

CHAPITRE 2

MONTAGE ET INSTRUMENTS

Dans la dernière décennie, plusieurs travaux ont porté sur la possibilité de mesurer les pertes diélectriques en utilisant une rampe de tension ainsi que l'application de cette méthode comme outil de diagnostic pour les enroulements statoriques [8, 10-13, 20, 21].

2.1 Spectromètre diélectrique dans le domaine du temps

Une instrumentation de laboratoire a été développée afin de mesurer le courant de polarisation pour des échelons de tension plus élevés que 1 kV. Le fait de pouvoir polariser à plus haute tension (jusqu'à 20 kV) permet d'obtenir des courants de polarisation de beaucoup supérieurs au bruit ambiant et d'éliminer les fluctuations aux longues mesures correspondantes aux basses fréquences. Le montage de laboratoire est illustré à la figure 2, présentée ci-dessous. Les essais en laboratoire utilisent, habituellement, un montage à deux électrodes actives (appelé UST pour « Ungrounded Sample Test »). Habituellement, lors de ce type d'essai on utilise la carte GPIB (General Purpose Interface Bus) pour la lecture du courant de charge et de décharge, tandis que les essais faits en centrale emploient un montage à une seule électrode active (appelé GST pour « Grounded Sample Test »).

La figure 1 présente l'arrangement instrumental des deux situations.

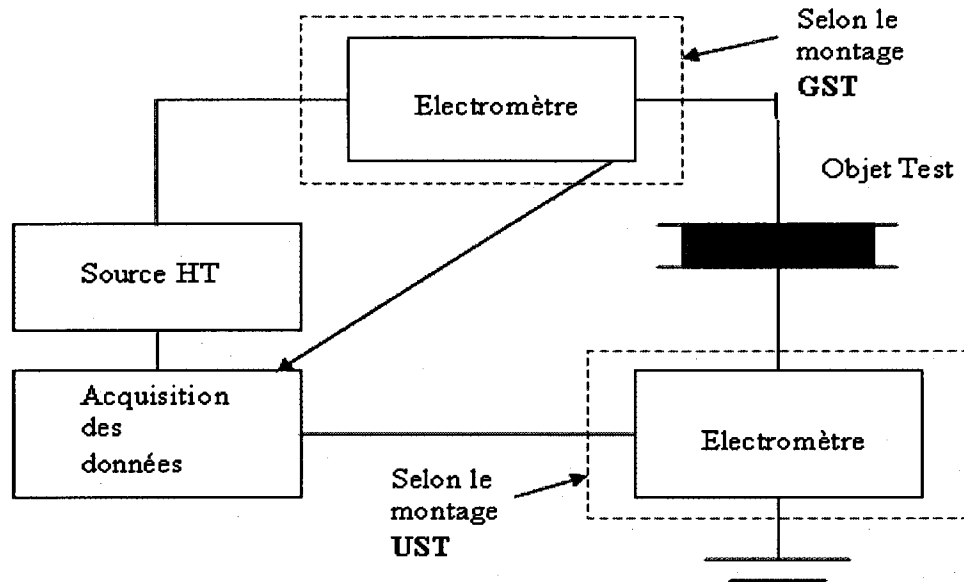


Figure 1 Arrangement instrumental sur le site ou en laboratoire pour la mesure du courant

Cette spectroscopie est réalisée à l'aide des instruments existants sur le marché. Des appareils fonctionnant dans le domaine du temps jusqu'à 20 kV et dans le domaine des fréquences de 10^{-3} à 10^{+3} Hz jusqu'à 30 kV sont maintenant commercialement disponibles. La description des modèles utilisés dans notre cas sera présentée plus loin dans ce chapitre. Notre système de contrôle est réalisé autour d'une application LabView [22], permettant de piloter la source haute tension, l'électromètre et le relais haute tension. La source haute tension est une source à courant continu contrôlable de la compagnie TREK dont la tension maximum est de 20 kV.

La résistance R_2 branchée en série avec l'échantillon (figure 2) a deux fonctions. La première est de protéger l'électromètre contre les forts courants capacitifs survenant au début de la charge et de la décharge. En effet, l'électromètre mesurant le courant pourrait alors être endommagé étant donné la fragilité de cet instrument. L'autre fonction de cette résistance est d'obtenir une bonne immunité au bruit lors de la mesure. L'électromètre a une entrée de type amplificateur de courant qui nécessite un contrôle de

l'impédance de l'objet d'essai. Pour obtenir de bons résultats de mesure sur un objet capacitif, il est préférable d'utiliser une résistance en série donnant une constante de temps entre 0,5 s et 2 s [23]. Cette constante de temps peut être réduite par l'utilisation des diodes dans le circuit de mesure. La résistance R_2 en série avec le pont de diodes D sert à empêcher l'électromètre d'être exposé à des courants qui pourraient l'endommager lors de la polarisation [24]. La combinaison des diodes en série avec la résistance R_2 permet d'augmenter davantage l'impédance série lors des mesures à faible courant étant donné leur impédance non linéaire, donnant ainsi un bon rapport signal/bruit.

