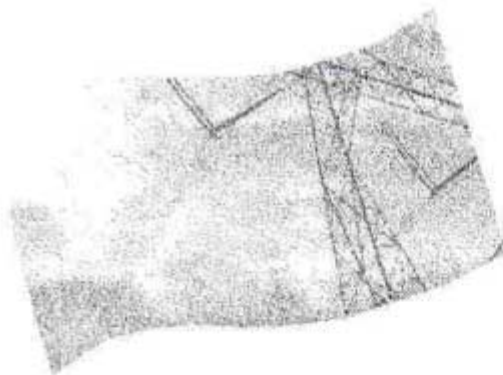


**Guide pour la mesure
des champs magnétiques
statiques et alternatifs
autour des barres
d'alimentation et des
redresseurs dans
l'industrie électrochimique**



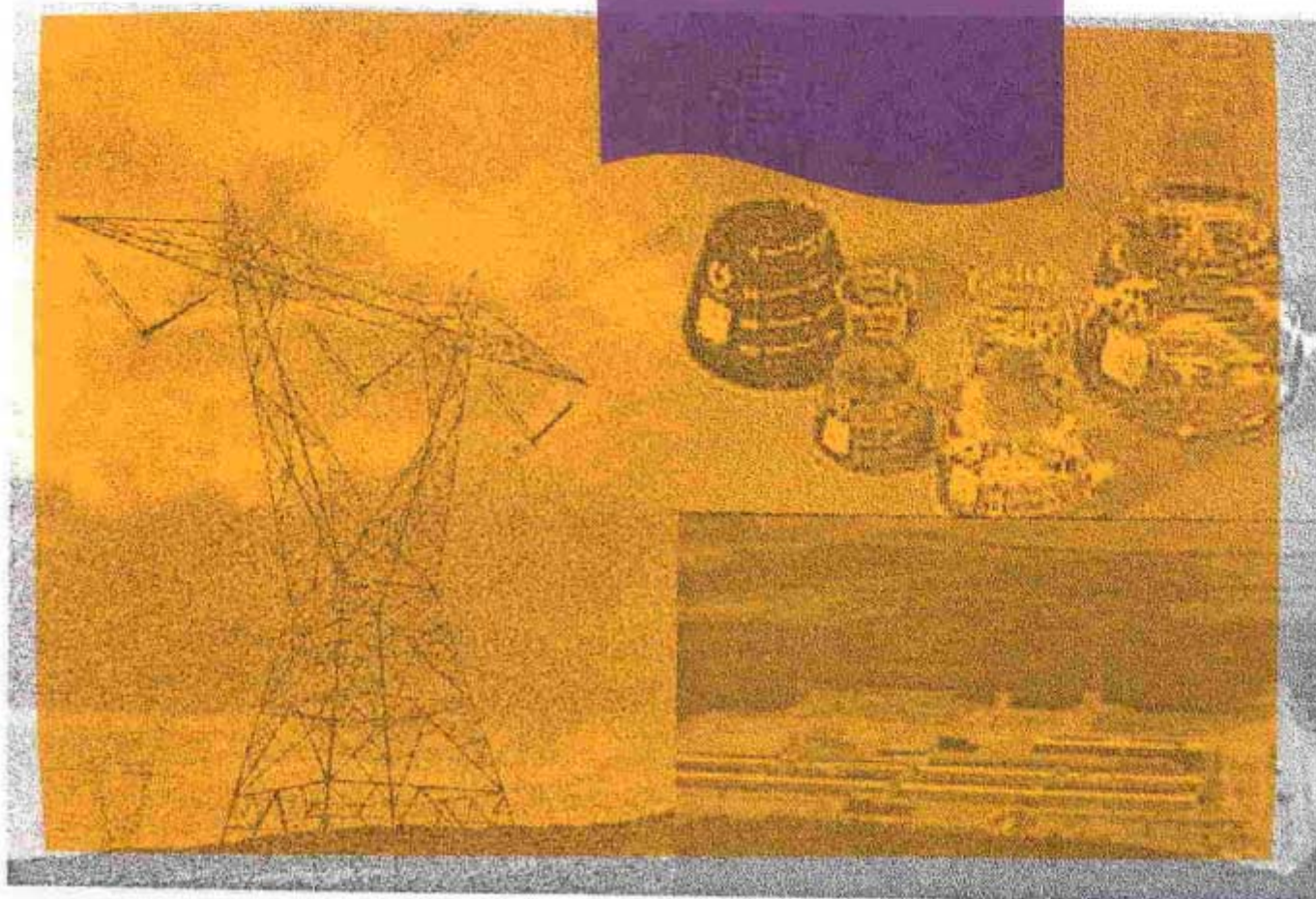
**ÉTUDES ET
RECHERCHES**

Lambert Laliberté

Mai 2000

R-244

RAPPORT



IRSST
Institut de recherche
en santé et en sécurité
du travail du Québec

La recherche, pour mieux comprendre

L'Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec (IRSST) est un organisme de recherche scientifique voué à l'identification et à l'élimination à la source des dangers professionnels, et à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes. Financé par la CSST, l'Institut réalise et finance, par subvention ou contrats, des recherches qui visent à réduire les coûts humains et financiers occasionnés par les accidents de travail et les maladies professionnelles.

Pour tout connaître de l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par la CSST et l'Institut.

Les résultats des travaux de l'Institut sont présentés dans une série de publications, disponibles sur demande à la Direction des communications.

Il est possible de se procurer le catalogue des publications de l'Institut et de s'abonner à *Prévention au travail* en écrivant à l'adresse au bas de cette page.

ATTENTION

Cette version numérique vous est offerte à titre d'information seulement. Bien que tout ait été mis en œuvre pour préserver la qualité des documents lors du transfert numérique, il se peut que certains caractères aient été omis, altérés ou effacés. Les données contenues dans les tableaux et graphiques doivent être vérifiées à l'aide de la version papier avant utilisation.

Dépôt légal
Bibliothèque nationale du Québec

IRSST - Direction des communications
505, boul. de Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : (514) 288-1 551
Télécopieur: (514) 288-7636
Site internet : www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche en santé
et en sécurité du travail du Québec,

**Guide pour la mesure
des champs magnétiques
statiques et alternatifs
autour des barres
d'alimentation et des
redresseurs dans
l'industrie électrochimique**

Lambert Laliberté,
Programme soutien analytique, IRSST

**ÉTUDES ET
RECHERCHES**

RAPPORT

 Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca

Cette publication est disponible
en version PDF
sur le site internet de l'IRSST.

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des auteur.



TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	3
AVIS AUX LECTEURS.....	5
1.- INTRODUCTION.....	8
1.1- NATURE DES CHAMPS MAGNÉTIQUES STATIQUE ET ALTERNATIF ...	8
1.2- OBTENTION DU COURANT CONTINU À PARTIR DU COURANT ALTERNATIF.....	9
1.3 ASPECTS GÉNÉRAUX D'UNE USINE ÉLECTROCHIMIQUE	14
1.4 OÙ MESURER ?	21
1.5- ESTIMATION DE L'EXPOSITION AUX CHAMPS MAGNÉTIQUES STATIQUES.....	23
2 - MESURE DU CHAMP MAGNÉTIQUE STATIQUE	23
2.1- MESURE AVEC LE TESLAMÈTRE/DOSIMÈTRE HI-3550.....	23
2.1.1- Le mode lecture directe « ΔB » et « DC »	26
2.1.2- Le mode dosimétrie « $\int B$ » et « DC ».....	26
2.2- MESURE AVEC LE TESLAMÈTRE BELL 4048.....	27
3- MESURE DES CHAMPS MAGNÉTIQUES ALTERNATIFS	29
3.1- MESURE AVEC LE HOLADAY HI-3627 ET LE CÂBLE DE RALLONGE DE LA SONDE.....	29
3.2- MESURE AVEC LA BOBINE PERFECTION MICA ET L'OSCILLOSCOPE FLUKE 97.....	33
3.3- FONCTIONNEMENT DE L'OSCILLOSCOPE FLUKE 97	36
4.- MESURE DES DISTANCES	39
4.1 FONCTIONNEMENT DU TÉLÉMÈTRE LEICA.....	40
5. - LIMITES D'EXPOSITION	41
5.1 CHAMPS MAGNÉTIQUES STATIQUES	41
5.1.1- Si l'exposition du travailleur est toujours inférieure à 60 mT.....	41
5.1.2- Si l'exposition du travailleur est constante et supérieure à 60 mT.....	42
5.1.3- Si l'exposition du travailleur n'est pas constante et peut dépasser 60 mT ...	42
5.2 CHAMPS MAGNÉTIQUES ALTERNATIFS	43
6.- MOYENS DE CONTRÔLE	44
7.- BIBLIOGRAPHIE	51

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Tension triphasée retrouvée à l'entrée des redresseurs.....	10
Figure 2 : Ondulations résiduelles de 360 Hz qui accompagnent la tension continue	11
Figure 3 : Ondulations alternatives résiduelles une fois le courant continu retiré.	12
Figure 4 : Transformée rapide de Fourier (FFT) du signal de la figure 3	12
Figure 5 : Fréquence de l'ondulation	13
Figure 6 : Schéma d'une usine électrochimique	16
Figure 7 : Transformateur triphasé refroidi à l'air d'une capacité de 960 kVA.....	17
Figure 8 : Chambres de redresseurs	18
Figure 9 : Barres de distribution en aluminium placées en parallèles	19
Figure 10 : Cellules électrochimiques reliées en série	20
Figure 11 : Endroits susceptibles d'avoir de forts champs statique et alternatif	22
Figure 12 : Teslamètre/dosimètre Holaday HI-3550.....	24
Figure 13 : Teslamètre HI-3550 placé à la ceinture du travailleur.....	25
Figure 14 : Emplacement des boutons de contrôle du teslamètre HI-3550.....	26
Figure 15 : Teslamètre Bell 4048 et rallonge de 1 m pour la sonde.....	27
Figure 16 : Sonde du teslamètre Bell 4048	28
Figure 17 : Chambre à zéro tesla pour le teslamètre Bell 4048	29
Figure 18 : Champmètre Holaday HI-3627 et câble de rallonge de 30 m.....	30
Figure 19 : Raccordement de l'oscilloscope Fluke 97 au Holaday HI-3627	31
Figure 20 : Bobine EP-107 reliée à l'oscilloscope Fluke 97.....	34
Figure 21 : Raccordement de la bobine à l'oscilloscope à l'aide de l'adaptateur banane- bnc.	35
Figure 22 : Oscilloscope Fluke 97 – Emplacement des boutons pour le réglage préliminaire.....	36
Figure 23 : Oscilloscope Fluke 97 – Emplacement des boutons pour la prise d'une mesure.....	37
Figure 24 : Oscilloscope Fluke 97 – Emplacement des boutons pour la mise en mémoire.....	38
Figure 25 : Télémètre à laser Leica	39
Figure 26 : Écriteau de mise en garde contre le champ magnétique statique.....	45
Figure 27 : Pictogramme d'avertissement pour les porteurs de stimulateur cardiaque....	46
Figure 28 : Écriteau de mise en garde contre le champ magnétique alternatif de 360 Hz	47

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Recommandations de l'ACGIH 1999 pour le champ magnétique <u>statique</u> ..	41
Tableau 2 : Méthode de mesure du champ magnétique statique en fonction de l'exposition au champ et de la durée du quart de travail	43
Tableau 3 : Recommandations de l'ACGIH 1999 pour une exposition au champ magnétique <u>alternatif</u> de <u>60 Hz</u>	44
Tableau 4 : Recommandations de l'ACGIH 1999 pour une exposition aux champs magnétiques alternatifs de 360 Hz, 720 Hz ou 1 440 Hz	44

LISTE DES ANNEXES

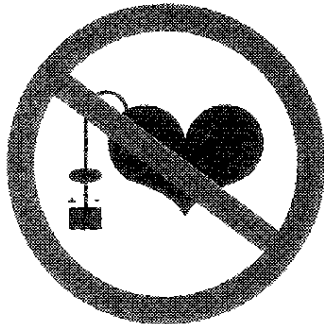
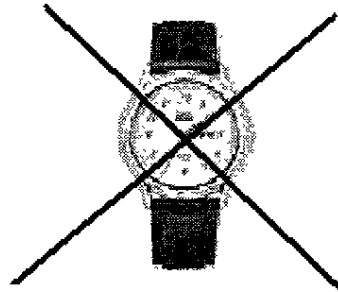
Annexe 1 : Tableau de conversion des unités de champ magnétique	52
Annexe 2 : Équation de blindage	53

AVIS AUX LECTEURS



CERTAINES MESURES DE CHAMP MAGNÉTIQUE DOIVENT ÊTRE FAITES PRÈS D'INSTALLATIONS ÉLECTRIQUES SOUS HAUTE TENSION. ASSUREZ-VOUS D'ÊTRE TOUJOURS ACCOMPAGNÉ, LORS DE TELLES MESURES, PAR UN ÉLECTRICIEN QUI CONNAÎT BIEN LE SITE ET LES CONSIGNES DE SÉCURITÉ.

VOUS ALLEZ ENTRER DANS UNE USINE OÙ LES CHAMPS MAGNÉTIQUES STATIQUES SONT TRÈS FORTS, N'OUBLIEZ PAS DE LAISSER VOS CARTES MAGNÉTIQUES ET MONTRE DANS UN ENDROIT SÛR.



SI VOUS POSSÉDEZ UN SIMULATEUR CARDIAQUE, OU UN IMPLANT OU UNE PROTHÈSE FERROMÉTALLIQUE, RESTEZ À L'ÉCART DE LA SECTION ÉLECTROCHIMIQUE DE L'USINE.

AVANT-PROPOS

Ce guide d'utilisation d'instruments de mesure du champ magnétique s'adresse aux hygiénistes et inspecteurs du réseau de la santé du Québec. Les méthodes d'utilisation du présent document visent les instruments de mesure de la banque de la CSST⁽¹⁾ et principalement le teslamètre/dosimètre triaxial de Holaday modèle HI-3550, le teslamètre uniaxial Bell 4048, le champmètre Holaday HI-3627, l'oscilloscope numérique Fluke modèle 97 jumelé à la bobine de mesure Perfection Mica modèle EP-107 et le télémètre Disto de Leica.

Le lecteur trouvera respectivement aux sections 1.1 et 1.2 du document, une explication sur la nature des champs magnétiques statique et alternatif ainsi que sur la production du courant continu à partir du courant alternatif. La section 1.3 présente un schéma d'une usine électrochimique et de ses composantes et la section 1.4 explique à l'hygiéniste où mesurer et les endroits les plus susceptibles d'émettre des champs forts de nature statique ou alternatif. Enfin, la section 1.5 fournit une équation qui permet d'estimer la densité magnétique statique à partir de l'intensité du courant et de la distance de la barre de distribution.

La section 2 présente les instruments pour la mesure des champs magnétiques statiques.

La section 3 présente les instruments pour la mesure des champs magnétiques alternatifs.

La section 4 présente les instruments pour la mesure de la distance.

Le lecteur trouvera à la section 5 les limites d'exposition aux champs statiques et alternatifs.

Le guide se termine avec la section 6 qui décrit les moyens de contrôle des champs.

Toutes les photos (sauf celle dont la source est indiquée) apparaissant dans ce document ont été prises par Mario Belisle.

Le présent document ne traite pas des effets biologiques entraînés par une exposition aux champs magnétiques car il s'agit d'un domaine trop vaste pour être incorporé au présent document. Le lecteur consultera le bilan de connaissances de l'IRSST B-047 intitulé «Bilan des normes et recommandations d'exposition aux champs électromagnétiques (0 à 300 GHz) et au rayonnement ultraviolet» pour en connaître davantage sur les effets biologiques spécifiques associés aux champs magnétiques statiques et alternatifs.

Le lecteur est invité à consulter les sites suivants :

⁽¹⁾ CSST : Commission de la santé et de la sécurité du travail du Québec

Avis : La documentation fournie sur ces sites est en perpétuel changement et est hors du contrôle de l'IRSST. Elle vous est fournie à titre de référence seulement. L'IRSST ne peut être tenu responsable des opinions, du contenu ou de l'exactitude de l'information fournie sur ces sites.

