

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 51 (1925)
Heft: 24

Artikel: A propos de méthodes d'accouplement des turbines hydrauliques
Autor: Thomann, R.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-39548>

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: 10.07.2025

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

BULLETIN TECHNIQUE

DE LA SUISSE ROMANDE

Réd. : D^r H. DEMIERRE, ing.

Paraissant tous les 15 jours

ORGANE DE PUBLICATION DE LA COMMISSION CENTRALE POUR LA NAVIGATION DU RHIN
 ORGANE DE L'ASSOCIATION SUISSE D'HYGIÈNE ET DE TECHNIQUE URBAINES
 ORGANE EN LANGUE FRANÇAISE DE LA SOCIÉTÉ SUISSE DES INGÉNIEURS ET DES ARCHITECTES

SOMMAIRE : A propos de méthodes d'accouplement des turbines hydrauliques, par R. THOMANN, ingénieur, professeur à l'Université de Lausanne. — Projet de traversée du Pas-de-Calais au moyen d'une double jetée formant chenal de navigation et viaducs pour routes et voies ferrées. — Concours pour l'étude d'un hospice orthopédique de la Suisse romande à édifier à Lausanne (suite). — La politique de développement de la Société « L'Energie de l'Ouest-Suisse ». — Exposition de la route à Milan. — BIBLIOGRAPHIE. — CARNET DES CONCOURS. — Service de placement.

A propos de méthodes d'accouplement des turbines hydrauliques

par

R. THOMANN, ingénieur, Professeur à l'Université de Lausanne.

Lorsqu'une installation hydro-électrique est capable d'utiliser tout le débit d'eau disponible ou que l'excédent de débit non absorbé par les turbines pendant la marche à charge réduite peut être accumulé, le simple souci du fonctionnement économique de l'installation exigera que les turbines soient aptes à utiliser au mieux l'eau disponible : il est d'ailleurs facile de satisfaire à cette exigence au moyen de turbines dont les variations du rendement avec le débit — dans le domaine des valeurs de ce dernier correspondant aux conditions de service de la machine — ne sont pas trop amples (turbines Pelton et Francis à nombre de tours spécifique moyennement élevé). La charge totale est alors simplement répartie uniformément entre les différents groupes générateurs de l'usine, ou bien, si les unités sont de puissance différente, en proportion de leur puissance maximum ; cette méthode de répartition de la charge est la plus favorable pour les génératrices électriques. Le réglage des régulateurs pour sa mise en œuvre est simple et on remplit ainsi, comme il sera exposé, les conditions de la meilleure utilisation.

Mais les circonstances sont tout autres dès qu'il s'agit de turbines dont le rendement, en fonction du débit, est représenté par des courbes plongeant rapidement des deux côtés du maximum, telles celles des turbines à hélice à nombre de tours spécifique élevé. Dans ce cas, des pertes notables peuvent résulter du couplage ou du découplage des unités d'après le procédé usuel, de sorte qu'il est opportun de discuter dans quelles conditions ce procédé usuel peut être conservé et quand et comment il doit être modifié.

Afin de pouvoir commencer cette discussion par l'examen du cas général, nous supposerons une installation équipée de deux turbines de puissances et de nombres de tours spécifiques différents (soit 600 et 720). En période de faible débit la petite turbine travaille seule jus-

qu'à ce que le débit disponible corresponde au débit à pleine ouverture de la machine. Le débit continuant à croître, à un moment encore à déterminer la petite turbine est arrêtée et la grande est alors mise seule en service jusqu'à ce qu'elle travaille à pleine ouverture. Ensuite la petite turbine est de nouveau mise en service accouplée avec la grande, et son ouverture est augmentée jusqu'à ce que toutes deux travaillent à pleine charge.

Il y a donc lieu de discuter les deux questions :

1^o Quand convient-il de substituer la grande turbine à la petite et, secondement, d'accoupler la grande avec la petite ?

2^o Dans quelle proportion convient-il de doser les débits afférents à chaque turbine quand elles marchent accouplées.

Couplage et découplage des turbines.

