

Étude de l'écoulement dans les circuits coudés. Dispositif de piégeage d'eau associé

*Investigation of flow in pipe bends.
Design of a special water separator*

Michel Pluviose

Laboratoire de la Turbine à Gaz – CETIM

Introduction

A la demande d'une entreprise électro-mécanique importante, cotisant au CETIM, le Laboratoire de la Turbine à Gaz a étudié sur maquette le circuit reliant la turbine haute pression des centrales du type PWR au séparateur d'eau, circuit soumis à l'action de la vapeur humide.

Le montage sur lequel les essais aérodynamiques ont été exécutés fait l'objet de la figure 1.

Afin de simuler le titre d'environ 0,9 existant dans cette tuyauterie, un dispositif d'injection d'eau a été placé à l'amont de la maquette ; il permet d'obtenir une pulvérisation d'eau dans l'air qui a été jugée suffisamment représentative.

Keller [1] et Engelke [4] ont établi une formule empirique reliant la dégradation mécanique due à l'érosion-corrosion aux caractéristiques thermodynamiques et géométriques de l'écoulement.

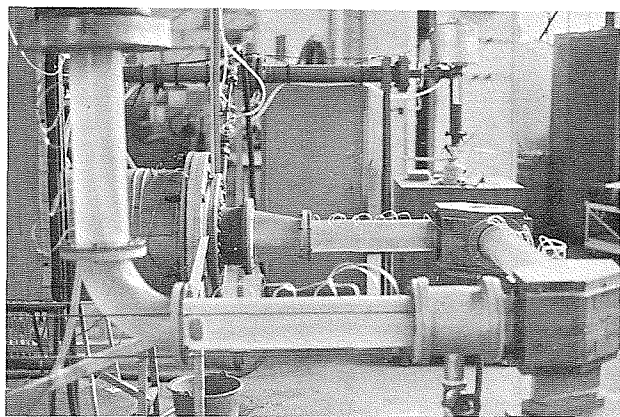


Figure 1

Cette formule se présente sous la forme d'un produit de quatre facteurs

$$S = f(\theta) \times C \times \sqrt{y} \times Kc$$

épaisseur d'abrasion locale maximum en mm/10000 h	influence de la température de l'eau ou de la vapeur	vitesse du fluide en m/s	humidité en	coefficient de forme de veine mm.s m x 10000 h
---	--	--------------------------------------	----------------	--

Il se trouve que $f(\theta)$ passe par un maximum pour $\theta = 180^\circ$ qui est la température de la vapeur humide dans la conduite étudiée.

Les auteurs proposent également un catalogue des valeurs de Kc pour différents éléments de conduite. Nous n'en retiendrons ici que quelques uns qui font l'objet de la figure 2, figure sur laquelle ont été également reportés les coefficients ξ de perte de charge [2].

L'examen de cette figure montre que toute amélioration aérodynamique de la forme du conduit améliorera le coefficient Kc , donc la fiabilité de l'élément considéré.

Parmi les quatre facteurs déterminant l'usure constatée, deux sont imposés par le cycle choisi ($f(\theta)$ et \sqrt{y}), l'un est établi par le constructeur lors du choix du diamètre économique de la conduite (C), seul le coefficient de forme de veine Kc semble donc susceptible d'être amélioré dans les coudés.

Le laboratoire ne disposant pas d'installation fonctionnant en vapeur humide, les essais ont été scindés en deux phases distinctes :

- essais aérodynamiques avec tentatives pour diminuer le coefficient de perte de charge aérodynamique d'un coude, étant entendu que toute diminution du coefficient de perte de charge ξ entraîne une diminution du coefficient Kc qui ne peut être chiffrée que par des essais d'endurance sur une installation fonctionnant en vapeur humide ;


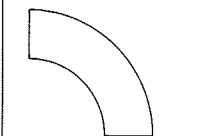
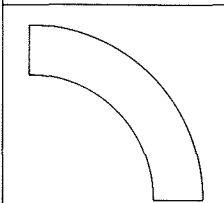

	$\frac{R}{D}$	K_c	ζ
	0,5	0,7	0,44
	1,5	0,4	0,23
	2,5	0,3	0,21
	luyau drott	0,04	0,02

Figure 2

— essais avec pulvérisation d'eau dans l'air. Ces essais qualitatifs ayant pour but de déterminer le trajet suivi par l'eau et les amoncellements de celle-ci dans la conduite.

Etude aérodynamique de l'écoulement dans les conduits coudés.

