Société
Hydrotechnique de France
Commission de Cavitation
Groupe de recherche n° 4

ÉTUDE DÉTAILLÉE DE LA COMPARAISON ENTRE ESSAIS INDUSTRIELS ET MODÈLE DANS QUELQUES CAS BIEN DÉFINIS

PAR H. GIRAUD *

Ont contribué par leurs informations à l'élaboration de ce document :

- E.D.F.-C.R.E.C.,
- E.D.F.-D.T.G.,
- Etablissements NEYRPIG,
- Société des Forges et Ateliers du Creusot (S.F.A.C.),
- SOGREAH.

- Turbines Kaplan :
Châteauneuf-du-Rhône. . . Groupe 1
La Vanelle. Groupe 2
Saint-Hilaire-du-Rozier.
- Turbine bulbe :
Beaumont-Monteux.

Turbines Francis

Introduction

Le phénomène de cavitation dans les turbines hydrauliques est connu depuis fort longtemps et a fait l'objet de nombreuses recherches. Sur les machines industrielles, on se borne le plus souvent à constater les manifestations de la cavitation (érosions, vibrations, etc.). Si le modèle réduit permet mieux de voir les figures de cavitation et de détecter les altérations de performances dues à ce phénomène, il se prête assez mal, par contre, à des études d'érosion.

Le but de cette enquête est donc de comparer le prototype et le modèle afin de montrer l'intérêt des essais sur modèle dans les problèmes de cavitation.

Nous donnerons les conclusions principales que l'on peut tirer des renseignements obtenus sur les centrales suivantes :

- Turbines Francis :
Usine du Carla. Groupes 1 et 2
Usine de Génissiat. Groupe 1

* Ingénieur à la SOGREAH.

Usine du Carla.

Nous noterons quelques légères différences entre modèle réduit et machine industrielle :

- le distributeur de la machine d'essai comporte 24 directrices au lieu de 16 pour le prototype.

La correspondance entre ouvertures du distributeur a donc été faite en considérant les angles d'injection. Cette méthode s'est avérée valable car on obtient une bonne concordance des débits et des puissances.

- les aspirateurs sont de types différents. Pour la machine industrielle le rapport :

$$\frac{\text{distance axe distributeur, fond aspirateur}}{\text{diamètre de roue}} = 3,57$$

tandis que pour le modèle, le rapport est de 2,8.

MACHINES INDUSTRIELLES.

1° *Caractéristiques des machines industrielles indiquées sur le cahier des charges :*

- usine du Carla;

- deux turbines Francis à axe vertical avec roues acier inox 13 % de chrome;
- vitesse de rotation $n = 500$ tr/mn;
- diamètre de roue (sortie de l'aubage) = 1,330 m;
- puissance garantie pour :
 - $H = 125,05$
 - $N = 19\,500$ ch (14 350 kW);
 - (2 groupes en fonctionnement),
 - $H = 137,00$
 - $N = 20\,900$ ch (15 380 kW)
 - (1 groupe en fonctionnement);
- niveau aval, pour :
 - $Q = 0$ cote aval : 193,50,
 - $Q = 13$ m³/s cote aval : 194,24,
 - $Q = 26$ m³/s cote aval : 194,75;
- cote d'implantation de la roue : 195,25.

2° Caractéristiques de fonctionnement :

- chute effective toujours voisine de 137 m;
- niveau aval variable suivant le régime de fonctionnement entre la cote 194,70 et la cote 194,10, ce qui conduit à un coefficient de cavitation d'installation (σ_i) compris 0,0653 et 0,07 :

$$\sigma = \frac{H_a - H_s - H_v}{H}$$

H_a : pression atmosphérique;
 H_s : hauteur d'aspiration;
 H_v : tension de vapeur d'eau;
 H : chute.

3° Observations sur les érosions et les régimes de fonctionnement :

a) *Observations effectuées sur le groupe n° 1.* — Après 14 661 h de fonctionnement, dont :

- 48 % du temps à une puissance comprise entre..... 14,5 et 17 MW
soit :
 - 21 % du temps à une puissance comprise entre. 14,5 et 15,8 MW
 - 27 % du temps à une puissance comprise entre. 15,8 et 17 MW
- 33 % du temps à une puissance comprise entre..... 11,5 et 14,5 MW
- 13 % du temps à une puissance comprise entre..... 8,5 et 11,5 MW
- 6 % du temps à une puissance inférieure à..... 8,5 MW

le phénomène d'érosion dû à la cavitation est important (voir planche 4).

Il affecte essentiellement les entrées des aubes, dans le sens de l'écoulement de l'eau et près du congé de raccordement avec la ceinture.

Les surfaces en cause représentent de 50 à 150 cm².

Toutes les aubes sont atteintes, mais la profondeur varie un peu d'une aube à l'autre. Elle atteint par endroits 8 mm.

Des érosions par cavitation se retrouvent aussi sur la ceinture, vers l'arête d'entrée entre les aubes.

Cette roue n'a jamais subi de meulage, ni de recharge.

b) *Observations effectuées sur le groupe n° 2.* — Après 14 788 h de fonctionnement total, dont environ :

- 49 % du temps à une puissance comprise entre..... 14,5 et 17 MW
soit :
 - 18 % du temps à une puissance comprise entre. 14,5 et 15,8 MW
 - 31 % du temps à une puissance comprise entre. 15,8 et 17 MW
- 29 % du temps à une puissance comprise entre..... 11,5 et 14,5 MW
- 16 % du temps à une puissance comprise entre..... 8,5 et 11,5 MW
- 6 % du temps à une puissance inférieure à..... 8,5 MW

Le phénomène d'érosion dû à la cavitation est le même que celui observé sur le groupe 1, mais nettement moins accentué (profondeur d'érosion d'un millimètre).