Sur la fig. 1 les rendements des deux turbines précitées sont représentés en fonction du débit. Les valeurs concernant la petite turbine sont affectées de l'indice a et celles qui se rapportent à la grande turbine, de l'indice b . Le débit disponible est désigné par Q et le débit écoulé par les turbines, par Q_a , respectivement Q_b ; η est le rendement avec lequel le débit disponible est utilisé, η_a le rendement de la petite turbine, η_b celui de la grande.

Dans l'hypothèse que le débit disponible croît à partir de sa valeur minimum, il sera utilisé d'abord par la petite turbine avec les rendements correspondant à la courbe η_a . Lorsque ce débit croît au delà de la capacité de la turbine (a) on pourrait être enclin, et c'est souvent le cas dans la pratique, à mettre immédiatement la petite turbine (a) hors de service et à lui substituer la grande turbine (b). Mais l'examen des deux courbes de rendement (fig. 1) montre que, dans ces conditions, le rendement fléchissant brusquement de 83 % à 60 % il est incontestablement préférable de maintenir encore quelque temps la petite turbine en service malgré qu'une faible quantité d'eau soit perdue. Il s'agit maintenant de déterminer le débit pour lequel la substitution de la grande turbine à la petite peut être opérée sans perte, c'est-à-dire pour lequel la grande turbine développe la même puissance que la petite. A cet effet, on pourrait

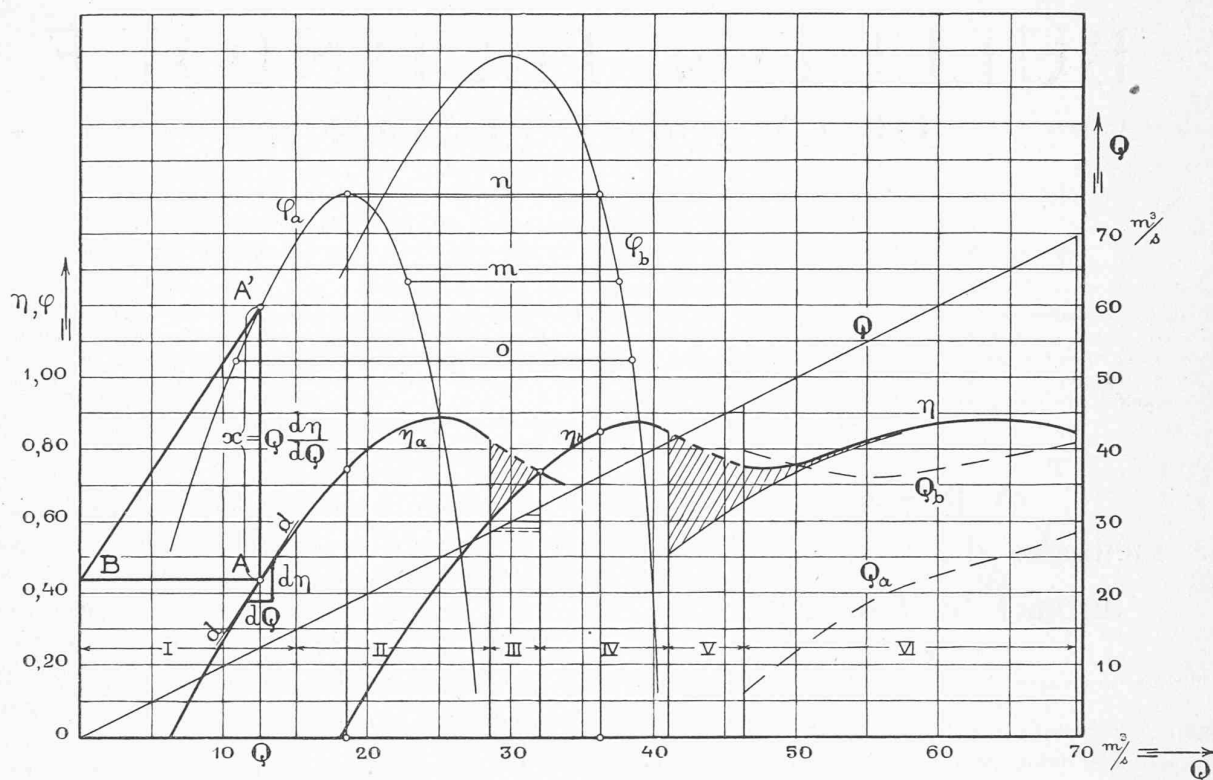


Fig. 1. — Turbine (a) : turbine-hélice ; $n_s = 600$; $Q_{max.} = 28,5 \text{ m}^3/\text{sec.}$

