

Les décharges partielles dans le diagnostic des systèmes électriques

T. Lebey

Laboratoire de Génie Électrique de Toulouse

COMMUNICATION DANS LES JOURNEES DU CLUB EEA

« Diagnostic en Electronique, Electrotechnique et Automatique »

17-18 Mars 2005 Lyon

Les décharges partielles dans le diagnostic des systèmes électriques

Thierry Lebey

Laboratoire de Génie Electrique de Toulouse

Résumé :

Au-delà d'une certaine tension d'alimentation, aucun dispositif électrique ne peut se prévaloir d'être exempt de décharges partielles. Ces dernières sont considérées comme un « ennemi silencieux », dans le sens où elles conduisent, une fois amorcées et si des précautions n'ont pas été prises au préalable, à la défaillance du système dans lequel elles se développent. Compte tenu des contraintes de plus en plus sévères s'exerçant sur les dispositifs et systèmes du génie électrique (électrotechnique ou électronique de puissance) leur existence est de plus en plus d'actualité. L'objet de cet article est de rappeler ce que sont ces décharges et, par des exemples concrets, de présenter quelques méthodes de mesure (principe et limitation) et les outils de diagnostic qui en résultent.

Mots Clés : machines tournantes basse tension, haute tension, convertisseur, modules de puissance, décharges partielles

Thierry Lebey est Directeur de Recherches au CNRS, responsable de l'équipe Matériaux Diélectriques dans la Conversion d'Energie regroupant 8 permanents au Laboratoire de Génie Electrique de Toulouse. Né en 1962, après une formation universitaire en Physique du Solide (Maîtrise) un DEA en microélectronique et une thèse de Doctorat en Electronique, il est recruté en 1990 au CNRS en tant que Chargé de Recherches. Il soutient son HDR en 1998.

Son domaine d'activité est celui des matériaux diélectriques solides utilisés dans les systèmes du Génie Electrique (Electrotechnique et Electronique de Puissance).

Il est l'auteur d'une centaine de publications dans des revues et conférences internationales, de plusieurs brevets étendus à l'étranger et responsable de nombreux contrats de Recherche avec l'industrie.

Thierry Lebey est membre du Conseil Scientifique du Département STIC du CNRS, dont il est le secrétaire scientifique. Il est éditeur associé auprès d'IEEE (Power Electronics), correcteur dans différentes revues internationales (JAP, IOP, IEEE) et expert français dans divers groupes du Comité Electrotechnique International.

Introduction

Les matériaux diélectriques ou isolants qu'ils soient solides, liquides ou gazeux sont souvent le maillon faible des systèmes électriques dont la fiabilité et la disponibilité dépendent assez souvent de la qualité des systèmes d'isolation électriques (SIE). Il convient donc de juger de l'utilité de ces matériaux et de leurs réponses aux sollicitations sous lesquelles ils vont devoir évoluer. Toutefois, compte tenu de l'absence de théorie physique susceptible de décrire leurs propriétés (tant à l'instant initial en fonction de leurs constituants

que dans la durée en fonction des contraintes qui leur sont appliquées) les règles de dimensionnement demeurent encore des plus empiriques. Elles font partie du savoir faire du constructeur de l'équipement. De manière générale, la tendance actuelle consiste soit à tenter de leur conférer des propriétés spécifiques, soit à employer les SIE à la limite de leurs possibilités en gardant en arrière plan la notion de fiabilité. Dans ce cas, des déclassements sont effectués. Les SIE sont utilisés à des fractions de la tension ou à des températures inférieures à celles pour lesquelles leurs propriétés sont avérées. Dans tous les cas, il faut tenter d'éviter de les faire fonctionner dans un domaine de tension au-delà duquel, le phénomène de décharges partielles est susceptible de se produire. Les travaux présentés dans ce qui suit concernent des SIE solides. Dans la première partie de cet article, nous rappellerons succinctement les principales définitions et caractéristiques des décharges ainsi que leurs méthodes de mesure. La seconde partie sera consacrée à des exemples dans le domaine de l'électrotechnique. Il s'agira d'une part des machines tournantes basses tensions alimentées par variateur et d'autre part des machines hautes tension et des techniques d'acquisition utilisables pour leur surveillance. Dans la troisième partie, nous montrerons que les dispositifs de l'électronique de puissance, tels que les modules n'échappent pas à la règle. Enfin, nous conclurons et donnerons nos perspectives

2) Les décharges partielles : grandeurs et définitions

Une décharge partielle est une décharge localisée dans une isolation. Celle-ci est dite partielle car elle ne court-circuite pas l'ensemble de l'isolation. L'extension de la décharge est limitée soit parce que le champ électrique local n'est pas suffisant pour provoquer sa propagation totale (décharge couronne dans un gaz ou un liquide, par exemple), soit parce que la propagation est bloquée par un isolant dont le champ de claquage est plus élevé (en général un solide) (figure1).

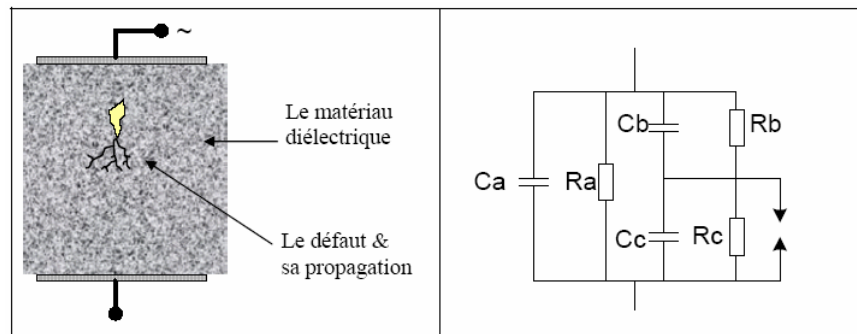


Figure 1 : Représentation schématique et description de type circuit de l'existence d'une décharge dans un SIE solide

Si une DP ne conduit pas immédiatement à la mise hors service d'un appareil, elle est toutefois préjudiciable dans la mesure où elle conduit à une dégradation des matériaux (en particulier solides) sous l'action de diverses contraintes :

- contrainte thermique générée localement par la décharge (par exemple carbonisation du carton d'un transformateur),
- contrainte chimique due aux produits de dégradation générés par la décharge (par exemple ozone ou acide nitrique),
- érosion mécanique (par exemple de l'émail de fils de moteurs basse tension), suite au bombardement par des espèces chargées.

