

Considérations sur le problème de la stabilité

Autor(en): **Gaden, Daniel**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin technique de la Suisse romande**

Band (Jahr): **71 (1945)**

Heft 22

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-54107>

Nutzungsbedingungen

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

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

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

Haftungsausschluss

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

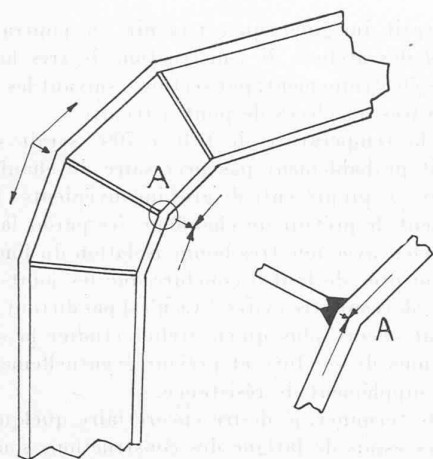


Fig. 12.

paraît pas entièrement justifié, j'ai montré que les deux choses étaient très différentes. On a par exemple tendance à vouloir tout arrondir dans les nœuds, dans les attaches, et cette pratique me paraît souvent conduire à de graves erreurs. Comment voulez-vous qu'un fer plat cintré travaille dans de bonnes conditions si sa forme est seulement maintenue en un seul point qui est son point d'attache avec l'âme ? (fig. 10).

Que l'on évite les changements brusques de section, rien de mieux, mais en ce qui concerne les ailes, tout changement de direction devrait se faire seulement en un point où se trouve une liaison efficace avec l'âme (fig. 11 et 12).

Je laisserai pour la journée de discussion qui aura lieu en automne, plusieurs questions qu'il serait intéressant d'examiner, par exemple la question des raidissements de toutes les surfaces en tôle et tout spécialement des constructions navales.

Contribution à l'étude des régulateurs de vitesse

Considérations sur le problème de la stabilité

par Daniel Gaden, ingénieur,
directeur des Ateliers des Charmilles, Genève¹.

L'Ecole d'Ingénieurs de Lausanne vient de recevoir en hommage un ouvrage qui lui fait honneur, provenant d'un des meilleurs, parmi ses anciens élèves. Le « Bulletin Technique » est heureux de pouvoir s'associer à cette manifestation en donnant de ce volume remarquable le compte rendu qu'on va lire (Réd.).

Le problème de la stabilité dont il s'agit est principalement — l'auteur prend soin de le préciser — celui de la marche d'une turbine hydraulique, munie d'un régulateur automatique de vitesse; mais diverses considérations qu'il expose s'étendent au cas de n'importe quelle machine motrice et donnent à l'ouvrage une portée générale qui déborde dans tout le domaine du réglage des centrales génératrices d'un réseau d'énergie électrique.

Le problème date du jour où Watt, vers 1784, construisit son premier pendule à boules. Il trouva sa première solution dans le cas du réglage indirect quand, à la suite des travaux de Joseph Farcot, le régulateur de vitesse fut doté par Paul Piccard d'un asservissement de la tringlerie du tachymètre à force centrifuge au piston du servo-moteur de commande du distributeur de la machine motrice. L'asservissement assurait bien la stabilité, mais du même coup provoquait un *statisme*, c'est-à-dire donnait au réglage la propriété parfois gênante de faire tourner la machine plus vite en marche à vide qu'à pleine charge. Il a dès lors fallu chercher, tout en réservant la stabilité de réglage, à limiter ce statisme à une valeur admissible ou même à le faire progressivement disparaître, quand il constituait un inconvénient.

Nombreuses sont les solutions empiriques données à ce problème qui tient en éveil depuis des dizaines d'années l'ingéniosité des constructeurs. Assez mince était en revanche à ce sujet la théorie, qui vient de trouver dans l'ouvrage de D. Gaden, un appont considérable et de tout premier ordre. Il s'agissait en effet de passer en revue le comportement dynamique,

non seulement du régulateur à simple tachymètre avec asservissement permanent ou temporaire, mais aussi le régulateur accéléro-tachymétrique dont on sait la sensibilité et la rapidité de réglage avec lesquelles il est à même d'agir.