4° Essais effectués par E.D.F. sur le groupe n° 2.

Les essais ont porté sur les points suivants :

a) *Influence de la cavitation sur les caractéristiques de la machine :*

Sur la machine industrielle, le coefficient de cavitation ne varie que dans des proportions relativement faibles. En effet, lorsque la chute est constante comme c'est le cas ici, on ne peut avoir des variations de σ_i que si le niveau aval varie beaucoup.

Par contre, pour une valeur donnée du σ_i d'installation, on peut faire varier la puissance jusqu'à la surcharge permise par l'alternateur et la limitation d'ouverture du distributeur.

L'examen de l'allure de la courbe puissance en fonction de l'ouverture du vannage permet, par comparaison avec la même courbe déduite du modèle réduit, de se rendre compte de l'influence des phénomènes de cavitation sur la puissance de la machine (voir planche 6).

b) *Repérage des « torches » par exploration de l'écoulement à la sonde :*

Une sonde spéciale mise au point par E.D.F. a permis d'explorer l'écoulement sous la roue par détection des zones gazeuses ou non.

Ainsi on a pu observer :

- une « torche » axiale bien centrée sous la roue (voir planche 1), pour une puissance de 23 800 ch correspondant à une ouverture de distributeur modèle 0 = 20;
- pas de « torche » pour des puissances de 19 900 ch et de 17 900 ch correspondant respectivement à des ouvertures de distributeur modèle 0 = 0,15 et 0 = 12,5;
- une « torche » excentrée tournante (voir planche 2) pour une puissance de 9 600 ch correspondant à 0 = 10;
- une « torche » excentrée de gros volume, qui tourne (voir planche 3) pour une puissance de 7 200 ch correspondant à 0 = 7,5.

TORCHES
SUR MODÈLE
RÉDUIT

*Swirl
on the model*

Ouverture :
Opening : 22,5.
Temps de pose :
Exposure :
1/50 000 s 1/100 s

TORCHES
SUR MODÈLE
RÉDUIT

*Swirl
on the model*

Ouverture :
Opening : 20.
Temps de pose :
Exposure :
1/50 000 s 1/100 s

TORCHE DÉCELÉE
SUR MACHINE INDUSTRIELLE
À L'AIDE DE SONDE

*Swirl detected
by probe
on prototype.*

TORCHES
SUR MODÈLE
RÉDUIT

*Swirl
on the model*

Ouverture :
Opening : 17,5.

Temps de pose :
Exposure :
1/50 000 s 1/100 s

TORCHES
SUR MODÈLE
RÉDUIT

*Swirl
on the model*

Ouverture :
Opening : 10.

Temps de pose :
Exposure :
1/50 000 s 1/100 s

TORCHE DÉCELÉE
SUR MACHINE INDUSTRIELLE
A L'AIDE DE SONDE

*Swirl detected
by probe
on prototype.*

TORCHES
SUR MODÈLE
RÉDUIT

*Swirl
on the model*

Ouverture :
Opening : 7,5.

Temps de pose :
Exposure :
1/50 000 s 1/100 s

TORCHE DÉCELÉE
SUR MACHINE INDUSTRIELLE
A L'AIDE DE SONDE

*Swirl detected
by probe
on prototype.*

3/

MACHINE D'ESSAI.

1° Caractéristiques :

- diamètre de roue : 314 mm;
- chute d'essai : 12 m environ;
- coefficient de cavitation variable par réduction de la pression atmosphérique régnant au-dessus du niveau aval;
- teneur en air dissous : 6 à 7 mmg/l.

2° Observations des érosions :

Il n'y a pas eu d'essais d'érosion au cours de ces essais de cavitation sur plate-forme.

3° Essais effectués sur modèle :

a) Influence de la cavitation sur les caractéristiques de la turbine :

Un grand nombre de points ont été étudiés et on a noté l'influence de la cavitation sur le rendement et la puissance. Dans le cas présent de Carla, on n'a jamais d'altération des performances pour des valeurs de σ variant entre 0,065 et 0,07. Par consé-

quent, on ne constate aucune anomalie sur la courbe : puissance en fonction de l'ouverture du distributeur (voir planches 5 et 6).

b) Observation visuelle de la cavitation et photographie à la lumière continue et stroboscopique pour des valeurs de σ comprises entre 0,065 et 0,07 :

- pour $\sigma = 22,5$ correspondant à une puissance industrielle de 25 000 ch,

on observe une « torche » axiale de très gros volume (voir planche 1) et la cavitation sur l'arête de sortie et contre la ceinture;

- pour $\sigma = 20$ correspondant à une puissance industrielle de 23 900 ch,

on observe une « torche » axiale d'assez gros volume (voir planche 1) et de la cavitation sur l'arête de sortie et contre la ceinture;

- pour $\sigma = 17,5$ correspondant à une puissance industrielle de 22 350 ch,

on observe une « torche » axiale ainsi qu'une très faible cavitation à la sortie de l'aubage (voir planche 2);

- pour $0 = 15$ correspondant à une puissance industrielle de 20 000 ch, il n'y a pas de « torche », ni de cavitation dans l'aubage;
- pour $0 = 10$ correspondant à une puissance industrielle de 13 900 ch, on observe une « torche » excentrée qui tourne (voir planche 2), on voit également quelques petites bulles de cavitation qui apparaissent de façon intermittente à la sortie de l'aubage côté ceinture;
- pour $0 = 7,5$ correspondant à une puissance industrielle de 9 600 ch, on observe une grosse « torche » excentrée qui tourne. Il n'y a pas de cavitation dans l'aubage (voir planche 3).

