

**Zeitschrift:** Ingénieurs et architectes suisses  
**Band:** 106 (1980)  
**Heft:** 9

**Artikel:** Atténuation des ondes électromagnétiques de choc par l'acier des armatures de béton  
**Autor:** Sauvain, Hubert / Lin, Chung Chi  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-73945>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 16.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Atténuation des ondes électromagnétiques de choc par l'acier des armatures de béton

par Hubert Sauvain, Fribourg, et Chung Chi Lin, Lausanne

Les bâtiments en béton armé ou métalliques ont pour effet d'atténuer les ondes électromagnétiques de choc générées par la foudre, les opérations dans un réseau électrique ou par une explosion nucléaire.

Les effets d'écran des bâtiments habituels en béton armé ou des bâtiments spécialement protégés ont été mesurés et sont comparés dans la présente étude.

## 1. Introduction

Une tendance générale montre qu'il est fait de plus en plus appel d'une part à des installations électriques complexes pour produire, transporter et distribuer l'énergie et, d'autre part, à l'électronique et l'informatique pour gérer cette énergie ou d'autres systèmes.

Ces réalisations électriques ou électroniques importantes ont cependant comme désavantage d'être sensibles aux parasites agissant dans leur environnement. Ces installations nécessitent donc une protection contre toutes ces perturbations impulsionnelles provenant de l'extérieur sous forme de rayonnement électromagnétique.

Les bâtiments habituels en béton armé constituent déjà un écran partiel face à ces perturbations [16]<sup>1</sup>. Dans le cas où ces perturbations doivent être fortement atténuées, il est nécessaire d'envisager une structure métallique plus importante: une grande attention doit alors être portée aux assemblages des différents matériaux métalliques utilisés.

L'influence des paramètres tels que le diamètre, l'espacement, les ligatures des aciers d'armature du béton est mesurée et mise en évidence. L'importance de ces paramètres est de plus comparée au cas des structures métalliques plus évoluées utilisées pour l'édification de bâtiments de protection.

## 2. Perturbations

Les perturbations impulsionnelles provenant de l'extérieur sous forme de rayonnement électromagnétique ont pour origine la foudre, les opérations dans un réseau électrique ou une explosion nucléaire [1], [2], [3], [4].

### 2.1 Foudre

La foudre se caractérise électriquement par une impulsion de courant dont la

valeur de crête varie entre 5 et 100 kA et dont le temps de montée est compris entre 0,5 et 1  $\mu$ s [2]. Un champ électromagnétique impulsionnel est alors rayonné à partir de cette décharge atmosphérique (fig. 1).

### 2.2 Opération dans un réseau électrique

Les opérations dans un réseau électrique, telles qu'ouverture ou fermeture de disjoncteurs, se caractérisent électriquement par une onde de tension dont la valeur de crête dépend de la tension nominale du réseau considéré et dont le temps de montée est de l'ordre de 250  $\mu$ s [3]. Un champ électromagnétique est de même rayonné à partir de cette source (fig. 1).

### 2.3 Explosion nucléaire

Une explosion nucléaire se caractérise physiquement par une région ionisée dont les conséquences électromagnétiques au niveau de l'habitat se résument en un champ électrique intense (50 kV/m) et un champ magnétique (130 A/m). Ces champs électromagnétiques sont rayonnés sur de grandes distances (>2000 km) sous la forme d'une impulsion dont le temps de montée est compris entre 5 et 100 ns [4], [5], [6], [7], [8], (fig. 1).

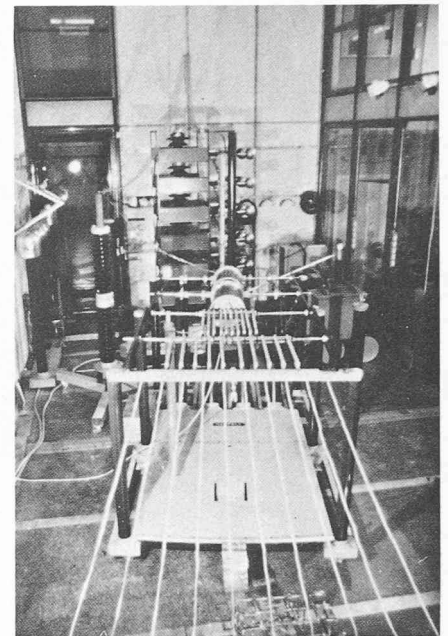


Fig. 2. — Vue de l'ensemble du laboratoire. Au fond : générateur de Marx. A l'avant : unité à front raide couplée à l'antenne.