<http://www.mcw.edu/gcrc/cop/static-fields-cancer-FAQ/toc.html>

<http://www.mcw.edu/gcrc/cop/powerlines-cancer-FAQ/toc.html>

<http://www.radio.fer.hr/cost244/>

<http://www.niehs.nih.gov/emfrapid/home.htm>

<http://www.cdc.gov/niosh/emf2.html>

<http://www.who.int/peh-emf/>

<http://www.osha-slc.gov/SLTC/elfradiation/index.html>

<http://www.tassie.net.au/emfacts/>

<http://www.ncrpn.com/> (National Council on Radiation Protection and Measurements)

<http://www.icnirp.de/> (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)

<http://www.iros.fir.it/safeemf/emfref.htm> (Italian National Research Council)

<http://www.hc-sc.gc.ca/ehp/dhm/brp/index.htm> (Santé Canada)

**Vous pouvez également consulter le site de l'IRSST à l'adresse suivante :
<http://www.irsst.qc.ca> pour obtenir les autres guides de l'auteur. Cliquez sur
«Publications» puis sur «Rayonnements et contraintes thermiques».**

**Pour communiquer avec l'auteur, via courriel , utilisez l'adresse suivante :
laliberte.lambert@irsst.qc.ca**

1.- INTRODUCTION

1.1- NATURE DES CHAMPS MAGNÉTIQUES STATIQUE ET ALTERNATIF

Le courant électrique génère un champ magnétique, proportionnel au courant, autour du conducteur. Si le courant circule toujours dans la même direction avec la même intensité, on parle alors de courant continu (c.c.). Le courant continu produit un champ magnétique constant ou statique autour du conducteur. Si l'intensité du courant varie ou change de sens périodiquement (courant alternatif c.a.), il génère alors un champ magnétique variable ou alternatif.

Le champ magnétique se représente par des lignes circulaires concentriques. Elles encerclent perpendiculairement le conducteur. Plus le champ magnétique est intense, plus on le représente par un nombre croissant de lignes par unité de surface et plus le tracé des lignes s'étend loin du conducteur. Ces lignes illustrent très bien la forme du champ de force magnétique qui existe autour d'un conducteur parcouru par un courant.

Rappelez-vous que :

- a) s'il n'y a pas de courant, il n'y a pas de champ magnétique.
- b) s'il y a un champ magnétique, il est à l'image de son courant générateur :
 - si le courant est continu, le champ magnétique est invariable ou statique;
 - si le courant est alternatif, le champ magnétique est alternatif;
 - l'intensité du champ magnétique est proportionnelle à l'intensité du courant. Il est donc tout naturel d'exprimer l'amplitude d'un champ magnétique en ampère par mètre (A/m). C'est-à-dire qu'à un mètre de distance du conducteur le champ magnétique aura une intensité de 1 A/m si le courant dans le conducteur est de 1 ampère.

Le champ magnétique est représenté par la lettre H. La densité de flux magnétique exprime le nombre de lignes du champ magnétique (dont l'unité de mesure est le Weber) par unité de surface (m^2). La densité magnétique, représentée par la lettre B, s'exprime soit en Weber/ m^2 ou plus communément en tesla (T). $1 \text{ Weber}/m^2 = 1 \text{ tesla}$. L'unité gauss (G) est en déperdition car elle ne fait pas partie du Système International (SI). Notons que: $1 \text{ tesla} = 10^4 \text{ gauss}$, et réciproquement : $1 \text{ gauss} = 10^{-4} \text{ tesla}$.

Lorsque le champ magnétique traverse un matériau non magnétique, c'est-à-dire qui ne colle pas à un aimant (comme l'air, le corps humain, le plastique, l'aluminium, certains aciers inoxydables, la fonte, etc.), les lignes de champ magnétique ne subissent aucun changement. Par conséquent la densité des lignes de champ reste inchangée.

Seul un matériau dit magnétique pour ferromagnétique ou ferrimagnétique (fer, acier doux, ferrites, etc.; ces matériaux sont attirés par un aimant) peut dévier ou perturber les lignes de champ magnétique en lui offrant un chemin moins «résistif» que l'air. Les lignes de champ «préfèrent» un médium moins résistif et ainsi modifieront leur trajectoire pour emprunter un chemin plus facile. La densité des lignes de force magnétique (B) sera donc plus forte dans le matériau magnétique qu'à l'extérieur du matériau. On dit de ces matériaux qu'ils concentrent les lignes de force. Les lignes de force se comportent comme l'eau de pluie qui dévale une montagne. Elle emprunte toujours le chemin le plus facile.

Les transformateurs et les moteurs font appel au champ magnétique comme moyen de transfert d'énergie. Pour que le transfert d'énergie soit très efficace, il faut minimiser les fuites de champ magnétique à l'extérieur du boîtier du transformateur ou du moteur. Un noyau de fer est ainsi placé à l'intérieur de ces appareils pour créer des chemins beaucoup moins résistifs (on dit à faible réluctance) que l'air. Résultat : les lignes de force les empruntent beaucoup plus que l'air. Ainsi, l'intensité magnétique à l'extérieur d'un moteur ou d'un transformateur est basse, toutes proportions gardées, avec d'autres appareillages de l'usine, comme les câbles de sortie des transformateurs ou les barres de sortie des redresseurs.

1.2- OBTENTION DU COURANT CONTINU À PARTIR DU COURANT ALTERNATIF

L'industrie électrochimique fait appel à de grandes quantités d'électricité pour son procédé d'électrolyse. Ce courant électrique doit être de nature continue pour obtenir une réaction chimique unidirectionnelle. Or l'énergie électrique arrive sous forme de courant alternatif triphasé. Elle doit donc circuler par des redresseurs afin d'être transformée en courant continu. La fonction des redresseurs est d'aiguiller vers une borne positive de l'alimentation des cellules toutes les alternances positives du courant alternatif et d'aiguiller vers la borne négative de l'alimentation toutes les alternances négatives du courant alternatif.

Les premiers redresseurs utilisés furent l'ignitron et le thyatron. Chacun avait des dimensions imposantes. Ils sont maintenant remplacés par des semi-conducteurs à l'état solide de la dimension d'une balle de tennis : la diode et le thyristor. Le thyristor permet, grâce à son électrode de contrôle, la gâchette, non seulement de redresser le courant alternatif en courant continu mais aussi de commander le débit du courant redressé qui circule dans les cellules d'électrolyse afin de contrôler la température du procédé chimique. L'inconvénient est que les usines qui utilisent des redresseurs à thyristors, génèrent énormément d'harmoniques sur les lignes d'alimentation autant du côté courant continu que du côté courant alternatif lorsque les thyristors entrent en mode de restriction du courant⁽²⁾. C'est pourquoi ils ont tendance à disparaître au profit des redresseurs à

(2) Pour diminuer le courant, le thyristor ne doit pas être en mode conduction durant toute la durée d'une demi-alternance. Pour ce faire, un circuit de déphasage contrôle sa gâchette et retarde le

diodes. Le contrôle du débit du courant dans les systèmes faisant appel aux diodes utilise généralement des réacteurs à saturation. Le contrôle du courant se fait ici avant la chambre des redresseurs.

Puisque le courant alternatif arrive à l'usine sous forme de courant alternatif triphasé d'une tension de 315 000 volts, il doit donc être abaissé en tension afin d'être compatible avec le procédé chimique. Un ou deux transformateurs sont utilisés à cet effet, de sorte que la tension finale soit aux alentours de 300 à 1 500 volts selon le nombre de cellules à alimenter (figure 1).

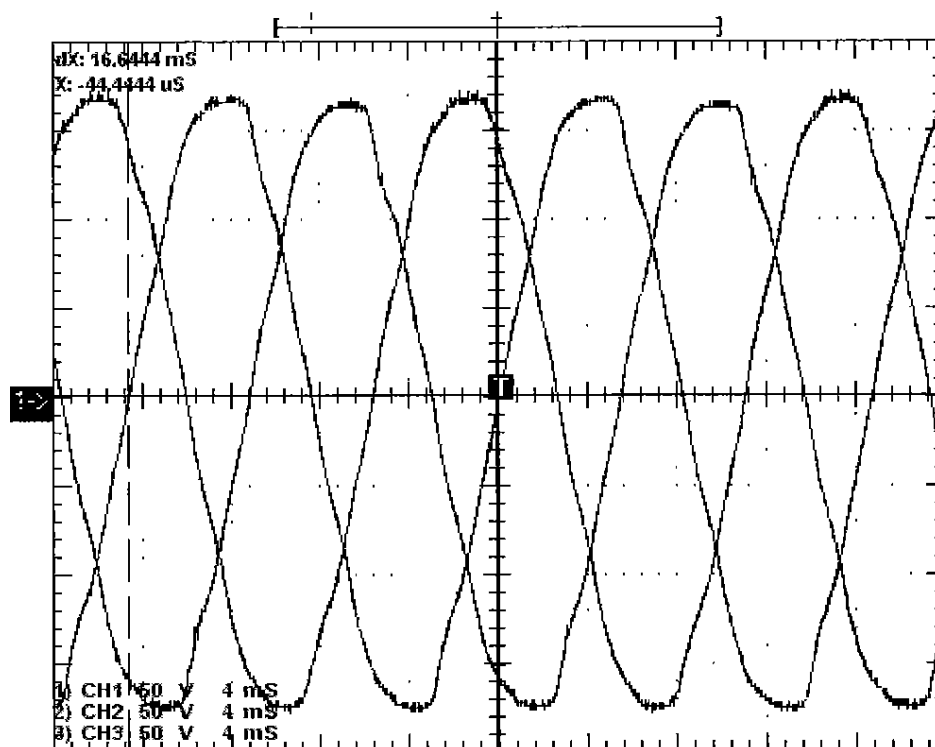


Figure 1 : Tension triphasée retrouvée à l'entrée des redresseurs

Chaque alternance représente ici une tension efficace (rms) de 212 volts @ 60 Hz qui se retrouve sur chacun des trois conducteurs. Trois conducteurs pour trois phases. Chaque phase est décalée de 120 degrés l'une par rapport à l'autre. La période d'une phase est de 16,6 ms.

Une fois redressé, le courant pourra être utilisé pour alimenter en série, les cellules électrochimiques dans lesquelles les réactions d'électrolyse s'effectuent. Le nombre de cellules varie d'une usine à l'autre. La tension aux bornes d'une cellule se situe entre 3 et 5 volts.

moment d'amorce du thyristor par rapport au passage à zéro du courant alternatif. Ce retard dans l'amorce du thyristor diminue la valeur efficace du courant mais le déforme en même temps. C'est précisément cette déformation du courant qui génère toutes les harmoniques.

Le courant électrique ainsi obtenu a la forme d'une suite de bosses de chameau : six ondulations pour des redresseurs à diodes (figure 2) et six ondulations dont la période est variable entre 0 et 180 ° selon le déphasage d'amorce pour les redresseurs à thyristors.

La fréquence du courant redressé est donc six fois la fréquence du courant d'entrée : trois ondulations pour les trois phases positives et trois ondulations pour les trois phases négatives. Le procédé serait plus efficace si l'intensité demeurait constante, car à chaque descente d'une ondulation, le procédé chimique ralentit pour ensuite être accéléré à la remontée de la prochaine (figure 2).

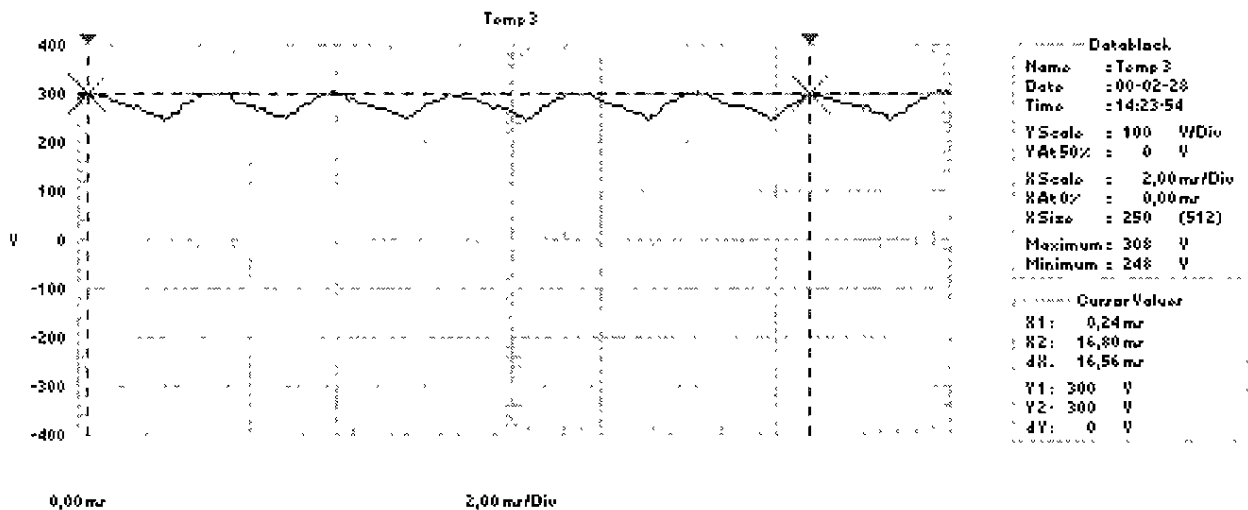


Figure 2 : Ondulations résiduelles de 360 Hz qui accompagnent la tension continue

Notez que les ondulations ont toujours la même polarité et sont superposées sur le courant continu. Dans notre exemple, le maximum de l'ondulation atteint 308 volts alors que le minima descend à 248 volts pour une tension efficace (rms) d'environ 285 volts. Les deux curseurs verticaux indiquent la période (16,66 ms) d'une onde de 60 Hz. On observe 6 ondulations dans une seule période de 60 Hz ce qui correspond à 6 fois la fréquence initiale, soit 360 Hz.

On cherche sans cesse à améliorer la qualité ou le rendement du courant continu en le rendant plus uniforme, c'est-à-dire en diminuant l'amplitude des ondulations. Améliorer la forme du courant continu signifie aussi augmenter le rendement des cellules. Plus l'usine consomme de courant, plus il devient rentable d'augmenter le nombre d'ondulation afin de minimiser les pertes c'est-à-dire l'amplitude des ondulations.

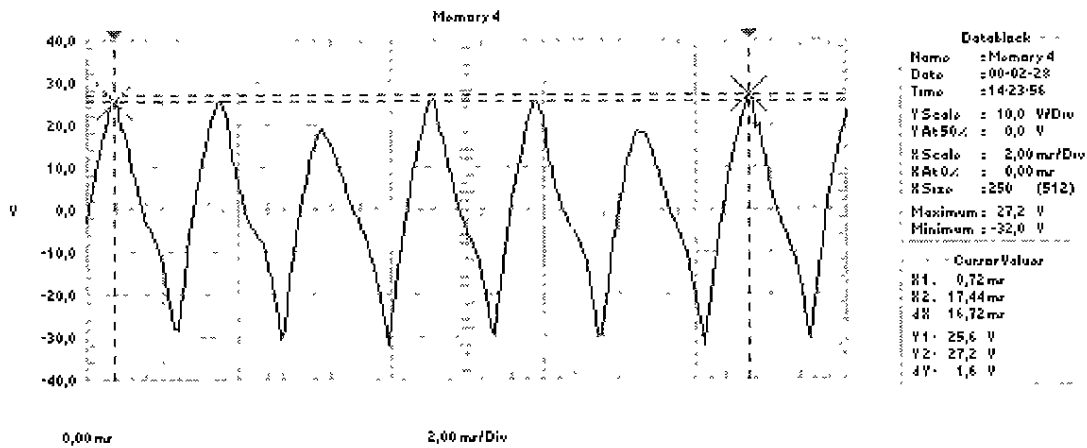


Figure 3 : Ondulations alternatives résiduelles une fois le courant continu retiré.

Si l'on retire le courant continu du graphique de la figure 2 pour ne laisser que les ondulations, nous nous retrouvons avec le graphique de la figure 3. On observe bel et bien une tension alternative de 360 Hz, qui, sous charge, engendre un champ magnétique alternatif de même fréquence. Lorsque l'on mesure avec une bobine, on se trouve à faire exactement la même chose, c'est-à-dire, à retirer la tension continue puisque c'est seulement les ondulations ou la partie alternative du courant qui peuvent induire une tension dans une bobine de mesure. Le champ magnétique statique, généré par le courant continu, devra être mesuré par une sonde à effet Hall.