Parmi les coudés étudiés systématiquement, certains ont fait l'objet de recherches expérimentales plus approfondies. Il s'agit du coude de référence ou coude normal (type A) de $R/D = 1,653$ et du coude type B dit laminaire. Un coude à ailettes et une série de coudés de sections droites elliptiques ont également été expérimentés.

Etude expérimentale du coude normal (type A de la Fig. 6)

Répartition des coefficients de pression dans le plan de symétrie du coude normal (type A) $R/D = 1,65$

La répartition des coefficients de pression tracée sur la figure 3 met en évidence :

- une remontée de pression lente à la sortie du coude sur la paroi convexe entraînant la possibilité d'écoulement de retour,
- aucune anomalie sur la paroi concave.

Une visualisation de l'écoulement pariétal confirme qu'aucune anomalie n'est décelable dans le coude normal ; en fait deux tourbillons étroits se forment à la sortie, mais n'ont pu être photographiés (Photo 4).

Il n'en serait pas de même pour un coude tracé avec un plus petit R/D et la photographie 5 montre les décollements formés dans un tel coude.

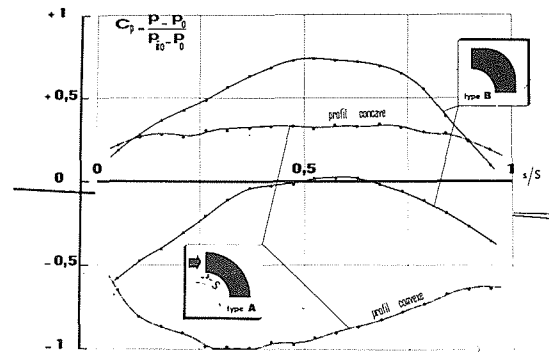


Figure 3

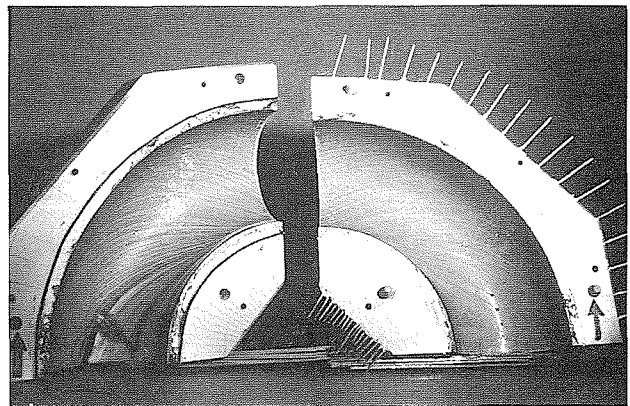


Figure 4

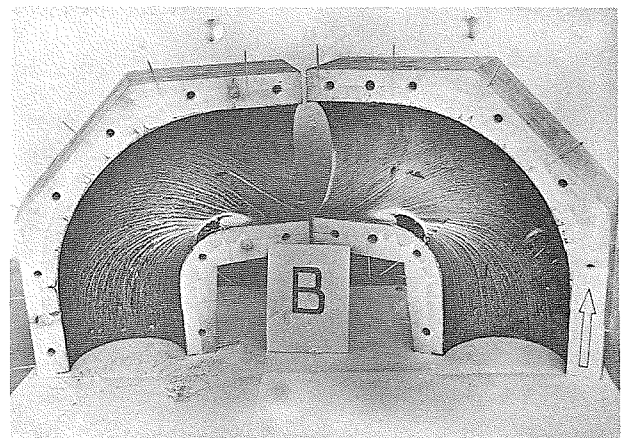


Figure 5

Coefficient de perte de charge du coude normal

Il n'a pas été jugé utile, pour le moment, de compliquer les essais par la détermination de la longueur de perturbation d'un coude, qui permet le calcul de la perte de charge globale.

Seul le coefficient de perte de charge, calculé entre la bride amont et la bride aval du coude, est exploité systématiquement ici ; le nombre de Reynolds de l'écoulement est de l'ordre de 5×10^5 .

Etude du coude laminaire

Ce coude est défini de telle manière que la pression le long de sa paroi interne reste théoriquement constante, en tentant de réduire ainsi les possibilités de courants de retour et décollements habituels aux canaux courbes classiques ; la couche limite demeure alors plus longtemps stable, d'où l'appellation "coude laminaire" par analogie aux grilles d'aubes à action dites "laminaires" tracées suivant le même principe [3].

Les équations intrinsèques du mouvement permanent d'un fluide parfait incompressible, montrent qu'en l'absence de champ de pesanteur, le produit du rayon par la vitesse du fluide est une constante.

