



FR9710030

---

# Production d'énergie (hydraulique, thermique et nucléaire)

LE RETOUR D'EXPERIENCE INTERNATIONAL DES  
FATIGUEMETRES DES TRANCHES NUCLEAIRES

*INTERNATIONAL EXPERIENCE FEEDBACK ON FATIGUE  
MONITORING SYSTEMS FOR NUCLEAR POWER PLANTS*

97NB00081

29-08

*D*



DIRECTION DES ÉTUDES ET  
RECHERCHES

SERVICE ENSEMBLES DE PRODUCTION  
DÉPARTEMENT RETOUR D'EXPÉRIENCES  
MESURES-ESSAIS



FR9710030

Section INIS  
Doc. enreg. le : 2.X/8/97  
N° TRN : FR9710030  
Destination : I,I+D,D

1996

---

MORILHAT P.

## LE RETOUR D'EXPERIENCE INTERNATIONAL DES FATIGUEMETRES DES TRANCHES NUCLEAIRES

### *INTERNATIONAL EXPERIENCE FEEDBACK ON FATIGUE MONITORING SYSTEMS FOR NUCLEAR POWER PLANTS*

Pages : 29

97NB00081

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

© EDF 1997

ISSN 1161-0611

29 - 08

## **SYNTHÈSE :**

Dès le démarrage des programmes électro-nucléaires, le besoin s'est fait sentir, au plan international, de développer des systèmes visant l'automatisation et l'amélioration de la surveillance des transitoires qui sollicitent les principaux composants mécaniques des tranches nucléaires, en vérifiant le caractère enveloppe de la conception non plus à partir d'une comparaison des causes (variations de température et de pression) mais en évaluant directement les conséquences (contraintes et dommage associé). Des prototypes de tels systèmes sont apparus dès le milieu des années 80 principalement en France, aux USA et en Allemagne, et leur industrialisation s'est poursuivie depuis.

Plusieurs années de développement et d'expérimentation sur site des prototypes de fatiguemètres conçus par la DER ont permis de nouer des contacts avec les développeurs de systèmes similaires et, dans certains cas, d'effectuer les comparaisons. L'expérience accumulée dans l'utilisation de tels systèmes, tant en France qu'à l'étranger, rend désormais possible un premier retour d'expérience.

Le concept de fatiguemètre repose sur une succession de modules élémentaires qui permettent d'élaborer les informations reçues de la tranche, d'abord sous la forme d'une comptabilisation des transitoires (transimètre), puis sous la forme d'un diagnostic mécanique (fatiguemètre).

Parmi les systèmes en opération, certains n'assurent en réalité que la partie transimètre, d'autres en revanche associent transimètre et fatiguemètre (systèmes EDF, EPRI et MITSUBISHI, certaines versions du système SIEMENS). Par ailleurs, de nombreux systèmes requièrent en plus de l'instrumentation d'exploitation de la tranche, une instrumentation spécifique localisée dans les zones suivies.

Le nombre de dispositifs en service n'a cessé de croître depuis le milieu des années 80, pour atteindre 53 systèmes en opération en 1996. Les développeurs les plus importants sont EPRI et son consultant Structural Integrity Associates (système FatiguePro), SIEMENS (système FAMOS) et EDF dont la mise en place progressive de SYSFAC à partir de 96 va faire augmenter notablement la part.

Le retour d'expérience technique de ces produits est positif (identification des modes opératoires les plus dommageables, meilleure comptabilisation des transitoires, suivi au plus près du dommage réel de fatigue...). Le bilan financier, lorsqu'il peut être mené, fait apparaître un gain. Enfin, le bilan de la gestion des projets, menés dans des conditions très différentes selon les développeurs, montre que si le temps de développement du dispositif EDF est légèrement supérieur à la moyenne (10 ans au lieu de 8), ceci s'explique par une phase d'industrialisation plus longue engendrée par une plus grande complexité du projet (le fatiguemètre n'est qu'un sous-ensemble de SYSFAC).

## EXECUTIVE SUMMARY :

From the very beginning of electro-nuclear programmes, internationally the need has become obvious to develop systems aiming at automation and improvement of monitoring of transients which stress the main mechanical components of nuclear units, by checking the conservativeness of the design no longer from a comparison of causes (temperature and pressure variations) but by directly assessing the results (stresses and linked damage). Prototypes of such systems have appeared since the middle of the '80s mainly in France, the USA and Germany, and manufacturing them has since continued.

Several years of development and on site testing of prototypes of fatigue measuring devices designed by the R&D D have enabled contacts with the developers of similar systems to be established and, in some cases, comparisons to be made. The experience accumulated in the use of such systems, both in France and abroad, from now on makes a first experience feedback possible.

The fatigue measuring device concept is based on a succession of elementary modules which enable information received from the unit to be processed, first in the form of transient counting (transient meters), then in the form of mechanical diagnosis (fatigue monitoring systems).

Among the systems in operation, some only provide the transient meter part in reality, on the other hand others link the transient meters and fatiguemeters (EDF, EPRI and MITSUBISHI systems and some versions of the SIEMENS system). Moreover numerous systems require, in addition to unit operation instrumentation, specific instrumentation located in monitored areas.

The number of devices in operation has not stopped growing since the middle of the '80s, to reach 53 systems working in 1996. The biggest developers are EPRI and its consultant Structural Integrity Associates (FatiguePro system), SIEMENS (FAMOS system) and EDF whose gradual implementation of SYSFAC from '96 is going to make its share particularly increase.

Technical experience feedback of these products is positive (identification of the most damaging operating modes, better transient accounting, closer monitoring of actual fatigue damage etc.). When it can be drawn up, the balance sheet reveals a gain. Lastly the management balance sheet of projects conducted under very different conditions according to the developers, shows that if development time of the EDF device is slightly more than the average (10 years instead of 8) this is explained by a longer manufacturing stage generated by a project of greater complexity (the fatigue monitoring system is only a sub-assembly of SYSFAC).

## SOMMAIRE

<b>1. INTRODUCTION</b>	<b>4</b>
<b>2. POURQUOI DES FATIGUOMETRES ?</b>	<b>5</b>
<b>3. L'ARCHITECTURE D'UN FATIGUOMETRE</b>	<b>6</b>
<b>4. LES DIFFERENTS CHOIX TECHNIQUES</b>	<b>7</b>
4.1 TRANSIMETRE ET/OU FATIGUOMETRE ?	8
4.2 INSTRUMENTATION GLOBALE ET/OU LOCALE ?	9
<b>5. L'ETAT DU MARCHE ET LES PRODUITS DISPONIBLES</b>	<b>10</b>
<b>6. LE RETOUR D'EXPERIENCE</b>	<b>12</b>
6.1 REX TECHNIQUE	12
6.2 REX FINANCIER	13
6.3 REX GESTION DE PROJET	13
<b>7. LES PERSPECTIVES</b>	<b>15</b>
<b>REFERENCES</b>	<b>16</b>
<b>ANNEXE 1 : DISPOSITIFS EN SERVICE EN 1996</b>	<b>17</b>
<b>ANNEXE 2 : DESCRIPTIF DES DISPOSITIFS EN SERVICE</b>	<b>19</b>

# 1. INTRODUCTION

Après une expérience d'une quinzaine d'années de comptabilisation des situations de la chaudière nucléaire, EDF a décidé de se doter d'un dispositif informatique pour assurer la comptabilisation réglementaire des situations et le suivi en fatigue de certaines zones réputées sensibles du Circuit Primaire des Réacteurs à Eau Pressurisée : le SYSFAC (SYstème de Surveillance en FATigue de la Chaudière).