Les milieux fluides (gaz ou liquides) sont relativement moins affectés lorsqu'ils sont libres de circuler : les contraintes thermiques et les produits de dégradation sont rapidement dispersés

dans le volume, alors qu'ils restent localisés et irréversibles dans les solides. De manière générale ces décharges se produisent lorsqu'une tension minimale est appliquée aux bornes d'un défaut à l'intérieur du gaz est occlus. Cette valeur minimale est déterminée en fonction de la nature du gaz à partir de la courbe de Paschen. (Figure 2)

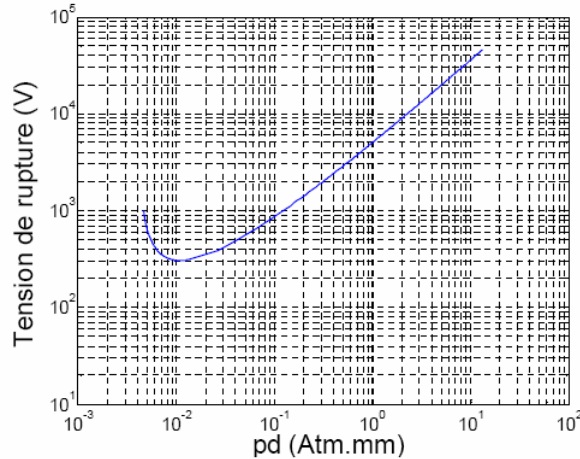


Figure 2 : Courbe de Paschen dans l'air

En 1889, F.Paschen (*Wied. Ann.*, **37**, 69) démontre expérimentalement la loi qui porte aujourd'hui son nom. Cette loi prouve que la tension de rupture d'un gap de gaz peut être décrite par une fonction du produit pression–distance. Ainsi pour un gap d'air et des distances de l'ordre du mm, la tension de rupture est une fonction quasi-linéaire du produit pression distance suivant la loi :

$$V = 30pd + 1.35 \text{ kV},$$

avec V la tension de rupture (en kV), d la largeur du gap (en centimètre), et p la pression (en Atmosphère). On retrouve ici la valeur bien connue de 30kV/cm communément considérée comme la tension de rupture de l'air.

La loi de Paschen décrit en fait le mécanisme de rupture de Townsend dans les gaz : la multiplication d'électrons secondaires produits par collisions dans le gap pour lequel le paramètre prépondérant est le produit pd . Cette loi ne s'applique toutefois que pour des produits inférieurs à 1 atm.cm. Enfin cette loi doit être modifiée pour des gaz électronégatifs comme le SF6, l'Oxygène, etc... qui ont des taux de recombinaisons d'électrons très élevés.

Toutefois, de manière générale, une équation de rupture peut être dérivée et des valeurs empiriques utilisées pour décrire le phénomène ; il s'agit :

- pour la tension de rupture :

$$V_b = B * p * d / (C + \ln(p * d))$$

- pour la rigidité diélectrique (champ électrique) :

$$E_b = p * (B / (C + \ln (p * d)))$$

Avec

$$C = A / \ln (1 + 1 / \gamma)$$

Où γ est le coefficient d'émission secondaire (variant de 10^{-2} à 10^{-3} pour l'azote et l'air et inférieur à 10^{-4} pour des gaz électronégatifs)

Utilisant les formules précédentes pour l'air:

$$A = 15 \text{ cm}^{-1}\text{Torr}^{-1}, B = 365 \text{ Vcm}^{-1} \text{ Torr}^{-1} \text{ et } \gamma = 10^{-2} \text{ et donc } C = 1.18$$

Tableau 1 : Valeur minimale d'apparition d'une décharge dans divers gaz

| Gaz | Vs min (V) | pd à Vs min (Atm cm) *10 ⁻³ |
|-----|------------|--|
| Air | 327 | 0.567 |
| Ar | 137 | 0.9 |
| H2 | 273 | 1.15 |
| He | 156 | 4.0 |
| CO2 | 420 | 0.51 |
| N2 | 251 | 0.67 |
| N2O | 418 | 0.5 |
| O2 | 450 | 0.7 |
| SO2 | 457 | 0.33 |
| H2S | 414 | 0.6 |

Concernant la détection, il s'agit le plus souvent de systèmes dont le rôle est, d'une part, d'extraire des signaux rapides d'amplitude très faible (signatures de DP) et, d'autre part, d'atténuer les signaux dus à la réponse du dispositif sous test à l'excitation du générateur. Ce dernier point est assez facile à réaliser dans le cas d'une excitation sinusoïdale 50 Hz, car le spectre du générateur est très dissocié de celui des DP. Cela est beaucoup moins évident comme nous le verrons dans la suite, dans le cas d'une excitation indicielle, surtout avec les composants de puissance actuels, rapides, qui peuvent générer des fronts dépassant 1 kV/μs. Globalement, ces détecteurs sont donc de nature passe-haut. Deux familles de détecteurs sont considérées ici, qui ont en commun de capter le courant « signature » de DP. La première utilise les dispositifs employés en alimentation sinusoïdale, dont la philosophie est de créer une branche supplémentaire (en parallèle) de court-circuit haute fréquence dans laquelle sont disposés en série un condensateur et le détecteur [KRE]. Nous les appellerons capteurs « de tension ». La seconde utilise des capteurs de courant haute fréquence par couplage magnétique, appelé aussi transformateurs de courant ou d'intensité, et placés en série dans la maille où l'on souhaite détecter les DP. Pour plus de détails, nous renvoyons le lecteur à [BID] par exemple.

Schématiquement et d'un point de vue expérimental, les systèmes classiques mesurent les courants transitoires rapides générés par les décharges partielles (le front de montée de l'impulsion de la décharge est de l'ordre de la ns et sa durée peut aller jusqu'à la microseconde) à l'aide d'un condensateur de couplage favorisant le passage dans une impédance de mesure. (Figure 3)

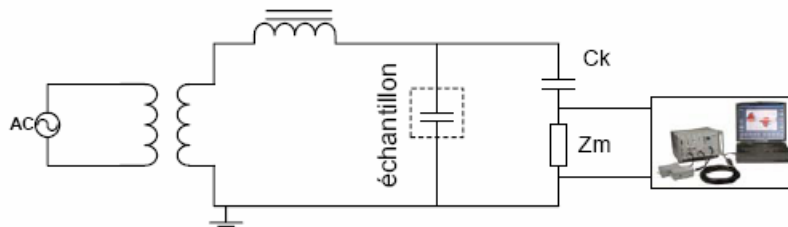


Figure 3 : Principe de la détection des décharges partielles dans un équipement en « hors ligne »

Notons que deux types de couplage peuvent être réalisés suivant que l'on peut ou non mettre l'objet à la masse (figure 4).

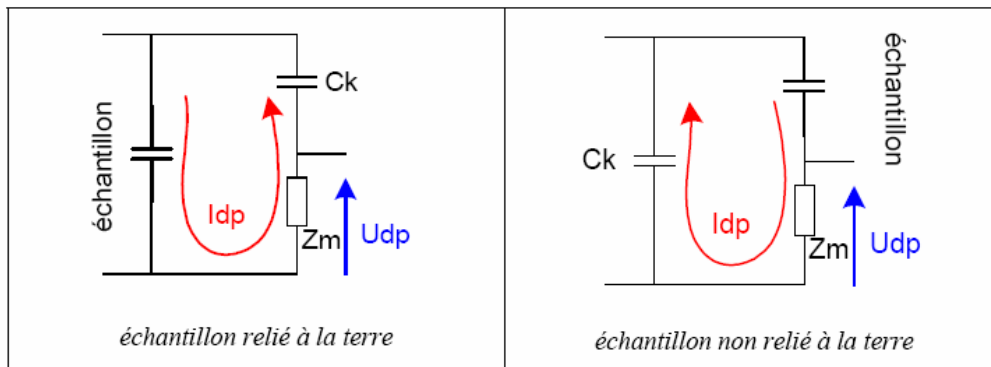


Figure 4 : les deux types de couplages possibles.