Les trois premiers chapitres de l'ouvrage fixent les définitions, les phases successives du réglage, établissent les équations principales du mouvement du régulateur et du mouvement des masses tournantes du groupe, pour finalement intégrer le système d'équations différentielles simultanées et établir les conditions dans lesquelles, pour chaque cas, le mouvement de réglage est *amorti*, c'est-à-dire sa stabilité est assurée, soit que ce mouvement comporte des oscillations d'amplitude décroissante, soit qu'il s'effectue selon une loi apériodique.

Il s'agit moins, dans toute cette recherche, des variations importantes de la charge que des *petites* oscillations se produisant à la suite d'un faible écart de réglage, lorsque la charge du groupe demeure constante, étant admis que, si de *petites* oscillations s'amortissent, de plus grandes ne peuvent que s'amortir a fortiori. Pendant cette démonstration, dont on admire la clarté, l'auteur vous conduit pas à pas dans le jeu des divers organes constituant le dispositif de réglage, dose les hypothèses qui permettent de résoudre le problème sans le fausser, met en évidence des grandeurs caractéristiques qui groupent en elles-mêmes toutes les données essentielles du problème. L'appareil mathématique mis en jeu à ce propos permet entre autres de montrer comment, *au point de vue de la stabilité* du réglage, le jeu de l'accéléromètre est l'équivalent de l'asservissement permanent ou temporaire d'un régulateur à simple tachymètre, à cette différence près toutefois que l'accéléromètre réagit directement à l'effet de l'accélération, tandis que l'effet d'un asservissement ne se fait sentir qu'indirectement; il va de soi qu'en cas de variation de la charge (ce qui ne constitue plus le problème de la stabilité) le jeu de l'accéléromètre est tout différent de celui du tachymètre et autrement avantageux que ce dernier, puisqu'il n'a pas à attendre, pour réagir, un écart de vitesse suffisant.

Le lecteur appréciera sans doute l'introduction de termes nouveaux pour définir, non seulement qualitativement, mais quantitativement des « temps » typiques; ainsi

la promptitude du réglage, qui détermine la vitesse de variation de la puissance produite à laquelle le réglage peut satisfaire, lorsqu'il est sollicité par un très faible écart de vitesse ou par une faible accélération;

¹ 1 vol. 253 pages, 32 figures. — Editions La Concorde, Lausanne 1945, broché Fr. 21.—, relié Fr. 27.—.

la dosage accélérométrique du régulateur, un temps qui donne la mesure du rapport existant dans un régulateur complet entre l'effet accélérométrique et l'effet tachymétrique ;

la rigidité d'un asservissement temporaire qui définit la vitesse avec laquelle l'effet de cet asservissement disparaît progressivement dans le temps.

Si les équations prennent une allure relativement simple, c'est que l'auteur a fait usage partout de « valeurs relatives », ce qui implique qu'il est vrai pas mal de définitions algébriques supplémentaires, mais très simples, qui apparaissent comme un outil naturel dans ce genre de développement.

Avant le chapitre IV, l'étude du réglage est faite sans préoccupation d'un effet du coup de bélier. Les résultats n'en sont valables (du moins dans le domaine des turbines hydrauliques) que dans quelques cas très particuliers, mais c'est bien partout ce qu'on croyait pouvoir faire il y a peu de temps encore, redoutant d'introduire dans l'appareil mathématique la variation de pression d'un fluide compressible dans une conduite élastique. Dès le chapitre IV l'auteur étudie, d'abord en elle-même, l'oscillation de pression produite par une petite oscillation de réglage, s'effectuant selon une loi sinusoïdale et il commence par démontrer — condition fondamentale pour le constructeur — que les mouvements du régulateur ne peuvent, en général, entrer en résonance avec les oscillations de pression dans la conduite. Puis il examine les différents cas possibles, selon lesquels

la période de l'oscillation de réglage T''
et la période T' = 2 π du coup de bélier

