

# Transformateurs de puissance : nuisances sonores et vibratoires

Autor(en): **Boss, Pierre / Pompéi, Michel / Masson, Céline**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin.ch : Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse, VSE = revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse, AES**

Band (Jahr): **95 (2004)**

Heft 9

PDF erstellt am: **08.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-857939>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Transformateurs de puissance: nuisances sonores et vibratoires

## Solutions passives et actives pour atténuer le bruit et les vibrations des transformateurs

Les exigences liées au bruit des postes sont de plus en plus importantes du fait de l'expansion des zones urbaines autour des postes existants d'une part, et des perspectives d'évolution de la réglementation européenne d'autre part. Cet article examine les différentes solutions pour atténuer le bruit des transformateurs: Réduction à la source, ou atténuation par des dispositifs passifs ou actifs.

La problématique du bruit lié aux transformateurs et aux bobines d'inductance dans l'huile a toujours été une préoccupation au sein du *Réseau de Transport d'Electricité* (RTE) en France. Toutefois la sensibilité croissante de l'opinion publique aux perturbations causées par le bruit, la perspective d'un renforcement de la législation face à ces problèmes environnementaux et l'urbanisation croissante autour de postes de grandes puissances modifient sensible-

*Pierre Boss, Michel Pompéi, Céline Masson, Bernard Krummen, Vincent Chritin, Philippe Herzog*

ment les données. L'objectif de cet article<sup>1)</sup> est de présenter les mesures mises en œuvre habituellement par RTE pour réduire les nuisances liées au bruit et d'analyser l'intérêt de réduire le bruit à la source. Pour cela, on réalisera un comparatif technico-économique entre des transformateurs standards RTE associés à des dispositifs d'insonorisation et des transformateurs qui auraient été spécifiés et conçus avec un niveau de bruit réduit. L'objectif de cet article est aussi d'illustrer l'utilisation pratique du contrôle actif sous l'aspect curatif pour la réduction des tonalités marquées. La description des méthodes, des moyens employés et des performances permet de faire le point sur les éléments indispensables au succès de cette technique.

### Problématique du bruit à RTE

RTE, gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité en France, est responsable du développement, de la maintenance et de l'exploitation du système électrique s'étendant du 400 kV au 63 kV inclus. La gamme de puissance des transformateurs de réseau est comprise entre 600 MVA et 20 MVA.

Le nombre de transformateurs en exploitation en 2002 était, hors transformateurs de la distribution, de 1104 (dont 1078 à primaire 400 kV ou 225 kV).

### Sources et niveaux de bruit

Sur un transformateur, on peut distinguer deux sources de bruit:

- la partie active
- la réfrigération et plus précisément les aéroréfrigérants. Tous les transformateurs concernés ont une circulation forcée et dirigée de l'huile et de l'air (type ONAF<sup>2)</sup>) à l'exception des appareils 20 MVA à refroidissement naturel (type ONAN) qui sont équipés de radiateurs.

*Le bruit de la partie active est lié à plusieurs paramètres:*

- la vibration du circuit magnétique sous l'action de deux mécanismes: la magnétostriction des tôles et les efforts magnétiques entre tôles (forces de Maxwell). Ce phénomène représente la part prépondérante du bruit de la partie active.

- les efforts entre conducteurs dans les enroulements (forces de Laplace) proportionnels à la charge. Ce bruit est souvent négligeable devant le bruit lié à la vibration du circuit magnétique.

Les phénomènes liés à l'induction sont périodiques, leur fondamental est le double de la fréquence de l'induction. Ainsi, le spectre fréquentiel de la partie active des transformateurs présente des fortes tonalités marquées sur le 100 Hz et le 200 Hz (1<sup>er</sup> harmonique).

Le bruit de la réfrigération est dû aux ventilateurs et dans une moindre mesure aux pompes. Cette source de bruit est donc principalement fonction de la vitesse de rotation des ventilateurs. Elle est directive et large bande.

Des niveaux maximaux indiqués dans nos spécifications et vérifiés par des essais de bruit sont exigés pour les transformateurs (tableau I).

### La réglementation

La législation autorise des sanctions pénales lorsque l'émergence perçue par autrui est supérieure à 5 dBA le jour et 3 dBA la nuit. Toutefois, il n'est pas tenu compte de cette émergence lorsque le niveau de bruit ambiant (incluant le bruit incriminé) est inférieur à 30 dBA.

L'évolution de la législation européenne (Directive Européenne sur le bruit ambiant) laisse préfigurer la nécessité de prendre en compte les tonalités marquées à moyen terme. Les expérimentations sur un système antibruit actif lancées avec Paulstra<sup>3)</sup> en 2003 et décrit dans cet article tiennent compte de ces évolutions.

### Coût des mesures

Le nombre de réclamations liées au bruit recensé sur le parc RTE pour le premier semestre 2003 est de 10. Ce chiffre tend à croître au fil des ans du fait de la sensibilité accrue de l'opinion publique et de l'urbanisation croissante autour des postes. En effet, le principe d'antériorité ne s'applique pas pour les postes RTE et le respect de la législation est nécessaire



Type d'appareil (1)	Puissance MVA/MVar *	Tensions	Refroidissement (2)	Niveaux garantis en dB(A)				Modes d'installation	
				Paliers techniques > 1992 (3)		Paliers techniques < 1992 (3)		Partie active	
				Partie active	Réfrigération	Partie active	Réfrigération	Cellule extérieure	Enceinte ou bâtiment d'insonorisation
TPN	0,5	63 kV/MT	ONAN	82		82		(4)	(4)
TR	20	63 kV/MT	ODAF	85	82	86	91		
			ONAN	85		86			
		90 kV/MT	ODAF	85	82	87	91		
			ONAN	85		87			
	36	63 kV/MT	ODAF	86	85	89	94	(4)	(5)
			ODAN		70	70			
		90 kV/MT	ODAF	86	85	90	94	(4)	(5)
			ODAN		70	70			
			ONAN	87			(4)		
TR	100	63/90 kV		En cours d'étude					
ATR	100	63/90 kV	ONAN	87					
TR	40	225 kV/MT	ODAF	87	85	98	94	(4)	(5)
	70	225 kV/MT	ODAF	94	86	98	96		
	2x40	225 kV/MT	ODAF	95	88	101	97		
	100	225 kV/HT	ODAF	98	88	103	98		
	170	225/63 kV	ODAF	96	89	106	100		
		225/90 kV	ODAF	98					
	150	400 kV/HT	ODAF	100	90	106	100		
	240			102					
ATR	300	400/225 kV	ODAF	100	90	108	100		
	600				92	102	102		
BOBINE	64 *	21 kV	ONAN	100		100		(5)	
	80 *	225 kV							

Tableau I Niveaux de bruit spécifiés par RTE

mais non suffisant devant un tribunal. Juridiquement, le problème est complexe.