## 3. Simulation de perturbations

Afin de considérer le cas extrême de perturbations électromagnétiques, seule la simulation du cas d'une explosion nucléaire a été envisagée. En effet, les deux autres cas de perturbations peuvent se traiter plus facilement, leurs valeurs caractéristiques de crêtes et de temps de montée étant respectivement inférieures et supérieures. On peut effectivement montrer que la complexité de la simulation, par équations mathématiques et par mesures, croît d'une manière inversement proportionnelle au temps de montée de l'impulsion considérée.

L'impulsion électromagnétique d'origine nucléaire est simulée à l'aide d'un générateur de haute tension à front raide (fig. 2) couplé à une antenne [9], [10].

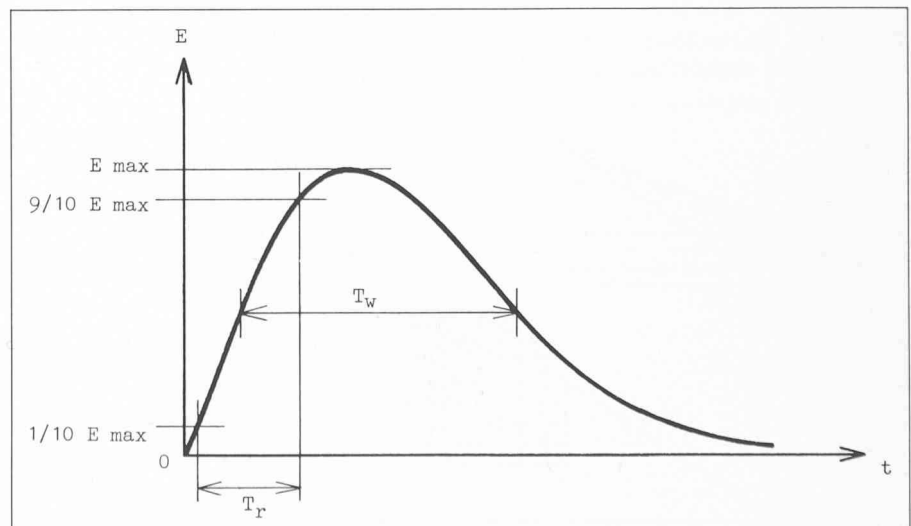


Fig. 1. — Forme normalisée d'une impulsion perturbatrice.  
 $T_r$  temps de montée  
 $T_w$  durée de demi-amplitude

<sup>1</sup> Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

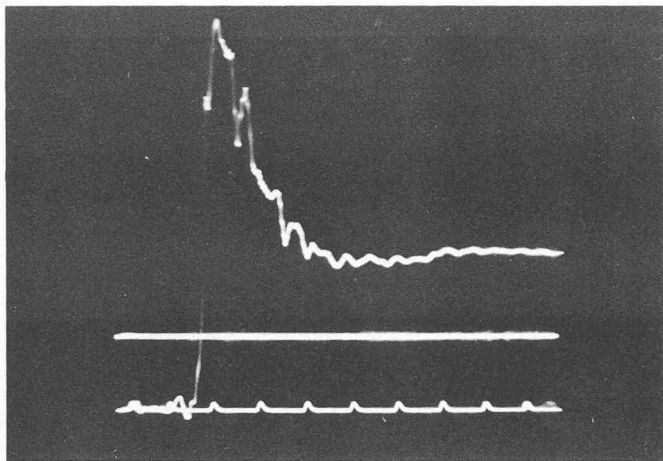


Fig. 3. — Impulsion de tension au bout de l'antenne.

Le générateur de choc délivre des impulsions de tension dont la valeur de crête atteint 300 kV et dont le temps de montée est compris entre 20 et 100 ns (fig. 3).

L'antenne est constituée de dix fils parallèles de 2 m de long situés horizontalement à 1,44 m du sol qui se terminent sur une charge adaptée de 100 Ohms. Le volume disponible pour une irradiation électromagnétique atteint 1 m<sup>3</sup>. En un point P situé à 30 cm du sol, sous l'antenne, on mesure un champ électromagnétique dont les valeurs de crête atteignent 225 kV/m et 1,45 kA/m. La densité de puissance obtenue dans ce volume (vecteur de Poynting) atteint 326 MVA/m<sup>2</sup>. Les maquettes constituées de matériaux de construction sont placées dans le dit volume de travail (fig. 4).

#### 4. Méthodes de mesure

Il est indispensable d'utiliser les méthodes de mesure évoluées dans un tel milieu hautement perturbé (10<sup>5</sup> V) où les niveaux des signaux à mesurer sont extrêmement faibles (10<sup>-2</sup> V) [10], [11], [12].

##### 4.1 Champ magnétique

Le champ magnétique est mesuré au moyen d'une sonde d'induction (fig. 5).