Le maintien d'une pression constante, (aux pertes de charge près) sur la paroi convexe, égale à la pression moyenne relevée en amont et en aval du coude, conduit dans ces conditions à augmenter la section droite moyenne (Fig. 6) donc à diminuer la vitesse moyenne de l'écoulement dans le coude et il est à noter que ce paramètre intervient directement dans la diminution de l'abrasion par érosion-corrosion comme il a été vu précédemment.

Répartition des coefficients de pression dans le plan de symétrie du coude laminaire (type B de la Fig. 6).

La répartition des coefficients de pression tracée sur la figure 3 met en évidence :

- une remontée de pression sur la paroi convexe dans la première partie du coude, beaucoup plus brusque que celle observée sur le coude normal type A, et susceptible de provoquer un décollement ;
- une recompression très brusque sur la paroi concave dans la première partie du coude, d'où une possibilité d'accident. L'équilibre de la veine en écoulement plan montre que ce danger se situe en fait dans une zone où les débits sont faibles, ce qui limite l'influence de cette zone dangereuse sur l'écoulement global.

La répartition de pression sur la paroi convexe du coude laminaire présente des anomalies par rapport à celle escomptée, à l'entrée et à la sortie du coude. Les variations brusques de courbure sont certainement responsables des survitesses locales enregistrées.

Les visualisations obtenues dans la couche limite font apparaître un décollement à l'entrée du coude dû vrai-

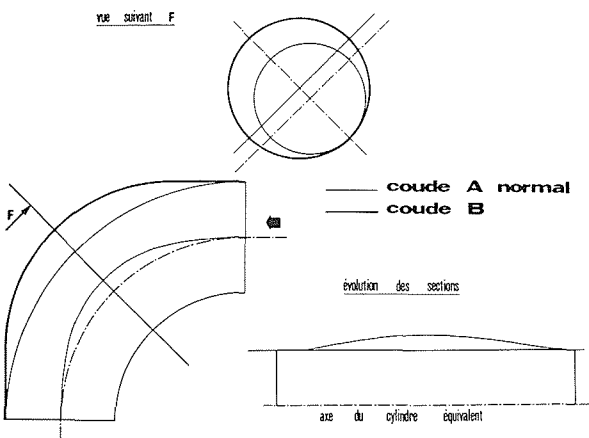


Figure 6

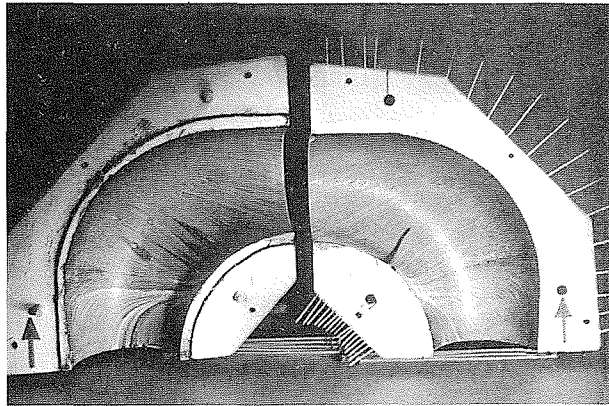


Figure 7

semblablement à la diffusion trop importante imposée au fluide (Photo 7).

Coefficient de perte de charge du coude laminaire

Le coude laminaire dont les résultats sont présentés ci-dessus, correspond à un rapport diamètre de la section droite médiane/diamètre de la tuyauterie = 1,273.

D'autres coudes à section droite circulaire présentant un évasement différent ont été réalisés. Le coefficient de perte de charge de ces coudes en fonction du rapport ci-dessus font l'objet de la figure 8.

Tous ces coudes ont été conçus avec un rayon intérieur constant.

La figure 8 montre que le coude normal crée moins de perte d'énergie qu'un coude laminaire, la recherche du minimum de cette courbe est utile pour la suite de l'étude. Ce résultat, semble-t-il, pourrait être attribué à la remarque suivante : un filet de courant moyen (par exemple celui situé dans l'axe du conduit à l'amont et

