



FR9710025

Production d'énergie (hydraulique, thermique et nucléaire)

PLANS D'EXPERIENCE NUMERIQUES. ETUDE DU
COMPORTEMENT VIBRATOIRE DES GRAPPES DE
COMMANDE D'UN REACTEUR A EAU PRESSURISEE

*NUMERICAL EXPERIMENT DESIGNS. STUDY OF
VIBRATORY BEHAVIOUR OF PWR'S CONTROL ROD
CLUSTER*

97NB00074

29-08

D



DIRECTION DES ÉTUDES ET
RECHERCHES
SERVICE ENSEMBLES DE PRODUCTION
DÉPARTEMENT ACOUSTIQUE ET MÉCANIQUE
VIBRATOIRE



FR9710025

Section : I,II
Doc. enreg. Is : 2118/47
N° TRN : FR9710025
Destination : I,II+D,D

Mars 1997

BOSELUT D.
SOULIER B.
REGNIER G.

PLANS D'EXPERIENCE NUMERIQUES. ETUDE
DU COMPORTEMENT VIBRATOIRE DES
GRAPPES DE COMMANDE D'UN REACTEUR A
EAU PRESSURISEE

*NUMERICAL EXPERIMENT DESIGNS. STUDY
OF VIBRATORY BEHAVIOUR OF PWR'S
CONTROL ROD CLUSTER*

Pages : 9

97NB00074

Diffusion : J.-M. Lecœuvre
EDF-DER
Service IPN, Département PROVAL
1, avenue du Général-de-Gaulle
92141 Clamart Cedex

29 - 08

© EDF 1997

ISSN 1161-0611

SYNTHÈSE :

On présente dans cette note une application originale de la méthode des Plans d'Expérience à des calculs numériques par Eléments Finis de comportement vibratoire non-linéaire de grappe de commande de réacteur à eau pressurisée. L'accent est mis sur l'intérêt particulier du choix de cette méthode.

Dans une première partie, le problème industriel est posé. Le modèle Eléments Finis et les excitations prises en compte sont présentés. Les grandeurs de sortie du calcul sont les déplacements des crayons dans leur guidage, les forces de choc contre le guidage et la puissance d'usure développée.

Dans une deuxième partie, l'étendue de l'étude paramétrique est présentée. La méthode des Plans d'Expérience utilisée tente d'approcher une surface de réponse par un polynôme de degré deux. Le modèle retenu est composé pour chacun des paramètres de tous les termes linéaires, quadratiques et d'interaction (26 coefficients). L'étude des forces RMS de choc et des puissances d'usure sur chacun des 17 points de guidage du crayon conduit à 34 polynômes.

Dans la troisième partie, l'élaboration du plan est détaillée : adaptation d'un plan de Doelhart pour prendre en compte un paramètre qualitatif, optimisation du plan par ajout de calculs bien choisis (approche D-optimale) et enfin extension pour passer de 4 à 6 paramètres.

Dans la quatrième partie, l'ensemble des informations que l'on peut sortir de l'analyse du plan est présenté. Un tableau d'analyse des résultats (orientée plus spécialement sur les forces de choc), met en évidence les paramètres importants à chaque point du guidage et leur distribution le long du crayon. L'étude des surfaces de réponses des paramètres deux à deux, permet de visualiser les interactions. L'intérêt de la méthode des Plans d'Expérience est souligné. Sa rigueur et son systématisme permettent au spécialiste de déceler les paramètres influents. La simulation simplifiée et moins coûteuse en temps de calcul de l'ensemble des solutions par de simples polynômes permet des comparaisons avec le retour d'expérience.

EXECUTIVE SUMMARY :

Experiment Design method application to Finite Element Model calculations is an original way of performing parametrical studies. It has been used at EDF, to simulate on a large parametrical domain the vibrations of PWR's control rod cluster and to analyse the wear phenomenon of rods.

In the first part, the finite element model is presented. The F.E.M. and the location of excitation sources is described. The calculated values are : rod displacement in the guiding cards, shock forces on the guiding cards and wear power produced.