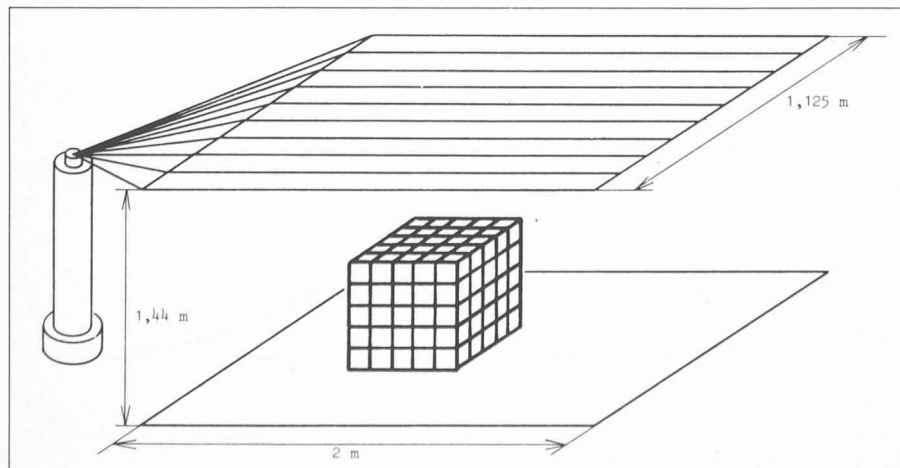


Fig. 4. — Disposition générale de la maquette par rapport à l'antenne.

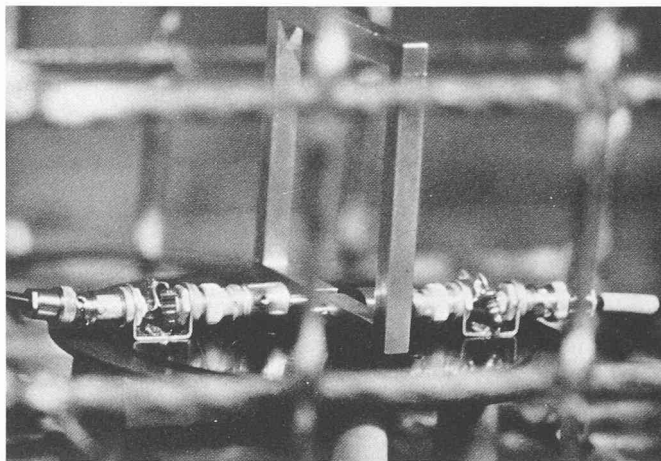


Fig. 5. — Sonde de champ magnétique disposée à l'intérieur de la maquette.

Le signal obtenu correspondant à ce champ est enregistré à l'aide d'un oscilloscope à mémoire immunisée à l'aide d'une cage blindée de mesure (fig. 6).

##### 4.2 Champ électrique

Le champ électrique est mesuré au moyen d'une électrode plane située à 20 cm du sol (fig. 7). Le signal correspondant à ce champ est enregistré par le même oscilloscope (fig. 8).

#### 5. Maquettes

Les bâtiments habituels en béton armé ont été modélisés à l'aide de cages cubiques constituées d'armatures utilisées habituellement dans les constructions. Deux diamètres différents d'armatures ont été retenus, l'un de 8 mm et l'autre de 14 mm (fig. 9 et fig. 10).

Une première série d'essais a été effectuée sur la base de ces deux diamètres, les armatures étant jointes entre elles à l'aide d'attaches (fig. 11). Dans le cadre de cette première série d'essais, deux différents espacements entre les barres d'armatures (10 et 20 cm) ont été comparés. Une deuxième série analogue d'essais a suivi, les attaches étant dans ce cas remplacées par des points de soudure (fig. 12).

#### 6. Résultats

Le facteur d'atténuation d'une cage contre les ondes de choc est défini comme étant le rapport de deux champs électromagnétiques mesurés en un point P, le premier sans cage, le deuxième après l'installation de la cage autour du point considéré.

Il est usuel d'exprimer ce facteur en échelle logarithmique, les valeurs de crête de ces deux champs étant très différentes [13], [14].

Le tableau I rassemble les résultats de mesure. Afin de comparer les facteurs d'atténuation des armatures de béton à ceux de structures métalliques homogènes, une dernière série de mesures est jointe dans le dit tableau. Celle-ci a été obtenue à l'aide d'un modèle cubique constitué de six parois d'aluminium, d'équerres et de vis. Le choix volontaire d'assemblages imparfaits qui reflète une construction sans attention spéciale permet de mettre en évidence le problème de pénétration des champs à travers les défauts (fig. 13, 14, 15, 16).

##### 6.1 Influence du diamètre des armatures

La variation d'atténuation du champ magnétique est de 1,7 dB pour une armature dont le diamètre varie de 8 mm à 14 mm (distance entre deux armatures : 10 cm). Cette faible variation est due d'une part à la diminution négligeable de la surface effective de pénétration et d'autre part à la diminution de la résistance électrique des armatures.