Ce système doit ainsi permettre de répondre de façon automatique aux exigences réglementaires de surveillance et d'améliorer l'exploitation à long terme des tranches en détectant et en analysant les principales actions susceptibles d'avoir une influence significative sur la durée de vie de l'installation.

B | SYSFAC comprend trois principales fonctions. La fonction d'affectation des transitoires sur des critères fonctionnels et la fonction d'affectation sur des critères mécaniques correspondent à la comptabilisation réglementaire (recueil des transitoires et affectation dans la liste des situations de la tranche). La fonction fatiguemètre, qui ne répond formellement pas à une obligation réglementaire, est chargée de la surveillance des points particulièrement sensibles de la chaudière, pour lesquels elle fournit un dommage précis.

Plusieurs années de développement et d'expérimentation sur site des prototypes de fatiguemètres conçus par la DER ont permis de nouer des contacts avec les développeurs de systèmes similaires et, dans certains cas, d'effectuer des comparaisons. L'expérience accumulée dans l'utilisation de tels systèmes, tant en France qu'à l'étranger, rend désormais possible un premier retour d'expérience.

C'est l'objet de ce document. L'étude est limitée aux fatiguemètres développés pour les tranches nucléaires. Les informations qui sont présentées se fondent sur les résultats d'une enquête menée en 1995-1996 par la DER auprès d'une vingtaine de sociétés dans le monde qui développent des fatiguemètres. La partie du document qui concerne l'Allemagne a été validée par un partenaire allemand (MPA Stuttgart) qui réalise une enquête similaire pour le ministère de l'environnement.

Le chapitre 2 rappelle le contexte qui a présidé à l'élaboration d'outils de surveillance en fatigue. Le chapitre 3 décrit les principales fonctionnalités qu'on retrouve dans tous les produits étudiés et le chapitre 4 présente différents choix techniques. Le chapitre 5 dresse un état du marché et le chapitre 6 synthétise le retour d'expérience.

## 2. POURQUOI DES FATIGUOMETRES ?

B

La conception des tranches nucléaires s'est faite sur la base de règles codifiées dont le respect garantit l'intégrité de l'enveloppe sous pression qui constitue le Circuit Primaire Principal des Réacteurs à Eau Pressurisée. Parmi ces standards, on peut citer à titre d'exemple le code américain ASME Section III [1], le code français RCC\_M [2] et le code allemand KTA [3]. Sur la base d'une liste de situations de fonctionnement supposées représentatives et enveloppes du fonctionnement réel, ces codes ont servi à dimensionner les principaux composants mécaniques passifs (tuyauteries, cuve, pressuriseur ...).

Pour les composants de classe 1, des exigences complémentaires imposent aux exploitants de vérifier que les composants ne sont pas soumis, en exploitation, à des sollicitations plus sévères ou plus nombreuses que celles définies lors de la phase de conception par les constructeurs. Ces exigences sont généralement exprimées dans un cadre législatif : articles 36 et 38 de l'arrêté du 26 février 1974 [4], Atomgesezt du 1er Septembre 1992 [5].

Afin de satisfaire ces exigences, les exploitants ont développé des procédures de comptabilisation qui tendent à associer à tout transitoire relevé en exploitation un transitoire de conception mécaniquement plus nocif. La détection des transitoires se fonde sur le relevé des températures et des pressions d'exploitation. La comptabilisation est réalisée en comparant ces paramètres à ceux des différents transitoires de référence.

Cette méthode, largement répandue, a cependant montré rapidement ses limites : les situations réelles diffèrent parfois notablement des situations de conception, les transitoires successifs sont difficiles à identifier et à séparer, certains transitoires restent inclassables ou peuvent être classés abusivement.

Par ailleurs, l'intégrité de certaines zones particulièrement sollicitées est devenue difficile à justifier sur la base des calculs classiques de conception.

C'est la raison pour laquelle, dès le début des années 80, le besoin s'est fait sentir, au plan international, de développer des systèmes visant l'automatisation de la surveillance des transitoires et son amélioration, en vérifiant le caractère enveloppe de la conception non plus à partir d'une comparaison des causes (variations de température et de pression) mais en évaluant directement les conséquences (contraintes et dommage associé). Des prototypes de tels systèmes sont apparus dès le milieu des années 80 principalement en France, aux USA et en Allemagne, et leur industrialisation s'est poursuivie depuis.

### 3. L'ARCHITECTURE D'UN FATIGUOMETRE

Un fatiguemètre est un dispositif informatique qui permet d'évaluer les conséquences mécaniques (en terme de dommage) des transitoires d'exploitation sur certains composants ou dans des zones localisées de ces composants.

L'architecture classique d'un fatiguemètre est présentée sur la figure 1.

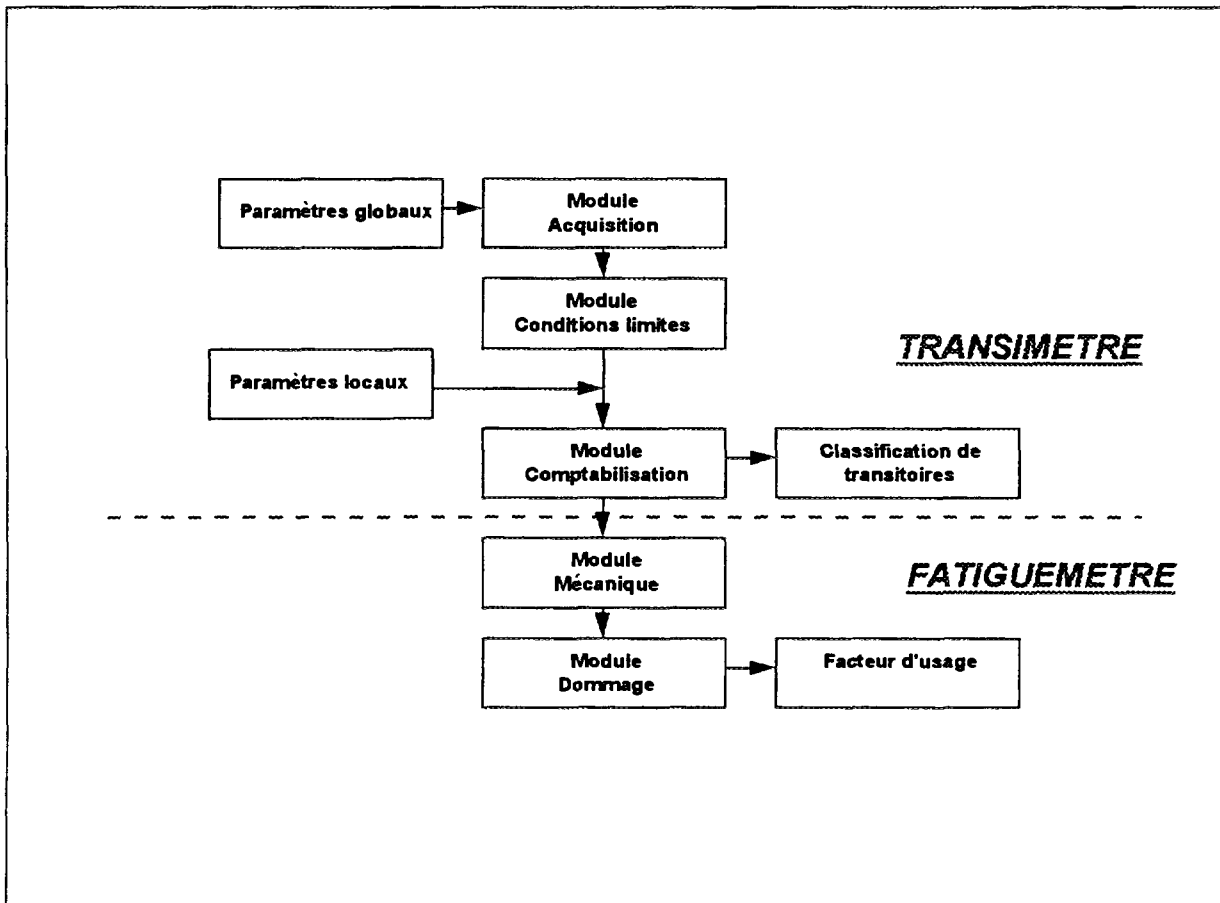


Figure 1. Architecture d'un dispositif de type fatiguemètre

Le système est composé d'une succession de modules :