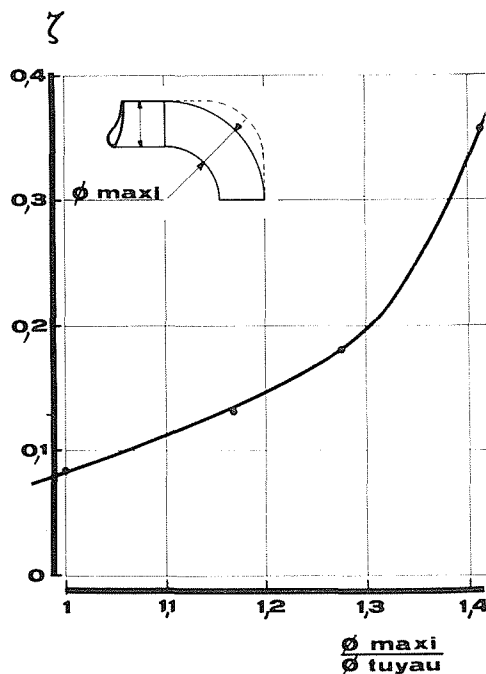


Figure 8

supposé demeurer dans l'axe à la sortie) suit un trajet plus courbe donc plus perturbé dans le cas du coude laminaire. Il a donc été envisagé un coude de même ligne moyenne et profil plan que le coude normal *A* et de même évasement que le coude laminaire *B* pour pouvoir comparer. Un coude de section droite elliptique a été construit et essayé (Photo 14).

Ce coude est plus perméable que le coude laminaire correspondant, mais demeure néanmoins légèrement moins efficace que le coude normal.

Les essais infructueux réalisés sur des coudes à courbure continue, peuvent se justifier à partir de la même remarque.

Etude des coudes elliptiques

Les études expérimentales effectuées sur l'allongement des grilles d'aubes des turbomachines axiales [3] montrent qu'il est possible de réduire le coefficient de perte ξ lorsque l'allongement relatif

$$\frac{h}{b} = \frac{\text{hauteur de l'aube}}{\text{projection axiale de la corde}} \text{ augmente.}$$

En général, en turbomachines un rapport h/b compris entre 2,5 et 5 est choisi.

L'influence de l'allongement est généralement associée à l'existence des écoulements secondaires marginaux dont l'importance relative diminue en même temps que l'allongement augmente.

La tentative présentée ci-avant sur un coude elliptique nous a montré le bien-fondé d'orienter la recherche vers les coudes de section droite différente d'un cercle. L'effet des écoulements secondaires qui perturbent profondément l'écoulement moyen dans un coude normal peut être atténué lorsque la différence de pression entre parois interne et externe est diminuée d'une part, et lorsque le trajet imposé au fluide pour passer des zones en surpression aux zones en dépression est grand. A section droite constante, une section elliptique semble donc meilleure qu'une section circulaire. Le montage (Fig. 9) a été réalisé pour effectuer de tels essais.

Il comporte principalement une tubulure d'essai elliptique munie du coude d'essai, raccordée à des tubes circulaires par des pièces de transformation.

La section de la tuyauterie est constante.

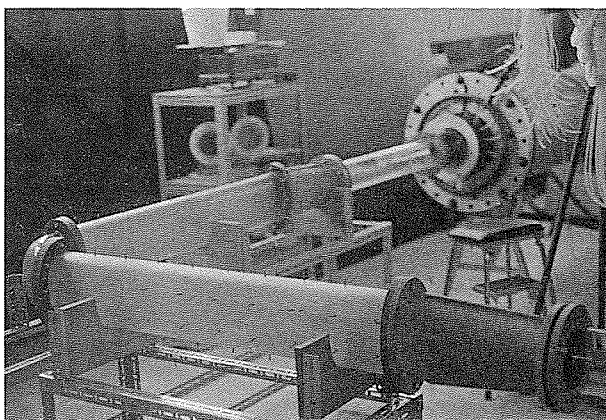


Figure 9

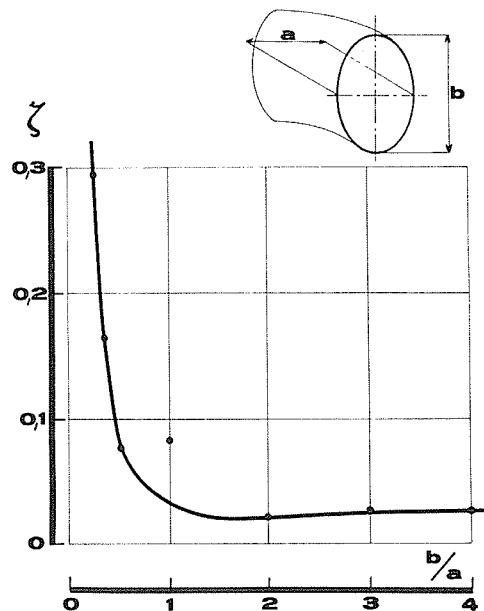


Figure 10

Le coefficient de perte de charge entre la bride amont et la bride aval du coude elliptique fait l'objet de la figure 10.