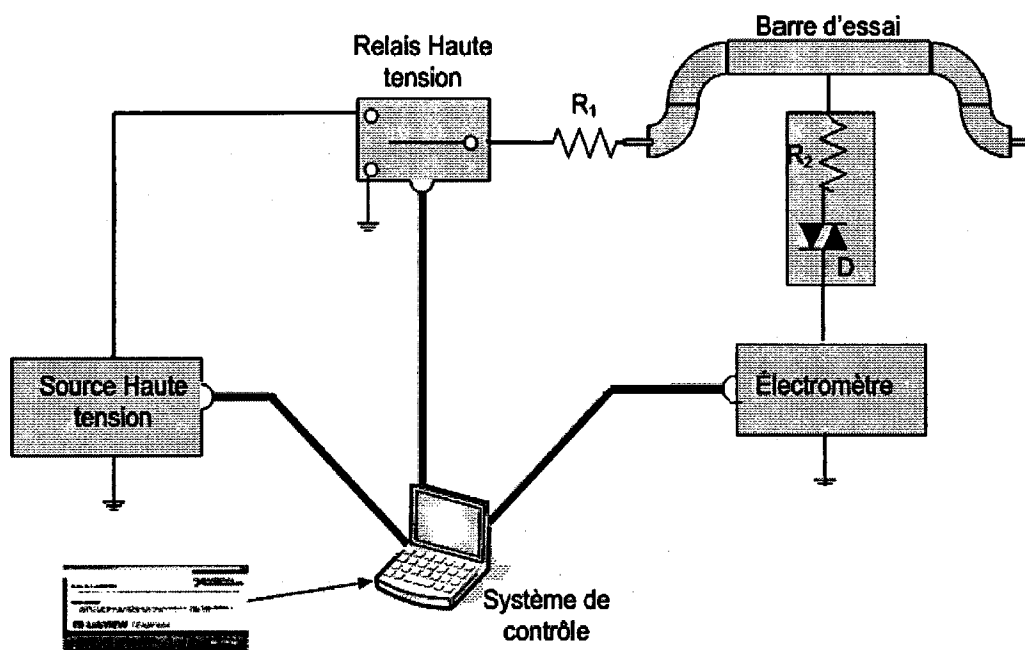


Figure 2 Montage utilisé pour les essais de montée progressive en haute tension continue en laboratoire

La figure 3, montre l'utilisation des électrodes de gardes, donnant une séparation entre la réponse de la partie droite d'une barre et celle des développantes. Afin d'éviter une apparition d'une importante tension de surface suite à la séparation entre la garde et la partie droite de la barre, la largeur de cette séparation doit être la plus mince possible.

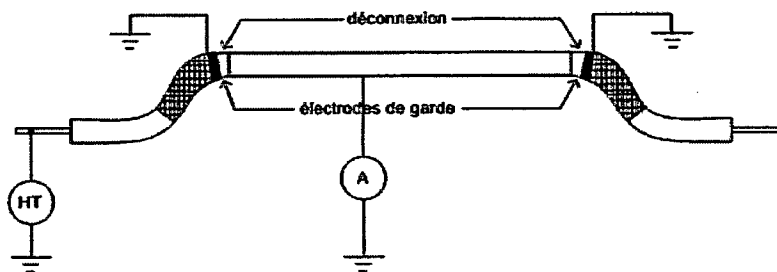


Figure 3 Contribution permettant de mesurer les propriétés du revêtement anti-effluves

2.2 Matériel requis pour le spectromètre

2.2.1 Électromètre

L'électromètre est un multimètre à Courant Continu de haute résolution. En tant que tel, il peut être pratiquement employé pour toutes les mesures de charges. En plus, ses spéciales caractéristiques d'entrée et sa haute sensibilité aux faibles mesures lui donne tout le privilège par rapport aux multimètres numériques classiques dans les mesures de : tension, courant, résistance et des mesures de charges. Les modèles Keithley (6517A, 237, 2010) offrent une grande précision et une haute sensibilité aux mesures. Le modèle 6517A est le plus précis par rapport au deux autres. Il offre des mesures, de courant de 100 aA à 20 mA, de tension de 10 μ V à 200 V, de résistance de 1 Ω à 10^{17} Ω et des mesures de charge de 10 fC à 2 μ C. Il peut être également commandé par l'intermédiaire d'une interface IEEE-48 (GPIB) intégrée par un système de commande tel qu'un ordinateur.

2.2.2 Source de la haute tension en courant continu

La compagnie TREK propose un modèle d'amplificateur de puissance haute tension courant continu TREK 20/20A, conçu pour fournir des tensions de sorties dans une plage de 0 à ± 20 kV en courant continu et un courant de charge de 0 à ± 20 mA à partir d'un signal d'entrée compris entre 0 et ± 10 V courant continu avec un gain de 2 000 et une impédance d'entrée de 50 k Ω . Cet amplificateur sera utilisé pour nous produire une tension de sortie jusqu'à 20 kV ce qui représentera notre source de haute tension.

2.2.3 Relais haute tension

Notre choix s'est porté sur le relais modèle E 60 kV de la compagnie Ross Engineering Corporation. Ce relais peut supporter un courant dans une plage de 1 mA à 600 A. Le but de son utilisation dans notre montage est de permettre de décharger l'échantillon dans une boucle externe. Son utilisation dépend de la source de tension utilisée puisque certaines sources de tension, telle que le TREK 20/20 A, possèdent un système de décharge incorporé dans la source. Donc, dans le cas de la source TREK 20/20 A le relais haute tension n'est pas utilisé, tandis que pour des sources de tension, telles que la source Glassman et la source Spellman, le relais haute est utilisé puisque ces deux sources de tension (Glassman et Spellman) ne sont pas équipées d'un système de décharge.

2.2.4 Système d'acquisition

Notre système d'acquisition de données est un ensemble d'instruments et d'appareils interconnectés permettant de faire automatiquement une série de mesure sur l'objet d'essai (figure 4). L'analyse et le choix des caractéristiques du système sont fortement liés à l'application.