##### 6.2 Influence de l'espacement entre deux barres d'armatures

La variation d'atténuation au champ magnétique est de 6,3 dB pour un doublement de l'espacement entre deux barres d'armatures (10 cm et 20 cm,  $\varnothing = 14$  mm). La diminution de cet espacement donne lieu à une augmentation importante du facteur d'atténuation. Cette variation a deux causes principales :

1. Augmentation de la fréquence de coupure inférieure du spectre du signal

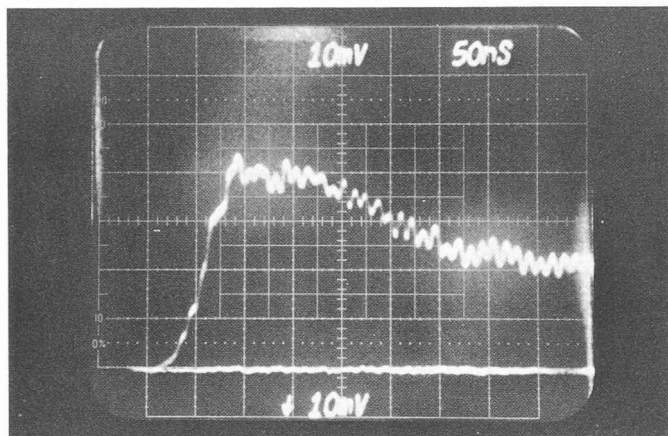


Fig. 6. — Impulsion de champ magnétique mesurée sous l'antenne.

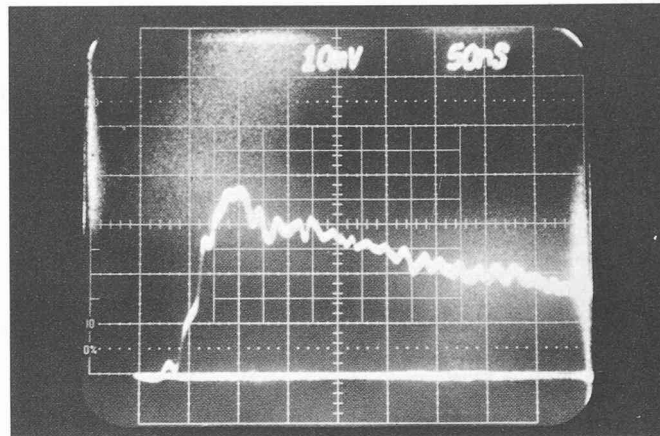


Fig. 8. — Impulsion de champ électrique mesurée sous l'antenne.

perturbateur en rapport avec la diminution de l'espacement.

2. Meilleure atténuation en haute fréquence due à la diminution de la résistance électrique de l'ensemble des armatures aux courants induits [13], [15].

### 6.3 Influence des liaisons entre armatures

La variation d'atténuation au champ magnétique atteint 2,2 dB et la variation correspondant au champ électrique atteint 10 dB lorsque le système d'attaches conventionnel est remplacé par des soudures en chaque nœud (treillis) ( $\varnothing = 8$  mm, distance entre deux armatures : 10 cm).

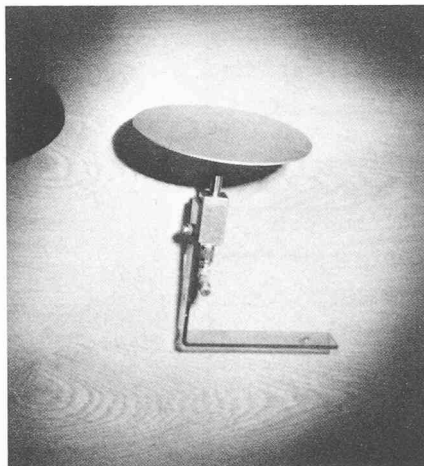


Fig. 7. — Sonde de champ électrique.

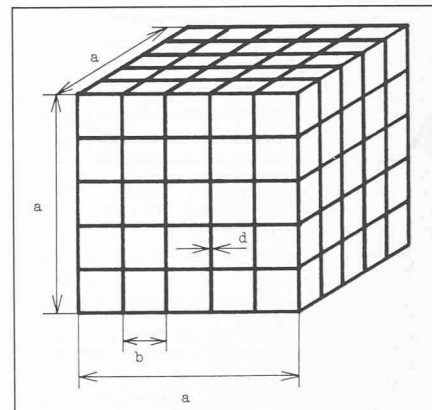


Fig. 9. — Maquette constituée d'armatures.  
 a dimension extérieure de la maquette  
 b distance entre armatures  
 d diamètre d'armatures