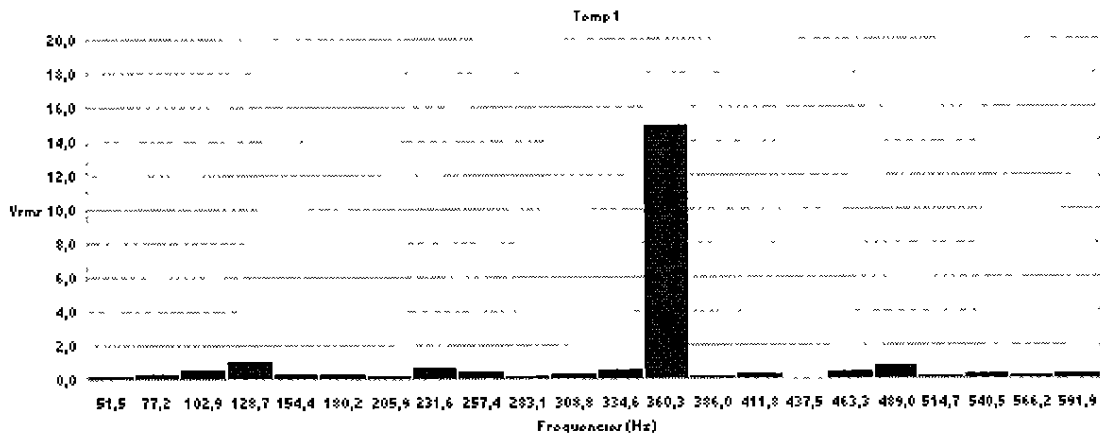


Figure 4 : Transformée rapide de Fourier (FFT) du signal de la figure 3

Notez que la fréquence de 360 Hz domine largement. Les autres composantes, à peine visibles, sont dues aux distorsions sur la ligne d'alimentation et aux caractéristiques inégales des diodes du redresseur. Ce graphique a été obtenu à l'aide du logiciel «FlukeView ScopeMeter» accompagnant l'oscilloscope Fluke 97.

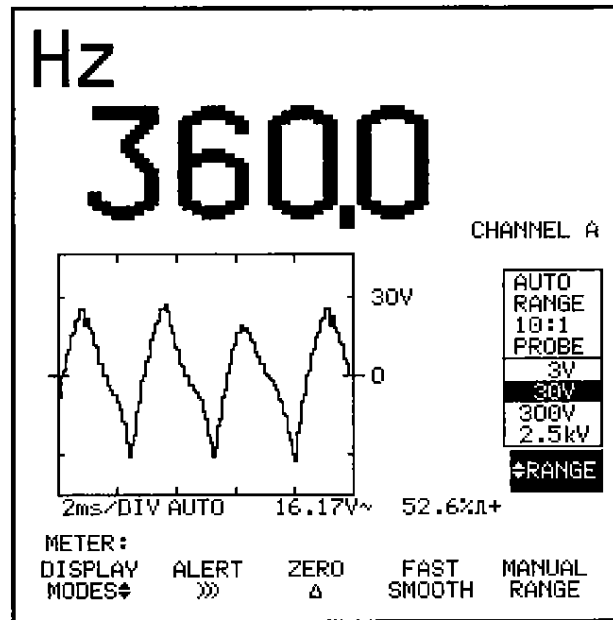


Figure 5 : Fréquence de l'ondulation

La figure 5 a été obtenue avec l'oscilloscope Fluke 97 en mode «meter» avec l'affichage dominant de la fréquence (choisissez V~ puis dans display modes choisissez «frequency» puis «enter»).

Pour améliorer le rendement du courant continu (à l'échelle industrielle) obtenu à partir du courant alternatif, il faut injecter dans une même période de temps plus d'ondulations afin que leurs superpositions réduisent les temps de descente et de montée du courant. Pour ce faire, il faut augmenter le nombre de phases du courant alternatif à l'entrée des redresseurs. On retrouve généralement l'un des cas suivants :

- Deux circuits de transformateurs triphasés, déphasés de 30 degrés l'un par rapport à l'autre sont aiguillés chacun à leurs redresseurs respectifs pour obtenir 6 ondulations à la sortie de chaque redresseur (360 Hz) mais 12 ondulations une fois la mise en parallèle de leurs barres de distribution pour l'alimentation des cellules avec une fréquence de 720 Hz.
- Deux circuits de transformateurs triphasés déphasés de 30 degrés l'un par rapport à l'autre sont aiguillés à un seul redresseur pour obtenir 12 ondulations à la sortie du redresseur (720 Hz) et 12 ondulations aux cellules (720 Hz).
- Deux circuits de transformateurs hexaphasés, déphasés de 15 degrés l'un par rapport à l'autre sont aiguillés chacun à leurs redresseurs respectifs pour obtenir 12 ondulations à la sortie de chaque redresseur (soit 720 Hz) mais 24 ondulations une fois leur mise en parallèle de leurs barres de distribution pour l'alimentation des cellules avec une fréquence de 1440 Hz.

- d) Deux circuits de transformateurs hexaphasés, déphasés de 15 degrés l'un par rapport à l'autre sont aiguillés à un seul redresseur pour obtenir 24 ondulations à la sortie du redresseur (1440 Hz) et 24 ondulations aux cellules (1440 Hz).

Ne soyez pas découragé à la vue de toutes ces fréquences, puisque le HI-3627 donne une lecture indépendante de la fréquence et de plus, la recommandation de l'ACGIH est la même pour toutes les fréquences d'ondulation entre 300 et 30 kHz.

ATTENTION : Il se pourrait que le nombre d'ondulations augmente dans l'avenir. Si le chef électricien de l'usine vous informe que son système de redresseurs contient 48 ondulations, soit 2 880 Hz, le HI-3627 qui couvre de 30 Hz à 2 kHz n'a plus la bande passante adéquate. Vous devez alors utiliser le HI-3637 qui couvre les fréquences de 2 kHz à 400 kHz. N'oubliez pas, qu'en tout temps, vous pouvez confirmer la fréquence de vos lectures en reliant soit le HI-3627 ou le HI-3637 (ou la bobine Perfection Mica) à l'oscilloscope portatif Fluke 97 et obtenir une lecture similaire à la figure 5.

L'amplitude des ondulations de 360 Hz, 720 Hz ou 1440 Hz qui accompagnent le courant continu est faible devant l'intensité du courant continu (figure 2). Malgré cela, le champ magnétique alternatif que ces ondulations génèrent, dépasse généralement les recommandations jusqu'à une distance d'environ 1 mètre de la barre de distribution du courant continu.

Ce dépassement s'observe dans la chambre des redresseurs, sur le parcours de la barre de distribution dès sa sortie du redresseur jusqu'aux premières cellules et s'atténue graduellement avec son passage à travers les premières cellules.

Le courant continu que l'on retrouve dans les usines se situe généralement entre 50 000 et 425 000 ampères par boucle de cellules d'électrolyse selon les entreprises. Plus les entreprises sont modernes, plus les courants sont forts.

Les courants utilisés en électrolyse sont si élevés qu'il est nécessaire d'utiliser plusieurs barres de distribution en parallèle pour assembler «un conducteur» suffisamment gros pour supporter de tels courants (figure 9).

Une seule de ces barres mesure environ 60 cm de hauteur par 3 cm d'épaisseur.

1.3 ASPECTS GÉNÉRAUX D'UNE USINE ÉLECTROCHIMIQUE

Voyons d'abord quelques produits qui font appel à de grandes quantités de courant continu, ce qui vous permettrait d'identifier une usine électrochimique :

- Aluminium
- Magnésium
- Zinc

- Fabrication de caustique NaOH (hydroxide de sodium) ou KOH (hydroxide de potassium)
- Chlore
- Chlorate de sodium
- Hydrogène
- Oxygène
- Raffinage du cuivre, de l'argent, de l'étain, du plomb, de l'or, de l'antimoine, du chrome, du cadmium, du cobalt, du nickel, du fer, du manganèse⁽³⁾.

Autres domaines qui font appel au courant continu mais de moins fort niveau :

- Métro
 - Lignes de transport électrique à courant continu
- Exemple : la ligne de 450 kV Radisson - Nicolet - Comerford.

Il n'y a pas d'usine électrochimique typique, chaque usine a des cellules électrochimiques de formes et de dimensions différentes, en nombre différent, de courant différent et de géométrie de barres de distribution différente.

Il existe tout de même un squelette commun à toutes ces usines que vous trouverez ici-bas (figure 6) :

⁽³⁾ Mc Graw-Hill Encyclopedia of Science & Technology. Vol. 6, 7 th edition. 1992. p123.

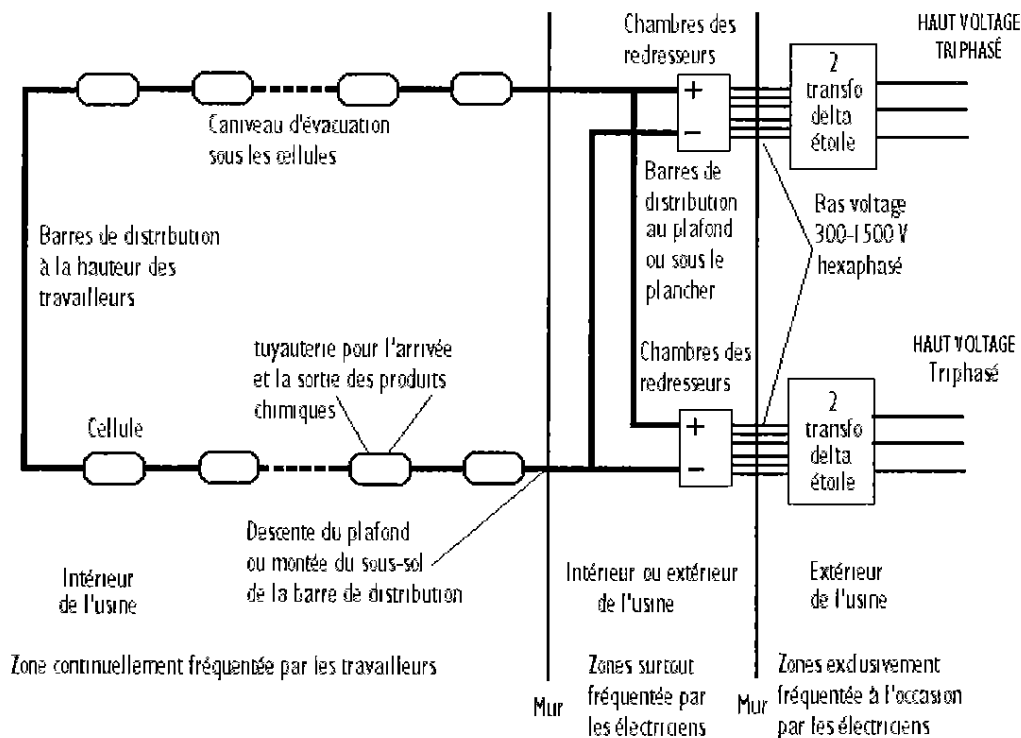


Figure 6 : Schéma d'une usine électrochimique

Voici les principaux dispositifs (vus de droite à gauche sur le schéma) d'une seule ligne d'une usine électrochimique. L'équipement se multipliera autant de fois qu'il y a de lignes (on entend par ligne de production, une boucle de cellules reliées en série) :

- 1) Un ou deux transformateurs (figure 7) qui réduisent la tension de la ligne de transport d'Hydro-Québec à un voltage utilisable pour les cellules. Le croquis à la figure 6 en illustre un (par chambre), ce gros transformateur est formé de deux plus petits transformateurs reliés en delta-étoile. La fréquence, dans cette zone, est de 60 Hz. Si vous devez mesurer à ces endroits, sachez que pour tous points de mesures équidistants des 3 conducteurs triphasés, vous allez surestimer la densité magnétique de 41% avec le Holaday HI-3627 ou le teslamètre/dosimètre FieldStar 4000. Dès que vous allez vous éloigner d'un côté ou de l'autre des conducteurs triphasés, l'erreur va diminuer très vite et ceci d'autant plus que les trois conducteurs sont rapprochés l'un de l'autre, ce qui est le cas dans les postes électriques contrairement aux grandes lignes de transport. Vous ne ferez pas cette erreur avec la bobine Perfection Mica qui ne mesure que selon un seul axe. Vous devez par contre l'orienter dans toutes les directions pour trouver la valeur maximale.

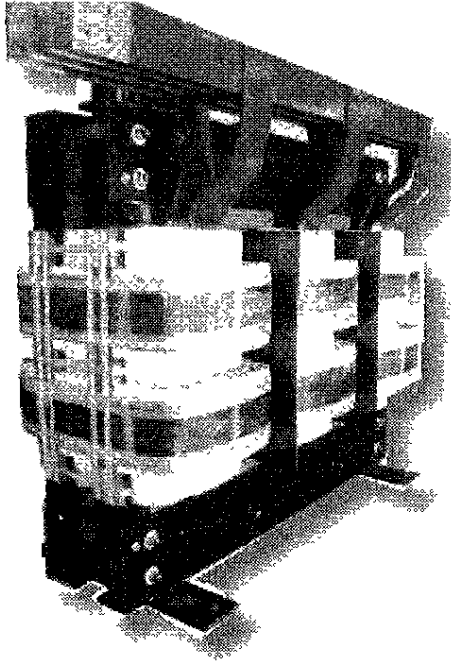


Figure 7 : Transformateur triphasé refroidi à l'air d'une capacité de 960 kVA

Remarquez les barres de distribution du courant au haut du transformateur. Le transformateur est généralement situé à l'intérieur d'une chambre. Souvent, le transformateur est immergé dans l'huile pour faciliter son refroidissement. Il est alors complètement scellé dans un boîtier d'acier et ces enroulement ne sont plus visibles.

(Photo gracieuseté de Neeltran Inc.)

- 2) Une à plusieurs chambres de redresseurs (figure 8) en fonction de la taille des installations. Nous en avons dessinées deux branchées en parallèle afin d'augmenter la capacité du courant d'alimentation des cellules.

N.B. IL est possible que vous rencontriez dans certaines usines une fréquence de 360 Hz aux barres de sortie d'une chambre à redresseur mais une fois réunies les une aux autres, comme sur le schéma, ces barres émettront par la suite une fréquence de 720 Hz car chacun des 360 Hz était déphasé de 30 degrés l'un par rapport à l'autre. Remarquez que cela ne change en rien l'interprétation des résultats si vous mesurez avec le Holaday HI-3627 puisque sa lecture est indépendante de la fréquence et que la recommandation reste la même de 300 Hz à 30 kHz. Cette situation est plus délicate si vous mesurez avec la bobine Perfection Mica, puisque celle-ci fait appel à la fréquence du champ pour évaluer son intensité. Il est donc toujours important de bien identifier la fréquence avec l'oscilloscope Fluke si vous travaillez avec la bobine Perfection Mica.

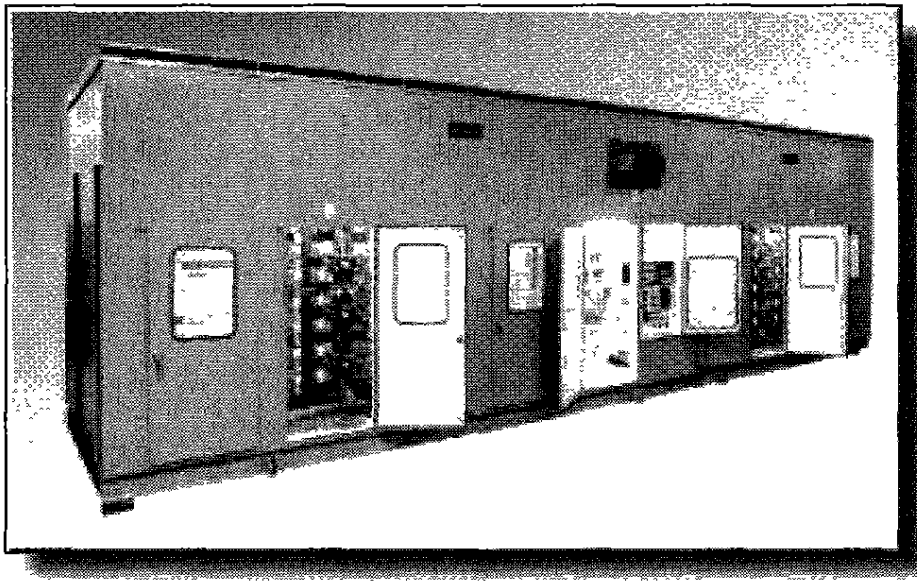


Figure 8 : Chambres de redresseurs

Les barres de distribution à courant continu sortent généralement de la chambre par le haut, en longeant le plafond ou sous le plancher pour aller rejoindre les cellules.

(Photo gracieuseté de Neeltran Inc.)

Si vous devez mesurer à l'intérieur d'une chambre à redresseurs, n'oubliez pas de protéger vos oreilles et vos yeux. Le bruit y est très intense et il est possible qu'une diode ou qu'un thyristor éclate. N'y allez jamais, sans avoir préalablement obtenu, des consignes de sécurité de la part du chef-électricien.