se trouvent, l'une vis-à-vis de l'autre,

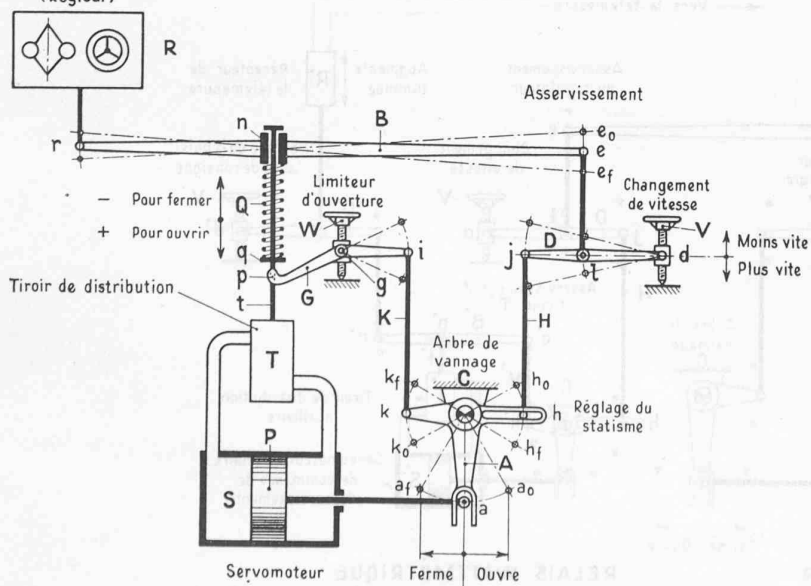
1° dans un rapport égal à 1.

C'est un cas très particulier : Il y a alors résonance et la surpression la plus forte est

$$\Delta h_{max} = 1 : \theta = 2 \cdot \Delta q_0 \max$$

soit, en valeur relative, le double de l'écart de réglage en débit ou — si l'on préfère la terminologie d'Allievi — le double de l'écart de degré d'ouverture. En outre, l'oscillation de pression est, dans ce cas, en opposition de phase avec l'oscillation de réglage.

Organes détecteurs (Régleur)



Eléments essentiels d'un régulateur automatique de vitesse.

2° dans un rapport extrêmement grand.

L'oscillation de la pression relative a alors pour amplitude

$$\Delta h_{max} = 2\pi \cdot \frac{cV}{T''} \cdot \Delta q_0 \max$$

et tend à se mettre en quadrature avec l'oscillation de réglage.

Mais ce sont là deux cas extrêmes. Généralement les périodes T'' et T' sont entre elles...

3° dans un rapport intermédiaire, qui soit ou non un nombre entier Z .

Alors la surpression et son angle de déphasage (compris entre $-\pi$ et $-\pi/2$) ont des expressions moins simples ; pour en donner la valeur immédiate, D. Gaden a établi patiemment des synopsis cartésiennes qui permettent d'un seul coup d'œil d'établir le rapport

$$\Delta h_{max} : \Delta q_0 \max$$

ainsi que l'angle de déphasage φ_m de l'oscillation de pression Δh par rapport à l'oscillation de réglage Δq_0 en fonction des caractéristiques

$$\rho = aV_0 : 2gH_0 \text{ de la conduite et}$$

$$Z = T'' : T' \text{ le rapport de ces deux périodes.}$$

Or l'oscillation de pression peut à son tour être décomposée en deux oscillations composantes :

l'une Δh_r en opposition de phase avec l'oscillation de réglage

$$\Delta h_r = \Delta h_{max} \cos \varphi_m$$

l'autre Δh_s en quadrature avec l'oscillation de réglage et dont l'amplitude a pour valeur

$$\Delta h_s = \Delta h_{max} \sin \varphi_m$$

Deux autres synopsis cartésiennes donnent indirectement, en fonction de ρ et de Z , les valeurs de Δh_r et de Δh_s par le moyen de deux coefficients caractéristiques r et s , à l'aide desquels on peut écrire les composantes ci-dessus sous la forme

$$\Delta h_r = r \cdot 2 \Delta q_0 \max$$

$$\Delta h_s = s \cdot 2\pi \frac{cV}{T''} \cdot \Delta q_0 \max$$

ce qui revient à rapporter l'amplitude de ces composantes à l'amplitude des oscillations de pression de même phase qui auraient lieu dans les cas extrêmes rappelés sous 1° et 2°.

Puis l'auteur, utilisant ces coefficients r et s dans le chapitre V, tient compte des effets du coup de bélier. Il examine séparément les conséquences sur l'oscillation de réglage des deux composantes de l'oscillation de pression :

d'abord la part de la composante Δh_r qui produit une augmentation fictive de l'inertie polaire des masses tournantes du groupe,

puis l'effet complet des deux composantes Δh_r et Δh_s , d'où il apparaît clairement que la seconde entraîne toujours un risque d'instabilité du réglage, et il s'agit alors de serrer le problème de beaucoup plus près qu'on ne peut le faire dans ce bref aperçu.