### Solutions insonorisantes

Tout ouvrage neuf est réalisé selon des règles bien précises, référencées principalement dans l'Arrêté interministériel ou Arrêté «Technique» et les «Directives Postes» RTE.

A ce titre, les maîtres d'œuvre disposent de trois types de solutions insonorisantes en fonction de la distance à laquelle se trouvent les habitations les plus proches et en fonction de l'atténuation souhaitée:

- les murs pare-son
- les enceintes
- les postes en bâtiment.

On notera toutefois que la disposition normale, hors problématique bruit, com-

prend déjà 2 murs latéraux (dits pare-feu) et un mur longitudinal côté primaire. La composition des murs et leur épaisseur ne sont pas imposés, elles doivent simplement répondre aux spécifications de RTE en matière de tenue au feu.

### Les murs pare-son

Technologiquement, un écran peut apporter un affaiblissement maximal de 15 dB(A) dans la direction où il est installé. Ses dimensions sont fonction de l'encombrement du transformateur à insonoriser et de la localisation du plaignant.

Pour définir la hauteur du mur, on considère que la source sonore est située sur un axe vertical, aux 2/3 de la hauteur de la cuve du transformateur et on détermine la hauteur «utile» du mur. Cette hauteur H correspond à la distance entre la droite qui joint la source sonore au

point à protéger et le sommet du mur. Elle est déterminée par un abaque en fonction de la distance D et de l'affaiblissement souhaité (figure 1).

La longueur de l'écran doit être au moins égale à la largeur du transforma-

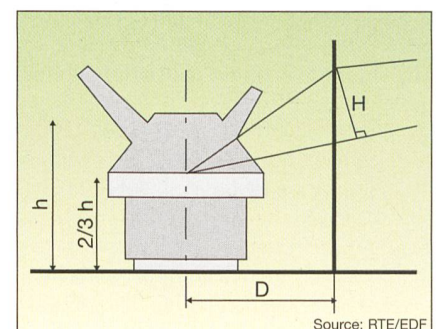


Figure 1 Transformateur et mur pare-son



teur accrue du double de sa hauteur utile. Le mur pare-son sera donc placé au plus près de la source.

Lorsque le bruit doit être réduit dans toutes les directions, le transformateur est entouré de 4 murs. Dans ce cas, une distance minimale entre le transformateur et les aérorefrigérants doit être respectée afin d'assurer une bonne circulation de l'air dans l'enclos.

Selon l'encombrement de l'appareil à protéger et le matériau utilisé, le coût d'un mur pare-son varie d'un facteur 3. A titre d'exemple, sur la base d'une composition du mur en béton cellulaire, son coût pour un transformateur à primaire 63 kV est inférieur à une dizaine de k€.

### Les enceintes

Une enceinte est une enveloppe complètement fermée composée de 4 murs et d'une toiture. Les aérorefrigérants sont situés à l'extérieur de l'enceinte. Technologiquement, une enceinte apporte un affaiblissement maximum de 25 dBA.

Sur la base d'une construction en parpaing creux de 20 cm avec enduit extérieur, le coût d'une enceinte est de l'ordre de 7 à 10 fois plus élevé que celui d'un mur pare-son. Le fait de devoir installer une enceinte d'insonorisation est donc conséquent sur le plan économique.

### Les bâtiments

Si les habitations les plus proches sont situées à moins de 20 m, le transformateur est habituellement installé dans un bâtiment en traditionnel avec étude acoustique complète et particulière. Technologiquement, l'affaiblissement maximal obtenu est supérieur à 25 dBA. Tous les postes urbains (p.ex. postes de Paris intra-muros) sont construits selon ce principe.

### Retour d'expérience

Les murs pare-son sont également utilisés comme des murs pare-feu et pare-projectile. Par conséquent, le matériau utilisé dans la composition des murs et des enceintes doit être un compromis entre une bonne tenue au feu et de bonnes performances insonorisantes. Dans la pratique, les murs sont habituellement réalisés avec du Siporex d'épaisseur 20 cm.

Or l'isolement acoustique d'un mur est donné, de manière approchée, par l'expression de la loi de masse:

$$TL = 20 \cdot \log_{10} (M_s \cdot f) - K$$

où  $TL$  signifie Transmission Loss en [dB],  $M_s$  est la masse surfacique du matériau (en  $[\text{kg}/\text{m}^2]$ ),  $f$  la fréquence des ondes sonores incidentes et  $K$  une constante qui

varie selon les cas typiquement dans la gamme 47 à 50 dB.

Le bruit rayonné au delà du mur est donc d'autant plus faible que:

- la masse surfacique de la paroi est élevée (-6 dB par doublement de masse surfacique);
- la fréquence du bruit incident est élevée (-6 dB par doublement de fréquence).

Par conséquent, les dispositifs d'insonorisation classiques sont globalement mal adaptés pour atténuer les basses fréquences et notamment les 100 Hz.

De plus la perte par transmission dépend également des effets de rigidité de la paroi considéré (dimensions finies, encastrement), à savoir en pratique que la performance d'un mur pourra être fortement péjorée à une fréquence critique  $F_c$  qui traduit pour un angle d'incidence donné l'effet de coïncidence entre les

ondes sonores sur la paroi et les ondes de flexion dans la paroi. Concrètement cette fréquence peut s'évaluer à partir de la relation

$$F_c = A/t$$

où  $A$  [ $\text{Hz} \cdot \text{mm}$ ] est une constante du matériau (pour des conditions de montage données) et  $t$  [mm] est l'épaisseur du matériau.

Par exemple pour du béton plein de 100 mm d'épaisseur et de masse volumique  $2300 \text{ kg}/\text{m}^3$ , avec un  $A = 18700 \text{ Hz} \cdot \text{mm}$ , on doit s'attendre à un net déficit d'isolement autour de 187 Hz. Le choix de l'épaisseur du mur doit donc être adapté également en fonction du matériau.

