SOCIÉTÉ HYDROTECHNIQUE DE FRANCE

Comité technique — Session n° 128 — Paris — 12 et 13 juin 1985

CERTAINS ASPECTS DE L'HYDROÉLECTRICITÉ DE FAIBLE PUISSANCE
QUELQUES ÉTUDES DE CAS DE TRANSITOIRES HYDRAULIQUES

Prise en compte de l'hydrologie et des facteurs économiques dans le calcul du diamètre économique des conduites forcées des microcentrales haute chute

*Taking hydrology and economic factors into account
for calculating the economic diameter of the penstocks
for high head microhydropower plants*

Th. Bongrand

Sogreah — Service Electromécanique
BP 172, 38042 Grenoble Cedex

Le diamètre économique des conduites forcées des centrales haute chute est souvent déterminé à l'aide de formules simplifiées (Sarkaria, Fahlbusch, Bresse, etc.), dont les résultats sont d'autant plus divergents que le diamètre est petit (cas des microcentrales).

Certaines, telle celle de Sarkaria, ne permettent pas la prise en compte de facteurs économiques. Le problème de leur validité aujourd'hui se pose donc. De plus, pour les faibles débits, certaines conduisent à des résultats inacceptables.

Cette communication rétablit le calcul d'où découlent les formules simplifiées précitées, afin d'aboutir à une formule complète prenant en compte l'hydrologie d'une part, les facteurs économiques du moment d'autre part.

La formule complète (dont l'emploi peut être assez lourd) est utilisée dans un programme sur micro-ordinateur qui, outre la détermination des diamètres économiques de la conduite, établit également le productible du site considéré.

The economic diameter of the draft tubes for high head power stations is often determined from simplified equations (Sarkaria, Fahlbusch, Bresse, etc.) the results of which diverge increasingly as the diameter decreases (case of small power stations).

Certain equations, such as Sarkaria's, do not allow economic factors to be taken into account, which raises the problem of their validity today. In addition, for small flows, certain lead to unacceptable results.

This paper gives the computation from which the above simplified equations are derived in order to arrive at a complete equation taking into account both hydrology and the prevailing economic factors.

The complete equation (which can prove complicated to use) is employed in a program on microcomputer which, in addition to determining the economic diameters of the line, also establishes the generation capacity for the site considered.

SOMMAIRE

1. Préambule
2. Objet et champ d'application de la méthode proposée
3. Limites d'application
4. Principe et formulation de la méthode
5. Exemple de données et de résultats
6. Conclusion

1. PREAMBULE

L'étude d'un aménagement hydroélectrique passe par une phase d'optimisation du débit d'équipement. Cette phase nécessite d'établir le coût de l'aménagement pour différentes valeurs du débit d'équipement encadrant la valeur optimale. Pour un aménagement haute chute, s'ajoute, de plus, une optimisation du ou des diamètres de la conduite forcée pour chaque valeur étudiée du débit d'équipement.

Dans le cas des microcentrales, cette phase d'optimisation peut conduire à des calculs lourds, par rapport aux budgets d'étude généralement réduits, particulièrement pour les études préliminaires de faisabilité.

C'est pourquoi, la détermination du diamètre "économique" des conduites forcées est souvent faite à l'aide de formules simplifiées ne tenant compte qu'implicitement, de manière peu précise ou statistique :

- . de l'hydrologie,
- . des facteurs économiques.

Parmi ces formules, on peut citer :

Formule de Sarkaria

$$D = 1,95 Q^{0,43} / H^{0,22}$$

avec :

D : diamètre économique en m
Q : débit équipé en m³/s
H : chute brute en m

Formule de Bresse

$$D = k \sqrt{H}$$

avec :

H : chute brute en m
K : coefficient compris entre 0,5 et 1

Formule de Fahlbusch 1 (formule complète)

$$D = 1,6 (e \lambda k / CRF a)^{1/7} \cdot H^{-1/7} \cdot (P/H)^{3/7}$$

avec :

P : puissance en kW
H : hauteur de chute brute en m
e : prix du kWh
f : facteur de marche annuel moyen
 λ : coefficient de perte de charge linéaire
k : coefficient sans dimension
CRF : charge annuelle de capital
a : prix du kg de conduite posée