Usine de Génissiat, groupe 1.

CARACTÉRISTIQUES DU GROUPE A AXE VERTICAL.

— chute nette moyenne.....	64,5 m
— puissance.....	66 MW
— débit.....	125 m ³ /s
— vitesse de rotation.....	150 tr/mn
— cote de l'axe du distributeur..	261 m
— cote amont variable de.....	331,4 à 326,2 m
— cote aval comprise entre.....	261 et 266

4/ Usine du Carla. Roue du groupe 1 après 14 600 heures de fonctionnement.

Carla power plant. N° 1 sel runner after 14,600 hours' running time.

OBSERVATIONS EFFECTUÉES SUR LES AUBES.

a) Prototype :

Sur le prototype, des érosions apparaissent systématiquement sur l'arête de sortie côté extrados. D'autres types d'érosions sont également observés que nous ne prendrons pas en considération, pour les raisons suivantes :

- érosion peu importante;
- apparition après un temps de fonctionnement très variable suivant les roues;
- localisation en des zones où la cavitation apparaît surtout aux charges partielles pour lesquelles les temps de fonctionnement sont difficiles à comptabiliser.

Les observations portent sur plusieurs roues de la centrale de Génissiat.

Après 12 000 h de marche, les érosions sur l'arête de sortie couvrent une plage continue ou seulement quelques « îlots » isolés, dans une bande de 50 à 150 mm de largeur, partant de la ceinture et longeant l'arête de sortie sur 1 400 mm environ. Leur profondeur maximale est de l'ordre de 5 à 10 mm.

b) Modèle réduit :

Sur la planche 7, nous avons fait figurer le seuil d'apparition de la cavitation sur l'arête de sortie des aubes de la roue (seuil déduit des observations sur modèle réduit) en fonction du σ et de la puissance.

A titre indicatif, sur ce même graphique, nous avons porté la courbe correspondant à une baisse de 1 point sur le rendement, due à la cavitation.

COMPARAISON.

Les conditions de fonctionnement des groupes de Génissiat ne subissent pas de variations importantes. Il semble donc possible de considérer comme fonctionnement moyen, l'ensemble des fonctionnements obtenus pendant une période de 1 an.

Au cours de l'année 1957 — 6 000 h de fonctionnement — nous avons trouvé que le groupe a fonctionné pendant plus de 600 h au-delà du seuil défini sur la planche 7, soit environ pendant 10 % du temps.

Sur une période de fonctionnement de 12 000 h, on peut donc raisonnablement estimer qu'une roue s'est trouvée pendant 1 200 h dans des conditions telles qu'une cavitation apparaisse sur l'arête de sortie des aubes.

Confrontation des observations faites sur la machine industrielle et le modèle réduit.

EROSIONS.

a) Usine du Carla :

Sur la machine industrielle, on a pu observer de l'érosion à l'entrée des aubes, près du raccordement avec la ceinture.

Sur le modèle réduit, dans des conditions de fonctionnement semblables à celles du prototype, c'est-à-dire correspondant à des fonctionnements compris entre 15,8 et 17 MW avec un coefficient de cavitation compris entre 0,0653 et 0,07, on a observé le phénomène de cavitation naissant vraisemblable-

6/ Courbes donnant pour la machine d'essai et la machine industrielle la loi puissance de la turbine en fonction de l'ouverture du distributeur.

Turbine output vs distributor opening, for test machine and prototype.

7/ Usine de Génissiat. Groupe I. Chute moyenne H = 64,50 m.

Génissiat plant. No. I unit. Mean head H = 64.50 m.

ment à l'entrée de l'aubage là où on a constaté des phénomènes d'érosion sur la machine industrielle.

On peut donc présumer qu'il y a concordance entre les phénomènes de cavitation observés sur modèle réduit et les manifestations de celle-ci sur la machine industrielle.

La planche 5 le montre bien, car on voit que l'on a fonctionné pendant 31,6 % du temps dans une zone où le modèle réduit présente de la cavitation dans l'aubage.

b) Usine de Génissiat :

De l'érosion a été constatée sur les arêtes de sortie côté extradados, de la machine industrielle. Celle-ci a fonctionné pendant 1 200 h sur 12 000 dans des conditions telles que l'on avait pu observer sur le modèle réduit des phénomènes de cavitation sur l'arête de sortie. Il est logique d'attribuer à cette cavitation l'érosion constatée. Là encore il semble y avoir une bonne concordance entre le modèle réduit et la machine industrielle.

Ici aussi, la planche 7 illustre bien cette constatation.

REPÉRAGE DES « TORCHES ».

Ce repérage a seulement été fait à l'usine du Carla.

Pour les divers régimes de fonctionnement et dans des conditions semblables, on observe une excellente corrélation entre les observations de « torche » sur machine industrielle et modèle réduit.

N. B. — De nombreuses observations, plus qualitatives que quantitatives, faites sur d'autres machines, renforcent notre certitude qu'il existe entre modèle et prototype une excellente concordance en ce qui concerne les phénomènes de « torche ».

