

Zeitschrift: IABSE reports = Rapports AIPC = IVBH Berichte
Band: 73/1/73/2 (1995)

Artikel: Expert system application to buildings maintenance
Autor: Diab, Youssef Georges
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-55356>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 19.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Expert System Application to Buildings Maintenance

Application de systèmes experts à la maintenance des bâtiments

Anwendung eines Expertensystems auf den Gebäudeunterhalt

Youssef Georges DIAB

Maître de Conférences

Université de Savoie

Le Bourget du Lac, France

G. Diab, né en 1964, obtient son diplôme d'ingénieur civil à l'ENTPE, Lyon. Pendant 4 ans il est directeur de la recherche et du développement dans un bureau d'études. Depuis 2 ans il est Maître de Conférences. Il est titulaire d'un doctorat en génie civil.

SUMMARY

Repairing damaged structures has become more expensive in the last years. In many cases, the engineers' experience was not sufficient to decide on the way to repair, and if repair is necessary. There are no exact scientific models for concrete structures repair. The knowledge is dispersed in different guidelines, regulations, books and procedures. The purpose of this work is to develop an expert system for diagnosing buildings pathologies caused by condensation and other physical phenomena and pathologies caused by mechanical defects.

RÉSUMÉ

La réparation des bâtiments est devenue chère, et l'expérience des ingénieurs n'est pas toujours suffisante pour choisir les méthodes de renforcement adéquates aux problèmes rencontrés. Il n'existe pas à l'heure actuelle un modèle scientifique fiable pour le choix de la méthode de réhabilitation car les informations sont dispersées. Il est donc nécessaire de mettre au point une approche pragmatique et scientifique. L'objectif de ce travail est de développer un système expert de diagnostic des bâtiments et de mettre au point une approche complémentaire de réhabilitation.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Sanierung von Gebäuden ist eine teure Angelegenheit, und nicht immer reicht die Erfahrung der Ingenieure aus, um zu den angetroffenen Problemen die angemessenen Reparaturmethoden zu wählen. Gegenwärtig existiert kein gültiges wissenschaftliches Modell für die Methodenwahl, denn die Informationen sind in verschiedenen Richtlinien, Vorschriften, Fachbüchern und Verfahrensanweisungen verstreut. Sie müssen in einem pragmatisch-wissenschaftlichen Ansatz aufbereitet werden. Gegenstand der Arbeit ist die Entwicklung eines Expertensystems zur Diagnose von Gebäudeschäden, verursacht durch Wasserdampfkondensation und andere physikalische Phänomene, und zum Einsatz entsprechender Sanierungsmassnahmen.



1. Introduction :

Les bâtiments vieillissent et les propriétés mécaniques de leurs matériaux constitutifs se dégradent, ce qui diminue leurs coefficients de sécurité prévus initialement par les codes de calcul et les réglementations. Ce problème est à l'heure actuelle majeur pour les bâtiments en maçonnerie de briques ou de pierres mais également pour les bâtiments en béton armé ayant un âge supérieur à une trentaine d'années.

Face aux désordres structurels de bâtiments et à la panoplie de solutions de réhabilitation, il est nécessaire d'établir une adéquation entre les uns et les autres afin de prendre les bonnes décisions de réparation et de faire progresser, à l'aide des résultats des calculs et du diagnostic, nos connaissances sur les phénomènes d'endommagement des différentes composantes, dans le but d'améliorer les projets futurs. Ainsi, pour l'analyse de ce problème, cet article s'articulera autour des thèmes majeurs suivants :

- 1) Nature et origine structurelle de désordres observés sur les bâtiments en béton,
- 2) Evaluation des coefficients de sécurité résiduels.
- 3) Inventaire des méthodes de réhabilitation actuelles.
- 4) Etablissement de règles liant les désordres observés au choix de la méthode de réhabilitation.

