



Le projet MIRADOR : fiabilité et décision pour la conception et le suivi des ouvrages de Génie Civil

Thierry Yalamas, J. Duchereau

► To cite this version:

Thierry Yalamas, J. Duchereau. Le projet MIRADOR : fiabilité et décision pour la conception et le suivi des ouvrages de Génie Civil. 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. pp.6. <hal-00566428>

HAL Id: hal-00566428

<https://minesparis-psl.hal.science/hal-00566428v1>

Submitted on 16 Feb 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Le projet MIRADOR : fiabilité et décision pour la conception et le suivi des ouvrages de Génie Civil

T. YALAMAS^a, J. DUCHEREAU^b

a. PHIMECA Engineering S.A., 34 rue de Sarliève, 63800 Couron d'Auvergne

b. Ecole des Mines de Paris (ENSM), 60 Bd Saint Michel, 75272 Paris Cedex 06

Résumé :

A travers quelques illustrations sur des ouvrages réels, les auteurs cherchent ici à démontrer l'intérêt des approches par réseaux de neurones d'une part et par actualisation bayésienne d'autre part pour prendre en compte les données d'inspection et de suivi des ouvrages de Génie Civil..

Abstract :

Using real application cases, authors aim here to demonstrate the interest of neuronal network models and bayesian updating methods to take into account data from inspections.

Mots clefs : inspections, mesure, prédiction, actualisation, réseaux de neurones.

1 Le projet MIRADOR

1.1 Objectifs

Le projet MIRADOR consiste à élaborer la méthodologie et les outils nécessaires pour être en mesure d'évaluer la sécurité d'un ouvrage de génie civil non seulement lors de sa conception et sa construction, mais également tout au long de sa vie. La démarche proposée s'appuie notamment sur l'interprétation probabiliste des résultats de plans d'instrumentation en cours de vie des ouvrages.

Au niveau de la conception de l'ouvrage, les approches probabilistes permettent :

- d'aider à l'interprétation des résultats des essais sur les matériaux (dont les essais sur les matériaux naturels comme les sols et les roches) ;
- d'analyser la sensibilité de la résistance de l'ouvrage aux paramètres d'entrée (chargement, matériaux, mode de réalisation de l'ouvrage, mais aussi aux paramètres de calculs non linéaires mal maîtrisés : fluage, fissuration du béton, etc.) ;
- de déboucher sur une conception robuste des structures, (pouvant s'adapter à des variations de ces paramètres sans se rapprocher de la ruine) ;
- d'étudier des scénarii de ruine possible (progressive ou brutale) ;
- de définir les zones critiques de l'ouvrage nécessitant une attention particulière lors de la construction, ou la mise en œuvre d'un plan d'instrumentation et de surveillance.

En cours d'exploitation de l'ouvrage, cette démarche probabiliste permet d'adapter ou de modifier la modélisation initiale en fonction des mesures d'auscultation effectuées périodiquement. Cette modification peut porter :

- sur le modèle représentant la physique du phénomène : c'est le cas des approches par réseaux neuronaux présentées dans la deuxième partie de cet article ;
- sur le modèle probabiliste de données utilisé *a priori* : c'est le cas des approches de mise à jour de modèles présentées dans la troisième partie de cet article.

Les écarts constatés proviennent soit d'écarts sur les données d'entrée, soit de la survenance d'un phénomène non prévu. Un écart non explicable dénonce un comportement anormal potentiellement dangereux,

qui permet de déclencher à temps les actions nécessaires de sécurisation. Dans les deux cas, le modèle numérique est corrigé ou complété en conséquence, jusqu'à fournir une image représentative de la réalité et autoriser de nouvelles prévisions de comportement à long terme. La démarche organise donc de façon quasi permanente une interactivité complète entre l'ouvrage et son modèle.

1.2 Organisation du projet

Le projet ANR MIRADOR (AAP PGCU 2006) est soutenu par l'ANR et regroupe :

- des sociétés d'ingénierie : IOSIS, Coyne et Bellier, EGIS, Phimeca ;
- deux industriels : EDF et Bouygues Construction
- des laboratoires de recherche : le Laboratoire de Mécanique des Structures Industrielles Durables (Lamsid), le LaMI (Institut Français de Mécanique Avancée), le LCPC, le Centre Commun de Géosciences Armines/ENSMP.

