Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 69 (1978)

Heft: 24

Artikel: Perturbations électromagnétiques dans les réseaux électriques de distribution

Autor: Aguet, M. / Blech, Ph. / Ianovici, M.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-914968

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: 13.07.2025

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

Perturbations électromagnétiques dans les réseaux électriques de distribution

Par M. Aguet, Ph. Blech, M. Ianovici et H. Sauvain

621.316.1:621.391.823;

Après une introduction sur les perturbations électromagnétiques, cet article présente une systématique d'étude de ces phénomènes et des moyens d'y remédier dans les réseaux électriques de distribution. Un cas particulier d'application est traité.

Nach einer Einleitung über elektromagnetische Störungen wird eine Systematik der Untersuchung dieser Erscheinungen und deren Behebung in elektrischen Verteilnetzen vorgestellt und mit einem Beispiel erläutert.

1. Généralités

1.1 Introduction

Une tendance générale constatée depuis les débuts de l'activité industrielle et ne faisant que s'accélérer va en direction d'interdépendances de plus en plus marquées des systèmes, conduisant à des complexes techniques de plus en plus évolués.

Ces systèmes font un large usage pour leur fonctionnement d'énergie et d'informations sous forme électrique qui se prêtent bien à une multitude d'applications diverses et à transfert rapide, mais qui présentent l'inconvénient d'être vulnérables à des phénomènes parasites de même nature agissant dans leur environnement. En conséquence il faut assurer une haute fiabilité d'exploitation des systèmes afin d'éviter des inconvénients pouvant entraîner des gênes d'exploitation ou même des catastrophes. Dans ce but, il est nécessaire d'être à même d'étudier toutes les causes possibles de perturbations électromagnétiques d'un système et de proposer les moyens de s'en affranchir.

La présente contribution s'attache à étudier un système constitué d'un réseau électrique (génération, transport et distribution d'énergie) et de consommateurs qui y sont raccordés. L'étude se limitera à la présentation d'une méthode d'analyse et de mesure des perturbations qui doit permettre aux lecteurs d'orienter leur choix sur des moyens de protection.

1.2 Quelques définitions

Les causes des perturbations sont les phénomènes d'interférences électromagnétiques (EMI electromagnetic interference) ou plus particulièrement les impulsions électromagnétiques (EMP electromagnetic pulse).

Les moyens de protection contre les perturbations électromagnétiques sont mises en compte dans l'acception générale de compatibilité électromagnétique (EMC electromagnetic compatibility) [1; 2; 3] [1]).

[1]) Voir la bibliographie à la fin de l'article.

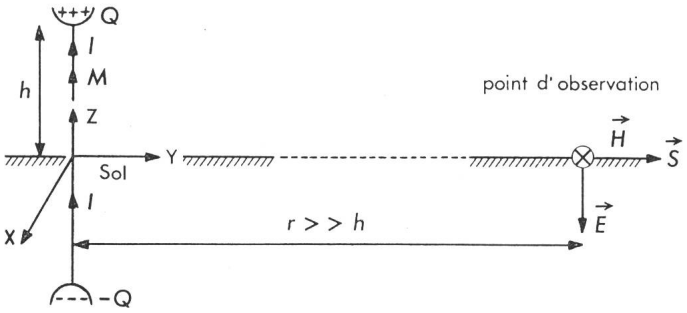

Fig. 1 Création des champs électriques et magnétiques
Q, $-Q$ charge et charge image

1.3 Equations de base de la compatibilité électromagnétique

Toute source d'énergie électrique est entourée de champs électromagnétiques. Une partie de l'énergie contenue dans ces champs se propage dans l'espace et disparaît. Le reste retourne à sa source ou est absorbé par un récepteur. Une émission par antenne dipôle se comporte de cette façon: une partie de l'énergie donne un champ rayonnant, une autre partie (retournant périodiquement à l'antenne) devient le champ d'induction. L'expression mathématique générale décrivant le champ électromagnétique est basée sur les équations de *Maxwell* [4].