Turbine (b) : » $n_s = 720$; $Q_{max.} = 41 \text{ m}^3/\text{sec.}$

Mode de service. — Zone I et II : la turbine (a) utilise, seule, tout le débit disponible. — Zone III : turbine (a) seule en service, excédent de débit. — Zone IV : la turbine (b) utilise, seule, tout le débit disponible. — Zone V : turbine (b) seule en service, excédent de débit. — Zone VI : les deux turbines (a) et (b) couplées de façon que Q_a est toujours égal à Q_b .

tracer les courbes des puissances des turbines et chercher l'intersection de la courbe correspondant à la grande turbine avec l'horizontale menée par le point terminus de la courbe correspondant à la petite turbine, mais on peut facilement aussi trouver ce point à l'aide des courbes de rendement.

Si la petite turbine est seule en service et que le débit disponible Q soit plus grand que le débit Q_a absorbé par la turbine, la puissance utile, en ch., développée par cette turbine sera

$$N_a = \frac{\gamma Q_a H \eta_a}{75}$$

et la puissance disponible étant

$$N_Q = \frac{\gamma Q H}{75}$$

le rendement, rapporté au débit disponible pour l'installation, sera donc

$$\eta = \frac{Q_a \eta_a}{Q}$$

$$Q \eta = Q_a \eta_a$$

de sorte que η est représenté en fonction de Q par une hyperbole équilatère passant par le point terminus de la courbe des η_a . Il est facile de construire des points de cette hyperbole par la méthode connue. (Voir fig. 3, la construction du point P' à partir de P) La tangente peut aussi être construite si on considère qu'elle doit avoir

par rapport au rayon vecteur allant de l'origine des coordonnées au point de contact, la symétrie indiquée sur la figure 2.

Le segment d'hyperbole reliant les deux courbes de rendement devra, naturellement, être situé aussi haut que possible ; la solution la plus favorable entre toutes sera donc celle qui correspondra à l'hyperbole tangente à la courbe des η_a . Il est facile de trouver, à l'aide de la construction de la tangente mentionnée ci-dessus, la tangente correspondante et, par suite, le point de contact lui-même. Le débit et l'ouverture correspondante relatifs au point de contact de la courbe des rendements avec l'hyperbole sont ceux qui correspondent à la puissance maximum de la turbine sous la chute envisagée et à vitesse angulaire constante. Il est sans intérêt de pousser le degré d'ouverture de la turbine au delà de ce point. Si la courbe des rendements est aplatie, comme c'est le cas pour les turbines Pelton ou les turbines Francis normales (voir sur la fig. 3 le point P de la courbe η_a) le point représentant la puissance maximum sort ordinairement du domaine de service normal de la turbine ; celle-ci ne peut pas être assez ouverte pour atteindre ce maximum de puissance. Mais si la courbe des rendements plonge rapidement des deux côtés du maximum, comme c'est le cas pour les turbines à hélice à aubes motrices fixes, il arrivera fréquemment qu'à partir d'une certaine position de l'organe de réglage la puissance diminuera, bien que le débit croisse ; des courbes de cette espèce seront

