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: 84 (1993)

Heft: 19

Artikel: Automatisation d'une installation hydraulique : modélisation des écoulements à basse pression et conception du réglage du niveau

Autor: Lahlou, Mouncif

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902730

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: 08.07.2025

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

Le réglage correct du niveau dans les canaux d'écoulements à basse pression est d'une grande importance pratique. En effet, la valeur du niveau doit être maintenue généralement à l'intérieur d'un intervalle de tolérance donné, notamment afin d'assurer la navigation fluviale et maximiser la production de l'énergie électrique dans les installations hydroélectriques. Le présent article décrit une étude de modélisation des écoulements à basse pression permettant d'optimiser le réglage du niveau.

Automatisation d'une installation hydraulique

Modélisation des écoulements à basse pression et conception du réglage du niveau

■ Mouncif Lahlou

Pour illustrer l'importance que peut prendre le réglage du niveau d'eau dans les canaux d'écoulements à basse pression, le réglage du niveau en amont d'un barrage au fil de l'eau est un exemple typique. En effet, la valeur du niveau doit y être maintenue à l'intérieur d'un intervalle de tolérance autour d'une consigne pour garantir un niveau assez élevé afin d'assurer la navigation fluviale et maximiser la production de l'énergie électrique. Dans ce contexte, la rapidité et la précision du niveau réglé dans un cas pratique se sont avérées nettement insuffisantes. Une étude de modélisation et de réglage du niveau permettant d'améliorer le réglage existant et appliquable à d'autres problèmes de réglage du niveau des écoulements à basse pression a été menée au Laboratoire d'electronique industrielle de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. En voici un résumé.

Description d'une installation hydroélectrique, vue par un automaticien

Généralités

Pour concrêtiser le réglage du niveau d'eau d'un écoulement à basse pression, on considère l'exemple typique du réglage du niveau en amont d'un barrage au fil de l'eau. La figure 1 présente le schéma de principe d'une telle installation. Dans le canal d'amenée du barrage, la dynamique du niveau d'eau Y (*grandeur à régler*) est déterminée par le débit en amont du canal (débit d'amenée), Q_p, et le débit en aval du canal (débit de décharge), Q_c. Dans la pratique, Q_c est considérée comme *grandeur de commande* que l'on peut varier via les turbines et les vannes en service constituant *l'organe de commande* du système. Un bon réglage du niveau doit donner de bonnes performances dynamiques par rapport à la consigne Y_c et par rapport au débit d'amenée Q_p, non commandable et considéré comme une *perturbation*.

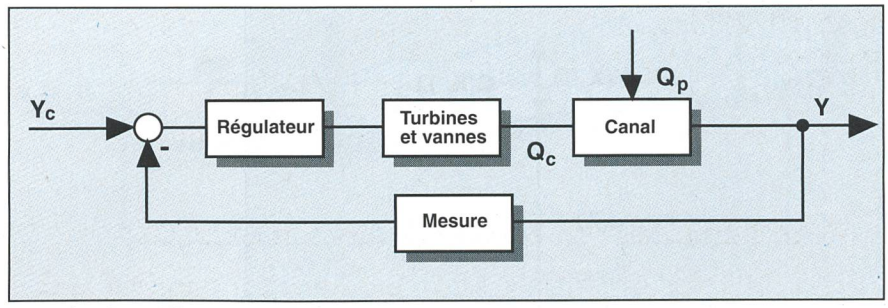


Figure 1 Schéma de principe du réglage du niveau en amont d'un barrage au fil de l'eau

Y	niveau d'eau (grandeur à régler)	Q_c	débit de décharge (en aval du canal)
Y_c	consigne du niveau Y	Q_p	débit d'amenée (en amont du canal)

Adresse de l'auteur:
Mouncif Lahlou, ing.-électr. EPFL,
EPFL – Laboratoire d'electronique industrielle,
DE-LEI, 1015 Lausanne.

Schéma bloc et fonctions de transfert

La figure 2 présente le schéma bloc du réglage correspondant à l'installation de la figure 1 et définit les fonctions de transfert des différents blocs fonctionnels. Les deux fonctions de transfert G_{am} et G_{av} décrivent le comportement dynamique du niveau Y en amont du barrage respectivement par rapport au débit des turbines et des vannes, Q_c, et par rapport au débit en amont du canal, Q_p. Pour dimensionner le régulateur du niveau, donné par la fonction de transfert G_r, on a besoin de connaître toutes les fonctions de transfert du circuit de réglage, soit en plus des fonctions de transfert G_{am} et G_{av} celles du bloc turbines-vannes (G_t) et de l'organe de mesure (G_m). Ces deux dernières sont en général bien connues. En revanche, des fonctions G_{am} et G_{av} adéquates doivent être développées.

La démarche de construction de G_{am} et G_{av}, essentiellement théorique, sera présentée succintement dans ce qui suit. Ces deux fonctions de transfert seront ensuite utilisées pour concevoir le réglage du niveau selon le schéma bloc de la figure 2, mais avec une abscisse de réglage quelconque. Finalement, on présentera un exemple pratique de réglage du niveau en amont d'un barrage au fil de l'eau.

Modélisation d'un écoulement à basse pression

Les équations de base

Un canal est siège d'un écoulement dit à basse pression si les trois approximations suivantes peuvent être retenues [1]:

- La vitesse et le niveau de l'écoulement sont identiques sur une section perpendiculaire aux lignes de courant (écoulement unidimensionnel).
- La vitesse de l'écoulement n'a pas de composante verticale.
- Les forces de friction ont la même formulation en régime perturbé qu'en régime permanent.

Pour un tel écoulement, la dynamique du niveau et du débit est régie par les équations de De Saint Venant [2] qu'on rappelle sous la forme suivante:

$$\partial A(X,T)/\partial T + \partial Q/\partial X = 0 \qquad (1)$$

$$(1/g)[(1/A)(\partial Q/\partial T) - (Q/A^2)(\partial A/\partial T)] + (1/g)[(Q/A^2)(\partial Q/\partial X) - (Q^2/A^3)(\partial A/\partial X)] + \partial Y/\partial X + \Gamma Q^2/A^2 + \partial Z/\partial X \qquad (2)$$

Les variables X, T, Z, Y et Q dénotent respectivement la position le long du canal, le temps, l'altitude du lit du canal, le niveau et le débit de l'écoulement (figure 3). En utilisant ces notations, le débit en amont du canal sera noté $Q(-L_c, t)$ et en aval $Q(0, T)$. Les paramètres A, B et g dénotent la section, la largeur de l'écoulement et l'accélération terrestre. G est le coefficient de pertes de charges, proportionnel aux forces de friction et au carré de la vitesse de l'écoulement.