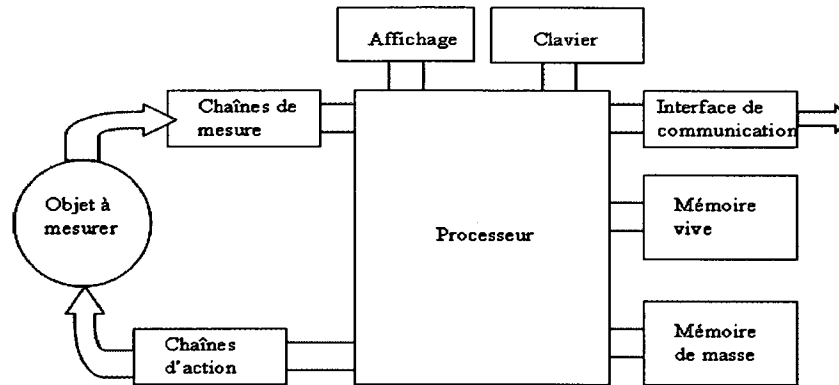


Figure 4 Système typique d'acquisition de données

2.2.5 Carte d'acquisition (DAQ)

Les cartes universelles d'acquisition permettent de réaliser à bon marché des applications d'acquisition et de contrôle de processus. Il ne faut pas oublier que leur résolution et leur précision sont limitées, qu'elles sont sujettes à passablement de bruit et les fréquences d'échantillonnage sont limitées tant par le nombre de canaux à mesurer que par la nécessité de les commander directement par le processeur. Ces cartes sont dotées d'un multiplexeur 16 canaux asymétriques (commutable en 8 canaux différentiels) et suivi d'un amplificateur d'instrumentation à gain programmable (gain 0,5/1/2/5/10/20/50/100), puis du convertisseur AD (Analogique-Digital) 12 bits (gamme $\pm 5V$ ou 0-10V) et d'un tampon (FIFO). Elles sont dotées aussi de deux convertisseurs DA (Digital-Analogique), avec leur tampon et les commutations de gamme de sorties associées (gamme $\pm 10V/0-10V$ avec référence interne ou $\pm EXT/0-EXT$ en référence externe, celle-ci étant limitée à $\pm 11V$). Huit entrées/sorties digitales avec lesquelles on peut travailler individuellement bit à bit, ou de manière globale en tant que groupe. On trouve aussi; des compteurs programmables pour gérer la fréquence de balayage entre canaux et la fréquence d'échantillonnage, plus deux compteurs disponibles pour gérer des signaux externes de synchronisation (impulsions de durée ou de fréquence programmable, comptage d'événements ...), et un connecteur interne (RTSI) pour la

synchronisation entre cartes multiples d'acquisition puis un autre connecteur externe pour relier les signaux.

2.2.6 Bus d'instrumentation (GPIB)

Le processeur communique avec l'ensemble des chaînes de mesure ou d'action au travers d'un bus numérique externe, ce qui permet de répartir l'instrumentation à proximité des points de mesure, et d'exploiter des appareils 'intelligents' effectuant une bonne partie du traitement du signal (capteur compensé, analyseur de spectre, synthétiseur de signaux ...). Notre système d'instrumentation est aussi bâti autour d'un bus GPIB (General Purpose Interface Bus) comme une autre alternative de lire le courant de polarisation en communiquant avec l'électromètre. Ce bus (GPIB) a été développé par Hewlett-Packard en 1965, il permet de relier un maximum de 15 appareils, avec une longueur de câble inférieure à 20 mètres. La vitesse de transfert est de 400 kbyte/s à plus de 1 Mbytes/s selon les options de construction. L'avantage d'une telle normalisation est qu'une quantité croissante d'instruments de différents fabricants sont disponibles et permettent de satisfaire pratiquement toutes conditions d'essai.

2.3 Arrangement Instrumental pour effectuer un essai de montée progressive en tension

Les essais réalisés en laboratoire sont différents de ceux réalisés en centrale électrique. Cette différence apparaît surtout dans l'emplacement des instruments de mesure formant le montage électrique puisque, à la différence des essais en laboratoire, on a accès seulement à une électrode de l'enroulement statorique en centrale. Les deux versions, laboratoire et terrain, sont présentées ci-dessous.

2.3.1 Version laboratoire

Les essais en laboratoire sont plus simples que ceux en centrale puisque l'échantillon, qu'il soit une barre ou une bobine, est complètement enlevé de la machine électrique et est transporté au laboratoire. Ceci nous offre la possibilité d'utiliser les deux électrodes (conducteur (s) en cuivre et la partie droite de l'échantillon). Pour ce genre d'essais, l'électromètre ou le multimètre est placé en aval de l'échantillon à diagnostiquer par l'entremise d'un circuit protecteur [24] (figure 5). La source de haute tension continue, variant suivant une rampe constante (1 kV/min), charge l'échantillon à travers la résistance haute tension, montée en série, jusqu'au niveau maximum de tension d'essai. Lors de nos essais de laboratoire, présentés dans le chapitre 6, ce niveau maximum de tension d'essai est compris entre 20 kV et 35 kV pour des périodes d'essai variant de 0 à 25 min. Ces périodes d'essai représentent le temps de charge ou le temps de lecture du courant de charge via le système d'acquisition. L'essai peut être arrêté avant d'atteindre ce temps de charge si des non linéarités importantes apparaissent dans la courbe courant versus tension ou si la pente de cette courbe devient asymptotique ou erratique. Ceci afin d'éviter un endommagement du système d'isolation de l'échantillon. Le relais haute tension est utilisé pour décharger l'échantillon après l'arrêt ou la fin de l'essai pour un temps de décharge au moins égal à la moitié du temps de charge (chapitre 3). Ceci va, d'un côté, nous éviter d'avoir un offset dans la courbe courant versus tension si un deuxième essai est directement lancé, et d'un autre côté, il va protéger l'expérimentateur contre un choc électrique si celui-ci s'approche de l'échantillon pour une raison ou pour une autre. Ces essais de laboratoire requièrent des conditions d'environnement favorables, c'est-à-dire un environnement moins humide et moins pollué.