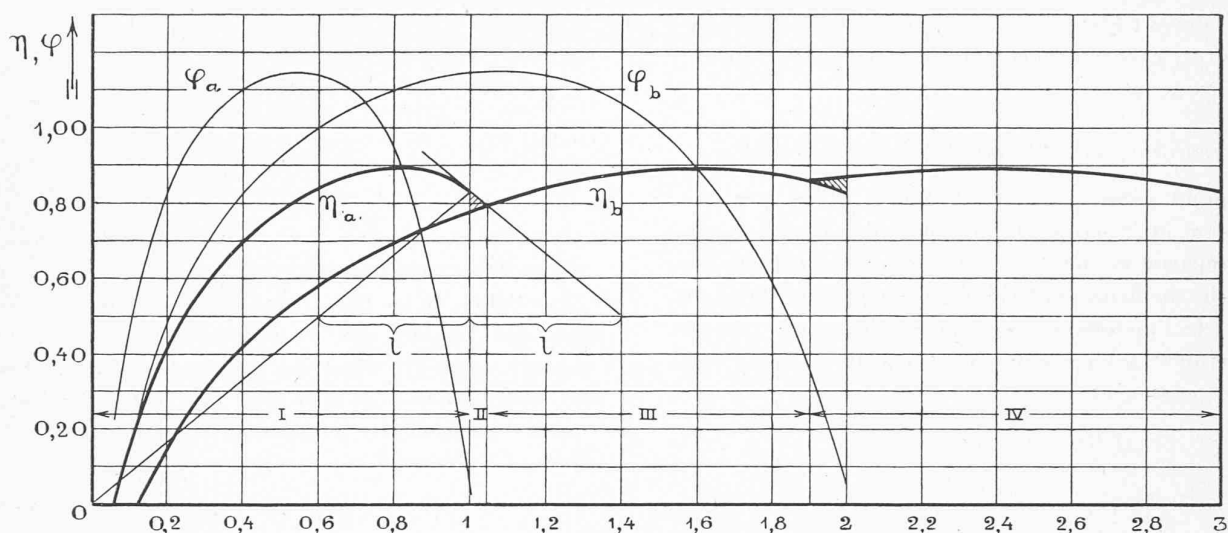


Fig. 2. — Deux turbines Francis $n_s = 200$, débit maximum de (b) égal à deux fois celui de (a).

Mode de service. — Zones I et II : turbine (a) seule en service, petit excédent de débit dans la zone II. — Zone III : turbine (b) seule en service. — Zone IV, commençant avant que la turbine (b) soit complètement ouverte : turbines (a) et (b) couplées et travaillant sous des charges proportionnellement égales.

touchées par l'hyperbole près du maximum et le domaine d'application de ces turbines à grande vitesse, déjà restreint par essence, sera encore réduit de ce chef.

A ce propos examinons brièvement une question d'ordre juridique qui se pose parfois, en corrélation avec ces faits. Pour des raisons que nous ne discuterons pas ici, les valeurs du rendement garanties sont ordinairement fixées intentionnellement au-dessous des valeurs escomptées et, en particulier, un certain « jeu » est laissé entre le maximum élevé des turbines à hélice et la courbe de garantie de sorte que celle-ci est un peu plus aplatie que la courbe représentant les résultats effectifs des essais de réception. Cette précaution fait naître la possibilité que l'ouverture correspondant à la puissance maximum tombe à l'intérieur du champ des conditions de service non pour la courbe de garantie mais pour la courbe des rendements effectifs. Le propriétaire de la turbine est, en général, peu satisfait de constater que la puissance développée par sa machine s'abaisse de nouveau à partir d'une certaine position du régulateur et il n'est que trop enclin à attribuer ce phénomène à un défaut de la turbine. Pourvu que la puissance maximum garantie soit atteinte, même à un débit plus faible, mais, par suite avec un rendement supérieur, il n'y a cependant aucun motif à réclamation. Le fournisseur de la turbine doit seulement s'engager à empêcher, par une construction appropriée du régulateur ou des organes de réglage, que la turbine ne puisse être ouverte au delà de la position correspondant à la puissance maximum. Cette précaution est nécessaire non seulement parce qu'une plus grande ouverture agirait défavorablement mais encore parce que le réglage est instable en ce point.

Sur le diagramme (η , Q) la conjoncture supposée est dénotée par le fait que la courbe des rendements aux essais et l'hyperbole de liaison qui lui est tangente sont

situées, jusqu'au débit maximum garanti, au-dessus de la courbe des rendements garantis. En revanche si, contrairement à l'hypothèse ci-dessus, la courbe des rendements effectifs tombe au-dessous de la courbe garantie avant que le débit maximum soit atteint c'est que la turbine ne satisfait pas aux conditions de la garantie.