En plus des approximations précitées, on néglige les débits latéraux du canal. Par conséquent, les fluctuations du débit du canal naissent uniquement aux extrémités amont ($X = -L_c$) et aval ($X = 0$) du canal (L_c étant la longueur du canal).

Petites variations autour de l'écoulement uniforme (linéarisation)

En pratique, les fluctuations précitées – et par suite celles du niveau – sont petites par rapport au débit du canal, si bien que l'on peut décrire leurs dynamiques respectives par les équations (1) et (2) linéarisées. Dans ce qui suit, on utilisera ces équations linéarisées pour déterminer les variations du niveau et du débit (resp. ΔY et ΔQ) autour de leurs valeurs en régime permanent (resp. $Y_o(X)$ et Q_o). Mais auparavant, on y opère les deux transformations suivantes:

- D'abord, on substitue aux paramètres de l'écoulement, à savoir la section de l'écoulement, la largeur de l'écoulement et le coefficient de pertes de charges (resp. $A_o(X)$, $B_o(X)$ et $\Gamma_o(X)$) des paramètres constants $\overline{A}_o$, $\overline{B}_o$, $\overline{\Gamma}_o$ [2] (l'indice inférieur $_o$ indique une valeur en régime permanent et $^-$ une valeur constante). On obtient ainsi deux équations différentielles linéaires où il est possible d'introduire la transformée de Laplace. Ces trois paramètres constants sont déterminés pour caractériser un écoulement uniforme ayant le même comportement dynamique que le canal original.
- Afin de simplifier les calculs analytiques, on introduit ensuite les grandeurs rapportées suivantes:

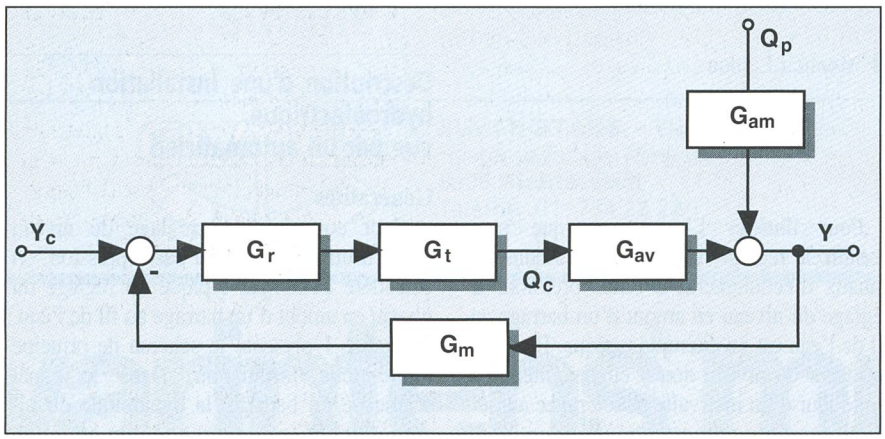


Figure 2 Schéma bloc du système selon figure 1

Y, $[y(x,t)]$	niveau d'eau [grandeurs rapportées des variations]
Y_c $[y_c(x,t)]$	consigne du niveau [grandeurs rapportées des variations]
Q_c $[q(0,t)]$	débit en aval du canal [grandeurs rapportées des variations]
Q_p, $[q(-l_c,t)]$	débit en amont du canal [grandeurs rapportées des variations]
G_r	fonction de transfert du régulateur
G_t	fonction de transfert du bloc turbines-vannes
G_{am}, G_{av}	fonctions de transfert du canal; elles décrivent le comportement dynamique du niveau $y(x,t)$ par rapport à $q(-l_c,t)$ et $q(0,t)$, respectivement

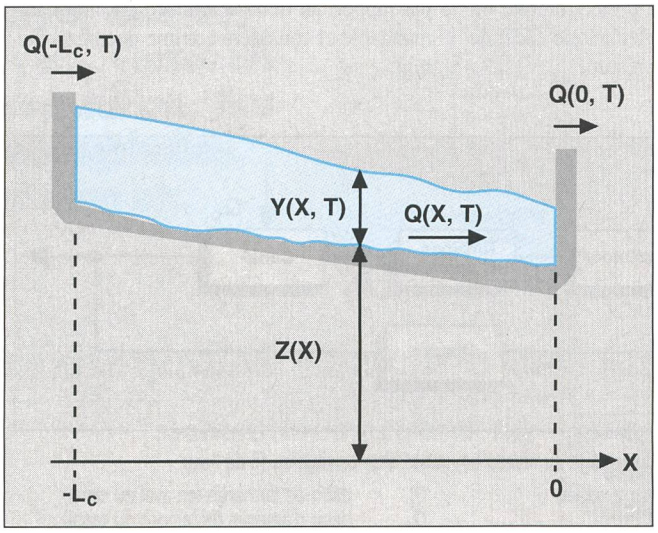


Figure 3 Coupe longitudinale du canal d'écoulements à basse pression

$$q = \Delta Q/Q_o \quad (3)$$

$$y = \Delta Y/Y_o \quad (4)$$

$$t = 2\Gamma_o g Q_o T / \overline{A}_o \quad (5)$$

$$x = 2\Gamma_o g X \quad (6)$$

On obtient finalement les deux équations (7) et (8) formant un système de deux équations différentielles linéaires aux dérivées partielles.

$$\partial y(x,t)/\partial t + \partial q(x,t)/\partial x = 0 \quad (7)$$

$$\partial q(x,t)/\partial t - 2\partial y(x,t)/\partial t + (\overline{v}_o^{-2} - 1)\partial y(x,t)/\partial x + q(x,t) - y(x,t) = 0 \quad (8)$$

Dans (8), $\overline{v}_o$ dénote le nombre de Froude égal au rapport entre la vitesse de l'écoulement ($\overline{V}_o = \overline{Q}_o/\overline{A}_o$) et celle de propagation de l'onde de translation $W_o = \sqrt{g\overline{A}_o/\overline{B}_o}$ [2]. A noter que les équations (7) et (8) ne dépendent pas des paramètres géométriques de l'écoulement. Pour les valider, l'utilisation de canaux en grandeurs réduites (équipement de laboratoire) est par conséquent possible.