Tout conducteur soumis à une tension et parcouru par un courant génère un champ électromagnétique constitué par une composante électrique $\vec{E}$ et une composante magnétique $\vec{H}$ en un point quelconque de l'espace (fig. 1). Le moment électrique est défini par

$$M = 2 \sum_i Q_i \, h_i \quad \left(I = \frac{1}{2h} \frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}t}\right) \tag{1.1}$$

La composante électrique $\vec{E}$ du champ électromagnétique peut être décomposée en une composante de champ statique $\vec{E}_s$, une composante de champ d'induction électrique $\vec{E}_i$ et une composante de champ rayonnant électrique $\vec{E}_r$.

$$E = \frac{1}{4\pi \varepsilon_0} \left(\frac{1}{r^3} M + \frac{1}{r^2 c} \frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}t} + \frac{1}{r c^2} \frac{\mathrm{d}^2 M}{\mathrm{d}t^2}\right) \tag{1.2}$$

Le premier terme de l'expression ($E_s \sim 1/r^3$) représente le champ électrostatique créé par la présence des charges d'espace. Le deuxième terme ($E_i \sim 1/r^2$) est appelé le champ d'induction et est proportionnel au courant I. Le dernier terme ($E_r \sim 1/r$) est le terme de rayonnement, proportionnel à $\mathrm{d}I/\mathrm{d}t$.

De façon analogue, la composante magnétique $\vec{H}$ du champ électromagnétique peut être décomposée en une composante du champ d'induction magnétique $\vec{H}_i$ et une composante du champ rayonnant magnétique $\vec{H}_r$.

$$H = \frac{1}{4\pi} \left(0 + \frac{1}{r^2} \frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}t} + \frac{1}{cr} \frac{\mathrm{d}^2 M}{\mathrm{d}t^2}\right) \tag{1.3}$$

Ces relations montrent que pour de faibles valeurs de dérivée, c'est-à-dire pour de basses fréquences ou de faibles valeurs de r, c'est-à-dire à proximité du conducteur, les composantes de champs rayonnants peuvent être négligées. La réciproque s'applique aux champs d'induction. Ces constatations permettent de définir les zones d'influence selon le tableau I [5].

2. Concept d'un système perturbé

2.1 Schéma bloc

Ce concept est basé sur le schéma bloc de la figure 2 qui fait intervenir un élément perturbateur (ELPEUR), un couplage (COUPL), un élément perturbé (ELPE) et éventuellement un moyen de protection (MOPRO).

2.2 Eléments perturbateurs dans un réseau de distribution

Ces éléments peuvent être classés selon deux critères principaux (tableau II):

– d'une part suivant la position relative du perturbateur par rapport au réseau de distribution: si le perturbateur est un élément faisant partie intégrante de ce réseau, il est dit interne. Si, par contre, il induit une perturbation dans ce réseau, il est dit externe.

– d'autre part selon l'évolution de l'amplitude de la perturbation au cours du temps. Si l'on est en présence d'un phénomène continu ou se répétant périodiquement, on parle d'une perturbation stationnaire. Si l'évolution est lente par rapport à la fréquence fondamentale (au moins plusieurs périodes de 50 Hz), on parle d'une perturbation quasi-stationnaire. En cas de phénomène variant plus rapidement, il s'agit d'une perturbation transitoire.

Les principaux éléments perturbateurs classés selon les critères définis sont listés au tableau II.

2.3 Transmissions des perturbations

Les couplages peuvent s'opérer par voies galvaniques (R), inductives et mutuelles (L, M), capacitives (C) et par rayonnement (S). Ces éléments peuvent être linéaires ou non-linéaires et non-dépendants ou dépendants de la fréquence.

Pour le calcul des couplages inductifs, dans le cas de lignes parallèles, on aura recours aux méthodes de calculs basées sur les distances moyennes géométriques (DMG) et les rayons moyens géométriques (RMG). Dans le cas de lignes non parallèles, on traite de façon semblable des tronçons de lignes