Formule de Fahlbusch 2, tirée d'un article de Water Power and Dam Construction - juin 1982 (formule simplifiée)

$$D = 0,52 H^{-1/7} (P/H)^{3/7}$$

avec :

P en kW et H en m

Formule du Cahier des Charges SHF, pour la fourniture et le montage des conduites forcées en acier - février 1984

$$D^7 = \lambda b \sigma Q^2 / 60 c P$$

avec :

λ : coefficient de perte de charge linéaire
b : prix actualisé du mètre de perte de charge
 σ : contrainte admissible en kg/mm²
c : prix du kg de conduite, montage inclus
P : la pression statique au point considéré

Dans ces formules (exceptée celle de Fahlbusch 1) seul apparaît le débit d'équipement. La distribution des débits inférieurs au débit d'équipement n'apparaît pas.

Ces formules peuvent conduire à des résultats différents.

L'écart entre les résultats est d'autant plus grand que le diamètre est petit.

Nous avons comparé quatre de ces formules dans le cas d'une microcentrale, dont les caractéristiques sont :

- . chute brute : H = 670 m

- débit d'équipement : $Q_e = 120 \text{ l/s}$
(microcentrale de Venosc - Alpes
(France))

Les résultats sont :

	Bresse $k = 1$	Sarkaria	Fahlbusch [*] 1	Fahlbusch 2
$\varnothing$ (mm)	297	187	232	199

* avec $p = 20 \text{ F/kg}$

Les formules de Sarkaria et de Fahlbusch 2 conduisent à des pertes de charge excessives dans le cas présent. Ces deux formules ne conviennent pas au cas des microcentrales à faible débit.

Elles ne permettent pas la prise en compte des facteurs économiques (elles intègrent en fait des facteurs économiques de l'époque de leur création).

De plus, ces formules considèrent, à l'exception de celle de la SHF, que la conduite a le même diamètre de l'amont vers l'aval. Or, il est économiquement intéressant de faire varier le diamètre en fonction de la pression :

- on adopte généralement des diamètres plus élevés pour les tronçons amont,
- on adopte généralement des diamètres plus faibles pour les tronçons aval.

En effet, les épaisseurs des tuyaux pour les tronçons amont sont plus faibles que pour les tronçons aval, et donc également les coûts.

La conduite forcée représente une part importante de l'investissement d'un aménagement haute chute au fil de l'eau (jusqu'à 50 %). Il est donc intéressant de déterminer le diamètre économique de la conduite forcée avec suffisamment de précision.

2. OBJET ET CHAMP D'APPLICATION DE LA METHODE PROPOSEE

On se propose de rétablir le calcul d'où découlent les formules simplifiées citées ci-dessus, afin d'aboutir à une formulation tenant compte :

- de l'hydrologie, c'est-à-dire plus clairement de la fréquence d'apparition des débits turbinés inférieurs au débit d'équipement, donc de l'énergie produite,

- des conditions économiques, c'est-à-dire du coût de l'énergie d'une part, du coût de la conduite d'autre part.

Le calcul conduit à la formule (19) du §4. Cette formule a été placée dans un programme sur micro-ordinateur, qui réalise les deux tâches suivantes :

- calcul du diamètre et de l'épaisseur de chaque tronçon de la conduite,
- calcul du productible.

Le programme a été écrit sur un micro-ordinateur HP 9845. Une fois collectées toutes les données nécessaires à la résolution du problème, le temps requis pour constituer le fichier de données n'excède pas 20 mn. Un calcul nécessite 1 mn.

La formule (19) établie au §4 peut aussi être utilisée, telle quelle, en sachant que le résultat sera légèrement entaché d'erreurs, puisque Δ et f_j dépendent de D . L'erreur est faible à cause de l'exposant 1/7.

3. LIMITES D'APPLICATION

La méthode exposée s'applique dans le cas où :

- l'aménagement est interconnecté à un grand réseau électrique dont il ne modifie pas la structure tarifaire (aménagement marginal). Le coût des pertes de production est donc connu.
- l'aménagement fonctionne au fil de l'eau et utilise toute la potentialité de la rivière, c'est-à-dire qu'il ne participe pas au réglage de la puissance du réseau.