Détermination des fonctions de transfert du canal

Afin d'extraire les deux fonctions de transfert du niveau, exprimant son comportement dynamique par rapport au débit en amont et en aval du canal, on calcule d'abord la transformée de Laplace [3] par rapport au temps t des équations (7) et (8). Après élimination dans (8) le débit selon (7), on obtient une équation différentielle linéaire du deuxième ordre du niveau par rapport à l'abscisse x. En rapportant sa solution au débit en amont $q(-l_c, t)$ et en annulant le débit en aval $q(0, t)$, on obtient la fonction de transfert par rapport au débit en amont G_{am} (9). De manière symétrique, on obtient la fonction de transfert par rapport au débit en aval G_{av} (10).

$$G_{am}(x,s) = y(x,s)/q(-l_c,s) = e^{\alpha(x+l_c)}[\alpha \mathrm{Sinh}(ßx) + ß\mathrm{Cosh}(ßx)]/s\mathrm{Sinh}(ßl_c) \quad (9)$$

$$G_{av}(x,s) = y(x,s)/q(0,s) = e^{\alpha x}[\alpha \mathrm{Sinh}(ß(x+l_c)) + ß\mathrm{Cosh}(ß(x+l_c))]/s\mathrm{Sinh}(ßl_c) \quad (10)$$

avec:

$$\alpha = \overline{v}_o^2/[2(1-\overline{v}_o^2)](1+2s)$$

$$ß = \overline{v}_o/[2(1-\overline{v}_o^2)]\sqrt{4s^2+4s+\overline{v}_o^2}$$

et s la variable de Laplace.

Les équations (9) et (10) sont fortement transcendantes car exprimées en termes de sinus et de cosinus hyperboliques (resp. Sinh et Cosh). Cependant, on peut décomposer les fonctions (9) et (10) en une somme de modes ou dynamiques élementaires [2], dont les trois types sont schématisés à la figure 4. Le bloc *1* représente un comportement intégral: à un saut de $q(-l_c, t)$ ou $q(0, t)$ correspond une rampe du niveau $y(x, t)$. Le bloc *2* indique un comportement oscillatoire (en sinusoïde amortie) pour une *infinité de fréquences*, représentant le phénomène d'ondes de translation. Enfin, le bloc *3* symbolise un comportement proportionnel valable en amont du canal pour G_{am}, et en aval pour G_{av}. En effet, dans ces deux cas, un saut du débit provoque un saut du niveau.

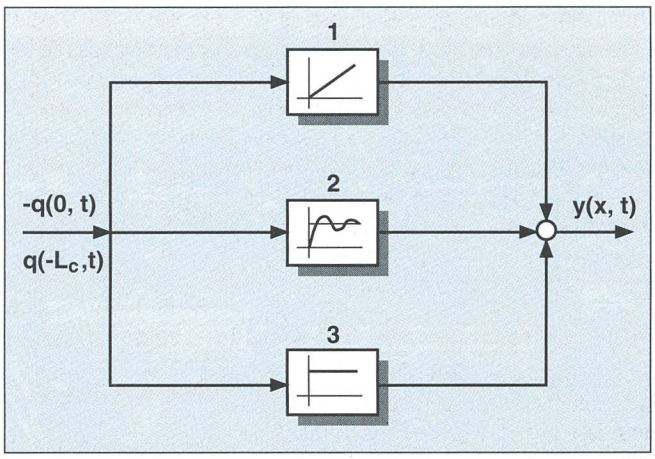


Figure 4 Modes de la dynamique du niveau
Explications: voir texte

Conception du réglage du niveau

Approximations des fonctions de transfert du canal

Pour concevoir le réglage de niveau à une abscisse x du canal, (9) et (10) sont inadéquates. En effet, les méthodes de conception à utiliser [3, 4] supposent des fonctions de transfert rationnelles du système à régler. A cet égard, la somme de modes précitée est intéressante puisque chaque mode correspond à une fonction de transfert rationnelle. Cependant, ces méthodes ne permettent pas de tenir compte d'une infinité de modes du comportement oscillatoire. Pour sortir d'affaire, on limite le nombre de modes y relatifs.

La dynamique relative aux modes supprimés est compensée en ajoutant un terme correctif. En effet, les coefficients de ce terme correctif sont calculés pour que la fonction de transfert approchée reproduise un nombre déterminé de coefficients de développement en séries de la fonction de transfert transcendante pour $s \rightarrow \infty$ et $s \rightarrow 0$. Cela permet d'améliorer le comportement dynamique donné par la somme tronquée en régime permanent ($s \rightarrow 0$) et transitoire ($s \rightarrow \infty$), et notamment récupérer le saut du niveau (comportement proportionnel) pour $X = 0$ et $X = -L_c$.

Dans le cas général d'un écoulement à basse pression, les deux fonctions de transfert approchées G_{am} et G_{av}, notées respectivement G_{am}^* et G_{av}^*, sont utilisées dans un schéma de réglage classique du niveau à une abscisse x du canal (figure 5) où on fait exclusivement usage des grandeurs rapportées selon (3) à (6); les grandeurs absolues correspondant à q et y étant les variations ΔQ *et* ΔY. Par convention, la grandeur de comman-

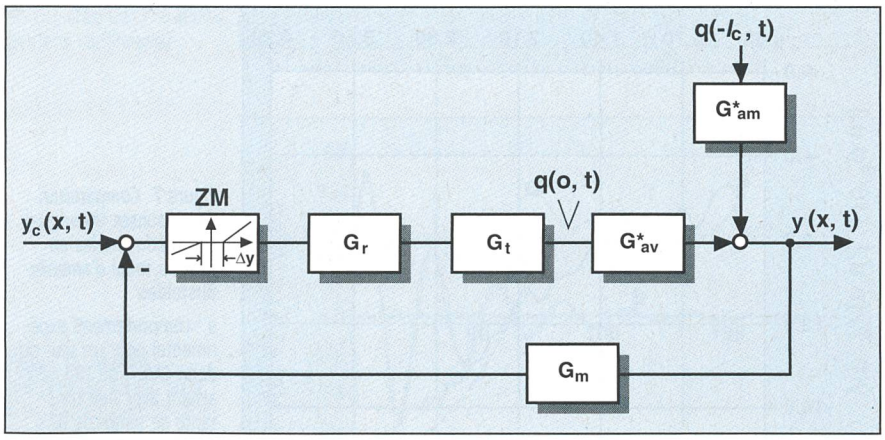


Figure 5 Schéma-bloc du circuit de réglage avec zone morte
ZM fonction non linéaire permettant d'annuler la commande du régulateur dans une zone morte de largeur Δy