Il est à noter que le coude normal se situe hors courbe dans cette représentation ; une exploration vers les coudes elliptiques de rapports b/a proches de l'unité s'avère indispensable.

L'expérimentateur signale des battements et des instabilités lors des relevés de pression statique depuis le coude normal jusqu'à des valeurs de $b/a = 3$.

Bien entendu, à section droite équivalente, une tuyauterie elliptique ayant un périmètre plus long qu'une tuyauterie circulaire, le net avantage obtenu avec un coude elliptique de $b/a > 1$ s'effrite au fur et à mesure que l'on prend en compte les longueurs droites amont et aval.

Etude du coude à ailettes

Le coefficient de perte de charge de ce coude (Fig. 16), défini entre les brides du coude, est égal à 0,282.

Etude de l'écoulement en phase humide.

Les coudes d'essais, objets de la présente note, ont été réalisés suivant une méthode éprouvée au laboratoire, à partir d'un moule réalisé autour de sections droites en laiton (Fig. 11). Le volume est ensuite comblé à l'aide de plâtre de Paris et lissé. Des flancs en PVC sont alors thermoformés autour de la forme ainsi obtenue et soudés (Fig. 12).

L'écoulement, dans ces coudes transparents, peut alors être visualisé par l'injection de particules dans l'air ou dans l'eau.

Le dispositif d'injection d'eau, réalisé et décrit ci-avant, adapté au conduit en essai, permet d'avoir accès à certaines particularités de l'écoulement d'eau.

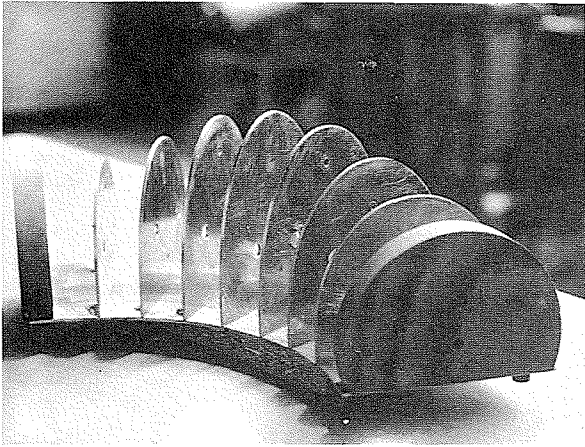


Figure 11

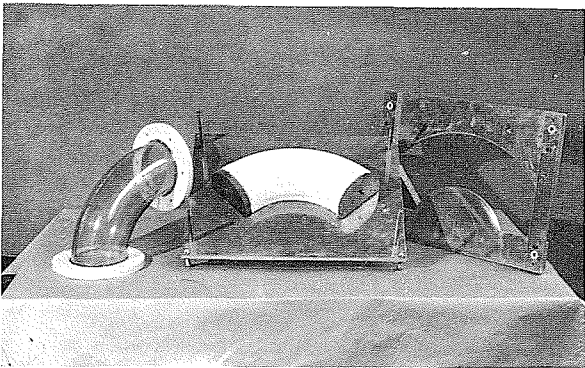


Figure 12

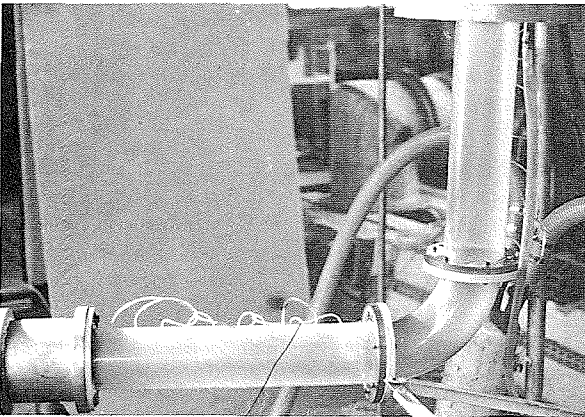


Figure 13

La visualisation obtenue sur le coude normal *A* fait l'objet de la photo 13.

Un amas d'eau tourbillonne à la sortie du coude ; il alimente par l'intermédiaire d'une crête un jet issu du coude et qui rejoint l'axe du conduit.

La visualisation obtenue sur le coude laminaire *B* montre que deux lames d'eau longent les parois à la sortie du coude.

