

**Zeitschrift:** Bulletin technique de la Suisse romande  
**Band:** 83 (1957)  
**Heft:** 18

**Artikel:** Principes et exemples d'application des dispositifs de stabilisation  
**Autor:** Cuénod, M.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-62794>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 15.10.2024

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

Après un certain temps s'établit la valeur suivante :

$$i(t) = \frac{KU}{L_0 L} \frac{1}{ab} = \frac{KU}{R_0(R + \rho K)}. \quad (21)$$

Nous constatons avec satisfaction que notre théorie conduit ainsi exactement au même résultat que celui auquel les ingénieurs sont habitués depuis l'époque de Heaviside. La différence réside dans les nouveaux fondements de ce calcul qui satisfait la rigueur mathématique (de même que les transformations de Laplace) et qui répond à une signification physique plus évidente des phénomènes.

### Annexe

Opérations avec les suites de temps à l'aide d'une « fonction génératrice »

Il est commode d'attribuer à une suite de temps  $f(t) = (f_0, f_1, f_2, \dots, f_n, \dots)$  de façon purement formelle un polynôme en  $x$  constitué par la série des puissances en  $x$

$$f_0 + f_1 x + f_2 x^2 + \dots + f_n x^n + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} f_n x^n.$$

Nous appelons cette série la « fonction génératrice » de la suite.

Si  $\varphi(t) = (\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n, \dots)$  est une deuxième suite

$$\text{et } \varphi_0 + \varphi_1 x + \varphi_2 x^2 + \dots + \varphi_n x^n = \sum_{n=0}^{\infty} \varphi_n x^n$$

la fonction génératrice correspondante, le produit de ces deux fonctions génératrices conduit à une nouvelle série

$$(f_0 \varphi_0) + (f_0 \varphi_1 + f_1 \varphi_0) x + (f_0 \varphi_2 + f_1 \varphi_1 + f_2 \varphi_0) x^2 + \dots$$

Ainsi que l'indique la formule (1), nous voyons que le coefficient de  $x^n$  correspond au *nième* terme du produit composé de deux suites (à l'exception du facteur  $h$ ). Autrement dit :

La fonction génératrice du produit composé de deux suites est égale au produit des fonctions génératrices des deux fonctions correspondantes (multipliées en outre par  $h$ ).

Pour effectuer le quotient composé des deux suites correspondant aux fonctions  $f(t)$  et  $\varphi(t)$ , il suffit de diviser les fonctions génératrices correspondantes en utilisant les règles classiques du calcul à l'aide de séries de puissances.

$$\text{Exemple : } f(t) = (1, 7, 21, 35, \dots)$$

$$\varphi(t) = (1, 4, 6, 4, \dots)$$

$$(1 + 7x + 21x^2 + 35x^3 + \dots) : (1 + 4x + 6x^2 + 4x^3 + \dots) = 1 + 3x + 3x^2 + x^3 + \dots$$

$$\frac{1 + 4x + 6x^2 + 4x^3}{3x + 15x^2 + 31x^3} = \frac{3x + 12x^2 + 13x^3}{3x + 12x^2 + 13x^3} = \frac{3x^2 + 13x^3}{3x^2 + 12x^3} = \frac{1}{x^3}$$

$$\text{Il en résulte } \frac{f}{\varphi} = \left( \frac{1}{h}, \frac{3}{h}, \frac{3}{h}, \frac{1}{h}, \dots \right)$$

A titre d'exercice, on peut contrôler que pour toute fonction  $f(t)$ , le quotient  $\frac{f}{\varphi}$  correspond à la suite de Dirac

$$\left( \frac{1}{h}, 0, 0, 0, \dots \right)$$

Il est également facile de prouver que

$$\left( \frac{1}{h}, 0, 0, 0, \dots \right) : (1, 1, 1, \dots, 1) = \left( \frac{1}{h^2}, -\frac{1}{h^2}, 0, 0, \dots \right).$$

(Voir fig. 5.)

## PRINCIPES ET EXEMPLES D'APPLICATION DES DISPOSITIFS DE STABILISATION

par M. CUÉNOD, ing. dipl. E.P.F., Dr. ès sc. techn.

Ingénieur à la Société Générale pour l'Industrie, Genève<sup>1</sup>

### Sommaire

Introduction. — I. Cause de l'instabilité d'un réglage automatique. — II. Principes des dispositifs d'anticipation : 1. Mesure de la dérivée de la grandeur à régler ; 2. Asservissement passager. — III. Principe de réalisation d'un régulateur différentiel : 1. Régulateur différentiel purement électrique ; 2. Régulateur différentiel avec translation ; 3. Régulateur différentiel avec asservissement électrique ; 4. Régulateur différentiel avec rotation. — IV. Exemples d'utilisation du régulateur différentiel : 1. Réglage de la chaudière d'un groupe thermique ; 2. Asservissement passager de la tension d'un générateur aux variations de sa puissance ; 3. Accélération du réglage de la tension ; 4. Amélioration du réglage puissance-fréquence. — Conclusion. — Annexe : Equations du réglage de vitesse d'un groupe hydro-électrique en marche isolée.

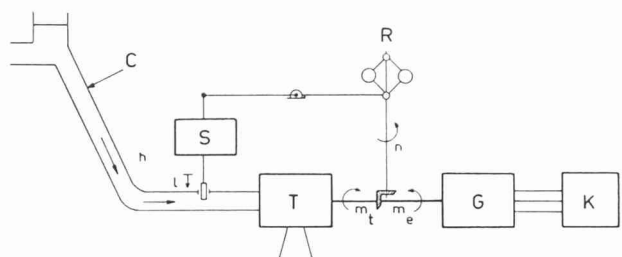
<sup>1</sup> Exposé présenté au cours de perfectionnement organisé par l'Association suisse pour l'automatique (A.S.P.A.) les 7 et 8 décembre 1956, à Zurich sur le thème : « Méthodes modernes pour l'analyse de phénomènes dynamiques dans la mécanique, l'électro-technique et l'automatique ».

### Introduction

La première qualité que l'on exige d'un réglage automatique, c'est qu'il soit stable. Nous nous proposons d'examiner quelles sont les causes qui peuvent rendre un réglage instable, puis les remèdes que l'on peut apporter à cette instabilité.

Pour fixer les idées, nous prenons comme exemple le cas du réglage de vitesse d'un groupe hydro-électrique en service isolé tel que le représente en principe la figure 1.

La turbine  $T$ , alimentée par la conduite forcée  $C$  entraîne le générateur  $G$  qui débite son énergie sur la charge  $K$ , constituée par l'ensemble des consommateurs du réseau. Le régulateur  $R$  accouplé à l'axe du groupe mesure la vitesse angulaire  $n$  de cet axe et commande, par l'intermédiaire du servo-moteur  $S$ , l'ouverture  $l$  de la turbine. Par suite de l'inertie de l'eau dans la conduite



*T* = Turbine.  
*G* = Générateur.  
*R* = Régulateur de vitesse.  
*K* = Charge alimentée par le générateur.  
*S* = Servo-moteur.  
*C* = Conduite forcée.

*l* = Ouverture de la turbine.  
*m<sub>t</sub>* = Couple moteur.  
*m<sub>e</sub>* = Couple résistant.  
*n* = Vitesse angulaire.  
*h* = Variation de la pression en amont de la turbine.

Fig. 1. — Principe du réglage de vitesse d'un groupe hydro-électrique.

forcée, toute variation de cette ouverture provoque une variation de la pression *h* en amont de la turbine. Le couple moteur *m<sub>t</sub>* de la turbine dépend d'une part de cette pression, d'autre part du débit de l'eau déversée par la conduite, débit proportionnel à l'ouverture *l* de la turbine. La vitesse du groupe est fonction d'une part du couple moteur *m<sub>t</sub>* et d'autre part du couple résistant électrique *m<sub>e</sub>* proportionnel à la puissance *k* débitée par l'alternateur. Le but du réglage est de maintenir constante la grandeur à régler *n* indépendamment des « perturbations » résultant des variations *k* de la puissance fournie par le générateur.

La figure 2 représente le schéma fonctionnel de ce système de réglage qui comprend quatre éléments dont les grandeurs d'entrée et de sortie sont récapitulées dans le tableau ci-dessous.

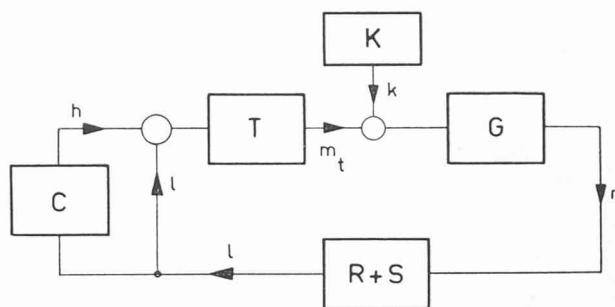
Élément	Grandeur d'entrée	Grandeur de sortie
Turbine <i>T</i>	Ouverture de la turbine <i>l</i> Pression <i>h</i>	Couple moteur <i>m<sub>t</sub></i>
Générateur <i>G</i>	Couple moteur <i>m<sub>t</sub></i>	Vitesse angulaire <i>n</i>
Dispositif de réglage ( <i>R + S</i> )	Vitesse angulaire <i>n</i>	Ouverture de la turbine <i>l</i>
Conduite forcée	Ouverture de la turbine <i>l</i>	Pression <i>h</i>

Nous examinerons les relations dynamiques qui relient ces différentes grandeurs. En nous basant sur cet exemple nous verrons tout d'abord les causes de l'instabilité d'un réglage automatique, puis nous verrons les moyens que l'on peut utiliser pour remédier au risque d'instabilité, moyens que l'on peut classer en trois grandes catégories :

- mesure de la dérivée de la grandeur à régler ;
- statisme passager ;
- chaînes d'anticipation.

