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: 78 (1987)

Heft: 7

Artikel: Applications industrielles de l'automatique moderne : trois réalisations concrètes

Autor: Eggimann, M.-A. / Hulliger, P. / Longchamp, R.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-903846

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: 09.07.2025

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

Applications industrielles de l'automatique moderne: trois réalisations concrètes

M.-A. Eggimann, P. Hulliger, R. Longchamp, A. Meister

Les méthodes modernes de l'automatique jouent un rôle de plus en plus important dans les projets à caractère industriel. Cet article présente quelques réalisations concrètes exploitant de telles techniques et illustre les avantages que l'on en tire. La première application concerne le réglage adaptatif d'axes de machines-outils, la deuxième le réglage adaptatif d'un four de cimenterie et la troisième le réglage multivariable, par méthode d'état, en présence de contraintes.

Die Anwendung moderner Regelstrategien gewinnt im industriellen Einsatz vermehrt an Bedeutung. Dieser Artikel stellt einige dieser Methoden anhand konkreter Realisierungen vor und weist zudem auf die damit verbundenen Vorteile hin. Ein erstes Beispiel beschreibt die Anwendung adaptiver Achsenregelung für Werkzeugmaschinen, ein zweites den Einsatz ähnlicher Methoden zur Regelung eines Zementdrehrohrofens und ein drittes die Anwendung von Zustandsreglern für Systeme mit einschränkenden Nebenbedingungen.

Adresse des auteurs

Marc-André Eggimann, Pascal Hulliger, Prof. *Roland Longchamp, Andreas Meister,* Institut d'automatique, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 1015 Lausanne.

1. Introduction

Le régulateur de type PID (Proportionnel Intégral Dérivateur) joue depuis plusieurs décennies un rôle central en automatique; réalisé à l'origine de manière analogique, il est actuellement implanté sous forme numérique. De nombreux problèmes industriels exigent des performances dynamiques et une précision impossibles à satisfaire par ces fonctions classiques. Le recours à de puissants algorithmes modernes, idéalement adaptés au calcul numérique, permet alors de répondre aux spécifications les plus draconiennes. Cet article présente quelques réalisations exécutées à l'Institut d'automatique de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne dans le cadre de collaborations industrielles. Ces réalisations, qui exploitent les méthodes d'état et du réglage adaptatif, illustrent les avantages décisifs que l'on peut en tirer dans des domaines aussi variés que la commande numérique des machines-outils, l'automatisation de la fabrication du ciment ou encore dans des problèmes d'interception.

2. Commande adaptative d'axes de machines-outils

2.1 Introduction

Cette section décrit l'état d'avancement des travaux et des réalisations de l'Institut d'automatique de l'EPFL dans le domaine de la commande d'axes de machines-outils.

L'évolution des performances des machines-outils permet, entre autres, d'utiliser des vitesses d'usinage toujours plus rapides, alors que l'on demande par ailleurs des précisions toujours plus élevées. Ce phénomène donne de sérieux problèmes au concepteur de système de commande d'axes. En fait, les commandes numériques modernes du marché utilisent de simples régulateurs proportionnels P et exceptionnellement des régulateurs PD ou PID. Lors d'opérations de contournage, les problèmes bien connus liés à l'utilisation de tels régulateurs sont dûs aux erreurs de traînée qui produisent des défauts de forme sur les pièces usinées. Un autre problème important est l'ajustement des paramètres des régulateurs des différents axes qui doivent être synchronisés. Cette phase d'ajustement est souvent longue et difficile. Avec de tels algorithmes, aucune structure modulaire n'est obtenue car les paramètres de réglage sont fonction de tous les axes devant être synchronisés.

Il est tout d'abord montré, en simulation sur ordinateur, les défauts de forme obtenus lors d'une opération de contournage avec l'utilisation d'algorithmes de réglage conventionnels. Ensuite une description générale des algorithmes proposés est faite. On voit de quelle manière les erreurs de traînée et les perturbations agissant sur l'axe réglé sont compensées. Ceci permet d'obtenir une structure modulaire où chaque axe est optimisé pour lui-même. L'ajustement des paramètres de réglage se fait automatiquement par identification de l'axe considéré à un modèle mathématique qui est ensuite utilisé pour le calcul des paramètres optimaux de réglage. Les performances des méthodes proposées sont finalement démontrées sur un axe réel de machine-outil commandé par un moteur hydraulique.

2.2 Simulation d'une opération de contournage

Le but de cette simulation sur ordinateur est de démontrer quelle sorte de défauts de forme se produisent sur des pièces usinées en contournage avec l'utilisation de régulateurs PD et PID conventionnels. On considère une opération de contournage faisant intervenir deux axes croisés. La forme désirée est un cercle d'un diamètre de