2. Nature et origine structurelle des désordres :

L'expérience a toujours été à la base des connaissances des constructeurs. L'examen approfondi des ouvrages existants, l'étude des échecs et des désordres sont donc indispensables pour progresser sans imprudence. Le relevé de dégradations suivi d'une analyse structurelle du bâtiment contribuent à prendre des décisions à caractère très immédiat et à apporter des éclaircissements sur l'origine des dégradations constatées et sur leur évolution future.

A titre d'exemple, contre les fissures de flexion et d'effort tranchant, reconnaissables par leurs positions par rapport à la fibre neutre de la poutre, les dispositions à prendre sont fonction de leurs ouvertures "e" et de leurs longueurs obtenues par un relevé (Mougin, 1986). Ainsi :

+ pour les fissures de flexion, si $e > 0.5$ mm un traitement approprié de la fissure est nécessaire avec suppression de la cause.

+ pour les fissures d'efforts tranchants, si $e < 0.3$ à 0.4 mm, aucune réparation n'est nécessaire.

2.1 Causes liées à la conception et au calcul :

1- Inexactitude ou insuffisance des hypothèses de calcul

- * sur les actions et combinaisons d'actions
- * sur les déformations imposées
- * sur les valeurs des caractères mécaniques des matériaux

2. Inadéquation des modèles de calculs

- * pour la détermination des sollicitations et de leurs combinaisons
- * pour l'étude de la stabilité générale ou locale (équilibre statique, contreventement, stabilité de forme...)
- * pour la prise en compte des phénomènes différés
- * pour la prise en compte des phénomènes thermiques (en particulier gradients)

3. Erreurs de conception, erreurs ou fautes de calcul

- * insuffisance des calculs de dimensionnement et insuffisance de la vérification
- * absence de dispositions prenant en compte les variations dimensionnelles
- * dispositions constructives inadaptées à la transmission des efforts (zones d'efforts concentrées, poussées au vide, zone de reprise de bétonnage)
- * acceptation de déformations excessives
- * non respect des de l'art.

2.2 causes liées à l'exécution :

1. Insuffisance des documents d'exécution

- * insuffisance de leur vérification par le maître d'oeuvre
- * erreurs de côtes et absences d'indications de tolérances
- * absence de dessins de détails dont dépend la faisabilité
- * préparation insuffisante du phasage et des réglages d'exécution

2. Déficiences du contrôle de qualité

- * qualité insuffisante ou défectueuse des matériaux, produits et composants, y compris dans les étalements et ouvrages provisoires
- * insuffisance ou absence de contrôle à la mise en oeuvre des aciers et des bétons
- * non - respect des prescriptions technologiques (adjuvants, gel, eaux, décoffrages...)

2.3 Causes liées aux conditions d'exploitation :

- * relâchement de la surveillance
- * exécution différée de travaux d'entretien
- * effets de conditions atmosphériques (eau, gel ,...)
- * accroissement de l'intensité et de l'agressivité du trafic (en particulier poids lourds)
- * fréquence de passage de convois exceptionnels

2.4 Causes liées au vieillissement de l'ouvrage :

- * séquelles d'incidents de construction
- * vieillissement des matériaux
- * vieillissement de la structure : effet de fatigue

Ces deux derniers phénomènes constituent les principales causes des désordres

2.5 Causes liées à des actions abusives :

- * séquelles dues au passage d'engins lourds de chantier pendant les opérations de terrassement
- * dépassement des charges autorisées (poids lourds en surcharge)

2.6 Occurrence d'actions naturelles ou extérieures :

- * Mouvements d'appuis (affouillements des fondations, tassements différentiels, glissements de terrains)
- * Ambiances agressives (embruns, eaux, fumées ,...)
- * Incendie
- * Séisme

3. Les coefficients de sécurité :

Le calcul des coefficients de sécurité permet de lever toute ambiguïté entre les fissurations "normales" et celles "hors règlements" : Cette étude des coefficients de sécurité résiduels vise à favoriser la réponse aux questions qui se posent aux maîtres d'ouvrages vis à vis des problèmes de fissuration et, au delà, vise à savoir s'il faut entamer des travaux de réparation ou pas.

