

Exposé de M. Grandjean

Programme EVA et modélisation associée

1. Contexte

Le programme EVA est un programme d'essais de pompe de réacteur à échelle réduite en écoulement diphasique eau-vapeur. Ce programme résultait d'un accord tripartite entre les partenaires CEA, Framatome, Westinghouse et s'est déroulé de 1975 à fin 1982.

Les tâches suivantes ont été réalisées :

	Responsable	Lieu
• construction de l'installation d'essai	CEA	Cadarache
Réalisation des essais	+ personnel FRA	
• Interprétation des essais	Westinghouse	Pittsburgh
développement d'un modèle analytique		
• Calcul de sensibilité au modèle de pompe dans des calculs d'accidents LOCA grosse brèche avec le code constructeur SATAN VI	Framatome	Paris

2. Données techniques

La pompe testée est une pompe de type W93A (modèle équipant les centrales Westinghouse 900 MWe) à l'échelle 0.382, échelle la plus importante utilisée en regard des programmes expérimentaux similaires.

A la différence des programmes EPOPEE à EDF ou Combustion Engineering aux USA, on n'a pas cherché à respecter la hauteur manométrique de la pompe échelle 1 en utilisant pour la maquette une vitesse de rotation dans le rapport inverse de l'échelle géométrique. Une vitesse nominale de 1500 tr/mn a été choisie par commodité technologique et les caractéristiques nominales qui en résultent sont indiquées ci-dessous (tableau I).

Le schéma de la boucle d'essais est donné sur la figure 5. On remarquera que la pompe en essai est alimentée en mélange diphasique par un émulseur réglable, conçu et

I. — Caractéristiques nominales de la pompe EVA échelle 0.382	
Vitesse de rotation	$N_n = 1500$ t/mn
Débit volumique	$Q_n = 0.392$ m ³ /s
Hauteur manométrique	$H_n = 19.6$ m
Couple hydraulique	$C_n = 581$ m.N (pour $\rho_n = 998$ kg/m ³)

construit spécialement pour ce programme ; cet émulseur très proche de la pompe est alimenté en vapeur par les circuits secondaires des réacteurs prototypes du site (pouvant fournir en pointe jusqu'à 100 tonnes/heure de vapeur à 35 bars) et en liquide par une boucle en circuit fermé, reprenant l'eau condensée en séparateur et réchauffée dans un échangeur vapeur/eau.

Sur le tableau II sont indiqués les domaines de variation des paramètres d'essai : pression, débit volumique et taux de vide en entrée, vitesse de rotation.

II. — Domaine de variation des paramètres d'essai	
Vitesse de rotation	0 (Rotor bloqué) 750, 1500, 3000 t/mn — 750 t/mn Rotor libre
Pression amont	8; 15; 29 bar
Débit volumique à l'entrée	0.25 à $5 \times Q_n$ en débit direct 0.25 à $1 \times Q_n$ en débit inverse
Taux de vide à l'entrée	0 à 1 (limitation inférieure selon le débit volumique)

Le tableau III donne la répartition des essais disponibles pour chacun des 3 quadrants. Les numérotations et notations conventionnelles des quadrants et octants sont rappelées sur la figure 6. En complément aux essais simple et double phase ont été utilisés des essais en cavitation où, partant de conditions amont sous-saturées la pression était progressivement baissée jusqu'à la saturation tout en essayant de maintenir constant le débit volume à l'entrée.

III. — Répartition des essais disponibles par quadrant	
1 ^{er} Quadrant ($Q > 0$; $N > 0$)	
simple phase	90
double phase	445
cavitation	83
	618
2 ^e Quadrant ($Q < 0$; $N > 0$)	
simple phase	16
double phase	159
cavitation	9
	184
3 ^e Quadrant ($Q < 0$; $N < 0$)	
simple phase	12
double phase	61
cavitation	0
	73

3. Résultats

Il est d'usage d'exprimer les caractéristiques de hauteur et couple (expérimentales ou calculées) sous forme réduite en les rapportant aux valeurs nominales des mêmes grandeurs. On définit ainsi :

- une hauteur réduite $h = H/H_n$
- un couple réduit $\beta = c/c_n$

où H est la hauteur manométrique totale
 c est le couple hydraulique exercé par la roue sur le fluide et rapporté à sa masse volumique
 l'indice n désigne les valeurs nominales.