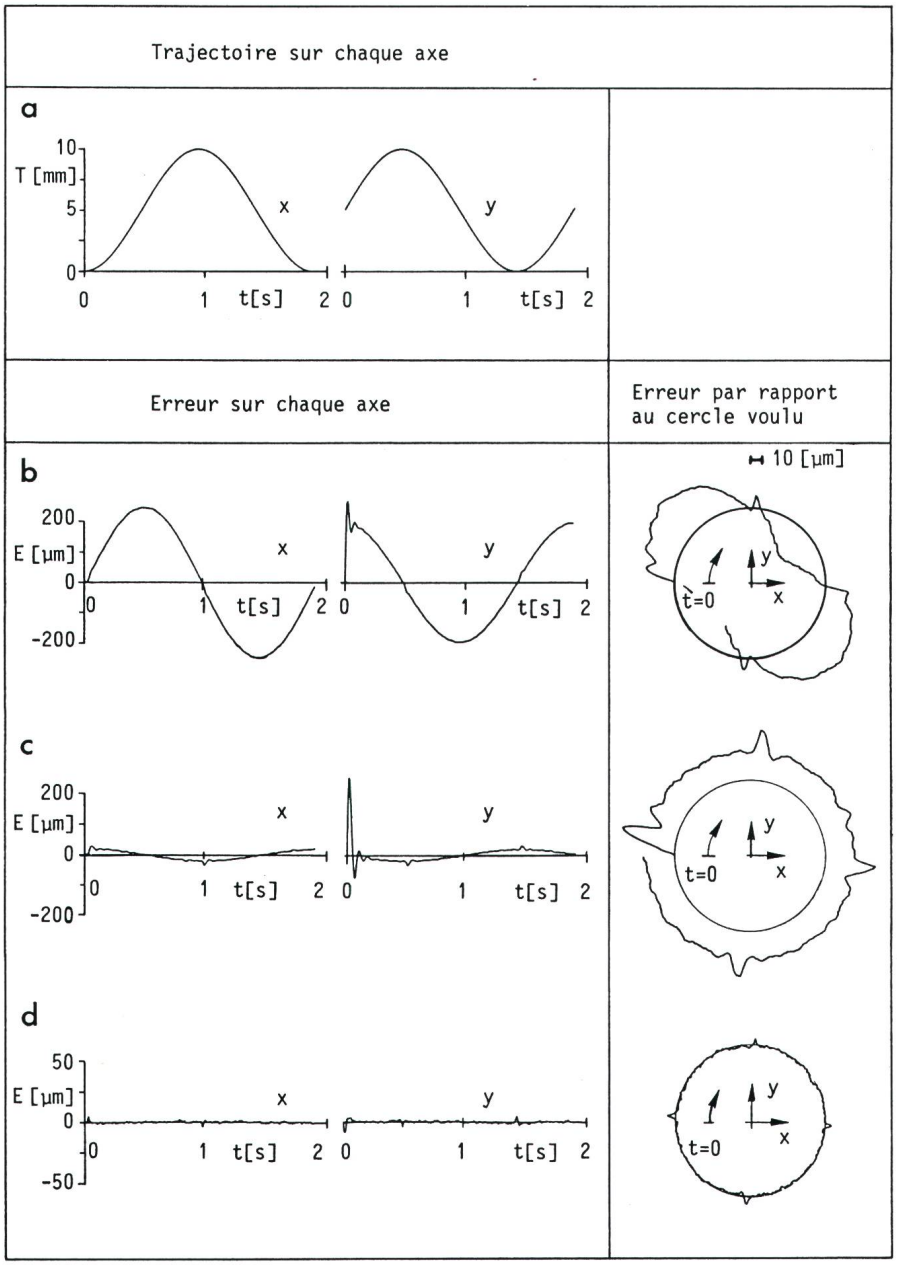


Figure 1 Simulation d'une opération de contournage sur deux axes

a Trajectoire
b Erreurs avec un régulateur PD conventionnel
c Erreurs avec un régulateur PID conventionnel
d Erreurs avec un nouvel algorithme avec commande a priori et estimateur de perturbations

10 mm et la vitesse d'avance tangentielle est de 1 m/min. Pour se rapprocher le plus possible d'un système réel, le modèle de simulation est du 5e ordre et tient compte des inerties, rigidité, self, frottements secs et visqueux agissant sur chaque élément, résolution du capteur de position et numérisation de la commande (nombre fini de bits). Les résultats de ces simulations sont reportés dans la figure 1. Le graphique 1a représente la trajectoire à suivre sur chaque axe pour obtenir un cercle (sinusoïdes). Pour chaque simulation apparaissent l'erreur par rapport à la trajectoire devant être suivie par chaque axe ainsi que l'erreur par rapport au cercle voulu. Le graphique 1b représente les erreurs obtenues avec un réglage de type PD conventionnel. Les erreurs de traînée maximum dépassent sur chaque axe 200 µm. La dynamique en boucle fermée n'est pas exactement la même sur les deux axes et on remarque la déformation résultante par rapport au cercle voulu (±40 µm). Le graphique 1c représente les erreurs obtenues avec un régulateur PID. On remarque que le terme intégrateur réduit les erreurs de traînée sur chaque axe, mais qu'aucune amélioration n'est apportée sur la déformation du cercle obtenu. Ceci est dû au fait que l'intégrateur introduit un certain déphasage dans la boucle de réglage. Le graphique 1d montre les résultats obtenus avec les nouveaux algorithmes dont la description générale est donnée ci-après.

2.3 Description de la nouvelle approche proposée

La résolution de tous les problèmes mentionnés passe par le concept de la compensation des erreurs de traînée, par l'adjonction d'une commande en boucle ouverte se basant sur la trajectoire de consigne de l'axe et sur la connaissance de la dynamique de cet axe. Certaines applications de ce concept existent déjà mais se fondent toujours sur des paramètres physiques du système à commander, ce qui explique la difficulté de mise en œuvre d'un tel concept. La nouvelle approche proposée est complètement différente dans le sens qu'aucun paramètre physique du système n'a besoin d'être connu. En effet, le principe de la méthode est d'acquérir un modèle mathématique de l'axe directement sous forme discrète par un *algorithme d'identification du système*. Ce modèle mathématique est ensuite utilisé pour calculer les paramètres du régulateur ainsi que les paramètres de la commande a priori destinée à compenser les erreurs de traînée. De plus, la connaissance de ce modèle permet d'introduire un estimateur de perturbations qui permet d'augmenter substantiellement la dynamique du système face aux perturbations qui agissent sur lui (frottements secs, forces d'usinage). Le schéma global de cette nouvelle approche est donné dans la figure 2.

Si la dynamique du système varie au cours du temps, il est possible d'implanter l'algorithme d'identification de manière à ce qu'il fonctionne en temps réel et qu'il permette d'ajuster les paramètres de commande en tout temps. Il faudra cependant veiller à ce que le système soit suffisamment excité pour pouvoir en retirer l'information nécessaire. Une tâche de supervision peut être introduite à un niveau supérieur pour décider l'enclenchement de l'algorithme d'identification si les conditions d'identifiabilité du système sont satisfaites. Dans un

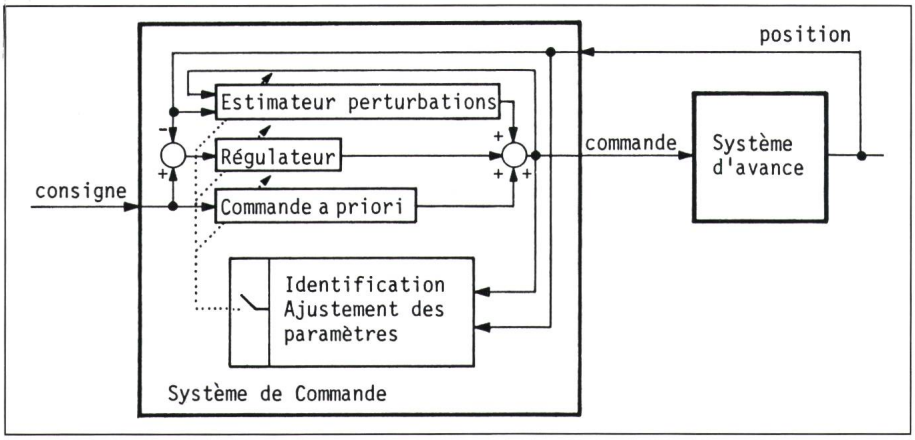


Figure 2 Schéma global du système de commande d'axe

grand nombre d'applications du domaine de la machine-outil, l'utilisation d'une procédure d'identification fonctionnant une fois pour toute ou de temps à autre suffit. Les paramètres de commande sont ajustés une fois cette procédure effectuée et restent constants. Cette démarche est industriellement opérationnelle et a déjà fait ses preuves. Les algorithmes de commande utilisés sont basés sur des méthodes polynomiales. Un aperçu de ces méthodes appliquées à la commande d'axe se trouve dans [2] et [3]. Des développements plus généraux sont donnés dans [1]. Ces méthodes sont très bien conditionnées pour des systèmes à une entrée et une sortie. Aucune estimation de variables d'état n'est requise, ce qui n'est pas le cas des méthodes de commande par variables d'état. La complexité de calcul est donc fortement réduite. Dans le cas du réglage d'axe de machine-outil, la seule connaissance de la position de l'axe suffit pour le commander. La dynamo tachymétrique peut donc être supprimée.