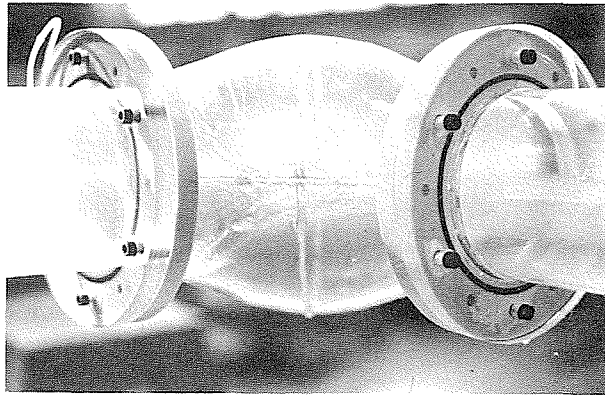


Figure 14

Les visualisations obtenues sur le coude elliptique font apparaître un amas d'eau qui se forme dès l'entrée du coude (Photo 14) et il en est de même pour le coude laminaire puisque la répartition de pression mesurée le favorise.

Deux lames d'eau longent là encore les parois à la sortie.

Puisque de l'eau longe la paroi (dans des proportions qui ne sont pas décelables à l'œil nu), il a été décidé de construire un dispositif pour tenter de capter cette eau.

Le dispositif schématisé (Fig. 15) est composé d'une fente continue munie d'un arrondi formant un effet Coanda facilitant le piégeage de l'eau, et d'un biseau à 45° .

Ce dispositif est placé à la sortie du premier coude.

Afin de n'évacuer, par l'orifice constitué, qu'un pourcentage faible du débit d'air en l'absence de dispositif de purgeage lors des essais, un jeu *J* de 2 mm a été choisi.

Les essais de laboratoire présentés ci-dessous montrent que :

- exception faite du coude à ailettes, tous les coudes essayés permettent de récupérer une fraction importante de l'eau injectée. Selon les modifications effectuées sur l'injecteur, ce pourcentage varie de 60 à 80 % pour le point de fonctionnement choisi ;

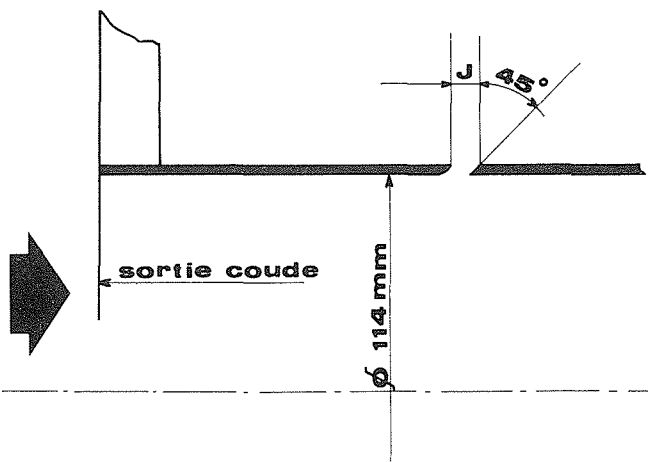


Figure 15

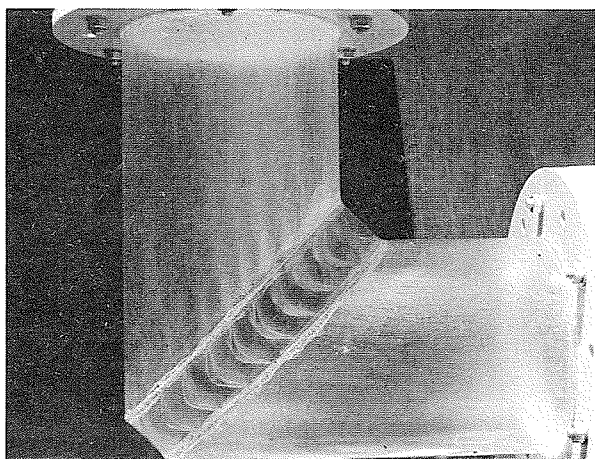


Figure 16

- le dispositif de piégeage d'eau, disposé à l'amont des coudes, permet de récupérer environ 25% de l'eau injectée ;
 - le coude à ailettes ne permet pratiquement aucune récupération d'eau, celle-ci est réhomogénéisée dans l'écoulement par l'intermédiaire du sillage des ailettes (Fig. 16). On capte néanmoins les 25% d'eau qui longeaient les parois à l'amont.
- Bien entendu, des dispositifs de captation de cette eau disposés sur les aubages, permettraient l'amélioration de ce coefficient de récupération.

L'influence de la position du piégeage, par rapport à la sortie du coude (Fig. 17), met nettement en évidence que, lorsque l'eau a été séparée et coule sur la paroi, il n'est pas raisonnable de la laisser soumise à un vent violent qui provoque une tempête à sa surface et des embruns plutôt comparables à des paquets de mer.