- Un module *Acquisition* scrute les paramètres « globaux » d'exploitation de la tranche (puissance nucléaire, températures, pressions, signaux d'ouverture de vannes,...) et vérifie la cohérence et la validité métrologique des données.
- Un module *Conditions limites* permet de reconstituer l'évolution des paramètres « locaux » (i.e. températures, débit, pression dans la zone étudiée) à partir des données globales d'exploitation. La relation entre paramètres globaux et paramètres locaux est obtenue par des calculs thermohydrauliques ou déduite de corrélations issues d'essais sur site ou sur maquettes.

Dans certains cas, ce module est remplacé par une instrumentation locale spécifique qui donne accès aux grandeurs locales de manière plus directe.



- Un module *Comptabilisation* assimile les transitoires suivies par les paramètres locaux (généralement des températures et des pressions) aux transitoires définis à la conception. Ce module permet d'établir un histogramme qui donne la fréquence d'observation de chaque transitoire de conception.

L'enchaînement de ces trois modules aboutit à une classification des transitoires : c'est la partie *transimètre* du dispositif.

Certains dispositifs, dont SYSFAC, associent deux modules supplémentaires :

- Un module *Mécanique* permet de calculer les contraintes engendrées par les évolutions de températures et de pression dans la zones sollicitée. Compte tenu du volume et du coût induit par des calculs de type éléments finis, la technique utilisée dans les différents systèmes en opération privilégie une approche par fonctions de transfert : la réponse de la structure à une sollicitation unitaire d'un type donné (échelon, rampe, ...) est calculée une fois pour toute par éléments finis. La réponse de la structure à un transitoire quelconque est alors obtenue en décomposant celui-ci en une succession de sollicitations unitaires dont on superpose les effets. Cette technique, qui permet revient à condenser dans une formule analytique les résultats d'un calculs par éléments finis, est très bien adaptée au calcul en temps réel.
- Un module *Domage* identifie des cycles de contraintes par un algorithme de comptage (généralement l'algorithme Rainflow qui est bien adapté au traitement des sollicitations réelles) et détermine l'endommagement qui en résulte par l'utilisation d'une courbe d'endurance du matériau et l'application d'une règle de cumul des dommages unitaires .

Ces deux derniers modules constituent la partie *fatiguemètre* proprement dite du dispositif.

## 4. LES DIFFERENTS CHOIX TECHNIQUES

La figure 1 précédente fait apparaître plusieurs choix techniques possibles.

**B** | Le premier concerne les fonctionnalités du dispositif : transimètre et/ou fatiguemètre ? Ce choix est guidé par le contexte des obligations réglementaires.

Le second concerne la reconstitution des paramètres locaux : instrumentation globale ou ajout d'une instrumentation spécifique locale ? Ce choix est guidé par l'effet de volume et l'existence de bases de données d'essais.

Ces deux alternatives sont à l'origine d'une assez grande confusion dans le discours sur les systèmes disponibles et contribuent à obscurcir la comparaison entre leurs avantages respectifs.

#### 4.1 TRANSIMETRE ET/OU FATIGUEMETRE ?

De nombreux systèmes présentés comme fatiguemètres ne sont à proprement parler que des transimètres. Pour illustrer cette affirmation, le tableau 1 ci dessous donne la situation des versions de FAMOS (système développé par SIEMENS-KWU) actuellement en opération.

Tableau 1. Implantation de FAMOS au 1/3/96 (source Siemens KWU).

		Préparation	Instrumentation et acquisition	Transimètre	Fatiguemètre
BWR	Philippsburg 1	■	■	■	
	Isar 1	■			
PWR	Obrigheim	■	■	■	
	Stade		■	■	
	Biblis A		■	■	
	Biblis B		■	■	
	Unterweser	■	■	■	
	Grafenrheinfeld	■	■	■	■
	Grohnde	■	■		
	Philippsburg 2	■	■	■	■
	Brokdorf	■			
	Isar 2		■	■	
	Emsland	■	■		
	Gösgen		■		
	Borssele		■		
Trillo		■			
VVER	Kola 1	■	■		
	Kola 2	■	■		

La phase de préparation consiste à identifier les composants affectés (sur la base du Rex ou des calculs de conception) et à recenser les paramètres nécessaires au développement d'un dispositif de suivi. En raison de similitudes entre tranches de même design, cette étape n'est pas toujours réalisée pour chaque tranche.

On constate que sur les 18 systèmes, 9 assurent une fonction transimètre et 2 seulement sont de véritables fatiguemètres. Les autres systèmes ne réalisent en fait que l'acquisition des paramètres.

## 4.2 INSTRUMENTATION GLOBALE ET/OU LOCALE ?

De nombreux systèmes en opération requièrent la mise en place d'une instrumentation locale spécifique. Ce choix implique des conséquences importantes sur la pérennité du dispositif (qualité métrologique et maintenance des voies de mesures pendant la durée de vie de la tranche) et sur son coût (l'ordre de grandeur est de 30 à 50 kF par voie de mesure instrumentée).

A titre d'exemple, le tableau 2 ci-dessous permet de comparer le nombre de capteurs requis par le système GIMOP, mis en place par GKN sur ses tranches, avec les dispositifs FatiguePro (SIA/EPRI) et SYSFAC (partie fatiguemètre).

Tableau 2. Instrumentation requise par différents systèmes.

	SYSTEME					
	GKN I		GKN II		FatiguePro	SYSFAC
	Instrum Globale	Instrum Locale	Instrum Globale	Instrum Locale	Instrum Globale	Instrum Globale
ARE/ASG	21	100	21	52	20	14
RCP - ligne d'expansion	4	21	6	41	20	23
RRA - piquage CPP	7	40	17	52		7
RCV - ligne de charge	5	15	9	16	2	6
Injection de sécurité					13	
Aspersion principale-auxiliaire	6	30	20	38	4	
<b>Sous- total Instrumentation</b>	<b>43</b>	<b>206</b>	<b>73</b>	<b>199</b>	<b>59</b>	<b>50</b>
Boulonnerie de cuve	14		25			
Pompe primaire - aspiration	7		16			
GV - plaque tubulaire	23		54			
Echangeur régénérateur	12	26	12	4		
VVP		6		24		
<b>TOTAL Instrumentation</b>	<b>99</b>	<b>238*</b>	<b>180</b>	<b>227*</b>	<b>59</b>	<b>50</b>

\* thermocouples, jauges de déformation, capteurs de déplacement

Pour les mêmes zones suivies (cf première partie du tableau 2), l'instrumentation globale requise par les différents systèmes est d'un volume analogue. En revanche, l'instrumentation locale nécessite un nombre très important de capteurs.

## 5. L'ETAT DU MARCHÉ ET LES PRODUITS DISPONIBLES

B

La figure 2 ci-dessous fournit le nombre de tranches nucléaires (par pays et par filière) qui bénéficient en 1996 d'un système (fatiguemètre ou transimètre) en service. L'annexe 1 donne la liste des tranches équipées. Précisons que ces systèmes ne suivent, dans la plupart des cas, qu'une seule zone.

