

FR9703949

FR 9703949
Destination : I, I+D, D

R
A
P
P
O
R
T

**VIBRATION OF
SAFETY INJECTION
PUMP MOTORS**

Didier WATTRELOS

Rapport IPSN/Département d'évaluation de sûreté N° 301e

Mars 1997

CEA-DES/301 e

d

29-04

RAPPORT DES/301e

**VIBRATION OF
SAFETY INJECTION PUMP MOTORS**

Didier WATTRELOS*

4th symposium NRC/ASME on pumps and
valves testing
15-18 July 1996, Washington

* IPSN/DES/SEREP

Mars 1997

VIBRATION OF SAFETY INJECTION PUMP MOTORS

D. Wattrelos

Institute for Nuclear Protection and safety (IPSN), France

1 - OBJECT

This paper covers a fault encountered in the safety injection pump motors of the French 900 MWe unit nuclear power stations. This fault was not revealed either during the low pressure safety injection and containment spray system pump qualification test under accident conditions or during the special tests on a test bench carried out to attempt to replicate the fault and to identify ways of remedying it. This constitutes a potential common mode of failure of the safety injection system and the containment spray system pumps.

The vibration phenomena illustrate the importance of carrying out tests in the plants under conditions as close as possible to those of actual accident.

2 - INTRODUCTION

At the request of the Nuclear Installation Safety Directorate (French acronym DSIN), subsequent to the safety review of the 900 MWe units of early design, tests were scheduled by the operator for July 1992. These tests of the low pressure safety injection and containment spray system pumps with recirculation via the reactor building containment sump took place during a refuelling outage of Unit 2 of Fessenheim Nuclear Power Station. The purpose was to verify, on-site, the behaviour of the pumps with an inadequate net positive suction head.

These tests, which placed demands on the equipment in conditions which are far closer to an accident situation than those encountered during periodic testing, revealed abnormal vibration of the pump drive motor. These vibrations are liable to constitute a potential common mode of failure of the safety injection and containment spray function in the event of an accident when use of these systems is required. The low pressure safety injection and containment spray system pumps are of identical design.

Excessive tightening of the outer ring of the lower ball bearing of the motors was thought to be the cause of the fault. Test bench trials were undertaken by Electricité de France (EDF) to confirm this hypothesis. In these tests, abnormal vibration did not occur, even with considerable tightening. However, they did show that a motor exhibiting vibration beyond the criteria for maintenance shutdown could operate for some one hundred hours without suffering damage or loss of performance. This substantial period is adequate for taking measures involving the installation of mobile equipment to avoid loss of core cooling capability.

While these investigations were being carried out, the motors of all the 900 MWe unit nuclear power stations were brought to compliance with the operating conditions laid down by manufacturers (proper sliding of the outer ring).

In so far as the root cause has not been identified, the Institute for Nuclear Protection and Safety (French acronym IPSN) thinks that additional research should be performed to explain the fault observed.

3 - DESCRIPTION OF THE PROBLEM

On 29 July 1992, during refuelling outage of unit 2 of Fessenheim Nuclear Power Station, a test of the low pressure safety injection pump with recirculation via the reactor building containment sump revealed vibration reaching 230 μm and a speed of 12 mm/sec after some 6 hours of testing. These values are far higher than the shutdown criteria for this type of pump (amplitude 140 μm , speed 11.2 mm/sec). Vibration was strongest at the upper bearing of the motors. It did not result in motor damage.

Testing of the low pressure safety injection system pump with recirculation via the sump involves operation at outputs of around 830 to 850 m^3/h , which are lower than the maximum output planned for operation with recirculation via the containment sumps (1020 m^3/h).

For reference, during the periodic tests on the low pressure safety injection system pumps, throughput did not exceed 240 m^3/h , with the exception of the functional tests with reactor vessel open when the pumps are required to provide high output for a period limited to around 30 minutes. During the periodic tests of the containment spray system pumps with their zero flow line, output is around 800 m^3/h .

Experience feedback from other 900 MWe capacity nuclear power stations

The operating conditions of the containment spray system and low pressure safety injection system pumps of the nuclear power stations with 900 MWe reactors of recent design are similar to those of the two power stations (Bugey and Fessenheim) of early design. There is therefore, concern that the problem may be common to all the 900 MWe reactors.

Experience feedback from other 1300 MWe reactor nuclear power stations

In the past, the endurance tests carried out at Saint Alban Nuclear Power Station on the containment spray system with recirculation via the sump resulted in excessive vibration and replacement of the upper single-direction thrust bearing of the motor with a double-direction thrust bearing (double row ball bearing) in all power stations with 1300 MWe reactors. This made it possible to solve the problem of vibration of their containment spray system.

4 - SAFETY ASSESSMENT

The immediate and potential consequences of the problem found in the pumps are the following:

Immediate consequences :

Apart from the appearance of high vibration, this problem had no immediate consequences. Expert appraisal of different components of the equipment failed to reveal any sign of damage.

The motor-to-pump coupling, which is not of the universal joint but of the gear type, did not show the slightest sign of seizing or friction. The expert appraisal carried out on the manufacturer's premises showed that this component was undamaged. Similarly, expert appraisal of the bearings did not reveal any sign of a significant wear, and their grease did not show any sign of ageing.

Potential consequences :

As the containment spray system and the low pressure safety injection system pumps are of identical design, the problem can affect either of the two engineered safety features at random. Furthermore, the defect observed may equally well affect one or both of the containment spray system and low pressure safety injection system pumps. It therefore constitutes a common mode of failure.

It is extremely difficult to assess the durability of equipment subjected to vibration. The process of wear is progressive, and can accelerate to failure of the component. It is therefore probable that after a few hours, or days, there is a real risk of loss of equipment.

Analysis of the potential consequences has consisted of assessing the risk of loss of the containment spray system and/or low pressure safety injection system by comparing the conditions of appearance of excessive vibration during testing with the operating conditions planned for the containment spray system and/or low pressure safety injection pumps in the event of loss of coolant accident (LOCA).

1) Risk of loss of equipment

The low pressure safety injection system pumps are designed to provide the following outputs for the following lengths of time:

	Output m³/h	Duration of operation
Direct injection	740	½ hour
Recirculation	1020	a number of months to 1 year

The containment spray system pumps are designed to provide the following outputs for the following lengths of time:

	Output m ³ /h	Duration of operation
Direct spraying	925	½ hour
Recirculationspraying	1100	A number of days to a number of months

These tables show that the onset of excessive vibration during the direct spraying or direct injection phase is unlikely. On the other hand, in the longer term, during operation in the recirculation mode, the possibility of loss of equipment ought to be taken into account.

2) Impact on the low pressure safety injection pump

Several types of LOCA accidents can occur. The case of intermediate and large breaks in the reactor coolant system had been examined with particular care, as such accidents give rise to the same control and flow requirements as safety injection.

The two low pressure safety injection system trains start up simultaneously, and each train is designed to be capable of providing the function alone. The two safety injection pumps discharge simultaneously into the hot and cold legs, so as to avoid crystallisation of borate in the reactor vessel.

If one pump is lost, the result is partial failure of the safety injection function, but the pump remaining in service can provide the necessary output.

If both pumps are lost, even if they are not lost simultaneously, loss of the safety injection function must be envisaged during its use. It is therefore necessary to resort to the H4 beyond-design-basis accident procedure (total loss of the pumping and/or heat exchange capability in the event of a loss of primary coolant accident). This procedure provides for backup of the low pressure safety injection system pumps with the engineered safety feature containment spray system, discharging through the safety injection lines, with the low pressure safety injection system pumps stopped.

