Transient Monitoring Experience and Development (Surveillance des transitoires en exploitation — Expérience et développement)

J.P. Baboulin
Electricité de France, SEPTEN, Tour EDF-GDF, F-92080 Paris la Défense Cedex 8, France

G. Bimont
Electricité de France, Direction des Etudes et Recherches, 25 Allée Privée, Carrefour Pleyel, F-93206 Saint Denis Cedex 1, France

P. Dessapt
Electricité de France, Service de la Production Thermique, 3 rue de Messine, F-75384 Paris Cedex 8, France

Résumé

L'analyse du comportement du circuit primaire des centrales à eau sous pression nécessite la définition précise de l'interface entre les études de fonctionnement et les études mécaniques. Cet interface est assuré par l'établissement d'une liste de situations de dimensionnement. La pertinence des études dépend de la précision de cette liste et donc des prévisions d'exploitation qu'elle sous-entend.

Ceci nécessite donc, qu'en exploitation, soit effectuée une surveillance exhaustive des transitoires réellement subis de façon à corriger, le cas échéant, les analyses de dimensionnement ou le fonctionnement des systèmes, voire même leur conception, de façon à garantir l'exploitation sûre du réacteur. Ce retour d'expérience, riche d'enseignements, est une condition nécessaire de la sûreté.

Les méthodes utilisées actuellement sont très lourdes et onéreuses. Des développements sont donc en cours pour mettre au point des méthodes plus performantes (utilisation de fonctions de transfert). Ces méthodes, dans la mesure où elles permettent d'apprécier directement les effets (contraintes) au lieu de simplement surveiller les causes (transitoires), sont moins conservatives et plus précises.

1 - INTRODUCTION

L'interface entre les études de fonctionnement et les études de mécanique représente une charnière importante de la procédure de justification de l'absence de risques de dommages inacceptables dans l'enveloppe du circuit primaire principal. Cet interface intervient non seulement au stade de la conception mais également tout au long de l'exploitation de la centrale nucléaire sur le réseau électrique, dans la vérification permanente de la compatibilité de cette exploitation avec les hypothèses de dimensionnement. Ceci a conduit les Autorités Françaises à définir un cadre règlementaire fixant, en particulier, les conditions d'établissement de la liste des situations du circuit primaire principal (CPP) générateurs des chargements à prendre en compte et, d'autre part, la surveillance à apporter en exploitation aux transitoires de dimensionnement.

2 - CONCEPTION

L'analyse du comportement des structures du CPP nécessite donc que soit pré-établie une liste des transitoires de dimensionnement qui représentent de manière précise le fonctionnement de la chaudière nucléaire sur toute sa durée de vie. La pertinence des études de justification du comportement des structures dépend de la précision de cette liste.

Nous pouvons illustrer ces remarques par les réflexions suivantes issues de l'expérience française.

2.1 - Etablissement de la liste

La politique prévisible d'exploitation conduit à définir une liste de transitoires dont la contribution aux dommages cumulatifs est significative. Ceci met en évidence la première difficulté ; c'est celle qui résulte directement de la spécification de ce qui peut être significatif pour le dommage considéré. En effet, si l'on considère, par exemple, le dommage de fatigue, on peut définir un seuil de contrainte au-dessous duquel la contribution à la fatigue peut être considérée comme nulle. Par contre, lorsqu'on envisage des phénomènes de propagation de défaut sous l'influence de chargements alternés, la définition des cyclages négligeables est théoriquement exclue.