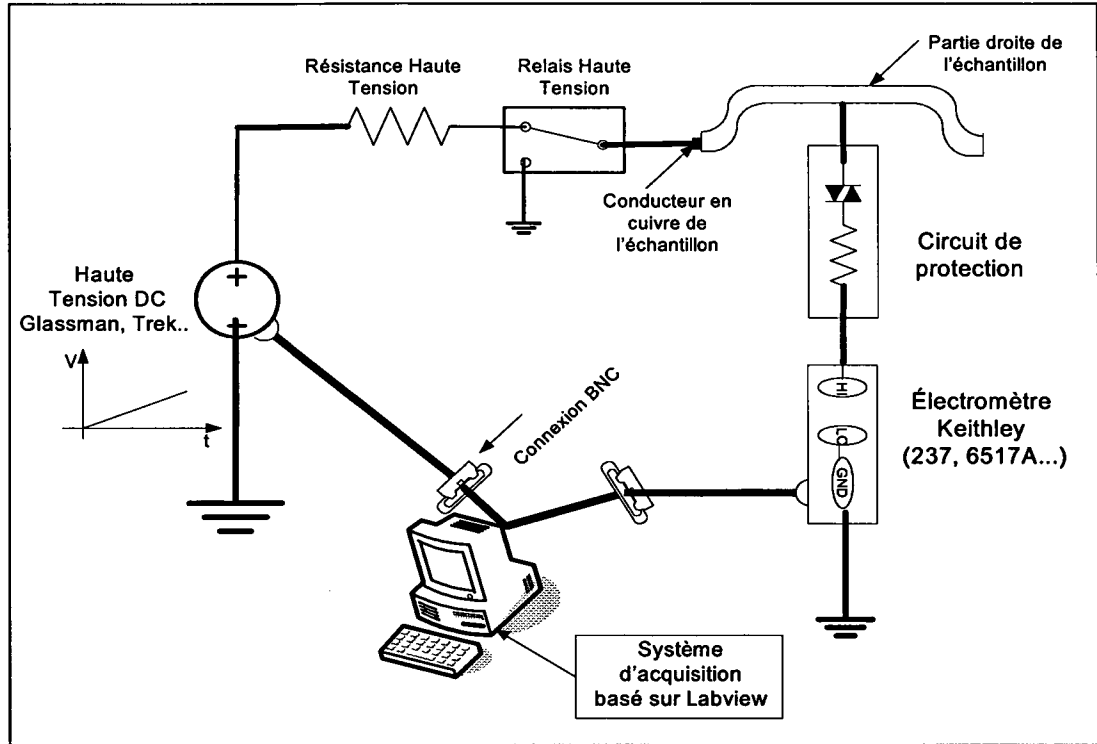


Figure 5 Arrangement instrumental lors des essais réalisés en laboratoire

2.3.2 Version terrain

Sur le terrain (en centrale) la deuxième électrode, en l'occurrence la partie droite, n'est pas accessible (insérée à l'intérieur de l'encoche fixée sur le noyau statorique). Seulement le conducteur en cuivre est accessible. Donc, on a accès à une seule électrode ce qui nous exige une configuration du montage d'essai différente de celle en laboratoire. Selon le théorème de Kirchhoff [25], dans un circuit électrique monté en série il existe un seul courant qui traverse tous les composants formant ce circuit (circuit électrique à une seule boucle), et reste le même dans toute la boucle (figure 5).

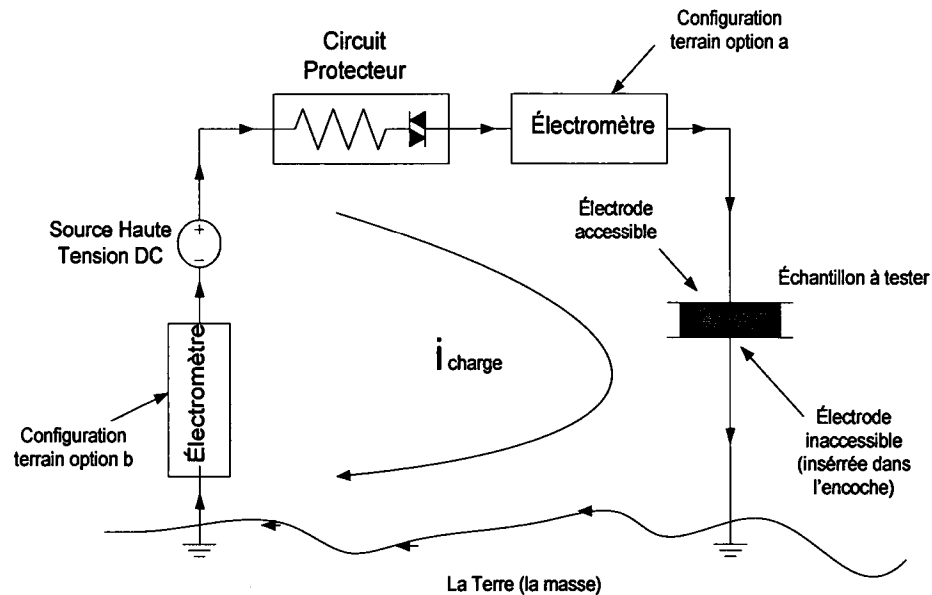


Figure 6 Courant de charge traversant un circuit monté en série

Donc il faut penser à trouver un emplacement pour l'électromètre, différent de celui de laboratoire, afin de pouvoir lire ce courant. On peut proposer deux configurations (figures 7 et 8). Dans le montage de la figure 7, l'électromètre est directement relié à la borne haute tension, ce qui l'expose à des fortes impulsions de courant qui peuvent l'endommager. Pour y remédier il faut mettre un circuit protecteur entre la borne haute tension et l'électromètre [24]. Le montage de la figure 8 représente la meilleure configuration. L'avantage principale de cette dernière est que l'électromètre se trouve protégé contre les pics de courant puisqu'il n'est pas exposé d'une manière directe à la haute tension (il est relié à la borne de basse tension de la source haute tension). On utilise généralement des sources de haute tension à masse flottante (Floating Ground), tel que la source Glassman, source Spellman...etc. La machine électrique étant en arrêt, l'essai est réalisé de la même façon que celui en laboratoire à l'exception des points suivants :

