

mardi 11 mai 2010 08:51



Symbion Power
Utility Engineers and Surveyors

Hi Sebastien,

We would be more than happy to work with you and your clients.

Corona surveys can be carried out in two ways. Firstly; Handheld mode. This is as it says and all inspections are carried out by foot. This is best suited to a more detailed inspection of a substation where there are lots of items to survey. Also, at times, when the helicopter inspections cannot access certain areas (livestock, horses etc) then it should be inspected by foot.

Secondly; Helicopter survey. Depending on the voltage and type of structure, this is carried out at a speed of around 35-50 kmph. The narrow field of view on the corona camera means that the camera looks a fair distance ahead, studying for any discharge from the assets. The aircraft moves along the wires, sometimes over the top but mainly off to one side, until discharge is located and needs to be viewed closer. This is where the helicopter comes to a hover. During this process, it is very important not to get too close to the object or fly over it as the downdraft from the rotor blades will disperse the corona and it will disappear. This also happens if the problem is down wind of the helicopter. We have seen problems many times before only to lose them when moving in closer and washing them away with clean / dirty air. Remember, corona is an airborne activity, if you upset this structure, then the corona will diminish. This all comes with experience, and working with a good pilot and camera operator.

We only record defects and not the whole survey, as no one wants to sit watching endless streams of video of power lines with no problems. They only want the data on problem areas.

If I can be of anymore assistance, please feel free to ask and I will get back to you as soon as I can.

--

Regards

Adam

Symbion Power (a division of PLM Dollar Group Ltd.)

<<http://www.symbionpower.com/>>

Tel: +44 (0)1603 869 257

Mobile: +44 (0)7879 846 361

Skype Name: symbionpower