Nous nous étendrons un peu sur les perspectives ouvertes par ce dernier moyen et donnerons quelques exemples de réalisation d'un régulateur différentiel dont ce moyen nécessite l'emploi.

En conclusion nous tâcherons de dégager en quelque sorte la « philosophie » de l'utilisation du principe de l'anticipation comme moyen de stabilisation des réglages automatiques.



*k* = Variation de la charge alimentée par le générateur.  
 Pour les autres symboles, même légende que pour la figure 1.

Fig. 2. — Schéma fonctionnel du dispositif de réglage d'un groupe hydro-électrique.

### I. Cause de l'instabilité d'un réglage automatique

Si chacune des grandeurs d'un circuit de réglage réagissait instantanément l'une sur l'autre, il n'y aurait pas de risques qu'un réglage automatique soit instable. Malheureusement tel n'est pas le cas ; tout organe mécanique est affecté d'une certaine masse et d'un certain frottement. Il faut un certain temps pour la mettre en train et pour l'arrêter.

Les propriétés d'un organe de réglage se laissent décrire de la façon la plus commode par deux sortes de « réponses » :

- la *réponse indicielle* est la variation de la grandeur de sortie résultant de la variation de la grandeur d'entrée selon une fonction ayant la forme d'un échelon rectangulaire ;
- la *réponse harmonique* caractérise la variation de la grandeur de sortie résultant d'une variation de la grandeur d'entrée selon une courbe sinusoïdale ; cette grandeur de sortie oscille également à la même fréquence, si on mesure l'amplitude de déphasage de cette oscillation et si on reporte vectoriellement le résultat de cette mesure pour différentes fréquences d'oscillation, on construit point par point la « réponse harmonique » de l'organe de réglage pris en considération.

A titre d'illustration, considérons le cas d'un dispositif de réglage à action proportionnelle désigné par « dispositif *P* ». Nous supposons tout d'abord un dispositif idéal, c'est-à-dire sans masse et sans frottement dont le modèle est donné par la figure 3 a. Ce modèle est constitué par un ressort *F* dont une extrémité est fixe et l'autre reliée au point *A* mobile. La grandeur d'entrée de ce dispositif est la force « *e* » agissant sur le point *A*. Sa grandeur de sortie est la course « *s* » du point *A*.

La relation entre la grandeur d'entrée et la grandeur de sortie se réduit à une simple proportionnalité

$$fs = e$$

avec *f* = constante du ressort.

La figure 3 b représente la réponse indicielle

$$\Phi_{es}(t) = \frac{s}{e} = \frac{1}{f}$$

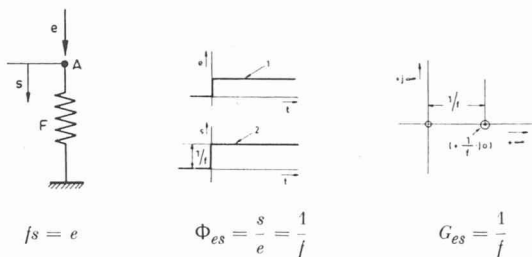


Fig. 3. — Caractéristique d'un dispositif de réglage à action proportionnelle idéale.

$fs = e$        $\Phi_{es} = \frac{s}{e} = \frac{1}{f}$        $G_{es} = \frac{1}{f}$   
 Courbe 1 = Variation de la grandeur d'entrée  $e$ .  
 Courbe 2 = Variation de la grandeur de sortie  $s$ .  
 Modèle      Réponse indicielle  $\Phi_{es}$       Réponse harmonique  $G_{es}$   
 fig. 3 a      fig. 3 b      fig. 3 c  
 $e$  = Grandeur d'entrée = force agissant sur le point A.  
 $s$  = Grandeur de sortie = course du point A.  
 $F$  = Ressort.  
 $f$  = Constante du ressort.

Lorsque la grandeur d'entrée varie selon un échelon rectangulaire représenté par la courbe 1 de la figure 3 b, la grandeur de sortie varie également selon un échelon rectangulaire représenté par la courbe 2.

Pour un tel dispositif, le déphasage entre les oscillations de la grandeur d'entrée et celles de la grandeur de sortie est nul quelle que soit la fréquence de ces oscillations. Le rapport entre les amplitudes de ces oscillations est constant. Ainsi que le représente la figure 3 b, la réponse harmonique se réduit dans ce cas au seul point  $(+\frac{1}{f}, j0)$  de l'axe réel du plan complexe (avec  $j = \sqrt{-1}$ ).

Considérons maintenant le cas d'un dispositif  $P$  avec amortissement dont le modèle est donné par la figure 4 a ; la force de freinage de l'amortisseur  $B$  est proportionnelle à la vitesse de déplacement de la grandeur de sortie  $s$ . La relation entre la grandeur d'entrée et la grandeur de sortie est donnée par une équation différentielle du premier degré :

$$fs + b \frac{ds}{dt} = e$$

avec  $f$  = constante du ressort  
 $b$  = constante d'amortissement.

En admettant que la grandeur d'entrée varie selon un échelon rectangulaire, il est facile de résoudre cette équation différentielle et on obtient pour la réponse indicielle  $\Phi_{es}$  une exponentielle représentée par la figure 4 b.

$$\Phi_{es} = \frac{s}{e} = \frac{1}{f} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_b}} \right)$$

avec  $T_b = \frac{b}{f}$  = constante de temps du dispositif.

Pour calculer la réponse harmonique, la méthode la plus commode est de faire usage du calcul opérationnel en remplaçant le signe de différenciation  $\frac{d}{dt}$  par l'opérateur  $p$ .

L'équation différentielle se transforme en l'équation opérationnelle suivante :

$$fs + bps = e.$$

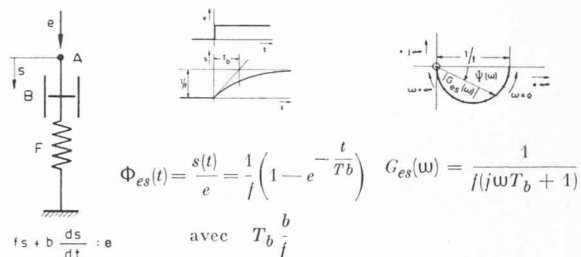


Fig. 4. — Caractéristique d'un dispositif de réglage à action proportionnelle avec amortissement.

Modèle      Réponse indicielle  $\Phi_{es}(t)$       Réponse harmonique  $G_{es}(\omega)$   
 fig. 4 a      fig. 4 b      fig. 4 c  
 $B$  = amortisseur ;  $b$  = constante d'amortissement ;  $\Phi$  = déphasage du vecteur de la réponse harmonique.

Pour les autres grandeurs, même légende que pour la figure 3.

Fig. 4. — Caractéristique d'un dispositif de réglage à action proportionnelle avec amortissement.

En calculant le quotient  $\frac{s}{e}$  on obtient ainsi la fonction de transfert  $\Phi_{es}$  du dispositif.

$$\Phi_{es} = \frac{s}{e} = \frac{1}{f + bp} = \frac{1}{f} \frac{1}{1 + pT_b}$$

L'expression analytique de la réponse harmonique  $G_{es}(\omega)$  s'obtient en remplaçant l'opérateur  $p$  par  $j\omega$  :

$$G_{es}(\omega) = \frac{1}{f} \frac{1}{1 + j\omega T_b}$$

La figure 4 c représente cette réponse harmonique dans le plan complexe. Pour des valeurs très basses de la fréquence  $\omega$ , le terme  $j\omega T_b$  est pratiquement négligeable par rapport à 1. La réponse harmonique se réduit au terme constant  $1/f$ . Le déphasage des oscillations de la grandeur de sortie est presque nul. Par contre pour des valeurs élevées de  $\omega$ , le facteur 1 est négligeable par rapport à  $j\omega T_b$ . La réponse harmonique prend la forme suivante :

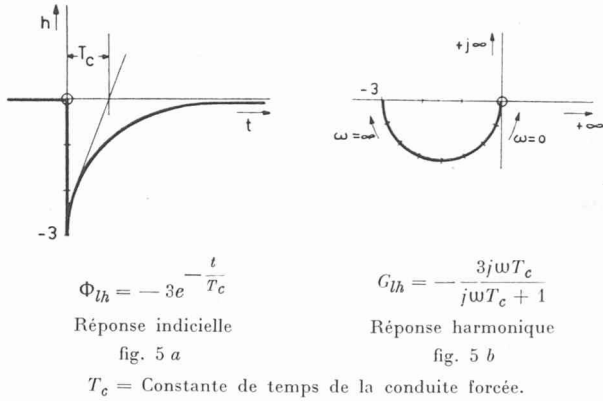
$$G_{es}(\omega) \Big|_{\omega \rightarrow \infty} = \frac{1}{f} \frac{1}{j\omega T_b} = -\frac{1}{j\omega T_b}$$

Le déphasage des oscillations tend vers  $-90^\circ$  et leur amplitude tend vers zéro. Il est facile de prouver que pour des valeurs intermédiaires de  $\omega$ , l'extrémité du vecteur, caractérisant les oscillations de  $s$  se déplace selon le demi-cercle représenté par la figure 4 c.