D'autre part, elle ne concerne que les tronçons de conduite dont l'épaisseur est déterminée par la pression (cas général des aménagements haute chute).

Le calcul a été élaboré dans le cas d'une exploitation au fil de l'eau. Elle pourrait aussi s'étendre à un aménagement avec retenue, pour autant que l'on puisse attacher une fréquence d'apparition à chaque débit possible turbinable (gestion de la retenue).

4. PRINCIPE ET FORMULATION DE LA METHODE

4.1 HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES

Nous avons supposé que :

- le coût de l'énergie est constant en monnaie constante,
- l'épaisseur de la conduite est faible par rapport à son diamètre, ce qui autorise à confondre le diamètre intérieur avec le diamètre moyen (moyenne entre le diamètre extérieur et le diamètre intérieur).

Ces deux hypothèses, tout à fait acceptables, ont été adoptées dans toutes les formules précédemment citées (Fahlbusch, Sarkaria, etc.).

4.2 FORMULATION

L'optimisation d'une conduite forcée consiste à mettre en balance le coût de l'investissement et le coût des pertes de charge par frottement. Plus grand est le diamètre, plus grand est l'investissement, mais moindres sont les pertes de charge, et inversement. Finalement, le coût total de la conduite peut être considéré comme la somme de deux termes :

- l'investissement initial de la conduite,
- le coût actualisé des pertes de charge durant la période de "vie économique" de l'aménagement. Le diamètre "économique" est celui qui minimise le coût total de la conduite, investissement initial plus coût des pertes de charge actualisé (c'est un critère parmi d'autres).

L'investissement

On le suppose proportionnel à la masse de la conduite, donc au diamètre et à l'épaisseur. Si celle-ci comporte n tronçons (de diamètre et d'épaisseur différents), l'investissement pour chaque tronçon est de la forme :

$$I = m \cdot p \quad (1)$$

avec :

m : masse du tronçon (s'exprime en fonction du diamètre et de l'épaisseur, donc de la pression),
 p : coût du kg d'acier de conduite, fourniture et pose,

$$m = \rho_a \pi D e L \quad (2)$$

avec :

ρ : masse volumique de l'acier
 D^a : diamètre du tronçon considéré
 e : épaisseur du tronçon considéré
 L : longueur du tronçon considéré

e est lié à la pression par la relation de résistance des matériaux :

$$e = PD/2\sigma = k \rho g H D/2 \quad (3)$$

avec :

H : pression statique à l'aval du tronçon exprimée en mètres de colonne d'eau
 k : coefficient de surpression par rapport à la pression statique (coup de bélier)
 ρ : masse volume de l'eau
 g : accélération de la pesanteur
 σ : contrainte maxima admissible dans l'acier (généralement 14 kg/mm² pour du E24).

Finalement :

$$I = \rho_a \rho \pi \times g k H L D^2 p/2\sigma \quad (4)$$

Nota 1 : Lorsque le débit d'équipement est inférieur à 2 m³/s et la chute inférieure à 250 m, il est intéressant d'équiper le pied de la conduite forcée avec une ou plusieurs soupapes de décharge, type adduction (type NEYRTEC), afin de réduire le coefficient k , c'est-à-dire la classe de pression des tuyaux, et donc l'investissement.

Nota 2 : dans une gamme de diamètre donnée, le coût de pose de la conduite peut être décomposé en deux termes :

- un terme incompressible,
- un terme dépendant du diamètre et du poids de la conduite.

Seul le deuxième terme doit être inclus dans p (p : prix de la fourniture + prix variable de pose).

La précision du résultat dépend beaucoup de l'expérience de l'ingénieur en ce qui concerne les coûts des conduites.

Coût actualisé des pertes de charge

Pour le tronçon de conduite considéré, la perte de charge est exprimée en mètres de colonne d'eau :

$$\begin{aligned} \Delta H_1 &= \lambda L \cdot \frac{V_1^2}{D \cdot 2g} \\ &= 8 \lambda L \cdot \frac{Q_1^2}{g \pi^2 D^5} \end{aligned} \quad (5)$$

avec :

V_i : vitesse de l'eau pour le débit Q_i

L : longueur du tronçon considéré

Q_i : débit dans la conduite à l'instant t_i

λ : coefficient de perte de charge

Ne sachant pas a priori si le régime d'écoulement est hydrauliquement lisse ou rugueux, le coefficient est calculé à partir de la formule de Colebrook (6).