Un exemple caractéristique de cette difficulté est fourni par les transitoires dus au fonctionnement de la centrale en réglage de la fréquence. Ce type de fonctionnement est d'une nécessité absolue pour l'exploitant puisqu'il conditionne la stabilité du fonctionnement et la maitrise des puissances échangées avec les réseaux voisins. A partir du moment où la puissance installée en centrale nucléaire d'un type donné est importante sur le réseau considéré, ce type de fonctionnement en réglage de la fréquence est obligatoire. Il se traduit pour la chaudière, par des variations aléatoires permanentes de la puissance et donc, des températures et pressions. On conçoit aisément la difficulté de spécifier pour le long terme ce type de sollicitations qui dépendent non seulement de la politique d'exploitation mais de la réponse de la chaudière elle-même à ces sollicitations. Par ailleurs, la spécification ne pourra être adéquate que, si préalablement, les études mécaniques et thermomécaniques ont permis d'évaluer la part de ces fluctuations qui sont négligeables.

2.2 - Comportement thermodynamique

Dans le même ordre d'idées, la liste des situations de conception doit spécifier les évolutions des paramètres principaux. Elle doit également spécifier les évolutions au niveau des points particuliers du CPP comme les lignes d'expansion et d'aspersion du pressuriseur et la ligne de charge par exemple. Ce travail étant à faire à l'origine du projet ; il conduit à disposer de modèles de simulation parfaitement validés. Ceci représente un deuxième type de difficultés lors de la mise en oeuvre d'un programme nouveau de centrales nucléaires.

2.3 - Politique d'exploitation

La politique d'exploitation prévisible du parc de centrale représente enfin une autre illustration du type de difficultés rencontrées. La période d'exploitation est extrêmement longue (couramment trente ans). Dans le cas de la réalisation d'un palier de centrales, entre la spécification initiale et la fin de l'exploitation de la dernière tranche du palier, il peut s'écouler de l'ordre du demi-siècle. Ceci illustre bien la précarité d'une prévision d'exploitation sur une telle période quand on sait que les évolutions de conjoncture, possibles dans une telle durée, peuvent modifier profondément les perspectives actuelles.

Les remarques ci-dessus mettent, en fait, en évidence que l'assurance de sûreté ne peut être apportée par la seule prévision d'exploitation et que la liste des situations qui en découle ne peut être valablement considérée comme garantissant à elle-seule les données d'entrée nécessaires à la justification du comportement. Les imprécisions évoquées ci-dessus, montrent la nécessité, d'une part, d'un recyclage de l'expérience d'exploitation venant corriger ces imprécisions et, d'autre part, d'une surveillance de l'exploitation réelle pour apprécier l'endommagement réel des structures.

3 - EXPERIENCE D'EXPLOITATION

L'expérience d'exploitation dont nous disposons est actuellement de 80 années centrale environ. Ceci représente certainement une base statistique intéressante et ce d'autant plus qu'elle porte sur une installation répétée à l'identique. Cette expérience est, par contre, limitée par le fait qu'elle ne peut mettre en évidence les effets éventuels dus à l'âge des centrales. Néanmoins, cela a pu nous apporter une connaissance suffisante pour mettre en évidence les éléments de ce retour de l'expérience qu'il convenait d'analyser pour garantir la sûreté de nos installations.

3.1 - Rappel de la pratique française

La règlementation impose à l'exploitant de montrer, en permanence que le fonctionnement réel de la centrale ne soumet pas l'enveloppe sous pression à des actions plus sévères que celles prises en compte à la conception. La méthode utilisée consiste à enregistrer systématiquement l'ensemble des transitoires survenant en exploitation, à les comparer un à un aux évolutions des transitoires de conception qui les enveloppent du point de vue de leurs effets thermiques et mécaniques et enfin à les décompter dans la liste de conception. La démonstration demandée est ainsi apportée par le fait que le "capital" de transitoires utilisé ne dépasse pas celui pris en compte à la conception. C'est une méthode certainement conservative mais lourde d'exploitation, ceci justifiant, d'ailleurs, les développements indiqués au chapitre 4.

3.2 - Retour de l'expérience

L'expérience d'exploitation quantifiée ainsi obtenue permet, de pallier les insuffisances ou les imprécisions introduites à l'origine du projet dans la définition prévisionnelle des sollicitations. Le retour de cette expérience s'exerce principalement dans les directions ci-après : révision de la conception, expérimentations complémentaires, modification du mode opératoire.