2.4 Résultats obtenus sur un axe de machine-outil

L'installation de test est décrite sur la figure 3. La particularité est que l'axe est entraîné par un moteur hydraulique. Il en résulte une dynamique meilleure puisque l'inertie d'un tel moteur est faible. Par contre, la mise en œuvre de la commande d'un moteur hydraulique devrait être en principe très délicate avec des algorithmes conventionnels vu les phénomènes physiques en jeu. La démarche et les méthodes proposées se sont révélées tout aussi efficaces dans ce cas que dans celui d'un entraînement électrique. Les paramètres des algorithmes utilisés lors des essais représentés sur la figure 4 ont été ajustés automatiquement à la suite d'une procédure d'identification durant environ 0,3 s. Le graphique 4a représente la trajectoire de consigne de l'axe qui est une suite de paraboles avec une vitesse d'avance maximum de 3 m/min. Le graphique 4b montre l'erreur par rapport à cette trajectoire avec l'utilisation d'un régulateur PD conventionnel. L'erreur de traînée maximum est de l'ordre de 550 µm. Le graphique 4c montre l'erreur avec un régulateur PD auquel on a ajouté le compensateur d'erreur de traînée et l'estimateur de perturbations. Les erreurs de traînée ont disparu; les pics sont dus à l'inversion du sens des frottements secs lors des changements de direction de l'axe. Le graphique 4d montre l'erreur avec un régulateur par placement des valeurs propres auquel on a ajouté le compensateur d'erreur de traînée et l'estimateur de perturbations. La dynamique a été améliorée, ce qui a permis de réduire l'amplitude de ces pics. Le suivi de trajectoire est assuré à environ ±5 µm.

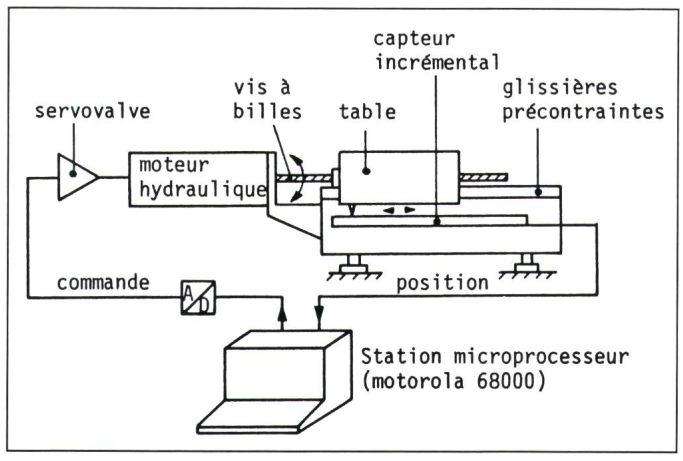


Figure 3 Schéma descriptif du banc d'essai

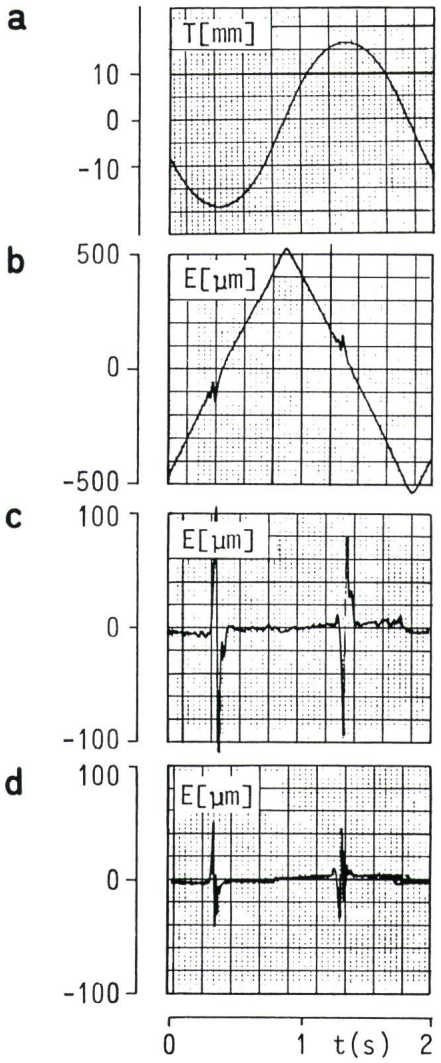


Figure 4 Résultats expérimentaux obtenus sur un axe de machine-outil

a Trajectoire
b Erreur avec un régulateur PD conventionnel
c Erreur avec un régulateur PD avec commande a priori et estimateur de perturbations
d Erreur avec un régulateur par placement des valeurs propres avec commande a priori et estimateur de perturbations

2.5 Conclusions

Le concept d'une commande adaptative d'axes de machines-outils a été présenté. Les avantages qui découlent de l'obtention d'un modèle mathématique par identification du système sont multiples. D'une part, la connaissance de ce modèle permet d'utiliser des lois de commande plus performantes et, d'autre part, d'ajuster rapidement et automatiquement les paramètres des algorithmes sans avoir besoin de la connaissance préalable des paramètres physiques du système. La mise en œuvre du système de commande est très fortement simplifiée. Le problème des erreurs de traînée est résolu par leur compensation, ce qui permet, outre la disparition des défauts de forme résultants, d'obtenir une structure algorithmique modulaire où chaque axe est optimisé indépendamment. Les méthodes polynomiales utilisées dans les algorithmes requièrent de faibles temps de calcul. Sur le microprocesseur MC 68000, un pas de calcul de l'algorithme de réglage s'effectue en 400 µs.

Ces nouveaux concepts présentés ont déjà été mis en œuvre dans l'industrie et ont satisfait toutes les spécifications. L'amélioration des performances des systèmes d'axe actuels sera rendue possible non seulement par une meilleure conception mécanique, mais obligatoirement aussi par l'implantation d'un système de commande performant tel que celui dont la description générale a été donnée ici.

3. Commande adaptative d'un four à ciment

3.1 Introduction

Cette section concerne la mise en œuvre d'une commande adaptative pour un four à ciment rotatif. On montre qu'un tel processus peut être réglé par les mêmes techniques de commande qu'un axe de machine-outil, malgré une vision toute différente des objectifs.

L'élaboration du ciment comprend les trois phases ci-après:
- le mélange et le broyage du cru,
- le processus de cuisson,
- le broyage du clinker.

Le four constitue le cœur de la cimenterie, car l'étape fondamentale de la production du ciment consiste à chauffer le cru à une température de l'ordre de 1400 °C, température indispensable pour engendrer les réactions chimiques nécessaires à l'obtention de clinker. Le système en question était auparavant commandé par deux opérateurs.

3.2 Description du four à ciment

Ces dernières années, les fours à ciment rotatifs (fig. 5) se sont imposés grâce à leur rendement énergétique favorable. L'installation de cuisson est constituée de trois parties:
- échangeurs de chaleur à cyclone,
- four rotatif,
- refroidisseurs planétaires.