3) Impact on the containment spray system function

After an accident of the large or intermediate break type, the two trains of the engineered safety feature containment spray system begin operating, on a redundant basis, for a period of 24 hours. After this period, the operator may opt to run only one train. Each train is designed to provide the output necessary for the temperature and pressure drop in the reactor building containment. Therefore there is a standby pump for the duty pump capable of providing the required output alone.

It can be considered that 100 hours into the accident (with a pressure of 1.5 bar and a temperature of around 75°C inside the reactor building containment), the reactor building containment spraying phase is practically over when an engineered safety feature containment spray system pump may be called upon to provide backup safety injection (application of the H4 procedure).

5 - ANALYSIS OF CAUSES AND CORRECTIVES ACTIONS

5.1 - Causes

Design of motor

The motors of the containment spray system and low pressure safety injection system pumps are of identical design (see fig. 1) in all 900 MWe units. These motors thus constitute a common risk of failure.

The motor consists of a stator with a rotor supported by a shaft guided by two ball bearings.

The lower bearing is of parallel type with balls. This type of bearing is normally force-fitted on the shaft and fitted with a slight interference in its outer ring. This bearing is intended to bear radial loads only (end play possible).

The upper bearing is of the tapered type with balls. It is designed to bear downward thrust loads, specifically the weight of the rotor. The particularity of this type of bearing is that the inner ring can move relatively to the outer one in the direction opposite to that of the forces it is intended to bear (in which case guidance is lost, see Figure 2).

The loading caused by vibration to which the motor is subjected consists of:

- the mass of the rotor to be borne by the upper bearing,
- the forces caused by differential expansion, resulting from heating of the motor,
- vibrations caused by the pump.

Causes

During the tests at Fessenheim nuclear Power Station, the frequency of vibration was observed to be 50 Hz, corresponding to twice the motor speed.

This frequency is characteristic of so-called «spinning top» operation, and Electricité de France adopted the hypothesis of binding the outer ring of the lower ball bearing on the motor stator. Indeed, if it is considered that the shaft is anchored at this ball bearing, differential rotor/stator expansion results in unloading the upper bearing and loss of guidance (see Figure 2). The rotor then operates as a «spinning top» as the motor shaft is only restrained by the lower ball bearing.

In so far as the root cause has not been identified the Institute for Nuclear Protection and Safety thinks that additional research and examination should be performed in that field.

5.2 - Bench testing

The operator held two bench test sessions (see Figure 3) to verify its hypothesis relating to binding of the outer ring of the lower ball bearing on the motor stator. The test bench

includes a hydraulic brake enabling the motor to operate at its rated power. The result of these tests were submitted to the IPSN.

First series of tests: axial movement of the outer ring of the lower ball bearing possible on the motor stator.

At first campaign was carried out to prove that the motor did not suffer from vibration when the outer ring of the lower ball bearing could slide on the motor stator. Tests were carried out with clearances of 10 and 60 μm . No fault were observed during these tests.

Second series of tests: binding of the outer ring of the lower ball bearing on the motor stator.

At the request of the IPSN, the operator took steps to demonstrate, on the test bench, the hypothesis of binding of the outer ring of the lower bearing to validate the first tests. Therefore, the operator included in its test program a configuration with maximum interference to verify the appearance of vibrations exceeding the criteria as soon as thermal equilibrium of the rotor was obtained. Interference of up to 31 μm (the maximum interference theoretically possible with the manufacturing tolerance limits) was obtained by modifying the housing diameter. No abnormal vibration was observed.

In the light of these findings, the IPSN considered that the origin of the fault had not been identified. Therefore, during these tests, Electricité de France ran a motor with excessive vibrations for some one hundred hours, corresponding to the four days necessary for fielding the mobile resources required in the H4 and U3 beyond-design-basis accident procedures (backup of the containment spray system and low pressure safety injection system with mobile equipment). To do this, a mechanical device for artificially raising the rotor was installed to simulate loss of guidance of the motor rotor by the upper ball bearing and to obtain vibration similar to that found during the initial fault described in §2.

The tests under these conditions lasted for 100 hours without any damage being detected in visual examination carried out after the test, and without the motor performance having changed.

The results are interesting as they show that in the event of vibration in a motor largely exceeding the shutdown criteria, there is sufficient time to make arrangements to avoid loss of core cooling capability. The mobile equipment consists of an emergency pump connected with a flexible pipe.

5.3 - Corrective actions

- Campaign for verifying and reajusting the lower bearings of the motors.

As soon as the nature of the problem was revealed, Electricité de France began checking proper sliding of the outer ring of the lower ball bearing on the basis of the functional clearance between the ring and the motor stator in all the nuclear power stations.

The motors were divided into two categories depending on whether sliding was considered possible or not.

a) For the lower ball bearings with a clearance between the outer ring and the motor stator greater than 20 μm , sliding of the outer ring of the lower ball bearing on the stator was possible as the functional play was known with an accuracy of 15 μm . The ball bearings were therefore retained.

b) For the lower ball bearings with a clearance between the outer ring and the motor stator either unknown or less than 20 μm , sliding of the outer ring of the low ball bearing on the stator being uncertain, the ball bearings were therefore re-adjusted to enable sliding

· Supplementary and compensatory provisions made by Electricité de France.

In view of the satisfactory behaviour of the equipment in a long test with abnormally high vibration, EdF adopted the hypothesis that a motor can operate for 100 hours without damage in the presence of high vibration (second series of tests, see §4.2).

EdF has provided two remedial lines of defence for partial or total failure either of the safety injection or containment spray functions:

a) Restoration of the function by replacement of the failed equipment.

Electricité de France considers that in such a situation, 60 hours would be necessary to procure and install the motor (only 35 hours if the motor is available on-site).

b) Resorting to the mobile equipment provided for in the H4 and U3 accident procedures.