## Technologies des transformateurs et leur réfrigération

Beaucoup de paramètres influençant le bruit émis par la partie active ont été mis

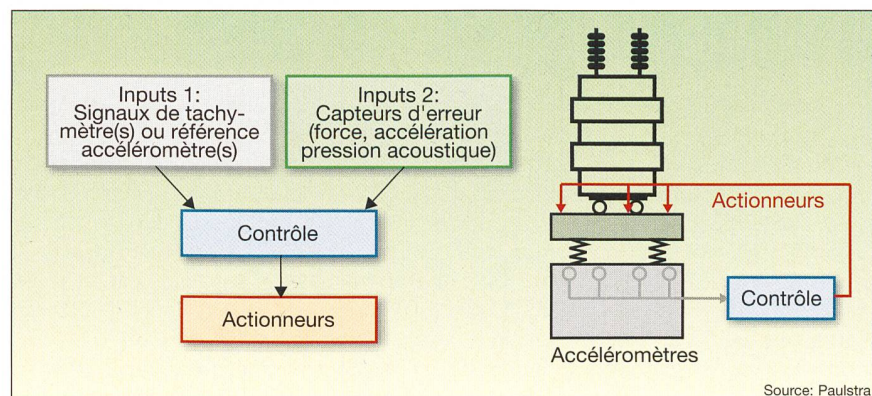


Figure 2 Principe du système de réduction active des vibrations

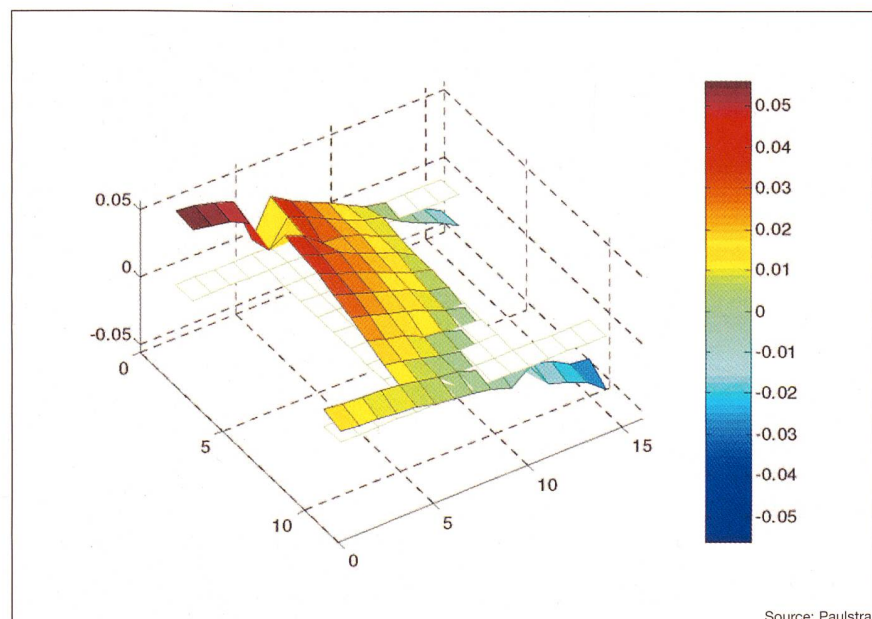


Figure 3 Exemple de réponse modale de la dalle



## Emission de bruit

en œuvre par les constructeurs de transformateurs au cours de ces dernières années. On peut citer:

- le serrage du circuit magnétique: on est passé d'un circuit simplement fretté à un circuit où les tôles sont collées (sauf la culasse supérieure) et frettées, ce qui permettrait d'après une étude théorique faite sur un transformateur de 200 kVA de gagner de l'ordre de 2 dBA;
- la forme des joints: le fait de passer de joints droits à des joints obliques a permis de gagner, selon une étude faite sur un transformateur 70 MVA, 3 dBA.

Ainsi, les parties actives de nos transformateurs sont aujourd'hui moins bruyantes. L'écart entre la limite maximale garantie, indiquée dans nos spécifications, et la valeur mesurée s'est donc accrue (l'écart est à minima de 4 dBA sur les appareils neufs).

Cependant, la réduction sonore la plus importante ne peut être obtenue que par une réduction de l'induction dans le circuit magnétique.

Des études font état d'un gain de 3 dBA pour une diminution de l'induction de 5% (l'induction étant initialement de l'ordre de 1,6 T). Pour des inductions plus élevées le gain serait certainement plus important.

D'autres modifications mises en œuvre sur des transformateurs à l'étranger pourraient être développées en France. On peut citer: le développement de cuve dont la réponse acoustique est adaptée aux vibrations émises par le circuit magnétique, la mise en œuvre de système antibruit actif plus particulièrement lorsqu'on souhaite atténuer une raie spécifique [1].

### La réfrigération

Pour diminuer le bruit d'une réfrigération de type ODAF, la solution la plus radicale consiste à remplacer les aéroréfrigérants par des radiateurs. Ainsi, certains modèles de transformateurs (36 MVA et 20 MVA) sont disponibles avec une réfrigération de type ONAN, dont le bruit est pratiquement nul, ou ODAN dont le bruit est approximativement inférieur de 15 dBA par rapport à des aéroréfrigérants.

Pour les transformateurs de plus forte puissance, le moyen le plus immédiat de réduire le bruit de la réfrigération est la diminution de la vitesse des motoventilateurs. Ainsi, la vitesse actuelle des motoventilateurs est de 750 tr/min contre 1000 tr/min il y a encore quelques années. Ce passage à des aéroréfrigérants dits «à bruit réduit» sur tous les transformateurs a permis de gagner environ 10 dBA. Un gain supplémentaire pourrait être ap-

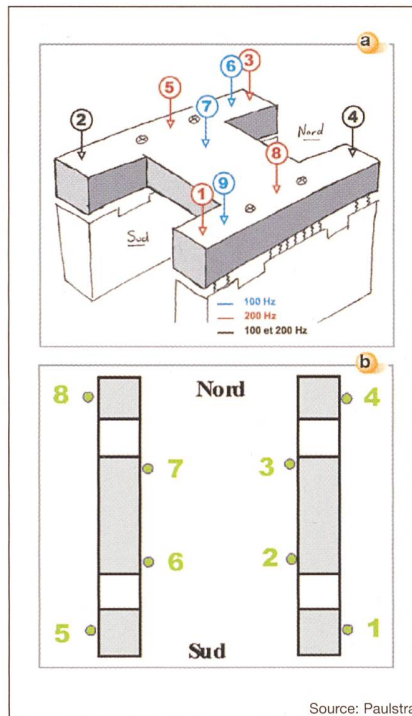


Figure 4 Disposition des actionneurs et des accéléromètres

4a: disposition des actionneurs; 4b: disposition des accéléromètres

porté, moyennant une évacuation des pertes équivalentes, avec des aéroréfrigérants présentant des motoventilateurs à 500 tr/min. Le gain attendu par rapport à des aéroréfrigérants à 750 tr/min serait également de l'ordre de 10 dBA.