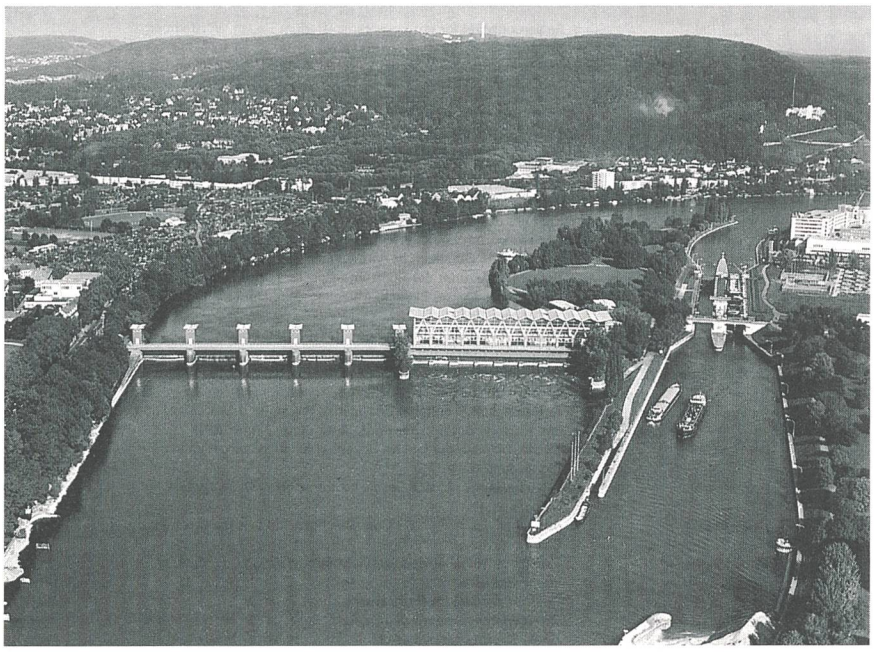


Figure 6 Installation hydroélectrique de Birsfelden
Vue d'ensemble de l'installation comprenant les canaux d'amenée et de fuite, l'écluse, les turbines (logés dans le bâtiment près de l'écluse) et les vannes

de est le débit en aval du canal et la grandeur de perturbation le débit en amont. L'étude du réglage dans le cas inverse, où le niveau est réglé par le débit en amont du canal en tenant compte du débit en aval du canal comme grandeur de perturbation, est tout à fait similaire.

Fonction de transfert du système turbines/vannes

La fonction de transfert G_t décrit le comportement de l'actuateur du débit $q(0, t)$. La dynamique correspondante est caractérisée, dans le cas d'un canal d'amenée d'une installation hydroélectrique, par les constantes de temps des turbines et/ou des vannes en service.

Pour ne pas solliciter les actuateurs du débit trop fréquement afin d'accroître leur durée de vie, on ajoute au circuit de réglage du niveau le bloc *ZM* (figure 5) représentant une fonction non linéaire permettant d'annuler la commande du régulateur pour des écarts de réglage (consigne du niveau $y_c(x, t)$ moins le niveau mesuré) compris dans une zone morte de largeur Δy.

Conception du régulateur

Le régulateur de niveau utilisé est de type PI, caractérisé par l'équation (11):

$$G_r(s) = (1+sT_n)/sT_i \qquad (11)$$

Pour déterminer ses coefficients, un procédé de dimensionnement a été élaboré [2].

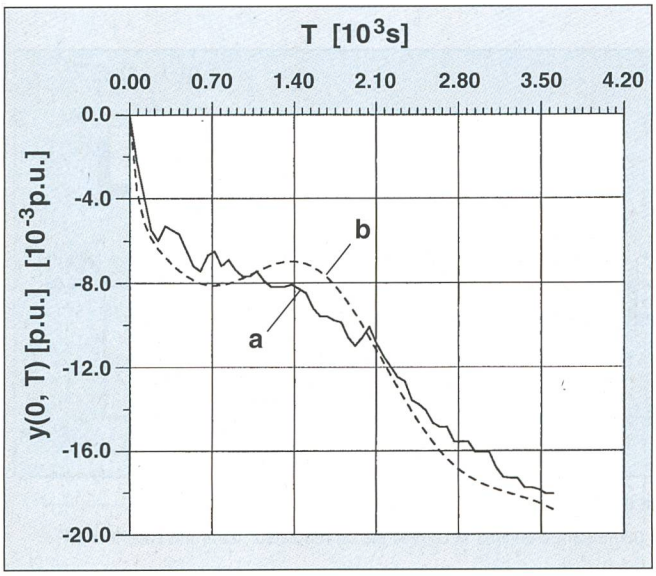


Figure 7 Comparaison des réponses théoriques et expérimentales en aval du canal d'amenée Birsfelden
a comportement expérimental pour un saut du débit $Q(0,T)$ de 100 m³/s atteint avec une constante de temps de 60 s
b réponse de G_{av}^* obtenue par calcul pour le même saut du débit $Q(0,T)$

En effet, ce procédé consiste à placer des valeurs de T_n et T_i permettant de conférer à la réponse fréquentielle d'amplitude du circuit de réglage en boucle ouverte une fréquence de coupure élevée (donc un réglage rapide) et des valeurs élevées en basses fréquences (donc limiter les dépassements par rapport à la consigne et à la perturbation) tout en assurant des marges de stabilité suffisantes.

Pour visualiser les réponses du niveau à un saut de la consigne ou de la perturbation, un logiciel de simulation sur IBM-PC a été développé. Il permet de choisir, sur la base des réponses obtenues, entre plusieurs variantes de coefficients issues du procédé de dimensionnement.

Exemple pratique: canal d'amenée Birsfelden

Détermination des fonctions de transfert

Dans ce qui suit, le canal d'amenée de l'installation hydroélectrique de Birsfelden (figure 6) servira d'exemple pour illustrer et valider la modélisation et le réglage du niveau selon les méthodes présentées ci-dessus. On rappelle que ce canal d'amenée (voir carte topographique dans [5]) est de longueur 7889 [m] et limité à son extrémité amont par le barrage d'Augst-Wyhlen et à son extrémité aval par le barrage Birsfelden sur le Rhin (figure 6). Le niveau de l'écoulement en aval du canal ($x = 0$) est légalement assigné à 254,25 m avec une tolérance de ±5 cm indépendamment du débit au point de fonctionnement Q_o.

La modélisation du niveau pour $x = 0$ commence par l'acquisition des paramètres $A_o(X)$, $B_o(X)$ et $\Gamma_o(X)$ du canal réel non uniforme à partir de ses données topographiques et hydrographiques [2]. Ensuite, on effectue la transformation de structure de l'écoulement. Les trois paramètres $\overline{A}_o$, $\overline{B}_o$ *et* $\overline{\Gamma}_o$ obtenus pour le point de fonctionnement considéré, avec $Q_o = 288$ m³/s, sont réunis dans le tableau I et sont valables pour G_{am} et G_{av}.