Après cette digression reprenons la discussion du côté technique du problème. Il a été établi ci-dessus que le point d'intersection avec la courbe des rendements de la grande turbine (b) de l'hyperbole de liaison correspondant à la courbe des rendements de la petite turbine (a) marque le débit à l'apparition duquel le groupe (b) doit être mis en service. Des débits inférieurs à celui-ci sont mieux utilisés au moyen de (a) même si (zone III de la Fig. 1) le débit disponible dépasse la capacité d'absorption de la turbine (a). Le gain de rendement résultant de cette marche est représenté par le premier des triangles de la Fig. 1 hachurés obliquement tandis que le premier triangle hachuré horizontalement dans la zone III représente la quantité d'eau non utilisée.

Dans la zone IV l'ouverture de la turbine (b) croît avec le débit disponible jusqu'à ce que la pleine ouverture ou la position correspondant à la puissance maximum soit atteinte.

A partir de ce point (zone V) la turbine (b) est maintenue seule en service, à pleine ouverture, jusqu'à ce que la somme des puissances des turbines (a) et (b) ait atteint la puissance, à pleine ouverture, de la turbine (b) pour le même débit disponible. L'intervention de cette conjoncture sera indiquée sur le diagramme des rendements par l'intersection de la courbe des rendements (b), ou de l'hyperbole qui la prolonge, avec la courbe des rendements de (a) + (b). Mais cette dernière courbe qui dépend du mode d'accouplement des deux

turbines devant être aussi élevée que possible, il y a lieu de discuter les conditions qui permettent de satisfaire à cette exigence.

La répartition du débit entre les turbines accouplées.

Lorsqu'un débit donné Q_c doit être utilisé par deux turbines (a) et (b) la question se pose de savoir comment il faut répartir ce débit Q_c entre les deux turbines pour obtenir la meilleure utilisation, ou pour que le rendement η de l'installation soit aussi élevé que possible. Cette dernière grandeur se déduit directement de l'équation des puissances

$$\gamma Q_c H \eta = \gamma Q_a H \eta_a + \gamma Q_b H \eta_b$$

à savoir

$$\eta = \frac{Q_a \eta_a + Q_b \eta_b}{Q_c}$$

Pour que le rendement composé η soit maximum pour une valeur déterminée de Q_c , il faut que la dérivée de η par rapport à une des variables Q_a ou Q_b soit nulle, par exemple :

$$\frac{d\eta}{dQ_a} = \frac{\eta_a + Q_a \frac{d\eta_a}{dQ_a} + \eta_b \frac{dQ_b}{dQ_a} + Q_b \frac{d\eta_b}{dQ_a}}{Q_c} = 0$$

et, puisque

$$Q_c = Q_a + Q_b ; dQ_b = -dQ_a$$

on doit avoir aussi

$$\eta_a + Q_a \frac{d\eta_a}{dQ_a} = \eta_b + Q_b \frac{d\eta_b}{dQ_b}$$

Par conséquent, les débits doivent être répartis de telle sorte que l'expression

$$\eta + Q \frac{d\eta}{dQ}$$

ait la même valeur pour les deux turbines.

Ces valeurs peuvent être facilement calculées dès que

$$\varphi_a = \eta_a + Q_a \frac{d\eta_a}{dQ_a}$$

et

$$\varphi_b = \eta_b + Q_b \frac{d\eta_b}{dQ_b}$$

sont représentées en fonction du débit, ce qui se fait au moyen de la règle seule, et comme suit :

A partir d'un point A de la courbe des rendements (Fig. 1) on mène une horizontale et, par le point d'intersection B de cette droite avec l'ordonnée d'abscisse nulle, on trace une parallèle à la tangente au point A de la courbe des rendements : le point A' d'intersection avec l'ordonnée de A est le point cherché de la courbe (φ). On se convaincra de l'exactitude de cette construction en comparant le triangle rectangle élémentaire de côtés $d\eta$ et dQ avec le triangle semblable ABA'. On a, en effet

$$\frac{d\eta}{dQ} = \frac{x}{Q} ; x = Q \frac{d\eta}{dQ}$$

et comme la longueur x est portée sur l'ordonnée, l'extrémité de cette longueur coïncide réellement avec le point cherché. On obtiendra ainsi très rapidement un nombre suffisant de points de la courbe (φ) qui passe, comme on le voit immédiatement, par le sommet de la courbe des η correspondante.