Le cru homogénéisé passe pendant la phase de préchauffage à travers les quatre échangeurs de chaleur, à contre-courant des gaz de combustion. A la fin de cette phase, la matière atteint une température au-dessus de 800 °C et entre dans le four à ciment, partie essentielle à la cuisson du clinker. Il lui faut environ 30 minutes pour traverser le four grâce à la faible inclinaison et au mouvement rotatif de ce dernier. Dans la zone de cuisson, à la sortie du four, la matière atteint une température d'environ 1400 °C. Cette température élevée est indispensable pour rendre possible les réactions chimiques qui transforment la farine précalcinée en clinker. La matière est finalement refroidie avant d'être stockée dans des silos verticaux. La production quotidienne de 1900 tonnes de clinker nécessite une quantité de combustible importante (200 tonnes de charbon ou équivalent).

3.3 Modélisation et stratégie de commande

La description du comportement dynamique d'un four rotatif à ciment est particulièrement complexe en raison de la présence simultanée de phénomènes très variés [4] (réactions chimiques, échanges thermiques et massiques). Il est quasi impossible de déterminer un modèle mathématique suffisamment exact basé sur les lois physiques. En outre, le comportement du processus n'est pas stationnaire d'autant plus qu'il dispose encore de points de fonctionnement variables. Ces difficultés sont généralement dues au comportement fortement non linéaire du processus, ainsi qu'à la présence de perturbations stochastiques à moyennes non nulles et difficiles à modéliser. Les constatations ci-dessus ont motivé le choix d'une commande adaptative [5;6]. Dans le cas de la commande d'axes, on désire compenser les erreurs de traînée (problème de poursuite d'une trajectoire). Pour la régulation d'un four à ciment, on doit adapter les gains du régulateur au comportement variable du processus. Le même algorithme de commande peut être appliqué dans ces deux cas pour atteindre des performances de réglage aussi différentes.

La figure 5 montre la structure générale du système de commande hiérarchique, tel qu'il est implanté sur le site

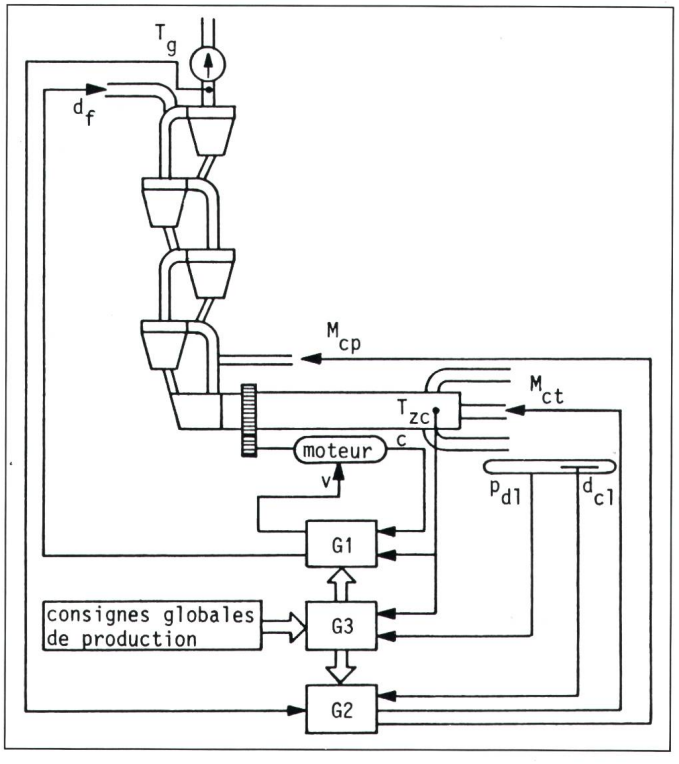


Figure 5
Schéma générale du four en boucle fermée

$G1$	Régulation à court terme
$G2$, $G3$	Régulation à long terme
v	Vitesse de rotation du four
d_f	Débit de farine
M_{ct}	Débit de charbon à la tuyère
M_{cp}	Débit de charbon de précalcination
T_{zc}	Température de la zone de cuisson
P_{dl}	Poids du litre
c	Couple du moteur électrique
d_{cl}	Débit de clinker
T_g	Température des gaz à la sortie

industriel. On trouve aussi dans ce schéma la liste des grandeurs de commande et de mesure qui permettent à l'ordinateur de commander le processus de manière autonome. Par manque de place, l'étude détaillée du procédé qui a abouti au choix de ces variables spécifiques n'est pas décrite ici. Mentionnons toutefois que cette sélection a été faite afin d'optimiser la marche de l'installation en boucle fermée selon les critères suivants:

- production d'un clinker de qualité déterminée,
- débit horaire de clinker prescrit,
- minimisation de la consommation spécifique d'énergie.

Ces objectifs visent la production optimale de clinker à long terme. En plus de cette tâche très délicate, un four à ciment est soumis à de nombreuses perturbations aléatoires (formations et chutes d'anneaux de collage, fluctuations du pouvoir calorifique des combustibles, variations des proportions chimiques dans la farine, etc.). Les conséquences de toutes ces perturbations influencent particulièrement la qualité d'exploitation. Elles se manifestent sur l'état du système à des constantes de temps d'ordres de grandeur très variés. Ce fait a motivé le développement d'un régulateur autoajustable à structure hiérarchique. Une telle structure rend simultanément possible les corrections rapides (niveau de réglage G1) pour stabiliser le processus face aux perturbations, ainsi que l'ajustage du point de fonctionnement à long terme (niveaux de régulation G2 et G3). On trouve des algorithmes de commande adaptative à chacun de ces trois niveaux de réglage, travaillant tous à des périodes d'échantillonnage différentes.

3.4 Améliorations de production par la commande adaptative

Les algorithmes de réglage ont été implantés à la Société des Chaux et Ciments de la Suisse romande (SCC) à Eclépens en automne 1985. La commande du four par ordinateur a d'emblée fourni d'excellents résultats. Actuellement, la commande adaptative a fait ses preuves sur ce site industriel. Des calculs statistiques de la SCC sur plusieurs mois ont démontré que le four a été commandé en boucle fermée pendant environ 98% du temps. La figure 6 illustre de manière représentative le fonctionnement de l'installation commandée par ordinateur sur 12 heures (enregistrements graphiques des variables les plus importantes).

La commande manuelle d'autrefois sert de base pour quantifier les améliorations apportées au comportement du four par le réglage adaptatif. La marche du four est devenue très régulière grâce à la commande en boucle fermée du procédé. Les influences des perturbations sont neutralisées rapidement par le réglage «feedforward» avant qu'elles ne se manifestent sur l'état du système. L'adaptation du régulateur aux conditions variables évite entre autres la surchauffe du four qui est non seulement un signe d'inefficacité, mais qui provoque aussi une usure supplémentaire de l'installation due à un clinker résultant trop dur.

Les performances attendues du système réglé ont été atteintes grâce à l'implantation d'algorithmes de commande adaptative. D'une part, ils assurent un comportement stable à court terme malgré les nombreuses perturbations aléatoires affectant le système et, d'autre part, le processus est géré de manière optimale à long terme (qualité et quantité de clinker prescrit pour un coût d'énergie minimum). L'application réelle du système de commande numérique réduit la consommation calorifique d'environ 2%. Cette réduction représente un gain remarquable pour une industrie où le coût de l'énergie constitue plus de la moitié de la totalité des frais de production.

