

## Résumé de la thèse de Khaled Hadj-Sassi

### Une stratégie d'estimation conjointe des paramètres et de l'état de structures à comportements non linéaires. Assimilation de données et erreur en loi de comportement

Un composant essentiel du parc de centrales nucléaires à eau pressurisée est l'enceinte en béton précontraint refermant le circuit primaire principal. Les enjeux de sûreté associés à ce composant amènent l'exploitant à mettre en oeuvre des instrumentations de suivi en service des caractéristiques géométriques de ces enceintes. Parallèlement de nombreuses études sont menées sur la simulation numérique de leur comportement à long terme (estimation des effets du fluage, risque de fissuration diffuse, analyse de l'évolution des propriétés d'étanchéité, etc...). Les progrès réalisés depuis vingt ans dans le domaine de l'assimilation de données en météorologie ou en océanographie, ainsi que l'augmentation de la puissance des calculateurs, permettent d'envisager d'appliquer ces techniques au problème très fortement non linéaire d'estimation, et de correction des paramètres de modèles de béton à partir des données d'auscultation. L'objectif de ce travail est double, il s'agit en effet de :

- Fournir grâce aux techniques d'estimation, une suite temporelle d'états mécaniques tridimensionnels d'une enceinte, états déterminés au mieux à partir des données relevées et des données disponibles sur les sollicitations mécaniques et climatiques, et prenant en compte les incertitudes de modèles et de données.
- Déterminer un modèle mécanique général recalé d'enceinte permettant de réaliser des prévisions sur l'état mécanique futur à partir de divers scénarios de chargement (épreuves hydrauliques par exemple) ou de sollicitations climatiques (longues périodes de sécheresse), voire même d'inclure des scénarios de réparation ou de modification de la structure (peau interne par exemple).

Pour réaliser l'estimation conjointe de paramètres matériau, intervenant de façon non linéaire dans la réponse de la structure, et de l'état de la structure, une stratégie à deux niveaux a été élaborée. La première fait intervenir une approche variationnelle déterministe d'identification des paramètres basée sur une nouvelle erreur en énergie baptisée Erreur en Loi de Comportement Incrémentale. Tandis que la seconde est stochastique et est attachée aux techniques d'assimilation de données 4D-Var.

La fonctionnelle d'Erreur en Loi de Comportement Incrémental a été développée pour l'identification de lois réversibles-dissipatives entrant dans la catégorie des matériaux standards. Elle regroupe toutes les informations contenues dans l'un ou l'autre des parties des équations constitutives pour contrôler explicitement l'ensemble des phénomènes dans lesquelles les paramètres matériaux interviennent. L'approche utilisée, sous sa forme variationnelle, consiste à exploiter l'information surabondante en surface (déplacement et tractions surfaciques) en introduisant deux couples de champs (déplacement, variables internes) chacun d'entre-eux résultant d'un problème direct d'évolution bien posé utilisant l'une ou l'autre des données surabondantes, et l'ensemble des données par ailleurs connues du problème. Les paramètres à identifier minimisent la nouvelle fonctionnelle en énergie construite à partir d'un écart entre ces deux champs solutions. Cet écart porte sur les incréments des champs de déformation et de variables internes et leurs quantités duales associées, en exploitant les propriétés variationnelles du problème d'évolution pour les matériaux standards en formulation implicite pure. Sa construction est basée sur l'inégalité de Fenchel et exploite les propriétés de convexité des potentiels d'énergie libre et de dissipation intervenant dans l'écriture des lois standards généralisées.

Pour l'estimation conjointe de l'état et des paramètres matériaux, on s'est appuyé sur les techniques d'assimilation de données 4D-Var basées sur la théorie de contrôle optimal. Un nouveau terme permettant d'inclure les paramètres matériaux a été ajouté à la fonctionnelle de maximum de vraisemblance usuelle utilisée pour l'estimation de l'état à partir de mesures bruitées. Ce nouveau terme fait intervenir une ébauche sur les paramètres et une matrice de covariance associée qui définit la norme sur ces paramètres. Ces deux éléments essentiels à la phase d'assimilation de données sont cependant impossible à déterminer sur une base statistique. La première a donc été choisie en retenant les paramètres (optimaux) qui minimisent la fonctionnelle énergétique et la matrice de covariance a été construite à partir du Hessien de cette fonctionnelle d'erreur globale. Les propriétés de bon conditionnement et de convexité locale de cette fonctionnelle ont motivés ce choix.

Cette stratégie hiérarchique a été mise en oeuvre dans le cas de matériaux visco-élastiques et sur des structures d'enceinte axisymétriques modélisées en éléments finis. L'algorithme d'optimisation retenu nécessite de déterminer les gradients de la fonctionnelle. Pour cela les techniques d'état adjoint ont été utilisées et ont donné lieu à une formulation générale de problèmes adjoints pour les matériaux standards généralisés dont les potentiels sont réguliers. Le cas de potentiels non deux fois différentiables (qui permettent de modéliser par exemple ici des lois de fluage avec seuils) a également été abordé et implémenté.