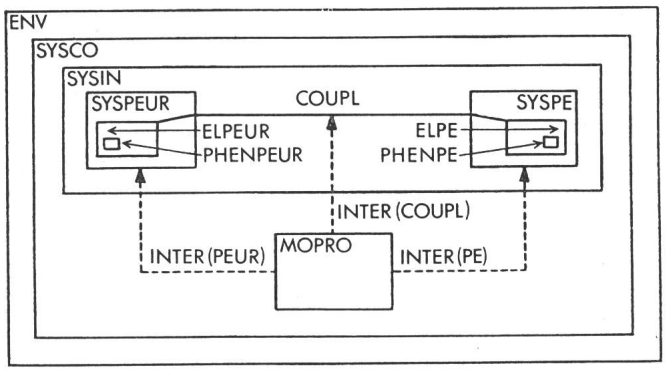

Fig. 2 Schéma Bloc d'un système perturbé

SYSCO	Système «compatibilisé»
SYSIN	Système d'interférence (non «compatibilisé»)
SYSPEUR	Système perturbateur (système dans lequel ELPEUR est intégré: appareil, contexte météorologique etc.)
ELPEUR	Elément provoquant la perturbation
PHENPEUR	Phénomène perturbateur (état, comportement, fonction d'ELPEUR)
SYSPE	Système perturbé (système dans lequel ELPE est intégré: appareil, système de communication, ordinateur etc.)
ELPE	Elément perturbé
PHENPE	Phénomène perturbé (état, comportement, fonction d'ELPE)
COUPL	Couplage électromagnétique
MOPRO	Moyens de protection (produits, conceptions)
INTER	Intervention (mise en œuvre de MOPRO)
ENV	Systèmes placés dans l'environnement, en relation (COUPL) avec SYSIN, SYSPEUR ou SYSPE, relation pouvant subir une influence par INTER

Zones d'influence des perturbations électromagnétique Tableau I

Fréquence	Continu	Industrielle	Radiophonique	thf (TV) [2]	uhf [3]
$f = \frac{\omega}{2\pi}$ (Hz)	0	$\frac{10^3}{2\pi}$	$\frac{10^6}{2\pi}$	$\frac{10^9}{2\pi}$	$\frac{10^{12}}{2\pi}$
Zone d'induction (réactive) distance (m)	$< \infty$	$< 3 \cdot 10^3$	< 3	$< 3 \cdot 10^{-3}$	$< 3 \cdot 10^{-6}$
Zone de rayonnement (active) distance (m)	∞	$> 30 \cdot 10^6$	$> 30 \cdot 10^3$	> 30	$> 30 \cdot 10^{-3}$

Classification des éléments perturbateurs Tableau II

Evolution dans le temps / Position relative au réseau	stationnaire	quasi-stationnaire	transitoire
internes	– circuits magnétiques saturés (transformateurs, selfs à noyaux de fer, ...) – semi-conducteurs (thyristors, triacs, redresseurs, onduleurs, ...) – machines synchrones et asynchrones – contacts entre lignes – arcs électriques (fours, ...)	– variations de charges (démarrages de moteurs, pompes, installations pour la fusion nucléaire, accélérateurs de particules, ...)	– déclenchement, ou enclenchement (tubes fluorescents, éclateurs, parasurtension, interrupteurs, disjoncteurs, fusibles, relais, appareils de soudure, allumages de chaudières, frotteurs, ...)
externes	– parallélisme de lignes	– courants de court-circuit	– foudre – NEMP [4]

[2] Très haute fréquence (télévision) [3] Ultra haute fréquence [4] NEMP: Nuclear Electromagnetic Pulse

Classification des éléments perturbés

Tableau III

Evolution dans le temps / Objet perturbé	stationnaire	quasi-stationnaire	transitoire
Relais électromécaniques	×	×	
Eclairage		× (flicker)	
Electronique de commande	× (harmoniques, coupures)	×	×
Electronique de mesure	× (harmoniques, coupures)	×	×
Télétransmissions	× (diaphonie)		×
Ordinateurs	harmoniques, coupures	×	×
Emetteurs, récepteurs (radio, TV)		×	×

suffisamment courts pour qu'elles puissent être admises parallèles [3; 6; 7; 8].

Pour le calcul du couplage par rayonnement, on utilise une méthode de calcul faisant intervenir le vecteur de Poynting, appliquée à la géométrie du système concerné [4].

2.4 Eléments perturbés

Le tableau III présente une classification des éléments perturbés potentiels analogue au tableau II.

3. Exemple

Un appareil de mesure situé dans un laboratoire est perturbé d'une façon aléatoire. Au vu de ce cas une analyse systématique doit être entreprise selon la démarche suivante.

3.1 Détermination de l'élément perturbateur

Sur la base d'une enquête, on établit d'abord le plan de situation (fig. 3).

On mesure ensuite les perturbations au niveau du système perturbé (tableau IV). Les résultats obtenus montrent un phénomène du type transitoire (fig. 4). La forme de l'impulsion mesurée permet de supposer la commutation d'une forte charge placée dans le réseau concerné.

Dans cet exemple relativement simple, une manipulation systématique de toutes les charges et de l'appareillage du réseau met en évidence une corrélation entre la perturbation de l'appareil de mesure et la commutation d'une installation de chauffage (fig. 4).