Turbines Kaplan

Usine de Châteauneuf-du-Rhône, groupe n° 1.

CARACTÉRISTIQUES DU GROUPE A AXE VERTICAL :

— chute nette maximale.....	19,3 m
— puissance unitaire.....	46 MW
— débit maximal (sous 16 m)....	320 m ³ /s
— vitesse de rotation.....	93,7 tr/mn
— cote de l'axe des pales.....	54,30

Niveau de restitution compris entre 59 et 60 avec pointes possibles à 58 et 61.

OBSERVATIONS EFFECTUÉES SUR LES PALES DU GROUPE N° 1,

a) après 3 000 h de fonctionnement (tabl. 1 a);

b) après 15 000 h environ (tabl. 2 a).

Les tableaux 1 a et 2 a indiquent, pour chacune de ces périodes, les différents fonctionnements réalisés et les observations de la cavitation sur modèle pour chacun d'eux :

— σ_i est le coefficient de cavitation d'installation du prototype avec pour plan de référence le plan contenant l'axe de rotation des pales;

- σ_1 est le coefficient de cavitation pour lequel, sur modèle, on a obtenu une chute de rendement de 1 %;
- a est la puissance obtenue sur modèle correspondant à la puissance industrielle pour le σ d'installation;
- b est la puissance sur modèle obtenue pour des valeurs de σ_i correspondant à σ_1 ;
- le rapport $(a/b) \times 100$ donne une idée de la marge de sécurité que l'on a sur la puissance entre le fonctionnement effectif et le fonctionnement limité par une cavitation assez développée.

Pour la cavitation sur modèle, observée par stroboscopie, on a distingué suivant la localisation du phénomène, de la cavitation marginale, de la cavitation sur le bord d'attaque et au moyeu. On a d'autre part, établi une graduation avec un nombre de croix allant jusqu'à trois quand la cavitation est très développée. L'absence de croix correspond à une absence complète de cavitation.

Pour les machines industrielles, seule l'érosion a pu être retenue. Après 3 000 h (tabl. 1 a), la pale présentait une érosion près du manteau de roue.

La réparation en a été effectuée et le profil dans cette zone a été amélioré. Après une nouvelle période de 15 000 h (tabl. 2 a), aucune trace d'érosion n'a été observée.

Usine de La Vanelle, groupe n° 2.

CARACTÉRISTIQUES DES GROUPES A AXE VERTICAL :

— chute nette.....	6,95 m
— puissance.....	8,5 MW
— débit.....	145 m ³ /s
— vitesse de rotation.....	100 tr/mn
— cote de l'axe des pales.....	128
— cote de restitution variable de.	128,7 à 131,5

OBSERVATIONS EFFECTUÉES SUR LES PALES.

L'observation sur prototype porte sur 50 000 h de fonctionnement. Il a été constaté une érosion sur la tranche de la pale contre le manteau de roue.

Nous avons reporté sur le tableau 1 b les différents points de fonctionnement. Les valeurs indiquées sont des valeurs moyennes, ce qui explique en particulier la valeur relativement faible des puissances.

Les observations correspondantes effectuées sur modèle montrent qu'à ces points de fonctionnement ne correspond aucune trace de cavitation. Nous avons indiqué le rapport de la puissance moyenne de fonctionnement à la puissance correspondant au σ_1 , c'est-à-dire avec chute de rendement de 1 point. Ce rapport reste compris entre 0,5 et 0,75.

Cependant, ces observations correspondant à la puissance moyenne sont de peu d'intérêt pour la cavitation. Au contraire, les phénomènes se produisant à pleine charge seront plus significatifs, encore qu'il soit impossible de déterminer la durée du fonctionnement dans ces conditions. Nous avons donc indiqué par un nombre de croix allant de 0 à 3 l'importance de la cavitation à pleine charge sur le bord d'attaque de la pale, du moyeu et sur la périphérie.

Tableau 1 a

	HAUTEUR DE CHUTE MOYENNE	NIVEAU AVAL MOYEN	PUISSANCE MOYENNE	NOMBRE D'HEURES DE MARCHÉ	PUISSANCE CORRES- PONDANTE SUR MODÈLE (a) (ch)	σ_i (Thoma)	CAVITATION			FONCTION- NEMENT AU σ_i PUISSANCE SUR MODÈLE (b) (ch)	$\frac{a}{b} \times 100$
	(m)	(m)	(MW)				Marginale	Bord d'attaque de la pale	Moyeu		
1	18,49	58,04	46,8	168	58	0,743	++	+	++	65,5	88,5
2	18,01	58,77	41,2	1 178	53,1	0,802				68,7	77,3
3	17,53	58,94	44,5	844	59,7	0,835	+	+	+	70	85,5
4	16,96	58,93	43,8	135	61,8	0,863	+	+	+	71	87
5	16,31	58,83	43,1	191	64,3	0,89	++	+	++	72	89,2
6	15,48	59,03	36,9	140	59,6	0,952	++	+	++	74	80,5
7	14,30	59,01	35,6	353	64,8	1,03	+	+	+	75,5	85,7