Approche technico-économique sur les transformateurs à bruit comme cité précédemment, une diminution significative du bruit des transformateurs passe par une diminution de l'induction, nos transformateurs étant exploités avec une induction comprise entre 1,7 T et 1,8 T. Or la diminution de  $B$  induit, afin de conserver un flux constant, une augmentation de la section du circuit magnétique et donc de son coût.

Cette hausse du prix de l'appareil est à comparer au gain généré par la valorisation des pertes fer qui sont proportionnelles au carré de l'induction et à la masse du circuit magnétique. La diminution des pertes générée par la baisse de l'induction compense largement celles liées à l'augmentation de la masse de circuit magnétique et on peut estimer en première approche que le gain sur les pertes fer est proportionnel à la réduction de l'induction.

Si l'on ne prend pas en compte le gain réalisé sur les pertes, le surcoût évalué pour réduire le niveau de bruit de 15 dBA ou 25 dBA des transformateurs ne semble

pas justifié en regard respectivement du coût du mur pare-son et de l'enceinte. Par contre si l'on intègre le coût capitalisé des pertes dans la comparaison économique, les solutions tendent à se rapprocher.

Il est donc judicieux dans le cas du développement d'un appareil spécifique d'évaluer l'intérêt de spécifier un appareil à faible niveau de bruit par rapport au fait de devoir mettre en œuvre des dispositions particulières pour atténuer ce bruit.

Dans le cas d'un parc de transformateurs standardisés, qui auraient donc tous par conception le même niveau de bruit, il conviendrait évidemment de pondérer l'analyse économique par la proportion de transformateurs qui nécessiteraient d'être équipés de mur pare-son ou d'être installés en enceinte.

Enfin, en plus de ces aspects économiques, il est nécessaire de vérifier également la transportabilité de l'appareil, notamment pour les transformateurs à primaire 400 kV, lorsqu'on réduit le niveau de bruit dans les spécifications.

En parallèle, les aéroréfrigérants «à bruit très réduit», c'est-à-dire avec des motoventilateurs à 500 tr/min, sont une option très intéressante dans la mesure où on peut la mettre en œuvre de manière ponctuelle en fonction de la configuration du poste.

### Les solutions actives

Les deux problèmes à résoudre sont d'une part la transmission des vibrations par voie «solidienne» qui entraîne une perturbation de nature vibratoire ou acoustique en un lieu éloigné du transformateur, d'autre part la transmission du bruit par voie aérienne. Dans le premier cas la solution active consiste à introduire sur les chemins empruntés par les vibrations des efforts d'amplitude et de phase appropriées pour contrer les vibrations générées par la source. Dans le second cas, les solutions proposées consistent



Figure 5 Actionneurs sur la dalle



Palier	Hauteur [m]	100 Hz			200 Hz		
		OFF [dB]	ON [dB]	DIFF [dB]	OFF [dB]	ON [dB]	DIFF [dB]
0.5	0.0	55.8	46.8	9.0	53.6	42.8	10.8
	1.7	54.8	46.9	7.9	47.7	32.3	15.4
1.5	1.7	58.4	51.4	7.0	49.6	42.9	6.7
2.5	1.7	46.2	35.0	11.2	49.3	41.5	7.8
3.5	1.7	34.2	31.0	3.2	51.5	41.3	10.2
4.5	1.7	29.7	24.0	5.7	50.1	41.9	8.2
5.5	1.7	38.9	31.1	7.8	43.9	31.8	12.1
6.5	1.7	47.8	39.0	8.8	44.8	36.2	8.6
			moy	7.6		moy	10.0
Chambre de garde			100 Hz		200 Hz		
		OFF	ON	DIFF	OFF	ON	DIFF
		43.4	28.7	14.7	33.8	26.9	6.9
		50.7	34.4	16.3	33.7	25.2	8.5
			moy	15.5		moy	7.7

Tableau II Résultats comparés actif-passif dans la cage d'escalier et dans un appartement

soit à combattre le bruit rayonné par la source à l'aide d'un champ acoustique approprié généré par des haut-parleurs, soit par une minimisation du bruit rayonné par la source à l'aide de générateurs d'efforts ou de moments appliqués en des points particuliers de la structure de la source.

## Deux exemples d'application

### La dalle de suspension

La première application concerne la transmission par voie «solidienne» des vibrations par la suspension et le sol vers des appartements voisins.

Sa réalisation est le résultat de la collaboration des sociétés ABB<sup>4)</sup>, SEL<sup>5)</sup>, IAV Engineering<sup>6)</sup>, le LMA (Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique) de Marseille<sup>7)</sup> et Paulstra.

Il s'agit d'un transformateur situé dans un poste 125 kV situé sous un immeuble d'habitations. Des mesures de vibration et acoustiques avaient permis de retenir la voie «solidienne» comme voie de propagation du son entre le transformateur et des appartements d'un immeuble voisin, ceci malgré une bonne performance de la suspension donnant une atténuation de 15 dB au moins. Les vibrations de la dalle sur laquelle repose le transformateur bien que très faibles, de l'ordre de 0,14  $\mu\text{m}$  à 100 Hz et de 0,05  $\mu\text{m}$  à 200 Hz, suffisaient à générer dans les appartements un bruit gênant à ces fréquences. La solution a consisté à minimiser les vibrations de la dalle par introduction d'efforts d'amplitude et de phase convenables en des points judicieusement choisis.

La figure 2 représente le principe. Des accéléromètres disposés sur le massif de

réaction mesurent l'accélération de celui-ci. Cette information est transmise au contrôleur qui commande les actionneurs disposés sur la dalle. Cette commande est calculée pour minimiser les accélérations du massif.

Pour définir le système, il faut déterminer la position optimale des accéléromètres et des actionneurs de façon à minimiser leur nombre tout en gardant une efficacité réelle et déterminer les efforts à introduire. Ceci est réalisé en s'aidant de la réponse modale de la dalle aux fréquences de 100 et 200 Hz.

La modélisation de la dalle permet de trouver la position théorique optimale des actionneurs (figure 3). Cependant compte tenu des contraintes dues à l'inaccessibilité de certains points plusieurs configurations ont été retenues. Ces configurations en nombre limitées ont fait l'objet de tests réels pour trouver celle qui donne le meilleur résultat à 100 Hz et 200 Hz.

Les efforts à introduire sont déduits d'une part des mesures des impédances

mécaniques locales aux points de chaque configuration et des amplitudes des vibrations à obtenir en ces points. Des actionneurs de 200 N se sont révélés suffisants.