In the second part, the computed experiment domain is described. Experiment Design method approaches response surface by a polynomial (here degree 2). The used model has all linear, quadratic and interactive terms for each of the 6 parameters (26 coefficients). 34 polynomials have been built to approach the effective shock forces and the mean wear power at each of the 17 guiding points.

In the third part, the building of the computer experiment design is detailed : Doehlert design adaptation to take a qualitative parameter, design optimisation by adding of four well chosen experiments and design extension from 4 to 6 parameters.

In the last part, all the informations disable by this method are described. The influence of parameters on calculated effective shock forces has been determined along rods and responses surfaces have been easily approximated.

Systematism and closeness of experiment design technique is underlined. Easy simulation of all the response domain by polynomial approach allows comparison with experiment feedback.

PLANS D'EXPERIENCES NUMERIQUES : ETUDE DU COMPORTEMENT VIBRATOIRE DES GRAPPES DE COMMANDE D'UN REACTEUR A EAU PRESSURISEE

Bruno SOULIER ¹, Didier BOSSELUT ², Gilles REGNIER ³

¹ Pôle Universitaire Léonard de Vinci - DER Mécanique, 92916 Paris - La Défense, France
bruno.soulier@devinci.fr

² EDF DER-AMV, 1 av du Gal de Gaulle 92141 CLAMART, France
Didier.Bosselut@der.edfgdf.fr

³ ENSAM LTVP, 151 bd de l'Hôpital 75013 PARIS, France
gilles.regnier@paris.ensam.fr

1. Introduction

La méthode des plans d'expérience permet d'organiser des analyses paramétriques de façon à minimiser le nombre d'expériences à réaliser tout en faisant clairement ressortir l'effet des paramètres. Par rapport à une méthode empirique habituelle, le gain se mesure en temps gagné et en rigueur dans l'exploitation des résultats. Cette méthode qui permet d'approcher une surface de réponse lorsqu'elle ne présente pas de violentes inflexions, par une expression polynomiale, est généralement utilisée pour optimiser des processus ou limiter les effets du bruit de fond dans des essais.

Dans le domaine de la simulation numérique, certains problèmes amènent aussi à réaliser des analyses paramétriques comportant de nombreux paramètres. Une application de la méthode des Plans d'Expériences (P.E.) a été menée à E.D.F. sur les grandeurs numériques de sortie d'un calcul dynamique non-linéaire de comportement vibratoire de grappe de commande utilisant un modèle Eléments Finis (E.F.).

2. Description du problème industriel

Les grappes de commande sont des composants importants des réacteurs à eau pressurisée des centrales nucléaires : elles assurent la régulation et l'arrêt du cœur. Pendant les phases de maintenance, des analyses systématiques sont réalisées sur leurs crayons neutrophages par des méthodes ultrasonores. Elles montrent l'existence de traces d'usure sur les grappes qui restent toujours en position haute dans le réacteur. L'endommagement des crayons est parfois suffisant pour nécessiter leur remplacement. Les vibrations dues à l'écoulement du fluide dans le circuit primaire produisent l'usure des crayons par impact-frottement contre leur guidage. Comprendre et prédire ces phénomènes est important pour la sécurité et aussi pour limiter les coûts de remplacement. Un modèle filaire par éléments finis a été développé avec le code de calcul mécanique *Code-Aster* afin de simuler le comportement vibratoire non linéaire de ces composants. Une grappe de commande est composée d'une tige de commande, d'une araignée et de 24 crayons neutrophages. Les crayons mesurent près de 4 mètres.