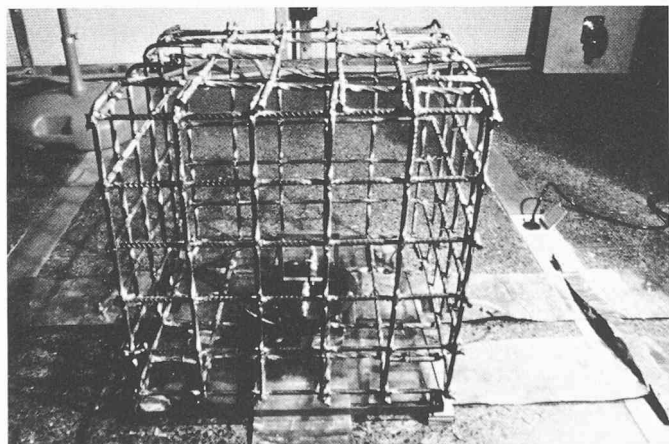


Fig. 10. — Maquette constituée d'armatures de béton armé.

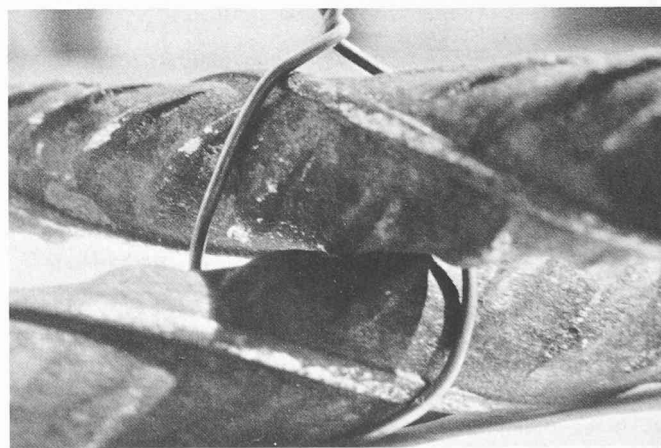


Fig. 11. — Liaison d'armatures par le système de ligature traditionnelle.



Fig. 12. — Liaison d'armatures par soudure.

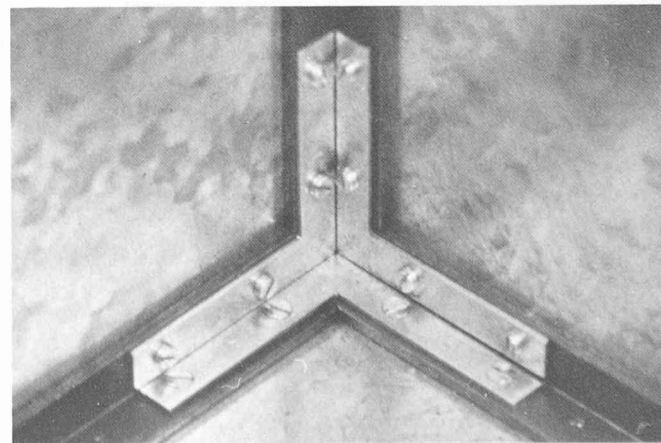


Fig. 13. — Vue d'un angle de la maquette à parois homogènes.



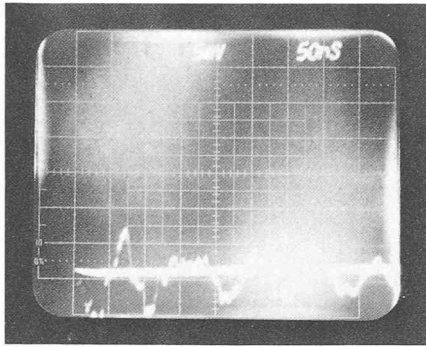


Fig. 14. — Champ électrique à l'intérieur de la maquette.

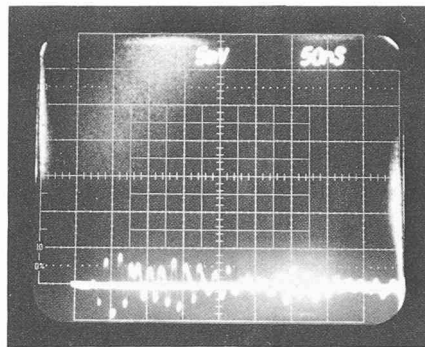


Fig. 15. — Champ électrique à l'intérieur de la maquette.