Le contrôleur fourni par ABB est du type feedback MIMO (multi entrées–multi sorties) avec minimisation de la moyenne quadratique des accélérations. La référence de phase est liée à la tension du transformateur.

La connaissance des fonctions de transfert entre les actionneurs et les accéléromètres permet de calculer la commande de chaque actionneur. De plus une identification périodique en ligne permet de tenir compte de toute évolution de cette matrice de transfert.

La configuration retenue est représentée par les figures 4 et 5. Un accéléromètre a été déplacé au centre de la dalle, pour contrôler la flexion. Il y a donc 7 capteurs côté aval et un côté amont.

### Vérification de la performance

Des micros sont placés dans la cage de l'escalier de l'immeuble concerné et dans la chambre d'un appartement (ces micros n'ont aucun rôle dans le contrôle).

Les résultats sont excellents dans l'escalier, et encore meilleurs dans l'appartement. On a littéralement l'impression que le transformateur s'arrête lorsque le système est actif. Les résultats sont indiqués dans le tableau II.

### La carcasse du transformateur

La seconde application concerne la transmission du bruit rayonné par la carcasse du transformateur. Il s'agit d'un transformateur de 225/63 kV de 100 MVA datant de 1959 pour lequel la décision de réaliser un mur pare-son a été prise suite à la réalisation d'un ensemble immobilier à proximité du poste. Avant que ce mur ne soit construit il a été jugé

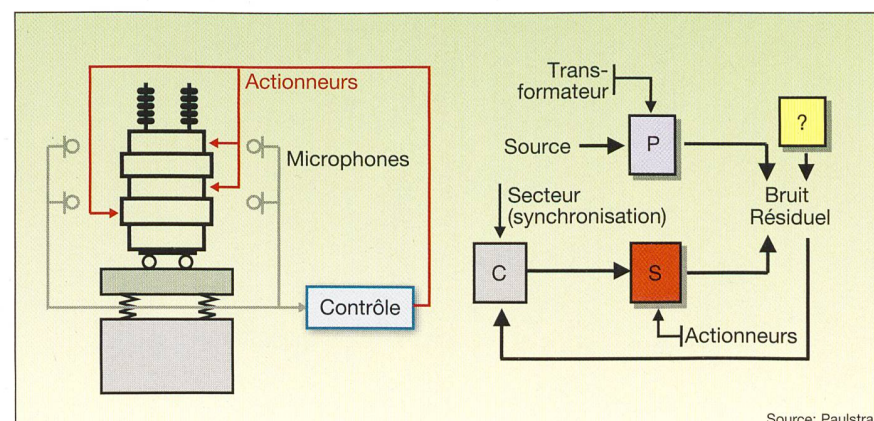


Figure 6 Principe du système de réduction active du bruit



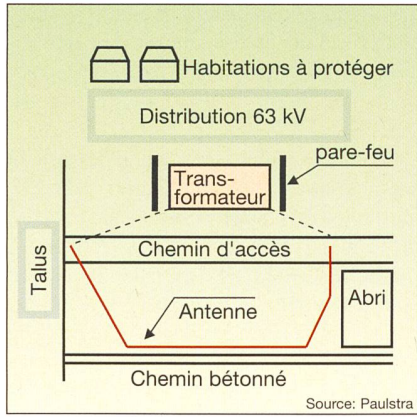


Figure 7 Positionnement de l'antenne

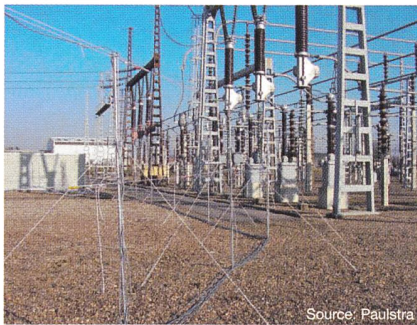


Figure 8 Antenne filaire de 36 micros

intéressant par RTE d'évaluer les performances d'un système actif.

L'objectif est de réduire l'émergence des raies à 100 Hz, 200 Hz et 500 Hz, dans le bruit parvenant par voie aérienne à des habitations voisines et d'évaluer les

contraintes d'installation d'un système actif.

Le principe est montré dans la figure 6. Il consiste à disposer de la surface de la carcasse des générateurs d'efforts perpendiculaires à celle-ci en des points judicieux pour minimiser le bruit rayonné en champ lointain. Connaissant les fonctions de transfert entre les générateurs (actionneurs) et les micros d'une antenne de micros placés en champ lointain.

Un contrôleur calcule la commande qui minimise le bruit capté. Cette technique a donné d'excellents résultats sur une maquette de transformateur placée dans une chambre anéchoïque.

À l'aide d'une cartographie acoustique établie au préalable, une antenne filaire de 36 micros est positionnée (figure 7). Dans le cas présent à cause des barres de distribution du 63 kV celle-ci ne peut pas être disposée entre le transformateur et les habitations.

Les 36 micros sont positionnés en alternance sur les deux hauteurs de l'antenne. Deux micros sont également positionnés en contrebas du transformateur, côté habitations. Ils serviront au monitoring en cours de contrôle (figure 8).

À l'aide de cartographies vibratoire effectuées à 100 Hz et 200 Hz (figure 9) nous choisissons un certain nombre de positions d'actionneurs (figure 10).

La matrice de transfert actionneurs-micros est établie. Une identification en ligne de cette matrice est possible pour tenir compte des évolutions dues à la variation de charge du transformateur et de

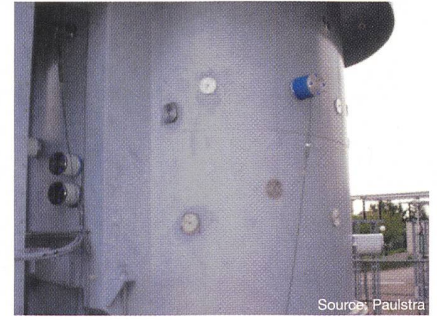


Figure 10 Position des actionneurs sur la cuve

l'environnement. Avec cette matrice de transfert et un algorithme de calcul spécifique nous déterminons la position et le nombre optimal des actionneurs.

Comme pour des raisons de sécurité (proximité de parties sous tension) pas toute la surface a été cartographiée. On a procédé à des itérations à partir de cette configuration théorique pour en trouver une acceptable. Après analyse, on a déterminé que 8 actionneurs sont nécessaire pour effectuer un contrôle acceptable. Le gain prévu à partir des mesures d'impédance et de la matrice des transferts est de l'ordre de 7 dB avec des actionneurs de 200 N. Ceci est insuffisant mais les délais d'action n'ont pas permis de disposer d'actionneurs plus puissants.