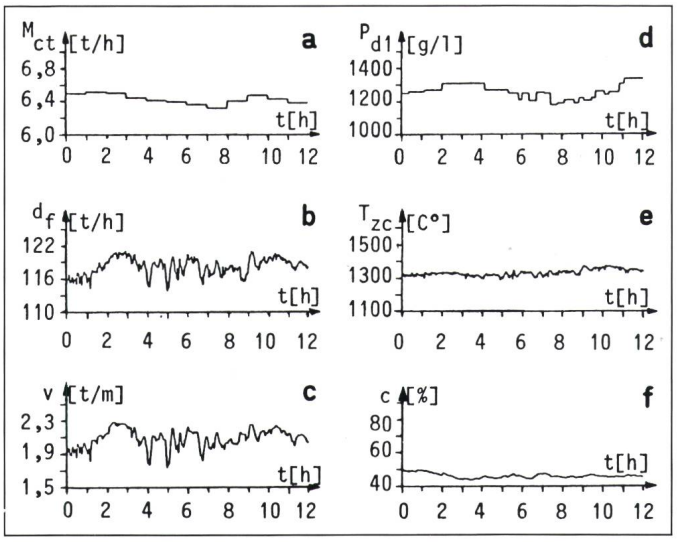


Figure 6
Comportement du four en boucle fermée
enregistré le 11 juillet 1986

a M_{ct} Débit de charbon à la tuyère
b d_f Débit de farine
c v Vitesse de rotation
d P_{dl} Poids du litre
e T_{zc} Température de la zone de cuisson
f c Couple du moteur

4. Réglage par méthode d'état en présence de contraintes de saturation

4.1 Introduction

Tout processus réglé réel est sujet à des contraintes de saturation et ceci tant au niveau de l'installation de réglage qu'au niveau du processus à régler. Ainsi, typiquement, les convertisseurs analogique/digital et digital/analogique, interface entre le calculateur et le processus, exploitent un signal électrique de ± 10 V ou de 2 à 20 mA. L'amplification et la transduction de ces signaux sont sujettes à des impératifs d'ordre économique et technique, limitant ainsi la grandeur de réglage. Pour exemple, mentionnons la pression de travail des actuateurs pneumatiques, la tension et le courant continus délivrés par un amplificateur de puissance à un moteur d'asservissement ou encore l'ouverture d'une vanne et le débit résultant. Finalement, le processus est intrinsèquement limité pour des raisons faisant intervenir la sécurité ou les dimensions de l'installation, par exemple la pression admissible d'une colonne de distillation chimique, la température et le débit d'un fluide traversant un échangeur de chaleur ou la course admissible d'un axe de machine-outil.

Dans la plupart des applications, les contraintes de saturation ne pénalisent pas de manière dramatique le comportement des processus réglés. Ceci explique pourquoi la synthèse de régulateurs ignore généralement les saturations de la commande, et plus radicalement celles du processus, se contentant par conséquence de «tronquer» la commande générée à sa valeur de saturation. Certes, il existe des méthodes limitant de manière sélective les signaux délivrés par un régulateur linéaire [7;

8], mais celles-ci ne tiennent pas compte des saturations intrinsèques du processus. De plus, ces méthodes n'agissent souvent qu'au moment où la commande dépasse théoriquement les limites admises.

Ces critiques nous ont poussé à étudier une synthèse de régulateurs basée sur la Programmation Linéaire (PL).

Outil de la recherche opérationnelle, la PL est une méthode mathématique essentiellement utilisée dans l'optimisation économique [9]. L'intérêt de cette méthode réside dans le fait qu'elle optimise un critère choisi par l'utilisateur et tient compte de manière explicite des bornes des variables considérées, soit les saturations du système. Ce dernier doit toutefois exhiber une structure linéaire. Ce n'est qu'à partir des années 60 que certains auteurs proposèrent l'exploitation de la PL pour le réglage de systèmes dynamiques [10].

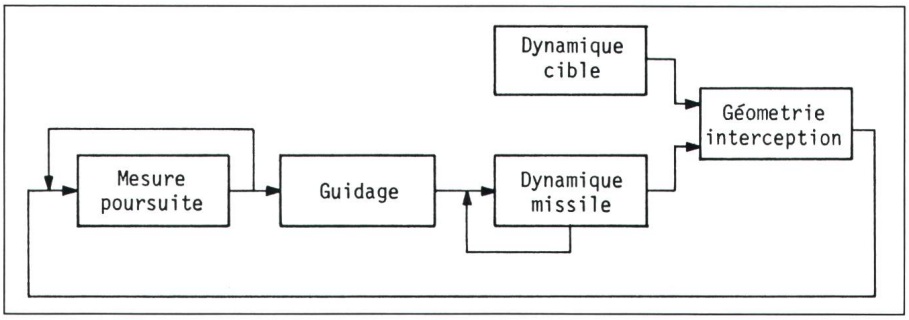


Figure 7 Schéma fonctionnel de l'interception air-air

4.2 Programmation linéaire et synthèse de régulateur

On remarque que le terme «programmation» ne signifie pas «élaboration d'un code pour ordinateur» mais recherche de valeurs, étant donné que dans le domaine de la recherche opérationnelle, tout ensemble de variables satisfaisant aux contraintes d'un problème est appelé «programme».

On admet l'hypothèse du caractère linéaire des systèmes étudiés et on verra plus loin que la linéarité exigée ne restreint pas les classes de processus étudiées.

Quel que soit le problème considéré, sa formulation se traduira par un critère à optimiser qui reflète au mieux nos intérêts. Parallèlement, le contexte physique nous imposera ses conditions sous la forme de contraintes linéaires d'égalité (dynamique du processus, liaisons, couplages) et de contraintes linéaires d'inégalité (commandes et variables physiques bornées). La formulation d'un problème de PL correspond à la recherche du minimum d'un critère linéaire sous conditions linéaires. L'algorithme dit du Simplexe permet de résoudre les problèmes ainsi formulés. A l'aide de quelques transformations, la formulation peut être étendue à des contraintes linéaires d'inégalité explicites et à un critère faisant intervenir les valeurs absolues des variables du problème. L'utilisation des valeurs absolues est nécessaire, car l'association de deux variables de signes opposés peut autrement annuler le critère.

Tout processus réglé peut être défini par ses équations dynamiques d'état et ses équations de mesure. Si les variables de commande, d'état ou de mesure sont sujettes à des saturations, des contraintes supplémentaires sont appliquées. Les équations non linéaires, représentatives du système sont approximées linéairement autour d'une trajectoire de fonctionnement. Ces équations sont de plus mises sous la forme discrète et déterministe.

A chaque période d'échantillonnage, le régulateur détermine la commande telle que le processus minimise un critère faisant intervenir les variables du système ou leurs mesures. Ce critère est significatif des objectifs de la régulation. La commande à appliquer au système correspond dès lors aux premières composantes du programme optimal déterminé par l'algorithme du simplexe.