Tableau 1 b

	CHUTE	NIVEAU AVAL	PUIS- SANCE MOYENNE	DURÉE DE MARCHÉ	PUIS- SANCE SUR MODÈLE (a) (ch)	σ_i	PUIS- SANCE MODÈLE AU σ_i (b)	$\left(\frac{a}{b}\right)$	PUIS- SANCE PLEINE CHARGE (MW)	PUIS- SANCE MODÈLE PLEINE CHARGE (c)	$\left(\frac{c}{b}\right)$	CAVITATION A PLEINE CHARGE		
	(m)	(m)	(MW)	(h)				%			%	Margi- nale	Bord d'at- taque	Moyeu
1	8,158	128,774	5,758	6 247	38,7	1,32	79,5	48,7	9,95	66,7	84	xxx	xx	x
2	7,992	128,95	6,365	6 162	44,2	1,372	80,7	54,7	9,85	68,2	84,5	xxx	xx	x
3	7,873	129,04	6,717	7 596	47,6	1,4	81,5	58,4	9,75	69	84,5	xx	xx	x
4	7,73	129,16	5,742	4 435	41,7	1,443	82,5	50,6	9,63	70,5	85,5	xx	x	x
5	7,58	129,31	7,055	5 292	53	1,493	83,2	63,7	9,4	72,5	87	xx	x	
6	7,42	129,278	6,831	4 659	52,7	1,52	83,5	63,2	9,2	73,5	88	x	x	
7	7,29	129,67	7,581	4 707	60,2	1,6	84,5	71,2	9	74,5	88	x		
8	7,097	129,47	7,312	4 541	60,7	1,617	86	70,8	8,7	75,7	88			
9	6,84	129,67	7,138	3 000	62,5	1,705	87	71,8	8,5	76,6	88			
10	6,47	129,64	7,215	3 900	68,5	1,8	90	76	8,2	77,7	86			

Tableau 2 a

	HAUTEUR DE CHUTE MOYENNE	NIVEAU AVAL MOYEN	PUISSANCE MOYENNE	NOMBRE D'HEURES DE MARCHÉ	PUISSANCE CORRES- PONDANTE SUR MODÈLE (a) (ch)	σ_i (Thoma)	CAVITATION			FONCTION- NEMENT AU σ_i PUISSANCE SUR MODÈLE (b) (ch)	$\frac{a}{b} \times 100$
	(m)	(m)	(MW)				Marginale	Bord d'attaque de la pale	Moyeu		
1	18,64	58,90	35,27	2 521	43,1	0,782				68,2	63,2
2	18,11	59,15	38,4	3 818	49,1	0,82				70	70,2
3	17,48	59,49	43,9	3 733	59	0,869	+	+	+	71	83,1
4	16,95	59,93	44,6	2 587	62,9	0,923	+	+	+	73	86,2
5	16,27	59,85	45,3	1 031	68	0,956	++	+	++	73,5	92,5
6	15,61	60,30	42,9	764	68,4	1,023	++	+	++	73,7	92,7
7	14,33	59,26	35,6	401	64,5	1,042	+	+	+	75,5	85,5

Usine de Saint-Hilaire-du-Rozier.

CARACTÉRISTIQUES DU GROUPE A AXE HORIZONTAL.

— chute moyenne.....	10 m
— puissance.....	17 620 ch
— débit.....	147 m ³ /s
— vitesse de rotation.....	107 tr/mn
— cote de l'axe de la roue.....	149
— cote aval moyenne.....	151,60

Pales en acier ordinaire.

OBSERVATIONS EFFECTUÉES SUR LA MACHINE.

a) Prototype :

Lors de la visite du mois de décembre 1964, les groupes avaient fonctionné pendant 40 000 h environ, et pendant le 1/6^e de ce temps (soit 6 600 h) à pleine charge.

Ce sont les fonctionnements à pleine charge qui nous intéressent, puisque c'est là que les risques de cavitation sont les plus grands.

Aucune trace d'érosion par cavitation n'a été constatée aussi bien sur les aubes que dans les autres parties de la machine. Aucun bruit caractéristique de cavitation n'est observé en fonctionnement normal.

Quelques points de fonctionnement les plus critiques ont été relevés et résumés dans le tableau ci-après :

POINT	H	PUISSANCE TURBINE N _{CH}	COTE AVAL	σ_i PROTOTYPE
1	9,3	16 700	151,59	1,352
2	8,46	14 900	152	1,535
3	9,48	17 000	151,52	1,32
4	9,94	17 150	150,99	1,205
5 (*)	10,80	19 100	150,25	1,04

(*) Pour le point 5 qui est un point de fonctionnement exceptionnel et que nous avons pu réaliser pendant quelques minutes seulement à cause des limites imposées par l'alternateur, on a observé quelques crépitements et légers claquements dans la machine.

b) Modèle réduit :

Nous reportons dans le tableau ci-dessous, les σ_i d'installation prototype les $\sigma_{critiques}$ correspondant au début de chute de rendement du modèle, pour les points de fonctionnement indiqués plus haut. Pour ces $\sigma_{critiques}$, on observe sur le modèle une petite poche de cavitation contre le moyeu, au voisinage du tourillon des pales, ainsi qu'une légère cavitation marginale. On a reporté également le rapport $[(a/b) \times 100]$ défini plus haut.

POINT	σ_i	$\sigma_{critique}$	$\frac{\sigma_i}{\sigma_{critique}}$	$\frac{a}{b} \times 100$
1	1,352	1,01	1,34	87,2
2	1,535	1,11	1,372	87,2
3	1,32	1	1,32	86,2
4	1,205	0,875	1,375	83,5
5 (*)	1,04	0,86	1,21	90

(*) Pour le point 5 qui est un point de fonctionnement exceptionnel et que nous avons pu réaliser pendant quelques minutes seulement à cause des limites imposées par l'alternateur, on a observé quelques crépitements et légers claquements dans la machine.