Il est également possible de faire une surestimation de 41% à l'intérieur de la chambre des redresseurs lorsque vous utilisez une sonde triaxiale, puisque des conducteurs triphasés s'y retrouvent. Mais pas à l'extérieur de la chambre puisqu'une des phases sera dominante. Le seul endroit à surveiller, est le point d'entrer des conducteurs triphasés dans la chambre. À cet endroit, il y a de forte chance pour que ce soit le 60 Hz triphasé (attention à la surestimation de 41%) qui l'emporte sur le 360 Hz qui pourrait traverser les parois de la chambre des redresseurs ou qui pourrait provenir des barres de sortie des redresseurs. Ici, tout dépend de la géométrie de l'entrée des conducteurs, de la sortie des barres ainsi que des propriétés de blindage magnétique de l'acier de la chambre des redresseurs.

- 3) Les barres de distributions (figure 9): elles transportent les énormes courants continus nécessaires aux réactions d'oxydoréduction dans les cellules.

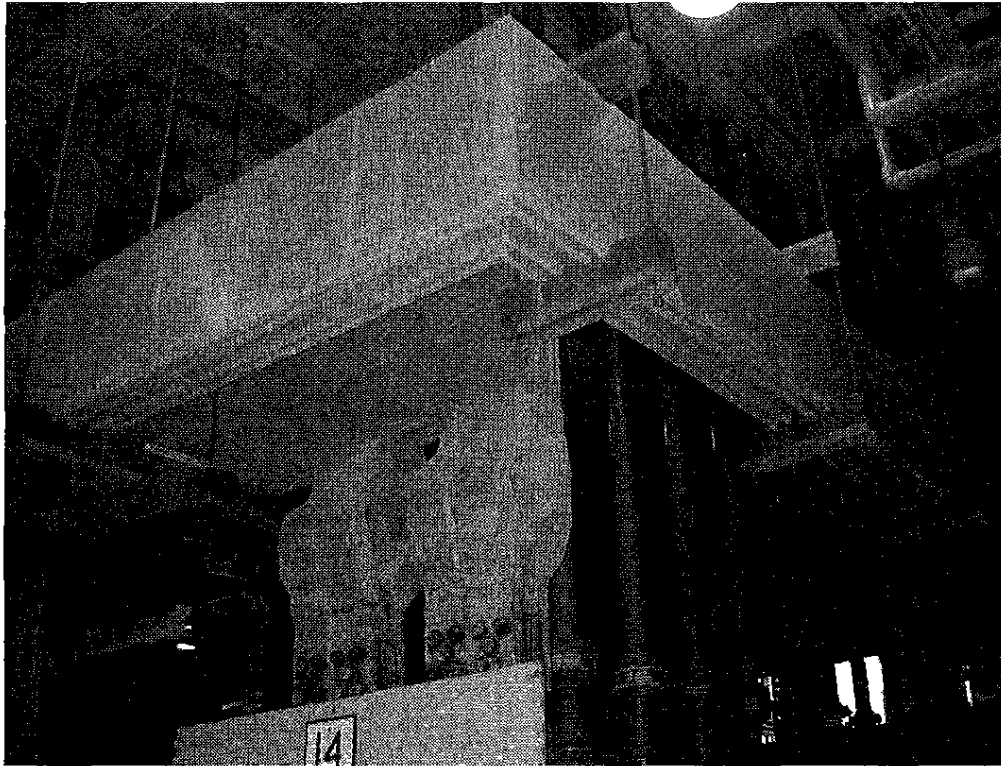


Figure 9 : Barres de distribution en aluminium placées en parallèles

(Photo gracieuseté de Produits Chimiques CXY)

Un champ magnétique statique intense s'y retrouve autour de la barre avec à peu près la même intensité partout sauf autour des coudes où il augmente un peu et vis-à-vis la cellule où le courant se disperse dans tout le volume de la cellule, ce qui a pour effet de diminuer la densité du courant et donc de réduire la densité magnétique.

Ce champ s'atténue comme l'inverse de la distance. Lorsque plusieurs lignes de cellules se côtoient, il est possible de retrouver des aires de neutralisation partielle des champs magnétiques si la polarité des barres qui se côtoient est la même et une augmentation, si la polarité des lignes diffère.

Comme nous l'avons vu, le courant continu est parasité par des courants pulsatifs (ondulations) résiduels. Plus le nombre de phases créées par des arrangements judicieux de raccordements de transformateurs interconnectés en étoile et delta sera grand, plus la fréquence des impulsions résiduelles sera élevée mais moins leur amplitude sera grande. Nous y retrouverons une des fréquences dominantes suivantes : 360 Hz, 720 Hz et 1440 Hz.

- 4) Finalement, un très grand nombre de cellules électrochimiques toutes raccordées en série. La figure 10, ci-bas illustre des cellules relativement petites (environ 60

cm de diamètre). Elles peuvent cependant atteindre chacune, des dimensions assez imposantes, telles celles d'un camion de la poste par exemple.

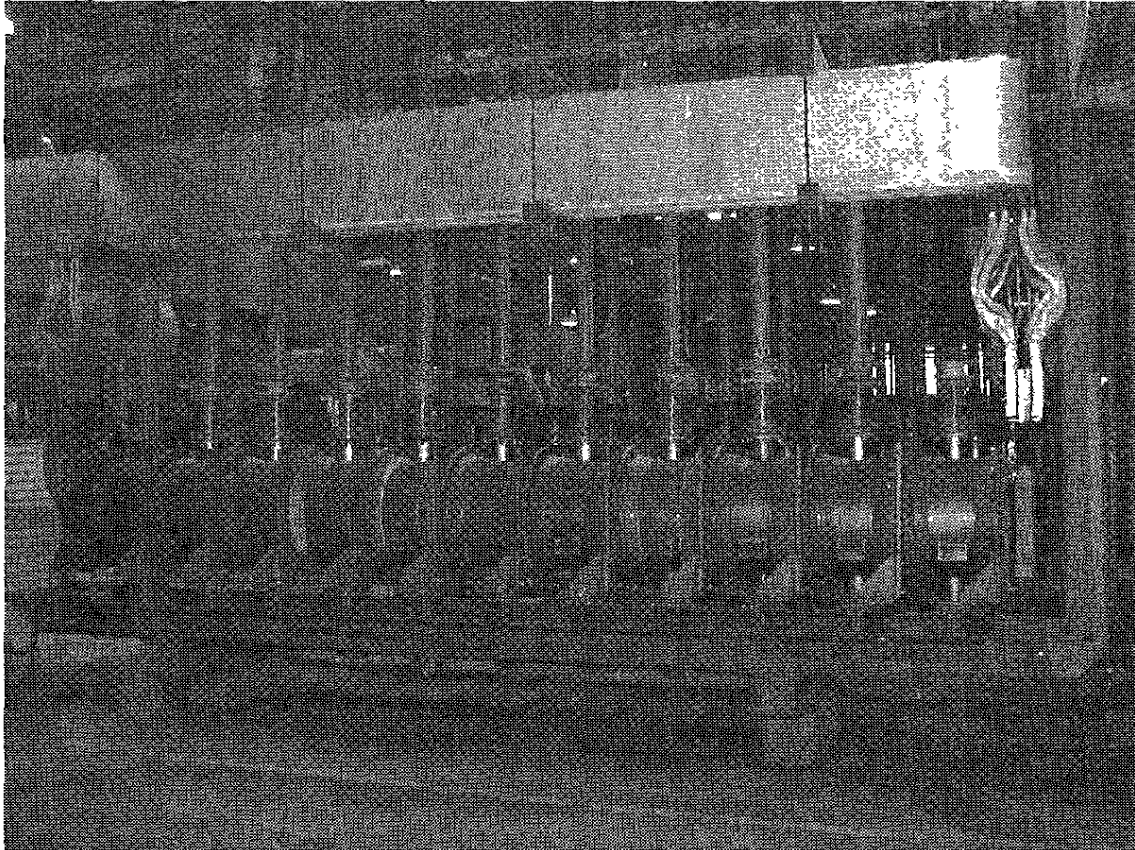


Figure 10 : Cellules électrochimiques reliées en série

(Photo gracieuseté de Produits Chimiques CXY)

La tension aux bornes d'une seule cellule est d'environ 3 à 5 volts. La somme de ces tensions individuelles multipliée par le nombre de cellules donne la tension totale qui alimente les deux extrémités des barres d'alimentation. Elle varie de 300 à 1500 volts selon les installations. Un vaste complexe de tuyauterie pour l'arrivée et la sortie des produits chimiques coiffe l'ensemble des cellules ainsi que plusieurs passerelles pour permettre l'accès à cette tuyauterie.

Notez que dans les usines de raffinage, comme pour le cuivre, les cellules prennent la forme de gigantesques baignoires ouvertes recouvertes de grilles sur lesquelles les travailleurs se déplacent. Les interconnexions des cellules sont alors beaucoup plus complexes que celle illustrée au croquis. Elles peuvent prendre un arrangement série /parallèle. Les baignoires étant ouvertes, ils dégagent souvent des vapeurs acides. Quant à la tuyauterie, elle est généralement située sous les bassins.

1.4 OÙ MESURER ?

Tous les endroits traversés par des barres d'alimentation et susceptibles d'être fréquentés par des travailleurs doivent faire l'objet d'une mesure à moins qu'un estimé mathématique (voir la section 1.5, estimé pour le champ statique seulement car c'est le seul pour lequel nous connaissons l'intensité du courant) ne démontre le contraire, c'est-à-dire un courant trop faible ou un éloignement suffisant de la barre de distribution.

Les endroits situés au-dessus comme une passerelle, en dessous ou à côté du passage d'une barre d'alimentation ou d'une cellule électrochimique tels que la cabine d'une grue qui se déplace au-dessus d'une salle à cuve, la cafétéria ou la salle de repos située entre deux lignes de cellules électrochimiques, la salle de contrôle placée au-dessus des barres, etc. doivent être considérés.

Notez que les champs continu et alternatif autour des coudes des barres de distribution sont plus intenses que le long des conducteurs linéaires. De plus, les champs alternatifs sont souvent plus intenses au début de la ligne, c'est-à-dire que les cellules situées plus près des redresseurs émettront des champs alternatifs plus intenses que les cellules situées en bout de ligne (figure 11). On portera donc une attention particulière à ces endroits.

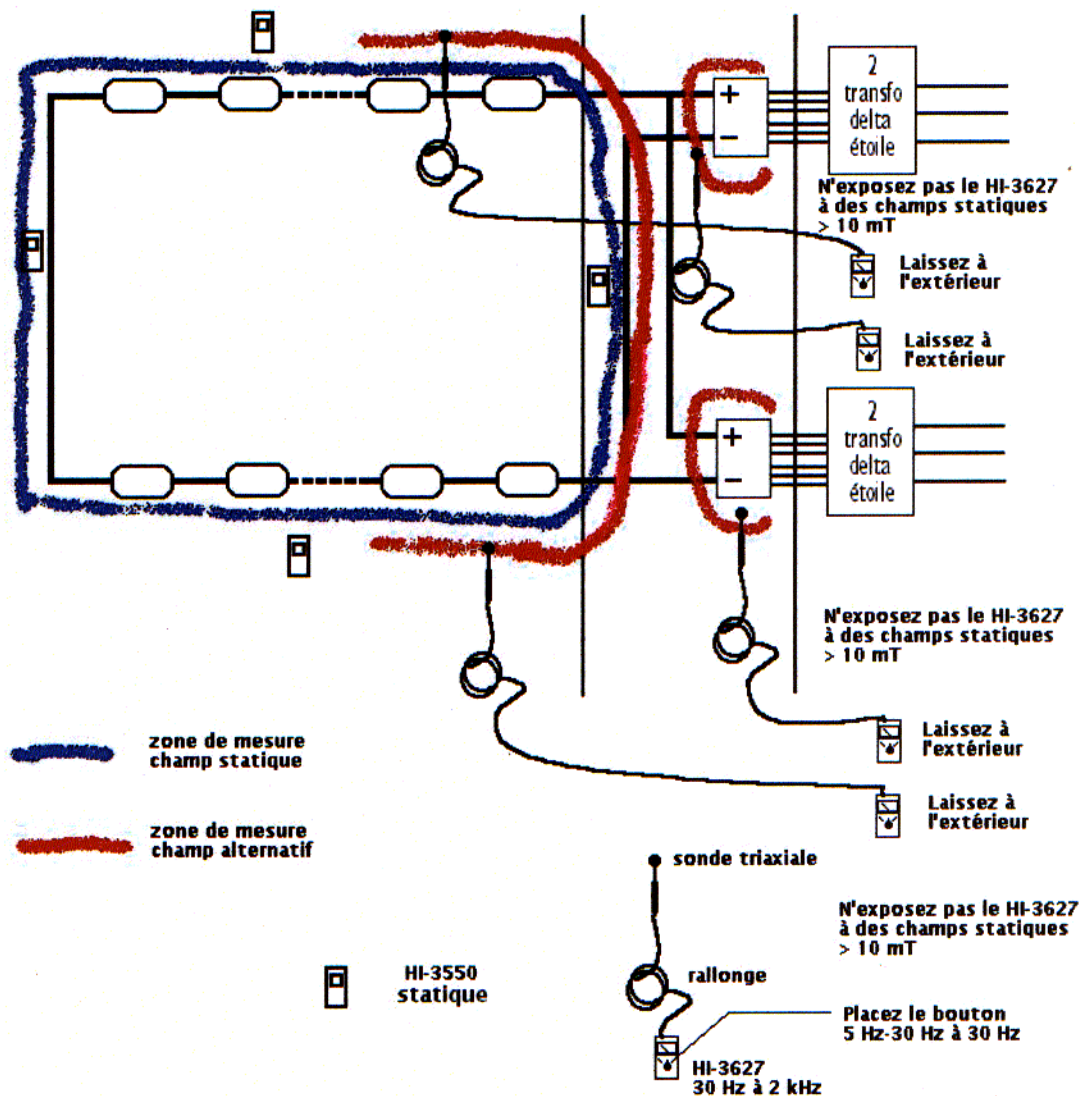


Figure 11 : Endroits susceptibles d'avoir de forts champs statique et alternatif

L'intérieur des chambres de redresseurs est soumis à des champs intenses mais elles ne sont qu'occasionnellement fréquentées par les électriciens pour effectuer des réparations. En plus d'y retrouver une des fréquences dominantes de 360 Hz ou 720 Hz ou 1440 Hz, la fréquence de 60 Hz peut également y être décelée en maints endroits selon la proximité de la sonde d'une phase. Par contre, à l'extérieur de la chambre, seule la fréquence dominante, excluant le 60 Hz, sera retrouvée car toutes les impulsions individuelles de 60 Hz auront été combinées à leur sortie de la chambre.

Les niveaux les plus intenses de champs magnétiques statiques se retrouvent aux barres de distribution, surtout les coudes, suivies des cellules électrochimiques.

Les niveaux les plus élevés pour les champs magnétiques alternatifs se retrouvent dans les salles de redresseurs et autour des barres de distribution, surtout les coudes, à la sortie des salles de redresseurs. Au fur et à mesure que le point de mesure se rapproche de la cellule électrochimique le long de la barre de distribution, les champs alternatifs diminuent d'intensité.

1.5- ESTIMATION DE L'EXPOSITION AUX CHAMPS MAGNÉTIQUES STATIQUES

Le champ magnétique statique issu du courant continu circulant dans les barres de distribution peut être estimé très facilement.

Pour une barre de distribution, transportant un courant continu, dont la longueur est plus grande que la distance «centre de la barre-point de mesure», l'intensité est donnée par la loi de *Biot-Savart* telle que :

$$B = \frac{\mu_0 I}{2 \pi r}$$

où :

B : densité du champ magnétique en Tesla

μ_0 : perméabilité du vide (4×10^{-7} Weber/A-m)

I : intensité du courant en ampère

r : distance, du centre de la barre d'alimentation s'il n'y en a qu'une ou du centre du groupe des barres s'il y en a plusieurs, au point de mesure, en mètre.

L'intensité du champ magnétique est donc proportionnelle au courant et inversement proportionnelle à la distance.

Par contre, l'estimation du champ magnétique alternatif ne peut se faire car l'intensité du courant alternatif parasite est généralement inconnue.

2 - MESURE DU CHAMP MAGNÉTIQUE STATIQUE

2.1- MESURE AVEC LE TESLAMÈTRE/DOSIMÈTRE HI-3550

Pour la vaste majorité des cas, la mesure du champ magnétique statique s'effectue à l'aide d'un teslamètre/dosimètre triaxial modèle HI-3550 (figure 12) de la compagnie Holaday.