\* \* \*

Examinons maintenant le comportement des différents éléments du circuit de réglage que nous avons pris comme exemple ; les équations qui relient les différentes variables sont données dans l'annexe. Nous en déduisons les réponses indicielles et harmoniques de ces éléments.

Considérons une brusque ouverture partielle du vanage de la turbine. Par suite de l'inertie de l'eau dans la conduite forcée, l'augmentation de débit a pour conséquence une dépression passagère  $h$  désignée sous le nom de coup de bélier. Si on néglige l'élasticité de l'eau et celle de la conduite forcée, on peut admettre



$$\Phi_{lh} = -3e^{-\frac{t}{T_c}}$$

Réponse indicielle  
fig. 5 a

$T_c$  = Constante de temps de la conduite forcée.

$$G_{lh} = -\frac{3j\omega T_c}{j\omega T_c + 1}$$

Réponse harmonique  
fig. 5 b

Fig. 5. — Réponse de la pression par rapport à une variation de l'ouverture de la turbine.

que la réponse indicielle  $\Phi_{lh}$  qui caractérise ce phénomène est une courbe exponentielle représentée par la figure 5 a (voir annexe) :

$$\Phi_{lh}(t) = -3e^{-\frac{t}{T_c}}$$

avec  $T_c$  = constante de temps de la conduite forcée

$$T_c = \frac{L v_n}{2g H_o} \quad (s)$$

avec  $L$  = longueur de la conduite forcée (m)  
 $v_n$  = vitesse de l'eau dans la conduite forcée (m/s)  
 $H_o$  = hauteur statique du plan d'eau (m)  
 $g$  = constante d'accélération (m/s<sup>2</sup>).

La réponse harmonique  $G_{lh}(\omega)$  représentée par la figure 5 b est un demi-cercle situé dans le troisième quadrant et caractérisé par l'expression suivante :

$$G_{lh}(\omega) = -\frac{3j\omega T_c}{j\omega T_c + 1}$$

Pour de basses fréquences, à savoir lorsque l'ouverture de la turbine varie très lentement, la variation de la pression est pratiquement négligeable ; par contre lorsque l'ouverture de la turbine oscille à une fréquence élevée, les oscillations de la pression sont maximums et déphasées de  $-180^\circ$ .

Pour de faibles variations par rapport aux grandeurs de régime, on peut admettre que la variation du couple moteur de la turbine est donnée par la somme des variations de l'ouverture de la turbine et de celles de la pression. La figure 6 a représente la réponse indicielle  $\Phi_{lm_t}$  de la turbine, réponse caractérisée par l'équation suivante :

$$\Phi_{lm_t} = 1 - 3e^{-\frac{t}{T_c}}$$

À la suite d'une brusque ouverture partielle de la turbine, le couple moteur commence par décroître passagèrement puis augmente et rejoint progressivement sa nouvelle valeur de régime.

La figure 6 b représente la réponse harmonique caractérisée par l'expression suivante :

$$G_{lm_t}(\omega) = 1 - \frac{3j\omega T_c}{1 + j\omega T_c} = \frac{1 - 2j\omega T_c}{1 + j\omega T_c}$$

Pour de basses fréquences, les variations du couple moteur sont en phase avec celles de l'ouverture de la

turbine ; pour de hautes fréquences, elles sont au contraire décalées de  $-180^\circ$ .

En cas de brusque variation du couple moteur ou de la charge du groupe, et par suite de l'inertie des masses tournantes du groupe, il leur faut un certain temps pour s'accélérer, ce qui donne à la réponse indicielle de l'alternateur l'allure d'une courbe exponentielle représentée par la figure 7 a et caractérisée par l'équation suivante :

$$\Phi_{kn}(t) = \Phi_{m_t n}(t) = \frac{1}{a} \left( 1 - e^{-\frac{ta}{T_a}} \right)$$

avec  $\Phi_{kn}$  = réponse de la vitesse de l'alternateur aux variations de la charge  $k$

$\Phi_{m_t n}$  = réponse de la vitesse de l'alternateur aux variations du couple moteur  $m_t$

$T_a$  = constante d'accélération du réseau

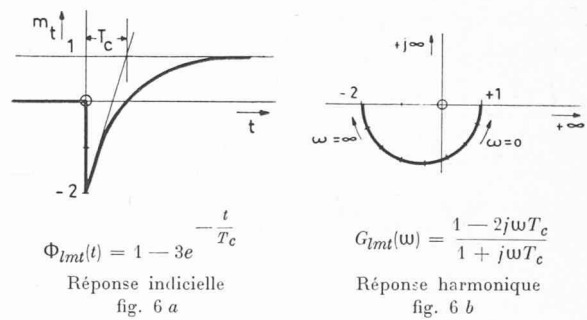
$$= \frac{PD^2 n_r^2}{366 N}$$

$PD^2$  = en tm<sup>2</sup>

$N$  = puissance nominale du groupe (en kW)

$n_r$  = vitesse angulaire (t/mn)

$a$  = coefficient d'autoréglage.



$$\Phi_{lm_t}(t) = 1 - 3e^{-\frac{t}{T_c}}$$

Réponse indicielle  
fig. 6 a

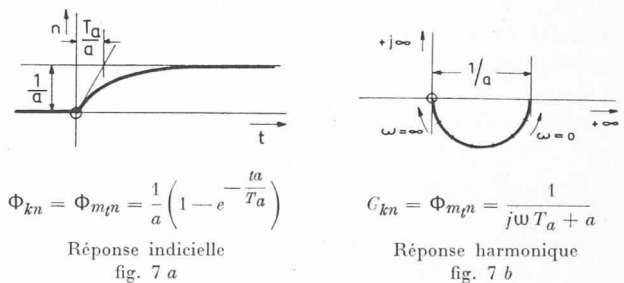
$$G_{lm_t}(\omega) = \frac{1 - 2j\omega T_c}{1 + j\omega T_c}$$

Réponse harmonique  
fig. 6 b

Fig. 6. — Réponse du couple moteur «  $m_t$  » à une variation de l'ouverture «  $l$  » de la turbine.

La réponse harmonique a l'allure d'un demi-cercle représenté par la figure 7 b et caractérisée par l'équation suivante :

$$G_{kn}(\omega) = G_{m_t n}(\omega) = \frac{1}{j\omega T_a + a}$$



$$\Phi_{kn} = \Phi_{m_t n} = \frac{1}{a} \left( 1 - e^{-\frac{ta}{T_a}} \right)$$

Réponse indicielle  
fig. 7 a

$$G_{kn} = \Phi_{m_t n} = \frac{1}{j\omega T_a + a}$$

Réponse harmonique  
fig. 7 b

$a$  = coefficient d'autoréglage ;  $T_a$  = constante d'accélération.

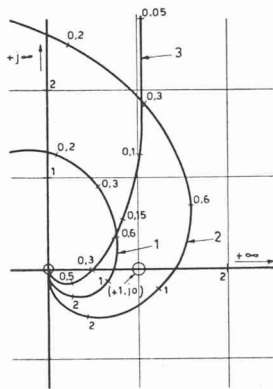
Fig. 7. — Réponse de la vitesse «  $n$  » du groupe à une variation du couple moteur «  $m_t$  » ou de la charge  $k$ .

Pour les basses fréquences, le déphasage des oscillations de la vitesse est négligeable et leur amplitude est égale à  $1/a$ . Pour de hautes fréquences, le déphasage tend vers  $-90^\circ$  et leur amplitude tend vers zéro.

On sait que l'on peut contrôler si les conditions de stabilité sont remplies en utilisant le *critère de Nyquist*. L'application de ce critère conduit à dessiner la réponse harmonique du circuit de réglage ouvert  $G_{nn}(\omega)$ , et à examiner la position de cette courbe par rapport au point  $(+1, j0)$  du plan complexe. Les courbes 1 et 2 de la *figure 8* représentent cette réponse harmonique dans le cas d'un réglage statique idéal donné par l'expression suivante :

$$G_{nn}(\omega) = -\frac{1}{\delta} \frac{1 - 2j\omega T_c}{1 + j\omega T_c} \cdot \frac{1}{j\omega T_a + a}$$

avec  $\delta$  = statisme du réglage.



Courbes 1 et 2 : sans dispositif de stabilisation.

$$G_{nn} = -\frac{1}{\delta} \frac{1 - 2j\omega T_c}{1 + j\omega T_c} \frac{1}{j\omega T_a + a}$$

Courbe 3 : avec dispositif de stabilisation.

$$G_{nn} = -\left(b + \frac{1}{j\omega T_r}\right) \left(\frac{1 - 2j\omega T_c}{1 + j\omega T_c}\right) \left(\frac{1}{j\omega T_a + a}\right)$$

$T_a$  = Constante d'accélération = 8 s.  
 $T_c$  = Constante de temps de la conduite forcée = 1,5 s.  
 $a$  = Coefficient d'autoréglage = 2.  
 Courbe 1 :  $\delta = 60\%$ .  
 Courbe 2 :  $\delta = 30\%$ .  
 Courbe 3 :  $T_r = 3$  s.  $b = 0,5$ .