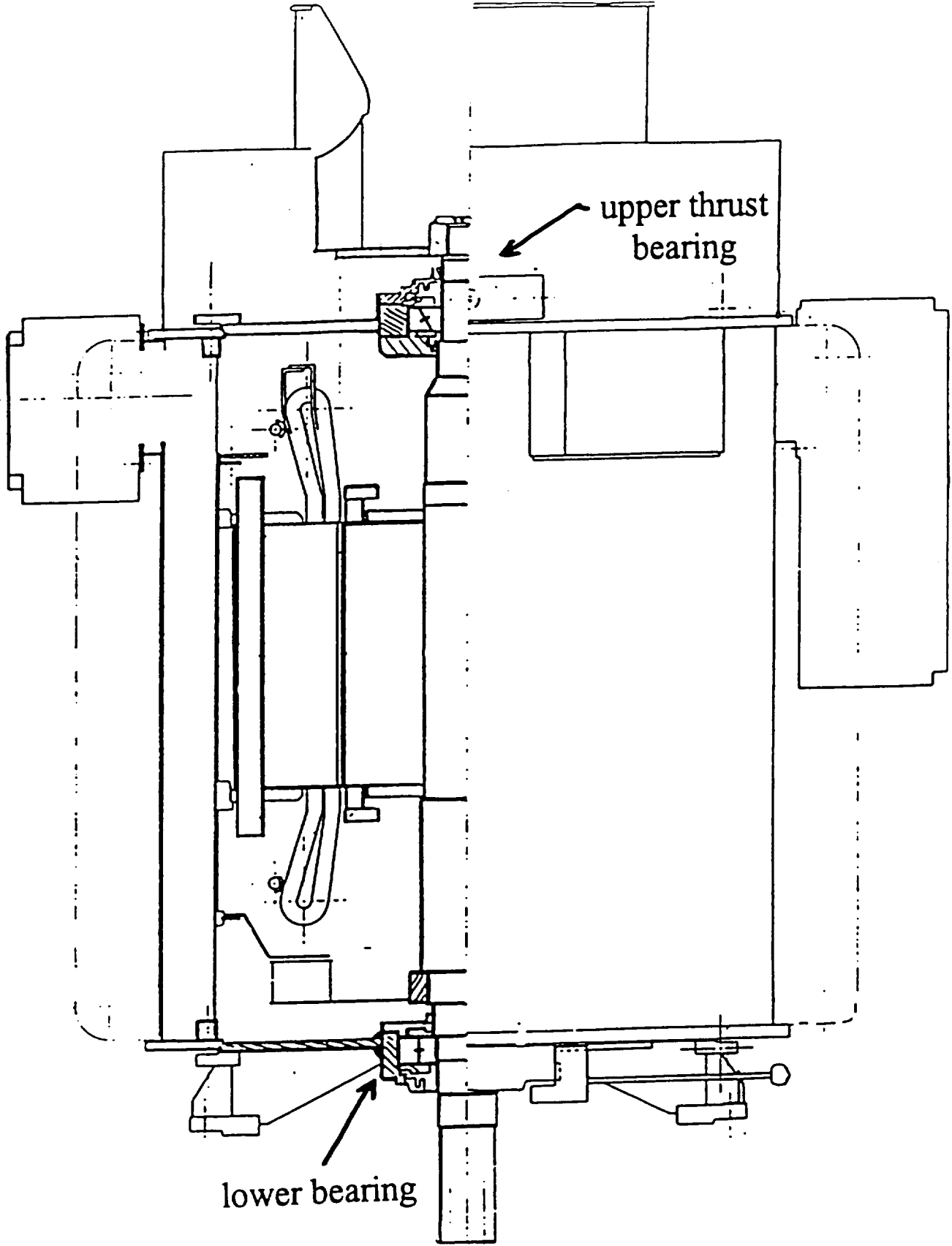
In the event of failure of the last safety injection or containment spray pump, partial cooling of the core is possible using the resources provided for in the H4 and U3 accident procedures.

These arrangements are provided to enable mutual backup of the containment spray system and low pressure safety injection system pumps, and make it possible to cope in the event of total loss of these pumps. Corresponding resources are permanently installed in the two 900 MWe reactor nuclear power stations of early design (Bugey and Fessenheim), whereas provision is made for mobile equipment in the other 900 MWe reactor nuclear power stations of more recent design. They necessitate the installation of flexible pipes and a backup pump driven by an internal combustion engine. When it is operating, water is injected into the reactor coolant system via the containment spray system heat exchanger and one train of the engineered safety feature low pressure safety injection system. In this situation, spraying inside the reactor containment is abandoned in favour of reactor core cooling.

6 -CONCLUSIONS AND LESSONS LEARNT

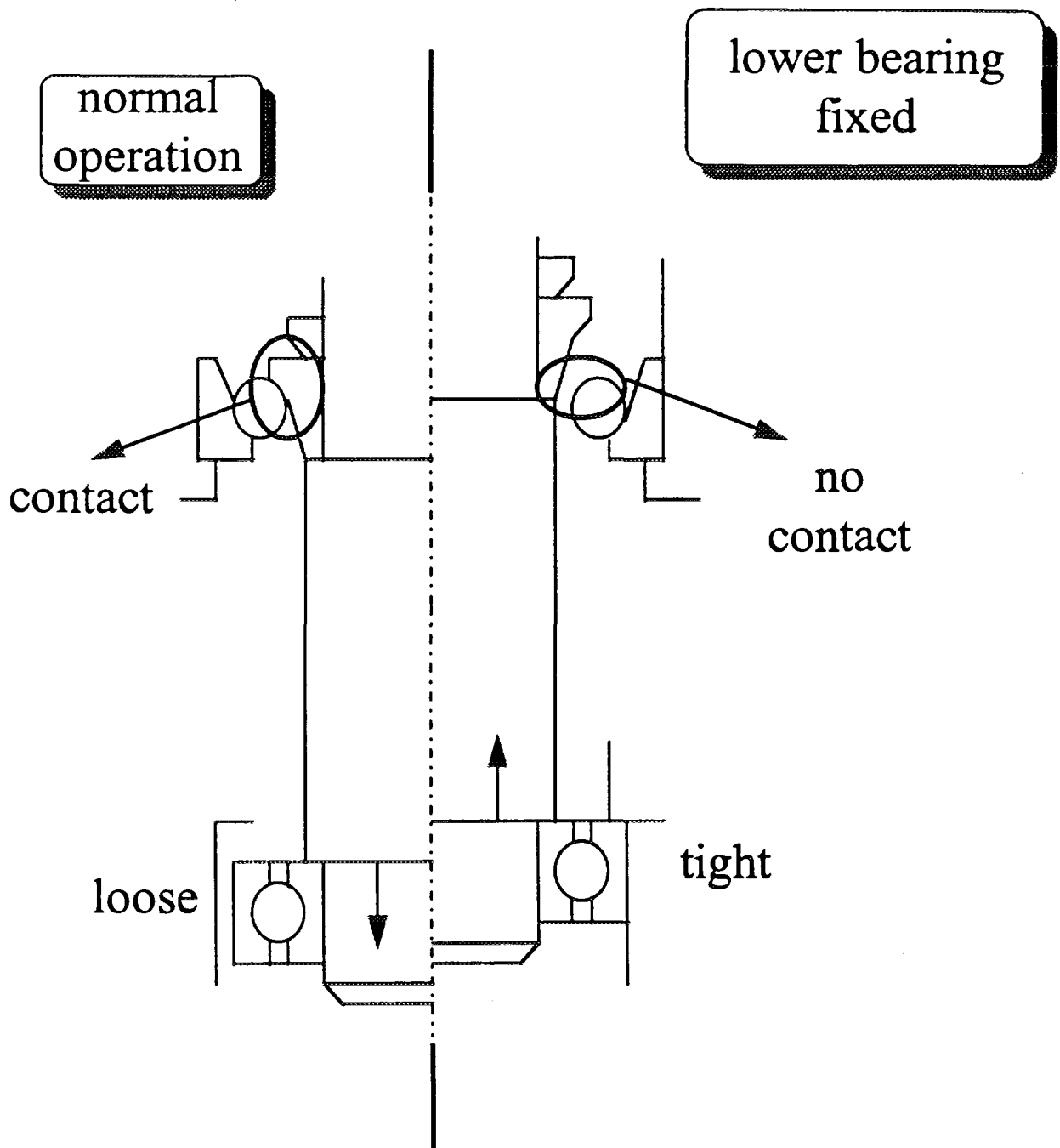
A specific test carried out in a plant involving demands on the equipment under conditions far closer to operation during an accident than those which are applied during the periodic tests revealed a fault liable to constitute a potential common mode of failure of the pumps of both the engineered safety feature low pressure safety injection and containment spray systems. It should be borne in mind that the probabilistic safety assessments use reliability data derived from the failure rates observed during normal operation which, for this type of equipment, correspond to the periodic tests.