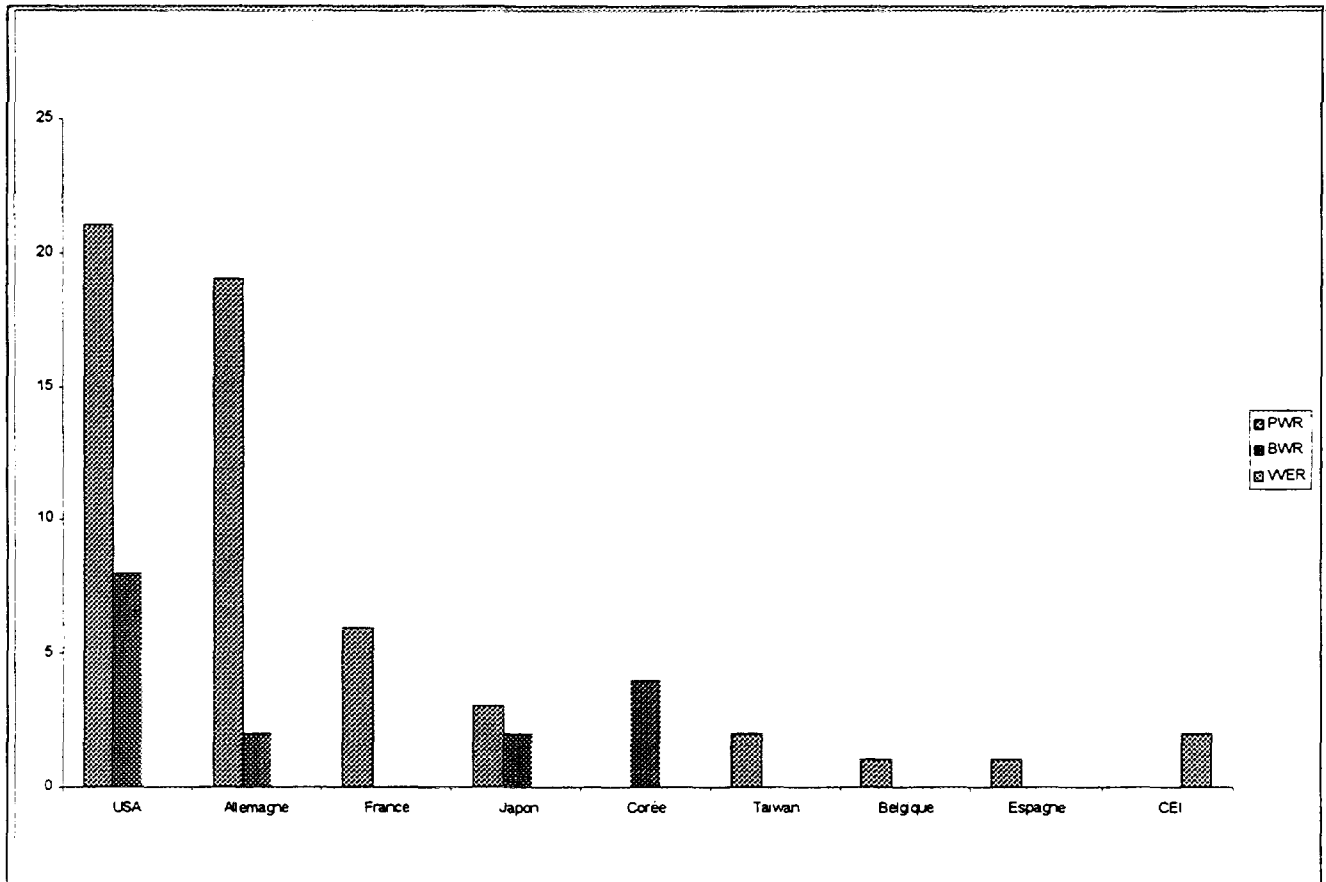


Figure 2. Répartition des systèmes en service en 1996 (par pays et par filière).

En attendant la généralisation de SYSFAC à tout le palier CPY qui fera croître la part France, on constate que c'est aux USA et en Allemagne que les systèmes sont les plus répandus.

Pour les tranches de type PWR, le partage du marché en 1996 fait apparaître trois principaux opérateurs comme le montre la figure 3 :

- Structural Integrity Associates et EPRI, développeurs de Fatiguepro,
- SIEMENS développeur de FAMOS,
- EDF développeur de SYSFAC.

Les autres opérateurs demeurent encore à un niveau modeste : GKN, TÜV Rheinland, MITSUBISHI, TOSHIBA, WESTINGHOUSE.

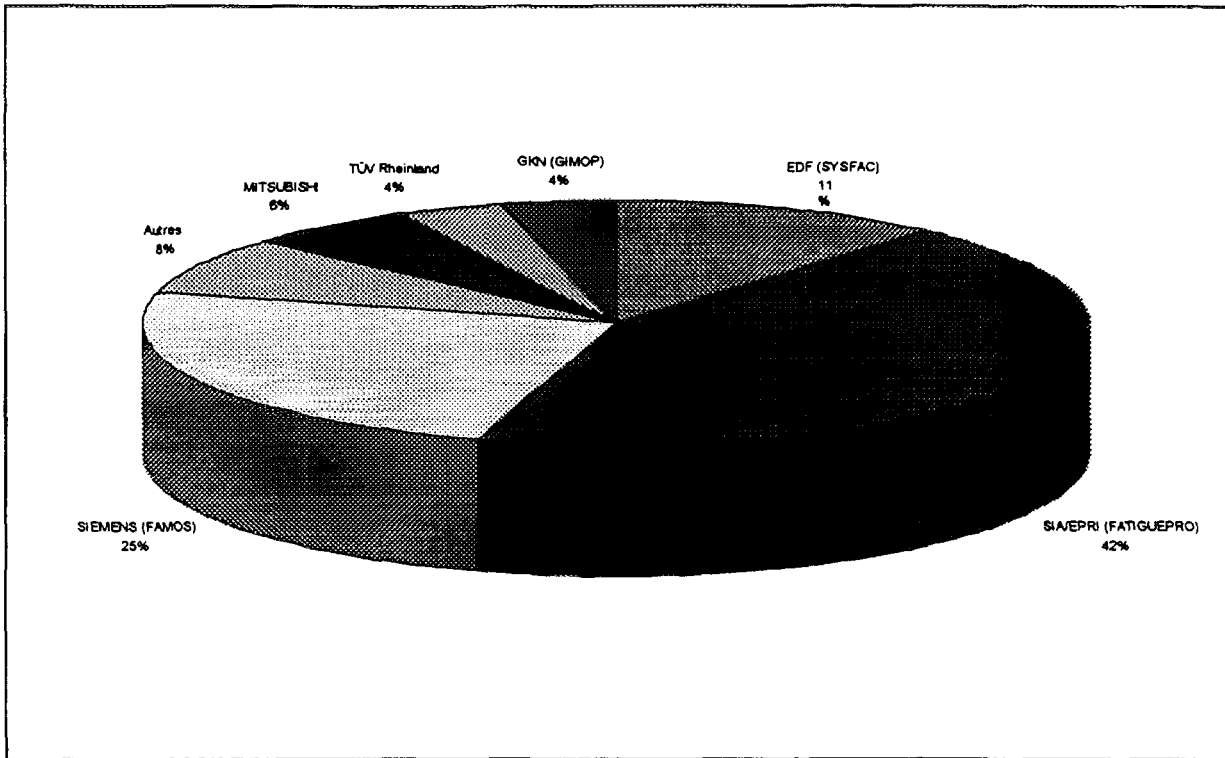


Figure 3. L'origine des systèmes en service sur les tranches PWR en 1996.