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{\epsilon}{3,7 D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \\ = -2 \log \left(\frac{\epsilon}{3,7 D} + \frac{2,51}{\sqrt{\lambda} D/4} \right)$$

avec :

ϵ : rugosité absolue,
 Re : nombre de Reynolds.

$$Re = VD/\nu$$

avec :

V : vitesse moyenne en m/s

D : diamètre en m

ν : viscosité cinématique = $1,15 \cdot 10^{-6}$ stockes (m²/s)

On constate que dépend du diamètre. Le programme détermine donc automatiquement en fonction de D par itérations successives, puisque la formule de Colebrook est implicite.

La perte en puissance est :

$$\Delta P_i = \eta_i \rho g Q_i \Delta H_i \quad (7)$$

avec :

η_i : rendement du groupe turbo-générateur pour le débit Q_i

$$\Delta P_i = 8 \lambda L \eta_i \rho Q_i^2 / \pi^2 D^5 \quad (8)$$

La perte d'énergie durant le temps Δt_i est :

$$\Delta E_i = \Delta P_i \cdot \Delta t_i \quad (9)$$

L'intervalle de temps minimum considéré Δt_i est la journée. Les débits de la rivière sur une période de N heures sont classés en fréquence cumulée, de telle sorte qu'à chaque débit Q_i on puisse associer un nombre d'heures f_i pendant lequel le débit de la rivière est supérieur ou égal à Q_i . On obtient ainsi une courbe des débits classés. Puis cette courbe est découpée en tranches de débits d'autant plus petites que l'on cherche une grande précision. A la tranche des débits compris entre Q_i et Q_{i+1} correspondra une valeur moyenne q_i ,

une durée d'apparition n_i et une perte d'énergie ΔE_i :

$$\Delta E_i = 8 \lambda L \eta_i \rho q_i^3 n_i / \pi^2 D^5 \quad (10)$$

La perte d'énergie totale sur toute la période considérée sera (11) :

$$\Delta E = 8 \lambda L \rho \sum_i q_i^3 \eta_i n_i / \pi^2 D^5$$

en posant :

$$\sum_i q_i^3 \eta_i n_i = f \eta Q_e^3 N \quad (12)$$

avec :

f : coefficient sans dimension dont la valeur est généralement comprise entre 0,35 et 0,6

Q_e : débit d'équipement

η : rendement pour Q_e

N : durée totale de la période couverte par la courbe des débits classés

$$\Delta E = 8 \lambda L \eta \rho f Q_e^3 N / \pi^2 D^5 \quad (13)$$

Si pendant la période N la valeur de l'énergie est c , la perte d'argent est :

$$\Delta P = 8 \lambda L \eta \rho f Q_e^3 N c / \pi^2 D^5 \quad (14)$$

La période connue des débits est généralement ramenée à une année. On parle alors d'année moyenne. On peut avoir plusieurs périodes tarifaires durant l'année. Ainsi, en France, il y a deux périodes tarifaires pour les microcentrales au fil de l'eau :

période 1 : hiver (5 mois)
 période 2 : été (7 mois)

On a alors (15) :

$$\Delta P = 8 \lambda L \eta \rho Q_e^3 \sum_j f_j N_j D_j / \pi^2 D^5$$

où j est le nombre de périodes tarifaires.

Les pertes sur toute la vie économique de la centrale sont (16) :

$$\Delta P_T = \frac{8 \lambda L \rho}{\pi^2 D^5} Q_e^3 \sum_j f_j N_j C_j \frac{(1+a)^n - 1}{a (1+a)^n}$$

avec :

a : le coefficient d'actualisation
 n : le nombre d'années d'actualisation

En prenant les formules (4) et (16), on obtient :

$$C = I + \Delta P_T = \rho a \rho \pi g k H L D^2 p / 2 a^2 \\ + 8 \lambda L \eta \rho Q_e^3 \sum_j f_j N_j C_j \\ \times \frac{(1+a)^n - 1}{a (1+a)^n} / \pi^2 D^5 \quad (17)$$

où C est le coût total actualisé du tronçon considéré de la conduite caractérisé par H qui est la pression statique à sa base.

