

# Mesure de la vitesse d'érosion

## Bilan des essais industriels à la Roche Bat l'Aigue avec le Decaver

L. Chincholle Laboratoire de génie électrique de Paris

P.M. Baetz Electricité de France, Service de la production hydraulique

### 1. Introduction

Le service de la Production hydraulique d'EDF gère un parc de 1 300 groupes hydroélectriques. Le phénomène d'érosion par cavitation qui ne se rencontre, presque exclusivement, que sur les groupes de types Francis, Kaplan, Hélices et Bulbes (950 machines au total), touche à peu près 1 turbine sur 5.

L'entretien par réparation du matériel érodé (rechargement par soudage...) mobilise, pour l'ensemble du service, environ 25 personnes à temps plein sur une année et ceci malgré l'utilisation de plus en plus grande de moyens de réparation automatisés tels que robotique et soudage semi-automatique assurant des gains de temps dans les opérations.

Les essais industriels menés à l'usine de la Roche Bat l'Aigue, avec le « Détecteur de cavitation érosive », s'ils peuvent être confirmés, laissent entrevoir la possibilité de déterminer les régimes de fonctionnement conduisant à une érosion par cavitation des machines pour chaque cas particulier (machine + conditions de fonctionnement). La connaissance de ces régimes particuliers pourra, dans certains cas, aider l'exploitant à optimiser les conditions de fonctionnement de ses machines.

Après avoir présenté le Decaver (Détecteur de Cavitation Erosive) nous rappellerons quelques résultats obtenus en laboratoire qui semblent être assez généraux pour permettre une meilleure interprétation des essais de la Roche Bat l'Aigue.

### 1.1. Rappels sur le Decaver et sur quelques résultats obtenus en laboratoire

Le Decaver est un appareil qui permet de mesurer très généralement la vitesse d'abrasion et de corrosion notamment la vitesse d'érosion par cavitation.

*1.1.1. Principe du Decaver :* Le principe de fonctionnement est de type électrochimique. On sait que la plupart des métaux tels que l'acier inoxydable, le titane, le nickel, etc... placés dans l'eau se recouvrent d'une couche d'oxyde dite passivante qui protège le métal en évitant l'évolution de la corrosion. Dans cet état le potentiel du métal sera  $E_o$ .

Si, par abrasion, on enlève la couche d'oxyde, le potentiel prend une valeur  $E_a$  d'autant plus négative que l'abrasion est plus importante. En même temps, la couche tend à se reformer très rapidement pour retrouver l'état initial. Cette évolution s'accompagne d'une variation de courant si l'on impose une tension ou d'une variation de potentiel si l'on impose un courant. Plusieurs publications ont déjà été présentées (1), (2), (3), (4).

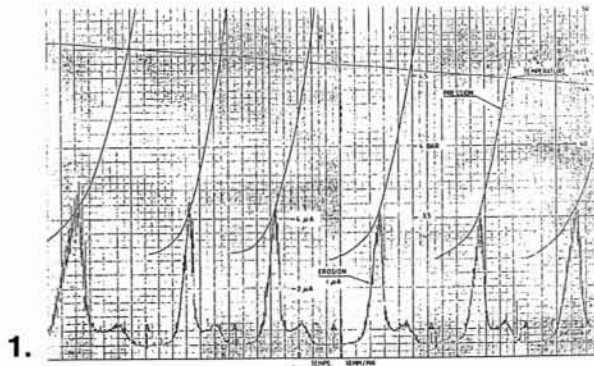
*1.1.2. Modes de fonctionnement :* Le rôle du Decaver est de polariser convenablement un capteur constitué par un métal qui se passive et de mesurer les variations d'une grandeur électrique qui est fonction de l'importance de l'abrasion.

Mode galvanostatique : on impose un courant à travers le capteur et on mesure les variations de son potentiel.