Les principales grandeurs mesurées sont les tensions d'apparition et d'extinction des décharges, leur distribution dans la phase et leur amplitude. Concernant cette dernière grandeur, notons qu'il ne s'agit en aucun cas d'une valeur vraie (les dimensions du défaut étant en général inaccessibles) mais d'une valeur dite « apparente ». Nous n'entrerons pas davantage dans le détail de ces définitions.[Norme CEI270]. Un exemple de définition de ces grandeurs est donné dans la figure 5.

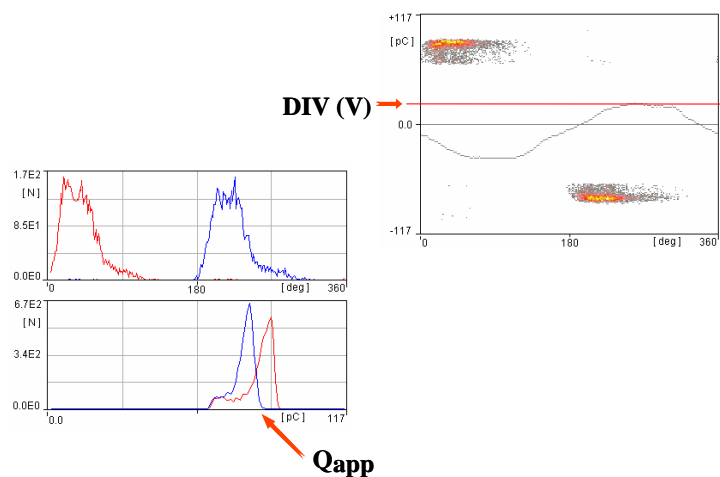


Figure 5 : Définition des principales grandeurs nécessaires au suivi des DP

3) Les décharges partielles dans les dispositifs de l'électrotechnique

3.1) Machines tournantes basses tensions alimentées par variateurs

3.1.1) Position du problème

Les machines électriques actuelles telles que les moteurs à induction, utilisées sur le réseau triphasé alternatif 50Hz donnent un seul point optimal de fonctionnement sur le diagramme couple – vitesse. Plusieurs secteurs d'industrie demandent de la force motrice dans des entraînements à vitesse variable (exemple : la traction électrique, les machines outils, etc.). Dans ce domaine d'application les solutions traditionnelles pour faire de la vitesse variable, jusqu'au début des années 80, étaient peu économiques.

Le développement de l'électronique de puissance durant ces dernières années, en terme de temps et de puissance de commutation, a permis aux systèmes de conversion électromécanique qui emploient des variateurs de vitesse d'obtenir de bonnes performances dynamiques, ainsi qu'un très bon rendement. Par exemple l'utilisation d'une alimentation de type onduleur à Modulation de Largeur d'Impulsion, pour un ensemble moteur - alimentation, offre le moyen efficace d'avoir des vitesses variables. Le démarrage sans sur-couples transitoires (limitation du courant de démarrage $I = 0.3I_n$ par le convertisseur), ainsi qu'un échauffement réduit pour le moteur qui fonctionne à faible puissance amènent des contraintes thermiques et mécaniques réduites.

Cependant, l'augmentation des contraintes électriques imposées par ces convertisseurs peut conduire à des durées de vie très courtes des moteurs ainsi alimentés, diminuant de manière dramatique la fiabilité de ces systèmes. En effet, pour une alimentation sinusoïdale 50Hz la durée de vie des moteurs asynchrones est assez grande (par exemple 10 ans pour des moteurs qui font deux cycles de démarrage par jour).

Par contre, lors de l'alimentation de ces moteurs par des variateurs de vitesse, des défaillances peuvent survenir : la durée de vie peut alors diminuer de façon considérable et la rupture à court terme de l'isolation est à redouter.

L'utilisation IGBT très performants en terme de vitesse de commutation (temps de montée et descente de 20 à 200ns) si elle permet de diminuer les pertes liées à l'amorçage et au blocage peut en effet, du fait de l'existence de fronts d'impulsion supérieure à $5\text{kV}/\mu\text{s}$ à l'entrée du moteur, conduire à une répartition de la tension dans les enroulements d'un stator tout à fait inhomogène conduisant à solliciter l'isolation entre spires de manière phénoménale. Pour les valeurs de fronts les plus importants ($> 5\text{kV}/\mu\text{s}$), 80% de la tension pourra ainsi se trouver aux bornes de la première bobine.

Si, dans les aléas de fabrication, la première et la dernière spire de cette bobine sont jointives (ce qui peut être le cas du fait du bobinage mécanique), alors quelques dizaines de microns d'émail vont supporter 80% de la tension appliquée et ce à la fréquence de découpage, c'est à dire quelques kHz. Les systèmes d'isolation actuels sont des émaux qui n'ont été ni dimensionnés ni prévus pour pouvoir endurer de manière permanente des sollicitations aussi sévères.

Ces contraintes peuvent conduire à l'apparition de décharges partielles (DP) dans l'isolation statorique des moteurs, et par la suite, à la rupture diélectrique. Ce phénomène n'était pas du tout spécifique pour l'alimentation BT et il est couramment rencontré dans des systèmes MT et HT (alternateurs etc.). Nous résumons dans ce qui suit, certains travaux que nous avons développés dans ce contexte.

3.1.2) Identification des contraintes et simulation en laboratoire sur échantillons modèles

Un moteur a été spécialement instrumenté pour visualiser les formes de contraintes associées à une alimentation du type M.L.I. L'originalité de cette approche réside dans le fait que toute une phase a été équipée. Ainsi, non seulement les tensions entre spires et masse, mais aussi les tensions entre spires peuvent être mesurées en fonction de la nature de l'onduleur, du niveau du bus continu, de la charge, de la longueur du câble de liaison entre l'onduleur et la machine...

Typiquement, les formes de tension sont des impulsions rectangulaires de largeurs variables présentant des fronts de tension dV/dt très élevés (quelques $\text{kV}/\mu\text{s}$). La propagation de ces impulsions dans le bobinage, les surtensions auxquelles elles pouvaient conduire ont été visualisées. Nous avons ainsi démontré que contrairement au cas a.c pour lequel la nature de la tension - c'est à dire sa forme, sa fréquence - était la même quelle que soit l'isolation

considérée, une alimentation par convertisseur se traduit par des contraintes différentes suivant l'isolation considérée (spires/spires, spires/masse et entre phases)(Figure 6).