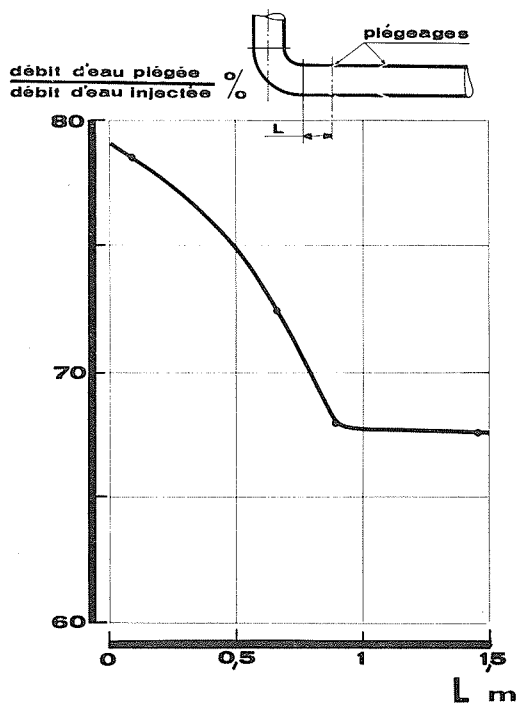


Figure 17

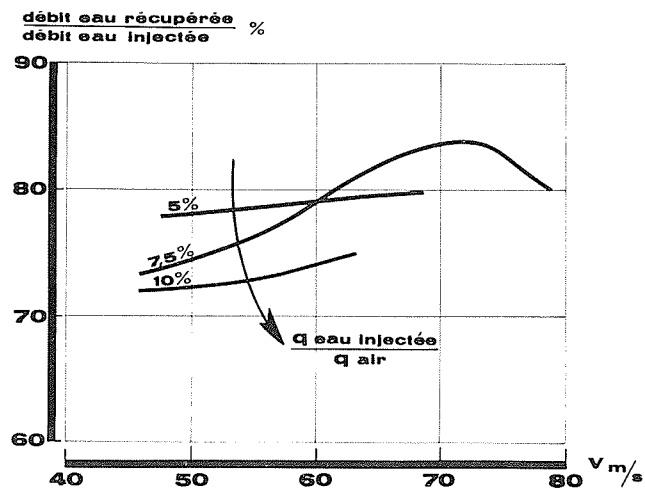


Figure 18

L'influence de la vitesse de l'écoulement et du titre sur l'efficacité du piégeage fait l'objet de la figure 18.

Conclusion

Les diverses observations relatives ci-dessus montrent que les coudes sans ailette essayés font office de séparateurs d'eau, ils détruisent l'homogénéité du flux en regroupant l'eau dans des zones privilégiées selon la géométrie du coude. Une partie importante de cette eau peut alors être piégée.

Les essais sur l'aérodynamique de l'écoulement dans les conduits coudés montrent que les études entamées, particulièrement sur les coudes de type elliptique, sont encourageantes. Ces travaux sont à poursuivre de manière à pouvoir déterminer pour un coude de R/D donné :

- la ligne moyenne optimum,
- l'évolution des sections droites optimum (évasement ou rétrécissement)
- la forme de la section droite optimum.

Les deux actions vont dans le sens d'une réduction de l'érosion-corrosion ; d'ores et déjà si les résultats obtenus en laboratoire se confirmaient en vapeur humide sur le site, la fiabilité des matériels soumis à l'action de l'eau serait améliorée.

Un piégeage d'eau a été, dans ce but, installé en centrale sur un conduit muni de coudes normaux. Les résultats obtenus concordent à ce jour avec ceux obtenus en laboratoire, encore faut-il vérifier dans le temps que la tenue des matériels s'en trouve améliorée.

Références

- [1] KELLER H. - Erosionskorrosion und heibdampfturbinen. VGB Kraftwerkstechnik 1974, Heft 5.
- [2] IDEL'CIK I.E. - Memento des pertes de charge. Collection du Centre de Recherches et d'Essais de Chatou. Eyrolles.
- [3] HORLOCK. - Axial Flow Turbines. Butterworth.
- [4] ENGELKE. - Operation experience for wet steam turbines. von Karman Institute for Fluid Dynamics. Lectures series 70, May 1974.

Discussion

Président : M. SEMERIA

M. Le Président. — Merci M. PLUVIOSE. La partie simple phase est la plus importante. La partie comportant des gouttelettes a été traitée plus rapidement ; elle a d'ailleurs été étudiée pour toutes sortes de chaudières.