Figure 12 : Teslamètre/dosimètre Holaday HI-3550

(Photo gracieuseté de Holaday Industries)

Cet instrument est léger. Il ne pèse que 166g avec les piles et son étui. Ses dimensions sont modestes. Elles ne font que 13,2 cm de longueur par 7,2 cm de largeur et 2,0 cm d'épaisseur. Le teslamètre/dosimètre s'installe facilement à la ceinture d'un travailleur grâce à son étui muni d'une ganse (figure 13).



Figure 13 : Teslamètre HI-3550 placé à la ceinture du travailleur

Le teslamètre/dosimètre Narda HI-3550 utilise trois senseurs à effet Hall placés sur le coin avant droit du boîtier pour effectuer une mesure triaxiale. L'annulation du champ magnétique terrestre s'effectue automatiquement, nul besoin de chambre à zéro tesla avec cet instrument. Chaque mesure prend trois secondes à effectuer, vous devez donc laisser le temps au HI-3550 d'effectuer son calcul avant de vous déplacer à un autre point de mesure. **Éviter de vous déplacer plus rapidement que le calcul de l'instrument car la valeur finale ne sera pas représentative de votre point de mesure initiale mais sera plutôt une somme vectorielle de 3 champs uniaxiaux provenant de trois points différents.**

L'instrument mesure les champs statiques aussi bas que 0,1 mT jusqu'à un maximum de 0,3 T par senseur pour une lecture triaxiale maximum de 0,5 T⁽⁴⁾. Le teslamètre peut lire jusqu'à un maximum de 3,54 T mais le fabricant ne peut garantir son exactitude pour des valeurs supérieures à 0,5 T. Les valeurs supérieures à cette dernière seront donc considérées comme un ordre de grandeur.

Deux modes de mesures sont disponibles (reportez-vous à la figure 14 pour l'emplacement des boutons qui contrôlent ces modes) :

⁽⁴⁾ $[(0,3)^2 + (0,3)^2 + (0,3)^2]^{1/2} = 0,5T$

2.1.1- Le mode lecture directe « ΔB » et « DC »

Dans ce mode, l'instrument effectue une lecture instantanée du champ magnétique statique. L'affichage est en mT ou T. La ligne du haut retient la valeur maximale lue depuis que l'instrument est en mode ΔB . Pour remettre la valeur maximale à zéro, changez de mode ou passez à AC puis à DC.

2.1.2- Le mode dosimétrie « $\int B$ » et « DC »

Dans ce mode, l'instrument intègre l'intensité du champ magnétique statique en fonction du temps. C'est-à-dire qu'il calcule la dose. On installe l'instrument à la ceinture du travailleur (pour le calcul de l'exposition au tronc) par l'entremise de la ganse placée au dos de l'étui dans lequel se glisse le dosimètre. L'affichage est en mT-h ou T-h. La remise à zéro de l'affichage se fait en appuyant **simultanément** (pendant trois secondes) sur les deux petits boutons « select » et « set » au dos de l'instrument (Fonction « Clear ») jusqu'à ce que l'affichage retombe à zéro.

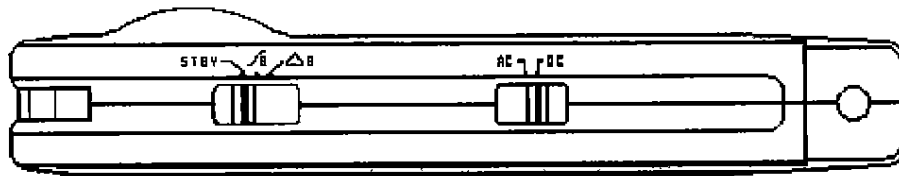


Figure 14 : Emplacement des boutons de contrôle du teslamètre HI-3550

Il est déconseillé de mesurer le champ magnétique alternatif de 60 Hz avec cet instrument car sa sensibilité (0,1 mT) et son exactitude (jusqu'à 20% d'erreur) laisse à désirer en « AC ».

Lorsque les mesures sont terminées, replacez l'instrument en veilleuse en plaçant le premier bouton dans le mode « Stand By » (STBY) afin de ménager les piles.

Le HI-3550 est alimenté par quatre piles alcalines de format AAA. Les piles devront être remplacées lorsque le voyant d'une pile apparaît dans le coin droit inférieur de la fenêtre d'affichage. Un jeu de 4 piles de remplacement est disponible dans la valise de transport.
N.B. Toutes les données de l'instrument sont perdues quand les piles sont retirées.

Une alarme sonore et visuelle de niveau d'intensité est disponible pour les deux modes de mesure. Consultez le manuel pour plus d'informations.

2.2- MESURE AVEC LE TESLAMÈTRE BELL 4048

Pour identifier la polarité d'un champ ou pour accéder à des endroits difficiles d'accès impossible avec le HI-3550, le teslamètre Bell 4048 est tout indiqué (figure 15). Celui-ci ne fait qu'une mesure uniaxiale et ne peut pas faire de dosimétrie. Ses avantages viennent du fait qu'il peut identifier la polarité d'un champ (étant uniaxiale, la valeur n'est pas mise au carré et ainsi, ne perd pas son signe) et que sa sonde est détachable. En effet, une rallonge d'un mètre comprise dans son étui de transport ou celle de 15 mètres disponible sur demande vous permet de faire des mesures uniaxiales dans des endroits difficiles d'accès. **N.B. Vous devez faire une demande spécifique pour la rallonge de 15 mètres.**

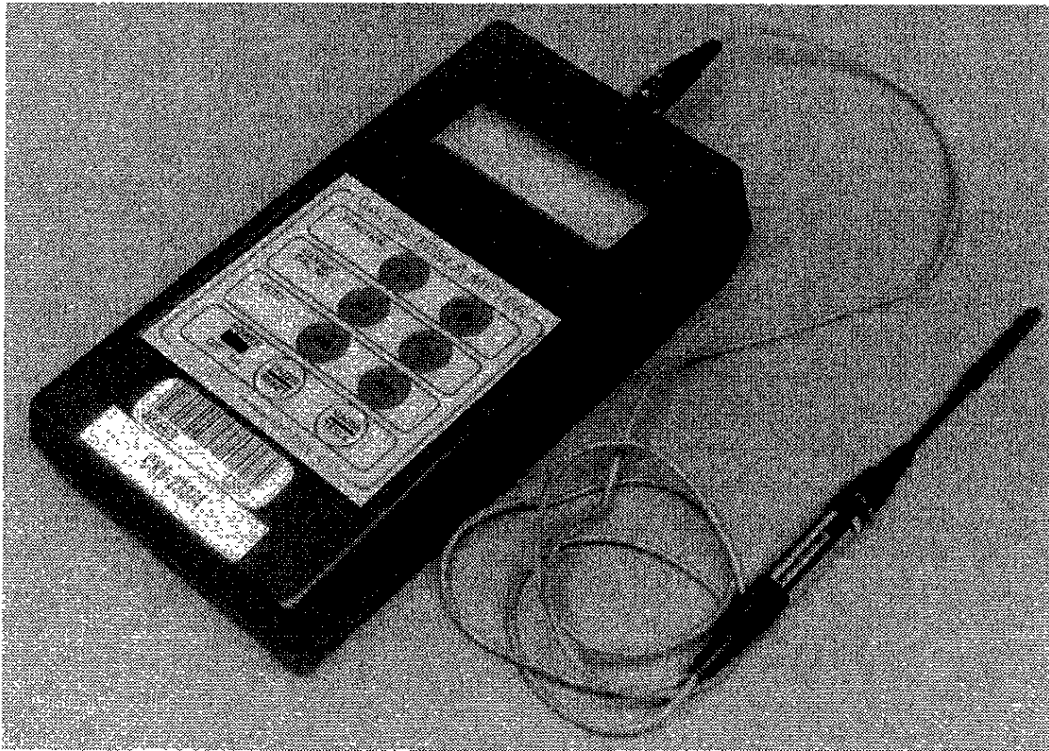


Figure 15 : Teslamètre Bell 4048 et rallonge de 1 m pour la sonde

Vous pouvez également faire des mesures de champs magnétiques avec le Bell 4048 pendant que le Holaday HI-3550 est utilisé à une dosimétrie. Dans ce cas, l'instrument (ou la sonde) doit être orienté(e) pour trouver la valeur maximale du champ ou pour prendre trois lectures selon trois axes orthogonaux puis faire la somme de leurs carrés et finalement extraire la racine carrée.

Pour utiliser l'instrument, il faut d'abord insérer la sonde dans la fiche située au haut de l'instrument. Cette fiche est indexée, le petit bouton noir de la sonde doit vous faire face (figure 16). Chaque sonde possède un numéro d'étalonnage qui doit être enregistré dans

l'instrument si ce n'est déjà fait. Placez le bouton « power » à « on ». L'instrument affiche le numéro d'étalonnage 1417. Confirmez cette valeur en appuyant sur « enter ».

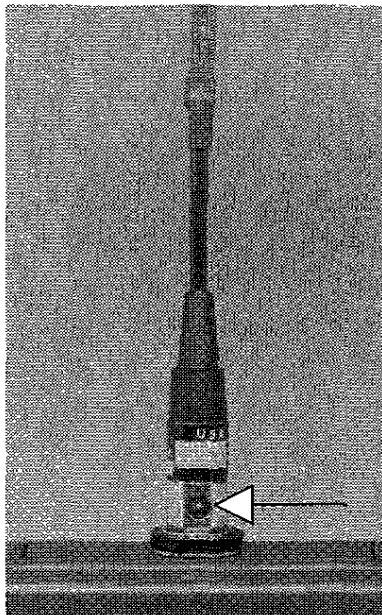


Figure 16 : Sonde du teslamètre Bell 4048

(Notez le bouton noir qui indexe et verrouille la sonde)

Vous devez maintenant annuler le champ magnétique terrestre en insérant la sonde dans la chambre à zéro tesla fournie dans l'étui (figure 17). Une fois la sonde insérée dans la chambre, appuyez sur « PB (probe) » dans la zone « zero » du clavier. Attendez quelques secondes puis recommencez jusqu'à ce que l'affichage indique 0.00. Appuyez sur le bouton « gauss/tesla » pour placer l'instrument en mode « **DC auto range mtesla** ».

Vous êtes maintenant prêt à prendre des mesures. Vous pouvez vérifier le bon fonctionnement du teslamètre en utilisant l'aimant de vérification fourni dans l'étui. Notez qu'un champ rentrant dans la sonde (pôle nord) donne une valeur positive alors qu'un champ sortant de la sonde (pôle sud) donne une valeur négative. Par convention, les lignes de force voyagent du pôle nord au pôle sud.

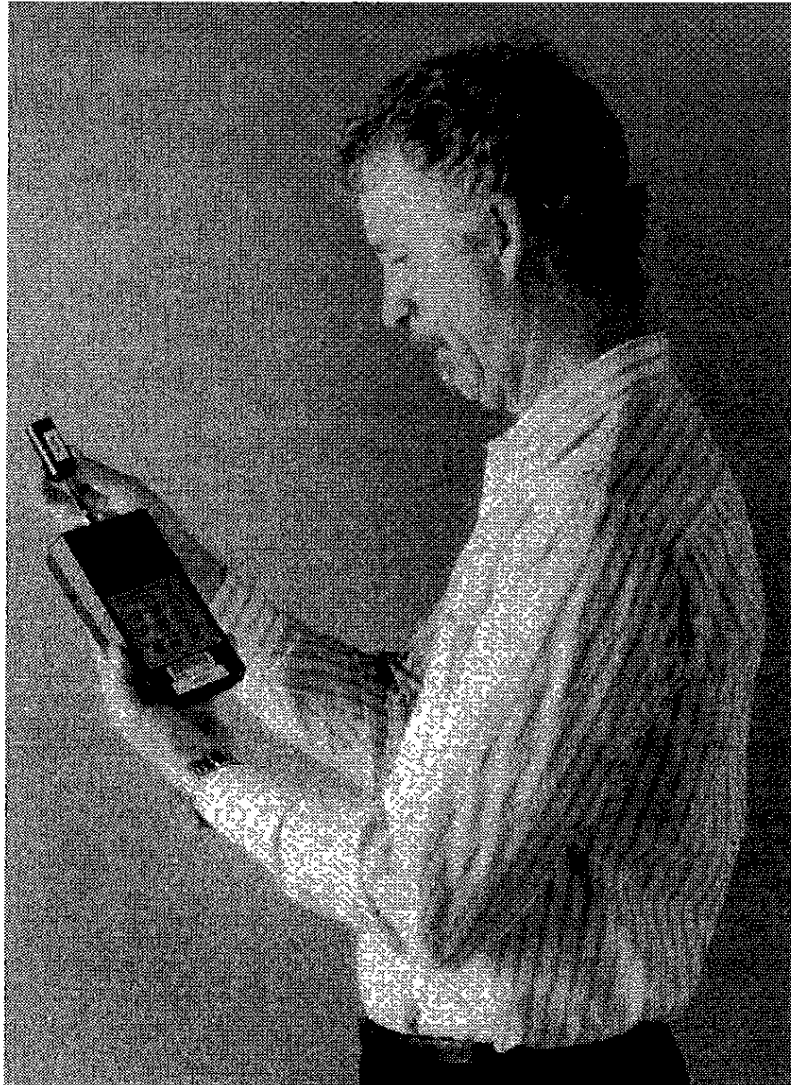


Figure 17 : Chambre à zéro tesla pour le teslamètre Bell 4048

(tenue dans la main droite du technicien)

Pour retirer la sonde de l'instrument, vous devez appuyer sur le petit bouton noir à la base de la sonde puis tirer. Il en va de même pour la rallonge.

3- MESURE DES CHAMPS MAGNÉTIQUES ALTERNATIFS

3.1- MESURE AVEC LE HOLADAY HI-3627 ET LE CÂBLE DE RALLONGE DE LA SONDE

Cette mesure nécessite deux personnes et le câble de rallonge. La façon la plus simple de mesurer le champ magnétique alternatif est d'utiliser le Holaday modèle HI-3627 avec le

câble de rallonge⁽⁵⁾ de 30 mètres pour la sonde (figure 18). **N.B. Vous devez faire une demande spécifique pour la rallonge.**

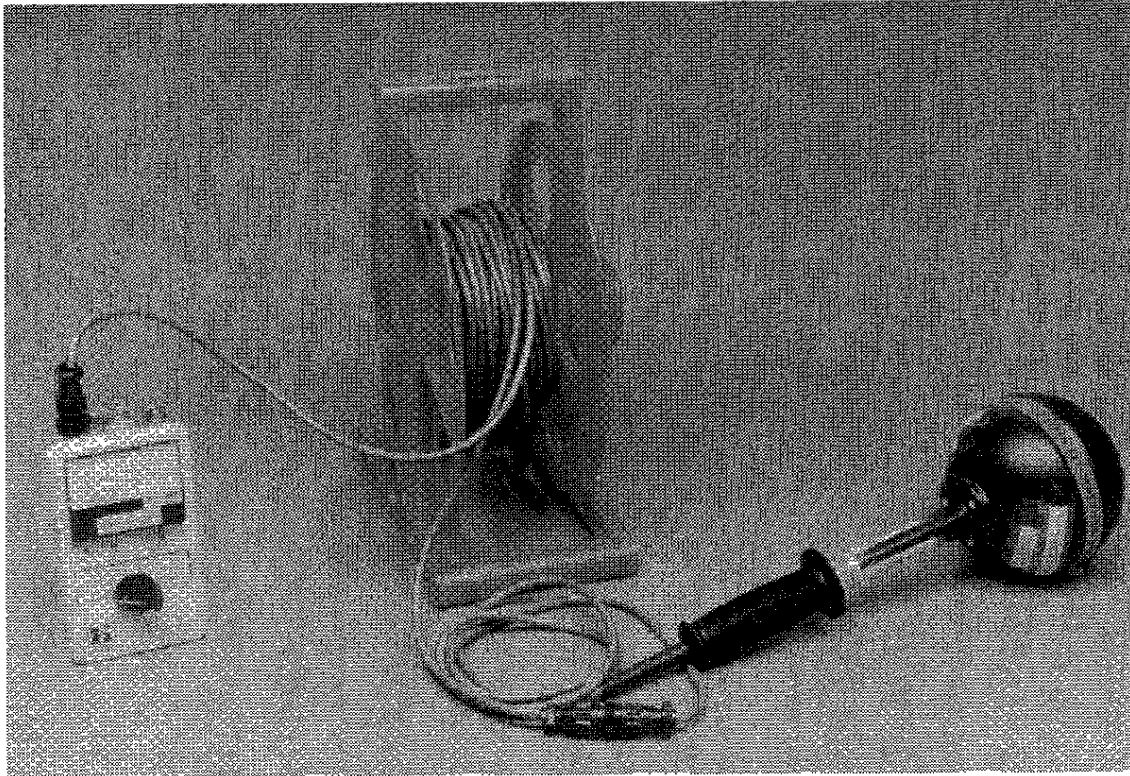


Figure 18 : Champmètre Holaday HI-3627 et câble de rallonge de 30 m

Il est très important de faire une mesure à deux personnes **en plaçant le HI-3627 hors d'un champ magnétique statique intense (ce dernier devrait être inférieur à 10 mT)** c'est-à-dire loin des barres d'alimentation qui sont des sources de champ magnétique statique intense qui **démagnétiseraient le galvanomètre du HI-3627 et le rendraient inutilisable**. Utilisez le teslamètre HI-3550 afin de trouver un endroit sûr pour entreposer et utiliser le HI-3627. Même si le HI-3627 n'est pas allumé, vous pouvez quand même démagnétiser son galvanomètre en circulant dans des aires à fort champ magnétique. Méfiez-vous, certaines barres de distribution passent sous les planchers et à l'intérieur de murs, elles ne sont donc pas toujours visibles. Faites une visite préliminaire des lieux accompagné d'un électricien afin de connaître l'emplacement des barres de distribution.