Fig. 8. — Réponse harmonique du circuit de réglage de vitesse d'une pompe hydro-électrique.

Ces courbes ont été calculées avec les valeurs numériques suivantes :

- $T_a = 8$
- $a = 2$
- $T_c = 1,5$
- $\delta = 17\%, 33\%$ .

Nous voyons que pour de très hautes fréquences, le vecteur de la réponse harmonique est déphasé de  $-90^\circ$ , et que pour de très basses fréquences, ce vecteur est décalé de  $+180^\circ$ . Pour la valeur du statisme  $\delta = 1/6 = 17\%$ , la réponse harmonique représentée par la courbe 1 « entoure » le point  $(+1, j0)$ . Le réglage est instable. Pour  $\delta = 1/3 = 33\%$ , la réponse harmonique « n'entoure pas » le point  $(+1, j0)$ , le réglage est stable. La valeur limite de stabilité est obtenue pour

$$\delta = \frac{2 T_c}{a T_c + T_a} = \frac{2 \cdot 1,5}{3 + 8} = 27\%$$

Cette valeur est relativement très élevée et conduit à des écarts de fréquence inadmissibles ; ainsi un écart de puissance de 10 % conduirait en régime permanent à un écart de fréquence de  $2,7\% = 1,35$  Hz, ce qui serait inadmissible pour l'exploitation. Pour réduire cet écart on est conduit à choisir des valeurs de statisme égales à 5 %, voire égales à zéro (réglage astatique). Afin d'obtenir toutefois un réglage stable, il est nécessaire d'introduire dans le système de réglage des dispositifs de stabilisation que nous allons préciser.

Ce sont les différents retards introduits dans la chaîne de réglage qui sont cause d'instabilité. Il faut remarquer

que ce n'est pas la valeur absolue des constantes de temps caractérisant les retards des organes de réglage qui sont déterminantes, mais les rapports entre ces différentes valeurs.

Examinons ce qui se passe à la suite par exemple d'une brusque diminution de la charge du réseau : la vitesse du groupe va augmenter ; le régulateur va commander une fermeture du vannage ; par suite du coup de bélier que provoque cette fermeture, la vitesse du groupe va continuer passagèrement à augmenter ; constatant cette augmentation, le régulateur de vitesse continue à commander la fermeture de la turbine au-delà de ce qu'exige la variation de la charge qui a provoqué la manœuvre de réglage. Par suite de cette fermeture exagérée, la vitesse va diminuer ensuite en dessous de la valeur de consigne et tout le processus se répète en sens inverse, ce qui peut dégénérer en oscillations qui peuvent aller en s'accroissant.

Pour y remédier, il faut introduire dans le circuit de réglage des éléments qui ont la propriété de compenser ces retards en agissant en quelque sorte « en avance ». Tel est le but des dispositifs de stabilisation. Comment un dispositif de réglage peut-il réaliser une telle anticipation ? C'est ce que nous nous proposons maintenant d'examiner.

## II. Principes des dispositifs d'anticipation

Le terme « d'anticipation » peut prêter à confusion. Un dispositif de réglage ne peut pas réaliser de miracles. Il ne lui est pas possible de réagir avant même que sa grandeur d'entrée n'ait varié ; c'est dans l'allure de sa réaction que consiste sa propriété d'anticiper. Nous avons vu que trois modes de stabilisation peuvent être envisagés que nous allons successivement passer en revue :

- mesure de la dérivée de la grandeur à régler,
- introduction d'un statisme passager,
- utilisation de chaînes d'anticipation.

### 1. Mesure de la dérivée de la grandeur à régler

Ainsi que le représente schématiquement la courbe 1 de la *figure 9 a*, la dérivée d'un échelon rectangulaire est une impulsion d'amplitude infinie mais de durée infiniment courte, appelée « fonction de Dirac ». Cette courbe est donc la réponse indicielle d'un régulateur mesurant la dérivée de la grandeur à régler de façon

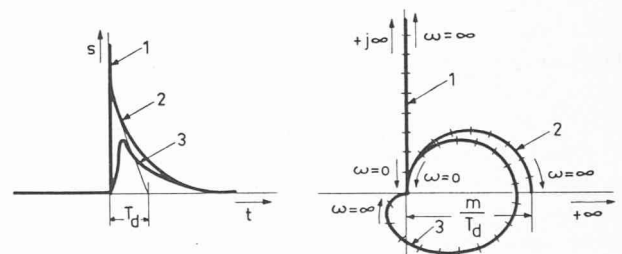


fig. 9 a Réponse indicielle      fig. 9 b Réponse harmonique  
 Courbe 1 = Réponse idéale.  
 Courbe 2 = Réponse effective.  
 Courbe 3 = Réponse d'un accéléromètre affecté de frottement.  
 $s$  = Grandeur de sortie.  
 $T_d$  = Constante de temps du régulateur différentiel.

Fig. 9. — Réponse d'un régulateur différentiel.

idéale, régulateur appelé également « régulateur différentiel », ou « dispositif D », ou encore « accéléromètre » lorsque la grandeur à régler est une vitesse. La fonction de transfert  $\Phi_{es}$  correspondante est proportionnelle à l'opération « p »

$$\Phi_{es} = mp$$

$m =$  constante = dosage de la mesure de la dérivée (dosage accélérométrique).

La réponse harmonique s'obtient à nouveau en remplaçant l'opérateur  $p$  par  $j\omega$ .

$$G_{es} = mj\omega.$$

Ainsi que le représente la courbe 1 de la figure 9 b, cette courbe se confond avec l'axe imaginaire. On voit que pour toutes les fréquences, le vecteur de la réponse harmonique d'un accéléromètre idéal est décalé de 90° en avant. Son amplitude est proportionnelle à  $\omega$ , c'est-à-dire qu'elle tend vers infini lorsque  $\omega \rightarrow \infty$  et vers zéro lorsque  $\omega \rightarrow 0$ .

Il est toutefois impossible de réaliser un dispositif matériel capable de faire instantanément une variation infinie. La courbe 2 de la figure 9 a représente la réponse indicielle d'un dispositif D tel qu'il peut être pratiquement réalisé en mesurant par exemple la différence de la course entre un dispositif P idéal et un dispositif P amorti ; on obtient ainsi :

$$\Phi_{es} = \frac{m}{T_d} \left( 1 - 1 - e^{-\frac{t}{T_d}} \right) = \frac{m}{T_d} e^{-\frac{t}{T_d}}$$

avec  $T_d =$  constante de temps du régulateur différentiel.

La surface intégrée par cette réponse indicielle est égale au dosage  $m$ . La fonction de transfert et la réponse harmonique correspondantes sont les suivantes :

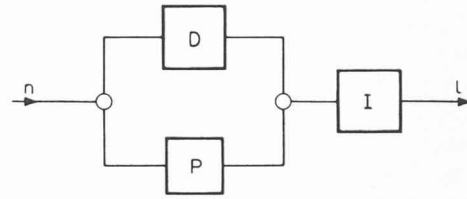
$$\Phi_{es}(p) = \frac{m}{T_d} \frac{p T_d}{1 + p T_d}$$

$$G_{es}(\omega) = \frac{m}{T_d} \frac{j\omega T_d}{1 + j\omega T_d}$$

Cette réponse harmonique est représentée par la figure 9 b. On voit que pour les basses fréquences, son déphasage tend vers +90°, par contre pour de hautes fréquences, le déphasage en avant tend vers zéro. Lorsque  $T_d \rightarrow 0$  on retrouve les caractéristiques d'un régulateur différentiel idéal.

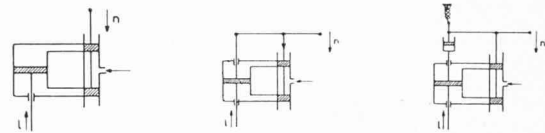
Pour un régulateur différentiel affecté de masse, on obtient les réponses indicielles et harmoniques représentées par les courbes 3. On voit que dans un certain domaine de fréquence, la réponse harmonique est déphasée en avant, tandis que dans un autre domaine le déphasage s'opère en arrière : ainsi se trouve illustré le fait qu'un accéléromètre trop lent n'est d'aucun secours, voire même devient nuisible en provoquant un déphasage en arrière.

Nous allons maintenant prendre en considération l'ensemble du dispositif de réglage constitué par un tachymètre, un accéléromètre et le servo-moteur qui commande l'ouverture de la turbine. Le schéma fonctionnel de cet ensemble est représenté par la figure 10. Nous admettons que ce servo-moteur n'est pas asservi ainsi que l'indique en principe la figure 11 a. Un tel



$n =$  Vitesse du groupe mesurée par le dispositif de réglage.  
 $l =$  Ouverture du groupe commandée par le dispositif de réglage.

Fig. 10. — Schéma fonctionnel d'un dispositif de réglage constitué par un tachymètre P, un accéléromètre D agissant sur un servo-moteur I non asservi.



Servo-moteur sans avertissement fig. 11 a      Servo-moteur avec asservissement rigide fig. 11 b      Servo-moteur avec asservissement glissant fig. 11 c

$n =$  Variation de la vitesse (grandeur d'entrée).  
 $l =$  Variation de l'ouverture de la turbine (grandeur de sortie).

Fig. 11. — Schéma de principe d'un servo-moteur.