On définit de même des valeurs réduites du débit volumique et de la vitesse de rotation :

$$v = Q_v / Q_{vn} \quad \text{et} \quad \omega = N / N_n$$

Les variables réduites permettent de déterminer les variables homologues.

Ainsi pour la hauteur dans le 1^{er} quadrant :

$$H_N = h/\omega^2 \text{ noté HAN pour } v/\omega < 1$$

$$h/v^2 \text{ noté HVN pour } v/\omega > 1$$

De même pour le couple et pour les quadrants supérieurs. La représentation homologue consiste à porter sur un même graphique les branches HAN en fonction de la variable v/ω pour $0 < v/\omega < 1$ (1^{er} octant) et HVN en fonction de la variable ω/v pour $0 < \omega/v < 1$ (2^e octant).

Cette représentation apparaît sur la figure 7. Bien qu'un peu abstraite la représentation homologue est intéressante car elle reste invariante dans un changement d'échelle ou de vitesse de rotation nominale (seulement pour un fluide parfait en toute rigueur). On notera qu'elle donne la variation des caractéristiques, hauteur ou couple, simultanément en fonction du débit et de la vitesse de rotation. Y apparaît notamment le point de fonctionnement à vitesse nulle qui, pour la hauteur, n'est autre que le coefficient de perte de charge de la pompe arrêtée.

Pour séparer l'influence des paramètres il est nécessaire de distinguer l'influence du taux de vide. Cette influence se traduit par une dégradation dont l'allure a été signalée par M. De Crécy (figure 3).

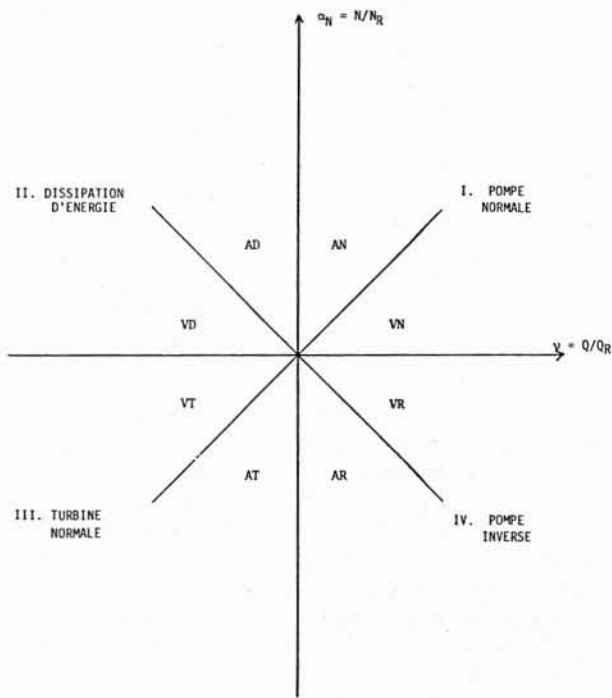


Figure 6 — Quadrants de fonctionnement. Notations.