- L'électromètre est monté en amont de l'échantillon à diagnostiquer;

- Il peut ne pas s'agir d'une seule bobine/barre mais plutôt d'un ensemble de bobines/barres, montées en série formant une partie ou l'ensemble de l'enroulement statorique de la machine électrique, supposées avoir un problème au niveau de l'isolation de masse;
- La grandeur du courant est plus importante que celle de l'essai de laboratoire, d'ordre d'une centaine de microampère voir plus;
- Les conditions d'environnement ne sont pas les mêmes. Il peut s'agir d'un environnement moins propre que celui en laboratoire. Donc, avant de commencer l'essai, il est conseillé de procéder à une mesure de la résistance et de l'indice d polarisation de l'échantillon ou des échantillons en question [1].

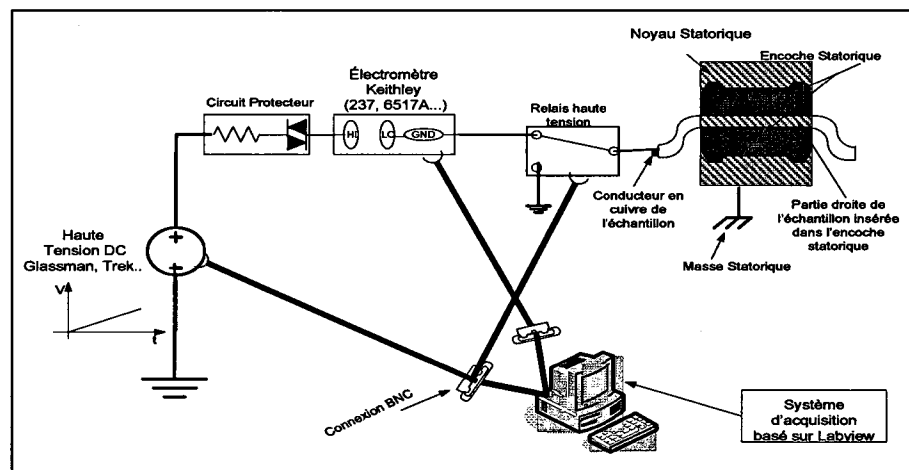


Figure 7 Première configuration de terrain réalisée en centrale électrique pour le diagnostic de l'état d'isolation d'une machine électrique. L'électromètre est placé entre le circuit protecteur et le relais

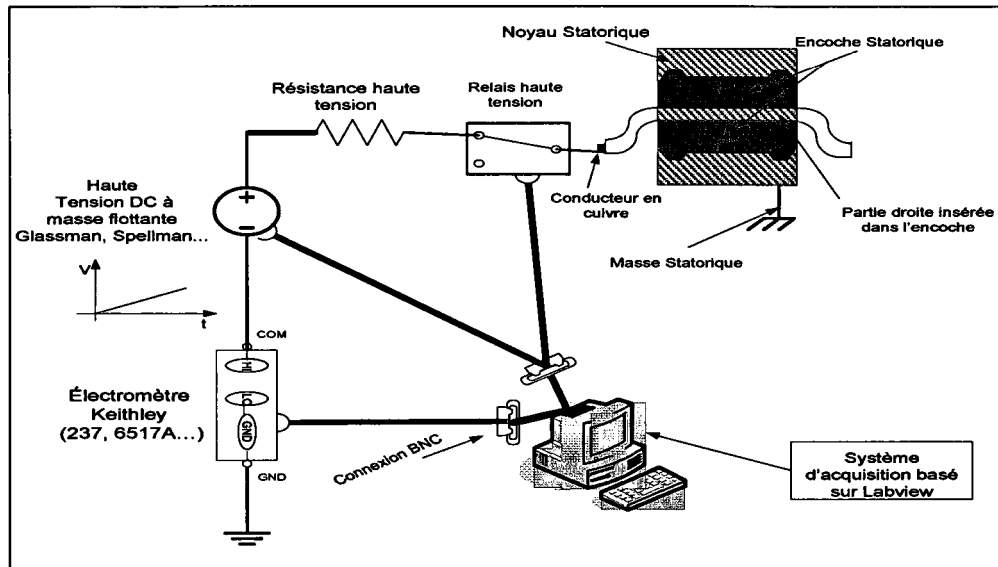


Figure 8 Deuxième configuration de terrain réalisée en centrale électrique pour le diagnostic de l'état d'isolation d'une machine électrique. L'électromètre est placé entre la source haute tension et la terre.