Enfin, la figure 4 illustre l'évolution sur les deux dernières décennies du nombre de systèmes en service. L'augmentation importante ces dernières années est le signe que les produits proposés ont acquis une maturité et sont maintenant industriels. Par ailleurs, on remarque qu'EDF, présent dès l'origine, a bien accompagné le mouvement.

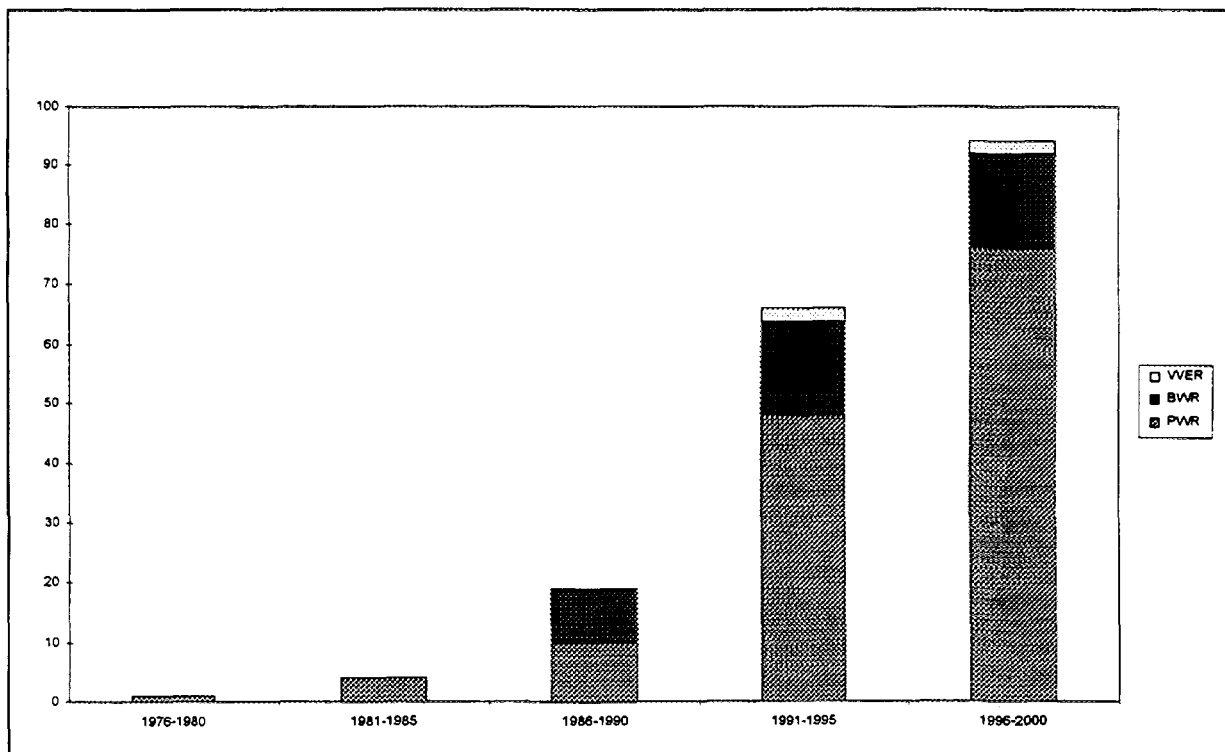


Figure 4. L'évolution du nombre de systèmes (transimètres ou fatiguemètres) en service.

## 6. LE RETOUR D'EXPERIENCE

### 6.1 REX TECHNIQUE

Un descriptif sommaire des différents produits disponibles est donné en annexe 2. Le retour d'expérience technique fait apparaître les principaux points suivants :

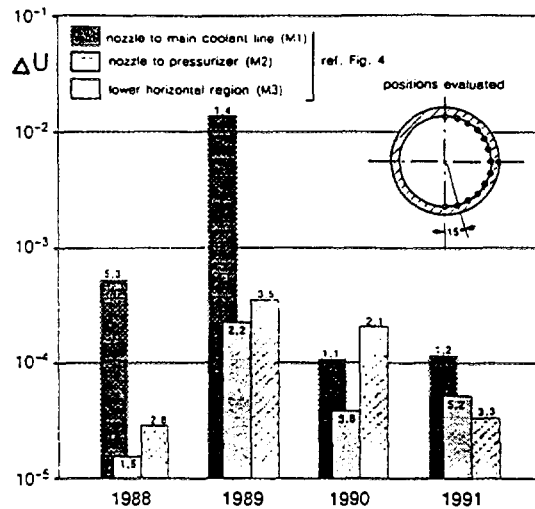
- Le concept de fatiguemètre est maintenant répandu et bien connu. Bien plus que sur une architecture informatique, la plus-value des systèmes porte sur le contenu des modules (algorithmes, corrélations), en particulier du module conditions aux limites locales, qui intègrent les résultats d'essais, les acquis de la R&D, et mobilisent le plus fortement les développements.
- Si le concept est identique pour tous les produits étudiés, le contenu des modules est souvent spécifique dans la mesure où les géométries et les corrélations sont propres à chaque palier et où la codification des calculs peut différer d'un pays à l'autre. C'est la raison pour laquelle un fatiguemètre peut très difficilement être acheté comme un système clé en main. Des adaptations sont toujours nécessaires.
- On peut grosso modo distinguer deux classes de produits :
  - SYSFAC (EDF), FatiguePro (SIA/EPRI), MITSUBISHI : instrumentation globale,
  - GIMOP (GKN), FAMOS (SIEMENS), OPELAS (TOSHIBA) : instrumentation locale.
- L'intérêt du calcul « on-line » a faibli depuis l'origine des fatiguemètres. La vision d'un poste situé dans la salle de commande s'est avérée naïve, et l'utilisation d'un fatiguemètre est généralement confiée à un niveau d'expertise suffisant chez les exploitants.
- Contrairement à SYSFAC, dont le fatiguemètre n'est qu'un sous-ensemble, les systèmes étrangers sont autonomes et fonctionnent sur des plates-formes informatiques simples (Stations de travail ou PC).

En matière de résultats, on retiendra les acquis suivants :

- Quel que soit le système étudié, le facteur d'usage obtenu par un surveillance en ligne est beaucoup plus faible que celui calculé à la conception. Les résultats sont similaires à ceux obtenus par le fatiguemètre EDF (La figure 5 de la page 13 en donne un exemple). Le problème principal demeure cependant l'initialisation de la valeur du dommage, pour laquelle chaque développeur propose une solution sans qu'un consensus soit établi.
- La mise en place d'un système a permis de modifier certaines procédures d'exploitation coûteuses en dommage et a conduit à l'amélioration de la disponibilité.

C'est ainsi que Tennessee Valley Authority (TVA), qui exploite les tranches de Sequoyah 1 et 2 où est installé un dispositif FatiguePro, a pu mettre en évidence que l'alimentation de secours du Générateur de Vapeur en mode automatique conduisait à des chargements thermiques responsables d'un facteur d'usage anormalement élevé. Ceci a conduit à réviser les procédures opératoires (limitation du nombre d'heure en mode automatique, passage en mode manuel avec consignes spécifiques).

B |



**Figure 5.** L'accroissement de facteur d'usage calculé par FAMOS dans la ligne d'expansion du pressuriseur pendant les phases de démarrage (Origine : SIEMENS).

## 6.2 REX FINANCIER

On ne dispose pas de réelle évaluation coût/bénéfice ailleurs qu'aux USA. Il semble que pour les exploitants allemands, l'enjeu soit avant tout de disposer d'un atout important dans le dialogue avec les Autorités de Sûreté, surtout dans les Länder à forte implantation écologiste.