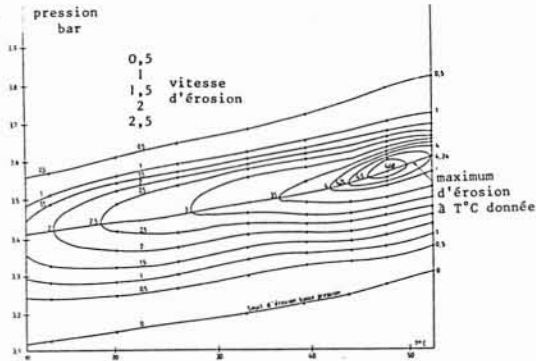
### Measurement of erosion rate.

#### Results of industrial tests conducted at la Roche Bat l'Aigue with the Decaver

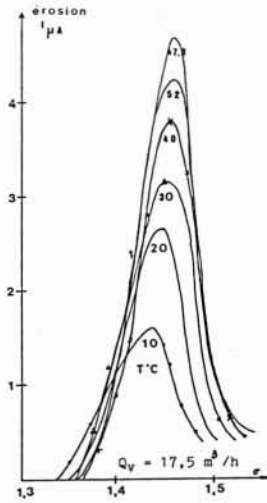
*The Decaver (an erosive cavitation detector), invented and used at the laboratory by Mr Chincholle, Professor at the Paris electrical engineering Laboratory, makes it possible to determine, in certain conditions, the erosive intensity of cavitation. A first assessment of this device in an industrial environment has been made on the G 3 wheel frame at La Roche Bat l'Aigue. This article relates to the tests and the results obtained, especially determining a half-load erosion maximum, whatever the nature of outdoor weather conditions (water temperature, muddled water...), whilst at full load the erosion is negligible.*



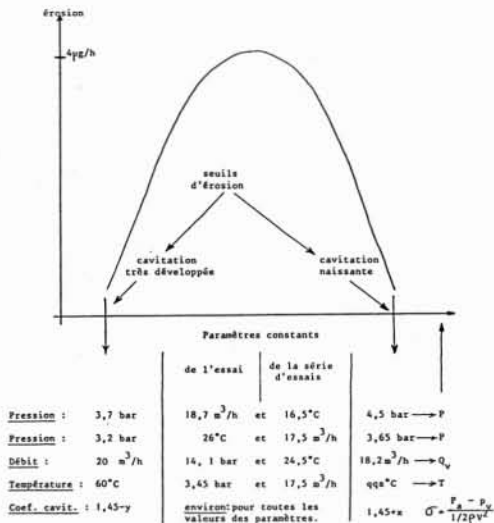
1.



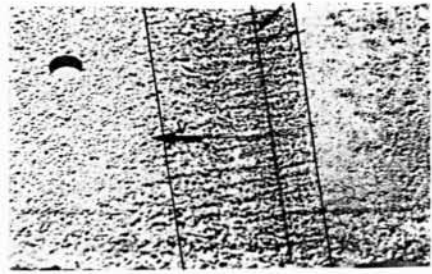
2.



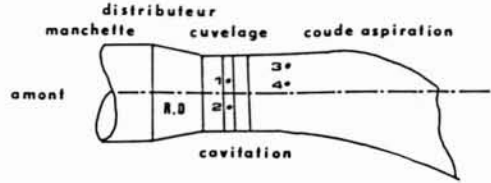
3.



4.

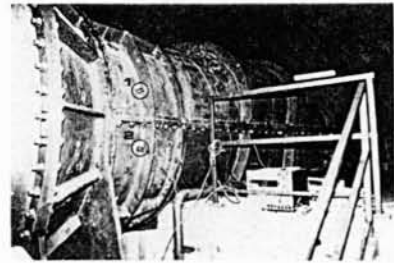


5.