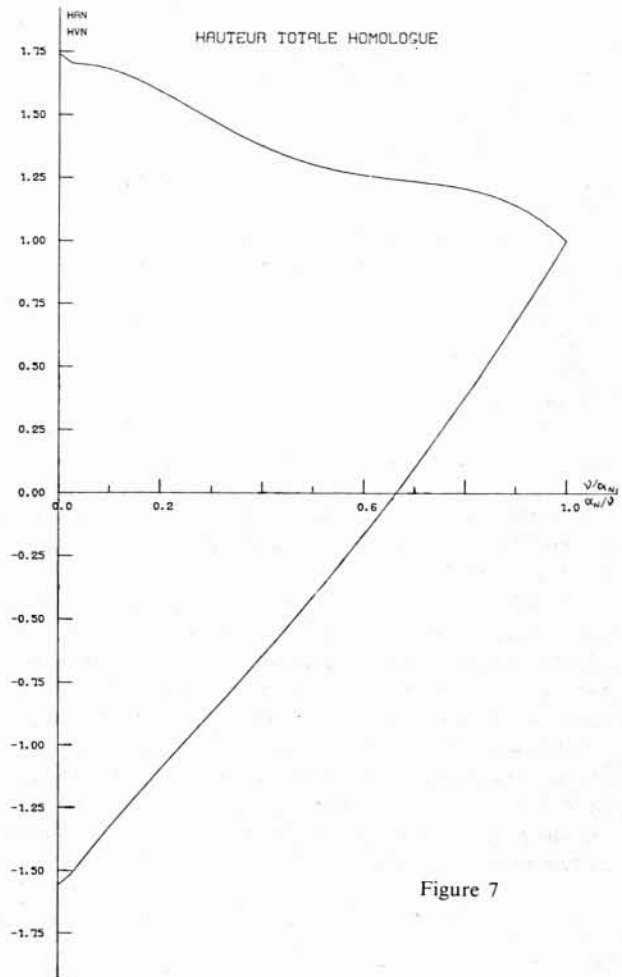


Figure 7

4. Modélisation

Nous évoquerons ici très sommairement les travaux de modélisation qui se sont développés sur la base des résultats expérimentaux EVA, à savoir le modèle Westinghouse développé contractuellement dans le cadre du programme EVA, et le modèle EDIPE développé en parallèle au CEA.

Modèle Westinghouse

Ce modèle est issu du modèle de Wilson, modèle ponctuel qui cherche à corrélérer le rapport des pertes diphasiques aux pertes monophasiques, défini par :

$$H^* = \frac{(H_{th} - H_{ex}) 2P}{(H_{th} - H_{ex}) 1P}$$

en fonction de paramètres tels que débit homologué taux de vide, pression etc.

La corrélation $H^* = f(v, \omega, \alpha, \dots)$ obtenue à partir d'essais sur une maquette à échelle réduite est utilisée à échelle 1 pour une classe de pompes de modèles voisins et permet de calculer la hauteur diphasique selon :

$$H_{2P} = H_{th2P} - H^* (H_{th1P} - H_{1P}) \quad (2)$$

Si le principe de base de ce modèle est très simple la mise en pratique reste délicate. En effet, les pertes qui interviennent dans les expressions (1) et (2) apparaissent comme des différences entre une hauteur théorique et une hauteur mesurée. On se trouve alors confronté aux difficultés suivantes :

- sensibilité importante de la hauteur théorique simple phase aux caractéristiques géométriques de la roue;
- nécessité de connaître l'état du fluide en sortie de roue pour calculer une hauteur théorique en double phase.

Par ailleurs, Westinghouse a étendu la méthode de Wilson au calcul du couple diphasique en définissant un rapport T^* par une relation analogue à (1). Or, à la différence des hauteurs, il se trouve que le couple réel et le couple théorique ont des points d'intersection. Il a donc fallu modifier artificiellement et arbitrairement ce dernier de manière à supprimer les intersections qui rendaient nul le dénominateur de T^* .

Les difficultés ci-dessus mentionnées ont fait apparaître que les rapports de pertes H^* et T^* du modèle de Wilson originel n'étaient pas transposables sans risques à des pompes de caractéristiques un tant soit peu différentes de celles de la maquette ayant servi à l'établissement des corrélations H^* (ou T^*) = $f(v, \omega, \alpha, \dots)$. Pour pouvoir garantir le bon déroulement des calculs, le modèle originel de Wilson a été modifié par des hypothèses simplificatrices dont le résultat est de le ramener à une simple corrélation empirique :

$$H_{2P} = H_{1P} - \Delta H_{EVA} (v/\omega, \alpha) \quad (3)$$

où

H_{2P} est la hauteur homologué double phase de la pompe considérée

H_{1P} est la hauteur homologué simple phase, supposée connue, de cette même pompe
 ΔH_{EVA} est la dégradation de la hauteur homologué déduite des essais EVA c'est-à-dire la différence $(H_{1P} - H_{2P})_{EVA}$

La paramétrisation de ΔH en fonction du débit homologué et du taux de vide est différenciée pour les 6 octants correspondant aux 3 quadrants. Une relation analogue à (3) est obtenue pour le couple hydraulique homologué.