Le projet a débuté en juillet 2007 pour une durée de 3 ans et s'articule autour de 3 axes : l'utilisation des approches probabilistes en phase de conception d'un ouvrage, l'interprétation des essais CND à l'aide des réseaux de neurones en cours de vie d'un ouvrage et la valorisation du suivi d'ouvrage par l'actualisation bayésienne de modèle. Pour chacun de ces axes, un travail méthodologique a été effectué et des applications sur des ouvrages et données réelles ont été réalisés ou sont prévues. Le dernier axe ne faisant que démarrer, les résultats présentés ici ont été obtenus en dehors de ce projet.

2 Suivi d'un ouvrage à l'aide de réseau de neurones

L'instrumentation et le suivi d'ouvrages de génie civil est principalement un enjeu de sécurité, mais également économique (cadre général de la FMDS - fiabilité, maintenance, disponibilité et sécurité). Ce travail de suivi nécessite une analyse systématique particulièrement roborative généralement complétée par une expertise pour expliciter des données d'acquisition douteuses. Une telle analyse est généralement précédée de la construction d'un « modèle » établissant une relation entre une grandeur caractéristique du comportement de l'ouvrage (typiquement une déformation, un déplacement) et des grandeurs descriptives de l'ambiance et donc des contraintes (variables explicatives). Ce type de modèle, obtenu par exemple par régression statistique, est assez rigide et n'apporte que des informations très globales, peu pratiques pour l'analyse.

Une approche alternative par réseau de neurones [1], moins déterministe (domaine de la logique floue), est ici proposée. Grâce aux capacités d'apprentissage et de généralisation du réseau de neurones, le modèle de suivi obtenu présente plusieurs avantages. Il est notamment plus souple et plus lisible : sa construction même contribue à l'analyse. C'est en particulier cette capacité d'apprentissage que l'on a souhaité exploiter pour détecter les anomalies les plus fréquentes (telles que les dysfonctionnements de capteurs ou l'absence de variables explicatives associées au phénomène suivi) et faciliter ainsi l'analyse.

Trois types d'ouvrages ont été traités avec succès : tunnel profond, barrage et enceinte de confinement. L'application présentée ici est celle du barrage.

2.1 Principes d'un réseau de neurones par rétropropagation

Il existe différentes sortes de Réseaux de Neurones dont les applications les plus connues sont la reconnaissance de forme, le contrôle de commande et les régressions [2]. Fondée sur une analogie avec la dynamique du cerveau (apprentissage et mémoire), ces méthodes consistent à présenter des associations de type [entrées, sorties] (pas toujours identifiées) pour les faire apprendre (stabilité du modèle). Les réseaux diffèrent par leur structure (connexions ou synapses, couches) et par leurs méthodes d'apprentissage.

Pour l'aide à l'auscultation des ouvrages, on a utilisé un réseau simple et une méthode très éprouvée : la **rétropropagation du gradient de l'erreur** (engl.: BPP). Les poids des connexions qui contribuent à engendrer une erreur importante seront modifiés de manière plus significative que les poids ayant engendré une erreur marginale.

Les paramètres guidant une bonne pratique sont notamment : les paramètres d'apprentissage, une normalisation judicieuse des [entrées, sorties], un apprentissage aléatoire des associations (pour favoriser la généralisation), le choix des critères de convergence du réseau (tolérances d'erreurs).

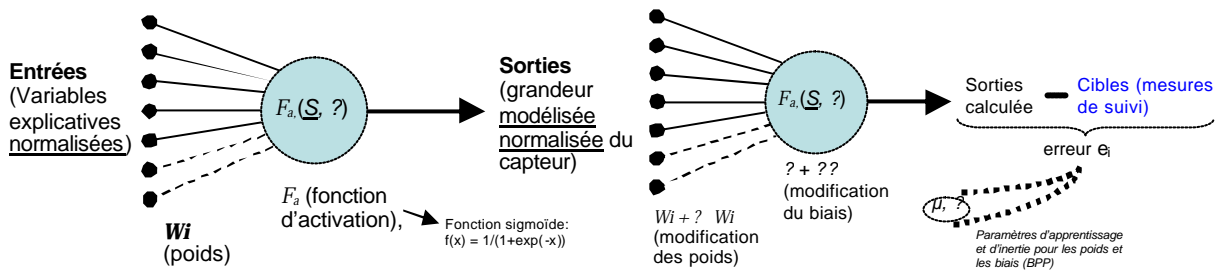


FIG. 1 – Schéma de principe d'un réseau simple construit par rétropropagation.