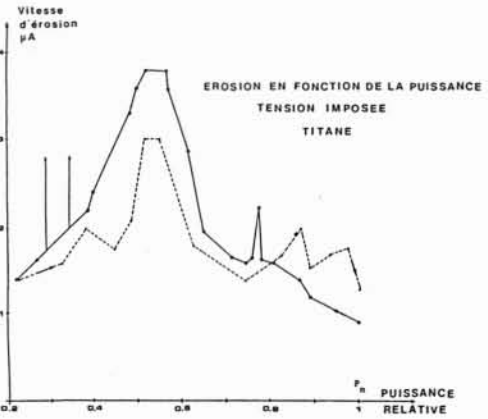


- 1- sur couvelage : partie supérieure, capteur  $\varnothing$  14 mm titane
- 2- sur couvelage : partie inférieure, capteur  $\varnothing$  12 mm inox
- 3- sur coude aspirateur : partie supérieure, capteur  $\varnothing$  5 mm inox
- 4- sur coude aspirateur : partie supérieure, capteur  $\varnothing$  14 mm titane

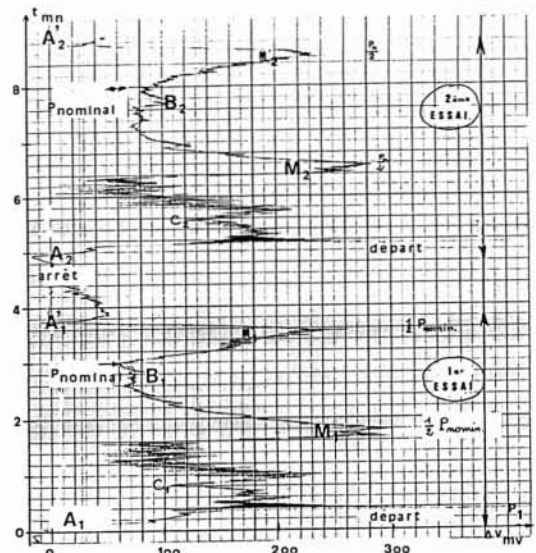
6.



7.



8.



9.

1 - Au cours d'un essai on ouvre la vanne de séro (A<sub>2</sub>) à sa valeur nominale (B<sub>2</sub>) puis on la ferme à nouveau (A<sub>1</sub>). Vue la dynamique du système les deux maximums ne sont pas identiques en grandeur.  
2 - Deux essais successifs sont très reproductibles.

1. Résultats expérimentaux -  $Q_v = 17,5 \text{ m}^3/\text{h}$ .
2. Courbes isoérosion (pression/température) -  $Q_v = 17,5 \text{ m}^3/\text{h}$ .
3. Érosion en fonction du nombre de cavitation  $\sigma$ .
4. Représentation schématique de l'érosion en fonction des paramètres mentionnés.
5. Érosion de la ceinture en acier ordinaire.
6. Disposition des sondes.
7. Vue générale de l'installation.
8. Érosion en fonction de la puissance électrique.
9. Essais de reproductibilité de l'érosion (variation du potentiel) en fonction du débit (variation du temps).

Mode potentiostatique : on impose le potentiel du capteur et on mesure le courant qui le traverse. Ce courant est proportionnel à la vitesse d'érosion.

Quelle que soit la technique utilisée, le Decaver est un appareil très sensible capable de donner, sur l'installation du laboratoire, une vitesse d'érosion de l'ordre de  $100 \mu\text{m}/\text{an}$ . Quand l'abrasion cesse, le capteur se reforme entièrement et retrouve l'état initial en potentiel et en courant.

*1.1.3. Rappel de quelques résultats expérimentaux de laboratoire (4) :* Nous ne signalerons que les résultats obtenus au Laboratoire de Génie Électrique de Paris et qui sont susceptibles de présenter un intérêt pour l'interprétation des essais réalisés à l'usine de la Roche Bat l'Aigue.

Ces résultats ont été obtenus sur un petit tunnel de cavitation utilisant de l'eau comme fluide et un doigt de titane à la fois comme élément cavitant et comme capteur.