2.4 Logiciel de contrôle

Le logiciel de contrôle est une application Labview©. Il s'agit d'un langage de haut niveau spécialisé dans l'acquisition, le traitement et la représentation des données. Il utilise les pilotes des fabricants et libère l'utilisateur de toute une série de tâches répétitives par des instructions orientées sur l'acquisition (par exemple acquisition d'un bloc de données, transformation de Fourier, optimisation de paramètres, analyse statique, représentation graphique...). Notre système d'acquisition, piloté à partir d'un ordinateur, est conçu autour d'un environnement graphique très puissant. Une partie ou la plate forme de ce logiciel de contrôle était déjà réalisée par le technicien Michel Drouin. Donc, à partir de ce travail déjà fait plusieurs opérations ont été modifiées et ajoutées telles que l'acquisition par la carte GBIP, des choix de sources de tension, des choix des instruments de mesures de courant... etc. La programmation se fait sous forme graphique à l'écran, chaque tâche d'acquisition étant représentée par un icône, la succession des opérations dépendant des liaisons entre les icônes (plus quelques

structures de base : boucles, choix conditionnels ...). L'interface utilisateur, dans l'application se fait sous forme d'un panneau fictif d'appareil, représenté à l'écran et actionné par la souris. Ici aussi on peut exécuter en interactif tout ou une partie du programme, ce qui permet un développement aisé. De plus, il n'est pas nécessaire de changer d'environnement (éditeur, compilateur) pour l'écriture proprement dite du programme. Les applications Labview ont l'avantage d'être orientées vers l'acquisition de données et d'éviter la programmation proprement dite pour ne se concentrer que sur les conditions d'acquisition, mais elles exigent un compromis entre les possibilités (fortes pour les langages, faibles pour les menus) et la nécessité d'un apprentissage plus ou moins long. Les principales pages de dialogue de notre logiciel se résument comme suite :

2.4.1 Page de démarrage

Au début de chaque exécution, une page de démarrage apparaît indiquant à l'utilisateur le début de l'essai (figure 9). Aucune saisie de données n'est faite à ce niveau là. L'utilisateur doit tout simplement appuyer sur le bouton Démarrer un essai. Pour évaluer un essai déjà fait et reprendre la simulation complète en temps non réel, on clique sur le bouton Visualiser un essai déjà effectué.

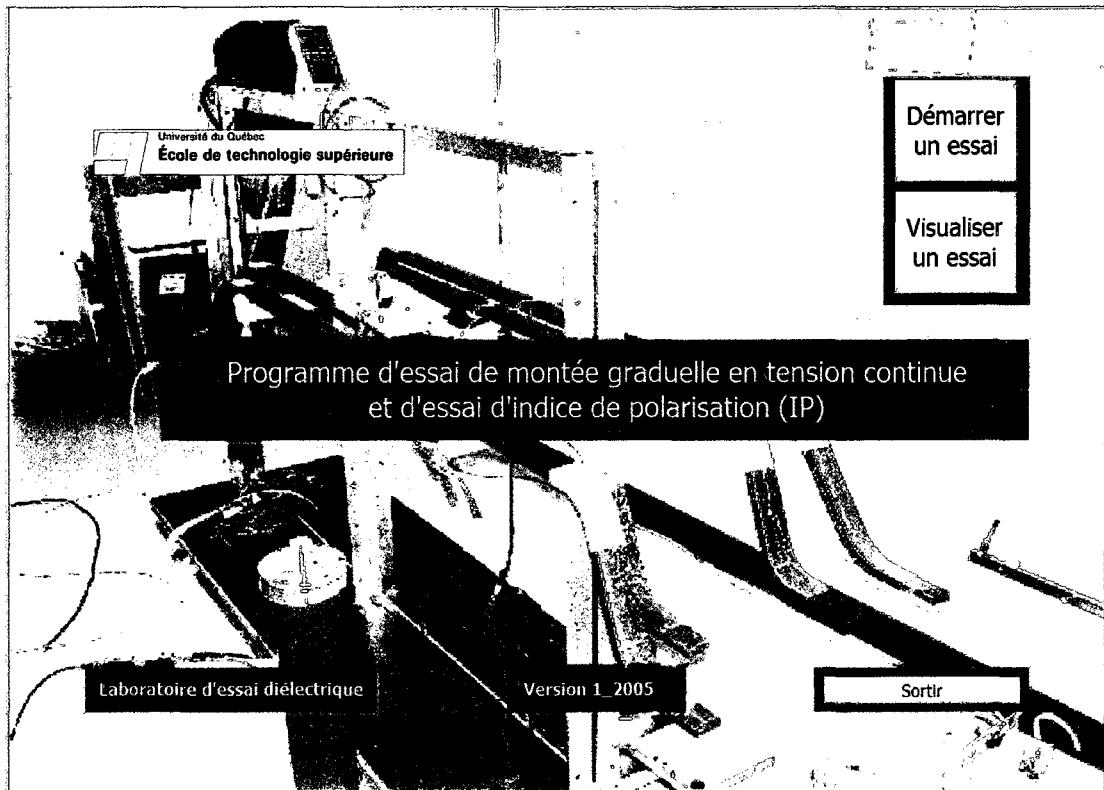


Figure 9 Page de démarrage du logiciel

2.4.2 Page des caractéristiques

Cette étape nous permet simplement la sauvegarde de certain nombre d'informations additionnelles propre à l'application sans que ces informations affectent l'essai lui même. Répartie en trois sections (Identification, Caractéristiques de la machine et Paramètres d'essai), toutes les informations jugées pertinentes seront saisies directement dans les cases blanches ou noirs correspondantes (figure 10). Cela donnera plus d'entité à l'application en question et aidera tout les utilisateurs à bien identifier et bien étudier les conditions du déroulement de l'essai. La sauvegarde de ces caractéristiques se réalise automatiquement ou manuellement à travers un bouton de sauvegarde.