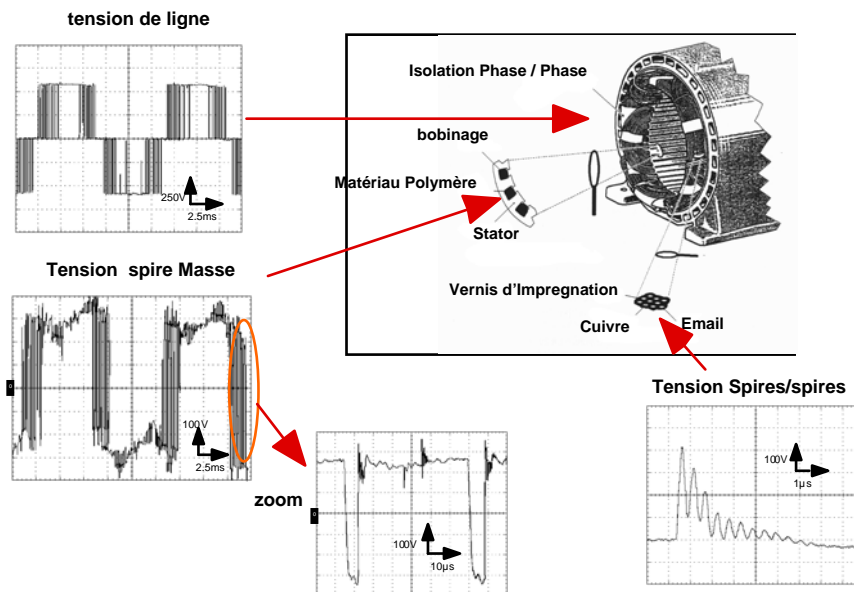


Figure 6 : Caractérisation des contraintes appliquées aux différents types de diélectriques présents dans le bobinage d'un moteur basse tension.

Ceci n'est pas sans répercussions sur la fiabilité des isolants et plus particulièrement sur l'isolation entre spires (fils émaillés). Notons que des émaux « classiques » peuvent ainsi présenter jusqu'à 11 couches de matériaux différents ! La figure 7 représente les conséquences de l'application d'une contrainte du type de celle susceptible d'être rencontrée sur un échantillon représentatif de l'isolation entre spires : une paire twistée. Une décharge lumineuse à pression atmosphérique est observée.

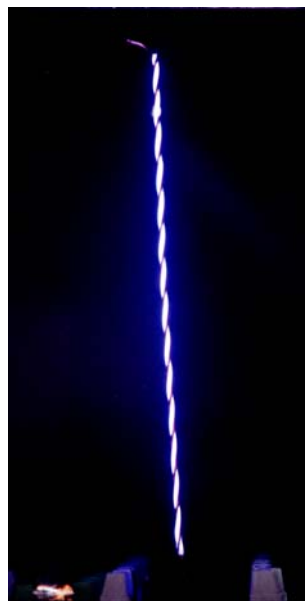


Figure 7 : Conséquences de l'application d'une tension de type MLI sur une paire twistée

Il va de soi que la durée de vie des SIE est alors d'autant plus faible que ce phénomène peut se développer. Pour cette raison, de nombreux travaux ont été développés pour « durcir » les SIE de manière à ce qu'ils puissent endurer sans défaillances ces contraintes. Nous n'entrerons pas dans le détail des opérations nécessaires à ce durcissement mais nous donnons dans le tableau 2 les résultats de vieillissements accomplis dans des conditions identiques ($V=1.5$ kV, $f = 10$ kHz, $dV/dt= 5$ kV/ μ s) sur différents types d'échantillons. Le résultat de ce durcissement, estimé à l'aide de nos bancs de mesure de durée de vie sous contraintes, est spectaculaire. La durée de vie qui était de quelques heures pour une isolation classique devient de l'ordre de plusieurs centaines d'heures pour une isolation durcie.

Tableau 2 : Durée de vie (en heures) de paires twistées sous contraintes non sinusoïdales.

| | Renforcé | Standard |
|----------|----------|----------|
| T= 20 °C | 235 | 2.54 |
| T= 80 °C | 208 | 1.93 |

Toutefois pour des problèmes de coûts, il est rare que ce type de fil soit utilisé, il est donc nécessaire de savoir à priori si telle ou telle machine sera le siège de décharges.

3.1.3) Mesures sur systèmes réels

Concernant les mesures sur machines deux approches sont possibles. La première consiste à effectuer ces mesures durant le fonctionnement réel et en situation. Ces mesures sont dites « on line ». La difficulté réside tout d'abord dans la manière d'extraire de signaux naturellement hautes fréquences mais d'amplitudes élevées (correspondant à la commutation du semi conducteur de puissance) des signaux situés dans le même domaine fréquentiel mais d'amplitudes plus faibles. Ensuite, et afin d'être sûr que de la nature des décharges, il convient d'être à même de faire varier le niveau de tension aux bornes de la machine. Ceci n'est possible qu'en jouant soit sur le niveau du bus, soit en augmentant la longueur du câble entre l'onduleur et la machine. Et finalement, cela est loin d'être aussi simple qu'il y parait ! La figure 8 présente un exemple de mesure on line sur machine basse tension alimentée par onduleur (résultat obtenu dans notre équipe). Notre expérience dans ce domaine nous conduit à penser que ce type de test ne peut pas être utilisé directement en "on line" sur les applications MLI du fait de la richesse des harmoniques qui peut induire en erreur la détection. Pour l'ensemble des raisons précédentes, ce type de recherches est actuellement en stand by.

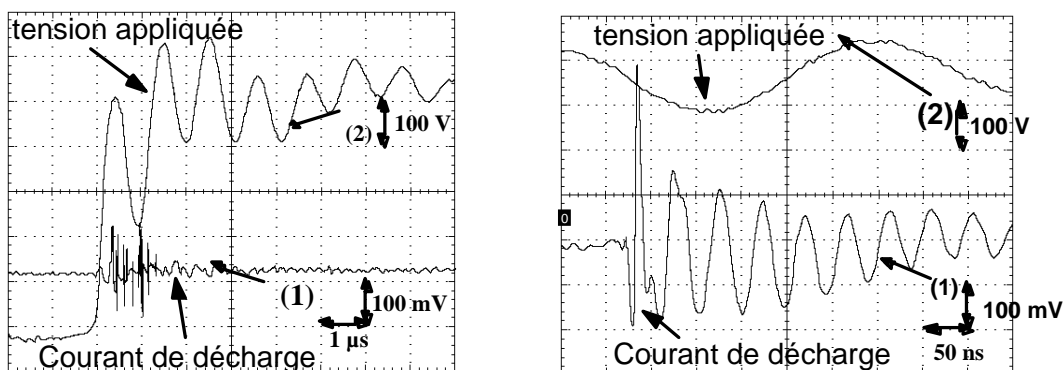


Figure 8 : Observation de D.P. dans une machine alimentée par variateur de vitesse

Une autre approche est toutefois développée. Son idée de base est d'envoyer un créneau de tension très raide, qui sollicite de manière non homogène le bobinage, et de regarder à travers des détecteurs de DP les éventuels signaux HF rapides de courant.

L'objectif est considéré comme atteint si pour un niveau de tension crête de 1500V (3 fois le DC BUS de machines alimentées par le réseau 400 V) on ne détecte pas de DP. Ces niveaux de tension seront à la fois révélateurs du soin apporté à la réalisation du bobinage (est-il ou non correctement rangé ? L'isolation a-t-elle été blessée ? etc.), mais aussi de la possibilité d'alimenter la machine au moyen d'un onduleur.

La méthode de détection peut se présenter schématiquement comme l'indique la figure 9.