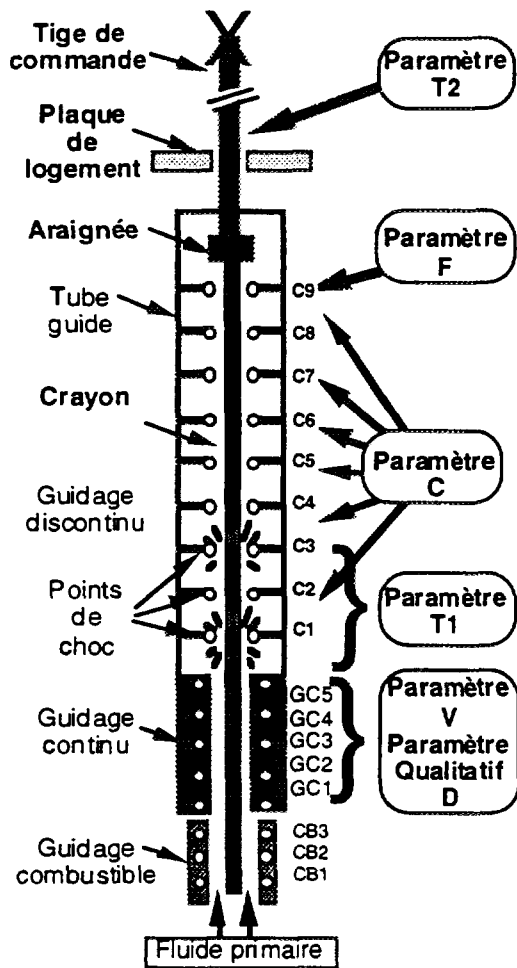


Figure 1 : Modélisation de la grappe de commande

Dans le modèle, un seul crayon est discrétisé de façon réelle. La grappe est complétée par un crayon équivalent dont la masse et la rigidité équivalent aux 23 autres crayons. Ces deux crayons colinéaires vibrent indépendamment. Sur la Figure 1, seul le crayon réel est représenté.

Six paramètres variés dont un qualitatif, sont considérés dans l'étude. Les paramètres D, F, T2, T1, C, V sont quantitatifs et D est qualitatif :

- l'excitation la plus importante est d'origine turbulente (T1) et est située sur la partie basse des crayons entre les guides C5 et D3.
- l'écoulement du fluide entre la tige de commande et la plaque de logement engendre une force fluide élastique turbulente (T2) au niveau de la plaque.
- la répartition (D) de forces statiques d'appui du crayon dans le guide continu dépend de sa position dans la grappe.
- un faible amortissement visqueux (V) apparaît dans le guidage continu.
- le modèle doit permettre l'intégration de forces statiques (F) mécaniques ou hydrauliques sur les guides discontinus supérieurs
- un décentrement de la grappe (C) est aussi à prendre en compte.

3. Etude paramétrique

Chaque calcul (assez coûteux en temps) donne pour chacun des 17 points de guidage, deux sorties dépendantes du temps : forces de choc du crayon contre son guidage et déplacements du crayon dans son guidage. L'étude paramétrique a porté sur l'analyse des forces de choc normales et de la puissance d'usure moyenne qui est le produit de la force normale par la vitesse tangentielle.

L'étude complète à 6 paramètres nécessiterait 21609 simulations numériques.

Afin de caractériser l'influence de chaque paramètre sur le comportement vibratoire des grappes et de connaître précisément les surfaces de réponse dans le domaine d'étude en un nombre minimum de calculs, un plan d'expériences numérique [MOR 91] [SAC 89] a été réalisé. Les surfaces de réponse sont approximées sur l'ensemble du domaine expérimental par 2x17 modèles polynomiaux. Par exemple, pour la force de choc normale sur la carte C1, on trouve une expression de la forme :

$$F_{n_{C1}} = 1,63 - 0,15D - 0,05F - 0,07T_2 + 1,17T_1 + 0,08V + 0,08C + 0,36D^2 - 0,15F^2 - 0,10T_2^2 \quad (1) \\ + 0,38T_1^2 - 0,03C^2 + 0,20T_2T_1 - 1,16T_2V - 0,17FC - 0,14T_2C + 0,36T_1C - 0,32VC$$

Les variables du modèle représentant les variations (linéaires ou quadratiques) des paramètres et les interactions entre paramètres, sont adimensionnées. Elles varient dans l'intervalle [-1, 1].

4. Construction du plan d'expériences

La construction du plan d'expérience s'inscrit dans une démarche incrémentale d'acquisition de connaissances qui doit permettre l'intégration de facteurs supplémentaires et l'extension du domaine d'étude des sollicitations.