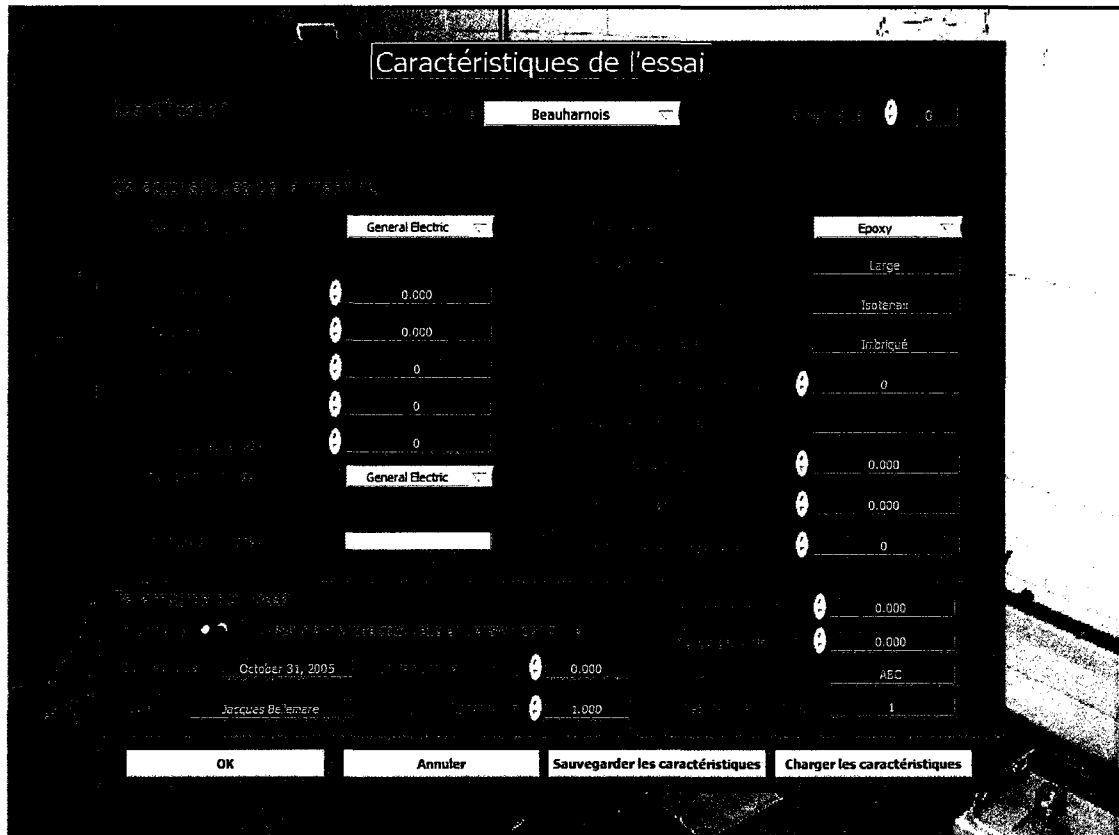


Figure 10 Page des caractéristiques

2.4.3 Page paramètres pour l'essai rampe

Répartie à son tour en quatre sections, cette boîte de dialogue présente les données les plus importantes que l'utilisateur doit saisir (figure 11). La section paramètre de mesure comporte la durée de la rampe ou de l'essai, le niveau maximal de haute tension, le gain de l'amplificateur et le nombre de lecture par seconde désirés. Ces données vont affecter directement l'essai. Une saisie soignée est donc recommandée. La deuxième section, en l'occurrence la lecture du courant, offre deux choix d'acquisition soit par la carte GPIB ou par la carte DAQ. Chaque choix offre la possibilité d'utiliser différents instruments de mesure pour la lecture du courant. Ce choix est en fonction du type

d'instrument à notre disposition et de la précision recherchée lors de la lecture du courant. L'option GPIB offre plusieurs choix d'instruments de mesure de courant de marque Keithley [24] (237, 6517A, 2010 et 2001). Ces instruments sont les plus utilisés dans notre environnement de travail, mais il est toujours possible d'ajouter d'autres instruments de mesure de courant possédant l'option de lecture via le bus GPIB si désiré. La source de haute tension continue est commandée seulement via la carte DAQ. Cette dernière présente un choix de sources de haute tension (TREK 20/20A, Glassman et spellman). Ces instruments peuvent à la fois appliquer la haute tension d'essai et lire le courant de charge. Mais ils sont moins sensibles pour des courants de l'ordre de $1\mu\text{A}$ et moins. Pour ces grandeurs de courant, l'option GPIB est nettement meilleure puisque la mesure de courant se fait via des instruments de haute sensibilité [26]. Dans le cas d'une mesure de courants d'ordre supérieur à $1\mu\text{A}$, la lecture du courant via la carte DAQ peut se faire et a l'avantage de nous épargner d'utiliser un instrument de mesure de courant dans le montage.

La troisième section est réservée au choix des canaux d'entrée et de sortie de la carte d'acquisition. Ces canaux servent à véhiculer ou échanger les informations entre la partie hardware (instruments de mesure, source haute tension) et la partie software (le logiciel de commande). Il y a huit possibilités pour les canaux d'entrée et deux pour celles de sortie. La section paramètres de l'arrêt de l'essai concerne les conditions maximales des niveaux de lectures protégeant ainsi l'ensemble des composants impliquées dans l'essai. Une fois que ces données sont saisies, une confirmation doit se faire en cliquant sur le bouton OK. Une boîte de dialogue s'ouvre vous demandant de saisir le nom de l'essai et de choisir son emplacement. L'utilisateur n'a qu'appuyer sur le bouton OK pour lancer l'essai.