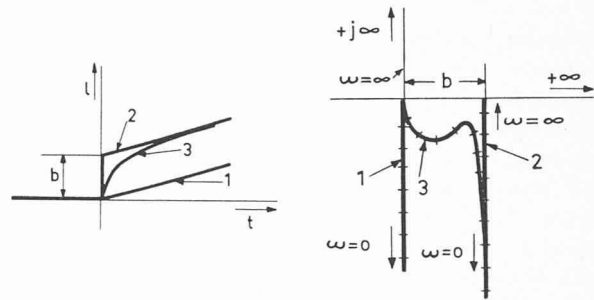


fig. 12 a Réponse indicielle      fig. 12 b Réponse harmonique

Courbe 1 = Réponse sans accéléromètre.  
 Courbe 2 = Réponse avec un accéléromètre idéal.  
 Courbe 3 = Réponse compte tenu des caractéristiques effectives d'un accéléromètre.

$l =$  Variation de l'ouverture de la turbine.  
 $b =$  Facteur de stabilisation.

Fig. 12. — Réponse du dispositif de réglage d'un groupe hydro-électrique.

servo-moteur n'est en position d'équilibre que pour une seule position de son tiroir de distribution. En cas de brusque variation de la position de ce tiroir, le piston du servo-moteur se déplace à une vitesse constante proportionnelle à cette variation. Ce servo-moteur présente la caractéristique d'un dispositif intégrateur (dispositif I) dont la réponse indicielle est donnée par la courbe 1 de la figure 12 a et est caractérisée par l'expression suivante :

$$\Phi_{es}(t) = \frac{t}{T_r}$$

avec  $T_r =$  constante de temps du dispositif de réglage.

La fonction de transfert et la réponse harmonique d'un dispositif de réglage I sont les suivantes :

$$\Phi_{es}(p) = \frac{1}{p T_r} \quad G_{es}(\omega) = \frac{1}{j\omega T_r}$$

Cette réponse harmonique est représentée par la courbe 1 de la *figure 12 b* et se confond avec le demi-axe imaginaire négatif. Pour toutes les fréquences cette réponse harmonique est décalée de  $90^\circ$  en arrière, son amplitude est inversement proportionnelle à  $\omega$ , elle tend vers l'infini lorsque  $\omega \rightarrow 0$  et tend vers zéro lorsque  $\omega \rightarrow \infty$ .

En admettant un accéléromètre idéal, la fonction de transfert du dispositif de réglage est la suivante :

$$\Phi_{nl} = (1 + mp) \frac{1}{p T_r} = b + \frac{1}{p T_r}$$

avec  $b = \frac{m}{T_r}$  = facteur de stabilisation.

Les réponses indicielles et harmoniques correspondantes sont les suivantes :

$$\Phi_{nl}(t) = b + \frac{t}{T_r} \quad G_{nl}(\omega) = b + \frac{1}{j\omega T_r}$$

Ces réponses sont représentées par les courbes 2 des *figures 12 a* et *12 b*. Nous voyons qu'à la suite d'une variation de la fréquence selon un échelon rectangulaire l'ouverture de la turbine fait tout d'abord un saut brusque d'amplitude égal au facteur de stabilisation, puis varie ensuite linéairement, proportionnellement à la constante de temps du dispositif de réglage. La réponse harmonique est une parallèle à l'axe imaginaire. On voit que pour de basses fréquences, le vecteur de la réponse harmonique est déphasé de  $-90^\circ$  et tend à se confondre avec celui de la réponse harmonique d'un dispositif I. Par contre pour de hautes fréquences, le déphasage de la réponse harmonique tend vers zéro ; le dispositif de réglage se comporte comme un dispositif P, dont nous l'avons vu, la réponse harmonique est décalée de  $90^\circ$  en avant par rapport à celle du dispositif I.

En fait si l'on tient compte des caractéristiques réelles de l'accéléromètre telles que nous les avons définies ci-dessus, on obtient les réponses indicielles et harmoniques représentées par les courbes 3 des *figures 12 a* et *12 b*. La réponse indicielle ne fait pas un saut brusque mais rejoint asymptotiquement la réponse indicielle idéale. Pour les basses et les hautes fréquences le déphasage de la réponse harmonique tend vers  $-90^\circ$ , ce déphasage est minimum pour une certaine valeur intermédiaire qu'il faut s'efforcer de faire coïncider avec la fréquence propre des systèmes à régler.

## 2. Asservissement passager

La *figure 11 b* représente un servo-moteur avec asservissement rigide. En cas de variation de la course du distributeur, le piston du servo-moteur se déplace en entraînant l'autre extrémité du balancier qui commande le tiroir de distribution, et le ramène en sa position d'équilibre. Il en résulte les réponses indicielles et harmoniques représentées par les courbes 2 des *figures 13 a* et *13 b*. Si l'asservissement permanent est remplacé par un asservissement « passager » ou dit « glissant » représenté par la *figure 11 c* on obtient comme réponses indicielles et harmoniques les courbes 3 des *figures 13 a* et *13 b* qui sont identiques aux courbes 3 des *figures 12 a* et *12 b*. Cette identité est la preuve que l'utilisation d'un accéléromètre et celui d'un statisme passager conduisent exactement au même résultat. Pour

obtenir une réponse indicielle qui présente la particularité d'avoir une course plus rapide au début, puis plus lente ensuite on peut :

- ou bien prévoir un dispositif relativement lent sur lequel on fait agir une impulsion supplémentaire au début : telle est l'action de l'accéléromètre ;
- ou bien prévoir un dispositif relativement rapide que l'on laisse agir sans le retenir tout d'abord puisque l'on freine ensuite ; tel est le principe de l'asservissement dit « passager ».

Il y a pourtant une différence essentielle entre le réglage accélero-tachymétrique et le réglage avec statisme passager : alors que dans le premier cas la constante de temps du dispositif de réglage est donnée par la constante de temps du servo-moteur principal, dans le deuxième cas, elle est déterminée par le temps de relaxation du dash-pot de l'asservissement passager. Ainsi que l'indique l'annexe, la réponse harmonique  $G_{nn}$  du circuit de réglage ouvert avec dispositif de stabilisation est donnée par l'expression suivante :

$$G_{nn}(\omega) = - \left( b + \frac{1}{j\omega T_r} \right) \cdot \frac{1 - 2j\omega T_c}{1 + j\omega T_c} \cdot \frac{1}{j\omega T_a + a}$$

La courbe 3 de la *figure 8* représente cette réponse harmonique en admettant les mêmes valeurs numériques que précédemment pour  $T_a$ ,  $T_c$  et  $a$  et en prenant pour les grandeurs caractéristiques du dispositif de réglage les valeurs numériques suivantes :

$$T_r = 3s \quad b = 0,5.$$

Nous voyons que bien que le réglage soit astatique, ce qui correspond en régime permanent à un statisme nul, on obtient des conditions de stabilité beaucoup plus favorables que dans le cas d'un réglage sans dispositif de stabilisation caractérisé par les courbes 1 et 2 de la *figure 8*.

Il existe une valeur optimum du facteur de stabilisation «  $b$  » et une valeur minimum à donner à  $T_r$  de façon à obtenir un réglage stable. Dans le cas particulier où  $a = 0$  (cas défavorable), on obtient :

$$b_{opt} = 0,317 \frac{T_a}{T_c}$$

$$T_{rmin} > 14,89 \frac{T_c^2}{T_a}$$

En introduisant les valeurs numériques de l'exemple

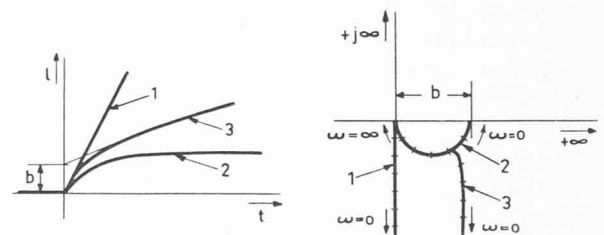


fig. 13 a Réponse indicielle      fig. 13 b Réponse harmonique

Courbe 1 = Servo-moteur sans asservissement.  
 Courbe 2 = Servo-moteur avec asservissement rigide.  
 Courbe 3 = Servo-moteur avec asservissement passager.

Fig. 13. — Réponse d'un servo-moteur.



pris en considération ci-dessus, on est conduit aux valeurs numériques suivantes :

$$b_{opt} = 0,317 \frac{T_a}{T_c} = 0,317 \frac{8}{1,5} = 1,7$$

$$T_{rmin} > 14,89 \frac{T_c^2}{T_a} = 14,89 \frac{1,51^2}{8} = 4,2 \text{ s.}$$

\* \* \*

Nous avons vu qu'en faisant agir un dispositif *P* et un dispositif *D* sur un dispositif *I*, on obtient en première approximation la réponse indicielle représentée par la courbe 1 de la figure 16 a. Si, ainsi que l'indique le schéma fonctionnel de la figure 17 a on fait agir en parallèle avec la sortie du dispositif *I* un dispositif *D*, on obtient la réponse indicielle représentée par la courbe 2 de la figure 16 a caractérisée par un surréglage passager. Cette même réponse indicielle peut être obtenue en principe en faisant agir en parallèle *I*, un dispositif *P* et un dispositif *D* ainsi que le représente la figure 17 b. C'est la réponse d'un dispositif *PDI*. La figure 2 de la figure 16 b représente la réponse harmonique correspondante. On voit que dans un certain domaine de fréquence, cette réponse harmonique est déphasée en avant.