Les débits Q_a et Q_b satisfaisant à la condition posée sont alors donnés par les abscisses des points d'égale hauteur sur les courbes des (φ) ; par exemple, chacune des horizontales m , n et o (Fig. 1) marque sur les deux courbes deux points corrélatifs. Le débit total correspondant à une horizontale donnée est alors

$$Q_c = Q_a + Q_b$$

et le rendement des deux turbines :

$$\eta = \frac{\eta_a Q_a + \eta_b Q_b}{Q_c}$$

Les courbes de la dernière zone (VI) de la Fig. 1 ont été construites d'après ces considérations. Les turbines sont, naturellement, toutes deux ouvertes pour le débit maximum Q_c . Lorsque le débit diminue, les deux turbines ferment à peu près également et de façon que la ligne de jonction de deux points corrélatifs des courbes (φ) soit une horizontale. Celle-ci s'élève donc et prend successivement les positions m et n ; dans cette dernière position, elle passe par le sommet de la courbe (φ_a) de sorte qu'elle ne peut pas s'élever davantage sur cette courbe ; même observation pour la courbe (φ_b). L'intersection de n avec la courbe (φ_b) marque donc sur celle-ci un point de renversement. Jusqu'à ce que ce point soit atteint la turbine (b) ferme puis elle rouvre, bien que le débit total Q_c des deux turbines doive diminuer ; aussi la turbine (a) doit-elle fermer d'autant plus vite. Lorsque sa puissance est tombée à zéro ou presque elle est mise hors de service et complètement fermée tandis que la turbine (b) reste entièrement ouverte jusqu'à ce que le débit disponible ait diminué au point d'être égal au débit à pleine ouverture de cette turbine (zone V) ; à partir de ce point, le débit de la turbine est réglé conformément au débit disponible. Sur la figure 1 les gains réalisés par l'accouplement décrit ci-dessus sont représentés par les surfaces hachurées obliquement. Par gain il faut entendre la différence de rendement par rapport à la méthode généralement employée, suivant laquelle la turbine (b) est mise en service et la turbine (a) mise hors de service aussitôt que cette dernière peut travailler à pleine ouverture, la turbine (a) étant ensuite accouplée à (b) dès que (b) travaille à pleine ouverture.

Toutefois la méthode exposée ci-dessus de réglage optimum dans la zone VI est un peu compliquée et, bien qu'il ne fût pas impossible de construire un régulateur automatique fonctionnant à peu près suivant

les principes établis, il est préférable, en général, d'opérer d'après un plan plus simple. Par exemple, on pourrait, dans notre cas, travailler suivant le mode indiqué ci-dessus jusqu'à ce que la droite de jonction des points φ fût parvenue sur l'ordonnée 1, 2 et que le débit de la turbine (b) se fût abaissé à 38 m³/sec. A partir de ce point, l'ouverture de (b) serait maintenue invariable jusqu'à ce que la puissance développée par (a) se fût annulée, après quoi (b) serait de nouveau ouverte en plein et réglée suivant la méthode décrite ci-dessus.

Pendant les périodes de croissance du débit, les courbes seront naturellement décrites en sens inverse de celui qui correspond à la décroissance du débit.

Quelques cas particuliers.

Les considérations précédentes visent le cas général de l'accouplement de deux turbines de dimensions différentes et affectées de courbes de rendement différentes; envisageons maintenant rapidement comment les choses se passent lorsque deux turbines caractérisées par la même courbe des rendements (même n_s) mais de grandeurs différentes ou deux turbines du même type et de même grandeur travaillent ensemble.

Si les turbines accusent le même rendement pour les mêmes fractions $\frac{1}{4}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$ de leur débit maximum, leurs courbes des rendements ont les mêmes ordonnées pour les mêmes fractions du débit et seules les abscisses diffèrent (voir Fig. 2), une des courbes paraissant, par rapport à l'autre, dilatée dans la direction des abscisses. On voit facilement qu'il en est de même, dans les conditions supposées, pour les courbes (φ) , car dans l'expression

$$Q \frac{d\tau}{dQ}$$

Q et dQ variant proportionnellement au débit maximum des turbines, le facteur

$$\frac{Q}{dQ}$$

sera le même pour une même valeur de $d\tau$ prise dans la même position sur les deux courbes.