Confrontation des observations faites sur la machine et le modèle réduit.

a) USINE DE CHATEAUNEUF-DU-RHÔNE.

La comparaison entre les observations sur modèle réduit (tabl. 1 a et 2 a) et le prototype montre que la cavitation décelée sur la machine d'essai ne se manifeste pas par de l'érosion sur la machine industrielle.

La comparaison des tableaux 1 a et 2 a entre eux montre aussi que l'érosion observée près du man-

teau de roue était due à un défaut dans l'exécution de la pale, puisque, après réparation et modifications du profil, cette érosion ne s'est pas reproduite alors que les conditions de fonctionnement restaient sensiblement les mêmes.

b) USINE DE LA VANELLE.

Le tableau 1 b montre que l'érosion constatée sur la pale du prototype correspond à la cavitation marginale observée sur modèle à pleine charge et pour les chutes élevées. La cavitation observée, dans les mêmes conditions mais avec une intensité moindre, sur le bord d'attaque et près du moyeu, n'a provoqué aucune érosion. Il semble qu'on puisse conclure à une bonne concordance entre modèle et machine industrielle.

c) USINE DE SAINT-HILAIRE-DU-ROZIER.

On voit que le σ_i d'installation prototype est très supérieur au $\sigma_{critique}$ observé sur modèle, et il est logique de ne pas trouver d'usure par cavitation sur la machine industrielle.

On peut donc dire qu'il y a accord entre le modèle et la machine industrielle.

Cependant, les résultats ci-dessus conduisent à faire la remarque suivante :

Dans ce cas, pour des valeurs de σ_i supérieures à $1,3 \sigma_{critique}$ modèle, aucun bruit ne se manifeste sur la machine industrielle.

Par contre, pour σ_i égal à $1,2 \sigma_{critique}$ environ, on note le début de bruits caractéristiques de la cavitation.

Turbines axiales

Usine de Beaumont-Montoux.

CARACTÉRISTIQUES DU GROUPE A AXE HORIZONTAL.

— chute moyenne.....	11 m
— puissance. (9,12 MW)	12 400 ch
— débit.	92,5 m ³ /s
— vitesse de rotation.....	150 tr/mn
— cote de l'axe de la roue.....	112,50
— cote amont.	127,7
— cote aval moyenne.....	116,7

OBSERVATIONS EFFECTUÉES SUR LA MACHINE.

a) Prototype :

Lors de la visite du mois de juin 1964, le groupe avait fonctionné pendant 39 709 h et produit 217 200 000 kW/h. Aucune trace d'érosion due à la cavitation n'a été constatée, aussi bien d'ailleurs sur les aubes que dans les autres parties de la machine.

Pendant la marche du groupe aucun bruit significatif de cavitation ne se manifeste.

Ce groupe fonctionne très souvent à pleine charge et le coefficient de cavitation correspondant au point haut de la roue de $\sigma_i = 1,12$.

b) Modèle réduit :

Pour le point de fonctionnement correspondant à la pleine charge du prototype, on a sur le modèle

un coefficient de cavitation critique $\sigma_{\text{critique}} = 0,85$. Avec ce σ_{critique} on observe le début de la chute de rendement et de puissance. On observe aussi sur les aubes une petite poche de cavitation au voisinage du moyeu vers le tourillon des pales, ainsi qu'un peu de cavitation marginale.

Le début d'apparition de la cavitation se situe approximativement pour $\sigma_{\text{critique}} = 0,95$.

Pour $\sigma = 1,12$ il n'y a aucune trace de cavitation dans l'aubage.

Le rapport $[(a/b) \times 100]$ est ici égal à 87,5.

CONFRONTATION DES OBSERVATIONS FAITES SUR LE PROTOTYPE ET LE MODÈLE RÉDUIT.

Comme on peut le remarquer, le σ d'installation est nettement supérieur au σ critique et au σ d'apparition de la cavitation.

Le prototype fonctionnant très souvent à pleine charge (c'est-à-dire là où les risques d'érosion par cavitation sont les plus grands) on peut conclure, puisqu'il n'y a pas d'usure par cavitation, que le calage de la machine est prudent.

Pour ce cas de fonctionnement, on peut dire que :

- avec σ_i prototype = 1,31 σ_{critique} modèle;
- ou σ_i prototype = 1,18 σ_u d'apparition de la cavitation modèle,

la machine industrielle ne présente aucune érosion par cavitation.

Cela ne permet pas évidemment de conclure et de prévoir jusqu'à quelle limite on pourrait caler la machine industrielle, mais on peut penser cependant qu'il y a accord entre le modèle et le prototype puisque le modèle indique « pas de cavitation », donc pas de risque d'usure et qu'effectivement il n'y a pas d'usure sur le prototype, donc vraisemblablement pas de cavitation.

On peut, dans ce cas, porter au moins la conclusion suivante :

Une marge de 31 % par rapport au σ_{critique} modèle est suffisante pour qu'on évite l'érosion. Cela ne veut pas dire qu'une marge plus faible n'aurait pas permis d'atteindre le même résultat.

Conclusions

Turbines Francis.

Deux cas de turbines Francis ont été examinés, et ces deux cas correspondent à des vitesses spécifiques (n_s) assez différentes :

- $n_s = 155$ pour le Carla;
- $n_s = 245$ pour Génissiat.