En consultant la section 1.5, on constate que pour une densité magnétique (B) égale à 10 mT et pour un courant (I) pouvant atteindre 425 000 ampères dans certaines usines, ceci impose une distance minimale des barres de distribution de :

⁽⁵⁾ Le câble de 30 mètres n'introduit pas d'atténuation significative pour le HI-3627. Les mesures faites en laboratoire donnent un facteur maximum d'atténuation de 0,997.

$$r = \frac{\mu_0 I}{2 \pi B} = \frac{4 \pi \times 10^{-7} \times 425\,000 \text{ A}}{2 \pi \times 10 \times 10^{-3} \text{ T}} = 8,5 \text{ m}$$

La rallonge mesure 30 mètres, vous ne devriez donc pas avoir d'ennuis. Une personne doit donc faire la lecture du champmètre alternatif dans un endroit sûr pendant que l'autre personne se déplace le long des barres de distribution avec la sonde. Une paire de walkie-talkies facilitera la prise de mesures. Faites-en la demande à l'usine, la plupart en possède.

Pour connaître la fréquence du champ magnétique, l'IRSST a ajouté un connecteur coaxial sur le teslamètre Holaday. Ce connecteur est relié à l'un des 3 amplificateurs de bobine. Il est ainsi possible de relier l'une des 3 bobines du Holaday avec l'oscilloscope Fluke 97 de façon à lire la fréquence et voir la forme de l'onde (figure 19).



Figure 19 : Raccordement de l'oscilloscope Fluke 97 au Holaday HI-3627

Mode d'opération du raccordement de l'oscilloscope au champmètre Holaday (référez-vous à la section 3.3 pour l'emplacement des boutons de l'oscilloscope) :

Reliez le connecteur coaxial du Holaday à l'entrée «A» de l'oscilloscope Fluke 97 à l'aide du câble coaxial placé dans le couvercle de la valise du Holaday.

Après avoir allumé l'oscilloscope par la touche verte «ON», appuyez sur la touche noire «setup» dans l'encadré blanc «memory». Puis appuyez sur la touche bleue «recall». Puis avec les 2 touches bleues, choisissez «setup 1» et appuyez sur la touche bleue correspondante à «enter». Vous pourrez ainsi connaître la fréquence du signal que vous mesurez. De plus, en tournant le bouton des échelles sur le HI-3627, vous contrôlez le gain du signal transmis à l'oscilloscope.

Vous pouvez également avoir une image plus grande du signal en vous plaçant en mode «scope» (bouton gris) puis en appuyant sur la touche turquoise «autoset». Toutes les lectures apparaissent à droite de l'écran. Ajustez le gain du signal, au canal A, avec le bouton gris foncé «mV/V» dans l'encadré blanc «Channel A» et le nombre de cycles apparaissant à l'écran avec le bouton noir «s TIME ns».

Si vous avez des doutes sur le bon fonctionnement du HI-3627, utilisez l'étalon magnétique à 60 Hz placé dans la valise de transport. Branchez-le dans une prise de 110 Vca et placez-le sur le dessus de la sonde. L'instrument devrait lire environ 0,3 mT. Cette dernière valeur est approximative, car elle dépend de la tension d'alimentation. Par contre, soyez assuré que si le galvanomètre est démagnétisé, jamais vous ne vous rapprocherez de cette valeur.

Comme il n'existe qu'une seule recommandation pour tous les champs magnétiques alternatifs situés entre 300 Hz et 30 kHz, et comme la fréquence du champ magnétique alternatif en provenance de la barre de distribution est soit 360 Hz, 720 Hz ou 1440 Hz, il n'est pas nécessaire d'identifier⁽⁶⁾ la fréquence du champ magnétique alternatif pour votre mesure puisque ce sera toujours la même recommandation de 200 μ T qui s'appliquera.

L'étalonnage du HI-3627 est valide jusqu'à au moins 1 440 Hz avec une erreur de $\pm 5\%$ ⁽⁷⁾. Comme la sonde est triaxiale, il n'est pas nécessaire de l'orienter dans toutes les directions pour la recherche du vecteur maximum. La distance de la source à la sonde doit être mesurée par rapport au ruban jaune qui entoure la sonde et non sa face avant. Ce qui a pour conséquence de ne permettre une mesure qu'à une distance minimale de 6,33 cm d'une source.

La sonde du Holaday a une surface d'intégration de 100 cm² et un noyau d'air. Parce que les champs que vous mesurez ne sont pas homogènes, **il est donc très important de**

⁽⁶⁾ L'identification de la fréquence peut quand même être utile pour la réalisation d'un écriteau de mise en garde tel que celui illustré à la section 6.

⁽⁷⁾ Pour un champ monophasé. L'instrument peut faire une erreur additionnelle de +41% au maximum pour un champ triphasé. Par contre, cette situation ne se produit que pour un point de mesure situé à égale distance des trois phases. Dès que le point de mesure n'est plus équidistant des trois phases, cette erreur est réduite considérablement, pour complètement disparaître dès qu'une des phases devient dominante de part la position du point de mesure. Cette erreur est inexistante pour des mesures faites autour des barres de distribution à courant continu puisque les trois phases disparaissent à la sortie des redresseurs.

rapporter ces spécifications dans votre rapport afin que les mesures puissent être reprises avec une sonde de mêmes caractéristiques et qu'elles soient reproductibles.

3.2- *MESURE AVEC LA BOBINE PERFECTION MICA ET L'OSCILLOSCOPE FLUKE 97*

Si la mesure à deux n'est pas possible ou que le niveau de champ magnétique dans lequel baignerait le HI-3627 serait supérieur à 10 mT, vous devez utiliser la bobine étalonnée Perfection Mica modèle EP-107 (placée dans la mallette de transport de l'oscilloscope, elle l'accompagne toujours) reliée à l'oscilloscope à cristaux liquides Fluke 97 (figure 20).



Figure 20 : Bobine EP-107 reliée à l'oscilloscope Fluke 97

La fréquence des ondulations résiduelles responsables du champ magnétique alternatif est soit de 360 Hz, 720 Hz ou 1440 Hz.

Il s'agit dans un premier temps **d'identifier la fréquence** du champ car elle servira dans l'équation (donnée plus bas) de la bobine pour convertir la lecture de mV en tesla. Une fois la fréquence identifiée avec l'oscilloscope Fluke 97, vous pouvez utiliser un multimètre numérique en mode tension alternative au lieu de l'oscilloscope à condition qu'il puisse mesurer jusqu'à 1440 Hz. À partir de maintenant, toutes les mesures faites aux alentours des redresseurs et des barres de distribution, le seront pour des champs à la fréquence mesurée précédemment. Il est important de vous rappeler que pour toute

mesure faite ailleurs qu'aux redresseurs ou barres de distribution, vous devez d'abord identifier la nouvelle fréquence.

L'étalonnage de la bobine est valide jusqu'à 3 kHz avec une erreur de $\pm 5\%$. La bobine doit être orientée dans toutes les directions pour la recherche du vecteur maximum. La distance de la source à la bobine doit être mesurée par rapport au ruban jaune qui entoure la bobine et non sa face avant. Ce qui a pour conséquence de ne permettre une mesure qu'à une distance minimale de 2,5 cm d'une source.

La bobine Perfection Mica a une surface d'intégration de 7 cm^2 et un noyau d'air. Parce que les champs que vous mesurez ne sont pas homogènes, **il est donc très important de rapporter ces spécifications dans votre rapport** afin que les mesures puissent être reprises avec une sonde de mêmes caractéristiques et qu'elles soient reproductibles.

L'équation de conversion de voltage à tesla pour la bobine Perfection Mica, EP-107 est :

$$B \text{ (tesla)} = \frac{60 \times \text{tension (mV)}}{56,0 \times \text{fréquence (Hz)} \times 10^4}$$

Notez que la fréquence est nécessaire et que la tension est exprimée en millivolt et non en volt.

Branchez la bobine au canal A de l'oscilloscope à l'aide de l'adaptateur pour convertir la fiche banane en une fiche BNC (figure 21) si ce n'est déjà fait.

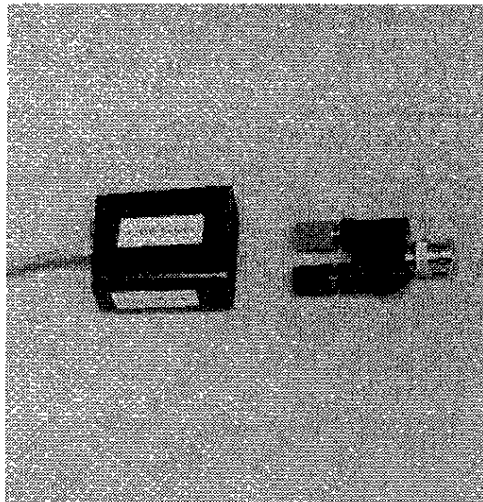


Figure 21 : Raccordement de la bobine à l'oscilloscope à l'aide de l'adaptateur banane-bnc.

3.3- FONCTIONNEMENT DE L'OSCILLOSCOPE FLUKE 97

Allumez l'oscilloscope en appuyant sur le bouton vert «on/off» en bas à gauche de l'instrument (figure 22). Assurez-vous qu'il est en mode «Scope» en appuyant sur le bouton gris «Scope».

Assurez-vous que le ratio de sonde est à 1:1 sur l'oscilloscope (la ligne du haut affiche «1:1 probe»). Dans le cas contraire, appuyez sur le bouton noir «LCD» puis sur le bouton bleu correspondant à «Probe Cal». Choisissez à l'aide des boutons bleus de défilement vers le haut et vers le bas (au haut du clavier et à droite) le ratio 1:1 pour le canal A.

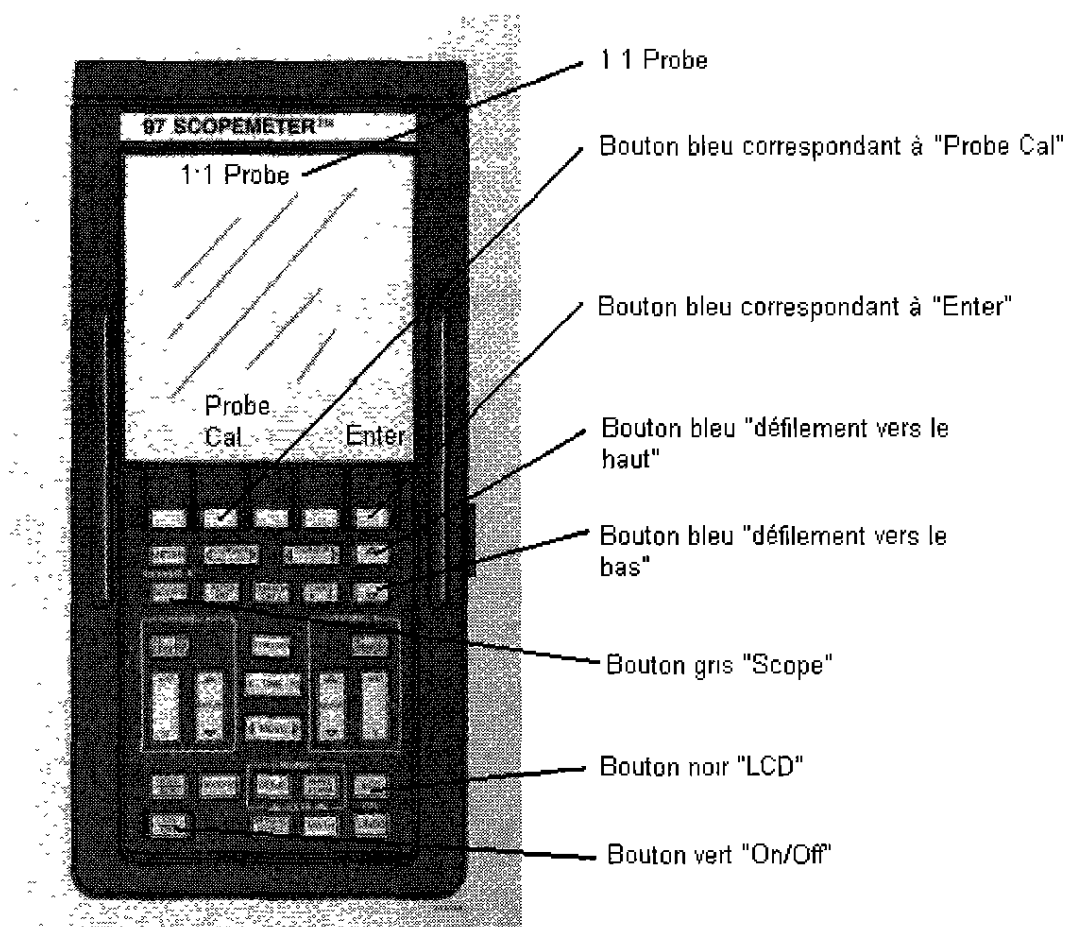


Figure 22 : Oscilloscope Fluke 97 – Emplacement des boutons pour le réglage préliminaire

Lorsque la source émet un champ, faites un réglage automatique de l'oscilloscope en appuyant sur le bouton turquoise «Autoset» (figure 23). Orientez la sonde selon différentes directions pour optimiser l'intensité. Appuyez de nouveau sur «Autoset» pour régler l'amplitude si c'est nécessaire.

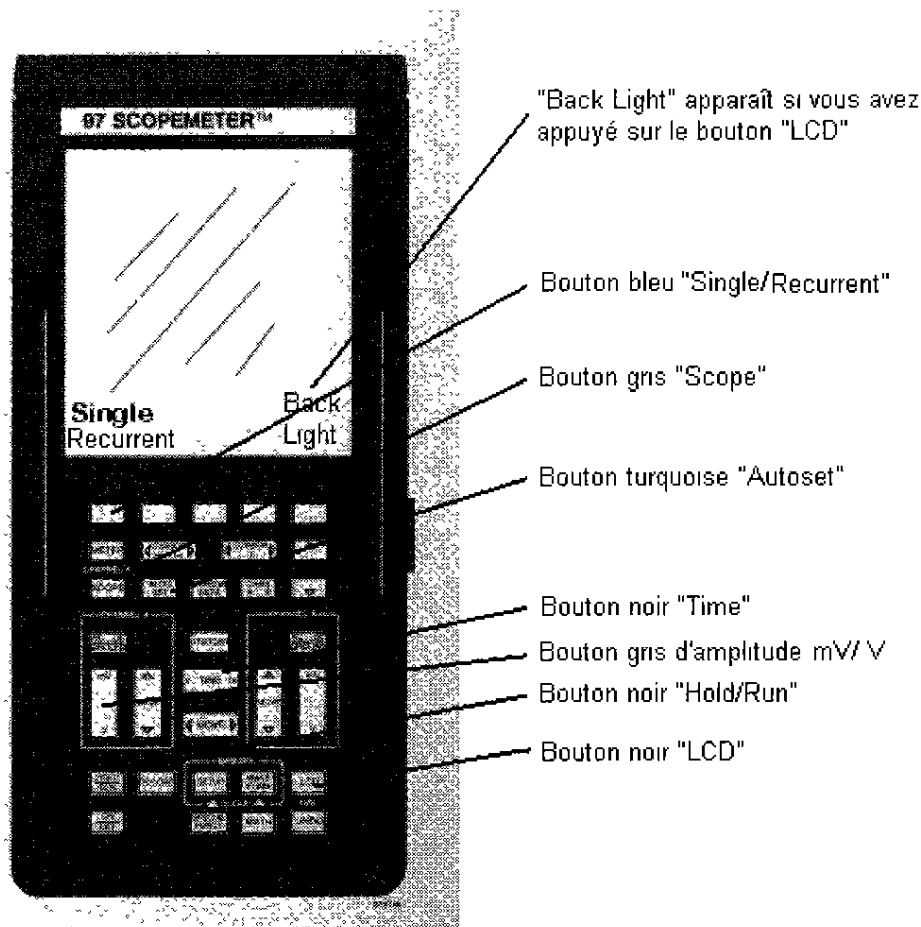


Figure 23 : Oscilloscope Fluke 97 – Emplacement des boutons pour la prise d'une mesure

Placez l'oscilloscope en mode «single» en appuyant sur le bouton «Scope» (figure 23) puis appuyez sur le bouton bleu de la 1^{ère} colonne pour obtenir le mode «single». Dans ce mode, l'oscilloscope agit comme une caméra : lorsque la source émettra son champ magnétique appuyez sur le bouton «Hold/Run» (au-dessus du bouton vert «on/off»). Le signal sera ainsi capturé à l'écran de l'oscilloscope et y demeurera aussi longtemps que vous n'appuierez pas de nouveau sur le bouton «Hold/Run».