Il importe pour un réglage automatique bien mis au point que ce domaine de fréquence corresponde à celui pour lequel la réponse harmonique du circuit de réglage ouvert passe à proximité du point critique (+1, *j*0).

L'utilisation de chaînes d'anticipation est particulièrement indiquée lorsque le dispositif à régler comprend une série de grandeurs de réglage liées les unes aux autres et réagissant les unes sur les autres avec un certain retard. Ces chaînes d'anticipation peuvent être placées soit en parallèle, soit en série dans le circuit de

réglage. Leur action provoque un surréglage passager qui compense les retards des éléments du circuit affecté de masse ou d'inertie. Les exemples que nous donnerons par la suite illustreront ce principe ; au préalable nous nous proposons d'examiner comment réaliser un régulateur différentiel.

### III. Principe de réalisation d'un régulateur différentiel

Le régulateur différentiel mesure les variations de la grandeur à laquelle il est soumis et annule son action dès que cette grandeur reste constante. De nombreux modes d'exécution d'un tel dispositif peuvent être envisagés. Nous nous contenterons d'en donner quatre exemples.

#### 1. Régulateur différentiel purement électrique

Ainsi que le représente la figure 18 un régulateur différentiel peut être obtenu par une combinaison très simple de résistances, de selfs ou de condensateurs. On obtient un tripôle élémentaire avec *u<sub>e</sub>* comme tension d'entrée et *u<sub>s</sub>* comme tension de sortie. On voit immédiatement que si *u<sub>e</sub>* varie selon un échelon rectangulaire, *u<sub>s</sub>* varie brusquement puis annule progressivement sa variation.

Cependant, si la puissance qui est absorbée par le circuit de sortie n'est pas négligeable et si la constante de temps de la réponse indicielle de régulateur est de l'ordre de plusieurs dizaines de secondes, voire plusieurs minutes, on est conduit à des dimensions prohibitives pour le condensateur ou le self et on a alors avantage à utiliser des dispositifs en partie mécaniques tels que les décrivent les exemples suivants.

#### 2. Régulateur différentiel avec translation (fig. 19)

En régime permanent, la force enregistrée par le système de mesure *M* est compensée par la force du ressort *F<sub>1</sub>*. Le contact mobile du rhéostat *R* se trouve

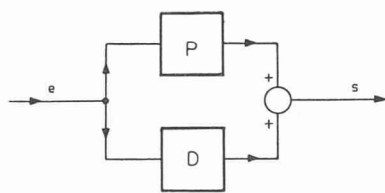


Fig. 14. — Principe de l'introduction d'une chaîne d'anticipation.

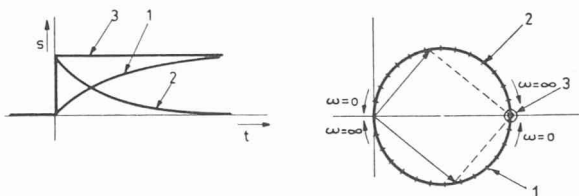


fig. 15 a Réponse indicielle      fig. 15 b Réponse harmonique  
 Courbe 1 = Réponse d'un dispositif *P* à action proportionnelle amorti.  
 Courbe 2 = Réponse d'un régulateur différentiel *D*.  
 Courbe 3 = Réponse d'un dispositif à action proportionnelle idéal.

Fig. 15. — Réponse d'un dispositif à action proportionnelle amorti avec chaîne d'anticipation.

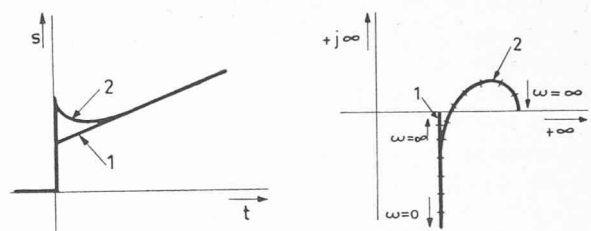


fig. 16 a Réponse indicielle      fig. 16 b Réponse harmonique  
 Courbe 1 = Sans chaîne d'anticipation.  
 Courbe 2 = Avec chaîne d'anticipation.

Fig. 16. — Réponse d'un dispositif de réglage P.I.D.

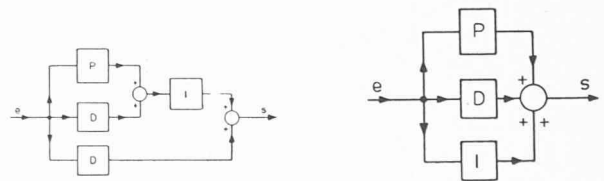


fig. 17 a

fig. 17 b

Fig. 17. — Schéma fonctionnel d'un dispositif de réglage P.I.D.

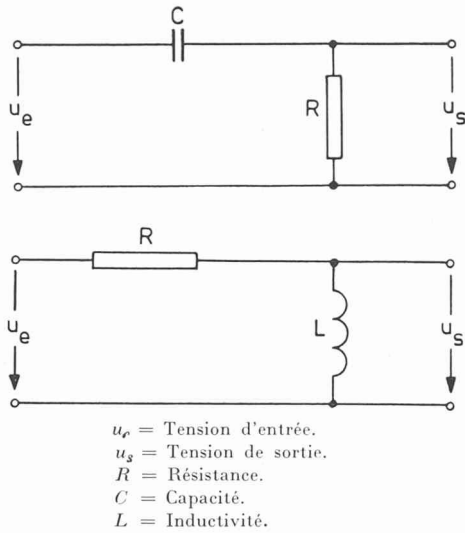


Fig. 18. — Régulateur différentiel purement électrique.

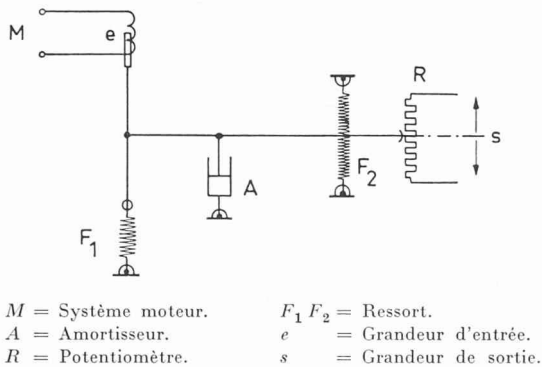


Fig. 19. — Régulateur différentiel avec translation.

en son point milieu ; s'il survient une variation de la grandeur d'entrée  $e$  (force induite par  $M$ ), le levier pivote autour de la position initiale du piston de l'amortisseur  $A$ . Il en résulte un déplacement de la grandeur de sortie  $s$  (point de contact du rhéostat  $R$ ), ce qui met le ressort  $F_2$  sous tension ; ce ressort se détend ensuite en modifiant la position du piston de l'amortisseur  $A$  et en ramenant progressivement le contact du rhéostat  $R$  dans sa position médiane.

3. Régulateur différentiel avec asservissement électrique (fig. 20).

Le système moteur  $M$ , dont le couple est compensé par le ressort  $F$  mesure la grandeur à régler et entraîne le rotor du transformateur à induit mobile  $T_1$ , dont la tension secondaire est une mesure de cette grandeur à régler. Cette tension secondaire est opposée à celle du transformateur à induit mobile  $T_2$ , dont le rotor est entraîné par le moteur  $M$ , moteur qui est commandé par le régulateur à impulsions  $R$ . Ce régulateur mesure la différence de tension entre les tensions secondaires de  $T_2$  et  $T_1$  et émet un nombre d'impulsions proportionnel à cette différence de tension. En régime permanent, cette différence de tension est nulle. S'il survient une variation de la grandeur d'entrée  $e$  enregistrée par le système de mesure  $M$ , il en résulte une différence de la tension  $s$

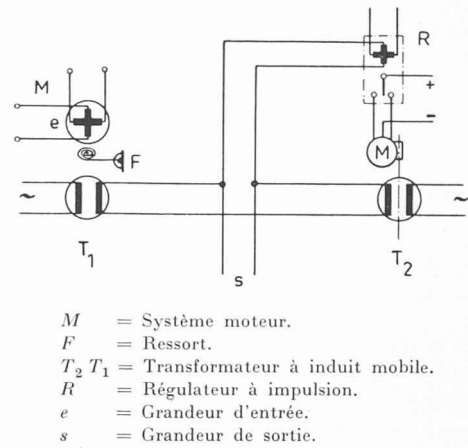


Fig. 20. — Régulateur différentiel avec asservissement électrique.

qui constitue la grandeur de sortie ; cette différence de tension provoque l'intervention du régulateur  $R$  et s'annule progressivement par suite de l'ajustement du transformateur  $T_2$ . On peut imaginer, selon le même principe, de nombreuses réalisations du régulateur différentiel, en mesurant la différence entre l'action de deux dispositifs à action proportionnelle dont l'un agit simultanément et l'autre est amorti.

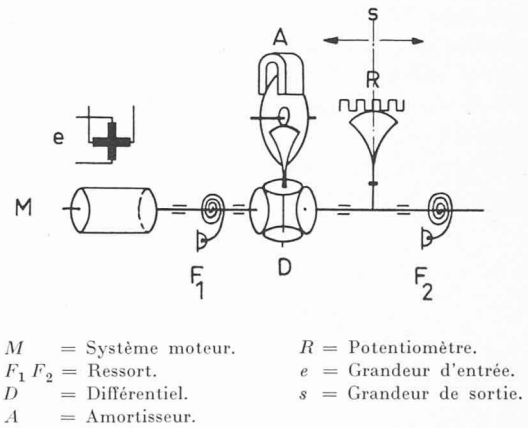


Fig. 21. — Régulateur différentiel avec rotation.