Notons que les associations peuvent contenir des anomalies et que celles-ci peuvent être apprises au détriment du critère de convergence. C'est cet effet *a priori* indésirable que l'on va exploiter pour signaler des anomalies.

2.2 Ouvrage d'application : barrage (Katse, données Coyne & Bellier)

On s'intéresse au **suivi des mesures de déplacement** d'un barrage voûte équipé de pendules en différents points. Il est acquis que ces déplacements dépendent essentiellement (mais de manière non exhaustive) :

- du **niveau de retenue** du barrage et de sa géométrie ; Ce que l'on traduit par un polynôme de z , creux relatif, ($z = 0$ au niveau de retenue maximum) ;
- de la **saison** censée reproduire les variations saisonnières (4 fonctions de type sinusoïde) ;
- de la **dérive temporelle** (3 formes dont en pratique seule la forme exponentielle est utilisée).
- des **températures min et max** sur les 48h précédents une mesure ;

On présente ici le suivi simultané de 5 pendules situés à une même altitude dans la largeur de l'ouvrage. Pour ce calcul simultané de plusieurs sorties, 2 critères de convergence (tolérances) ont été prévus afin de mieux tracer les anomalies : l'erreur globale et l'erreur maximale d'un pendule).

2.3 Méthodologie pour la détection d'anomalies

On peut concevoir 2 sortes d'apprentissage pour le réseau: un «**continu**» (accumulation des mesures au cours du temps) ou «**glissé**» (période de 2 ou 3 années progressivement décalée). L'analyse est actualisée régulièrement (chaque mois ou chaque trimestre). On réalise des apprentissages successifs de 1998 jusqu'à fin 2004 : les tolérances optimales permettant la convergence et la stabilité du réseau évoluent assez peu (erreur d'environ 2,6% pour l'erreur globale et 3,2% pour un capteur individuel). Il n'y a pas de variation significative de ces 2 critères : le modèle obtenu est satisfaisant et présente une certaine capacité de prévision (particulièrement utile lorsque l'on a correctement calé les paramètres associés à la dérive temporelle. Il faut bien entendu disposer de projections pour les variables explicatives). Aucun pendule ne contribue anormalement à l'erreur globale. La visualisation apporte la confirmation de ce résultat.

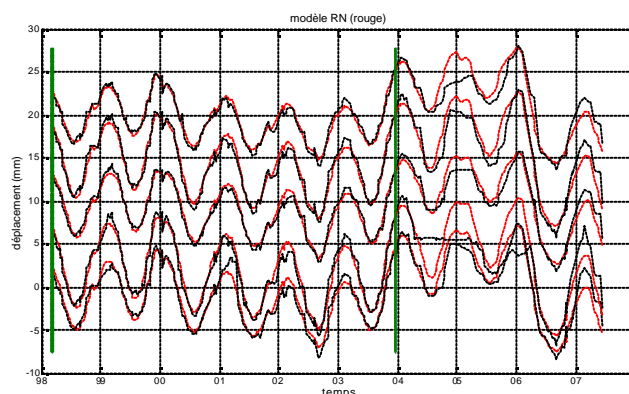
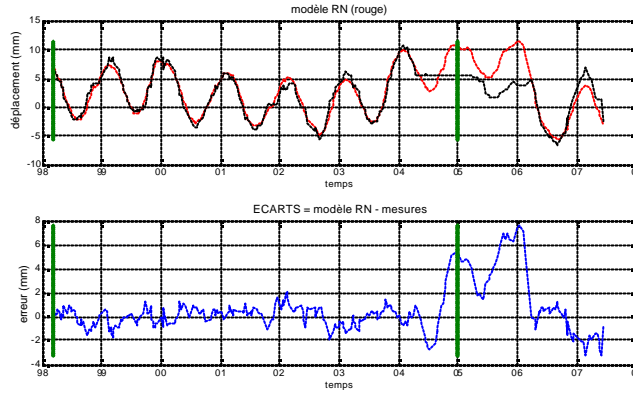


FIG. 2 – Comparaison observations - prédictions.

Par contre, à partir de 2005, l'apprentissage ne permet pas de converger avec d'aussi bonnes tolérances : (3,5% et 5%, ce qui est important en grandeurs réelles). L'erreur relative d'un des pendules (le 2^e en partant du bas) est nettement plus importante et est confirmé par l'observation graphique de ce pendule.