Plusieurs tables d'expériences ont été prédéfinies et optimisées pour l'étude des surfaces de réponses quadratiques [BOX 87] [DOE 70]. Les prérequis formulés précédemment nous ont orientés vers le choix d'une table de Doehlert combinant 4 paramètres en 21 expériences.

La prise en compte d'un facteur qualitatif à 3 niveaux, caractéristique de la distribution d'effort statique dans le guidage continu, est réalisée en modifiant la table de Doehlert initiale. La suppression de 2 des essais réduit à 3 les 5 niveaux du premier facteur. Un plan d'expériences D-optimal [FED 71] (tableau 1), comportant 23 combinaisons, est obtenu en ajoutant 4 expériences aux 19 précédentes.

combinaison	D	F	T2	T1
1	0	0	0	0
2 (supprimé)	1	0	0	0
3 (supprimé)	-1	0	0	0
4	0,5	0,866	0	0
5	-0,5	-0,866	0	0
6	0,5	-0,866	0	0
7	-0,5	0,866	0	0
8	0,5	0,289	0,816	0
9	-0,5	-0,289	-0,816	0
10	0,5	-0,289	-0,816	0
11	0	0,577	-0,816	0
12	-0,5	0,289	0,816	0
13	0	-0,577	0,816	0

combinaison	D	F	T2	T1
14	0,5	0,289	0,204	0,791
15	-0,5	-0,289	-0,204	-0,791
16	0,5	-0,289	-0,204	-0,791
17	0	0,577	-0,204	-0,791
18	0	0	0,612	-0,791
19	-0,5	0,289	0,204	0,791
20	0	-0,577	0,204	0,791
21	0	0	-0,612	0,791
a (ajouté)	-0,5	-0,866	-0,816	0,791
b (ajouté)	0,5	0,866	-0,816	0,791
c (ajouté)	0,5	-0,866	0,816	0,791
d (ajouté)	0	0,866	0,816	0,791

Tableau 1 : Plan D-optimal 1 à 23 combinaisons pour 4 paramètres (variables adimensionnées)

Cet ajout permet de diminuer significativement la variance sur les coefficients du modèle et les corrélations entre les coefficients.

L'étude de 2 nouveaux facteurs est réalisée en ajoutant au plan D-optimal 1, 22 simulations supplémentaires (tableau 2).

n°	D	F	T2	T1	C	V
1	plan D-optimal 1				0	0
23	(23 simulations)				0	0
2-1	0,5	0,289	0,204	0,158	0,775	0
2-2	-0,5	-0,289	-0,204	-0,158	-0,775	0
2-3	0,5	-0,289	-0,204	-0,158	-0,775	0
2-4	0	0,577	-0,204	-0,158	-0,775	0
2-5	0	0	0,612	-0,158	-0,775	0
2-6	0	0	0	0,632	-0,775	0
2-7	-0,5	0,289	0,204	0,158	0,775	0
2-8	0	-0,577	0,204	0,158	0,775	0
2-9	0	0	-0,612	0,158	0,775	0
2-10	0	0	0	-0,632	0,775	0
2-11	0,5	0,289	0,204	0,158	0,129	0,764
2-12	-0,5	-0,289	-0,204	-0,158	-0,129	-0,764
2-13	0,5	-0,289	-0,204	-0,158	-0,129	-0,764
2-14	0	0,577	-0,204	-0,158	-0,129	-0,764
2-15	0	0	0,612	-0,158	-0,129	-0,764
2-16	0	0	0	0,632	-0,129	-0,764
2-17	0	0	0	0	0,645	-0,764
2-18	-0,5	0,289	0,204	0,158	0,129	0,764
2-19	0	-0,577	0,204	0,158	0,129	0,764
2-20	0	0	-0,612	0,158	0,129	0,764
2-21	0	0	0	-0,632	0,129	0,764
2-22	0	0	0	0	-0,645	0,764

Tableau 2 : Plan D-optimal 2 combinant 6 paramètres en 45 simulations

5. Analyse et résultats

Dans cet article, la validité du modèle éléments finis n'est pas discutée. La quantité de résultats est importante : 2 réponses (force de choc normale efficace et puissance moyenne d'usure) pour chacun des 17 points de guidage et chacun des 45 calculs.