3.2.1 - Retour sur la conception

L'exemple caractéristique de cette conséquence est donnée par le comportement de la ligne de charge (liaison entre le circuit de contrôle volumétrique et chimique et le circuit primaire). Les transitoires supportés par cette ligne et son piquage peuvent être classés en deux grandes catégories :

- des transitoires d'amplitude limitée à 100 °C,
- des transitoires de forte amplitude pouvant atteindre 250 °C.

Pour les transitoires de faible amplitude, on constate que le nombre cumulé d'occurences est inférieur aux prévisions et reste du même ordre quelle que soit la tranche. Il faut cependant remarquer que ces situations sont induites principalement par les manoeuvres d'orifice du circuit de contrôle volumétrique et chimique. Ces manoeuvres sont nécessaires lors des variations de puissance du réacteur pour contrôler la concentration en bore. Or, les centrales n'ont jusqu'à présent effectué que très peu de variations de charge. A partir du moment où elles sont exploitées en suivi de charge (ce qui est progressivement le cas à partir de cette année) ces manoeuvres seront beaucoup plus fréquentes. L'expérience nous montre alors que les estimations couvriront correctement ces fonctionnements.

Par contre, les variations de grande amplitude dépassent sur les premières années de fonctionnement, les occurences prévues. D'un point de vue fonctionnel, ces transitoires sont produits par les mises hors service du circuit de décharge. Cette constatation nous a conduit à des actions très importantes pour résoudre un problème qui met en cause directement la disponibilité de la centrale. Ces actions nécessiteraient, à elles-seules, un long développement. Nous nous bornerons à citer les grands axes d'action qui, concuremment, nous permettent actuellement de penser que le problème est soluble.

a/ actions au niveau du dossier d'analyse du comportement :
- en utilisant des données fonctionnelles (évolutions des paramètres physiques) plus réalistes, ceci étant rendu possible par l'expérience d'exploitation elle-même qui permet de mieux apprécier le conservatisme pris à la conception.
- en reprenant les calculs avec des méthodes plus fines.

b/ actions au niveau de la conception et du fonctionnement du circuit et des régulations associées, dans le but de réduire en nombre et en sévérité les transitoires thermiques en cause. Ces actions ont porté essentiellement sur les régulations du niveau du pressuriseur qui commandent directement le comportement thermique de la ligne de charge, de même que sur les actions automatiques qui conduisent à l'isolement de la ligne de décharge. Sont actuellement en cours des actions plus spécifiques portant sur la conception du circuit de charge lui-même (remplacement des vannes tout-ou-rien commandant les orifices de détente par des vannes réglantes, contournement partiel de l'échangeur régénérateur).

3.2.2 - Expérimentations complémentaires

L'expérience d'exploitation met en évidence la nécessité d'une connaissance plus fine du fonctionnement thermodynamique dans certains points particuliers du circuit primaire. Ceci a conduit à procéder à des expérimentations complémentaires sur des centrales en fonctionnement. Ces essais consistaient à instrumenter plus complètement les parties en cause (essentiellement thermomètres en peau externe) pour mesurer, en exploitation, les évolutions thermodynamiques et permettre ainsi la mise au point des modèles. A titre d'exemples caractéristiques, on peut citer la mise en évidence de stratifications dans la ligne d'expansion du pressuriseur et de fluctuations dans la ligne de charge.

3.3 - Retour sur les modes d'exploitation

Le dernier domaine de retour d'expérience est le mode opératoire lui-même. L'exploitation de la centrale sur le réseau comporte, a priori, une certaine élasticité. De manière complémentaire, il est donc possible d'agir sur l'exploitation elle-même pour diminuer la sévérité des sollicitations. Deux exemples peuvent illustrer ce mode d'actions, l'un relatif à des grands mouvements, l'autre à des fluctuations :

a/ Les centrales comportant des défauts sous-revêtement ont été limitées dans leurs variations de charge (nombre et amplitude), les études mécaniques ayant montré que ces transitoires avaient une contribution relativement importante à la propagation éventuelle de ces défauts dans le revêtement.

b/ Dans un tout autre domaine, le fonctionnement en réglage de la fréquence peut se faire en asservissant à la fréquence soit la puissance de la turbine soit la position d'ouverture de ses soupapes. Le second mode de réglage conduit à une sollicitation moindre du réacteur tout en assurant une marge de stabilité suffisante.