Le contrôleur à 36 entrées et 18 sorties, les algorithmes et les actionneurs sont de conception Paulstra-Hutchinson. Le contrôle est du type harmonique feedback global MIMO avec minimisation de la moyenne quadratique des pressions acoustiques aux micros.

Le système est auto-adaptatif pour prendre en compte les modifications des fonctions de transfert en cours de fonctionnement: variation de charge entraînant des variations des températures et d'impédances par variation de l'écoulement du fluide et variations atmosphériques (p. ex. pluie et vent).

#### Résultats

Le résultat est donné par la figure 11 pour la fréquence de 100 Hz et la figure 12 pour le 200 Hz. L'écart de gain entre les deux fréquences est dû au nombre réduit d'actionneurs utilisés à 200 Hz pour des raisons de disponibilité.

On remarque dans les deux cas que la présence des lobes demeure. Le gain n'est pas uniforme, par contre on le retrouve sur les micros de monitoring placés entre le transformateur et les habitations. Ceci tend à prouver qu'un contrôle sur une face est efficace du coté opposé. Le gain obtenu est proche de celui prévu. Des actionneurs plus puissants sont nécessaires.

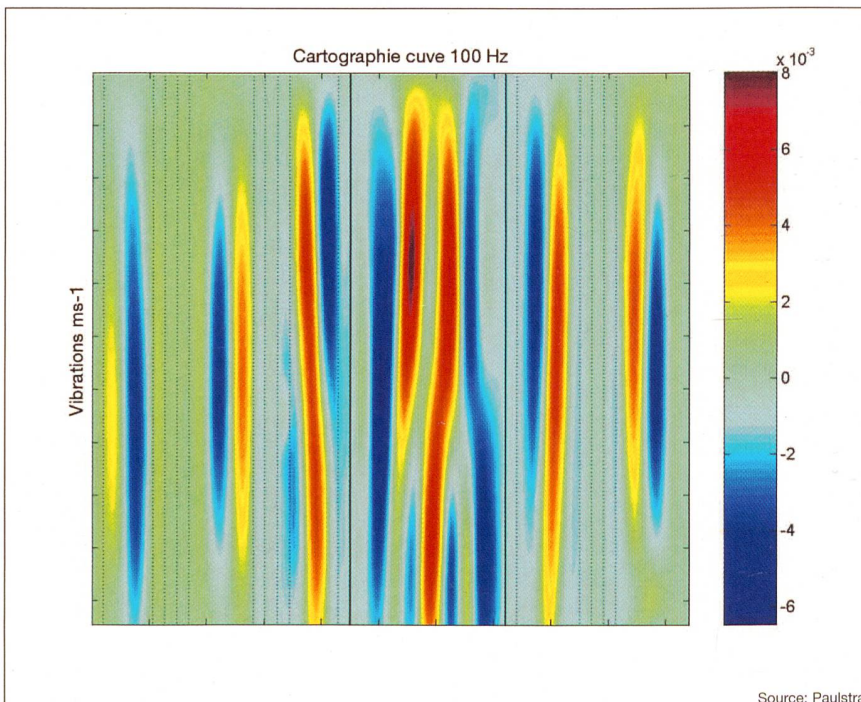
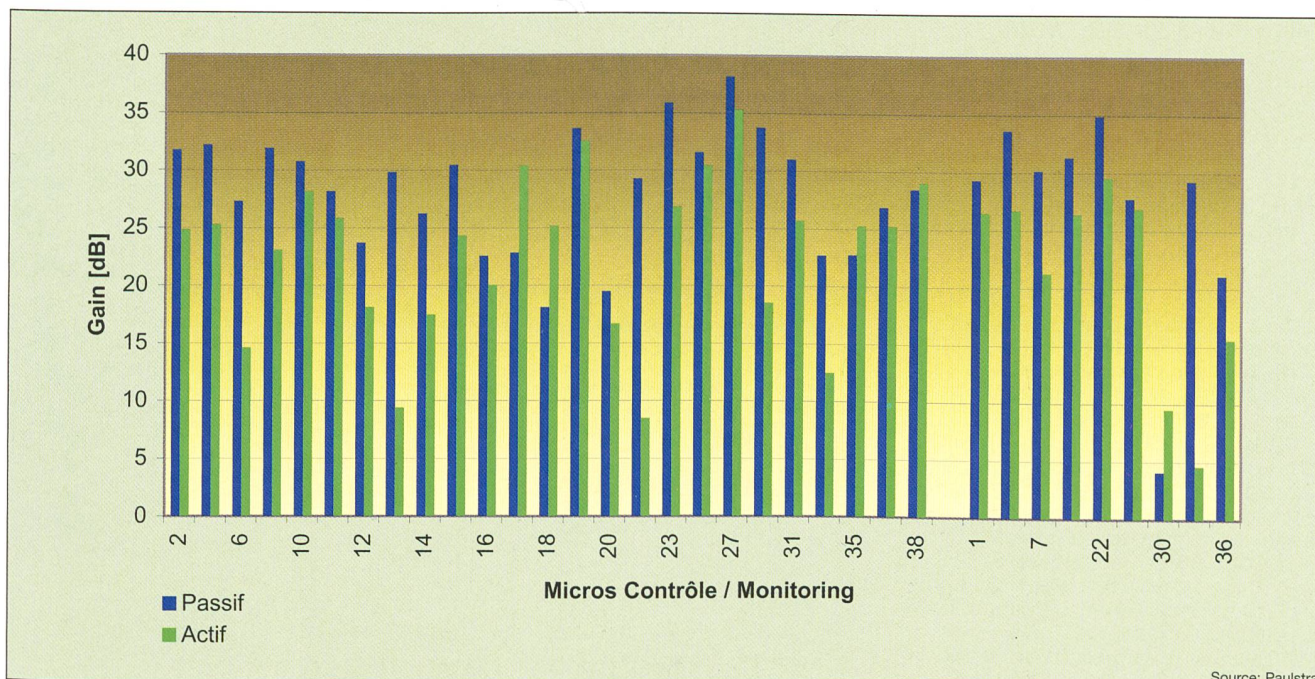