Q_o [m³/s]	$\overline{A}_o$ [m²]	$\overline{B}_o$ [m]	$\overline{\Gamma}_0$ [10⁻⁴ s²/m²]
288	1189,2	217,1	1,38

Tableau I Paramètres de l'écoulement uniforme

Les fonctions de transfert approchées G_{am}^* et G_{av}^* sont ensuite déduites en considérant un seul mode du comportement oscillatoire et en ajoutant un terme correctif du premier ordre. On obtient après quelques calculs les fonctions approchées (12) et (13) dans lesquels on distingue la fraction en $1/s$ relative au comportement intégral et la somme des deux fractions avec pôles complexes et con-

jugués relatives au mode oscillatoire retenu. Les deux termes restant forment la correction.

$$G_{av}^*(s) = 0{,}024 - 0{,}022/(1+0{,}23s) + 0{,}033/s + (0{,}032 - j0{,}0037)/[s+(0{,}5+j4{,}415)] + (0{,}032 + j0{,}0037)/[s+(0{,}5-j4{,}415)] \quad (12)$$

$$G_{am}^*(s) = 0{,}0075/(1+0{,}23s) + 0{,}033/s + (-0{,}033 + j0{,}00031)/[s+(0{,}5-j4{,}415) + (0{,}033 - j0{,}00031)/[s+(0{,}5+j4{,}415) \quad (13)$$

Le processus de modélisation aboutissant à (12) et (13) est par la suite validé en comparant les réponses du niveau calculées à partir de (12) et/ou (13) aux courbes expérimentales disponibles et correspondant aux mêmes débits $q(0, t)$ et $q(-l_c, t)$. A la figure 7, on compare d'une part la réponse expérimentale du niveau en aval obtenue lors de la mise en service d'une turbine du barrage Birsfelden, correspondant à un saut du débit $Q(0, T)$ de 100 m³/s atteint avec une constante de temps de 60 s (figure 7, *a*); et d'autre part la réponse de G_{av}^* obtenue par calcul pour le même saut de débit $Q(0, T)$ (figure 7, *b*). A noter que le temps est exprimé en grandeur absolue et le niveau en grandeur rapportée selon (4).

Pour déterminer les coefficients du régulateur PI du circuit de réglage du niveau, on admet que l'actuateur du débit de commande $q(0,t)$ est la turbine précitée. La fonction de transfert du débit correspondante est donnée par (14). En outre, le transducteur de mesure du niveau se comporte comme un filtre du premier ordre avec une constante de temps de 500 s (15).

$$G_t(s) = 1/(1+0{,}04s) \quad (14)$$
$$G_m(s) = 1/(1+0{,}32s) \quad (15)$$

Aux figures 8 et 9 sont présentées les réponses du niveau pour un saut de la consigne $y_c(0, t)$ de 0,1 p.u. (ou de 80 cm) et pour un saut de la perturbation $q(-l_c, t)$ de 0,1 p.u. (ou de 28,8 m³/s). Ces deux réponses sont obtenues, selon le procédé de dimensionnement précité, pour $T_n = 152{,}5$ s et $T_i = 1{,}52$ s. L'écart de réglage dans la figure 8 pénètre dans l'intervalle de tolérance après environ 40 minutes tandis que la réponse par rapport à la perturbation, *y* est toujours inscrite (figure 9); leurs valeurs (écart de réglage et réponse par rapport à la perturbation) atteignent cependant un maximum de 20 cm (0,025 p.u.) et 4 mm ($5 \cdot 10^{-4}$ p.u.) respectivement. Cette dernière valeur est tout à fait acceptable et permet d'imposer une zone morte Δy relativement élevée tout en assurant que le niveau reste à l'intérieur de l'intervalle de tolérance ±5 cm autour de 254,25 m.

A titre de comparaison, on présente aux figures 10 et 11 les réponses obtenues avec les coefficients du régulateur PI utilisé en pratique [7]. Ces réponses sont caractérisées par

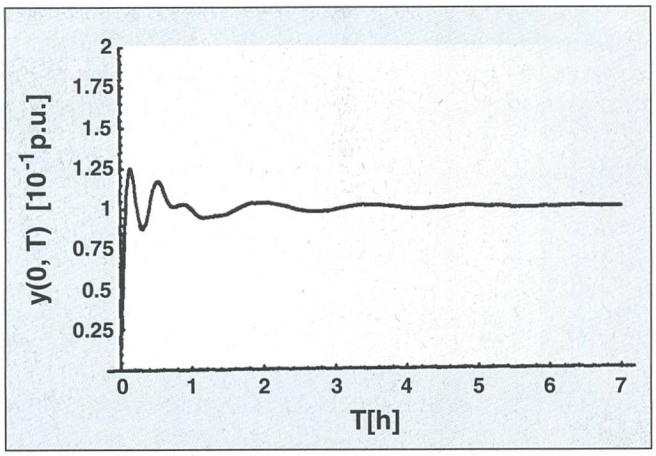


Figure 8 Réponse indicielle du niveau suite à un saut de consigne de 0,1 p.u.

paramètres du régulateur PI: $T_n = 152{,}5$ s et $T_i = 1{,}52$ s

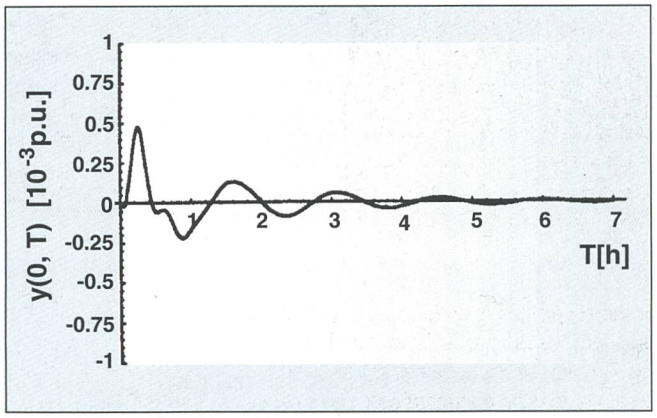


Figure 9 Réponse indicielle du niveau suite à un saut de perturbation de 0,1 p.u.

paramètres du régulateur PI: $T_n = 152{,}5$ s et $T_i = 1{,}52$ s

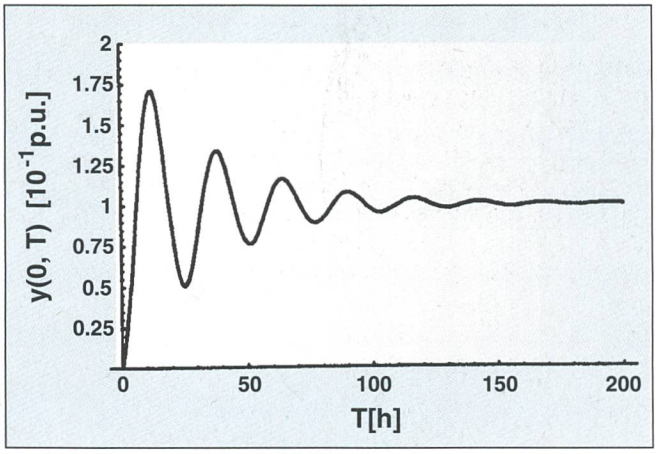


Figure 10 Réponse indicielle du niveau suite à un saut de consigne de 0,1 p.u.