Pour ajuster manuellement l'amplitude du signal, appuyez d'un côté ou de l'autre du bouton gris foncé «mV/V» dans l'encadré blanc «Channel A » (figure 23) et pour ajuster manuellement le nombre de cycles apparaissant à l'écran, appuyez d'un côté ou de l'autre du bouton noir «s TIME ns». Pour chaque nouvel ajustement de l'amplitude ou du balayage, vous ne pourrez voir les résultats qu'en capturant une nouvelle onde en appuyant de nouveau sur «Hold/Run».

Lorsque vous êtes satisfait de la clarté du signal et que celui-ci représente le signal maximum obtenu par orientation optimale de la bobine, placez-le en mémoire :

Appuyez sur le bouton gris «waveform» dans la case blanche «Memory» (figure 24). Appuyez sur le bouton bleu de la 3^e colonne correspondant à «copy». Utilisez les boutons bleus de défilement vers le haut et vers le bas, pour choisir le canal A puis appuyez sur le bouton bleu correspondant à «Enter». Puis choisissez la mémoire dans laquelle vous voulez mémoriser le signal à l'aide des boutons bleus de défilement vers le haut et vers le bas, ensuite appuyez sur le bouton bleu correspondant à «Enter». Il est recommandé d'identifier le contenu de chaque mémoire sur une feuille à part puisque vous ne pouvez identifier chaque tracé à l'oscilloscope.

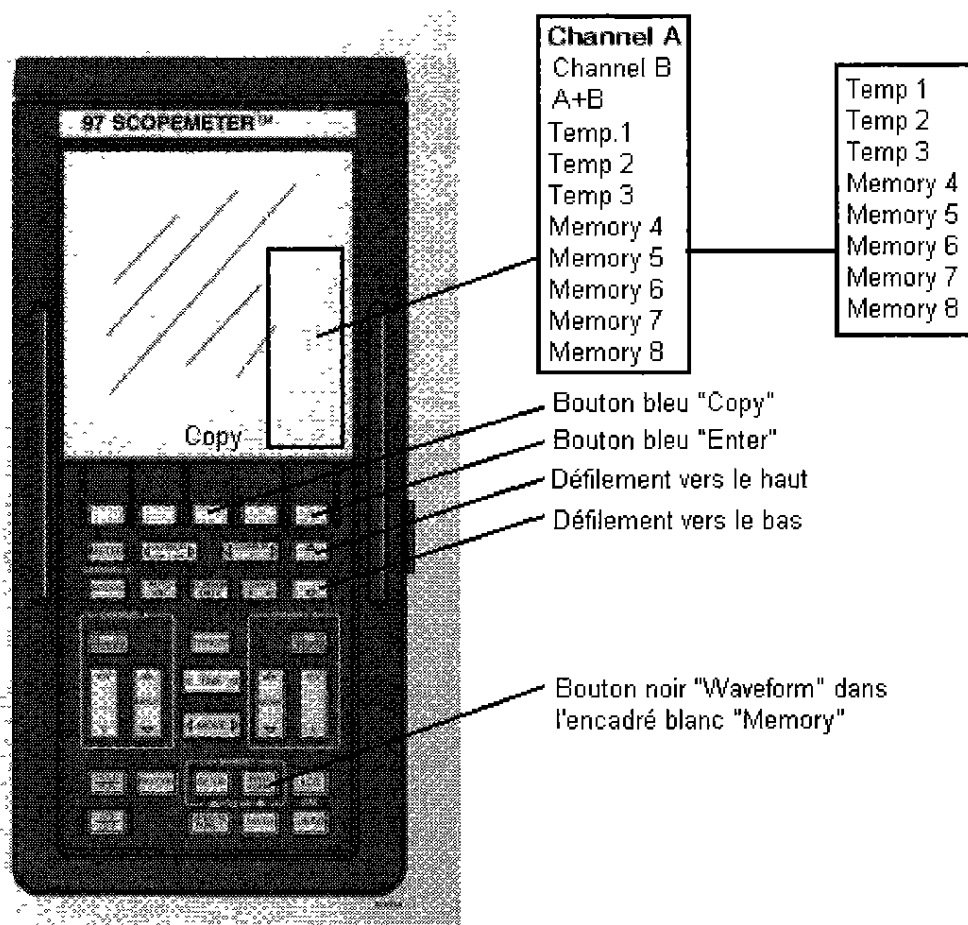


Figure 24 : Oscilloscope Fluke 97 – Emplacement des boutons pour la mise en mémoire

4.- MESURE DES DISTANCES

N'utilisez qu'un ruban à mesurer fait de **fibre de verre** ou une règle en plastique afin de prévenir les chocs électriques dus au contact direct avec un conducteur à haute tension.

L'évaluation des distances est grandement simplifiée par l'utilisation d'un télémètre à laser. En effet, vous pouvez connaître avec une résolution de 1 mm la distance entre la source et votre sonde de mesure par l'utilisation du télémètre à laser DISTO de la compagnie LEICA (figure 25). De plus, puisque sa lumière est d'un rouge vif, on peut facilement cibler la source.

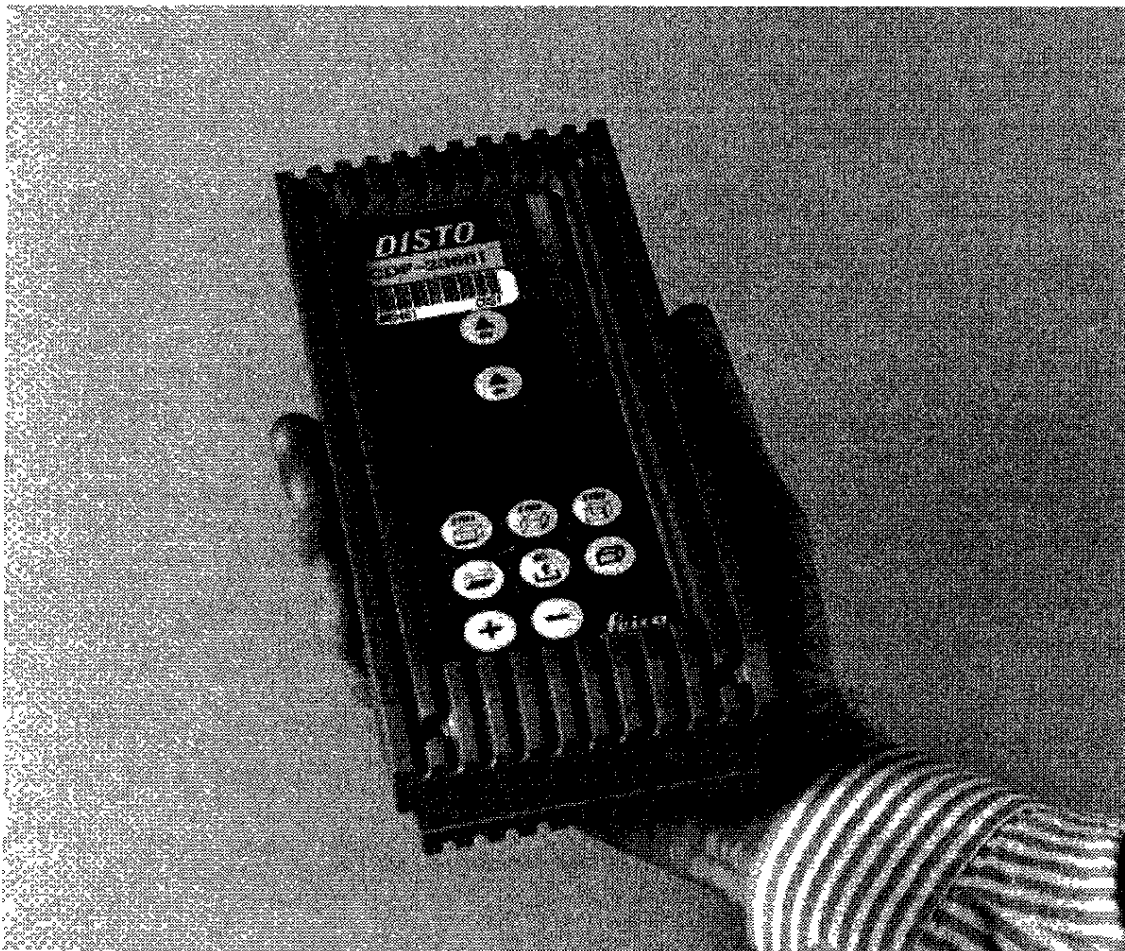


Figure 25 : Télémètre à laser Leica

4.1 FONCTIONNEMENT DU TÉLÉMÈTRE LEICA

Le télémètre modèle Disto de Leica est conçu pour effectuer des mesures rapides de distance entre 20 cm et 30 mètres sans cible et jusqu'à 100 mètres avec une cible. Vous trouverez dans la valise de transport du télémètre une cible de couleur brune, à cette fin. L'incertitude des mesures est de ± 3 mm à un niveau de confiance de 95%. Une mesure peut prendre entre 2,5 et 10 secondes selon la netteté du faisceau réfléchi. Les mesures doivent se faire dans un environnement entre -10 et 50°C . Commencez par charger la batterie du télémètre en insérant la fiche du chargeur dans le côté gauche du télémètre. Celui-ci possède un chargeur intelligent qui ne peut surcharger la batterie. Un signal audible vous avertit quand la batterie est pleinement chargée. Le symbole de batterie sur l'affichage vous indique son état.

Si vous désirez mesurer par rapport à l'avant du télémètre appuyez sur le bouton «on» situé au haut de l'instrument. Si vous désirez mesurer par rapport à l'arrière du télémètre appuyez sur le deuxième bouton «on» situé sous le premier. Les valeurs affichées tiennent compte de l'épaisseur de la gaine grise de protection.

Pour seulement allumer le faisceau laser, n'appuyez qu'une seule fois sur «on». «LASER» apparaît sur l'affichage.

Pour éteindre le laser, appuyez une fois sur «-». Pour éteindre l'instrument, appuyez une seconde fois sur «-».

Pour faire une mesure de distance, appuyez deux fois de suite sur «on». «DISTANCE» apparaît sur l'affichage.

Pour mesurer en continu lorsque vous vous déplacez, appuyez trois fois de suite sur «on». «TRC» pour tracking, apparaît à l'affichage. Pour arrêter les mesures consécutives, appuyez sur «-». Pour éteindre l'instrument, appuyez trois fois sur «-».

L'instrument s'éteint de lui-même lorsqu'aucune opération n'est effectuée.

Pour éclairer l'affichage, appuyez simultanément sur les deux boutons de droite «cube» et «STO3». Pour l'éteindre, faites la même opération.

Pour mesurer à partir du coin d'une pièce, dépliez la barre de référence sous l'appareil et placez-la dans le coin de la pièce. Ajoutez 50 mm au résultat. Pour évaluer la superficie ou le volume d'une pièce, consultez le manuel d'opération.

N'oubliez pas qu'il s'agit d'un laser et comme tel, respectez les mesures élémentaires de sécurité qui s'imposent.

5. - LIMITES D'EXPOSITION

5.1 CHAMPS MAGNÉTIQUES STATIQUES

Le Québec n'a aucun règlement relatif à l'exposition aux champs magnétiques statiques. Toutefois, certains organismes dont l'ACGIH, ont émis des recommandations décrites dans le tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1 : Recommandations de l'ACGIH 1999 pour le champ magnétique <u>statique</u>			
	<i>Limite d'exposition moyenne pondérée sur 8 heures</i>	<i>Dose limite sur 8 heures</i>	<i>Valeur plafond</i>
<i>Tronc</i>	60 mT	480 mT-h	2T
<i>Membres</i>	600 mT	4 800 mT-h	5T
<i>Porteur d'équipement électronique médical</i>	N/A	N/A	0,5 mT

Source : American Conference of Governmental Industrial Hygienists. Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices for 1999. Cincinnati, Ohio, 45211-4438. p141.

La dose de densité magnétique à ne pas excéder est de 60 mT pour 8 heures soit 480 mT-h pour le tronc et 600 mT pour 8 heures soit 4800 mT-h pour les membres. À cela s'ajoute une valeur plafond de 2T pour le tronc, 5 T pour les membres et 0,5 mT pour les porteurs d'appareil médical électronique selon l'ACGIH⁽⁸⁾ 1999. Une mise en garde s'applique pour toute personne portant des broches de suture, pinces chirurgicales ou prothèses faites de matériaux ferromagnétiques. En effet, celles-ci pourraient être fortement attirées ou même arrachées du corps de la personne, si cette dernière était placée dans un champ magnétique très intense.

Les cas qui suivent portent sur une exposition au tronc. La même procédure pourrait être suivie pour une exposition aux membres en positionnant le dosimètre sur un bras ou une jambe.

5.1.1- Si l'exposition du travailleur est toujours inférieure à 60 mT

Alors le temps d'exposition permis pour le travailleur sera illimité peu importe la durée de son quart de travail. La mesure de la densité magnétique se fait avec le

(8) American Conference of Governmental Industrial Hygienists

teslamètre/dosimètre HI-3550 en mode instantané « ΔB » et «DC». Référez-vous à la figure 14 pour la position de ces boutons.

5.1.2- Si l'exposition du travailleur est constante et supérieure à 60 mT

Alors le temps d'exposition **en heures** permis pour le travailleur sera de 480 mT-h divisé par la densité magnétique mesurée en **mT**.

5.1.3- Si l'exposition du travailleur n'est pas constante et peut dépasser 60 mT

On doit alors procéder à une dosimétrie avec le HI-3550 en mode intégration « $\int B$ » et «DC». Référez-vous à la figure 14 pour la position de ces boutons. Une ou l'autre des situations suivantes peut se présenter dans ce cas :

- a) Le quart de travail du travailleur est inférieur ou égal à 8 heures

Placez le dosimètre sur le travailleur au début de son quart et reprenez-le à la fin. La lecture du HI-3550, en mode intégration « $\int B$ » et «DC», doit être inférieure à 480 mT-h

- b) Le quart de travail du travailleur est supérieur à 8 heures

Placez le dosimètre sur le travailleur au début de son quart et reprenez-le après 8 heures. Notez la valeur de la dose. Le lendemain, placez le dosimètre sur le travailleur une heure après le début de son quart et reprenez-le après 8 heures. Notez la valeur de la dose. Le lendemain, attendez 2 heures avant le début des mesures et ainsi de suite jusqu'à ce que vous ayez couvert toute la période de son quart de travail avec une fenêtre de mesure de 8 heures. Par exemple, si le quart de travail est de 12 heures, vous aurez besoin de 4 échantillons décalés d'une heure. Retenez la dose maximale. Elle doit être inférieure à 480 mT-h.

Cette façon de procéder suppose que le travailleur suit à peu près la même routine, c'est-à-dire qu'il subit l'exposition des mêmes équipements d'une journée à l'autre. Si ce n'est pas le cas, vous devrez faire plus de mesures afin d'obtenir des fenêtres d'acquisition de 8 heures qui couvrent toutes les possibilités d'exposition provenant de tous les équipements sujets à exposer le travailleur.

Le tableau qui suit résume les quatre cas possibles d'exposition.