3.2 Schéma équivalent

En appliquant le principe de superposition, on se borne à étudier le phénomène transitoire tout en négligeant l'onde fondamentale à 50 Hz. Pour établir le schéma équivalent, on se sert du tableau V pour les sources. Les lignes sont traitées par une des méthodes exposées plus haut et la charge remplacée par une impédance équivalente (fig. 5).

3.3 Méthode de calcul

Sur la base du schéma équivalent, on établit un calcul de la propagation et de la perturbation. Ce calcul est nécessaire pour vérifier la validité du schéma en comparant les résultats calculés aux valeurs mesurées. Si le schéma est valable, il pourra être utilisé pour déterminer le système de protection optimum.

Pour effectuer ce calcul, la méthode numérique des ondes mobiles représente un des moyens les plus puissants et mieux adaptés au calcul par ordinateur [9; 10]. Elle est basée sur la méthode des observateurs de Bergeron [11]. Comme cette dernière, elle est limitée au cas des lignes sans pertes. On peut, cependant, sans commettre d'erreurs importantes, introduire les pertes résistives série sous forme concentrée. Le réseau à étudier peut comporter des éléments répartis (lignes) et concentrés (charges), mono- ou polyphasés, des commutateurs, ainsi qu'un nombre limité d'inductivités et résistances non-linéaires (parasurtensions, circuits magnétiques saturés).

Les équations différentielles qui décrivent le comportement des inductances ou des capacités sont remplacées par des équations aux différences finies. A leur tour, ces dernières

Types de mesures

Tableau IV

Evolution dans le temps / Mesure	stationnaire	quasi-stationnaire	transitoire
Variations de tension très lentes (quelques s à 1 jour)	Enregistreur de tension (courant) efficace		
Variations de tension rapides (1 ms à 30 s)		oscillographe	
Impulsions de tension (1 ns à 1 ms)			oscilloscope à mémoire (éventuellement mémoire tampon)
Harmoniques	Analyseur de spectre 10 Hz...2 kHz		

Schemas équivalents des sources Tableau V

Type de source \ Schéma de source	source de tension	source de courant	source d'énergie
Machine tournante	×		
Transformateur de puissance	×		
Transformateur d'intensité		×	
Arc électrique		×	
Self à noyau de fer		×	
Convertisseur statique		×	
Contact entre lignes	×		
Parallélisme			×
Foudre, NEMP			×
Manœuvres	×	×	×

peuvent être remplacées par des circuits équivalents ohmiques avec sources de courant incorporées. De cette manière on ramène la situation du réseau à un instant t à l'étude d'un circuit à constantes localisées en régime établi en courant continu, régi par l'équation générale sous forme matricielle.

$$[Y]\cdot[u(t)] = [i(t)] - [I(t-\Delta t)] \tag{3.1}$$

$[Y]$ matrice d'admittance aux accès (ou matrice d'admittance nodale)

$[u(t)]$ vecteur colonne des tensions de nœuds à l'instant t

$[i(t)]$ vecteur colonne des sources de courants injectés aux nœuds

$[I(t-\Delta t)]$ vecteur colonne des sources de courants connues à l'instant $(t-\Delta t)$

Soit par exemple

$$[u(t)] = \begin{bmatrix} u_i(t) \\ u_c(t) \end{bmatrix} \tag{3.2}$$

$u_i(t)$ sous-vecteur des tensions de nœuds inconnues (i)
$u_c(t)$ sous-vecteur des tensions de nœuds connues (c)

L'équation (3.1) s'écrit alors

$$\begin{bmatrix} Y_{ii} & Y_{ic} \\ Y_{ci} & Y_{cc} \end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix} u_i(t) \\ u_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_i(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} I_i(t-\Delta t) \\ I_c(t-\Delta t) \end{bmatrix} \tag{3.3}$$

En résolvant par rapport à $u_i(t)$

$$[Y_{ii}]\cdot[u_i(t)] = [i_i(t)] - [I_i(t-\Delta t)] - [Y_{ic}\cdot u_c(t)] \tag{3.4}$$

on peut exprimer le sous-vecteur des tensions inconnues $u_i(t)$ en fonction des sources de courants injectés $i_i(t)$, connaissant au temps $(t-\Delta t)$ le sous-vecteur des sources de courants injectés $I_i(t-\Delta t)$ et le sous-vecteur des tensions de nœuds $u_c(t)$.

Les calculs effectués par le programme TRANSIENT sur la base du schéma équivalent (fig. 5) confirment les mesures obtenues ci-dessus (fig. 6). Pour l'étude de certains problèmes particuliers, des programmes spécifiques ont été développés [12; 13].