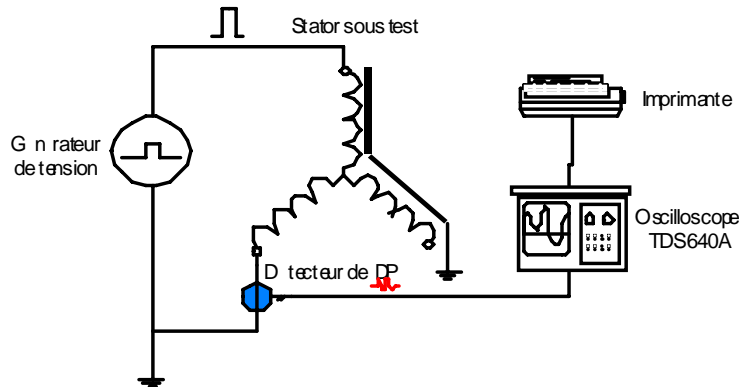


Figure 9 : Méthode de détection de DP en impulsionnel

La tension aux bornes de l'échantillon est augmentée de manière linéaire, au coup par coup, jusqu'à l'observation d'une impulsion de courant HF sur l'écran de l'oscilloscope. La valeur de la tension enregistrée est la tension d'apparition des DP. Le rôle du détecteur est, d'une part d'extraire des signaux rapides de très petite amplitude (signatures de DP), et d'autre part, d'éliminer le bruit dû à la réponse du filtre à l'excitation indicielle du générateur.

Un exemple de mesure DP dans de telles conditions est donné dans la figure ci-dessous.

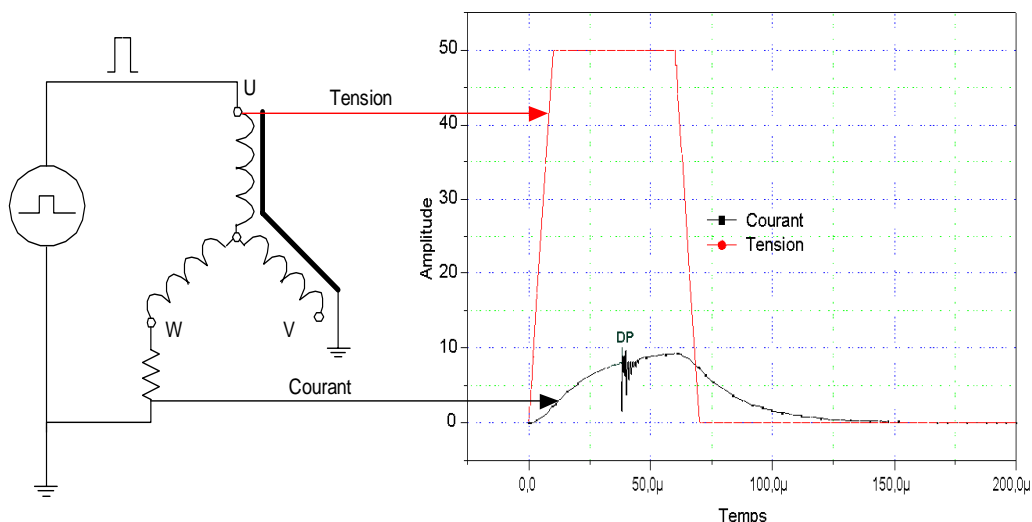


Figure 10 : Exemple de détection de DP dans un bobinage réel.

Une fois validé de manière définitive, ce système permet un classement systématique de ces dispositifs dans le cadre de tests de qualité en sortie de fabrication.

3.2) Machines tournantes hautes tensions

3.2.1) Position du problème

Le cas des machines tournantes hautes tensions est totalement différent. On ne peut éviter leur existence ! Les SIE sont donc spécialement choisis pour être capables de supporter des DP pendant au moins 20 ans et ainsi de permettre un fonctionnement nominal de la machine. Dans la plupart des cas, les matériaux utilisés sont à matrice polymère (polyépoxy ou polyester) renforcés le plus souvent par un matériau inorganique (Verre, SiC, ZnO...). Il s'agit donc de composites [époxy / Verre / Mica] pour les parties droites ou [époxy / SiC] sur les parties externes des barres les développantes) de ces machines afin d'assurer une fonction de répartition/gradation de la tension (figure 11) et photo 1

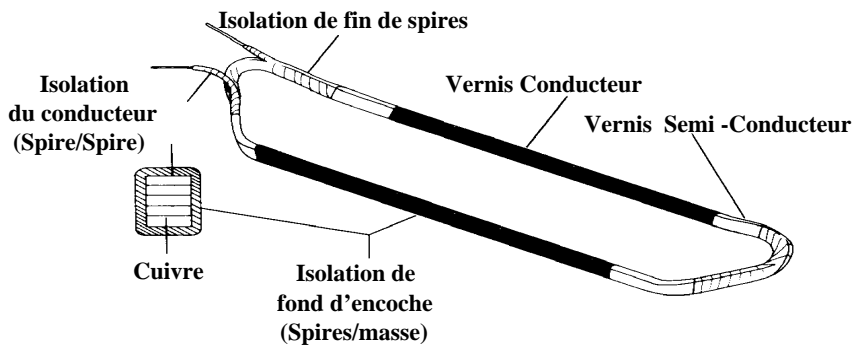


Figure 11 : Exemple de matériaux étudiés : Cas d'une barre d'alternateur H.T.



Photo 1 : Exemple de barres haute tension

La détection en ligne des Décharges Partielles (DP) constitue un outil performant pour le suivi de l'évolution des machines tournantes utilisées dans la production de l'énergie. Toutefois différents systèmes sont susceptibles d'être utilisés. Il s'agit soit de capteurs de tension « classiques » soit de capteurs de courant. Nous présentons dans ce qui suit quelques caractérisations que nous avons effectuées sur des systèmes réels (machines de plusieurs centaines de MW).

3.2.2) Coupleurs Capacitifs et hybrides (capacitifs inductifs) de tension

Ces coupleurs sont placés au niveau du boîtier de connexion de la machine et se comportent globalement comme les impédances de mesures évoquées précédemment. Ils sont associés à un monitoring permettant un traitement spécifique de ces données, propre à chacun des constructeurs de ces dispositifs et fondé sur leur savoir faire. La photo 2 présente une comparaison de deux coupleurs (un capacitif, l'autre mixte [inductif capacitif]) et la photo 3 les baies d'acquisition qui leur sont associés. Enfin, la photo 4 présente leur connexion à la machine au niveau de la boîte à borne.



Photo 2 :Les deux types de coupleurs : capacitif /inductif (PAMOS) et capacitif (ICM)



Photo 3.1 : Système ICM

Photo 3.2 : Système PAMOS



Photo 4 : Connexion des coupleurs à la boîte à borne.

Un exemple type de résultat est donné sur la figure 12 suivante.

Nous n'entrerons pas davantage dans le détail des données qui font encore l'objet de beaucoup de travaux.