4 - ETUDES DE DEVELOPPEMENT

La comptabilisation en fonctionnement des transitoires nous permet de garantir une exploitation de la centrale à l'intérieur des limites de dimensionnement. C'est une méthode conservative mais onéreuse. A titre d'exemple, elle nécessite la disponibilité à temps plein d'un technicien pour deux tranches. Par ailleurs, elle nous semble présenter un degré de conservatisme important. Ces deux éléments justifient des développements pour mettre au point une méthodologie plus performante permettant une appréciation en temps réel des contraintes et des dommages. Autrement dit, substituer à une méthode surveillant les causes, une méthode comptabilisant les effets.

4.1 - Principe de la méthode

Pour évaluer le dommage de fatigue, il est nécessaire de calculer les variations de contraintes mécaniques et thermiques. Celles-ci sont proportionnelles à la variation de pression et peuvent donc être calculées facilement à partir des résultats d'un seul chargement (fonction de transfert établie à partir de la réponse à un transitoire échelon). L'évaluation de la contrainte due aux efforts extérieurs représente une difficulté qui peut être résolue, par exemple, par une prise en compte forfaitaire.

4.2 - Conditions de validité

De manière générale, la validité de la méthode est liée à la linéarité du système (équations aux dérivées partielles linéaires). Pour maintenir cette linéarité un certain nombre d'hypothèses sont nécessaires :

- caractéristiques thermiques et mécaniques constantes durant le transitoire,
- conditions aux limites linéaires (coefficient d'échange constant, conditions sur les déplacements et les chargements linéaires).

4.3 - Détermination de la fonction de transfert

Celle-ci nécessite le calcul de la réponse à un échelon de température. Cet unique calcul effectué par la méthode des éléments finis permet de calculer les fonctions de transfert dans les zônes, les plus sollicitées. Ces fonctions établies à partir des transformées de Laplace permettent alors de calculer, pour chaque composante du tenseur des contraintes, la réponse en contrainte pour un transitoire réel par déconvolution du produit : $S = H \times E$

H = fonction de transfert

E = transformée de Laplace de la variation de température en entrée

S = transformée de Laplace de la variation de contrainte en sortie.

4.4 - Application

L'application de cette méthode a été faite pour deux zones présentant des facteurs d'usage élevés (tubulure d'expansion du pressuriseur et piquage de la ligne de charge). La figure 1 montre la comparaison des résultats à ceux d'un calcul aux éléments finis. On peut également utiliser cette méthode pour calculer l'évolution des contraintes pour plusieurs points du piquage au cours d'un transitoire réel d'exploitation, à partir de l'évolution d'une température mesurée (fig. 2). L'intérêt de cette méthode est donc la possibilité de calculer en temps réel l'évolution des contraintes pour des points judicieusement choisis des zones les plus sollicitées. Dans une première étape, on conserverait sur mémoire de masse les extrêma relatifs des évolutions de contraintes. Cette banque de données permettrait, ensuite, de calculer, en temps différé, les facteurs d'usage en utilisant les algorithmes de fatigue usuels, on remplacerait ainsi la comptabilisation des transitoires (cause) par le calcul du dommage (effet). Nous pouvons noter que cette évaluation du dommage a fait l'objet d'une réalisation dans un domaine différent mais comparable du point de vue mécanique (dommage de fatigue dans une turbine de centrale thermique).

4.5 - Avantages et inconvénients

Les avantages principaux d'une telle méthode sont :

- un gain de temps permettant une application temps réel,
- un coût marginal très faible par transitoire,
- une application décentralisée.