Aux USA, par contre, l'enjeu financier est extrêmement important, dans la mesure où la rentabilité des tranches nucléaires est parfois une question de vie ou de mort pour les petites sociétés qui les exploitent.

A titre d'exemple, le bilan financier mené par Tennessee Valley Authority (TVA) fait apparaître le gain apporté par un fatiguemètre FatiguePro installé sur le piquage du tronçon commun ARE/ASG sur les tranches 1 et 2 de Sequoyah.

- TVA estime que l'utilisation de FatiguePro permettra de réduire les calculs mécaniques de justification et le nombre d'inspections en service au piquage.

Le gain qui en résulte est évalué à 1,5 M\$ sur les 20 prochaines années. Cette estimation se fonde sur un coût d'inspection en service de 25 k\$ par piquage. Sans FatiguePro, 80 inspections sont prévues dans les 20 ans pour les 8 piquages des deux tranches Sequoyah 1 et 2, soit un coût de 2 M\$. Avec FatiguePro, seulement un quart des piquages vont être inspectés à chaque arrêt de tranche (20 inspections), soit un coût de seulement 500 k\$ (d'où le gain de 1,5 M\$).

- D'autre part, TVA estime que les résultats de FatiguePro permettront de reporter les réparations éventuelles dans les arrêts de tranches programmés et d'éviter leur prolongation. Le bénéfice attendu est de 2,4 M\$ pour les deux tranches.

- L'installation de FatiguePro sur les deux tranches s'élevant à 0,25 M\$, le gain complet de l'opération s'élève donc à 3,65 M\$ sur 20 ans.

### 6.3 REX GESTION DE PROJET

Dans la mesure des informations disponibles, il semble que le temps moyen de mise sur le marché des dispositifs est d'environ 8 ans (temps écoulé entre la prise de décision de développement d'un prototype et la fin de la phase d'industrialisation).

Pour SYSFAC, cette durée est plutôt de l'ordre de 10 ans (fin 1985- mi 1996), mais il faut tenir compte que le fatiguemètre n'est qu'un sous-ensemble du projet complet.

La figure 5 ci-dessous permet de comparer la durée relative des principales phases de quelques projets étrangers et de SYSFAC. On constate que l'étude de faisabilité et la réalisation du prototype du fatiguemètre de SYSFAC ont abouti plus rapidement que d'autres projets, mais que la phase d'industrialisation a duré plus longtemps, probablement en raison du développement et de l'intégration des deux autres modules d'affectation fonctionnelle et mécanique.

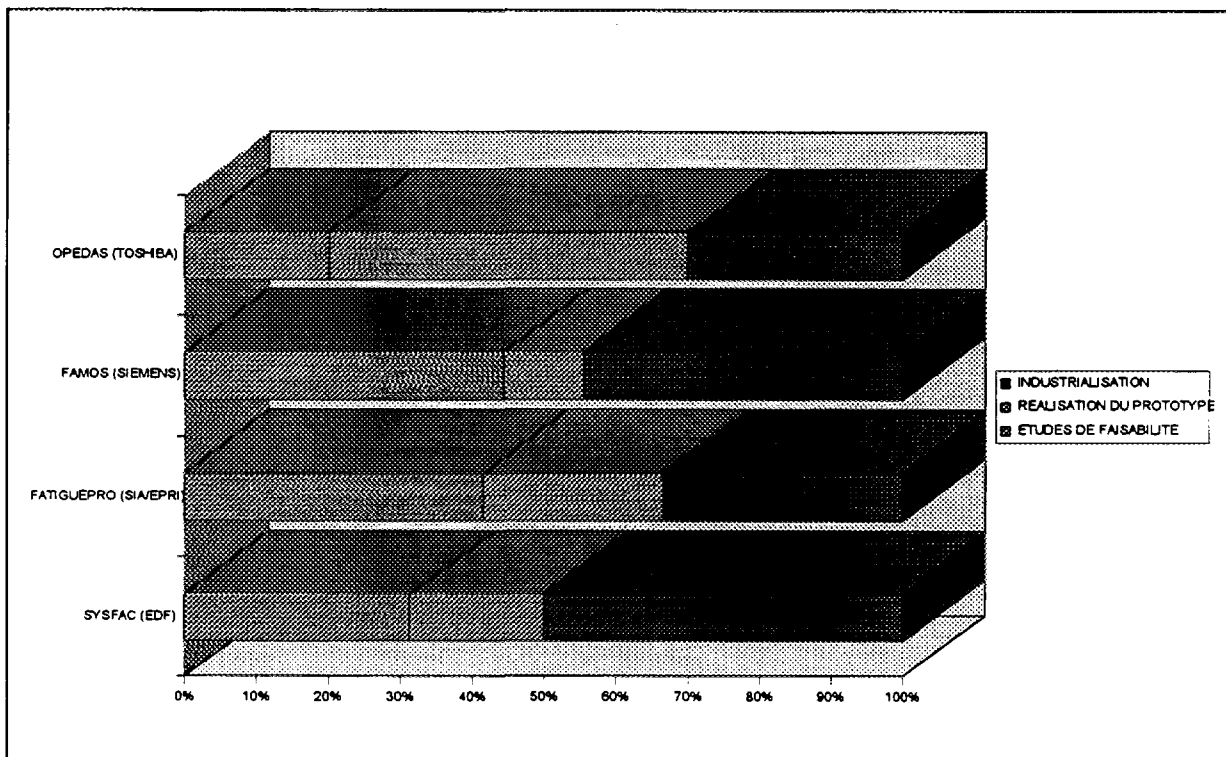


Figure 6. La durée (en relatif) des principales phases de quelques grands projets.

Par ailleurs, on observe que les systèmes actuellement les plus opérationnels ont été développés par des exploitants ou avec leur participation très active. Les systèmes proposés par des constructeurs n'ont pas eu le succès escompté (OTMS de FRAMATOME, WES-TEMS de WESTINGHOUSE). La raison principale réside probablement dans le manque de données d'exploitation accessibles aux constructeurs, données qui sont à la base du développement et de la crédibilité des modules de calcul.

Enfin, on constate que si les structures de projet sont plus légères à l'étranger qu'en France, la pérennité des produits n'est en revanche pas clairement garantie.



## **7. LES PERSPECTIVES**

Au vu de ce retour d'expérience international, jugé globalement positif, l'utilisation des fatiguemètres est appelée à s'étendre.

Sur la plan technique, la tendance est à compléter le calcul de facteur d'usage d'un calcul de propagation de défaut.

Le couplage avec d'autres dispositifs de surveillance (vibrations, érosion-corrosion) est également une tendance qui se fait jour dans les systèmes actuels.

Plus généralement, on note de la part des développeurs le besoin d'une confrontation des expériences de manière plus franche et plus profonde que par l'intermédiaire des publications de congrès, dont le caractère publicitaire marqué biaise la qualité des échanges.

A l'initiative d'EDF, un réseau d'échanges techniques est donc en cours de constitution. Rassemblant des partenaires des USA (SLA), de l'Allemagne (GKN, MPa) et français (EDF, FRAMATOME), son but est d'émettre de recommandations sur les spécifications de systèmes fatiguemètres et d'élaborer des guidelines pour leur validation. La difficulté consistera évidemment à ne pas léser les intérêts commerciaux et à garantir la propriété industrielle des produits.

Précisons qu'à l'heure actuelle, cette action est partiellement engagée par l'échange d'informations entre MPA et EDF pour l'élaboration de la présente note, et la réalisation d'un benchmatk entre SYSFAC et FatiguePro sur le module ARE/ASG.