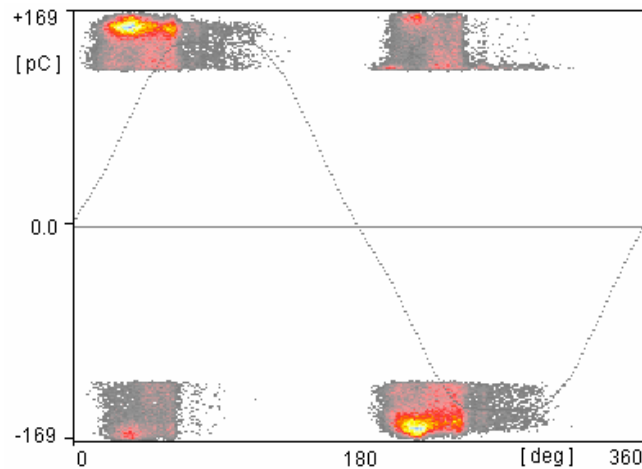


Figure 12 : Exemple de résultat d'acquisition de DP en on line

3.2.3) Coupleurs de courant

Récemment, l'utilisation de capteurs, pouvant être assimilés à des antennes et placés directement dans le stator en contact avec la barre a été proposée [STONE]. De nombreux avantages sont ainsi escomptés: la possibilité de localiser les sources des décharges, un meilleur rapport signal / bruit, etc. Ce système (TGA (Iris Power)), fait appel à des capteurs non conventionnels (SSC : Stator Slot Coupler) constitués d'une ligne couplée en régime transitoire à une barre de l'alternateur. Ils sont insérés au préalable dans le bobinage comme le montre la photo 5.



Photo 4 : insertion des coupleurs de type SSC

Le capteur SSC est composé d'un circuit micro ruban placé à l'extrémité de la partie droite de la barre, couplé en haute fréquence à la propagation des DP [LESAINT]. L'analyse des signaux à chacune des extrémités du micro ruban permet de déterminer le sens de propagation

de l'impulsion. Les sorties du SSC sont appelées "EW" pour des signaux provenant du côté de la développante et "S" pour ceux provenant de la partie droite.

C'est alors le classement de ces décharges par rapport à leur nombre leur amplitude et surtout leur localisation qui permet d'effectuer une surveillance de ces machines. Notons que ce système est très développé en Amérique du nord.

3.2.4) Comparaison des systèmes

Des comparaisons ont été effectuées entre les différents systèmes. Ces tests ont été menés tant sur une barre en laboratoire que sur une machine de 600MW, par injection capacitive ou par suivi de « vraies » décharges. Dans à peu près tous les cas, le système haute fréquence est capable de détecter et classer correctement les décharges si celles-ci se produisent dans un environnement proche du détecteur (de l'ordre du m). Pour des distances d'injection plus importantes, les signaux sont considérés comme du bruit ou encore sont mal interprétés (considérés à tort comme venant de la développante ou de la partie droite).

Concernant les coupleurs plus classiques et par rapport à la **charge réelle** injectée capacitivement dans la partie droite d'une barre (environ 300pC), la **charge apparente** indiquée par l'ICM lorsque celui-ci est calibré au niveau des condensateurs de couplage, est approximativement dix fois plus petite (typiquement de 15 à 30pC). Il en est à peu près de même pour le PAMOS.

On voit ainsi, s'il en était besoin, que si la détection est à peu près au point et ce quel que soit le système, la route est encore longue pour établir les bases d'un diagnostic qui soit fondé.

4) Les décharges partielles dans les dispositifs de l'électronique de puissance

Il existe actuellement sur le marché des composants de puissances pour la traction ferroviaire différents fabricants de module: ABB, EUPEC, DYNEX, MITSUBISHI, TOSHIBA. Avec le développement de l'utilisation des composants IGBT, deux technologies ont été développées pour le packaging de ces modules : les technologies dites « press pack » et hybrides. C'est cette dernière qui s'est semble-t-il imposée.

Les modules actuellement utilisés dans les applications ferroviaires haute tension sont des modules discrets 3300V/1200A ou 1700V / 800A. Le module de puissance haute tension peut être considéré comme un empilement de matériaux diélectriques, chacun d'entre eux étant susceptibles de supporter des contraintes d'un niveau suffisant pour amorcer des décharges. La réalisation de ces modules repose sur une brique de base qu'est l'association substrat / puces.

Chaque substrat porte plusieurs IGBTs et plusieurs diodes (le nombre étant fonction des calibres (en courant et en tension) et de la stratégie de fabrication). Les substrats actuellement utilisés dans les applications fortes puissances sont des céramiques soit d'alumine soit de nitrure d'aluminium, métallisées. Le nitrure d'aluminium présente une très bonne conductibilité thermique (entre 150 et 250 W/m.K) ce qui permet de diminuer la résistance thermique des modules de puissances. Pour des applications plus basses puissances l'alumine du fait de son très faible coût est encore largement utilisée.

Une fois brasée sur une semelle conductrice (AlSiC ou Cu) jouant le rôle de diffuseur thermique, l'ensemble est ensuite noyé dans un gel diélectrique ayant pour fonction d'assurer la tenue diélectrique du module.

Les figures 14 et 15 résument en les schématisant les différents points précédents.

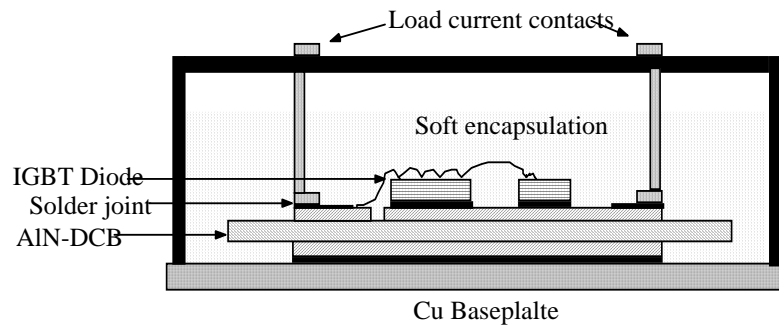


Figure 14 : Représentation schématique d'un module de puissance vue en coupe.

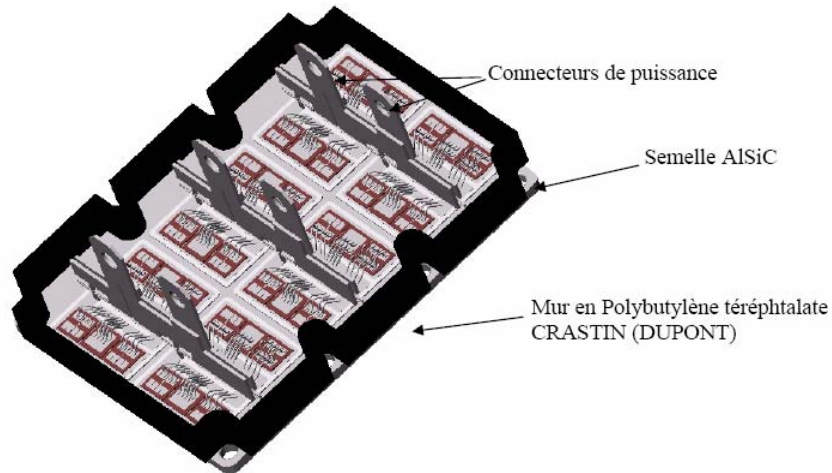


Figure 15 : Représentation schématique d'un module de puissance.