Dans les deux cas, les machines industrielles ont fonctionné pendant un temps suffisamment grand, à des régimes qui, réalisés sur modèle réduit, ont montré de la cavitation dans l'aubage. On a observé sur les machines industrielles que les plaques d'érosion étaient précisément localisées à l'endroit où la cavitation s'était manifestée sur modèle réduit.

Cependant, il n'est pas possible de déduire de ces expériences une information complète en ce qui

concerne la corrélation entre le degré de cavitation sur le modèle et l'usure sur le prototype.

En effet, même en supposant que les manifestations instantanées de la cavitation sur le modèle et la machine industrielle évoluent de façon identique en fonction des régimes de marche, on ne peut pas pour autant déduire quel est le régime limite à partir duquel l'érosion de cavitation se développe sur la machine industrielle.

En ce qui concerne le phénomène de « torche » pour l'usine du Carla, la concordance entre le modèle et le prototype est remarquable.

Turbines Kaplan et bulbe.

Si l'on suppose que la cavitation se produit de la même façon sur modèle et sur le prototype, l'observation de ce qui se passe sur le modèle nous conduit à considérer les cas suivants :

— *il y a cavitation marginale :*

À la lumière des observations faites sur les turbines de Châteauneuf-du-Rhône et La Vanelle, on ne peut tirer de conclusion très précise concernant la corrélation entre cavitation sur modèle et usure sur machine industrielle.

Pour Châteauneuf-du-Rhône, après réparation, il n'y a plus d'érosion, alors que le modèle montre encore de la cavitation marginale. Pour La Vanelle, il y a érosion sur machine industrielle et cavitation marginale sur modèle. Il semble donc que l'usure soit fonction de l'intensité de la cavitation.

— *il y a cavitation sur le bord d'attaque et près du moyeu :*

Dans le cas de Châteauneuf-du-Rhône et La Vanelle, la machine industrielle ne subit pas d'érosion de cavitation de ce type. On peut en déduire une « borne inférieure » de fonctionnement permise sans érosion et avec un certain degré de développement de la cavitation, mais évidemment on ne peut rien dire de la limite à partir de laquelle l'érosion se manifesterait.

— *il n'y a aucune cavitation dans l'aubage du modèle :*

Ce sont les cas de Saint-Hilaire-du-Rozier et de Beaumont-Montoux où on ne trouve aucune usure par cavitation. Ces cas qui, *a priori*, paraissent peu intéressants, nous apportent cependant quelques renseignements utiles.

On peut conclure que :

- pour une machine axiale semblable à celle de Beaumont-Montoux et fonctionnant à des régimes voisins, un écart de 30 % entre le σ_{critique} et le σ_i d'installation (ou de 18 % entre le σ_i d'installation et le σ_u d'apparition de la cavitation) est suffisant pour qu'il n'y ait pas d'érosion;
- pour une machine Kaplan semblable à celle de Saint-Hilaire et fonctionnant à des régimes voisins, un écart de 30 % entre le σ_{critique} et le σ_i d'installation est suffisant pour qu'il n'y ait pas d'usure. Lorsque cet écart se réduit à 20 %, on note l'apparition des bruits caractéristiques de la cavitation.

Conclusions générales.

Deux sortes de préoccupations sont à l'origine des investigations dont nous nous rendons compte :

a) une préoccupation de connaissance. La question principale est la suivante : dans quelle mesure les lois de similitude qu'on sait n'être que des approximations, sont-elles vérifiées par l'expérience ? En d'autres termes, dans quelle mesure les modèles reproduisent-ils correctement l'évolution des phénomènes très complexes de cavitation ? A cette question nous n'apportons qu'une réponse très incomplète, car malheureusement les observations industrielles sont très fragmentaires pour ce qui concerne les manifestations instantanées à la cavitation. On peut cependant noter une vérification très intéressante, de la validité de la similitude dans le cas des torches à la sortie des turbines Francis. Pour le reste, on peut au moins dire qu'on n'a pas rencontré de contradictions flagrantes et qu'il y a lieu de présumer que la similitude de cavitation établie en fait pour le seuil de cavitation peut s'étendre assez valablement à la cavitation développée.

b) l'autre préoccupation est de juger du degré d'utilité des essais sur modèle réduit de cavitation. Il n'y a aucun doute à ce sujet pour ce qui concerne l'élaboration des tracés, mais peut-on valablement se poser la question suivante : les dépenses importantes qu'implique le recours au modèle réduit se justifient-elles par la précision plus grande qu'elles apportent au stade de l'élaboration des projets d'installation. Ici il faut se souvenir que le modèle n'est pas la seule méthode ; le recours à la statistique basée sur les observations industrielles fut pendant longtemps l'arme principale des projecteurs. Les cas particuliers qui ont été examinés dans cette étude nous semblent établir que le modèle a certainement un degré de représentativité suffisant pour permettre une prévision notablement plus précise que celle qu'on pourrait déduire de la statistique. Il est important de noter cependant que ceci n'est vrai qu'à la condition de procéder sur le modèle à des observations suffisamment détaillées et systématiques suivant des techniques qui sont d'ailleurs assez bien développées maintenant.

Cette étude n'a pas permis de traiter complètement le problème, mais elle a néanmoins apporté des conclusions intéressantes et elle nous incite à proposer de poursuivre l'investigation.

L'étude pourrait être continuée en se limitant à un type de turbine et à un nombre très limité de cas.