## REFERENCES

- [1] ASME Boiler and Pressure Vessel Code  
Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components, section III  
American Society of Mechanical Engineers, 1992.
- [2] KTA - Regel 3201.2  
Komponenten des Primärkreise von Leichtwasserreaktoren  
Teil 2 : Auslegung, Konstruktion und Berechnung, 1984.
- [3] RCC\_M  
Règles de Conception et de Construction des Matériels Mécaniques des Ilôts Nucléaires REP.  
AFNOR, 1989.
- [4] Arrêté du 26 février 1974 portant application de la réglementation des appareils à pression aux chaudières nucléaires à eau sous pression.
- [5] ATG  
Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren  
Atomgesetz 1.9.92
- [6] BMI  
Sicherheitskriterien für Kernkraftwerke  
Bekanntmachung des BMI, Octobre 1977.
- [7] RSK Leitlinien für Druckwasserreaktoren, Octobre 1981
- [8] NRC  
Monitoring of Design Basis Transient Fatigue Limits for Reactor Coolant System, 1978

## ANNEXE 1 : Dispositifs en service en 1996

<b>P W R</b>	<u>SYSFAC</u> (EDF)	France	Bugey 2 Dampierre 1 Tricastin 1 Tricastin 2 Tricastin 3 Tricastin 4
	<u>FAMOS</u> (SIEMENS)	Allemagne  Belgique Espagne	Obrigheim Stade Biblis A Biblis B Unterweser Grafrheinfeld Grohnde Philippsburg 2 Brokdorf Gösgen Isar 2 Emsland Borssele Trillo 1
	<u>GIMOP</u> (GKN)	Allemagne	GKN 1 GKN 2
	<u>TUV</u>	Allemagne	Grohnde Grohnde
	<u>CUSTOS</u>	Allemagne	Non précisé Non précisé
	<u>MUSCYS</u>	Allemagne	Non précisé Non précisé
	<u>FATIGUEPRO</u> (SIA/EPRI)	USA   Taiwan	Diablo Canyon 1 Diablo Canyon 2 Millstone 3 San Onofre 2 San Onofre 3 Sequoyah 1 Sequoyah 2 Prairie Island 1 Prairie Island 2 Point Beach 1 Point Beach 2 Vogtle 1 Vogtle 2 Callaway Wolf creek Arkansas Nuclear One Waterford 1 Waterford 2 Calvert Cliffs 1 Calvert Cliffs 2 Maanshan 1 Maanshan 2
	<u>Mitsubishi</u>	Japon	Mihama 1 Mihama 2 Mihama 3
	<b><u>TOTAL PWR</u></b>		<b>53</b>

<b>B W R</b>	<b>FAMOS</b> (SIEMENS)	Allemagne	Philippsburg 1 Isar 1
	<b>FATIGUEPRO</b> (SIA/EPRI)	USA	Oyster Creek Susquehana 1 Washington NP 2 Vermont Yankee Brunswick 1 Brunswick 2 Clinton River Bend
		Corée	Kuo Sheng 1 Kuo Sheng 2 Chinshan 1 Chinshan 2
	<b>OPEDAS</b> (TOSHIBA)	Japon	Kashiwazaki-Kariwa 3 Kashiwazaki-Kariwa 4
	<b>TOTAL BWR</b>		<b>16</b>

<b>V V E R</b>	<b>FAMOS</b> (SIEMENS)	CEI	Kola 1 Kola 2
	<b>TOTAL VVER</b>		<b>2</b>

## **ANNEXE 2 : Descriptif des dispositifs en service**

## DEVELOPPEURS

- Gemeinschaftskernkraftwerk Neckar GmbH (GKN)
- Technischer Überwachungs Verein Südwestdeutschland (TüV)
- AMTEC GmbH
- MPA Stuttgart

## UTILISATEURS

- Neckarwestheim (GKN 1 &2)

## PRINCIPE

- **Type d'instrumentation** : globale et locale
- **Système informatique** : Station de travail en perturbographie (acquisition continue toutes les 10 s, stockage si variation des paramètres)
- **Type d'analyse** : Analyse élastique ou élasto plastique par éléments finis en post traitement des données recueillies (température et pression), intégration dans une base de données comme conditions limites d'un calcul EF et analyse selon KTA 3201.2

## EXPERIENCE

Mise en place d'un transimètre à GKN 1 en 1980, puis à GKN2 en 1989 à la MSI. Optimisation des modes opératoires de la ligne d'expansion, la ligne d'aspersion du pressuriseur, la ligne ARE, l'échange-régénérateur.

## PERSPECTIVES

Prise en compte de l'érosion corrosion, de la corrosion sous contrainte, intégration des inspections en service

## REFERENCES

J. BARTONICEK, W. ZAISS, F. SCHOCKLE, D. BLIND, H.KOCKELMANN.  
Monitoring systems and procedures for life time prediction of components.  
Nuclear Engineering and Design 144 (1993), pp 123-138

F. SCHOCKLE, J. BARTONICEK, H.KOCKELMANN.  
Determination of actual fatigue usage of the surge line in GKN 2 on the basis of on-line monitoring. SMIRT 12, 1993, pp 259-264

J. BARTONICEK, W. ZAISS, W. HIENSTORFER, H.KOCKELMANN.  
Monitoring systems and determination of actual fatigue usage  
Nuclear Engineering and Design 153 (1995), pp 127-133

J. BARTONICEK, F. SCHOCKLE.  
Piping integrity monitoring system for GKN PWRs  
ASME PVP Conference, Honolulu, 1995

## DEVELOPPEURS

- Siemens AG Power Generation Group (KWU)

## UTILISATEURS

- Une dizaine d'exploitants allemands (cf annexe 1)

## PRINCIPE

- **Type d'instrumentation** : globale et locale
- **Système informatique** : Acquisition des données en perturbographie et stockage par microprocesseur. Fonctions transimètre et fatiguemètre sur PC.
- **Type d'analyse**

L'intégration du procédé est divisée en 3 phases :

Phase 1 : installation du système, acquisition et stockage des données.

Phase 2 : analyse des chargements température et pression (transimètre)

Phase 3 : analyse mécanique et évaluation du facteur d'usage (fatiguemètre)

Les différents niveaux d'analyse sont scindés et les calculs ne sont engagés qu'en post-traitement. Les données issues de l'instrumentation globale servent à l'identification des situations de chargements (comparaison aux contraintes engendrées par les transitoires de conception codées sur EPROM) et au calcul du facteur d'usage.

Les données issues de l'instrumentation locale servent à l'évaluation des chargements locaux : calcul des températures internes à partir des températures externes par méthodes inverses puis calcul des contraintes par fonctions de transfert.

Une analyse élasto-plastique simplifiée (selon KTA) est menée après superposition des chargements locaux et globaux.

## REFERENCES

H-J. GOLEMBIEWSKI, M. MIKSCH.  
Fatigue monitoring in German nuclear power plants.  
Nuclear Engineering and Design 144, 1993, pp 409-421

H-J. GOLEMBIEWSKI, K. TULKE.  
Component fatigue rаетes drawn from measured load histories. case study of a PWR surge line using FAMOS. SMIRT 12, 1993, pp 307-311

H-J. GOLEMBIEWSKI, M. MIKSCH.  
State of the Art and Benefits of In Service Fatigue Monitoring IAEA Technical Committee Meeting. Use of Diagnostic Systems to Monitor Performance and reliability of safety equipment, Vienne, Austria, Oct 11-15, 1993.

**DEVELOPPEURS**

- TÜV Rheinland

**UTILISATEUR**

- Grohnde Nuclear Power Station

**PRINCIPE**

- **Type d'instrumentation** : globale et locale (381 thermocouples sur sept lignes dont 60 sur ligne d'expansion, jauges de déformations, capteurs de force et de déplacement).

- **Système informatique** : Acquisition des données en perturbographie (toutes les secondes).