4. Régulateur différentiel avec rotation (fig. 21).

Le couple induit par le système moteur  $M$  est compensé par le ressort  $F_1$ . Son arbre est relié à celui qui entraîne le rhéostat de réglage  $R$  par l'intermédiaire du différentiel  $D$  accouplé avec l'amortisseur  $A$ . S'il survient une modification de la grandeur d'entrée  $e$ , la rotation de l'arbre est transmise au contact mobile du rhéostat de réglage par le différentiel  $D$  ; il en résulte une course  $s$  de ce contact mobile et une tension du ressort  $F_2$  qui se détend ensuite progressivement en entraînant l'amortisseur  $A$  et en ramenant ainsi le contact mobile du rhéostat de réglage dans sa position médiane.

De même qu'un accéléromètre, le régulateur différentiel doit avoir une réaction suffisamment rapide sinon son action risque d'aller à fin contraire. Cependant, il est inutile de pousser trop loin cette exigence de rapidité car au-delà d'une certaine limite il n'en résulte aucune amélioration de la qualité du réglage. Dans chaque cas particulier, on peut déterminer les caractéristiques optimums à donner à ce régulateur, appelé parfois « correcteur de stabilité » qui peut être placé soit en parallèle, soit en série dans le circuit de réglage.

#### IV. Exemples d'utilisation du régulateur différentiel

##### 1. Réglage de la chaudière d'un groupe thermique

L'utilisation de chaînes d'anticipation permet de relier directement la cause à l'effet qui doit en résulter sans attendre la variation des grandeurs de réglage intermédiaire. On peut par exemple envisager d'asservir directement l'ouverture de la turbine ou le réglage du foyer d'une chaudière d'un groupe thermique aux variations de la charge produite par le groupe, avant que les variations de la vitesse du groupe et de la pression de la vapeur ne se soient produites, le réglage classique subsistant pour assurer le « réglage fin ». La courbe 1 de la *figure 22* représente la variation de la pression de la chaudière d'un groupe thermique sans action du régulateur différentiel; la courbe 2 représente cette même variation, compte tenu de l'intervention d'un régulateur différentiel qui provoque une légère surpression passagère et augmente la puissance de la chaudière avant même que la turbine ait transmis cet appel de puissance; l'écart de pression et par conséquent l'écart du régime de chauffe est inférieur à celui qui ressort de la courbe 1.

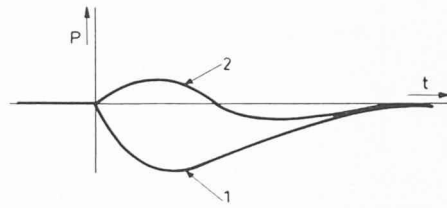
##### 2. Asservissement passager de la tension d'un générateur aux variations de sa puissance

Lorsqu'un groupe est en marche isolée sur un réseau à caractère ohmique (distribution urbaine, électrochimie, etc.), sa charge varie en fonction du carré de sa tension; si, à la suite d'une augmentation de la puissance qui est demandée au groupe la tension est momentanément réduite, sa charge est maintenue tout d'abord à une valeur égale, sinon proche de sa valeur initiale; à mesure que la tension retrouve sa valeur de consigne, la charge du groupe est progressivement amenée à sa nouvelle valeur à un rythme tel que la turbine puisse suivre cette variation de charge; l'écart de la fréquence se trouve ainsi réduite aux dépens, il est vrai, d'un écart passager de la tension. Les répercussions de l'à-coup de charge se trouvent ainsi réparties sur la tenue de la fréquence et la tenue de la tension, ce qui permet d'améliorer cette tenue de la fréquence.

##### 3. Accélération du réglage de la tension

Le régulateur différentiel permet de compenser l'inertie naturelle de certains organes de réglage, telle que, par exemple, l'inertie magnétique du champ d'excitation d'un alternateur.

La courbe 1 de la *fig. 23* représente une variation selon un échelon rectangulaire de la tension mesurée par le régulateur de tension, en admettant que le circuit de réglage est ouvert; la courbe 2 représente la réponse



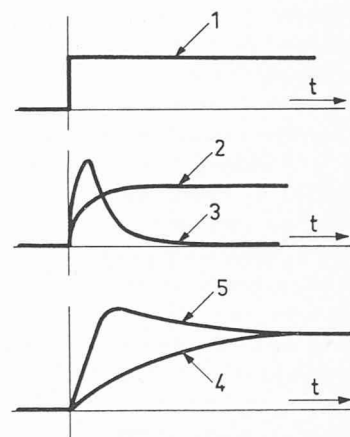
$P$  = Variation de la pression dans la chaudière  
 Courbe 1 = Sans régulateur différentiel.  
 Courbe 2 = Avec régulateur différentiel.

Fig. 22. — Variation de la pression d'une chaudière à la suite d'une augmentation de la charge d'un groupe thermique.

de ce régulateur de tension et la courbe 3 la réponse du courant d'excitation caractérisée par une constante de temps relativement élevée, surtout si le régulateur agit sur l'excitatrice auxiliaire, comme cela est le cas pour les alternateurs de grande puissance.

La courbe 4 représente la réponse du régulateur différentiel et la courbe 5 la réponse du courant d'excitation, compte tenu de l'action du régulateur différentiel; grâce au surréglage passager qu'il introduit, la constante de temps qui caractérise la réponse du courant d'excitation se trouve réduite.

On peut envisager également que le régulateur différentiel agisse directement en parallèle sur le champ de l'excitatrice principale, voire sur le champ de l'alternateur, par l'intermédiaire d'enroulements ad hoc, ce qui permet d'accélérer encore plus le réglage de la tension.

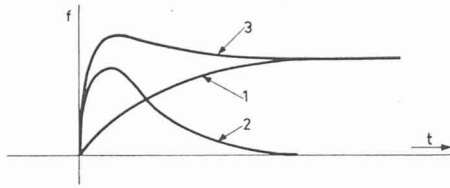


Courbe 1 = Variation de la tension mesurée par le régulateur.  
 Courbe 2 = Réponse du régulateur de tension statique.  
 Courbe 3 = Réponse du régulateur différentiel.  
 Courbe 4 = Variation de l'excitation sans régulateur différentiel.  
 Courbe 5 = Variation de l'excitation avec régulateur différentiel.

Fig. 23. — Réglage de la tension d'un alternateur avec régulateur différentiel.

##### 4. Amélioration du réglage puissance-fréquence

La caractéristique du réglage puissance-fréquence est valable pour des régimes permanents. S'il survient une variation de charge dans l'un des complexes interconnectés cette variation se répercute immédiatement sur la puissance d'échange; par contre, la variation de fréquence ne peut s'effectuer qu'en fonction de la



Courbe 1 = Réponse du détecteur de fréquence.  
 Courbe 2 = Réponse du régulateur différentiel.  
 Courbe 3 = Réponse de la superposition du détecteur de fréquence  
 et du régulateur différentiel.  
 $f$  = Variation de la fréquence.

Fig. 24. — Amélioration du réglage fréquence-puissance au moyen d'un régulateur différentiel.

constante d'accélération de l'ensemble interconnecté, selon la courbe 1 de la *figure 24*. Il en résulte qu'immédiatement après la perturbation, le réglage s'effectue non selon le principe puissance-fréquence, mais à puissance constante. Il peut en résulter des corrections de réglage inopportunes. La courbe 2 représente la réponse du régulateur différentiel enregistrant la variation de fréquence avec un amortissement approprié. La courbe 3 représente l'action d'un détecteur de fréquence (reproduisant fidèlement la variation effective de la fréquence) et du régulateur différentiel. Cette courbe 3 permet de prévoir l'écart de fréquence en régime permanent et d'obtenir ainsi un réglage selon le principe puissance-fréquence avant que l'écart de fréquence ne se soit produit.

\* \* \*

On peut objecter que l'utilisation de chaînes d'anticipation augmente de façon excessive le travail de réglage ; par exemple, les variations de la pression d'une chaudière suivent de façon très amortie les fluctuations de la charge du réseau et diminuent d'autant le travail de réglage de la chaudière. Si la fluctuation de la puissance est faible et de courte durée, il est souhaitable que la chaudière ne varie pas son régime de chauffe ; pour éviter cette augmentation inopportune du travail de réglage, il est souhaitable de combiner les chaînes d'anticipation avec des éléments non linéaires qui fassent en sorte que leur action soit négligeable pour de faibles variations de leur grandeur d'entrée et qui accentuent leur action pour des variations importantes de leur grandeur d'entrée. Il est certain que ces éléments non linéaires vont être amenés de plus en plus à un rôle important dans la technique des réglages automatiques.

Dans certains cas, par exemple, pour des réglages de température, l'anticipation se réalise en utilisant une « image » du dispositif à régler qui « prévoit » rapidement la variation que ce dispositif atteindra en régime permanent et permet d'ajuster le réglage en conséquence.