La méthode de détection d'anomalies par réseau de neurone se concentre sur 3 critères :

- a) évolution des tolérances (globale et relative),
- b) contribution relative à l'erreur (la plus importante contribution est à surveiller),
- c) visualisation graphique des erreurs.

Notons que l'apprentissage « **continu** » (cumulé) peut s'avérer moins efficace qu'un apprentissage « **glissé** » lorsque une anomalie est peu significative et que l'on a accumulé une longue plage de mesures correctes (l'erreur relative est alors plus faible et l'erreur globale moins parasitée). Cependant l'apprentissage « **continu** » est plus intéressant en termes de suivi et de prévision de la dérive.

Un certain nombre de paramètres peuvent être librement ajustés à différents stades de l'application du réseau de neurones pour optimiser l'efficacité du modèle (un soin particulier, mais non complexe, doit être apporté aux normalisations, à la détermination des variables explicatives et aux critères de convergence).

3 Actualisation bayésienne

Une méthode d'actualisation bayésienne peut être utilisée pour tenir compte d'informations disponibles sur le comportement de la structure dans l'estimation de sa probabilité de défaillance. Nous présentons ici cette technique au travers d'un exemple d'application au comportement différé d'enceintes de confinement. En effet, les applications de cette méthode sur les ouvrages étudiés dans le cadre du projet MIRADOR sont prévus au cours de la troisième année qui n'a pas encore démarré. Ces résultats ont déjà été présentés dans d'autres communautés [3].

3.1 Actualisation de la probabilité de défaillance

Nous considérerons dans cet exemple illustratif que le critère de défaillance est une précontrainte résiduelle limite admissible dans la direction tangentielle \mathbf{s}_b^{qq} en zone courante de la paroi. La probabilité de défaillance s'écrit alors sous la forme :

$$(1) \quad P_{fc}(t) = \text{Prob}[M(t) \leq 0]$$

Avec : $M(t) = \mathbf{e}_b - \mathbf{e}_{el}$

Dans cette expression \mathbf{e}_b et \mathbf{e}_l sont respectivement la déformation différée tangentielle du béton et la déformation élastique instantanée du béton sous l'effet de la précontrainte.

Notons $[(\mathbf{e}_b)_{m,i}]_{1 \leq i \leq n}$, n valeurs de la déformation différée tangentielle du béton aux instants $t = t_i, 1 \leq i \leq n$.

Ces n observations peuvent être exprimées par les égalités suivantes :

$$(2) \quad H_i = (\mathbf{e}_b)_{m,i} - \mathbf{e}_b(t = t_i) = 0$$

La probabilité de défaillance actualisée est alors donnée par la probabilité conditionnelle :

$$(3) \quad P_{factu}(t) = \text{Prob}[M(t) \leq 0 | H_1 = 0 \cap \dots \cap H_n = 0]$$

Madsen (1985) [4] fournit une expression de l'indice de fiabilité du premier ordre actualisé \mathbf{b}_{actu} en fonction des mesures $(\mathbf{e}_b)_{m,i}$:

$$(4) \quad \mathbf{b}_{actu}(t) = \frac{\mathbf{b}(t) - \{\mathbf{r}M(t)H_i\}^t [\mathbf{r}H_iH_j]^{-1} \{\mathbf{b}_i\}}{\sqrt{1 - \{\mathbf{r}M(t)H_i\}^t [\mathbf{r}H_iH_j]^{-1} \{\mathbf{r}M(t)H_i\}}}$$

Avec, $\{\mathbf{b}_i\}$ le vecteur des indices de fiabilité correspondant aux événements ($H_i \leq 0$), $[\mathbf{r}H_iH_j]$ est la matrice de corrélations entre les marges H_i et H_j et $\{\mathbf{r}M(t)H_i\}$ est le vecteur de corrélation entre les marges H_i et $M(t)$.

La probabilité de défaillance actualisée correspondante est ensuite obtenue par l'expression suivante, dans laquelle Φ est la fonction de répartition gaussienne centrée réduite :

$$(5) \quad P_{factu}(t) = \Phi(-\mathbf{b}_{actu}(t))$$

De façon similaire à la démarche proposée pour l'actualisation de la probabilité de défaillance, les mesures périodiques peuvent être utilisées pour actualiser les bornes d'un intervalle de confiance (par exemple les valeurs à 2,5% et 97,5%).