On pourrait par exemple choisir quelques usines du Rhin qui, compte tenu des variations de niveau aval et des résultats d'exploitation déjà acquis, permettraient de cerner de plus près le problème du seuil d'érosion.

Discussion

Les discussions ont porté principalement sur les points suivants :

1. Au sujet des usures observées sur l'arête d'entrée des roues de l'usine du « Carla », selon certains, l'usure peut non pas être causée par de la cavitation, mais par de l'eau fortement chargée en sable. Ce sable provoquant un sillon, modifie le profil et ensuite la cavitation apparaît provoquant la tâche d'érosion.

Ce point de vue n'est pas partagé par toute l'assistance, car au « Carla » il n'y a pas de sable dans l'eau et, sur le modèle réduit, la cavitation apparaît bien à l'entrée de l'aubage.

Cependant, un certain doute subsiste et l'opinion générale est que, dans ce cas particulier, on ne peut être absolument affirmatif en disant qu'il y a *excellente concordance* entre modèle et prototype.

2. Au sujet des « torches » il est indiqué que leur repérage dans la machine industrielle est obtenu à l'aide de sonde à résistivité qui indique à tout instant, si la tête de mesure se trouve dans l'eau ou dans un milieu gazeux.

La détermination des « torches » fixes et centrées est immédiate. Pour des torches tournant dans l'aspirateur, il faut relever en divers points d'un rayon, la durée et la phase du passage gazeux.

A la question posée de savoir si, lorsqu'on entend les coups sourds à la sortie d'un aspirateur, ceux-ci sont liés à une torche qui apparaît stable sur le modèle, mais qui à l'échelle industrielle fait des lâchers de bulles, il est répondu : sur les bras de supports d'arbres d'hélices d'un navire, les claquements très violents qu'on entend coïncident toujours avec le lâcher d'un nuage de cavitation, même si la cavitation est dans l'ensemble stable.

On rappelle aussi les essais au David Taylor Model Basin où, à l'extrémité d'une aile portante d'envergure limitée, on créait un tourbillon très stable : on effectuait des mesures de pression à l'aide d'une sonde très sensible et en même temps on filmait à l'ultra-cinéma. Il a été constaté qu'une pointe de pression (claquements) coïncidait avec la disparition d'une petite bulle de cavitation qui venait de se détacher du noyau du tourbillon.

On a pu constater aussi sur des turbines Kaplan, à la fois sur le modèle et le prototype, qu'à l'apparition de la cavitation correspondaient des fluctuations de pression.

3. La cavitation peut apparaître dans la turbine Kaplan sur l'aubage au voisinage du moyeu. Il semble, et c'est l'avis général, que lorsque cette cavitation n'est pas trop développée, elle ne provoque pas d'érosion. Ceci, d'ailleurs, confirme certaines conclusions qui avaient été indiquées dans une communication présentée le 20 mars 1964 au Comité Technique de la S.H.F. : « Influence des divers types de cavitation sur les bruits, les érosions et les modifications des performances ».

4. Le dernier point discuté concerne la marge de sécurité que l'on doit prendre entre le σ critique et le σ d'installation, car pratiquement la cavitation apparaît toujours avant l'altération des performances. Mais peu d'avis sont donnés sur la valeur de cette marge de sécurité.

M. le Président clôt la discussion et indique que des résultats plus précis concernant l'usine de Rhinau sur le Rhin pourront faire l'objet d'un autre rapport.

Abstract**Detailed study of prototype and model test comparisons
for a few specific cases****by H. Giraud ***

1. Introduction.

Information on cavitation affecting hydraulic machines is obtainable from the following sources:

- (i) The scale model;
- (ii) The prototype.

Observation of the latter, however, is most usually confined to effects of cavitation, such as erosion, vibration, etc., whereas mainly cavitation figures are observed on the model, while noting effects of cavitation on machine performance.

The purpose of this study, therefore, is to compare the prototype with the model in order to show the usefulness of model tests in studying cavitation problems.

2. Francis turbines.

Two cases have been investigated:

- (i) Two 20,900 HP vertical Francis turbines at the Carla power plant (500 r.p.m. under 137 m head) showed erosion at the runner blade entrance. These machines ran for 31.6 % of the overall time in an operating range in which cavitation had been observed on the model;
- (ii) The 90,000 HP vertical Francis turbines at the Genissiat power plant (150 r.p.m. under 64.5 m head) were affected by erosion at the runner blade exits. These machines ran for 10 % of the total time in an operating range in which cavitation had been observed on the model.

There was close agreement between prototype and model, and in the case of the Carla turbines the visible swirl underneath the model and prototype runners was almost identical for both.

3. Kaplan and bulb turbines.

No erosion was observed near the runner hub and blade leading edges of the 11,500 HP La Vanelle plant Kaplan turbine (100 r.p.m. under 6.95 m head) and the 62,500 HP Châteauneuf-du-Rhône Kaplan turbine (93.7 r.p.m. under 19.3 m head), even though the respective models had shown traces of cavitation. The marginal cavitation observed on the La Vanelle model did leave any erosion on the blades.

No erosion was observed on the prototypes nor cavitation on the models of the 17,600 HP Saint-Hilaire-du-Rozier Kaplan turbine (107 r.p.m. under 10 m head) and the 12,400 HP Beaumont-Monteux bulb turbine (150 r.p.m. under 11 m head).

* Engineer at SOGREAH.