Si séduisante que soit l'utilisation de l'anticipation dans la technique des réglages automatiques, elle ne doit pas faire oublier les autres modes de stabilisation qui tiennent compte de l'ensemble du dispositif à régler. Ainsi dans le cas du réglage de vitesse d'un groupe

débitant son énergie sur un réseau à caractère ohmique, une stabilisation très énergique et une amélioration de la tenue de la fréquence est obtenue en asservissant passagèrement ou en permanence la tension à la fréquence, asservissement qui fait en sorte que lorsque la fréquence augmente la tension, et partant la charge augmente également ; on obtient ainsi un « auto-réglage » caractérisé par le coefficient d'auto-réglage «  $a$  ».

Ce cas illustre le fait qu'un dispositif à régler doit être considéré comme un tout et que des solutions intéressantes peuvent être trouvées en reliant des éléments qui peuvent paraître de prime abord n'avoir aucun rapport les uns avec les autres, ce qui est également une forme d'anticipation. Ainsi dans certains cas une réduction importante du volume à prévoir pour une chambre d'équilibre peut être obtenue en asservissant la tension du groupe à la hauteur du plan d'eau de la chambre d'équilibre, ce qui supprime la cause même de l'instabilité de la chambre d'équilibre qui est le réglage du groupe à puissance constante.

### Conclusion

Nous avons vu que la cause de l'instabilité d'un réglage automatique étaient les *retards* introduits dans le circuit de réglage par suite des frottements ou de l'inertie des organes de réglage. Nous avons vu que le remède à l'instabilité était de compenser les retards par une *anticipation* et que cette anticipation consiste à provoquer un *surréglage* passager, qui annule son action avant même que son action sur la grandeur à régler se soit fait sentir.

Ce *surréglage* peut être obtenu soit par les moyens classiques de la mesure de la dérivée à l'écart de réglage par exemple au moyen d'un accéléromètre, ou d'un asservissement avec statisme passager, ou enfin par l'utilisation de chaînes d'anticipation. Cette dernière méthode revient à prévoir un réglage « intelligent » qui fasse preuve d'initiative, prévoie en quelque sorte l'ordre qu'on va lui demander, intervienne à bon escient et annule son action dès qu'elle s'avère superflue. Ce réglage n'a une action que sur l'aspect dynamique du processus de réglage, autrement dit il ne supprime pas les dispositifs de réglage classiques mais permet de les compléter en leur laissant le soin d'effectuer le réglage fin en régime permanent. Cette méthode a l'avantage d'améliorer la stabilité du réglage et de diminuer les écarts de réglage. Ainsi, par exemple, à la suite du déclenchement d'un incendie, une intervention immédiate, avec des moyens même très réduits tels que l'extincteur à main, permet parfois de juguler l'incendie et rend inutile la mise en œuvre par la suite des moyens d'extinction plus importants. Dans un cas comme dans l'autre, il s'agit de gagner une course contre le temps.

De nombreux autres exemples pourraient être donnés de l'utilisation du principe d'anticipation. Nous espérons que ces quelques considérations seront suffisantes pour faire saisir le principe du fonctionnement des dispositifs de stabilisation et pour montrer en particulier les perspectives ouvertes par l'introduction de chaînes d'anticipation dans le domaine des réglages automatiques.

## Annexe

Equations du réglage de vitesse d'un groupe hydro-électrique en marche isolée

Le comportement du réglage de vitesse d'un groupe hydro-électrique peut être caractérisé par un système de six équations différentielles<sup>1</sup>:

$$\text{Equation des masses tournantes } T_a \frac{dn}{dt} + m_e = m_t.$$

$$\text{Equation du couple moteur } m_t = 1 + \frac{3}{2} h + n \operatorname{tg} \alpha_t.$$

$$\text{Equation de la surpression } h = \Theta \left( \frac{dl}{dt} + \frac{1}{2} \frac{dh}{dt} \right).$$

$$\text{Equation du couple résistant } m_e = n \operatorname{tg} \alpha_e + k.$$

$$\text{Equation du dispositif de réglage } \frac{dl}{dt} = - \left( b \frac{dn}{dt} + \frac{1}{T_r} \right).$$

Avec  $n$  = variation relative de la vitesse,  
 $l$  = variation relative de l'ouverture de la turbine,  
 $m_t$  = variation relative du couple moteur,  
 $m_e$  = variation relative du couple résistant,  
 $h$  = variation relative de la pression,  
 $k$  = variation relative de la charge débitée par le générateur,  
 $T_a$  = constante d'accélération du groupe  
 $= \frac{PD^2 n_r^2}{366 N} (s)$ ,  
 $PD^2$  en  $\text{tm}^2$ ,  
 $N$  = puissance nominale du groupe (kW),  
 $n_r$  = vitesse angulaire (t/mn),  
 $\Theta$  = chiffre caractéristique de la conduite  
 $= \frac{L v_n}{g H_o} (s)$ ,  
 $L$  = longueur de la conduite forcée (m),  
 $v_n$  = vitesse de l'eau dans la conduite forcée (m/s),  
 $H_o$  = hauteur statique du plan d'eau (m),  
 $g$  = constante d'accélération ( $\text{m/s}^2$ ),  
 $T_r$  = constante de temps du dispositif de réglage,  
 $b$  = facteur de stabilisation,  
 $\operatorname{tg} \alpha_e$  = augmentation relative des couples résistants en fonction de la vitesse,  
 $\operatorname{tg} \alpha_t$  = diminution relative du couple moteur en fonction de la vitesse.

La résolution de ce système d'équations différentielles s'effectue le plus commodément en faisant usage du calcul opérationnel: en remplaçant le signe de différenciation  $\frac{d}{dt}$  par l'opérateur  $p$  on obtient un système de cinq équations algébriques à cinq inconnues.

<sup>1</sup> Voir « Amélioration de la tenue de la fréquence dans un réseau alimenté par une centrale hydro-électrique » M. Cuénod et J. Wahl. Bull. techn. de la Suisse Rom. 20 mars et 3 avril 1954.

$$p T_a n + m_e = m_t;$$

$$m_t = 1 + \frac{3}{2} h + n \operatorname{tg} \alpha_t;$$

$$h = -\Theta \left( pl + \frac{1}{2} ph \right);$$

$$m_e = n \operatorname{tg} \alpha_e + k;$$

$$pl = - \left( bpn + \frac{1}{T_r} \right).$$

Nous éliminons les différentes variables et en déduisons les fonctions de transfert et réponses indicielles suivantes:

pour la conduite forcée:

$$\Phi_{lh}(p) = \frac{h}{l} = - \frac{3 p T_c}{1 + p T_c}; \quad \Phi_{lh}(t) = -3e^{-\frac{t}{T_c}}$$

avec  $T_c = \frac{\Theta}{2}$  = constante de temps de la conduite forcée;

pour la turbine:

$$\Phi_{lm_t}(p) = \frac{m_t}{l} = \frac{1 - 2 p T_c}{1 + p T_c}; \quad \Phi_{lm_t}(t) = 1 - 3e^{-\frac{t}{T_c}}$$

pour le générateur:

$$\Phi_{m_e^n}(p) = \frac{n}{m_t} = \Phi_{kn} = \frac{h}{k} = \frac{1}{p T_a + a};$$

$$\Phi_{m_e^n}(t) = \Phi_{kn}(t) = \frac{1}{a} \left( 1 - e^{-\frac{at}{T_a}} \right)$$

avec  $a$  = coefficient d'autorégulation =  $\operatorname{tg} \alpha_e - \operatorname{tg} \alpha_m$

pour le dispositif de réglage:

$$\Phi_{nl}(p) = \frac{l}{n} = - \left( b + \frac{1}{p T_r} \right); \quad \Phi_{nl}(t) = - \left( b + \frac{t}{T_r} \right).$$

La fonction de transfert de l'ensemble du circuit de réglage est donnée par le produit des fonctions de transfert partielles:

$$\Phi_{nn}(t) = \Phi_{nl} \cdot \Phi_{lm_t} \cdot \Phi_{m_e^n} = - \left( b + \frac{1}{p T_r} \right) \cdot \frac{1 - 2 p T_c}{1 p T_c} \cdot \frac{1}{p T_a + a}.$$

En remplaçant l'opérateur  $p$  par  $j\omega$  dans cette expression, on obtient immédiatement la réponse harmonique  $G_{nn}(\omega)$  du circuit de réglage ouvert:

$$G_{nn}(\omega) = - \left( b + \frac{1}{j\omega T_r} \right) \cdot \frac{1 - 2 j\omega T_c}{1 + j\omega T_c} \cdot \frac{1}{j\omega T_a + a}.$$

## QUELQUES APPLICATIONS DE LA SERVO-TECHNIQUE ET DES CALCULATEURS ANALOGIQUES DANS LA DÉFENSE ANTIAÉRIENNE

par L. AMBROSINI, Ingénieur dipl. E.P.F. Zurich, à Genève<sup>1</sup>

### 1. Introduction

La science actuelle des servo-mécanismes et des calculateurs est redevable, malheureusement dans une proportion importante, aux efforts déployés dans le domaine militaire pendant et après la deuxième guerre

<sup>1</sup> Conférence tenue le 7 décembre 1956 au 1<sup>er</sup> Congrès de l'ASPA, à Zurich.

mondiale. Devant les nécessités militaires, des crédits importants ont été utilisés, ayant comme conséquence la collaboration à grande échelle d'ingénieurs de toute première valeur, et la spécialisation de techniques nouvelles, aujourd'hui utilisables dans de nombreux secteurs de l'industrie, notamment dans l'automatique de production.