Si on ferme deux turbines de cette sorte à partir de la pleine ouverture de façon que la condition du meilleur rendement soit satisfaite, les horizontales coupent les courbes (φ) en des points qui correspondent aux mêmes fractions de leur débit total individuel: les turbines sont par exemple ouvertes simultanément au $\frac{1}{4}$, $\frac{3}{4}$ ou $\frac{1}{2}$ de leur pleine ouverture. Comme, dans notre hypothèse, les courbes des rendements ont les mêmes ordonnées pour les mêmes fractions du débit total individuel la condition à satisfaire peut aussi être exprimée comme suit: les charges des deux turbines, en fraction de leur pleine charge, doivent être maintenues égales si les deux machines doivent travailler avec le meilleur rendement global.

Sur la figure 2 sont tracées les courbes relatives à deux

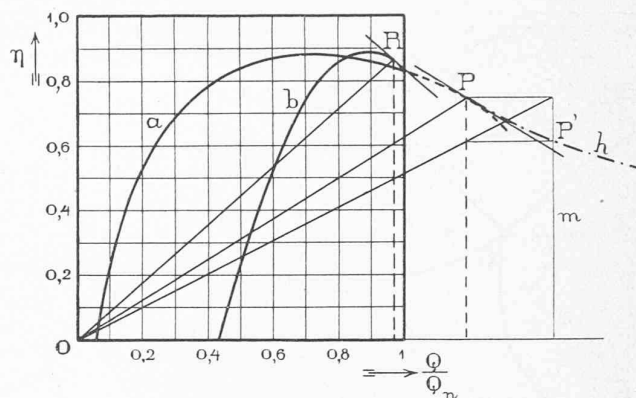


Fig. 3.

Turbine (a): turbine Francis ($n_s = 200$).

Turbine (b): turbine-hélice ($n_s = 700$), de même puissance que (a).

Pour (a) le point P correspondant à la puissance maximum est situé en dehors du domaine d'utilisation; pour (b), le point homologue R est situé à l'intérieur de ce domaine; par conséquent, la turbine (b) ne devrait pas être ouverte au delà du degré correspondant au point R.

turbines Francis de la même série $n_s = 200$, mais dont l'une est deux fois plus puissante que l'autre. Au surplus, ce diagramme correspond aussi aux conditions de service de trois turbines de même type et de même grandeur puisque la grande turbine peut toujours être remplacée par deux autres, également chargées, de mêmes type et grandeur que ceux de la petite. Il en résulte que trois turbines identiques travaillent dans les meilleures conditions lorsqu'elles sont également ouvertes et chargées.

Bien que, d'après les considérations précédentes, il soit évident que la règle est la même pour le cas de deux turbines identiques, ce corollaire peut être vérifié immédiatement. En effet, comme les courbes (φ) de deux turbines identiques se superposent, les valeurs de φ pour les deux turbines sont les mêmes si, pour les deux turbines, on choisit ce point sur la même branche de la courbe (φ) , ce qui correspond à la même ouverture ou à la même charge. Il n'y a aucun avantage à choisir les points à la même hauteur mais sur des branches différentes de la courbe (φ) .

Remarque. — La méthode décrite ci-dessus pour la détermination du mode d'accouplement optimum des turbines hydrauliques peut être aussi appliquée, moyennant judicieuse adaptation, à d'autres machines.

Projet de traversée du Pas-de-Calais au moyen d'une double jetée formant chenal de navigation et viaducs pour routes et voies ferrées.

L'orientation actuelle des rapports politiques entre les nations européennes est de plus en plus dominée par des éléments financiers et économiques. Il est fort possible que d'ici peu la question de la jonction de l'Angleterre au Continent soit posée à nouveau et définitivement. Aussi M. Jules Jaeger¹,

¹ Le constructeur du barrage de la Jagne et des ponts de Péroilles et de Zähringen, à Fribourg. Réd.