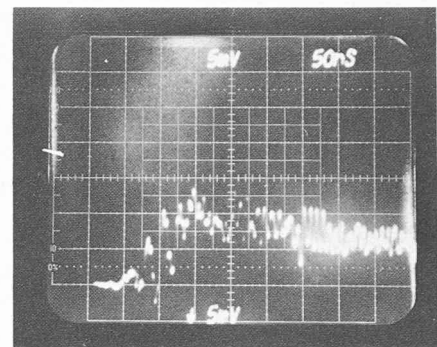
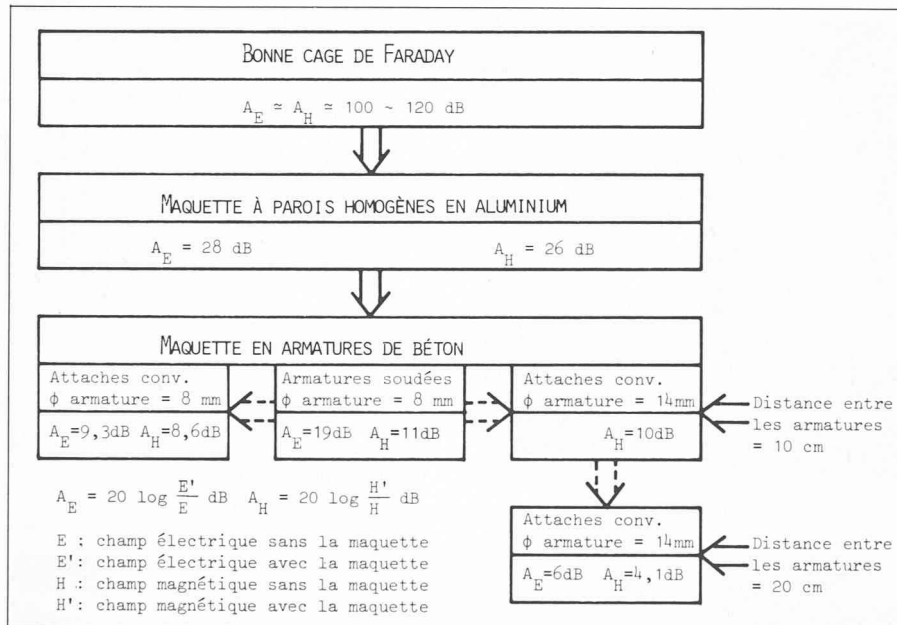


Fig. 16. — Champ magnétique à l'intérieur de la maquette.

TABLEAU I: Récapitulation des résultats de mesure.



La variation d'atténuation du champ électromagnétique est aléatoire et importante. En effet, la résistance de contacts entre armatures dans le cas des attaches conventionnelles est trop fortement dépendante de l'état de corrosion du système. Il est donc impératif de prévoir des liaisons soudées.

#### 6.4 Influence de parois homogènes

La variation d'atténuation du champ magnétique est de 15,1 dB et du champ électrique est de 8,7 dB par rapport au cas de la cage équipée d'armatures soudées ( $\phi = 8$  mm, distance entre deux armatures : 10 cm). Cette variation, relativement faible face à l'importante modification entreprise, montre qu'un assemblage de parois d'aluminium ne peut se faire simplement à l'aide de vis. Il est en effet indispensable de prévoir dans ce cas des surfaces de recouvrement et des joints de contact.

## 7. Conclusions

Les facteurs d'atténuation des champs électromagnétiques impulsionnels ont été obtenus pour le cas de bâtiments en béton armé et métalliques.

7.1 Ces mesures révèlent que les facteurs d'atténuation des bâtiments en béton armé sont insuffisants :

1. Les distances entre armatures sont trop grandes.
2. Les liaisons par attaches ne présentent pas de bons contacts, ces dernières se corrodant très rapidement.

De tels bâtiments présentent cependant une atténuation supérieure aux ondes de choc électromagnétiques à front moins raide (foudre ou opérations dans le réseau électrique).

Toutefois, une modification des armatures de bâtiments peut être envisagée de cas en cas :

1. Adjonction d'un treillis à diamètres faibles et mailles fines lié aux aciers d'armatures.
2. Soudure des jonctions en chaque croisement des aciers d'armatures.

7.2 Les mesures montrent que les facteurs d'atténuation des bâtiments métalliques sont également insuffisants, vu que les assemblages ou les diverses ouvertures entre les parois métalliques ne sont pas électromagnétiquement étanches. Les facteurs d'atténuation de ces bâtiments augmentent cependant lorsque la raideur du front de l'impulsion perturbatrice

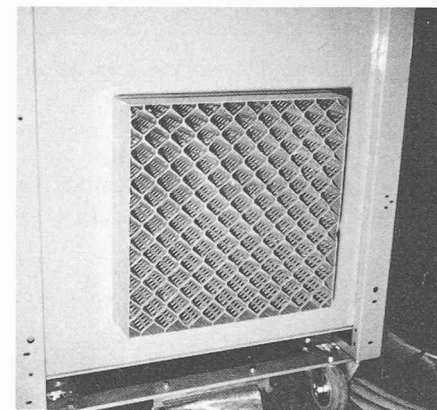


Fig. 17. — Nid d'abeilles.