Le régulateur proposé nécessite la détermination du critère à minimiser, ainsi que le choix de l'intervalle temporel séparant chaque état discret. Cet intervalle est aussi appelé horizon d'optimisation ou de prédiction et dépendra de la dynamique du système.

4.3 Application à un processus non linéaire non stationnaire

Afin d'illustrer la puissance potentielle du régulateur développé ci-dessus, on applique celui-ci au guidage d'un missile air-air.

Le processus d'interception air-air constitue la synthèse de deux processus à intérêts divergents que sont l'évasion de la cible et la poursuite du missile (fig. 7 et 8). L'étude par simulation est caractérisée par des hypothèses simplificatrices non limitatives tels l'espace d'évolution constitué par un plan horizontal (X, Y) ou le déterminisme des mesures. Les dynamiques de vol et de commande, ainsi que l'interception, sont définies par huit équations différentielles non linéaires à coefficients variables. Les non-linéarités proviennent des termes de couplage issus de l'utilisation d'un référentiel non inertiel ainsi que des projections géométriques des grandeurs caractérisant l'interception (angle de visée σ et distance R cible-missile). La variation des coefficients correspond aux variations de masse, d'inertie et de position du centre de gravité lors de la propulsion du missile par combustion. On précise que les forces aérodynamiques agissant sur le missile sont non linéaires et présentent une forte discontinuité aux alentours de Mach 1. La cible quant à elle s'évade par des manœuvres circulaires, limitées en accélération. Les caractères non linéaires et non stationnaires définis ci-dessus sont de plus pénalisés par des saturations au niveau de la commande électrique U, de la commande aérodynamique ΔZ (angle d'aileron de gouverne limité à $\pm 26°$) et de la mesure (débattement du radar de poursuite limité par un cône de 90° d'ouverture). La saturation de la mesure est importante car une fois le radar amené en butée, la cible est «perdue de vue».

Le modèle du missile proposé est relativement complexe et constitue la base de notre simulation.

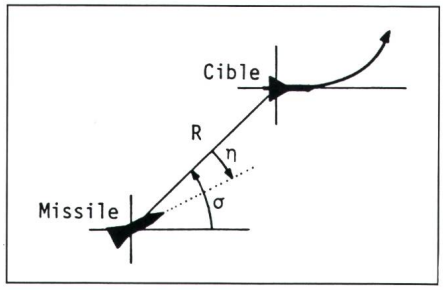


Figure 8 Géométrie de l'interception air-air

R Distance cible-missile
σ Angle de visée
η Prévisée initiale

Le processus défini ci-dessus, de par sa complexité, ne peut être exploité tel quel par le régulateur PL présenté au paragraphe 4.2. Pour cela, on développe un modèle simplifié à l'extrême, linéaire, à coefficients constants et dont la dimension est réduite à 3. Une équation de mesure permet d'évaluer l'angle du radar, variable sujette à saturation. Le régulateur n'aura donc à disposition qu'une vision déformée et réduite du processus qu'il commande, celle-ci étant actualisée périodiquement. L'horizon d'optimisation est déterminé en fonction de la durée potentielle de l'interception, appelé «time to go». Cet horizon est actualisé périodiquement. On fixe cependant une valeur maximale limite à l'horizon d'optimisation. Ainsi, dans la première phase du vol, l'horizon est dit fuyant alors qu'il est adapté dans la phase finale. Les variables intervenant dans la fonction coût et traduisant au mieux les intérêts du missile, sont la variation de l'angle de visée σ et la distance cible-missile R (fig. 8). La période d'échantillonnage du régulateur est fixée à 5 ms.

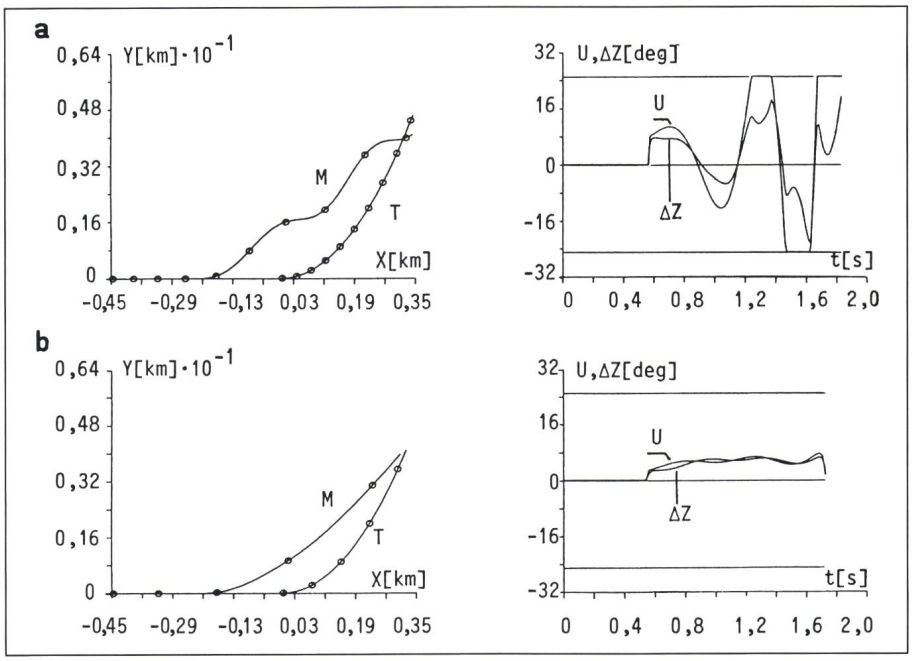


Figure 9 Tir rapproché

a Guidage NP (classique) b Guidage PL (évolué)

X, Y Coordonnées cartésiennes du plan d'évolution U Commande électrique

ΔZ Commande aérodynamique

4.4 Comparaison avec un réglage classique

On compare le régulateur PL à un guidage classique par Navigation Proportionnelle (NP). La NP élabore une commande proportionnelle à la variation de l'angle de visée σ, assurant une certaine prédiction au niveau du pointage du missile.

L'étude de tirs réels montre que l'interception de cibles manœuvrantes est impossible dans certaines configurations. Ces observations sont corroborées par les simulations sur ordinateur. Les possibilités d'interception sont limitées soit par les performances aérodynamiques du missile, soit par la loi de guidage utilisée.

Analysant les positions initiales du missile par rapport à la cible, on détermine un domaine géographique à partir duquel l'interception est réussie. Ce domaine est appelé *enveloppe de tir.* Ainsi, pour une manœuvre évasive et un type de visée initiale donnés, on peut déterminer les frontières à partir desquelles l'interception est un échec. La frontière la plus proche de la position initiale de la cible est liée à la faculté du missile à manœuvrer serré. Dans ce type de configuration, la commande est à son maximum du début jusqu'à la fin du vol et un régulateur évolué ne peut pas améliorer le comportement aérodynamique du missile.