This fault was not revealed either during the low pressure safety injection and containment spray system pump qualification tests under accident conditions or during the special tests on a test bench carried out to attempt to replicate the fault and to identify ways of remedying it. The vibration phenomena illustrate the importance of the details of assembly and supporting of equipment, and shows the need for carrying out tests in the plants under conditions as close as possible to those of actual accident situations.



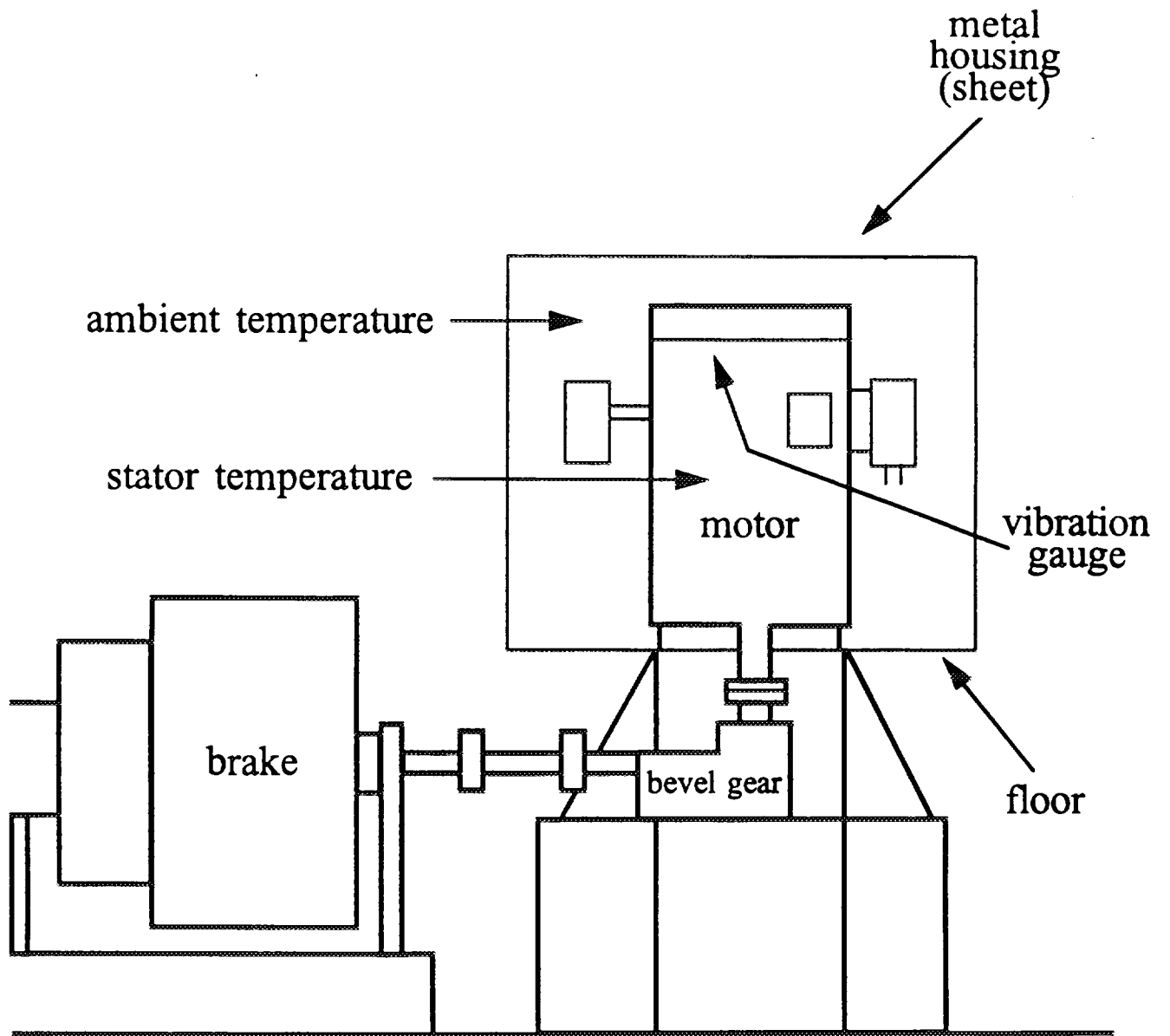
MOTOR OVERALL DRAWING

FIGURE 1



RELIEF MECANISM OF THE UPPER BALL BEARING

FIGURE 2



MOTOR TEST BENCH

FIGURE 3



DOUBLE

Handwritten signature

**VIBRATIONS DES
MOTEURS DES POMPES
D'INJECTION DE SECURITE**

Didier WATTRELOS

Rapport IPSN/Département d'évaluation de sûreté N° 301

Mars 1997

R
A
P
P
O
R
T

RAPPORT DES/301

VIBRATIONS DES MOTEURS DES POMPES D'INJECTION DE SECURITE

Didier WATTRELOS*

4ème symposium NRC/ASME relatif aux pompes et robinets
15-18 juillet 1996, Washington

* IPSN/DES/SEREP

Mars 1997

VIBRATIONS DES MOTEURS DES POMPES D'INJECTION DE SECURITE

D. WATTRELOS

Institut de protection et de sûreté nucléaire (FRANCE)

1 - OBJET

Cette anomalie n'a été mise en évidence, ni lors des essais de qualification des pompes des circuits d'injection de sécurité (RIS-BP) et d'aspersion dans l'enceinte (EAS) aux conditions accidentelles, ni lors des essais périodiques particuliers sur banc engagés pour essayer de la reproduire et pour rechercher des solutions permettant de la résoudre. Cette communication a pour objet de présenter une anomalie rencontrée sur les moteurs des pompes d'injection de sécurité des centrales REP 900 MWe françaises. Elle constitue un mode commun potentiel de défaillance des pompes des circuits de sauvegarde RIS et EAS.

Concernant les phénomènes vibratoires, ceci illustre l'intérêt des essais qui peuvent être effectués sur les sites au plus près des conditions réelles de fonctionnement accidentel.

2 - INTRODUCTION

A la demande de la Direction de la Sûreté des Installations nucléaires (DSIN), suite à la réévaluation de la sûreté des tranches de puissance nominale 900 MWe de première conception, des essais ont été programmés par l'exploitant en juillet 1992. Ces essais en recirculation des motopompes d'injection de sécurité basse pression (circuit RIS-BP) et d'aspersion dans l'enceinte (circuit EAS) sur le puisard de l'enceinte du bâtiment réacteur ont eu lieu lors d'un arrêt pour rechargement de la tranche 2 de la centrale nucléaire de Fessenheim. Leur but était de vérifier, sur site, le bon comportement des motopompes lorsque leur hauteur nette minimale d'aspiration (NPSH) était insuffisante.

Ces essais, sollicitant le matériel dans des conditions beaucoup plus proches du fonctionnement accidentel que celles rencontrées lors des essais périodiques, ont permis d'observer des vibrations anormales des moteurs d'entraînement des pompes. Ces vibrations sont susceptibles de constituer un mode commun potentiel de défaillance des fonctions d'injection de sécurité et d'aspersion dans l'enceinte du réacteur, en cas d'accident nécessitant l'appel à ces systèmes. Les moteurs des pompes des circuits RIS-BP et EAS sont de conception identique.