Sur l'enregistrement de la *figure 1* on voit la reproductibilité de six essais successifs quand la pression décroît de 5 bar à 3,2 bar tandis que la température s'élève lentement. Notons que l'érosion passe un maximum vers 3,5 bar. La *figure 2* montre des courbes isoérosion tirées d'enregistrements analogues au précédent.

La *figure 3* montre l'importance du coefficient de cavitation  $\sigma$  pour l'expression de l'érosion de cavitation. Enfin, la *figure 4* est une généralisation de l'évolution de l'érosion de cavitation en fonction de la pression, du débit, de la température, du coefficient de cavitation et même de la teneur en air.

## 1.2. Essais du Decaver à la Roche Bat l'Aigue

Les essais devaient avoir lieu sur une machine soumise à la cavitation érosive et dont on connaissait l'importance de l'érosion pour une durée de fonctionnement donnée. Les machines de la Roche Bat l'Aigue se prêtant à ces conditions, les essais se sont déroulés de 1983 à 1986.

*1.2.1. Description du site expérimental :* Le barrage-usine est équipé de 4 groupes en « S » turbinant les eaux de la

Creuse. Il a été mis en service en 1978. Les caractéristiques générales de l'usine sont :  $Hn = 12 \text{ m}$  -  $Q$  total turbiné =  $75 \text{ m}^3/\text{s}$  - P max. totale = 8 MW ( $4 \times 2$ ). Chaque groupe en « S » à axe horizontal comprend une turbine Kaplan (roue de 1 850 mm à pales variables, distributeur fixe - Enfoncement à  $Qn = 4,55 \text{ m}$ ) et un multiplicateur (PV = 280 tr/min et GV = 1 000 tr/mn).

*Historique de l'érosion :* En 1983, après 20 500 heures de fonctionnement, on constate sur le manteau en acier 20 CMD 5, une érosion caractéristique de cavitation qui s'est surtout développée sur une bande de 6 à 7 cm de large (profondeur de l'usure 2 mm environ). Cette bande est décalée de 2 cm vers l'aval par rapport à l'axe de la roue (*fig. 5*). Il a été décidé alors de remonter les manteaux de tous les groupes avec des pièces en inox Z 6 CN 18.10. L'essai du Decaver est réalisé sur le nouveau manteau inox du Groupe 3 afin de mieux apprécier les conditions dans lesquelles la cavitation précédente s'est développée.

*1.2.2. Présentation de l'essai :* La disposition des capteurs sur le groupe est indiquée sur le schéma de la *figure 6* et sur la photo de la *figure 7*.

Les capteurs 1 et 2 sont disposés sur la ceinture, dans la zone érodée. Ils sont distants de 60 cm, leur surface active affleure la paroi intérieure de la conduite. Les électrodes 3 et 4 sont placées à 80 cm en aval dans une zone non soumise à l'érosion. Trois séries de mesures ont été faites :

- décembre 1983 à 21 119 heures de marche,
- janvier 1986 à 26 450 heures de marche,
- avril 1986 à 27 733 heures de marche.

*1.2.3. Résultats des essais :* L'ensemble des trois campagnes de mesure a clairement mis en évidence qu'il existe toujours un maximum d'érosion à 0,55 fois la puissance nominale ( $P_n$ ) (*fig. 8*) alors que l'érosion à pleine charge est négligeable. Ces essais ont montré que les résultats obtenus par le Decaver sont reproductibles dans le temps. La *figure 9* représente deux essais successifs comprenant chacun une ouverture et une fermeture de la turbine ( $A_1$  et  $A_2$  = démarrage du groupe,  $C_1$  et  $C_2$  = couplage sur le réseau,  $M_1$  et  $M_2 = 0,55 P_n$  ( $P_n$ ),  $M'_1$  et  $M'_2 = 0,55 P_n$  ( $P_n$ ),  $B_1$  et  $B_2 = P_n$ ,  $A'_1$  et  $A'_2$  = arrêt du groupe). On a remarqué que 2 capteurs placés à 60 cm de distance sur une même circonférence donnent les mêmes « profils » d'érosion, ce qui tendrait à montrer qu'il y a une continuité de la cavitation sur cette génératrice, dans cette zone (*fig. 10*).