Modèle EDIPE

Ce modèle développé au CEA représente le niveau de complexité supérieur par rapport aux modèles empiriques ponctuels de type « boîte-noire ». La pompe j est représentée par une série de 3 volumes (aspiration; roue; diffuseur + volute) dans lesquels l'écriture de bilans permet de déterminer l'état du fluide en chacun des nœuds à partir des conditions amont. L'écoulement diphasique est traité par un modèle homogène à l'équilibre thermodynamique avec glissement interfacial. C'est ce glissement qui est apparu le paramètre principal pour la dégradation des caractéristiques diphasiques dans le 1^{er} quadrant, et qu'on a choisi de corrélérer sur les résultats expérimentaux.

La vitesse de rotation est régie par l'équation mécanique de bilan du couple sur l'arbre de la pompe.

La hauteur manométrique et le couple hydraulique interviennent comme termes sources respectivement dans les équations de bilan d'impulsion et d'énergie de la roue. On les a exprimés sous la forme :

$$H = H_{th} + \Delta H_f + \Delta H_c + \Delta H_d$$

$$C = C_{th} + C_d$$

avec :

H_{th}, C_{th} : hauteur et couple théoriques obtenus par les triangles de vitesses en entrée et sortie roue

ΔH_f : perte hydraulique sur la hauteur due au frottement sur les parois

ΔH_c : perte hydraulique sur la hauteur due aux chocs ou décollements du fluide sur les aubes en régime désadapté

$\Delta H_d, C_d$: pertes dissipatives sur la hauteur ou le couple dues à la recirculation interne du fluide dans les aubages aux faibles débits.

Le principe du modèle est de considérer les termes théoriques H_{th} et C_{th} comme termes principaux. On les obtient sans peine en double phase en réécrivant une équation d'Euler généralisée où interviennent le taux de vide et le glissement interfacial. Les pertes $\Delta H_{f,c,d}$ et C_d sont considérés comme termes correcteurs et sont supposés être en double phase les mêmes fonctions du débit volume qu'en simple phase liquide. L'ajustement de ces termes est d'ailleurs réalisé de manière à retrouver au mieux les caractéristiques expérimentales en écoulement monophasique liquide.

Performances : Le modèle EDIPE donne des résultats convenables tant que le principe ci-dessus reste à peu près vérifié : c'est le cas pour le 1^{er} et 3^e quadrants pas trop loin du régime adapté. Ce n'est par contre plus du tout le cas pour le 2^e quadrant où les termes dissipatifs sont largement prépondérants (hauteurs théorique et réelle sont constamment de signe opposé !).

Il faut signaler aussi que le modèle, du fait de l'hypothèse d'équilibre thermodynamique des phases, est inapte à rendre compte de débits critiques diphasiques réalistes. C'est là une difficulté inhérente au choix du modèle d'écoulement.

Conclusions

Le programme EVA a fourni une base de données importantes sur les performances d'une pompe primaire de réacteur en écoulement diphasique eau-vapeur. A l'issue d'un travail intensif de dépouillement et vérification des résultats expérimentaux, il faut constater que ces derniers présentent, comme dans d'autres programmes, une disper-

sion importante qui rend hasardeuse la mise au point de modèles.

Les modèles analytiques développés dans le cadre de ce programme sont un modèle rudimentaire et un modèle intermédiaire insuffisamment approfondi. On peut regretter que l'effort de réflexion engagé récemment au CEA/STT et ayant conduit à la définition d'un modèle élaboré de pompe axiale 6 équations véritablement à la mesure du problème, arrive un peu tard, à une époque où tous les programmes expérimentaux sont terminés depuis 4 ou 5 ans. De ces programmes, une masse de résultats largement sous-exploités subit actuellement un vieillissement précoce au fur et à mesure que sont disposées les équipes expérimentales et la connaissance non écrite qu'elles avaient accumulée. La réutilisation de ces résultats dans des modèles « pompe » de deuxième génération semble donc problématique.