Le serrage trop important de la bague externe du roulement à billes inférieur des moteurs a été envisagé comme cause de l'anomalie. Différents essais sur banc ont été entrepris par Electricité de France (EdF) pour confirmer cette hypothèse. Ces essais n'ont pas permis de vérifier l'apparition de vibrations anormales, même avec un serrage important. Par contre, ils ont montré qu'un moteur affecté de vibrations dépassant très largement les seuils des critères d'arrêt pour maintenance pouvait fonctionner pendant une durée d'une centaine d'heures, sans subir de dégât et sans évolution de ses caractéristiques. Ce délai important permettrait de prendre des dispositions par l'installation de moyens mobiles pour éviter la perte de refroidissement du cœur.

Parallèlement à ces investigations, une mise en conformité de ces moteurs sur toutes les centrales nucléaires du palier de puissance nominale 900 MWe, par rapport aux conditions de fonctionnement définies par le constructeur, a été réalisée (bon coulisement de la bague externe).

Dans la mesure où la cause profonde de l'anomalie n'est pas expliquée, l'Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire (IPSN) estime nécessaire de poursuivre les recherches visant à expliquer le problème rencontré.

3 - DESCRIPTION DE L'ANOMALIE

Le 29 juillet 1992, lors de l'arrêt pour rechargement de la tranche 2 de la centrale de Fessenheim, l'essai des motopompes du circuit RIS-BP en recirculation sur le puisard de l'enceinte du bâtiment réacteur a mis en évidence des vibrations atteignant jusqu'à 230 μm d'amplitude et environ 12 mm/s de vitesse après environ 6 heures d'essai. Ces valeurs sont très supérieures au critère d'arrêt de ce type de motopompe (amplitude 140 μm , vitesse 11.2 mm/s). Les vibrations maximales ont été localisées sur les paliers supérieurs de ces moteurs. Elles n'ont pas conduit à des avaries du moteur.

L'essai des motopompes du circuit RIS-BP en recirculation sur le puisard implique un fonctionnement à des débits de l'ordre de 830 à 850 m^3/h , inférieurs au débit maximal prévu lors du fonctionnement en recirculation sur les puisards de l'enceinte : 1020 m^3/h .

A titre d'information, lors des essais périodiques des pompes du circuit RIS-BP, le débit atteint n'excède pas 240 m^3/h à l'exception des Essais Fonctionnels Cuve Ouverte (EFCO) où les pompes sont sollicitées à grand débit pendant une durée limitée à environ 30 minutes. Lors des essais périodiques des pompes du circuit EAS sur leur ligne de débit nul, le débit est de l'ordre de 800 m^3/h .

Retour d'expérience sur les autres centrales nucléaires de puissance nominale 900 MWe

Les conditions de fonctionnement des pompes du circuit RIS-BP ou EAS des centrales nucléaires de puissance nominale 900 MWe de dernière conception étant similaires à celles des deux centrales (Bugey et Fessenheim) de première conception, on peut craindre une extension potentielle de ce problème à l'ensemble des réacteurs de puissance nominale 900 MWe.

Retour d'expérience sur les autres centrales nucléaires de puissance nominale 1300 MWe

Dans le passé, des essais d'endurance effectués à la Centrale de St Alban sur les pompes du circuit EAS en recirculation sur le puisard, avaient conduit à un constat de vibrations excessives et au remplacement de la butée supérieure à simple effet du moteur par une butée à double effet (double roulement à contact oblique) sur l'ensemble des centrales de puissance nominale 1300 MWe. Ceci avait permis de résoudre les problèmes de vibrations des pompes du circuit EAS sur ces centrales.

4 - EVALUATION DE SÛRETÉ

Les conséquences réelles et potentielles de l'anomalie détectée sur les pompes sont les suivantes :

Conséquences réelles

Hormis l'apparition de vibrations élevées, cette anomalie n'a pas eu de conséquence réelle. L'expertise des différents composants du matériel n'a pas permis de détecter de signe de détérioration.

L'accouplement moteur/pompe, qui n'est pas à cardan mais à engrènement, n'a pas montré de trace de grippage, ni de frottement. L'expertise effectuée chez le constructeur a montré que ce composant n'a pas subi d'altération. De même, l'expertise des roulements n'a révélé aucune trace d'usure significative. La graisse n'a pas présenté de signe de vieillissement.

Conséquences potentielles

Les moteurs des pompes des circuits RIS-BP et EAS étant de technologie identique, l'anomalie peut affecter indifféremment ces 2 fonctions de sauvegarde. De plus, le défaut observé peut concerner aussi bien l'une des deux motopompes des circuits RIS-BP et EAS que les 2 pompes. Ce défaut constitue ainsi un mode commun de défaillance.

Il est très difficile d'évaluer la tenue dans le temps d'un matériel soumis à un régime vibratoire. Le processus d'usure est évolutif et peut s'accélérer jusqu'à la ruine du composant. Il est donc probable qu'après quelques heures, ou quelques jours, le risque de perte d'une machine soit réel.

L'analyse des conséquences potentielles consiste à évaluer le risque de perte de la fonction du circuit RIS-BP et/ou EAS en comparant les conditions d'apparition des vibrations excessives lors de l'essai avec les conditions de fonctionnement prévues pour les pompes du circuit RIS-BP et/ou EAS en cas d'Accident de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP).

1) Risque de perte des machines

Les pompes du circuit RIS-BP sont construites pour fonctionner pour le débit et la durée suivants :

	Débit m ³ /h	Durée de fonctionnement
Injection directe	740	½ heure
Recirculation	1020	Plusieurs mois à 1 an

Les pompes du circuit EAS sont construites pour fonctionner pour le débit et la durée suivants :

	Débit m ³ /h	Durée de fonctionnement
Aspersion directe	925	½ heure
Aspersion en recirculation	1100	De plusieurs jours à plusieurs mois

Il résulte de l'examen des tableaux ci-dessus, que l'apparition de vibrations excessives dans la phase d'injection directe ou d'aspersion directe est peu probable. Par contre, à plus long terme, lors d'un fonctionnement en recirculation, le risque de perte d'une machine ne peut être écarté.

2) Impact sur la fonction RIS-BP

Plusieurs types d'accidents de type d'APRP peuvent survenir. Le cas des brèches intermédiaires et grosses sur le circuit primaire a été examiné plus particulièrement, dans la mesure où ces accidents font appel aux mêmes exigences de conduite et de débit pour l'injection de sécurité.

Les deux files du circuit RIS-BP démarrent simultanément, chaque file étant conçue pour assurer seule la fonction. Les 2 pompes d'injection de sécurité débitent simultanément en branches froides et en branches chaudes, afin d'éviter la cristallisation du bore dans la cuve du réacteur.

Si une pompe est perdue, il y a défaillance partielle de la fonction d'injection de sécurité, mais la pompe restant en service assure seule le débit nécessaire.

Si les deux pompes sont perdues, même en considérant qu'il peut y avoir un délai entre leur défaillance, la perte de la fonction d'injection de sécurité doit être envisagée durant son utilisation. Il faut alors faire appel à la procédure de conduite accidentelle hors dimensionnement H4 (perte totale à terme des moyens de pompage et/ou d'échange de chaleur en cas d'accident par perte de réfrigérant du circuit primaire). Cette procédure prévoit le secours des pompes du circuit RIS-BP par les pompes du circuit de sauvegarde EAS qui débitent alors à travers les lignes d'injection de sécurité, les pompes du circuit RIS-BP étant à l'arrêt.