Les inconvénients sont dus essentiellement à un investissement important à réaliser au départ pour établir une banque de données.

5 - CONCLUSION

Il nous apparait, en conclusion, que deux idées principales pourraient être dégagées.

La première est que la garantie du bon comportement de l'enveloppe du circuit primaire est assurée, en ce qui concerne l'interface fonctionnel, à la fois par la précision de la prévision d'exploitation et par la surveillance des transitoires réellement subis, cette surveillance devant, bien sûr, être recyclée sur la conception.

La deuxième idée que l'on pourrait mettre en évidence est que l'information apportée par cette surveillance exhaustive des transitoires pourrait être utilisée pour orienter l'inspection en service en modulant soit la périodicité soit la nature même des contrôles en fonction du résultat de la comptabilisation des situations qui donne une image précise de l'état d'endommagement des structures.

COMPARAISON FONCTION DE TRANSFERT-ELEMENTS FINIS:

PIQUAGE LIGNE DE CHARGE

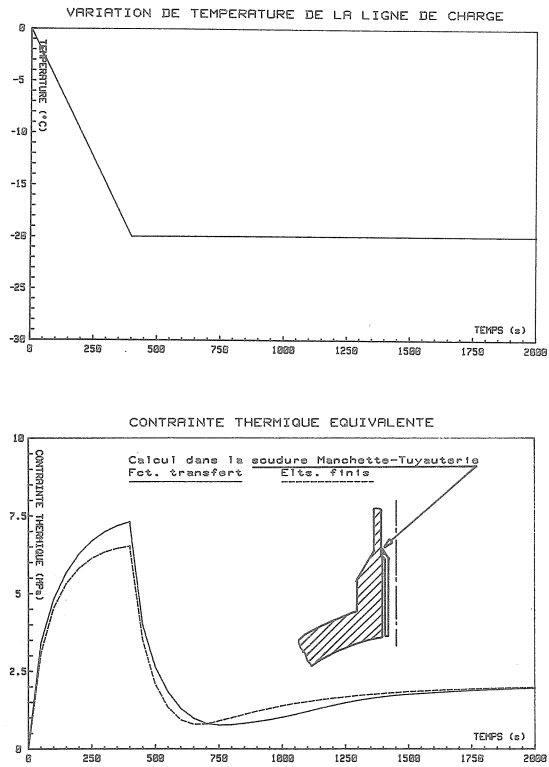
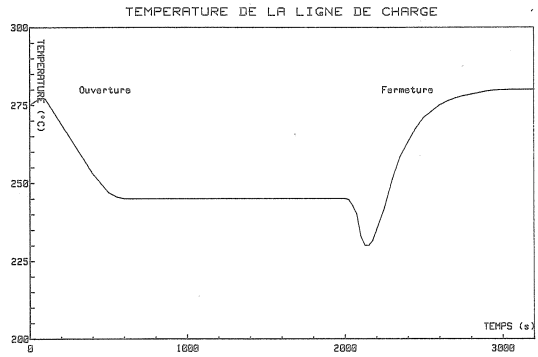


Figure 1.

OUVERTURE ET FERMETURE D'UN ORIFICE SUR LA DECHARGE:

PIQUAGE LIGNE DE CHARGE



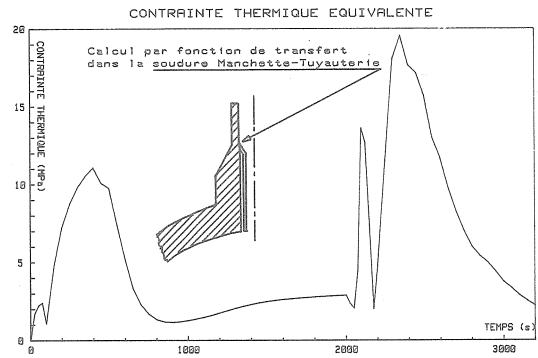


Figure 2.