A ces deux composantes peut s'ajouter l'effet de l'écart de vitesse du groupe sur la différence entre le couple moteur et le couple résistant, effet favorable quand la pente de la courbe du couple résistant (en fonction de la vitesse angulaire) est algébriquement plus grande que celle du couple moteur.

On trouve, dans le chapitre VI, toute l'illustration de la discussion analytique précédente, présentée à l'aide de diagrammes vectoriels, ainsi qu'un résumé des effets favorables à la stabilité et de ceux qui tendent à la rendre impossible; langage neuf — dans ce domaine — et particulièrement suggestif.

Dans le chapitre VII, l'auteur traite le problème du point de vue du constructeur qui a à remplir, dans des circonstances données et en cas de décharges brusques importantes d'un groupe turbo-générateur, des conditions imposées de surpression et de survitesse:

1° Le temps de fermeture du pointeau ou du vannage est choisi assez long pour ne jamais atteindre la surpression maximum imposée par le constructeur de la conduite forcée et, de ce temps de manœuvre du distributeur, dépend directement — tout au moins dans un réglage à simple action:

2° Le choix du moment d'inertie polaire des masses tournantes du groupe, de façon à n'atteindre pas l'écart de vitesse prescrit par l'exploitant.

Avec cette possibilité, dans le réglage à double action, de disjoindre le réglage de la puissance, du réglage du débit et de mettre au point, par des temps de manœuvre différents mais coordonnés, d'une part la survitesse, d'autre part la surpression résultant d'une variation de charge du groupe.

Or c'est précisément ce problème fondamental du «choix du PD²» qui demande une retouche, pour englober celui de la stabilité de la marche sous tous les régimes. Notre auteur y introduit avec habileté les conditions d'amortissement des petites oscillations du réglage, compte tenu des différents facteurs énumérés plus haut, les uns toujours favorables ou défavorables à la stabilité, les autres à effet variable selon le régime de marche du groupe. D. Gaden, tout au moins pour une première approximation, de portée d'ailleurs tout à fait générale, en vient même à circonscrire les valeurs de ces coefficients et à les inclure dans un coefficient unique K qui doit répondre — pour qu'il y ait stabilité du réglage — à la condition

$$K < \frac{\overline{\Theta}' \cdot T}{\left(\frac{3}{2} \theta\right)^2}$$

C'est une expression homogène qui contient, on va le voir, toutes les données du problèmes:

$\overline{\Theta}'$ = temps caractéristique de la promptitude de réglage, à savoir l'aptitude du régulateur à maintenir la vitesse du groupe (ou, si l'on veut, la fréquence du courant) entre des limites plus ou moins étroites, en face des petites variations de la puissance consommée,

$T = \frac{I\Omega_0^2}{P_0}$ temps caractéristique de l'inertie spécifique du groupe ou, si l'on préfère, le temps de mise en vitesse des masses tournantes, à vide, de la vitesse nulle à la vitesse normale, lorsqu'elles sont sollicitées par un couple constant de valeur égale au couple de régime normal,

$\Theta = \frac{LV_0}{gH_0} = \rho\mu$ temps caractéristique de la sensibilité de la conduite à l'égard du coup de bélier ou encore le temps de mise en vitesse des masses d'eau de la conduite, de la vitesse nulle à la vitesse normale, sous l'effet d'une différence de pression égale à la chute H₀.

Il s'agit, en d'autres termes, de s'assurer dans les masses tournantes du groupe d'une inertie spécifique ayant au moins pour valeur

$$T > \frac{K}{\overline{\Theta}'} \cdot \left(\frac{3}{2} \theta\right)^2$$

Ecrite sous la forme du PD² en combinant les formules mêmes données par l'auteur aux pages 45 et 147 de son ouvrage, la condition précédente devient:

$$PD^2 > \frac{27K}{\left(\frac{n}{100}\right)^2} \cdot \frac{N_0}{\overline{\Theta}'} \left\{ \frac{3}{2} \cdot \frac{LV_0}{gH_0} \right\}^2$$

dans laquelle notamment:

N₀ représente la puissance nominale de la turbine en chevaux

n sa vitesse de rotation exprimée en nombre de tours par minute.