Le diamètre économique est celui pour lequel C est minimum, c'est-à-dire pour lequel :

$$\frac{\delta C}{\delta D} = 0 \quad (18)$$

On obtient alors, pour chaque tronçon de la conduite, (unités SI) (19) :

$$D = \left[\frac{40 \eta \sigma \lambda Q e^3}{\rho a \pi^3 g k H p} \left(\sum_j f_j N_j C_j \right) \frac{(1+a)^n - 1}{a(1+a)^n} \right]^{1/7}$$

En considérant :

- . des valeurs moyennes de η, λ, f_j, k
- . une durée de vie de 30 ans et un taux d'actualisation de 8 %

la formule devient :

$$D = 2 (Q^3 \sum N_j C_j / pH)^{1/7} \quad (20)$$

avec :

Q en m³/s,
N en heures
C en F/wh
p en F/kg

Dans le cas de la vente de l'énergie à EDF par les producteurs autonomes, la formule devient :

$$D = 1,5 Q^{3/7} / H^{1/7} \quad (21)$$

avec :

N1 : 151 jours
N2 : 214 jours
C1 : 40 cts/kWh
C2 : 10 cts/kWh
p : 20 F/kg

Dans le cas où l'on voudrait utiliser la formule (19) sans calculer les valeurs de f_j , f_j pourra être pris égal à 0,5.

Dans l'exemple cité de la microcentrale de Venosc, la formule simplifiée (21) donne D = 240 mm pour le tronçon inférieur. On choisira alors le diamètre extérieur normalisé 273 mm.

Dans la formule complète (19), et f_j dépendent de D. Le programme procédera donc par itérations successives, selon l'organigramme simplifié suivant où J est le nombre de tronçons.

ORGANIGRAMME SIMPLIFIE

où J est le nombre de tronçons de la conduite forcée

5. EXEMPLE DE DONNEES ET DE RESULTATS

(Par manque de place ne figurent pas ici les données hydrologiques).

VOICI LES DONNEES

```

1) MASSE VOL. DU METAL DE LA CONDUITE (acier=785kg/m3) 7058
2) PRIX AU KG DE COND. (Fragilisation corrosion Frase Fines) 28
3) CONTRAINTE ADMISSIBLE (u. usuel)=14kg/mm2 pour E24 14
4) RUCOSITE EQUIVALENTE EN (mm) 15
5) TAUX D'ACTUALISATION EN (%) 6
6) DUREE DE VIE ECONOMIQUE DE LA CONDUITE (annees) 30
7) PRIX DE VENTE DE L'ELECTRICITE EN HIVER (ct/kwh) 37.40
8) PRIX DE VENTE DE L'ELECTRICITE EN ETE (ct/kwh) 11.00
9) TEMPS DE FONCTIONNEMENT HIVER (heures) 3624
10) TEMPS DE FONCTIONNEMENT ETE (heures) 5126
11) RENDEMENT AU DEBIT D'EQUIP. (TURBINE+GENE.) (0.80) .82
12) COEFFICIENT DE SURPRESSION 1.2
13) DEBIT D'ARRALEMENT EN FRACT. DU DEBIT D'EQUIPEMENT .1
14) DEBIT RESERVE HIVER (l/s) 158
15) DEBIT RESERVE ETE (l/s) 200
16) NOMBRE DE TRONCONS DE LA CONDUITE 3
17) DEHIVELÉE ET LONGUEUR DEVELOPPÉE POUR CHAQUE TRONCON A PARTIR DE L'ANOT
    DEHIVELÉE LONGUEUR
TRONCON n° 1 48 1328.0
TRONCON n° 2 45 1180.0
TRONCON n° 3 143 448.0

```

```

CHUTE BRUTE: 228 m
LONG. DEVELOPPÉE TOTALE: 2948.0m

```

```

RENDEMENTS DE LA TURBINE EN FONCTION DU 1/10 DU DEBIT D'EQUIPEMENT
1/10 2/10 3/10 4/10 5/10 6/10 7/10 8/10 9/10 10/10
.888 .837 .879 .882 .872 .879 .882 .882 .879 .870