diminue. Une amélioration des facteurs d'atténuation peut être obtenue en proposant la modification suivante :

1. Les assemblages doivent être soudés ou comporter des recouvrements, des joints de contact et un système de vissage adéquat.
2. Les ouvertures (portes, fenêtres, aération, réseaux électriques et réseaux de fluide) doivent être rendues électromagnétiquement étanches par l'utilisation de :
  - joints de contact pour les portes,
  - nids d'abeilles pour les fenêtres et les aérations (fig. 17),
  - filtres pour les réseaux électriques,
  - sections réduites et multiplication des conduites pour le transport de fluides.

La réalisation de maquettes soumises à des ondes de choc en laboratoire permet de déterminer les paramètres d'influence tels que :

- diamètre d'armatures,
- distance entre les armatures,
- type d'attaches,
- type de matériaux métalliques,
- épaisseur de paroi,
- type de joints,
- type de filtres,
- type de nids d'abeilles.

Une telle étude, simple et réduite dans le temps, effectuée lors du projet d'édification d'un bâtiment permet d'obtenir une optimisation du point de vue coût et atténuation.

## Bibliographie

- [1] M. AGUET, PH. BLECH, M. IANOVICI, H. SAUVAIN : *Perturbations électromagnétiques dans les réseaux électriques de distribution*. Bulletin SEV/ASE, vol. 69 (1978), n° 24, p. 1310-1314.
- [2] PH. BLECH, H. SAUVAIN, M. AGUET : *Elektromagnetische Verträglichkeit*. Elektrotechnik, n° 4/1979, p. 53-57.
- [3] M. AGUET, PH. BLECH, M. IANOVICI : *Coordination probabilistique de l'isolement des réseaux électriques à haute tension*. Bulletin SEV/ASE, vol. 68 (1977), n° 24, p. 1297-1303.
- [4] L. W. RICKETTS, J. E. BRIDGES, J. MILELA : *EMP Radiation and Protective Techniques*. Wiley-Interscience, New York, 1976.
- [5] *EMP Awareness Course Notes*. IIT Research Institute, Chicago, Illinois, septembre 1973.
- [6] TH. RÜDY : *Die Freifeldwerte des EMP*. Gruppe für Rüstungsdienste, Laboratorium Wimmis, août 1977.
- [7] M. WIK, W. JÖHL et K. APPERT : *Primäre und sekundäre NEMP-Wirkungen*. Forschungsinstitut für Militärische Bautechnik, Zurich, juillet 1972.
- [8] K. APPERT : *Der elektromagnetische Impuls von Nuklearexplosionen in grosser Höhe*. Forschungsinstitut für Militärische Bautechnik, Zurich, février 1973.
- [9] M. AGUET, PH. BLECH, M. IANOVICI, B. SCHAEDELI : *Le Laboratoire haute tension*. Bulletin SEV/ASE, vol. 69 (1978), n° 12, p. 618-623.
- [10] PH. BLECH, H. SAUVAIN, M. AGUET, M. IANOVICI : *Impulse Wave Attenuation Factors of Shielding Cages*. Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility, Rotterdam, mai 1979.
- [11] M. AGUET, M. IANOVICI, PH. BLECH, B. ZÜRCHER : *Measurement of Impulse Currents using Optical Fibres*. International Symposium on High Voltage Engineering, Milan, Italie, Août 1979.
- [12] J. LEROUX : *Intégrateur passif à basse impédance pour les impulsions rapides à haut voltage*. Nucl. Instr. Method., vol. 76 (1969), n° 164, p. 168.
- [13] D. R. J. WHITE : *A Handbook on Electromagnetic Shielding Materials and Performance*. Don White Consultants, Inc., Maryland, 1975.
- [14] R. CROZE, L. SIMON, J. P. CAIRE : *Transmission téléphonique : théorie des lignes*. Ed. Eyrolles, Paris, 1973.
- [15] W. JÖHL : *A General and Systematic Survey of NEMP Protection Measures*. Forschungsinstitut für Militärische Bautechnik, Zurich, janvier 1978.
- [16] A. A. SMITH : *Attenuation of Electric and Magnetic Fields by Buildings*. IEEE Trans. Electromag. Comp., vol. EMC-20, n° 3, août 1978.