Les figures 3a et 3b ci-dessous illustrent la pertinence de cette méthode de recalage. En effet, non seulement la prédiction en tendance centrale (moyenne) est meilleure mais l'intervalle de confiance est très significativement resserré. On constate de plus qu'un nombre de mesures relativement faible apporte une amélioration notable des prédictions.

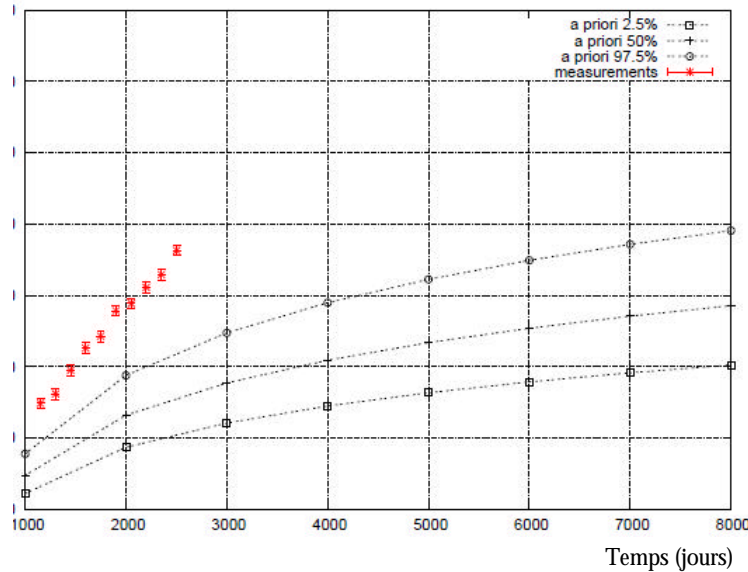
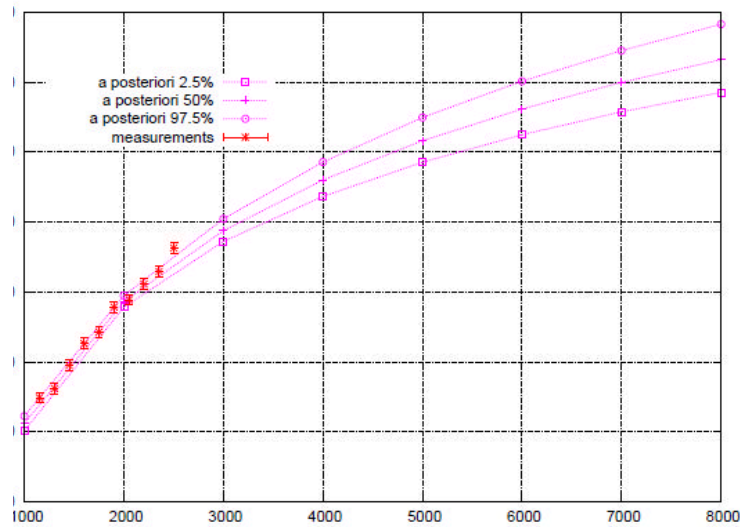


Figure 3a : Prédictions *a priori* de l'évolution de la déformation orthoradiale (Sudret et al., 2006)



Figures 3b : Prédictions *a posteriori* de l'évolution de la déformation orthoradiale (Sudret et al., 2006)

4 Conclusion

Sans prétendre faire un recensement exhaustif des possibilités d'utilisation des données de suivi d'ouvrage ou d'inspections, cette publication montre deux voies d'utilisation différentes. L'illustration sur des exemples réels démontre le caractère applicable de ces méthodes sur des ouvrages réels et ouvrent la voie à une généralisation possible de leur utilisation afin de mieux valoriser les essais et mesures réalisées sur les ouvrages au cours de leur vie.

References

- [1] Simon Haykin, « Neural Networks : A Comprehensive Foundation (2nd Edition) », [1998] Prentice Hall
- [2] Léon Personnaz et Isabelle Rivals, *Réseaux de neurones formels pour la modélisation, la commande et la classification*, CNRS Editions, 2003.
- [3] B. Sudret, M. Berveiller, F. Perrin et M. Pendola, *Bayesian Updating of the long-term creep deformations in concrete containment vessels*, Proc. 3rd Int. ASRANET Colloquium, Glasgow, Juillet 2006.
- [4] Madsen H.O., *Model updating in First Order Reliability Theory with application to fatigue crack growth*, 2nd International Workshop on Stochastics Methods in Structural Mechanics, 1985.