```

```

REND. DE LA GENE. EN FONCT. DU 1/4 DE LA PUISS. MAXI. SUR L'ARRE DE LA TURBINE
1/4 2/4 3/4 4/4
.850 .954 .954 .954

```

```
DEBIT D'EQUIPEMENT: 1000 l/s
```

	DIAMETRE OPTIMAL mm	EPAISSEUR mm	MASSE kg
TRONCON n° 1	758	6.3	133814
TRONCON n° 2	758	6.3	127588
TRONCON n° 3	688	5.9	38413

```
MASSE TOTALE DE LA CONDUITE : 329726 kg
```

```

ENERGIE PRODUITE EN HIVER: 3918775 kWh
ENERGIE PRODUITE EN ETE : 3398997 kWh
ENERGIE TOTALE : 7389772 kWh

```

6. CONCLUSION

La méthode proposée permet une détermination du diamètre économique des conduites forcées :

- soit en utilisant directement la forme (19) ou (20) ou (21),
- soit en utilisant un programme informatique qui, de plus, calcule la production d'énergie.

Un tel programme nécessite un investissement faible et permet de réaliser des études d'optimisation rapidement.

S'agissant des formules dont la critique a été faite au §1, on note que :

- la formule de Bresse est trop imprécise (quelle valeur donner à k),
- les formules de Sarkaria et Fahlbusch 2 conduisent à des valeurs trop petites du diamètre et ne peuvent donc être utilisées dans le cas des microcentrales.

Discussion

Président : M. M. DELAVALLE

M. Le Président. — Je remercie *M. BONGRAND* de son exposé, qui nous a fait quitter le terrain des généralités pour une approche globale des problèmes de la minihydroélectricité en France et hors de France, mais, à l'occasion notamment de l'intervention de *M. CATALAN*, nous avons tout de même plongé dans le débat français en la matière. Ici, nous nous trouvons dans un sujet beaucoup plus technique, mais qui nous montre bien à quel point il peut-être important, lorsque l'on réalise des aménagements de moyenne ou de petite importance, de disposer de méthodologies et de techniques d'étude qui puissent être à l'origine de la rentabilité ou de la non rentabilité d'un aménagement. Lorsqu'on voit la perte de charge passer, en fonction du diamètre d'une conduite forcée, de 25 % à moins de 8 %, on se doute bien que le résultat final, pour l'entrepreneur qui va construire et exploiter une microcentrale, ne sera pas exactement le même; dans un cas, sans doute pourra-t-il obtenir un résultat économique satisfaisant, et dans l'autre, s'il réalisait sa petite centrale dans des conditions de perte de charge aussi néfastes, il risquerait fort de se retrouver dans une situation commerciale dramatique.

Je pense que nous pouvons passer à la discussion. Nous sommes ici dans un domaine très technique. Qui demande la parole ?

M. GAUTHERON. — Avez-vous effectué une étude de la sensibilité de votre formule au taux d'actualisation, et pourquoi prendre 8 % ?

M. BONGRAND. — L'étude de sensibilité a montré que le paramètre le plus important est le débit car il apparaît à la puissance 3. La valeur de 8 % du taux d'actualisation a été déterminée par notre service économique.

M. BLANC. — Pourquoi le calcul d'optimisation du diamètre de la conduite forcée ne tient-il pas compte du coût de l'équipement électromécanique de l'usine qui est également influencé par les pertes de charge dans la conduite d'amenée à travers la chute nette ?

Le diamètre calculé est théorique, mais pour des installations de cette taille, il convient de choisir entre les dimensions existantes dans le commerce.

M. BONGRAND. — L'influence des variations des pertes de charge en fonction du choix du diamètre de la conduite sur le dimensionnement et donc le coût des équipements électro-mécaniques est négligeable.

Le diamètre calculé est effectivement théorique. Le programme, après avoir déterminé le diamètre théorique, va chercher dans une table la valeur nominale la plus proche.