On remarque par ailleurs qu'à l'intérieur de l'enveloppe de tir, à proximité de la frontière intérieure, apparaissent des «taches» dans lesquelles l'interception est impossible. Ces zones mettent en évidence les déficiences du guidage standard. La figure 9 illustre ce genre de problème par les trajectoires de la cible T et du missile M, ainsi que la commande U électrique et la commande aérodynamique consécutive ΔZ. La figure 9a se rapporte au guidage classique NP alors que la figure 9b se rapporte au guidage évolué PL. On voit ainsi que la commande issue de la NP oscille et impose une trajectoire qui rend l'interception impossible. Le régulateur LP quant à lui génère une commande plus régulière et permet l'interception. Manifestement, le gain du régulateur NP est trop élevé pour cette configuration et devrait être adapté à celle-ci. Le régulateur PL rend possible une action adaptée à chaque configuration et permet ainsi de supprimer les «taches» d'impossibilité dans l'enveloppe de tir.

L'interception d'une cible est facilitée par une prévisée initiale η positive, c'est-à-dire une configuration recherchant initialement un cap de collision (fig. 8). Malheureusement, si la cible dispose de moyens de brouillage efficaces, il n'est pas possible de lancer le missile sans viser directement la cible, donc admettre une prévisée nulle. Dans certains cas, de légères erreurs de visée provoquent des lancements avec de faibles prévisées négatives. La figure 10 illustre de la même manière que la précédente ce type de configuration, la prévisée valant -3 degrés. Le guidage traditionnel est mis en échec alors que le régulateur PL permet l'interception. On voit que dans la phase initiale du vol, la variation de l'angle de visée σ est faible, alors que dans la phase finale, elle augmente de telle manière qu'elle amène la commande NP à sa saturation. Le missile atteint ainsi sa limite aérodynamique de réaction et n'intercepte pas sa cible. Le régulateur PL opère par contre une prévision, agit plus fortement dans la phase initiale et évite de cette manière la saturation finale. Si on fait varier la prévisée négative η, on s'aperçoit que la commande NP est saturée plus ou moins longtemps à la fin de l'interception, alors que le régulateur PL s'adapte à chaque prévisée afin d'éviter les limitations aérodynamiques.

Dans les configurations ne posant aucun problème, les comportements des deux régulateurs sont sensiblement identiques.

4.5 Conclusions

Les simulations effectuées démontrent l'intérêt du régulateur PL. Celui-ci adapte son comportement aux caractéristiques évolutives du processus, modifiant sa politique d'action ou effectuant une prédiction du système réglé. L'application avec succès de ce régulateur à un processus complexe, non linéaire et non stationnaire nous laisse entrevoir son potentiel d'action. L'utilisation conjointe d'observateur est facilitée par le fait que le régulateur PL se contente d'une modélisation schématique et réduite du système à régler. Ce régulateur peut être mis en œuvre sur un mini-ordinateur ou microprocesseur conventionnel. Des périodes d'échantillonnages réduites (quelques millisecondes) ne peuvent s'obtenir qu'à l'aide de processeurs spéciaux et semblent réservées aux applications militaires et aérospatiales.

Les processus non linéaires et non stationnaires sanctionnés par des saturations pénalisant la dynamique, constituent le champ d'application idéal du régulateur PL. On peut mentionner les procédés chimiques, thermiques ou la gestion de ressources hydrauliques.

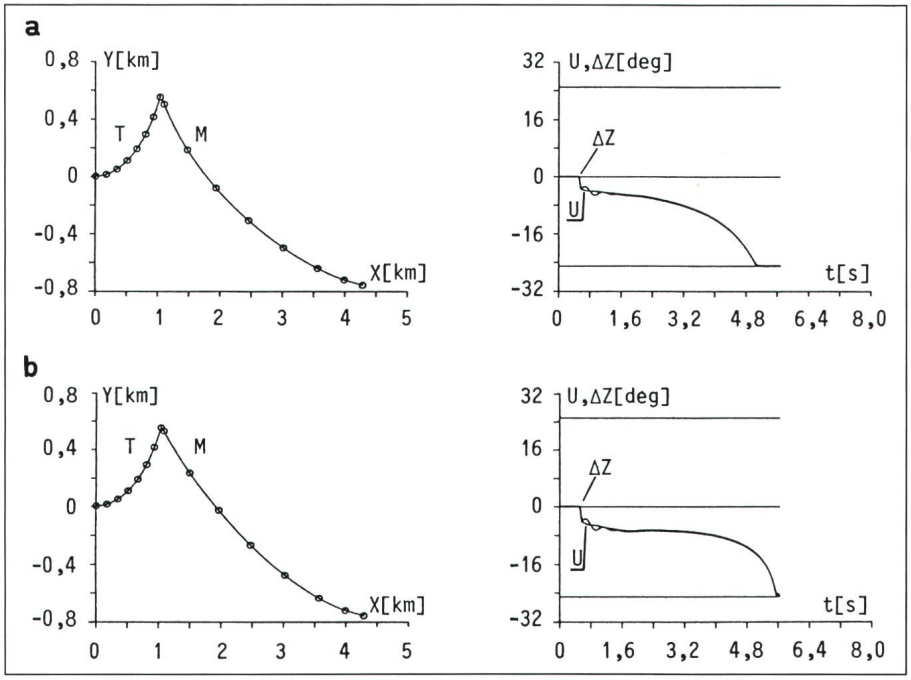


Figure 10 Tir avec prévisée négative

a Guidage NP (légende voir fig. 9) b Tir avec prévisée négative, guidage PL

Bibliographie

[1] *K.J. Aström* and *B. Wittenmark:* Computer controlled systems; theory and design. Englewood-Cliffs/N.J., Prentice-Hall, 1984.

[2] *P. Hulliger:* Algorithmes de commande adaptative pour machines. Bull. ASE/UCS 76(1985)15, p. 920...923.

[3] *P. Hulliger* and *C. Kohler:* Adaptive tracking algorithms and their application to a machine-tool, Proceedings of the IFAC-Symposium on Microcomputer Application in Process Control, Istanbul, 1986.

[4] *J.D. Marcuard* and *A. Meister:* Application of modern numeral control to an industrial rotary cement kiln. Proceedings of the IFAC-Symposium on Microcomputer Application in Process Control, Istanbul, 1986.

[5] *K.J. Aström* and *B. Wittenmark:* Self-tuning controllers based on pole-zero placment. IEE Proceedings, Part D: Control Theory and Applications 127(1980)3, p. 120...130.

[6] *T.R. Fortescue, L.S. Kershenbaum* and *B.E. Ydstie:* Implementation of self-tuning regulators with variable forgetting factors. Automatica 17(1981)6, p. 831...835.