4. Système de protection

L'occurrence de perturbations pouvant entraîner des fonctionnements erronés ou intempestifs ou même la destruction d'éléments sensibles, impose de limiter ces perturbations en

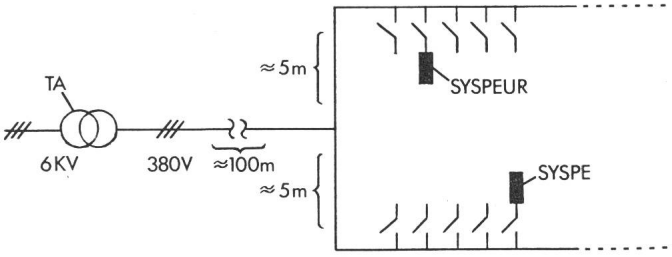

Fig. 3 Plan de situation
TA Transformateur d'alimentation 50 Hz
SYSPEUR Installation de chauffage qui se révèle être l'élément perturbateur
SYSPE Charge perturbée

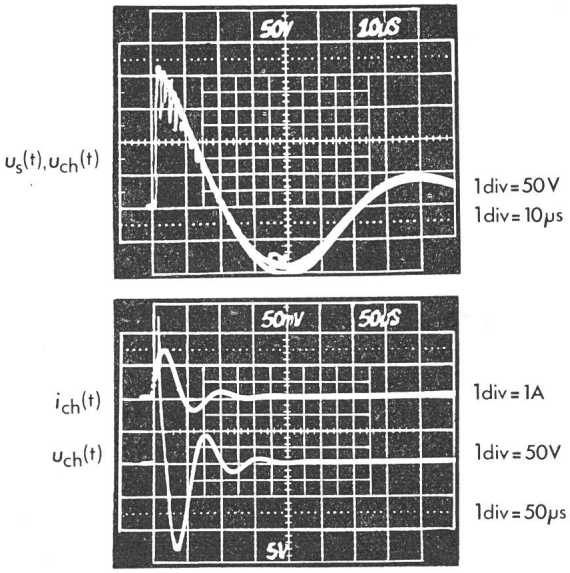

Fig. 4 Résultats des mesures de tension et courant
$u_s(t)$ Tension aux bornes du système perturbateur
$u_{ch}(t)$, $i_{ch}(t)$ Tension et courant du système perturbé

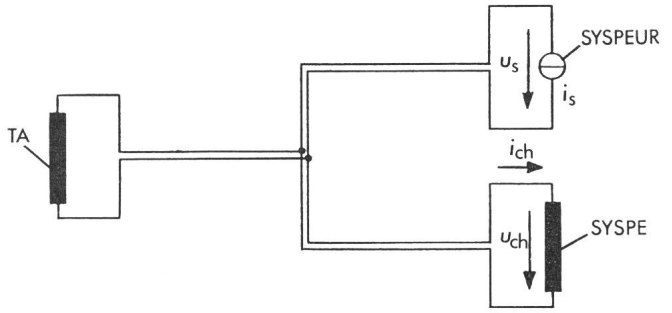

Fig. 5 Schéma équivalent
TA Transformateur d'alimentation 50 Hz
SYSPEUR Système perturbateur (source de courant)
SYSPE Charge perturbée
$u_s(t)$, $i_s(t)$ Tension et courant du système perturbateur
$u_{ch}(t)$, $i_{ch}(t)$ Tension et courant du système perturbé

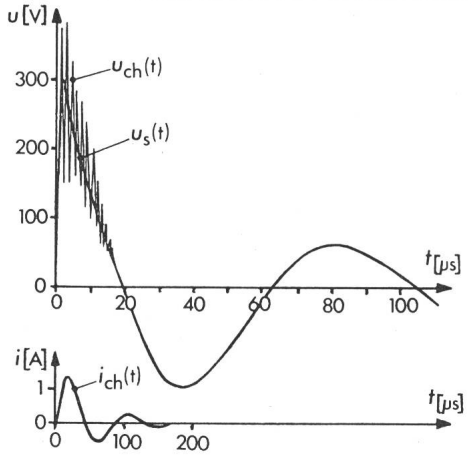

Fig. 6 Résultats des calculs de tension et courant effectués à l'aide du programme TRANSIENT

$u_{ch}(t)$, $i_{ch}(t)$ Tension et courant calculés, du système perturbé
$u_s(t)$ Tension mesurée aux bornes du système perturbateur

nombre, en amplitude ou en fréquence suivant le cas [14]. On peut envisager d'intervenir sur l'élément perturbateur, sur le couplage, sur les éléments perturbés ou sur une combinaison de plusieurs de ces derniers [15; 16; 17]. Une classification des moyens de protection est présentée au tableau VI.