paramètres du régulateur PI: $T_n = 4800$ s et $T_i = 4000$ s (anciens coefficients)

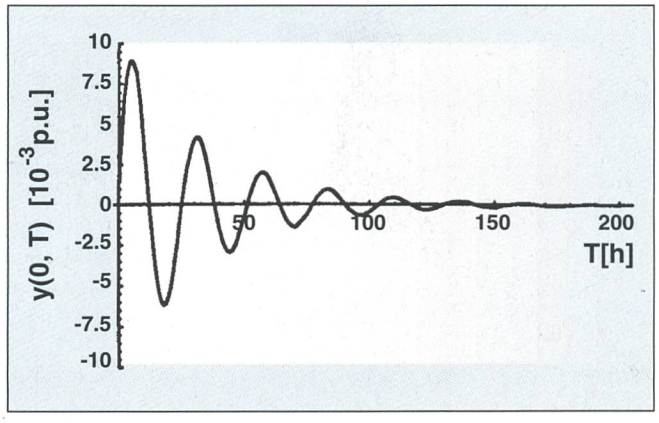


Figure 11 Réponse indicielle du niveau suite à un saut de perturbation de 0,1 p.u.

paramètres du régulateur PI: $T_n = 4800$ s et $T_i = 4000$ s (anciens coefficients)

des oscillations d'amplitude relativement élevées (valeurs maximales de l'écart de réglage de 60,1 cm (ou 0,075 p.u.) et de la réponse par rapport à la perturbation de 6 cm (ou $7{,}5 \cdot 10^{-3}$ p.u.) et beaucoup moins bien amorties.

Conclusion

A l'instar de l'exemple ci-dessus, le réglage classique du niveau basé sur les fonctions de transfert approchées devrait permettre d'améliorer de manière substancielle le réglage de niveau des canalisations à basse pression. Pour un canal d'amenée d'une installation hydroélectrique, cette amélioration permettra en particulier de mieux contrôler la hauteur de chute des turbines et d'élargir la zone morte Δy dans le but de solliciter moins fréquemment les turbines et les vannes afin de limiter leur coût d'exploitation.

Regeltechnik für Flusskraftwerke

Modell eines Wasserkanals und Optimierung des Regelverhaltens der Niveauregelung

In den Staustrecken von Flusswasserkraftwerken wird verlangt, dass der Wasserstand immer in relativ engen Grenzen, in der Nähe des höchstmöglichen Niveaus, gehalten wird. Dies ist notwendig, um einerseits eine möglichst hohe Kraftwerksleistung zu erzielen, andererseits aus Rücksicht auf die Umwelt und, gegebenenfalls, auf die Schiffahrt. Dies stellt hohe Anforderungen an die eingesetzte Regeltechnik. Normalerweise benützt man dazu PI-Regler, welche die dynamischen Eigenschaften des Kanals, der Turbinen und der Schütze möglichst gut berücksichtigen müssen. Anhand eines konkreten Falles, der Staustrecke des Rheins zwischen Augst-Wyhlen und Birsfelden (Bild 6), beschreibt der Aufsatz das Vorgehen zum Bestimmen der beeinflussbaren Regelparameter, um eine optimale Regelung des Wasserniveaus direkt oberhalb des Stauwehrs zu erreichen. Es wird auch darauf hingewiesen, wie das Modell für andere Fälle verallgemeinert werden kann.

Das Prinzipschema und ein Blockschema des Regelproblems aus Sicht des Regelungstechnikers zeigen die Bilder 1, 2 und 5. Um die optimale Übertragungsfunktion des Regelblocks zu bestimmen, müssen die Übertragungsfunktionen der übrigen Teilsysteme bestimmt werden. Im Zentrum der Untersuchungen steht dabei die Ermittlung der Übertragungsfunktionen des Kanals nach Bild 3. Ausgehend von den grundlegenden Gleichungen (1) und (2) von De Saint Venant sind verschiedene Vereinfachungen notwendig, die zu den Übertragungsfunktionen (9) und (10) führen. Für die praktischen Zwecke können diese nochmals vereinfacht werden (Gleichungen (12) und (13)). Für die untersuchte Staustrecke wurden alsdann die Parameter des Reglers neu berechnet und mit ihnen das Regelverhalten des Gesamtsystems theoretisch und experimentell untersucht (Bilder 7–11). Das Einschwingverhalten des Systems konnte aufgrund dieser Untersuchungen wesentlich verbessert werden.

Remerciements

Ce travail a pu être mené à bien grâce au subside accordé par la Commission pour l'Encouragement de la Recherche Scientifique (CERS).

Bibliographie

[1] *J.A Cunge* et *F.M Holly*: Practical aspects of computational river hydraulics (chap. 2). Pitman, Massachusetts, 1980.

[2] *M. Lahlou*: Modélisation et réglage de niveau des écoulements à basse pression. Thèse de doctorat EPFL, Lausanne, 1993.

[3] *H. Bühler*: Systèmes échantillonnés. Vol. 2, Traitement dans l'espace d'état, Complément au Traité d'électricité, Presses polytechniques romandes, Lausanne, 1983.

[4] *H. Bühler*: Conception de systèmes automatiques. Complément au Traité d'électricité, Presses polytechniques romandes, Lausanne, 1988.

[5] *M. Lahlou*: La modélisation des écoulements à basse pression traitée par un automaticien. Un modèle d'état du niveau d'eau tenant compte des phénomènes d'ondes de translation. Bull. ASE/UCS 84(1993)9, pp. 33–37.

[6] *M. Lahlou*: Barsoph, programme général de simulation et de réglage du niveau des écoulements à basse pression. Set de manuels d'utilisation, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Laboratoire d'électronique industrielle, Lausanne, 1992.

[7] *M. Lahlou*: Canal d'amenée Birsfelden, modélisation et réglage de niveau. Rapport interne EPFL-LEI 92, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Laboratoire d'électronique industrielle, Lausanne, 1992.

ETG
SEV/ASE

Connaissez-vous l'ETG?