Tableau 2 : Méthode de mesure du champ magnétique statique en fonction de l'exposition au champ et de la durée du quart de travail				
Niveau d'exposition pour le tronc* Selon l'ACGIH 1999	< 60 mT		> 60 mT	
	Exposition au champ statique	Constante ou variable	Constante	Variable
Quart de travail	< ou > 8 h	< ou > 8h	≤ 8h	> 8h
Temps d'exposition permis en heures selon l'ACGIH	Infini	480 mT-h/B où B est la densité magnétique mesurée en mT	Dosimétrie sur la durée du quart de travail Dose < 480 mT-h	Dosimétrie à fenêtre de 8 h couissant d'une heure chaque jour Dose < 480 mT-h pour chaque fenêtre
Référence voir section	5.1.1	5.1.2	5.1.3a	5.1.3b

* Les mêmes règles s'appliquent pour la mesure au niveau des membres sauf qu'il faut utiliser 600 mT au lieu de 60 mT pour une lecture instantanée et 4 800 mT-h au lieu de 480 mT-h pour une dose.

5.2 CHAMPS MAGNÉTIQUES ALTERNATIFS

Le Québec n'a aucun règlement relatif à l'exposition aux champs magnétiques alternatifs. Toutefois, certains organismes dont l'ACGIH, ont émis des recommandations décrites dans les tableaux 3 et 4 ci-dessous.

Tableau 3 : Recommandations de l'ACGIH 1999 pour une exposition au champ magnétique alternatif de 60 Hz	
Exposition au tronc, pour la journée	1 000 μ T
Pour travailleurs avec stimulateur cardiaque	100 μ T
Exposition aux bras et jambes	5 000 μ T (5 fois la valeur du tronc)
Exposition aux mains et pieds	10 000 μ T (10 fois la valeur du tronc)

Source : American Conference of Governmental Industrial Hygienists. Threshold Limit Value and Biological Exposure Indices for 1999. Cincinnati, Ohio, 45211-4438. p143.

Tableau 4 : Recommandations de l'ACGIH 1999 pour une exposition aux champs magnétiques alternatifs de 360 Hz, 720 Hz ou 1 440 Hz	
<i>Exposition au tronc, bras ou jambes pour la journée</i>	0,2 mT
<i>Pour travailleurs avec stimulateur cardiaque</i>	0,1mT

Source : American Conference of Governmental Industrial Hygienists. Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices for 1999. Cincinnati, Ohio, 45211-4438. p143.

6.- MOYENS DE CONTRÔLE

La façon la plus simple et la moins coûteuse de réduire l'exposition au champ magnétique est par l'éloignement du travailleur de la source. On signalera la zone sécuritaire à l'aide de ruban adhésif ou d'une bande de peinture et d'un écriteau, à lettres noires sur fond jaune, similaires à ceux illustrés aux figures 26 et 28 selon qu'il s'agit d'un champ magnétique statique ou alternatif. La figure 27 illustre un danger pour les porteurs de stimulateurs cardiaques. Sur ce dernier écriteau, le pictogramme est noir pour le cœur, le fil et la batterie ; et le cercle barré est rouge. Le tout est dessiné sur un fond blanc.



Figure 26 : Écriteau de mise en garde contre le champ magnétique statique

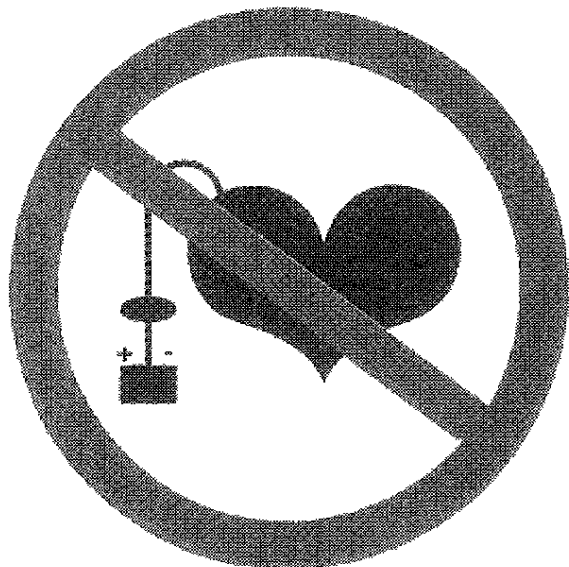


Figure 27 : Pictogramme d'avertissement pour les porteurs de stimulateur cardiaque

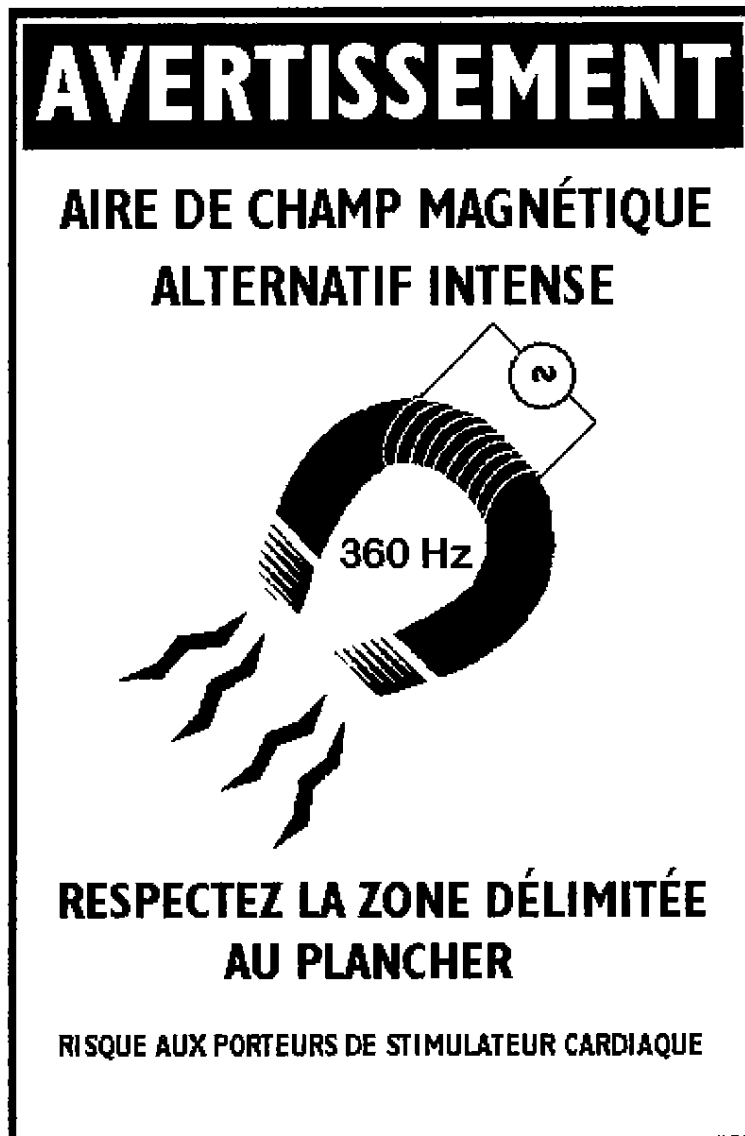


Figure 28 : Écriteau de mise en garde contre le champ magnétique alternatif de 360 Hz

Notez que contrairement à l'écriteau du champ magnétique statique, celui-ci ne comporte plus de mise en garde pour les porteurs de broches de suture, pinces chirurgicales ou prothèses faites de matériaux ferromagnétiques. La raison est que le champ magnétique alternatif attire et repousse 360 fois par seconde les objets ferromagnétiques. Il n'y a donc aucun effet net d'attraction. **Il pourrait par contre y avoir un échauffement des objets métalliques mais le champ magnétique alternatif devrait être beaucoup plus puissant que ce que l'on retrouve dans les usines électrochimiques.** La fréquence de l'écriteau devrait correspondre à la fréquence réelle de l'emplacement, donc 60 Hz, 360 Hz, 720 Hz et 1440 Hz, etc.

Lorsque l'éloignement du travailleur n'est pas possible, on doit examiner la possibilité de réduire le champ magnétique par un réarrangement géométrique des câbles ou des barres d'alimentation. En effet, il est important de maintenir les conducteurs d'aller et de retour du courant, les plus rapprochés possible afin que les champs magnétiques des conducteurs s'annulent. L'équation suivante démontre l'avantage de rapprocher le conducteur d'aller de celui de retour :

$$B = \frac{\mu_0 I d}{2 \pi r^2}$$

où :

- B : densité du champ magnétique en Tesla
- μ_0 : perméabilité du vide (4×10^{-7} Weber/A-m)
- I : intensité du courant en ampère
- d : distance séparant les deux conducteurs en mètre. La distance «d» doit être beaucoup plus petite que «r».
- r : distance, du centre des deux barres d'alimentation ou des deux conducteurs au point de mesure, en mètre.

L'atténuation du champ magnétique se fait selon $1/r^2$ lorsque $d \ll r$.

Lorsque l'éloignement de la source ou le rapprochement des barres de distribution pour l'aller et le retour du courant ne peuvent se faire, la dernière solution consiste à blinder la source. Il s'agit d'une solution très dispendieuse. Le meilleur blindage est celui qui entoure complètement la source avec le moins d'arêtes possibles. Selon le niveau d'atténuation souhaité, le blindage comportera une ou plusieurs couches de matériaux ferromagnétiques isolées les unes des autres. On évitera de faire un blindage spiralé autour de la source ce qui aurait pour conséquence de créer un courant de Foucault qui générerait à son tour, un autre champ magnétique.

Le fer ou l'acier doux roulé à froid (très peu de carbone) est un matériau relativement peu dispendieux qui se prête bien au blindage aux basses fréquences. Sa perméabilité relative à l'air est d'environ 180 [White, 1980 p 2.2]. Celui-ci est disponible en feuille de 4 x 8 pieds et de 1/16 de pouce d'épaisseur pour moins de 50\$. Une telle feuille pèse environ 36 kg. Pour de petits volumes, il est souhaitable d'avoir un matériau moins lourd et plus efficace. On se tournera alors vers la classe de matériaux appelés mu-métaux. Plus légers et beaucoup plus efficaces, ils sont aussi beaucoup plus dispendieux et nécessitent un grand soin dans leur manipulation.

Si le blindage comporte plusieurs couches, le matériau qui possède la plus basse perméabilité et le plus haut niveau de résistance à la saturation est placé en premier. Suivront par la suite les matériaux qui ont de plus en plus de perméabilité et de moins en moins de résistance à la saturation. Chaque couche doit être isolée électriquement de la précédente.

Le blindage d'un champ magnétique statique ou alternatif de fréquence très basse peut se faire à l'aide d'un cylindre placé autour du conducteur responsable d'une trop forte émission. Sa longueur doit être au moins quatre fois plus grande que son diamètre. De plus, si le joint n'est pas soudé, il faut alors faire chevaucher d'au moins 2 cm une paroi sur l'autre de façon à faciliter le passage du flux magnétique.

L'efficacité du blindage (EB) du champ magnétique peut se calculer à l'aide de l'équation suivante :

$$EB_{dB} \cong 20 \log_{10} \left(1 + \frac{\mu_r t}{2r} \right)$$

où : EB : Efficacité du blindage en décibel
 μ_r : perméabilité relative du matériau de blindage par rapport à l'air
t : épaisseur du matériau de blindage
r : rayon du cylindre de blindage ou distance conducteur plaque de blindage

t et r doivent avoir les mêmes unités métriques ou anglaises

Cette équation n'est valable que pour les champs magnétiques statiques et alternatifs de basses fréquences. Les équations en annexe 2 permettent de le vérifier. [White, 1980 p1.32].

L'efficacité du blindage (EB) en décibel est reliée aux intensités des champs magnétiques de la façon suivante :

$EB_{dB} = 20 \log_{10}(H_b/H_a)$ où : H_b : intensité du champ magnétique avant blindage
H_a : intensité du champ magnétique après blindage

N.B. La perméabilité relative d'un matériau μ_r varie en fonction de l'intensité du champ magnétique extérieur et de sa fréquence, surtout pour les fréquences de plusieurs kHz. Les fabricants de mu-métaux donnent habituellement la courbe d'hystérésis des différents matériaux de blindage afin d'en déduire la perméabilité en fonction du champ magnétique extérieur et de connaître également le point de saturation.

Pour plus d'informations sur la façon de blinder et les matériaux disponibles, consultez les sites suivants.

Avis : La documentation fournie sur ces sites est en perpétuel changement et est hors du contrôle de l'IRSST. Elle vous est fournie à titre de référence seulement. L'IRSST ne peut être tenu responsable des opinions, du contenu ou de l'exactitude de l'information fournie sur ces sites.

Notez que certains sites pourraient ne plus être actifs au moment de la lecture de ce document.

<http://www.acornnmr.com/shielding.htm>

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

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

http://www.enertech.net/html/emf_mitigation.html#vdt

<http://www.fms-corp.com/>

<http://www.magnetic-shield.com/>

<http://www.mnsinc.com/emf/magneticshielding.html>

7.- BIBLIOGRAPHIE

Fluke. SW90W Logiciel FlukeView Scopemeter. Mode d'emploi. Décembre 1996, Rev. 2, 2/97.

Fluke. 93/95/97 50 MHz Scopemeter. Manuel d'utilisation. N° 930816.1993.

Holiday Industries Inc. HI-3550 Magnetic Field Monitor User's Manuel. 1993.

Leica. Disto User manual. 1994.

Philips. PM9080/001 Optically Isolated RS-232-C Interface Adapter for ScopeMeter Model 97. Manuel d'instruction. N° 4822 872 00527 Rev 921201. 1992.

White, Donald R.J. Electromagnetic Shielding – Materials and Performance. Published by Don White Consultants, Inc. 1980.

Wildi, Théodore en collaboration avec Gilbert Sybille. Électrotechnique. Les presses de l'Université Laval.1991. Chapitre 32 et 48.

World Health Organization. Environmental Health Criteria 69 - Magnetic Fields. Geneva 1987. p27.

Annexe 1 : Tableau de conversion des unités de champ magnétique

TABLEAU DE CONVERSION POUR DIFFÉRENTES UNITÉS DE CHAMP MAGNÉTIQUE DANS L'AIR					
Pour obtenir l'unité dans la case horizontale multipliez l'unité dans la case verticale par le facteur correspondant					
	T	G	γ	A/m	Oe
T	1	10^4	10^9	$7,96 \times 10^5$	10^4
G	10^{-4}	1	10^5	79,6	1
γ	10^{-9}	10^{-5}	1	$7,96 \times 10^{-4}$	10^{-5}
A/m	$1,256 \times 10^{-6}$	$1,256 \times 10^{-2}$	1256	1	$1,256 \times 10^{-2}$
Oe	10^{-4}	1	10^5	79,6	1

Tiré de [WHO, 1987] p 27

T : tesla (Weber/m²)

G : gauss

A : ampère

m : mètre

γ : gamma

Oe : oersted

Annexe 2 : Équation de blindage

Équation générale pour le blindage des champs électrique et magnétique en champ proche et éloigné, pour différentes épaisseurs de matériaux,

$$EB_{ab} = 20 \log_{10} \left\{ e^{\alpha t} \left| \frac{(1+K)^2}{4K} \left[1 - \left(\frac{K-1}{K+1} \right)^2 e^{-2\gamma t} \right] \right| \right\} \quad [\text{White, 1980 p1.18}]$$

De cette équation, il est possible d'obtenir une équation simplifiée pour les champs magnétiques de basses fréquences avec t/δ , K et $2\gamma t \ll 1$. Soit

$$EB_{ab} \cong 20 \log_{10} \left[\frac{1}{4K} [1 - (1-4K)(1-2\gamma t)] \right]$$

$$EB_{ab} \cong 20 \log_{10} \left(1 + \frac{\gamma t}{2K} \right)$$

γ : constante de propagation = $\sqrt{\omega \mu \sigma}$ pour les métaux
 où $\omega = 2 \pi f$

où

$$K = \frac{Z_{\text{onde}}}{Z_{\text{matériau}}} = r \sqrt{2 \pi f \sigma \mu_0 / \mu_r} \quad \text{pour les champs magnétiques}$$

où Z : impédance

f : fréquence en hertz

μ : perméabilité du matériau = $\mu_0 \mu_r$

μ_0 : perméabilité absolue de l'air = $4\pi \times 10^{-7}$ henrys/mètre

μ_r : perméabilité relative par rapport à l'air du matériau

σ : conductivité du matériau en mhos/mètre

[White, 1980 p1.32]

d'où :

$$EB_{ab} \cong 20 \log_{10} \left(1 + \frac{\mu_r t}{2r} \right) \quad \text{si } t/\delta, K \text{ et } 2\gamma t \ll 1$$

où : EB : Efficacité du blindage

μ_r : perméabilité relative du matériau par rapport à l'air

t : épaisseur du matériau de blindage

r : rayon du cylindre de blindage

t et r doivent avoir les mêmes unités métriques ou anglaises.