- **Type d'analyse**

Fonction transimètre : suivi des mouvements de ligne, des phénomènes thermiques lents et comparaison au Rex des autres tranches.

Fonction fatiguemètre : appliquée aux zones sollicitées identifiées par la fonction transimètre. La méthode de calcul n'est pas encore complètement codifiée, l'évaluation des contraintes se fonde pour l'instant sur les jauges de déformation.

**EXPERIENCE**

Mise en place d'une instrumentation au démarrage de la tranche (1300 MW) en 1984.

**REFERENCES**

H. DITTMAR, P. HOFSTOETTER.

Experience with the TÜV pipe monitoring system at the Grohnde nuclear power station. Nuclear Engineering and Design 153 (1995), pp 163-171.

P. HOFSTOETTER

In service measurements on piping systems and components in nuclear power plants. Nuclear Engineering and Design 147 (1994), pp 369-374.



**DEVELOPPEURS**

- EPRI
- Structural Integrity Associates

**UTILISATEURS**

- Exploitants américains et coréens (cf annexe 1).

**PRINCIPE**

- **Type d'instrumentation** : globale
- **Système informatique** : PC
- **Type d'analyse** : Utilisation de fonctions de transfert, ASME III

**REFERENCES**

K. HOUSE, D. GERBER

Transient monitoring program at Sequoyah Nuclear Plant Units 1 and 2.

K. HOUSE, D. GERBER, S. GOSSELIN

On-line fatigue usage monitoring improved nuclear plant availability  
EPRI Report IN-101613, 1994

A. KUO, TANG S., RICCARDELLA P.

An on line fatigue monitoring system for power plant. Part I and II  
Design and Analysis Methods for Plant Life Assessment, PVP Volume 112, ASME (1986)

A. KUO, TANG S., RICCARDELLA P.

Fatiguepro : on line fatigue usage transient monitoring system  
EPRI Report NP-5835M, 1988

**DEVELOPPEURS**

- WESTINGHOUSE

**UTILISATEURS**

- Commanche Peak 2

**PRINCIPE**

- Type d'instrumentation : globale
- Système informatique : PC
- Type d'analyse :

Fonction transimètre : cette fonction seule est assurée à l'heure actuelle. La détection des transitoires est réalisée à partir des paramètres température, gradient de température et pression. Une affectation à des transitoires de conception est ensuite réalisée.

Fonction fatiguemètre : cette fonction n'est pas encore intégrée.

**EXPERIENCE**

Une station dite de démonstration est installée à Commanche Peak 2.

**REFERENCES**

E.L. CRANFORD, A. ENGEL, A.K. KUNDU  
The Commanche Peak Steam Electric Station Thermal Event Monitoring System.  
1995 ASME PVP Conference.

Westinghouse Electric Corporation  
WES-TEMS for improved surveillance activities, reduced transient tracking cost, realistic transient monitoring. 1995.

**DEVELOPPEUR**

- Mitsubishi Heavy Industries Ltd

**UTILISATEURS**

- Kansai Electric Power Co.
- Hokkaido Electric Power Co
- Shikoku Electric Power Co
- Kyushu Electric Power Co
- Japan Atomic Power Co

**PRINCIPE**

- **Type d'instrumentation** : globale
- **Système informatique** : Acquisition des données par mini-ordinateur sur un bus de la tranche.
- **Type d'analyse**  
Conditions limites locales : module thermohydraulique ajusté sur données d'essai spécifiques.

Calculs mécaniques : codification MITI Notification 501, ASME III.  
Calcul des contraintes par fonction de transfert (Green) puis Rainflow  
Fonctions transimètre et fatiguemètre (à la demande).

**EXPERIENCE**

Mis en place sur MIHAMA 1, 2, 3 en mars 1995, pas de Rex depuis.

**REFERENCES**

K. SAKAI, A. KATO, K. HOJO, T. KOMINO  
Outline of On-Line Fatigue Monitoring System for Nuclear Power Plant.  
Japan IERE Council, Mars 1995

K. SAKAI, K. HOJO, A. KATO, R. UMEHARA  
On-Line Fatigue Monitoring System for Nuclear Power Plant.  
Nuclear Engineering and Design, 153 (1994), pp19-25

**DEVELOPPEURS**

- Toshiba Co
- Hitachi Ltd

**UTILISATEUR**

- Tokyo Electric Power Co

**PRINCIPE**

- **Type d'instrumentation : globale et locale**
- **Système informatique** : cad = 0,1 s transitoires) ou 1 mn (permanent)  
compression de données en perturbographie
- **Type d'analyse**  
Compta fonctionnelle ou mécanique  
Comptabilisation (transimètre) par rapport aux événements de conception  
Fatiguemètre : calcul EF. S'oriente vers approche fonction de transfert pour diminuer le coût des calculs.

**EXPERIENCE**

Mis en place à Kashiwazaki-Kariwa 3-4 (110 MW BWR) (1992-1994)  
(étude de faisabilité : 1985-1986, développement 1987-1988)

**REFERENCES**

- O. Maekawa, Y. Kanazawa, Y. takahashi, M. Tani  
Operating data monitoring and fatigue evaluation systems and findings for boiling water reactors in Japan.  
Nuclear Engineering and Design 153 (1995), pp 135-143.
- O. Maekawa, Y. Kanazawa, Y. takahashi, M. Tani  
Trend of operating data monitoring and fatigue evaluation systems for BWR in Japan.  
SMIRT 12 ,1993, pp 265-270

**DEVELOPPEUR**

- Tractebel Energy Engineering

**UTILISATEUR**

- Centrale de Doel

**PRINCIPE**

- **Type d'instrumentation** : globale et locale
- **Système informatique** : non précisé
- **Type d'analyse** : calculs éléments finis sur la ligne d'expansion et le piquage ARE/ASG.

**EXPERIENCE**

Installation du système à Doel 2 et Doel 4.  
Facteur d'usage beaucoup plus faible que prévu.  
Le système est encore largement en développement.

**REFERENCES**

M. GUYETTE, M. DE SMET.  
Inverse and direct transfer functions for the fatigue follow-up of piping systems submitted to stratification.  
Nuclear Engineering and Design 153 (1995), pp 183-195

**DEVELOPPEUR**

Bhabha Atomic Research Centre

**UTILISATEURS**

Application aux BWR, PWR, HPWR.

**PRINCIPE**

- **Type d'instrumentation** : Pas d'information.
- **Système informatique** : PC
- **Type d'analyse** : Fonctions transimètre et fatiguemètre(approche fonction de transfert). Système qualifié sur boucle d'essai.

**EXPERIENCE**

Mise en place en cours (depuis juin 95) à Kota (HPWR).

**REFERENCES**

N.K. MUKHOPADHYAY, B.K. DUTTA, H.S. H.S. KUSHAWA  
On line fatigue life monitoring methodology for power plant components.  
Int. J. Pres Ves & Piping 60 (1994), pp 297-306.

N.K. MUKHOPADHYAY, B.K. DUTTA, H.S. H.S. KUSHAWA  
Development of methodology for on line fatigue life monitoring of nuclear power plant components. SMIRT 12, 1993, pp 295-300.

N.K. MUKHOPADHYAY, B.K. DUTTA, H.S. H.S. KUSHAWA  
Implementation of on line fatigue monitoring methodology in heavy water plant Kota for remnant life assessment programme.  
Workshop on creep, fatigue, creep-fatigue interaction, Kalpakkam, India, 1995.

N.K. MUKHOPADHYAY, B.K. DUTTA, H.S. H.S. KUSHAWA  
Generation of data base for on-line fatigue life monitoring of indian nuclear power plant components: Part I.  
Generation of Green's functions for end fitting.  
Rapport interne BARC/1994/E031.