3) Impact sur la fonction EAS

Après un accident de type "grosse brèche" ou "brèche intermédiaire", les deux files du circuit de sauvegarde EAS entrent en service, de façon redondante pendant une période de 24 heures. A l'issue de cette période, on admet de fonctionner avec une seule file à la convenance de l'opérateur. Chaque file est dimensionnée pour assurer le débit nécessaire à la chute de la pression et de la température dans l'enceinte du bâtiment réacteur. Il existe donc une pompe à l'arrêt en secours de la pompe en marche capable d'assurer à elle seule ce débit requis.

On peut considérer que 100 heures après l'accident (la pression et la température dans l'enceinte du bâtiment réacteur étant respectivement de l'ordre de 1.5 bar et d'environ 75° C), la phase d'aspersion de l'enceinte du bâtiment réacteur est pratiquement terminée lorsqu'on appelle éventuellement une pompe du circuit de sauvegarde EAS en secours de la fonction d'injection de sécurité (application de la procédure de conduite accidentelle H4).

5 - ANALYSE DES CAUSES ET ACTIONS CORRECTIVES

5.1 - CAUSES

Conception du moteur

Les moteurs des circuits RIS-BP et EAS sont de conception identique (voir la figure 1) pour toutes les tranches nucléaires de puissance nominale 900 MWe. Ces moteurs constituent donc un point commun.

Le moteur est constitué d'un stator et d'un rotor supporté par un arbre dont les efforts sont repris par deux roulements à billes.

Le roulement inférieur est un roulement à billes classique. Ce type de roulement est normalement monté serré sur l'arbre et légèrement serré sur sa bague extérieure. Ce roulement est destiné à reprendre uniquement les efforts radiaux (coulissement axial possible).

Le roulement à billes supérieur est un roulement à billes à contact oblique. Sa fonction est la reprise des efforts axiaux orientés de haut en bas, et particulièrement du poids du rotor. La particularité de ce type de roulement est la possibilité de déplacement de la bague intérieure par rapport à la bague extérieure dans le sens opposé à celui des efforts qu'il est censé reprendre (dans ce cas, le guidage n'est plus assuré, voir la figure 2).

Les chargements subis par le moteur à l'origine des vibrations se composent :

- de la masse du rotor à reprendre par le roulement supérieur,
- des efforts résultant des dilatations différentielles, dues à l'échauffement du moteur,
- des vibrations induites par la pompe.

Causes

Lors des essais sur le site de Fessenheim, la fréquence de vibrations observée était de 50 Hz, soit deux fois la fréquence de rotation du moteur (1500 tr/min).

Cette fréquence étant caractéristique d'un fonctionnement dit "en toupie", Électricité de France a retenu l'hypothèse incriminant le serrage de la bague extérieure du roulement à billes inférieur sur l'arbre du moteur. En effet, si l'on admet que l'arbre a un point fixe au niveau de ce roulement à billes, la dilatation différentielle rotor-stator a pour effet de décharger le roulement supérieur qui n'est donc plus guidé (voir figure 2). Le rotor fonctionne alors "en toupie" car l'arbre du moteur n'est plus tenu que par le roulement à billes inférieur.

Dans la mesure où la cause profonde des anomalies observées n'est pas expliquée, l'Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire (IPSN) estime nécessaire de poursuivre les études et recherches dans ce domaine.

5.2 - ESSAIS SUR BANC

L'exploitant a engagé deux campagnes d'essais sur banc (voir la figure 3) afin de vérifier son hypothèse incriminant le serrage de la bague extérieure du roulement à billes inférieur sur le stator du moteur. Grâce à un frein hydraulique, le banc permet au moteur de fonctionner à sa puissance nominale. Les résultats de ces essais ont été présentés à l'IPSN.

1ère série d'essai : coulissement axial possible de la bague extérieure du roulement à billes inférieur sur le stator du moteur

Une première campagne a été engagée avec pour objectif de démontrer que le comportement du moteur était exempt de vibration lorsque la bague extérieure du roulement à billes inférieur pouvait coulisser sur le stator du moteur. Des essais ont été engagés avec des jeux de 10 à 60 μm . Aucune anomalie n'a pu être observée lors de ces essais.

2ème série d'essai : serrage de la bague extérieure du roulement à billes inférieur sur le stator du moteur

A la demande de l'IPSN, l'exploitant a entrepris de mettre en évidence, sur banc d'essai, l'hypothèse du serrage de la bague extérieure du roulement inférieur afin de valider les premiers essais. A cette fin, l'exploitant a inclus dans son programme d'essai un montage avec serrage maximum, en vue de vérifier l'apparition de vibrations hors critères dès la stabilisation thermique du rotor. Des serrages pouvant atteindre 31 μm (valeur supérieure au serrage qui peut théoriquement être obtenu par le respect des tolérances de fabrication) ont été réalisés par modification du diamètre du logement. Aucune vibration anormale n'a pu être observée.

Au vu de ces éléments, l'IPSN a estimé que l'origine de l'anomalie n'était pas trouvée. Aussi, durant ces essais, Électricité de France a fait fonctionner un moteur en régime vibratoire excessif pendant une centaine d'heures, correspondant aux 4 jours nécessaires à la mise en place des moyens mobiles prévus dans les procédures de conduite accidentelle hors dimensionnement H4 et U3 (secours des circuits EAS et RIS-BP par la mise en place de moyens mobiles). A cette fin, un dispositif mécanique de soulèvement artificiel du rotor a été installé pour simuler la perte de guidage du rotor du moteur par le roulement à billes supérieur

et pour obtenir des vibrations similaires à celles constatées pendant l'anomalie décrite au paragraphe 2.

Dans ces conditions, l'essai a duré 100 heures, sans qu'aucun dégât n'ait pu être décelé à l'examen visuel effectué à l'issue de l'essai, et sans que les caractéristiques du moteur aient évolué.

Ces résultats sont intéressants car ils montrent qu'avec un moteur affecté de vibrations dépassant très largement les critères d'arrêt, il existe un délai permettant de prendre des dispositions pour éviter la perte de refroidissement du coeur. Ces moyens mobiles sont une installation de tuyaux flexibles et une pompe de secours.

5.3 - ACTIONS CORRECTIVES

- Campagne de vérification et de remise en conformité du palier inférieur des moteurs

Dès la mise en évidence du problème, Électricité de France a entrepris la vérification du bon coulisement de la bague extérieure du roulement à billes inférieur en fonction du jeu fonctionnel entre cette bague et le stator du moteur sur toutes les centrales.

Les moteurs ont été classés en 2 catégories selon que le coulisement ait été jugé possible ou non.

a) les roulements à billes inférieurs dont le jeu entre la bague extérieure et le stator du moteur était supérieur à 20 μm . Le coulisement de la bague extérieure du roulement à billes inférieur sur le stator était possible car le jeu fonctionnel était connu avec une précision de 15 μm . Le roulement à billes a donc été conservé.

b) les roulements à billes inférieurs dont le jeu entre la bague extérieure et le stator du moteur était inconnu ou inférieur à 20 μm . Le coulisement de la bague extérieure du roulement à billes inférieur sur le stator n'était alors plus évident. Le roulement à billes a donc été mis en conformité pour permettre le coulisement.