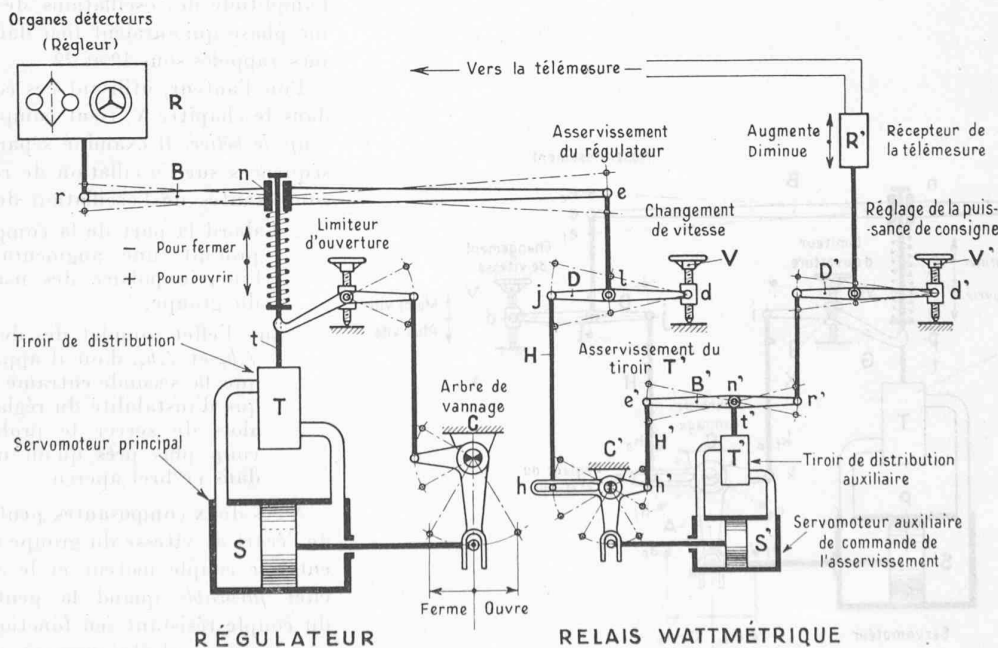


Schéma d'un régulateur de vitesse équipé en vue du réglage « fréquence-puissance ».

On possède ainsi ce qu'on devrait appeler *la condition de stabilité de Gaden*, formule qui certainement va être appelée à jouer, chez les constructeurs de turbines, le même rôle que joue déjà par ailleurs (dans le calcul d'une chambre d'équilibre) la « condition de stabilité de Thoma ».

Assurer la stabilité de réglage d'un groupe est une chose ; assurer celle d'un ensemble de groupes, couplés en parallèle sur un réseau, en est une autre, car ils doivent tous subvenir aux variations de la puissance totale à fournir et effectuer le réglage de la fréquence *commune*. La condition à réaliser par chaque groupe, c'est qu'il soit stable dans son fonctionnement isolé ou tout au moins — s'il était instable en tournant seul — qu'il fonctionne en parallèle avec d'autres groupes qui soient à même de réaliser la stabilité de l'ensemble selon des conditions qu'indique précisément le chapitre VIII. L'auteur rappelle par ailleurs la répartition de la charge totale qu'on peut établir entre différents groupes dont les statismes sont réglés à des valeurs différentes, lors de la marche en parallèle ; à la condition toutefois que ces statismes (exception faite de celui d'un seul des groupes — le « chef d'orchestre ») aient des valeurs différentes de zéro, car un réglage *isodrome* étendu à plusieurs groupes ne déterminerait par lui-même aucune détection précise de la part de l'un ou de l'autre des régulateurs et la prise de la charge par les différents groupes demeurerait incohérente.