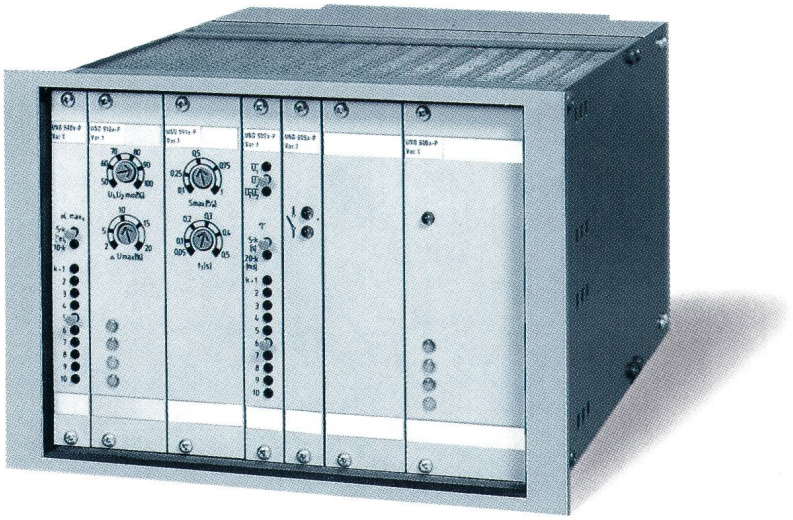
[7] *A.H. Glattfelder* and *W. Schaufelberger:* Start-up performance of different proportional-integral-anti-wind-up regulators. Internat. J. Control 44(1986)2, p. 493...505.

[8] *A.H. Glattfelder, W. Schaufelberger* und *J. Tödtli:* Diskrete Proportional-Integral-Differential Regler mit Anti-Windup-Massnahmen. SGA-Zeitschrift 3(1983)1, S. 12...22.

[9] *M. Simmonard:* Programmation linéaire. Technique du calcul économique. Paris, Dunod, 1972.

[10] *D. Tabak* and *B.C. Kuo:* Optimal control by mathematical programming. Englewood-Cliffs/N. J., Prentice-Hall, 1971.

Brown Boveri.
Perfektion in Synchronisation für Generatoren und Netze.



Einfach in der Bedienung und sehr wirtschaftlich, erfüllt unser modular aufgebautes System SYNCHROTACT® 3 ein breites Anforderungsspektrum. Auch für Nachrüstungen (Retrofit) bestens geeignet.

Einige Merkmale:

- ★ **Inhärente Genauigkeit durch spezielle Messprinzipien**
- ★ **Langzeitstabilität**
- ★ **Unkomplizierte Schaltkreise**
- ★ **Weitgehende Selbstüberwachung**
- ★ **> 4000 Einheiten im Betrieb bewährt**

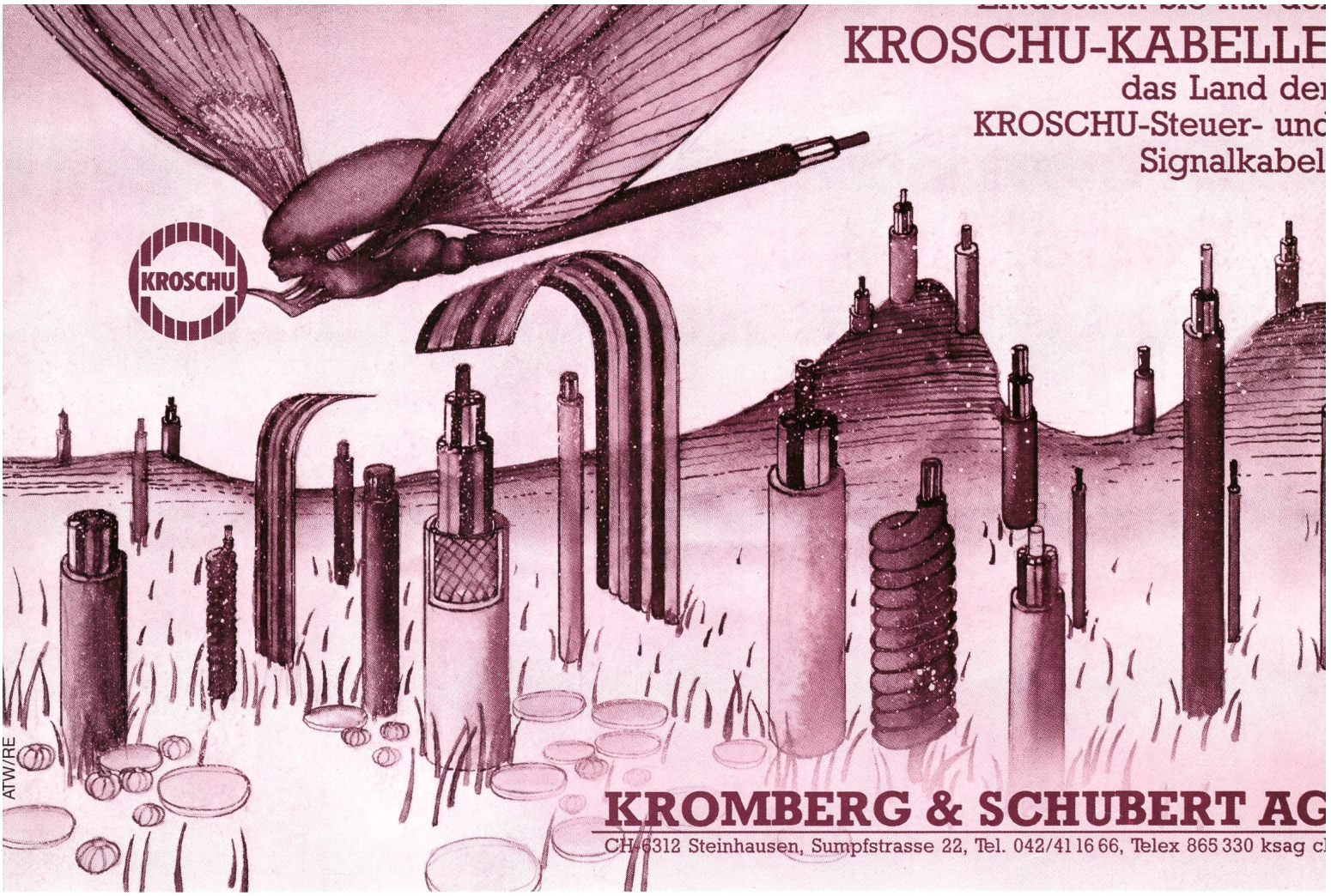
Wir beraten Sie gern, bitte rufen Sie doch an.

BBC Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie.
Verfahrenstechnik
CH-5401 Baden/Schweiz

Verkauf Synchronisiergeräte
Telefon 056/29 98 63

BBC
BROWN BOVERI

CH-VE 5009 87 D



**Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)
ein entscheidendes Qualitätskriterium
für elektronische Apparate und Anlagen**

Unser Entstörungslabor

- prüft die Störempfindlichkeit und das Störvermögen,
- bestimmt Störschutz- und Schirmmassnahmen,
- kontrolliert Apparate und Anlagen auf Einhaltung der gesetzlichen Störschutzbestimmungen,
- führt Prototyp- und serienmässige Entstörungen aus,
- steht Fabrikations- und Importfirmen für fachmännische Beratung in EMV-Problemen zur Verfügung.

PRO RADIO-TELEVISION, Entstörungslabor, 3084 Wabern, Telefon 031 / 54 22 44