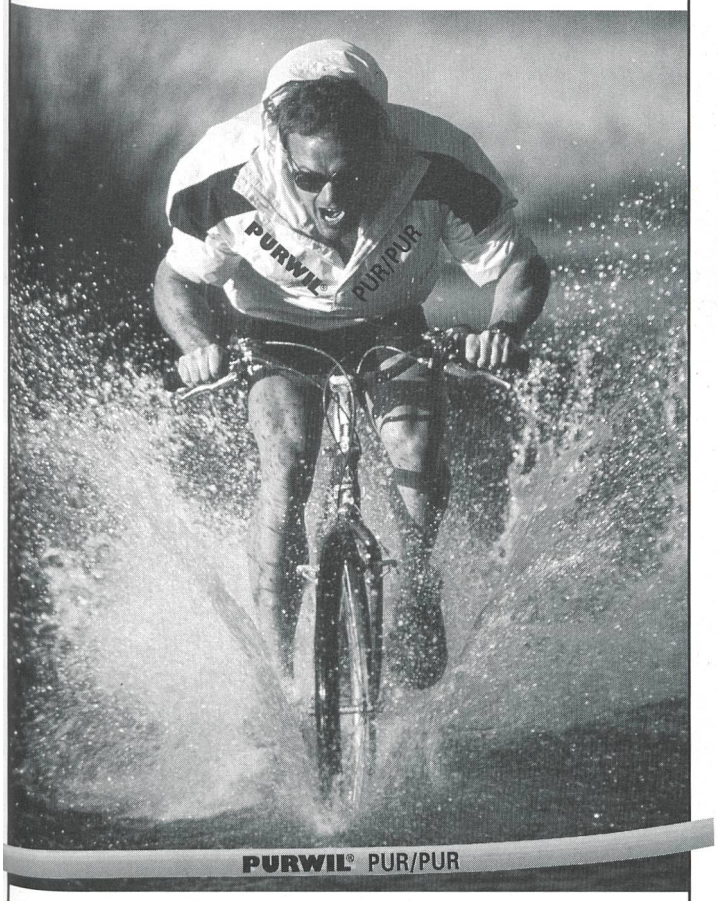
La Société pour les techniques de l'énergie de l'ASE (ETG) est un *Forum national* qui s'occupe des problèmes actuels des systèmes d'énergie électrique dans le cadre global de toutes les formes de l'énergie. En tant que *société spécialisée de l'Association Suisse des Electriciens* (ASE), elle se tient à la disposition de tous les spécialistes et utilisateurs intéressés du domaine des techniques de l'énergie.

Pour de plus amples renseignements et documents, veuillez prendre contact avec l'Association Suisse des Electriciens, Seefeldstrasse 301, case postale, 8034 Zurich, téléphone 01 384 91 11.

W

wie Wasserbeständig

Hydrolysebeständig



Hart im Geben
Hart im Nehmen

PURWIL® PUR/PUR

Sie sind nicht nur überfahrfest,
sondern trotzen auch
härtesten Witterungsbedingungen
von –40 °C bis +80 °C

Auch Benzin- und Öl-Rückstände
lassen unsere **PURWIL®**-Kabel kalt

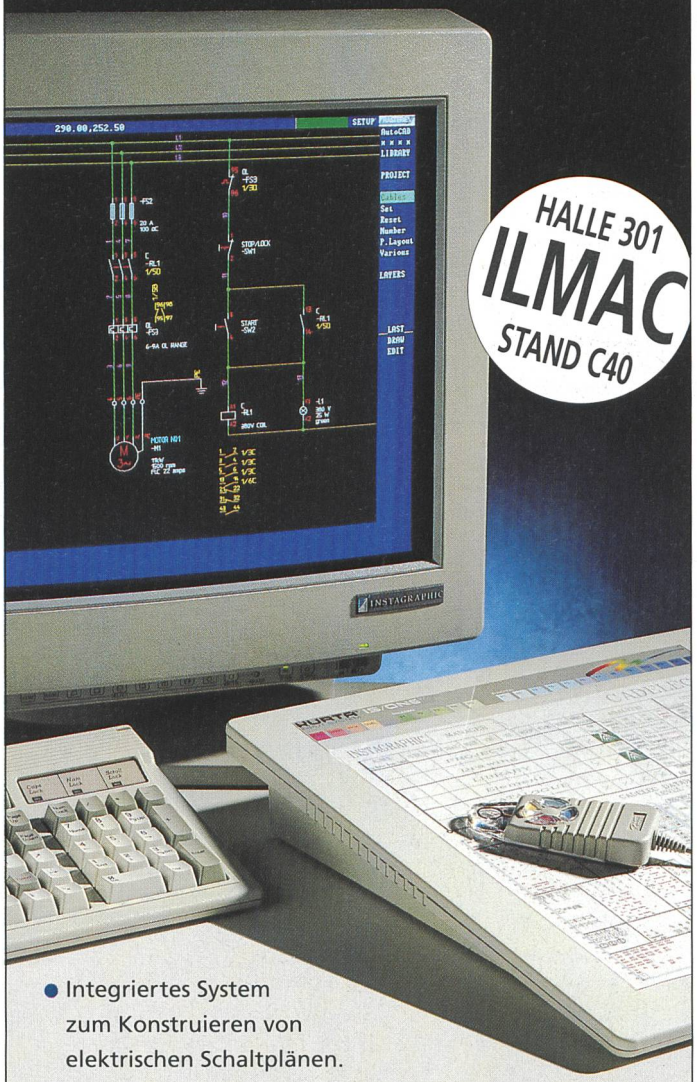
Verlangen Sie unsere Dokumentation und Preislisten.

KIW

Kupferdraht-Isolierwerk AG
CH-5103 Wildegg
Telefon 064/57 01 11
Telefax 064/533 628