M. BONNIN. — Est-ce que vous avez des valeurs numériques concernant la captation de l'eau dans le coude ?

M. PLUVIOSE. — 70 % d'eau totale injectée (ruisselante ou dans la masse) a pu être piégée.

M. LEGENDRE. — Le coude à ailettes présenté peut paraître plus mauvais que les autres coudes vis-à-vis du piègeage d'eau. Il y a cependant lieu d'insister sur le fait qu'aucune captation n'a été prévue sur les aubes.

M. PLUVIOSE. — Nous nous sommes attachées à montrer qu'un coude à ailettes ne projette pas l'eau aux parois ; au contraire, il réhomogénéise convenablement l'écoulement en aval. Un piègeage d'eau sur les parois du coude manque alors d'efficacité ; par contre, comme le propose M. LEGENDRE, il serait tout à fait possible de piéger l'eau sur les aubages.

M. Le Président. — Dans le dernier coude à section elliptique, vous rassemblez l'eau le long de deux génératrices. Le dispositif de piègeage n'a pas besoin d'être tout autour.

M. PLUVIOSE. — C'est exact, mais pour des commodités de réalisation et pour une meilleure tenue mécanique, c'est une rampe annulaire qui a été choisie.

M. Le Président. — Est-ce que le problème de la granulométrie intervient ?

M. PLUVIOSE. — C'est un des aspects du problème qui n'a pu être regardé. Le conduit étudié est disposé à l'aval d'une turbine où la granulométrie est difficile à connaître. Un essai sur le site nous semble donc préférable à une multiplication d'essais délicats et onéreux.

M. SAGNER. — Quand vous avez admis une relation entre le coefficient de forme et la vitesse d'érosion en vous basant sur des résultats pour une famille de coudes circulaires, est-ce que vous pensez que vous avez le droit d'utiliser cette relation pour une autre famille ? Si au lieu d'un coude, vous aviez une grande boîte avec une entrée et une sortie à 90°, il y aurait certainement perte de charge, mais est-ce qu'il y aurait beaucoup d'érosion ?

M. PLUVIOSE. — Le laboratoire ne dispose pas d'installation fonctionnant en vapeur humide ; ce serait une autre étude expé-

rimientale qu'il faudrait lancer pour vérifier que le facteur érosion-corrosion est effectivement amélioré.

Le coefficient de forme du schéma que vous proposez ne figure pas dans la littérature à ma connaissance. L'érosion-corrosion serait certainement beaucoup plus grande dans ce cas que dans celui du coude présenté, car il y aurait alors destruction du film d'eau ruisselant sur les parois par les gouttelettes. Dans des cas analogues où existe un point d'arrêt, la vitesse d'érosion-corrosion est multipliée par deux environ ; c'est le cas, par exemple, des piquages sur les tuyauteries.

M. CHAUBERT. — Vous avez parlé assez rapidement du coude à ailettes. Est-ce que ce coude n'est pas de nature à permettre une amélioration du coefficient de pertes de charges ? Et si oui, quel est l'inconvénient qui prohibe son emploi dans ce genre de machine ?

M. PLUVIOSE. — Le coude à ailettes a un coefficient de perte de charge défini entre brides moins bon que celui des coudes présentés. Par contre, il a la propriété de rétablir un écoulement homogène, ce qui justifie son emploi dans les souffleries aérodynamiques ou à l'amont de systèmes déprimogènes de mesure de débit. Bien entendu, lorsque l'on prend en compte le frottement dans les parties droites de raccordement au coude, et selon la longueur de ces parties droites, il peut y avoir intérêt à utiliser des coudes à ailettes et ces coudes existent effectivement sur certaines centrales. C'est pourquoi nous avons présenté à titre de comparaison la forme des écoulements d'eau distribués par un tel coude.

M. BERGERON. — Tout coude est forcément un piège à eau par suite des différences de pression qu'il engendre de part et d'autre des sections normales à l'écoulement.

Le coude elliptique améliore les résultats par rapport à un coude ordinaire puisqu'il évite pratiquement les contractions.

De ce fait, il améliore aussi les pertes. Pour cette raison, d'ailleurs, il est préconisé, depuis déjà bien longtemps, dans les installations où la réduction de pertes est capitale.

M. PLUVIOSE. — Tous les coudes essayés, sauf le coude aileté, projettent effectivement l'eau sur les parois, où il est alors possible de la capter. La proportion d'eau captée varie sensiblement selon le coude.

M. Le Président. — S'il n'y a plus de question, je remercie M. PLUVIOSE.