Chaque polynôme comporte un terme constant et 26 coefficients à estimer. Les coefficients obtenus pour la force de choc normale efficace aux 17 points de guidage sont représentés dans le tableau 3.

L'analyse des coefficients du modèle montre les paramètres les plus importants et leur influence le long du crayon. Les termes linéaires sont les plus influents, le terme quadratique du décentrement est le plus fort (en C9).

La répartition de force statique D a un effet non linéaire dans le guidage continu et combustible (à partir de C2) et aucun effet en partie haute. La force statique F a un effet sur les cartes C7 à C9 (là où elle est appliquée). L'excitation T2 n'a pas un très grand effet dans cette gamme de variation, exceptée une interaction avec l'amortissement visqueux V sur les cartes C1 à C5.

L'excitation T1 est très importante excepté au milieu du guidage continu. Cette excitation a un effet quadratique peu important par rapport à l'étude en puissance d'usure [BOS 97].

Nom	Termes linéaires						Termes quadratiques				Termes d'interactions								
	D	F	T ₂	T ₁	V	C	DD	FF	T ₂ T ₂	T ₁ T ₁	CC	DT ₁	T ₂ T ₁	T ₂ V	FC	T ₂ C	T ₁ C	VC	
C9		0.7		1.0		2.4					4.4				2.7				
C8		0.6		0.6		0.6					-0.5		0.2	0.4					
C7		0.3		0.8		0.3		-0.3			-0.4		0.3						0.6
C6				0.7															
C5			-0.1	0.8											-0.5				
C4			-0.2	0.8	0.2	0.2									-0.5				
C3			-0.1	0.8	0.2	0.2									-0.6				
C2	0.1	-0.1		0.6		0.1		-0.3			0.5								
C1	-0.2			1.2			0.4			0.4					-1.2				
GC5	-0.2			0.6	-0.2		-0.7			0.7		-0.3			1.1	0.8	0.8	0.5	
GC4	-1.7						1.9								-1.1				
GC3	-1.5						1.5		0.2										
GC2	-1.2						1.3		0.2										
GC1				0.5			-1.1							-0.6					
CB3	0.5			0.4			1.9		0.4										
CB2	0.5			0.2			0.6					0.4							
CB1	0.3			0.5	-0.1		-0.4		-0.2			0.3		-0.5					

Tableau 3 : coefficients du modèle polynomial de la force normal effective

L'amortissement visqueux V a un effet léger dans la partie terminale basse et au dessus du guidage continu. Le décentrage de la grappe C a une influence significative et importante, particulièrement en C9, et un effet quadratique important de C7 à C9.

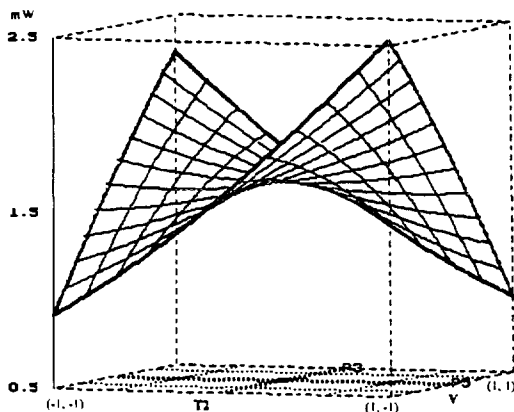


Figure 2 : Interaction T2.V en C1.

La représentation de la surface de réponse en fonction de deux paramètres, les autres étant fixés à leur valeur moyenne caractérise encore mieux que le tableau 3, l'interaction entre ces 2 paramètres.

La figure 2 montre l'influence de l'interaction des paramètres T2 et au niveau de la carte C1.

La forme de la surface de réponse montre que cette interaction V, non supposée au début de l'étude, est fortement non-linéaire.

L'intervalle bilatéral de confiance à 95% sur la prédiction en force normale de choc est présenté sur la figure n°3 pour une combinaison des paramètres d'entrée pris au hasard hors plan (n°516). On remarque que le calcul direct E.F. est bien encadré par cet intervalle. La largeur de la bande est directement liée à l'adéquation du modèle polynomial retenu dans la phase d'analyse du plan d'expérience. La largeur importante de cette bande en regard des valeurs moyennes doit être relativisée par l'aspect global de l'auscultation escomptée sur un domaine d'étude aussi étendu.