CADELEC

CAD für den Elektroingenieur

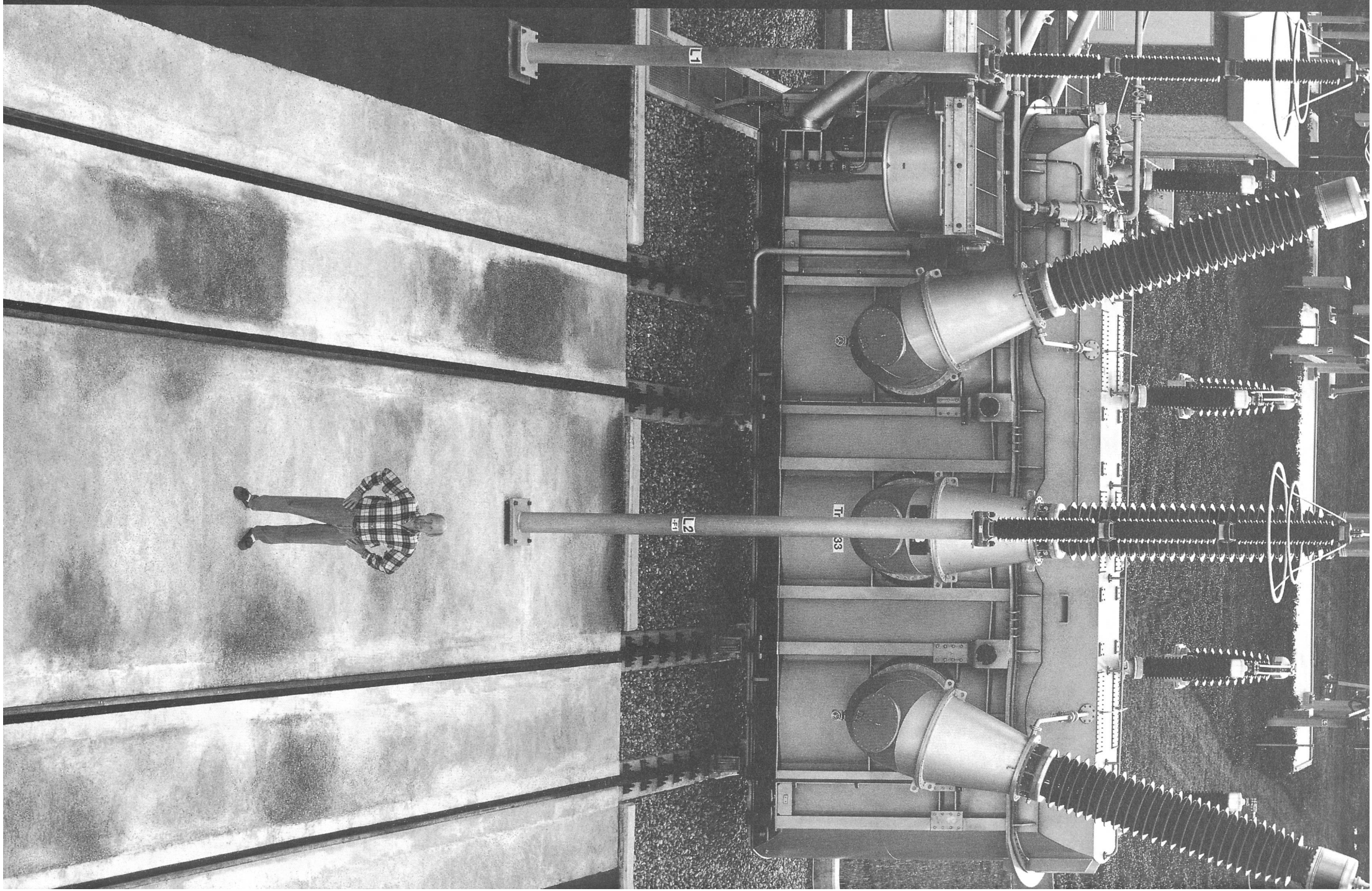


- Integriertes System zum Konstruieren von elektrischen Schaltplänen.
- Vollautomatisches Errechnen und Überprüfen der Querverweise.
- Automatische Kennzeichnung und Numerierung von Bauteilen, Klemmen und Leitungen durch vom Benutzer definierbare Betriebsmittelkennzeichnungen.
- Automatisches Erzeugen von Stücklisten, Rohstücklisten und Verbindungslisten.
- Halbautomatisches Erstellen des Schaltschrankaufbaus.
- Verwaltung der Klemmleisten und der externen Kabel, einschließlich automatisches Erstellen von Klemmenplänen.
- Kopplung an externe Datenbanken, wie z.B. Lagerbewirtschaftung.
- Verwendet AutoCAD als Graphik-Editor.

ENERGIE- UND VERFAHRENSTECHNIK
CH-4153 Reinach, Kägenstrasse 12
Tel. (061) 712–1509 Fax. (061) 712–1511

SISCAD AG
Chemin de la Chavanne 17
CH-1196 Gland, Schweiz
Tel. (+41–22) 364–5491 Fax. (+41–22) 364–5393

Die Support-Stellen aller ABB-Gesellschaften sind miteinander verbunden – über das ABB Support Switch Board. Sollten Sie den direkten Weg zu Ihrem Ansprechpartner nicht kennen: Wählen Sie die ABB Hotline 056 / 75 77 88. Rund um die Uhr.



«Wir sind ganz bei Ihrer Sache.

Für mich heisst das die volle Verantwortung für die mir anvertrauten Anlagen und Objekte übernehmen. Support muss schliesslich etwas mehr sein als nur Service. Dazu gehört für mich auch das stetige Bemühen um Umweltverträglichkeit, also zum Beispiel der umweltgerechte Umgang mit Ölen in Schaltern und Transformatoren. Das meine ich, mit 'volle Verantwortung übernehmen'. Das ist für mich Support!»

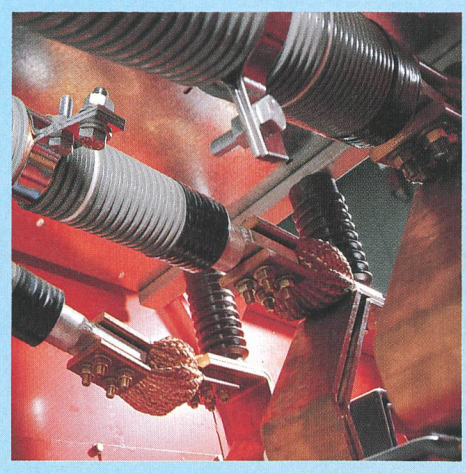
Gérard Pallandre ist Chefmonteur für Neumontagen, Inbetriebsetzungen und Service bei ABB Sécheron AG, Genf. Hinter ihm steht ein 200 MVA-3-Phasen-Transformator mit 300 Tonnen Gesamtgewicht. Dieser transformiert 380 kV Hochspannung auf 110 kV.

ABB Support. Wir sind ganz bei Ihrer Sache.

ABB

Technologiestandort Schweiz

DURESCA®-Stromschiene
Typ DE, während der Montage



sicher und zuverlässig

... müssen Energieverteilsysteme geplant, konstruiert und hergestellt werden, damit sie den immer höher werdenden Anforderungen genügen können. Die ständige Weiterentwicklung und Innovation ist für MGC Moser-Glaser & Co. AG, Bereich Energietechnik, eine Selbstverständlichkeit. Dies nicht nur für DURESCA®-Stromschienen, sondern auch für die Öl- und SILESCA®-Giessharztransformatoren, SILESCA®-Giessharz- und GASCOIL®-SF_6-Wandler, sowie auch für die neuen SF_6-isolierten GASLINK®-Stromschienen.

MGC
MOSER-GLASER

MGC Moser-Glaser & Co. AG
Energie- und Plasmatechnik
Hofackerstrasse 24
4132 Muttenz / Schweiz
Tel: +61 59 61 11
Fax: +61 61 38 15