Figure 9 Cartographie vibratoire à 100 Hz

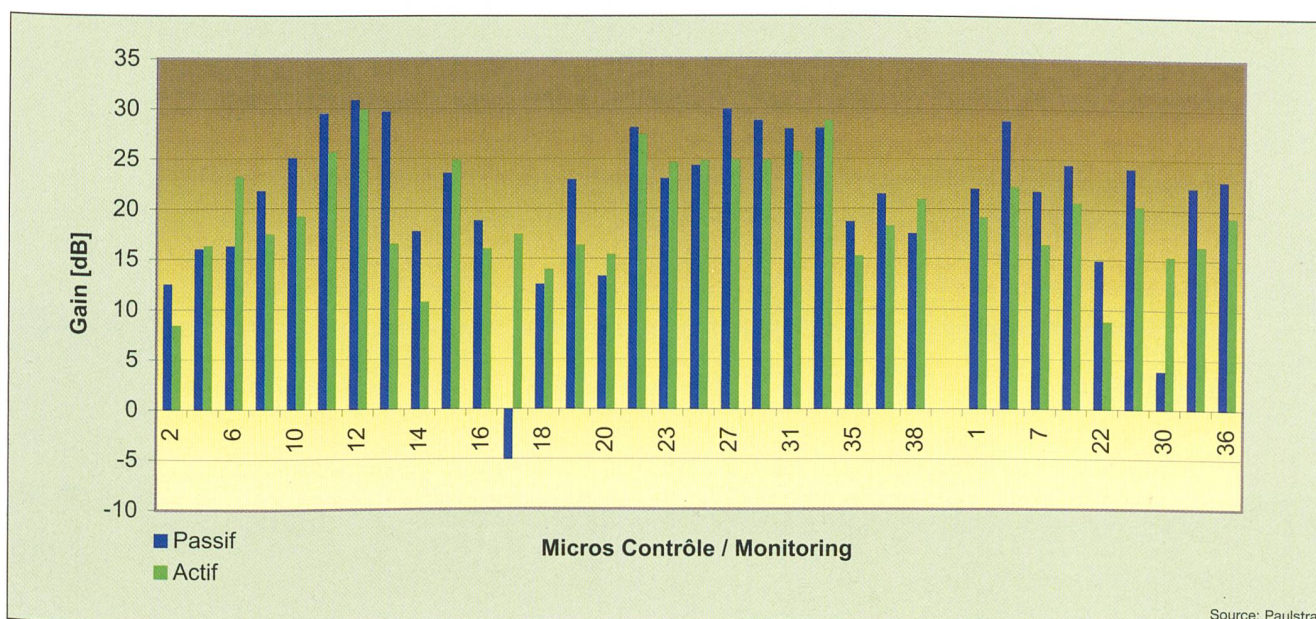




Source: Paulstra

Figure 11 Contrôle du 100 Hz

Gain sur 34 micros à 100 Hz (5,9 dB). Les micros 1-7-22-30-36 ne sont pas dans la boucle de contrôle



Source: Paulstra

Figure 12 Contrôle du 200 Hz

Gain sur 34 micros à 200 Hz (2,4 dB). Les micros 1-7-22-30-36 ne sont pas dans la boucle de contrôle

La mise en place du système sur le terrain n'a pas présenté de difficulté particulière. Le comportement du système est robuste. Les résultats sont encourageants. Une prochaine étape consistera à utiliser des actionneurs plus puissants.

## Conclusion

Ces deux exemples mettent en évidence l'importance du placement des actionneurs. Les efforts mis en jeu sont

modestes, le contrôle fréquentiel et la gestion du système sont performants. L'industrialisation ne devrait pas poser de problème particulier, elle devra prendre en compte les contraintes d'environnement et d'usage cas par cas.

Le contrôle du rayonnement de la source nécessite une investigation plus poussée quant aux modes de vibration de la structure et aux impédances mécaniques. Le positionnement des actionneurs fait appel à un algorithme dont la

mise en œuvre est en cours d'optimisation. Une telle technique, prometteuse en laboratoire demande une confrontation plus longue avec les exigences du terrain.

## Référence

- [1] J. Vierengel et al.: Utilisation de la technique de contrôle actif pour réduire le bruit des transformateurs de puissance. Rapport Cigre 12-301, 1998.



**Informations sur les auteurs**

**Pierre Boss** est responsable de l'activité Business Development pour le groupe Service de ABB Sécheron. Il a travaillé pour ABB à Genève et à Mannheim depuis 1967. Depuis 2001 il est aussi membre du comité national suisse de Cigré/Cired et délégué suisse au comité Cigré A2 «Transformateur» depuis 2000.

ABB Sécheron, CH-Meyrin, pierre.boss@ch.abb.com

**Michel Pompéi** est responsable des études avancées au sein de la société Paulstra-Vibrachoc du groupe Hutchinson. Travaillant depuis 1969 à l'utilisation mécanique des caoutchoucs pour le découplage vibratoire des structures, il a occupé les postes de directeur des études chez Paulstra jusqu'en 1982 et de directeur technique chez Vibrachoc jusqu'en 1994.

Paulstra-Vibrachoc, F-Paris, michel.pompei@hutchinson.fr

**Céline Masson**, diplômée de l'école supérieure d'ingénieurs de Marseille, travaille au sein du Centre National d'expertise Réseaux de RTE depuis 1999, à l'élaboration de spécifications techniques et à la qualification de matériels bobinés et notamment de transformateurs. Elle est en charge également d'appui et du suivi technique des convertisseurs de puissance de la station des Mandarins de l'interconnexion France-Angleterre IFA 2000.

RTE/CNER, F-Paris, celine.masson@rte-france.com

**Bernard Krummen**, est responsable du réseau de distribution du service de l'électricité de la ville de Lausanne. Engagé au SEL en 1984 comme ingénieur, il est nommé chef de division «Etudes et projets» en 1991, puis ingénieur-adjoint du chef de service en 1999.

Service Electricité de Lausanne, CH-Lausanne, bernard.krummen@lausanne.ch

**Vincent Chritin** a fondé et dirige la société IAV Engineering, spécialisée en ingénierie acoustique et vibratoire et implantée depuis 1997 au Parc Scientifique de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. IAV Engineering compte à son actif dans ce domaine plus de 150 projets d'étude et de transfert technologique et exploite dans une dizaine de pays un parc d'une trentaine de stations automatiques mettant en oeuvre des capteurs acoustiques propriétaires originaux.

IAV Engineering, CH-Ecublens, vincent.chritin@iav.epfl.ch

**Philippe Herzog** est Chargé de Recherches au Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique du C.N.R.S. Depuis 1983, il étudie les transducteurs électroacoustiques et leurs applications industrielles, notamment pour les systèmes de contrôle actif.