Sur la base des différents modes de protection pouvant être retenus dans le cas particulier, on reconduit les analyses correspondantes à l'aide du schéma équivalent dont on a contrôlé la validité. A la suite d'une étude technico-économique des résultats d'analyses, la solution optimale peut être choisie.

Classification des systèmes de protection Tableau VI

Lieu d'intervention / Types de protection	Elément perturbateur	Couplage	Elément perturbé
Batterie tampon			×
Groupe statique ou tournant d'alimentation		×	
Survolteur-dévolteur			×
Filtre	×		×
Condensateur-série		×	
Transformateur de séparation (translateur)			×
Transposition		×	
Torsadage		×	
Parasurtension (éclateur, résistance non linéaire)			×
Mise à terre	×	×	×
Écran (blindage)	×		×
Manteau		×	
Paratonnerre	×		
Câble de garde	×	×	
Fluidique		×	
Fibre optique		×	

Bibliographie

[1] *D. Stoll:* EMC Elektromagnetische Verträglichkeit. Berlin, Elitera-Verlag, 1976.
[2] Proceedings of the first and second symposium on electromagnetic compatibility, Montreux 1975 and 1977.
[3] *D.H.J. White:* EMC Handbooks. Electromagnetic interference and compatibility. Vol. 1...6. Germantown/Maryland, D. White Consultants, 1971...1975.
[4] *F. Gardiol:* Electromagnétisme. Traité d'électricité de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, vol. III. St. Saphorin, Editions Georgi, 1977.
[5] *R.F. Ficchi:* Les parasites en électricité et en électronique. Paris, Dunod, 1966.
[6] *M. Aguet* et *U. Cavalli:* Méthode de calcul de l'influence des câbles à haute tension sur les lignes de télétransmissions. Bull. ASE/UCS 67(1976)16, p. 846...853.
[7] *P.-A. Chamorel* et *J.-J. Morf:* Graphique interactif appliqué au calcul des constantes de lignes aériennes. Bull. ASE/UCS 67(1976)6, p. 290...295.
[8] *P.-A. Chamorel:* Calcul des caractéristiques électriques des câbles haute tension à fréquence industrielle. Bull. ASE/UCS 69(1978)2, p. 77...82.
[9] Electromagnetic transients program, user's manual. Portland/Oregon, Bonneville Power Administration, 1973.
[10] *H. Dommel:* Berechnung elektromagnetischer Ausgleichsvorgänge in elektrischen Netzen mit Digitalrechnern. Bull. SEV 60(1969)12, S. 538...548.
[11] *A. Mauduit:* Méthode graphique de Bergeron pour l'étude de la propagation des ondes le long des lignes électriques. Rev. Gén. Electr. 63(1954)4, p. 191...221.
[12] *G. Moussa:* Méthode d'analyse des perturbations dues aux redresseurs dans un réseau de distribution. Bull. ASE/UCS 65(1974)13, p. 949...956.
[13] *H. Sauvain* et *E. Lambin:* L'onduleur statique pour la récupération de l'énergie de freinage des véhicules électriques ferroviaires. Bull. ASE/UCS 69(1978)18, p. 990...994.
[14] Limitation des perturbations apportées aux réseaux d'alimentation par les appareils électrodomestiques et analogues comportant des dispositifs électroniques. SEV-EN 50006.1976.
[15] *J. Guillot:* Etude des perturbations électriques agissant sur les circuits BT des postes et centrales. Rev. Gén. Electr. 82(1973)11, p. 679...690.
[16] *R. Boite* et *J. Neirynck:* Théorie des réseaux de Kirchhoff. Traité d'électricité de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, vol. IV. St. Saphorin, Editions Georgi, 1976.
[17] *D.H.J. White:* Electrical filters. Germantown/Maryland, D. White Consultants, 1976.

Adresses des auteurs

Ph. Blech, Ing. dipl. EPFL et *H. Sauvain,* Ing. dipl. EPFL, Groupe EMC-Fribourg, Condensateurs Fribourg Holding S.A., 1700 Fribourg.

M. Aguet, Ing. dipl. EPFL, chargé de cours et *M. Ianovici,* Dr. Ing., 1er assistant Chaire d'installations électriques de l'EPFL, 16, chemin de Bellerive, 1007 Lausanne.