- Dispositions compensatoires et complémentaires prévues par EdF

Compte tenu du bon comportement du matériel en essai de longue durée à un régime vibratoire anormalement élevé, Électricité de France a fait l'hypothèse qu'un moteur peut fonctionner 100 heures sans dommage en régime vibratoire élevé (voir 2ème série d'essai du paragraphe 4.2).

En cas de défaillance partielle ou totale de l'une des deux fonctions IS ou EAS, Électricité de France a prévu deux lignes de défense palliatives :

- a) Restauration de la fonction par remplacement du matériel défaillant

Dans cette situation, Électricité de France estime que 60 heures sont nécessaires pour approvisionner un moteur et l'installer (35 heures seulement si le moteur est disponible sur le site).

b) Appel aux moyens mobiles prévus dans les procédures de conduite accidentelle H4-U3

En cas de défaillance de la dernière pompe IS ou EAS, le refroidissement partiel du coeur est assuré à l'aide des dispositifs prévus dans le cadre des procédures de conduite accidentelle H4-U3.

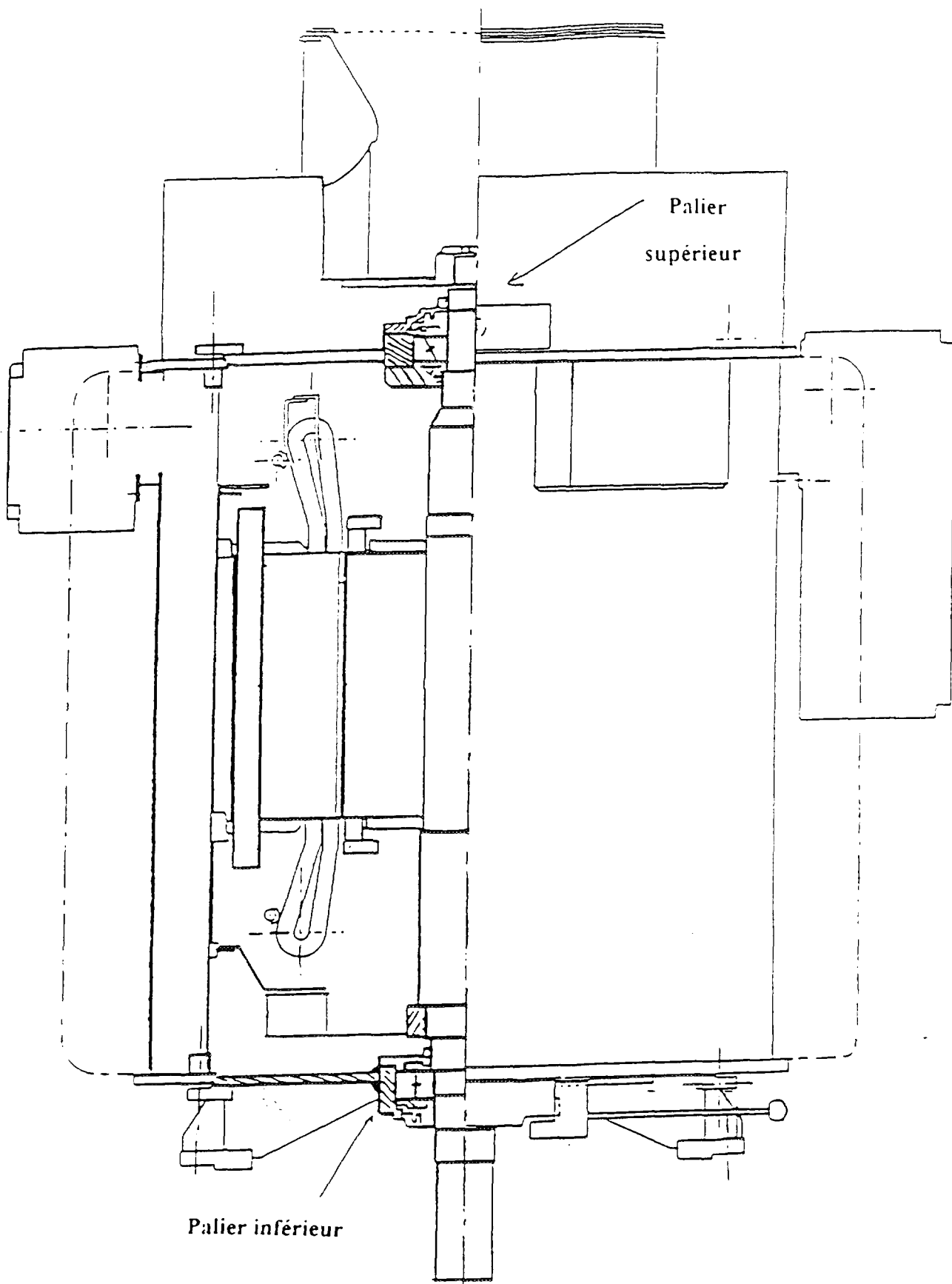
Ces dispositifs sont prévus pour permettre le secours mutuel des pompes des circuits EAS et RIS-BP, et faire face à la perte totale de ces pompes. Ces dispositifs sont installés en fixe sur les deux centrales de puissance nominale 900 MWe de première conception (Bugey et Fessenheim), mais sont mobiles sur les autres centrales de puissance nominale 900 MWe de conception plus récente. Ils nécessitent l'installation de tuyaux flexibles et d'une pompe de secours à moteur thermique. De l'eau est alors injectée dans le circuit primaire via un

échangeur du circuit EAS et une file du circuit de sauvegarde RIS-BP. Dans cette situation, l'aspersion de l'enceinte de confinement du réacteur est abandonnée au profit du refroidissement du cœur du réacteur.