*Commentaires sur les résultats :* Le point le plus intéressant de ces essais est la détermination d'un maximum d'érosion à demi-charge quelles que soient les conditions extérieures (Température de l'eau, eau chargée...), alors qu'à pleine charge l'érosion est négligeable. On remarquera l'analogie avec les résultats obtenus en laboratoire lorsque le débit varie (*fig. 6*). Sachant que le mode d'exploitation de la machine n'autorise que le fonctionnement à 1/2 charge ou à pleine charge, on peut conclure que l'érosion constatée sur le manteau de roue résulte uniquement des 17 000 heures de fonctionnement à 1/2 charge (80 % du



temps total). On peut relier ce résultat à la profondeur d'érosion constatée sur le manteau du G3 (environ 2 mm) et à l'indication du Decaver à  $1/2 P_n$  (3,6  $\mu\text{A}$ ). Le calcul de la vitesse d'usure du matériau donne 0,12  $\mu\text{m/h}$ , soit encore 1 mm/an pour un fonctionnement permanent de la turbine avec une érosion constante telle que le Decaver affiche un courant constant de 3,6  $\mu\text{A}$ .

*Considérations sur l'étalonnage du Decaver :* Supposons qu'on utilise des capteurs en titane pour comparer l'érosion dans deux cas différents, une érosion par ultrasons et l'érosion de la Roche Bat l'Aigue avec un acier 20 CMD 5 du manteau de roue.

Dans le premier cas un courant de 1  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  donne une érosion de 1 mm/an. Dans le second cas nous avons 3,6  $\mu\text{A}$  pour un diamètre de 14 mm soit une densité de courant de 2,34  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  ce qui donnerait avec l'étalonnage du premier cas 2,34 mm/an de titane soit une érosion 2,34 fois plus forte qu'avec l'acier ordinaire. Or on sait que l'érosion du titane est environ 2,5 fois plus grande que celle de l'acier ordinaire en présence de cavitation. Bien que cette ressemblance soit frappante on ne doit pas oublier que c'est le résultat du seul essai disponible en ce moment.

Parallèlement, des essais d'érosion qui sont en cours au laboratoire dans un tunnel de cavitation semblent donner des résultats comparables aux précédents.

En résumé, pour l'essai de la Roche Bat l'Aigue un courant de 1  $\mu\text{A}$  dans le capteur en titane correspond à une érosion instantanée de 0,28 mm/an sur l'acier 20 CMD 5 du manteau de roue soit de 0,032  $\mu\text{m/h}/\mu\text{A}$ .

## 2. Conclusions

Dans le cadre de l'exploitation des turbines hydrauliques, le Decaver présente l'intérêt de relier l'intensité érosive de cavitation de parties statiques d'une machine, aux conditions de fonctionnement de la machine : débit, hauteur de chute, etc...

Ceci peut permettre, suivant les possibilités de conduite des groupes d'éviter les fonctionnements prolongés à un régime donnant lieu à une érosion importante de cavitation, dans la mesure où la plage de cavitation est suffisamment étroite.

Si l'on veut associer l'intensité érosive indiquée par le Decaver à l'usure de certains matériaux dans des conditions données, l'étalonnage de l'appareil doit encore être précisé ou bien effectué sur un essai de longue durée (5 000 heures par exemple) à débit à peu près fixe.