Or, ces systèmes ne sont pas parfaits et des phénomènes comme des dé-métallisations de substrats (photo 6) ou des bulles dans l'encapsulation conduisent à des décharges du type de celles résumées respectivement dans la figure 16 et les photos 7 et 8 pour le gel.

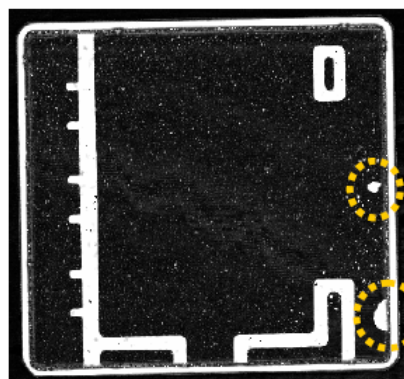


Photo 6 : Imagerie acoustique d'un substrat présentant des défauts

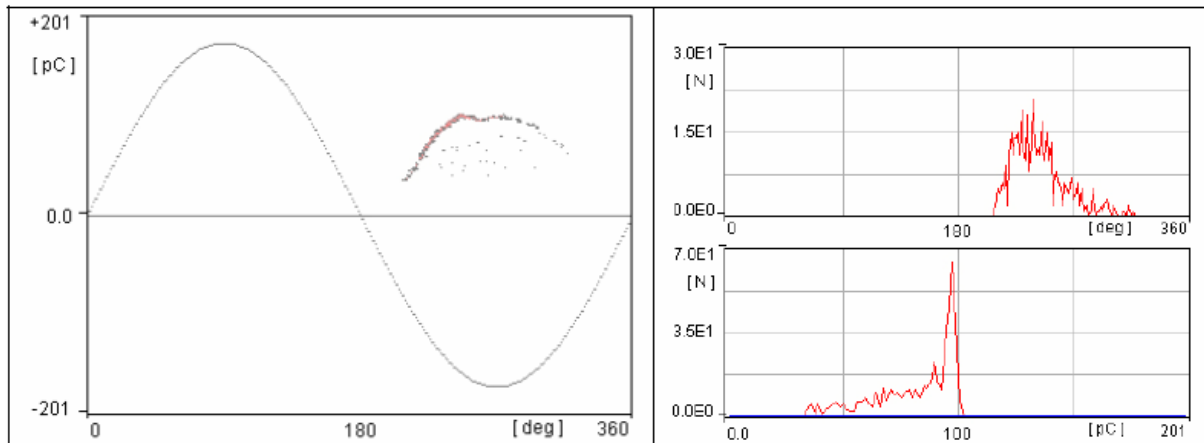


Figure 16 : Diagramme PRPD (Phase Resolved Partial Discharge) du défaut précédent pour une tension crête de 3300 V

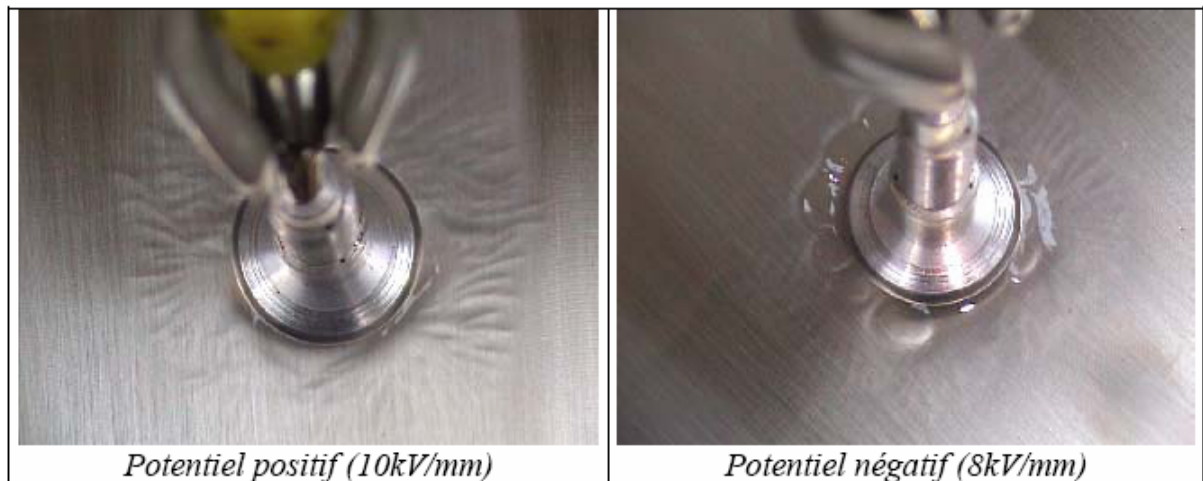
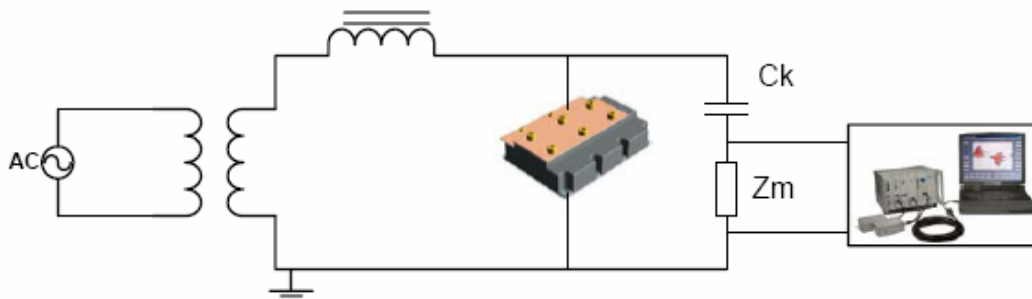


Photo 7 et 8 : Conséquences de la polarité de la tension sur les contraintes induites dans le gel d'encapsulation

Il va de soi que les mêmes risques existent au niveau du module assemblé. Il convient donc de le tester lui aussi. Le test imposé par la CEI est représenté sur la figure 17. Le module 3300V testé semble pouvoir être utilisé sans danger puisqu'un seuil 5kV efficace est mesuré.