## Adresse des auteurs :

Hubert Sauvain, ing. dipl. EPFL  
EMC Fribourg, Condensateurs  
Fribourg Holding SA  
1700 Fribourg  
Chung Chi Lin, ing. dipl. EPFL  
Ecole polytechnique fédérale de Lausanne  
1007 Lausanne

## Industrie et technique

## Mesure sans contact de la température superficielle d'un cylindre de laminier

La température des cylindres de laminiers a une grande influence sur l'emprise. Des changements de température ont pour effets :

- de modifier le diamètre des cylindres en provoquant des variations d'épaisseur du produit ;
- de modifier le profil des cylindres, ce qui affecte directement le produit ;
- d'augmenter les tensions internes, menaçant ainsi la durée de vie des cylindres.

Comme il existe une relation directe entre les températures et les tensions internes, les températures à la surface du cylindre ont une importance déterminante.

Il existe maintenant un système de mesures capable de déterminer ces températures sur un secteur donné du cylindre de travail et même du cylindre d'appui refroidi à l'eau. Ces mesures permettent d'agir sur les facteurs qui dépendent de la température, donc sur la qualité du laminage.

BBC a développé un procédé qui se base sur la mesure des courants de Foucault. Il permet de mesurer, en cours de travail, la température superficielle du cylindre sans le toucher.

Dans ce but, des capteurs de courants de Foucault sont montés le long du cylindre, de façon à obtenir une répartition axiale de la température.

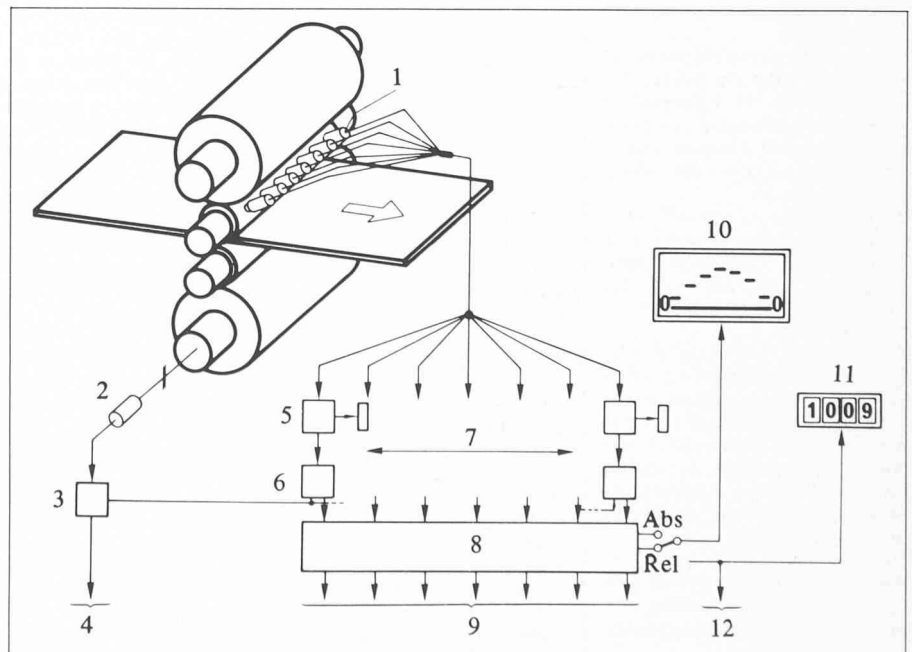
La figure montre le schéma bloc de l'ensemble des mesures. On y reconnaît le cylindre à mesurer, qui est couplé avec

un décodeur et son équipement électronique, afin de procéder à des mesures synchronisées le long d'une génératrice déterminée.

Les signaux transmis par les capteurs de courants de Foucault, donc de la température, ont une fréquence porteuse de 30 kHz. Ils sont transmis chacun à un démodulateur FM, muni d'un potentiomètre

de réglage qui permet de corriger les différences de mesures dues à un manque d'homogénéité du matériel constituant le cylindre. On procède, à température constante, à l'étalonnage au début de la mesure sur le cylindre en ajustant, sur les démodulateurs, toutes les tensions à la même valeur initiale.

Un appareil à enregistrement multiple transmet les signaux perçus sur la génératrice du cylindre selon un rythme cyclique à un oscillographe pouvant tra-



Système de mesure BBC captant les températures à la surface d'un cylindre de laminier en travail :

- |   |   |
|---|---|
| 1 Capteur de courants de Foucault   | 7 Points de mesure  |
| 2 Donneur d'impulsion   | 8 Enregistreur multiple, électronique accessible                        |
| 3 Dispositif de sélection de la génératrice à mesurer                       | 9 Evaluation des données de mesure                                      |
| 4 Départs vers :<br>l'enregistreur / ajustage du serrage<br>la calculatrice | 10 Répartition des températures sur le cylindre (relatives ou absolues) |
| 5 Démodulateur FM avec ajustage individuel                                  | 11 Indication de la température moyenne                                 |
| 6 Echantillonnage   | 12 Somme des températures moyennes                                      |