En conclusion, l'essai industriel de la Roche Bat l'Aigue ne peut permettre de porter un avis que sur les possibilités de mesure du Decaver sur les parties statiques de la machine. L'extension à la surveillance de la cavitation sur les roues de turbine semble plus délicate car elle nécessite la mise en œuvre d'un système embarqué ou bien la sortie du signal électrique sur l'axe de la turbine par un dispositif balais-collecteur. Dans tous les cas, il serait intéressant de confirmer les résultats positifs déjà acquis, sur d'autres machines soumises à la cavitation.

## Références

- [1] *Brevets :* ANVAR (CHINCHOLLE) en 1978. ANVAR et IREQ en 1983.
- [2] R. SIMONEAU, J.L. FIHEY, L. CHINCHOLLE. Effet d'activation anodique de la cavitation érosive, *Congrès AIRH, 1982, Amsterdam.*
- [3] L. CHINCHOLLE, G. KLIMEK, R. SIMONEAU. Etalonnage d'un Détecteur de Cavitation Erosive, *Congrès AIRH, 1982, Amsterdam.*
- [4] L. CHINCHOLLE. Etude de l'érosion instantanée de cavitation en fonction du débit, de la pression et de la température. *Journal of Hydraulic Research.* Vol. 26, 1988, N° 2.
- [5] L. CHINCHOLLE. Répartition du courant à la surface d'une électrode plongée dans un milieu aqueux lorsque cette surface est partiellement abrasée. *Compte Rendu Académie des Sciences-Electrochimie*, t. 296 (6 juin 1983).

## Adresses des auteurs

Prof. L. Chincholle  
Laboratoire de génie électrique  
de Paris  
ESE. Plateau du Moulon  
91190 Gif-sur-Yvette  
Tél. : 69 41 80 40

Monsieur P.M. Baetz  
EDF. Service de la Production  
hydraulique  
14/16, rue de Miromesnil  
75008 Paris  
Tél. : 47 64 70 00

## Discussion

Président : M.P. LAVY

*M. KARIMI :* 1) Les électrodes en inox et en titane fournissent le même signal sur votre graphique mais ils n'ont pas la même vitesse d'érosion. Comment expliquer cela ?

2) La vitesse d'érosion et la valeur électrochimique que mesure le « DECAVER » dépendent beaucoup de la température. Je ne sais pas comment vous pouvez reporter la part des signaux due à l'augmentation de la vitesse d'érosion de la part des signaux due à l'élévation du courant ?

*M. CHINCHOLLE :* 1) Oui, mais ces électrodes servent comme référence normalisée d'érosion et on détermine, par ailleurs, la corrélation qui existe avec chaque matériau.

2) La température au cours d'un essai variant de 0,3 °C, je l'ai considérée constante.

*M. KARIMI :* Quel est le mécanisme physique qui fournit le signal électrochimique (potentiel chimique) ? Pour une mesure plus juste de la vitesse d'érosion, il faut pouvoir séparer l'influence en température de ce potentiel.

*M. CHINCHOLLE :* Le potentiel chimique dépend de la température mais j'impose le potentiel dans ces essais et je mesure le courant. Le Decaver fournit le courant nécessaire à l'oxydation.

*M. BONNIN :* Pourriez-vous décrire les expériences qui valident la mesure de vitesse d'érosion à partir d'une lecture d'intensité, conduisant en particulier sur votre installation au coefficient de proportionnalité de 84  $\mu\text{g/h}$  par  $\mu\text{A}$  ?

*M. CHINCHOLLE :* L'intégration de la courbe intensité de courant (que nous appelons vitesse d'érosion) en fonction du temps donne la quantité de courant accumulée. D'autre part, la perte de masse est mesurée par pesées successives dans le temps. On peut tracer ainsi la valeur de la perte de masse ( $\mu\text{g}$ ) en fonction de la quantité d'électricité ( $\mu\text{A}\cdot\text{h}$ ) ; la pente de la droite ainsi obtenue donne le coefficient de proportionnalité :  $\mu\text{g}/\mu\text{A}\cdot\text{h}$ , soit  $\mu\text{g/h}$  par  $\mu\text{A}$ .