M. GIRAULT. — Le programme ne tient pas compte du vieillissement de la conduite forcée.

M. Le Président. — Il faut bien voir qu'il y a deux niveaux d'études économiques, et je ne crois pas me tromper en disant qu'ici nous en sommes au stade des méthodes je dirais presque de tests économiques pour choisir les dimensionnements principaux le plus tôt possible en n'ayant peut-être pas toutes les données techniques de détail du projet. On peut décider plus tard d'affiner une étude économique, mais en tenant compte du résultat du dégrossissage lorsqu'on veut avoir une évaluation plus affinée du productible et, à travers le productible, l'évaluation économique du projet. Cela se place probablement dans une première boucle qui permet d'éviter les grosses erreurs du point de vue économique; ce sont des méthodes de boucle de tests en cours d'étude qui ont de plus en plus de succès parce qu'elles permettent parfois d'éviter des erreurs coûteuses.

M. BONGRAND. — L'étude de sensibilité a montré que le résultat est peu sensible à ce paramètre. L'utilisateur en tient

compte dans le choix de la valeur de la rugosité des tuyaux qui sera choisie intermédiaire entre celle d'un tuyau neuf et celle d'un tuyau ancien.

M. LECORNU. — Comme pour le calcul des diamètres de conduites de refoulement de station de pompage, il s'agit de trouver le meilleur compromis entre l'investissement et la valeur des pertes d'énergie actualisées. N'y a-t-il pas lieu d'introduire, dans le prix au kilo, un terme lié aux dépenses d'entretien ?

M. BONGRAND. — Les coûts d'entretien des conduites forcées pour les centrales de production autonome sont faibles, voire nuls, les conduites étant souvent enterrées.

M. BANAL. — Les formules classiques citées par l'auteur sont encore valables, à conditions de modifier les coefficients.

Y a-t-il des raisons de principe pour lesquelles des formules valables pour des conduites forcées de grands diamètres cessent de l'être pour des petites ?

M. BONGRAND. — Les coefficients des formules sont liés aux conditions économiques en vigueur au moment de leur établissement. Les études précédentes ont une base statistique, indépendante de la taille de la conduite. Or les conditions économiques ont changé. Il suffit pour s'en convaincre de voir l'évolution des tarifs d'achat de l'énergie des producteurs autonomes par E.D.F.

De plus, les longueurs de conduites ont tendance à s'allonger, les meilleurs sites étant déjà équipés. Il convient donc de porter une attention particulière au dimensionnement. Il faut noter que, pour une petite centrale, la conduite forcée peut représenter jusqu'à la moitié de l'investissement.

M. TRUONG. — Le calcul du diamètre « économique » réalisé à E.D.F. pour de grands aménagements montre que l'optimum est assez plat.

M. FEILLÉE. — Le calcul du diamètre de la conduite forcée doit prendre en compte fréquemment d'autres critères que ceux exposés précédemment.

Lorsque la conduite forcée est relativement longue, il faut vérifier que les conditions de survitesse, surpression et de stabilité du réglage de vitesse de la turbine sont assurées et dans la négative, il faut examiner les dispositions à prendre (augmentation du diamètre de la conduite, installation d'une cheminée d'équilibre, clapets anti-bélier, etc.).

Dans cette étude, il est relativement facile d'approcher les problèmes de la surpression dans la conduite et de la survitesse des groupes. Par contre, les calculs de la stabilité du réglage en réseau séparé nécessite l'utilisation de programmes informatiques qui ne sont pas à la portée des utilisateurs du guide des petits aménagements.

Pour dégrossir le problème, ne pourrait-on pas établir des formules approchées, par exemple en réactualisant les formules qui avaient été proposées il y a plus de quarante ans par *M. D. GADEN*, compte-tenu de l'évolution des régulateurs de vitesse ?

M. Le Président. — Je remercie *M. FEILLÉE* de son intervention.

Je me garderai bien de tirer des conclusions à la fin d'une première séance qui n'est que le début de notre session, puisque nous parlerons encore de minihydroélectricité pendant les séances de cet après-midi et de demain matin.

Je voudrais simplement remercier toute l'assistance et plus particulièrement les différents intervenants qui nous ont permis un débat enrichissant et qui ont bien voulu faciliter au maximum la tâche de l'animateur que j'ai été ce matin.