Au chapitre IX se trouvent décrits les dispositifs courants permettant de faire varier soit la vitesse du groupe, soit le statisme du régulateur, ou de limiter l'ouverture et, par là même, la puissance du groupe. L'auteur fait ici un examen critique des façons heureuses ou contre-indiquées selon lesquelles ces dispositifs peuvent être utilisés en vue du réglage de la fréquence, de la puissance ou de « fréquence-puissance », ce dernier étant appelé à trouver d'intéressantes applications dans le domaine des échanges d'énergie entre réseaux interconnectés. Et l'on passe une dernière fois en revue, dans le chapitre X, les lois générales qui résultent de cet exposé brillant, lequel cependant ne cache rien des difficultés réelles et montre bien les domaines dans lesquels il convient de rester prudent et de munir ses calculs des marges nécessaires.

Dans trois appendices, l'auteur apporte encore des données utiles au praticien, rappelle le calcul de la survitesse en cas de décharge brusque et totale, montre l'effet des caractéristiques multiples d'une conduite sur l'oscillation de pression engendrée par une oscillation de réglage et donne enfin le détail des mesures du temps \mathcal{T}' caractéristique de la promptitude de réglage auxquelles il a procédé dans diverses installations en vue de contrôler expérimentalement sa condition de stabilité. Ces appendices contribuent à donner à l'ensemble de l'ouvrage un intérêt pratique de premier plan, tant pour les constructeurs mécaniciens et électriciens que pour les exploitants des réseaux.

Emile Faguet avait coutume de dire que les livres d'idées se lisent autant en tournant les feuillets de gauche à droite qu'en les tournant de droite à gauche — à condition, bien entendu, d'effectuer d'abord le trajet dans le bon sens. Je pense qu'il en est ainsi de celui-ci, dont l'unité apparaît magnifique dans un domaine pourtant complexe et c'est le plus beau compliment qu'on puisse sans doute faire à l'au-

teur : d'être arrivé à dominer suffisamment le dispositif multiple d'un réglage automatique pour pouvoir mettre au point, à chaque instant et dans chacune de ses parties, des hypothèses ingénieuses et pourtant simples, qui permettent encore de manipuler l'appareil de calcul avec toutes les chances d'obtenir des résultats corrects et immédiatement comparables à ceux de l'expérience.

L'époque que nous vivons a montré surabondamment vers quel funeste destin conduisent des points de vue bornés et des recherches égoïstes. Aussi peut-on se réjouir quand un homme d'expérience livre généreusement le fruit de ses études et, vous prenant pour ainsi dire par la main, vous conduit à pied d'œuvre pour constater avec lui et la complexité du problème et les solutions qui, dans la réflexion, se révèlent à vous progressivement.

Par l'excellence de la méthode, la clarté et — on peut bien le dire — l'éloquence de l'exposé, on a certainement ici dans la main un outil remarquable, qui fait honneur et au directeur des Ateliers des Charmilles et à l'organisme tout entier qui l'a rendu possible.

Genève, octobre 1945.

JULES CALAME.

SOCIÉTÉ SUISSE DES INGÉNIEURS ET DES ARCHITECTES

Communiqué du Secrétariat.

Depuis le début de cette année, le délégué aux Possibilités de travail édite un bulletin d'information destiné à renseigner les autorités fédérales, cantonales et communales, de même que l'industrie privée, sur tous les problèmes qui touchent la création de possibilités de travail. Le délégué envisage de faire paraître six numéros par an, dont l'un sera consacré exclusivement à la construction des logements. Deux autres cahiers donneront un aperçu de l'activité dans le bâtiment.

On peut s'abonner au bulletin, qui paraît en français et en allemand, auprès de la Centrale fédérale du matériel et des imprimés, Palais fédéral, Berne, au prix de 4 fr. par an.

Pour toutes les personnes qui s'intéressent aux questions en rapport avec la création de possibilités de travail, le génie civil et le bâtiment, le bulletin du Délégué est un organe indispensable de documentation. Nous recommandons donc à tous nos lecteurs de s'abonner à cette publication.

NECROLOGIE

M. Louis Chabloz, ingénieur.

Le 23 septembre, M. Louis Chabloz, ingénieur, décédait brusquement des suites d'une opération relativement anodine et sans qu'auparavant son état de santé ait donné lieu à des craintes ou même à des inquiétudes à son entourage. C'est avec une stupéfaction chagrinée que ses nombreuses connaissances ont appris ce départ subit, car peu de jours auparavant, il s'était entretenu normalement avec les personnes qu'il rencontrait, et nul n'avait été effleuré par l'idée qu'il s'agissait d'une dernière entrevue.