LMA-CNRS, F-Marseille, herzog@lma.cnrs-mrs.fr

<sup>1</sup> Cet article a été présenté au Congrès Matpost de novembre 2003.

<sup>2</sup> La classification du type de refroidissement des transformateurs est indiquée par 4 lettres.

<sup>1</sup>ère lettre: fluide de refroidissement interne en contact avec les enroulements. O: huile minérale ou liquide isolant synthétique à point de flamme ≤ 300 °C; K: liquide isolant à point de flamme > 300 °C; L: liquide isolant sans point de flamme mesurable.

<sup>2</sup>ème lettre: mode de circulation pour le fluide de refroidissement interne. N: convection naturelle à travers le

système de refroidissement et dans les enroulements; F: circulation forcée à travers le système de refroidissement (soit les pompes à liquide de refroidissement) et convection naturelle dans les enroulements (également appelé flux non dirigé); D: circulation forcée à travers le système de refroidissement, dirigée du système de refroidissement au moins vers les principaux enroulements.

<sup>3</sup>ème lettre: fluide de refroidissement externe. A: air; W: eau.

<sup>4</sup>ème lettre: mécanisme de circulation pour le fluide de refroidissement externe. N: convection naturelle; F: circulation forcée [ventilateurs (refroidissement par air) ou pompes (refroidissement par eau)]

<sup>3</sup> www.paulstra-vibrachoc.com

<sup>4</sup> www.abb.com

<sup>5</sup> www.lausanne.ch/sil

<sup>6</sup> www.iav.ch

<sup>7</sup> http://omicon.cnrs-mrs.fr, www.lma.cnrs-mrs.fr

fachbeiträge

**Leistungstransformatoren:  
Lärmemission und Vibrationen**

**Mit passiven und aktiven Systemen lassen sich  
Lärmemission und Vibrationen von Transformatoren  
reduzieren**

Die maximal erlaubte Geräuschemission von Unterstationen unterliegt zunehmend strengeren Anforderungen. Dies liegt einerseits an der fortschreitenden Expansion von Wohngebieten und andererseits an der sich abzeichnenden Verschärfung der geltenden Gesetze. Dieser Beitrag stellt verschiedene Möglichkeiten der Lärmreduktion vor und vergleicht ihre Wirksamkeit sowie die entsprechenden Investitionskosten. Es werden sowohl aktive und passive Schall- und Vibrationsdämpfer untersucht als auch die Bekämpfung der Störungen an ihrer Entstehungsquelle, den Transformatoren.

**Das Energiemanagementsystem von BERG**

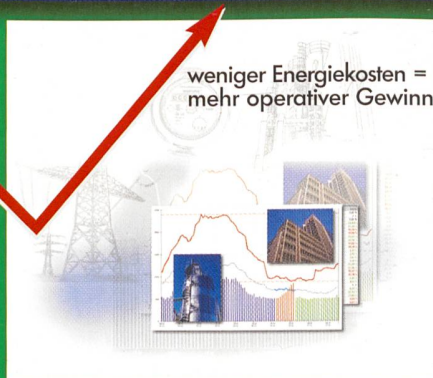
**schafft Transparenz**



Optimierungsgewinn

Informationsgewinn

weniger Energiekosten =  
mehr operativer Gewinn



Erfassung, Auswertung und Verrechnung von Verbrauchsdaten individuell anpassbares offenes Datenbanksystem modularer Aufbau herstellerunabhängige Erfassung von Zählerdaten (ECS, ZLT, GLT, DDC, SPS ...) kompatibel zu LON, Powerline, Profibus, EIB, M-Bus, DFÜ ...

Görlitz Schweiz AG  
Tirolerweg 8  
CH-6300 Zug  
Telefon: +41 (0)41 720 01 40  
Telefax: +41 (0)41 720 01 41  
e-mail: info@goerlitz.ch  
www.goerlitz.ch  
www.berg-energie.de







# Turbinenwerkstatt Innertkirchen

**Spezialist** für die Instandsetzung und Aufwertung von Pelton-, Francis- und Pumpenlaufrädern inklusive Beschichtungen.

**Partner** für Revisionen von hydraulischen Maschinen und Abschlussorganen inklusive Herstellung von Ersatzteilen.

**Praktiker** mit 9 Wasserkraftwerken im eigenen Betrieb.  
Wir sprechen die Sprache der Kraftwerksunternehmer!

Unsere Turbinenwerkstatt wird geführt von einem motivierten Team mit profunden Fachkenntnissen und Jahrzehnte langer Erfahrung. Wir verfügen über hochwertige Einrichtungen, wie grosse Fräs- und Drehzentren sowie Schweißroboter, und wir arbeiten in modernen Werkhallen. Ein eigener Pelton-Versuchsstand erlaubt die Überprüfung von Formen und Wirkungsgraden.

Spitzentechnologie für die Wasserkraft.

Besuchen Sie uns an den Powertagen  
vom 4.-6. Mai in Zürich, Stand 10 B

[www.grimselstrom.ch](http://www.grimselstrom.ch)



# Zählerfernauslesung, Energiedaten erfassen, analysieren, visualisieren...

**Powerstage 2004, Zürich:  
Halle 3.0 / Stand B06**

Für die Energieverrechnung benötigen Sie zuverlässige Energiedaten.

Wir liefern die gesamte Lösung von der mobilen Zählerdatenerfassung, dem Zählerfernauslese-System über das Energiedatenmanagement bis zur Internet-Visualisierung.

[www.optimatik.ch](http://www.optimatik.ch)

**OPTIMATIK xamax**

**Generalvertretung für**  
• Zählerfernauslese-System ITF-EDV Fröschl  
• Energiedatenmanagement-System BelVis von Kisters AG

**Optimatik AG**, GZS Strahlholz, 9056 Gais, Tel. 071 793 30 30, Fax 071 793 18 18, [info@optimatik.ch](mailto:info@optimatik.ch)  
**Xamax AG**, Hardhofstrasse 17, 8424 Embrach, Tel. 01 866 70 80, Fax 01 866 70 90, [info@xamax-ag.ch](mailto:info@xamax-ag.ch)

**rittmeier**

## Messtechnik und Leitsysteme für:

- Wasser- und Energieversorgung
- Verfahrens- und Umwelttechnik
- Wasserkraftwerke

Besuchen Sie uns an den  
**Powertagen 2004** vom  
4. – 6. Mai, Messe Zürich  
Halle 3, Stand A22

**100 Jahre**

**BRUGG**

Rittmeyer AG, CH-6302 Zug, [www.rittmeier.com](http://www.rittmeier.com)  
Ein Unternehmen der Gruppe Brugg