Paramètres pour l'essai rampe

Paramètres de la mesure

Durée de la rampe (min.):

Tension maximale (kV):

Echantillonnage (data/s):

Gain de l'amplificateur:

Atténuation:

Lecture du courant

Carte GPIB

Carte DAQ

Choix d'un instrument de mesure:

Paramètres de l'arrêt de l'essai

Courant maximum (uA):

Choix des Canaux

Canal de Lecture du Courant AI:

Canal de Lecture de la tension AI:

Canal de Lecture de la tension de sortie AOwt:

OK Retour Annuler

Figure 11 Page paramètres pour l'essai rampe

2.4.4 Page essai de montée graduelle en tension continue

Cette page (figure 12) permet de suivre l'évolution de l'essai en temps réel, affichant le comportement des trois grandeurs du courant (capacitif, absorption et total) en fonction de la tension appliquée sur le système d'isolation en question. Le courant capacitif (se reporter au prochain chapitre pour plus de détails) est directement calculé et tracé puisque toutes ses composantes sont connues. L'équation à partir de laquelle ce courant est calculé est la suivante :

$$I_{\text{capacitif}} = C \frac{dU_c}{dt}$$

où C est la capacité de l'échantillon telle que lue par un multimètre (en μF), $\frac{dU_c}{dt}$ est la variation de la tension d'essai U_c (en volts) en fonction du temps t (en seconde). Ce rapport représente la pente de l'essai (V/s) qui est constante durant toute la période de l'essai. Ce courant capacitif est représenté par une ligne horizontale de couleur verte. Le courant total ou courant de charge mesuré est tracé en temps réel. Le système d'acquisition enregistre 1 667 valeurs par seconde puis il calcule la moyenne de ces valeurs et affiche la valeur de cette moyenne sur le graphe courant en fonction de la tension. Donc, à chaque seconde une seule valeur est affichée pendant toute la période de l'essai et c'est ainsi que la courbe du courant total (couleur rouge) est faite. À partir de cette courbe une évaluation approximative du courant est tracée. Cette droite représente la somme des deux courants capacitif et d'absorption. Deux valeurs du courant total sont utilisées pour tracer cette droite. La première est la valeur du courant total lorsque la tension appliquée atteint 10% du niveau maximal de tension d'essai. La seconde est déterminée à 30% du niveau maximal de la tension d'essai. Dans cette plage de tension (de 10% à 30% du niveau maximal de tension d'essai) le comportement diélectrique est considéré généralement linéaire. Une fois que ces deux points sont déterminés, la droite du courant capacitif plus le courant d'absorption est directement tracée avant la fin de l'essai. Elle est superposée à la courbe du courant total et représentée par une couleur bleue. Toute la partie du courant total excédant cette droite est présumée représenter le courant de fuite. La progression de la rampe en tension (tension commandée en kV) et la lecture du courant (courant total en μA) en fonction du temps (en seconde) sont aussi indiquées par des cadrans à droite du graphe. Un bouton d'urgence offre la possibilité d'arrêter l'essai à tout moment si une déviation raide très prononcée de la courbe survient. On peut donc détecter un défaut d'isolation sans endommager le système d'isolation de l'objet d'essai. Pour se faire, dès qu'un problème survient l'utilisateur doit appuyer rapidement sur le bouton arrêt d'urgence.

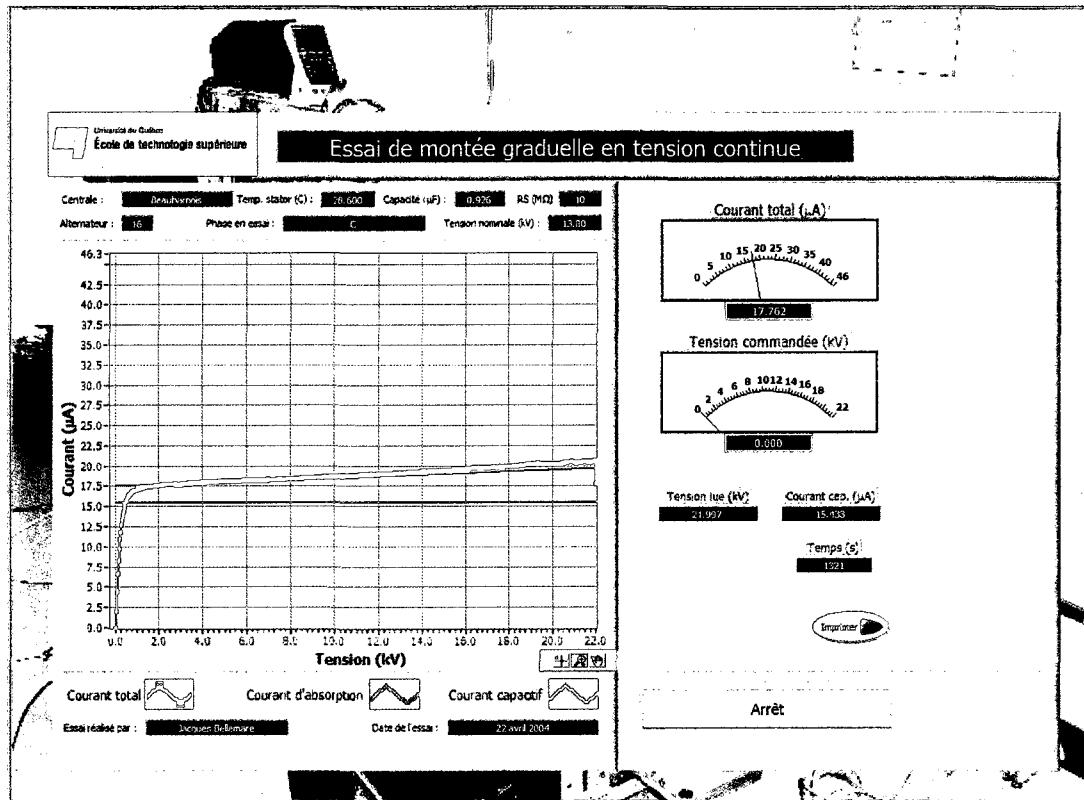


Figure 12 Page essai de montée graduelle en tension continue

L'importance du logiciel est primordiale dans un système d'acquisition, cependant il reste inutile d'acheter un système sophistiqué s'il faut consacré des années à développer le programme d'application. Dans ce contexte, notre option est de faire un développement complet du logiciel au moyen d'un langage structuré de haut niveau et d'un driver permettant d'accéder au matériel tout en respectant le cahier des charges.