6 - CONCLUSIONS ET ENSEIGNEMENTS TIRES

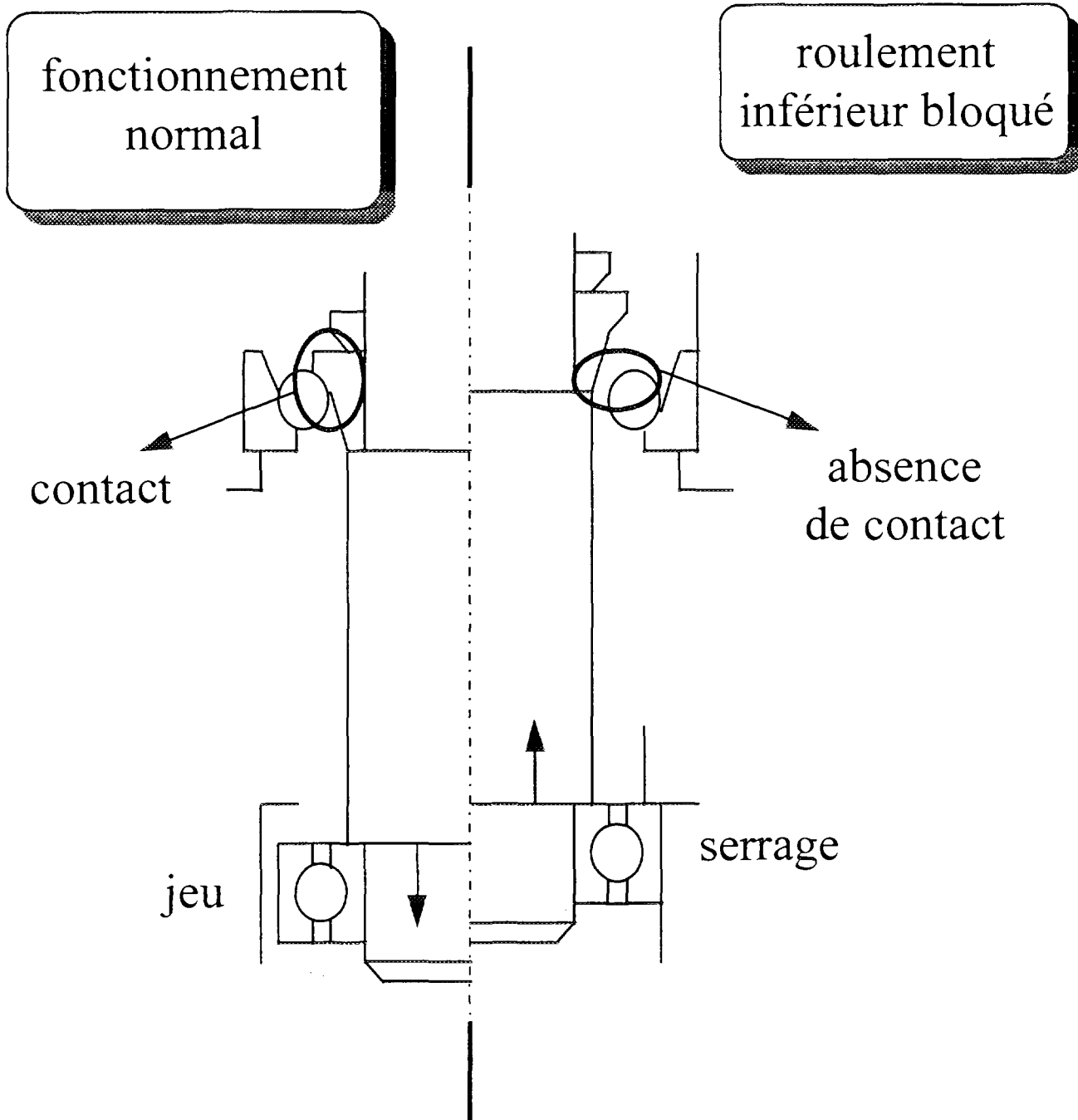
Un essai particulier effectué sur site, sollicitant le matériel dans des conditions beaucoup plus proches du fonctionnement accidentel que celles dans lesquelles on effectue les essais périodiques, a mis en évidence une anomalie de nature à constituer un mode commun potentiel de défaillance des pompes des deux circuits de sauvegarde RIS-BP et EAS. On peut rappeler que les études probabilistes de sûreté utilisent des données de fiabilité établies sur la base du taux de défaillance observé en fonctionnement normal, c'est-à-dire, pour ce type de matériel, lors des essais périodiques.

L'anomalie n'a été mise en évidence, ni lors des essais de qualification des pompes des circuits RIS-BP et EAS aux conditions accidentelles, ni lors des essais périodiques particuliers sur banc engagés pour essayer de reproduire l'anomalie et pour rechercher des solutions permettant de la résoudre. Concernant les phénomènes vibratoires, ceci illustre l'importance des particularités de montage et de supportage des matériels, et renforce l'intérêt des essais qui peuvent être effectués sur les sites au plus près des conditions réelles de fonctionnement accidentel.



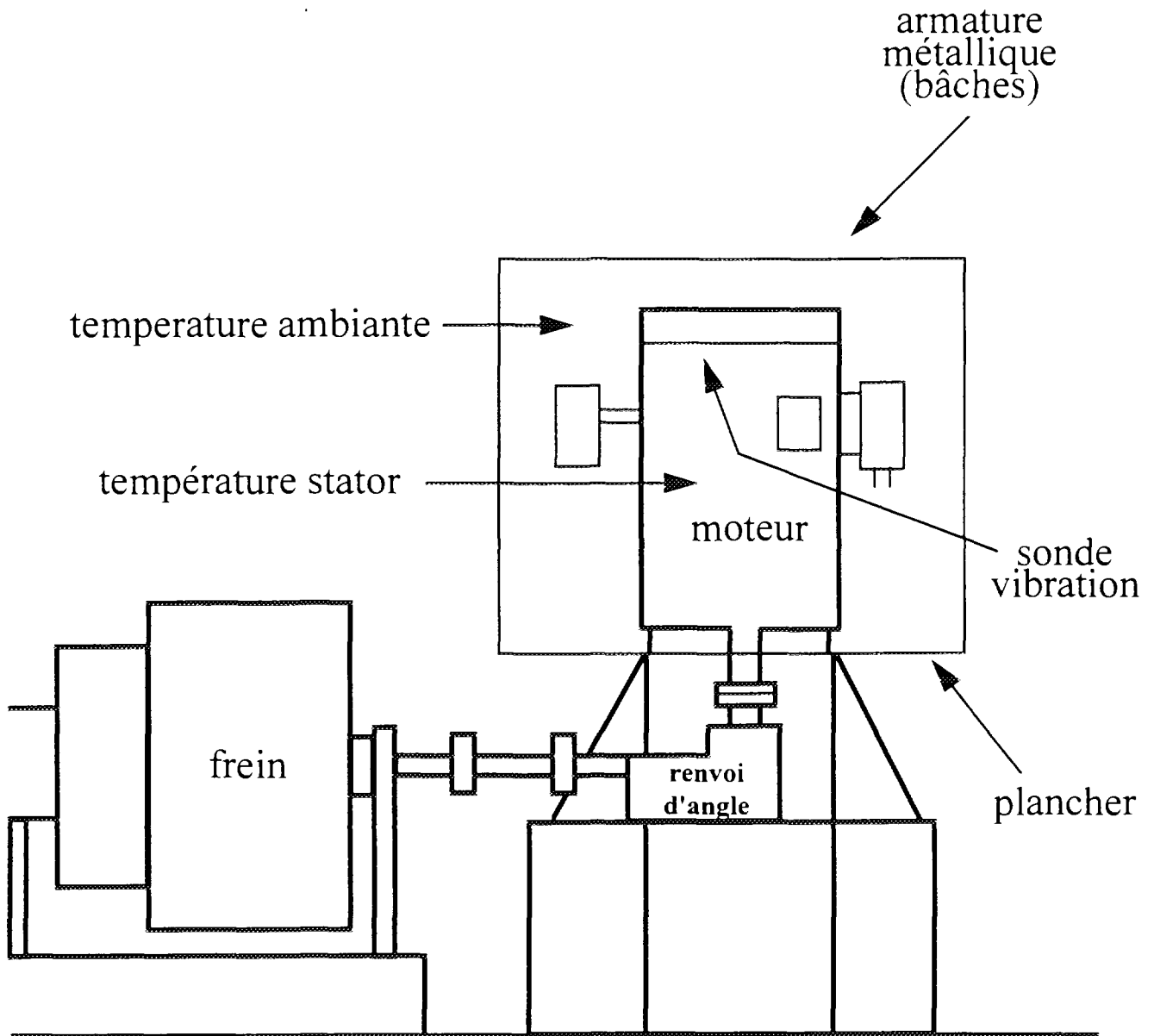
Plan de principe des moteurs

FIGURE 1



**Mécanisme de soulagement du roulement à bille supérieur
(fonctionnement en toupie)**

FIGURE 2



Dispositif d'essais moteur

FIGURE 3