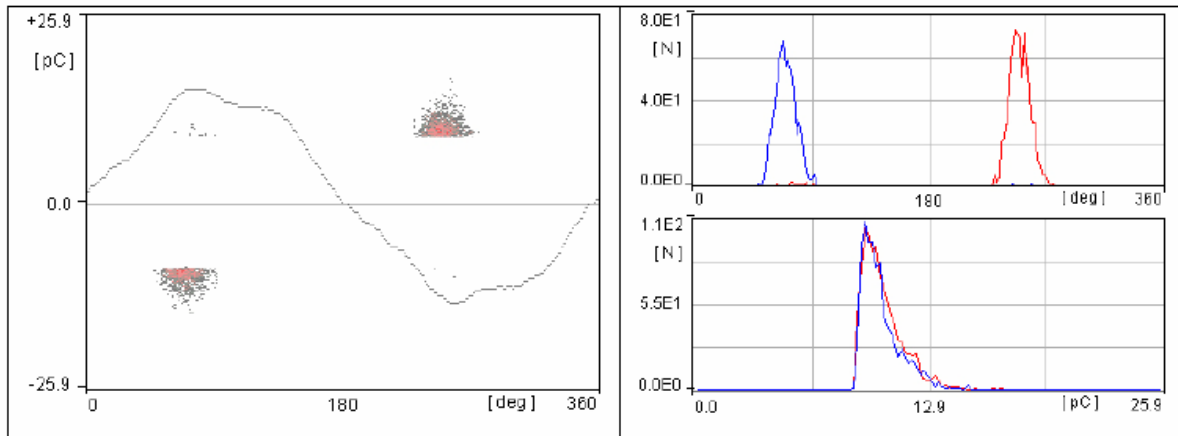


Figure 17 : Détermination de l'existence de DP en accord avec la norme CEI dans des modules de puissance.

Nous avons pourtant montré que ce test était loin d'être suffisant. Utilisant le schéma de la figure 18 qui permet de stresser tous les SIE présents, des signaux de type décharges sont observés pour des niveaux de tension de l'ordre du kV (500 Vdc+ 400 Vac) ce qui est dans la gamme d'utilisation de ces modules.

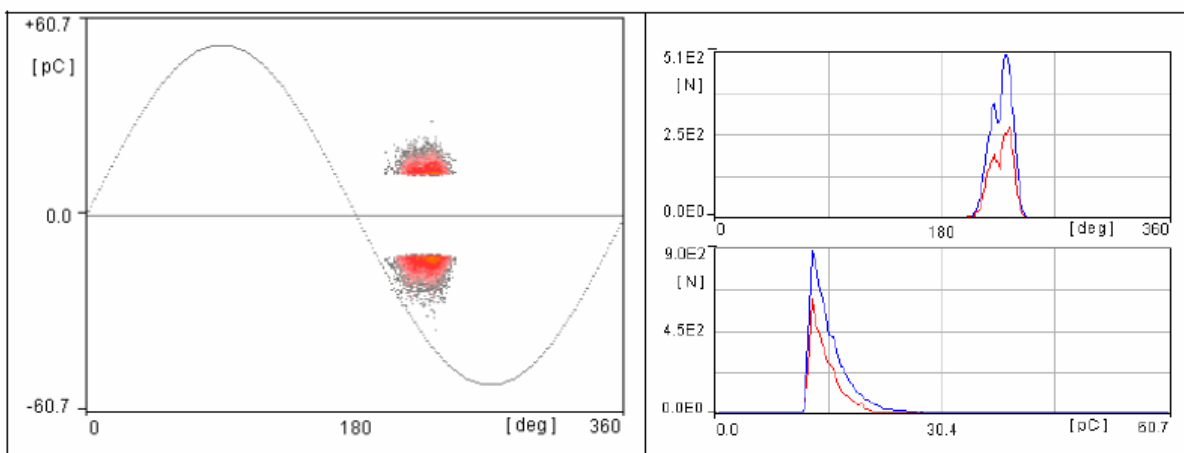
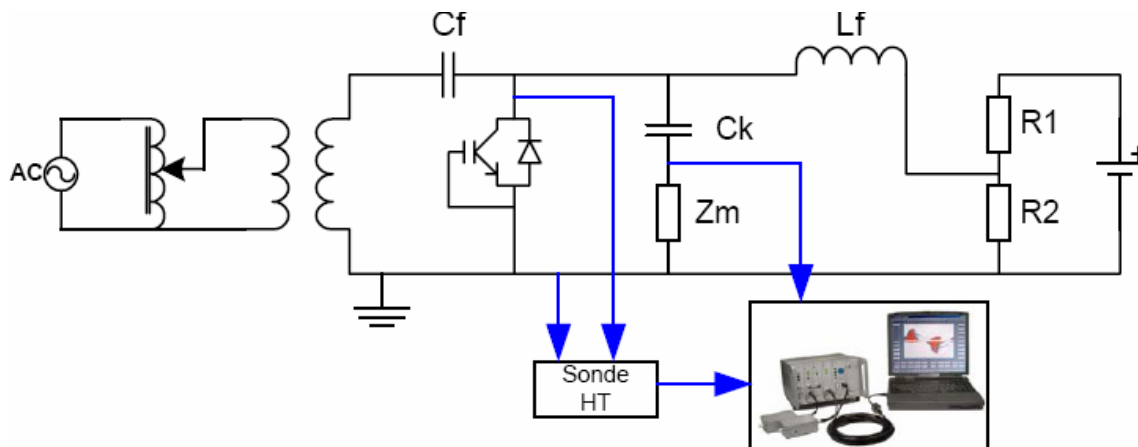


Figure 18 : Détermination de l'existence de DP avec le système breveté LGET/PEARL.

De nombreux travaux doivent encore être effectués dans ce domaine afin de mieux localiser (et de limiter l'action) des décharges

Conclusion

Le phénomène de Décharges Partielles est souvent passé sous silence dans le domaine du génie électrique. Il se révèle pourtant susceptible de permettre le diagnostic de nombreux dispositifs électrique facilitant ainsi leur maintenance et augmentant leur fiabilité. Les critères d'appréciation restent toutefois du domaine du savoir des experts qui n'aiment pas ou peu le partager. Le développement de surveillance en ligne et à distance, associé à l'utilisation de logiciels d'aide à la décision reposant sur du traitement du signal (ondelettes) ou de l'information (logique floue, réseau de neurones) devrait permettre de lever ce dernier verrou. C'est en ce sens que nous pensons doivent maintenant se poursuivre ces travaux.

REMERCIEMENTS

Les travaux résumés ici ont pour la plupart été réalisés dans l'équipe MDCE et dans certains cas en collaboration avec mon collègue et ami Olivier Lesaint. Que tous soient ici remerciés.

REFERENCES

- [BREIT] T.Lebey, S.Dinculescu, F.Breit, E.Dutarde,"A new method to detect Partial Discharges in high voltage Power modules",EPE 2003, Toulouse, Septembre 2003
- [BIDAN] BIDAN P., LEBEY T., MONTSYENY G., NEACSU C., SAINT-MICHEL J., « Transient voltage distribution in inverter fed motor windings: Experimental study and modeling », IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 16, N° 1, janvier 2001.
- [CEI 270] Norme Internationale CEI 60270 3^{ème} édition « Techniques des essais à haute tension – Mesures des décharges partielles » 2000
- [KRE] KREUGER F.H., Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment, Butterworth & Co (Publishers) Ltd, 1989.
- [LESAINT] O. Lesaint, T. Lebey, S. Dinculescu, H. Debruyne and A. Petit, "Propagation of fast PD signals within stator bars,performance and limitations of a high frequency monitoring system", Int.Conf.on Prop. and Appl. of Diel. Mat.(ICPADM), Mai 2003, Osaka, Japon
- [STONE] H.G. Sedding, G.C. Stone and S.R. Campbell "Measurement of partial discharges on operating turbine generators with a novel wide band coupler", Proc. Of the 3rd ICPADM, , july 8-12, Tokyo, 1991