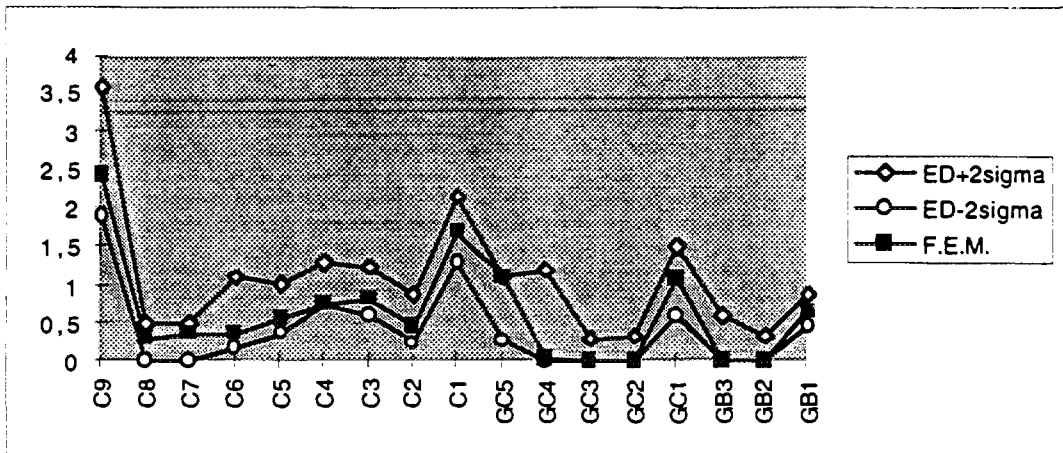


Figure 3 : Adéquation du modèle polynomial dans le cas de la simulation P.E. n°516

6. Conclusion

L'emploi d'un plan de type Doehlert modifié par une stratégie D-optimal nous a permis d'exploiter, malgré l'évolution de l'étude, le modèle numérique de façon rationnelle avec une série minimum de calculs. Le bénéfice est d'autant plus grand que le nombre de paramètres est important. La visualisation rapide des surfaces de réponses, la détermination de l'influence des paramètres dans le domaine expérimental et la recherche rapide d'extremum ou d'optimum peuvent aider les spécialistes à avoir une vision globale et précise du phénomène physique simulé. Le domaine de réponse du modèle doit être comparé au retour d'expérience des centrales.

7. Références

- [BOX 87] Box G.E, Draper N.R., (1987), Empirical model-building and surface response, *Wiley InterScience*, New York.
- [DOE 70] Doehlert D.H., (1970), Uniform Shell Designs, *Applied Statistics*, 19, 231-239.
- [JAC 93] Jacquart G., Bosselut D. (1993) « Impact friction vibrations on tubular structures: numerical simulation and experimental validation », *EDF mechanical seminary*, Beaune, France.
- [REG 94] Régnier G., Soulier B. (1994), Experimental Designs for an experimental modelling of material or structural tests, *Probabilities and Materials*, 197-208.
- [SOU 94] Soulier B. (1994), Sur la modélisation expérimentale en mécanique : précision, optimisation et applications industrielles, *thèse de l'ENS Cachan*, Cachan.
- [MOR 91] Morris M.D. 1991, Factorial sampling plans for preliminary computational experiments, *Technometrics*, Vol. 33, No 2, 161-174.
- [SAC 89] Sachs J., Welch W.J., Mitchell T.J., Wynn H.P. 1989, Design and analysis of computer experiments, *Statistical Science*, Vol 4, No 4, 409-435.
- [FED 72] Fedorov V.V. 1972, Theory of optimal experiments, Academic Press, London.
- [BOS 97] Bosselut D., Régnier G., Soulier B. (1997) «FEM of PWR's control rod cluster. Parametrical study of vibrating behavior by Experiment Design Method » SMIRT Lyon France.