La fissuration étant du domaine non élastique, l'utilisation des codes de calcul élasto-plastique est nécessaire lorsqu'une étude approfondie sera réalisée. Dans notre approche la variation de la rigidité est utilisée comme artifice de calcul pour prendre en compte la fissuration de la structure. La rigidité étant connue pour la structure saine, on la fait varier suivant l'état de la fissure dans la structure endommagée. Après avoir fixé une valeur caractéristique de contrainte dans les matériaux constitutifs, on détermine soit les contraintes dans les différents éléments de la structure soit les sollicitations. Le rapport des contraintes ou des sollicitations caractéristiques fixées au préalable sur les contraintes ou sollicitations correspondantes calculées sous la structure supposée saine puis endommagée permet d'obtenir le coefficient de sécurité dans l'élément considéré et, partant, dans toute la structure.

La méthode permet de fournir une première approche du degré de sécurité de la structure apparaissant à travers les fissures mais n'a aucun caractère réglementaire. On peut connaître la chute des résistances dans l'ouvrage endommagé par rapport à son état initial (sain), mais aucun seuil critique n'est fixé. Ce dernier est défini selon les pratiques et les exigences des maîtres d'ouvrages. De même, bien que proche de la réalité, la modélisation est une approche simpliste de la réalité mais ne reflète pas le comportement réel d'une structure en béton armé. Celui-ci doit être modélisé directement par l'intégration de la fissuration dans les calculs. Ainsi notre approche se présentera comme suit :

- Une étude de la structure saine supposée homogène, avec le chargement appliquée (déplacements d'appui compris):

- Une étude de la structure endommagée avec le même chargement extérieur.

Cependant, compte tenu du fait que les coefficients de sécurité n'ont aucun caractère réglementaire, il est à l'heure actuelle très souvent impossible de donner une appréciation quantitative des risques que peut faire encourir aux usagers une structure dégradée ou en cours de dégradation. Les appréciations ne peuvent alors être portées que par référence à d'autres ouvrages étudiés précédemment.

4. Observation des dégradations :**4.1 Chronologie d'apparition :**

Les dégradations d'un ouvrage, suivant l'origine de leur cause, se manifestent à plus ou moins long terme. Ainsi :

- Lorsque les défauts sont dus à des erreurs de conception, de calcul (tel est le cas dans les nombreux désordres structurels observés) ou même de mise en oeuvre, les désordres apparaissent rapidement dans les mois qui suivent la mise en service.



- Les dégradations des ouvrages bien conçus et bien construits n'apparaissent qu'au bout de quelques décennies, lorsque la couche protectrice des aciers commence à se dégrader. D'où la notion de garantie décennale pour la structure et le gros oeuvre des bâtiments.

Cependant, il est à noter que les dégradations causées par les eaux agressives et les fissures dues au retrait se manifestent pour les premières dans les deux à trois ans qui suivent la mise en service et pour les secondes dès la mise en oeuvre du béton (retrait thermique) et également dès le premier hiver froid et sec (retrait hygrométrique).

4.2 Evolutivité des dégradations :

1- Au début : (1er stade)

- * fissures fines
- * efflorescences
- * traces de rouille

2- Evolution : (2ème stade)

- * multiplication et accroissement de la longueur des fissures
- * épaufures dans les angles
- * aciers corrodés apparents
- * gonflement du béton

3- Dégradations avancées : (3ème stade)

- * éclatements entre les fissures
- * éclatements le long des aciers
- * aciers corrodés et/ou coupés
- * altérations superficielles ou dans la masse de béton

4.3 A quel moment intervenir ?

Un ouvrage doit être protégé essentiellement contre les venues d'eau (imperméabilisation des faces exposées, protection des fondations, évacuation des caves, drainage, etc.). Il faut donc surveiller les ouvrages de façon à intervenir le plus rapidement possible et si possible au premier stade où un entretien suffit. Lorsqu'on intervient au deuxième stade des dégradations, l'entretien spécialisé est nécessaire. Au troisième stade, la vie de l'ouvrage peut être en cause et il est nécessaire de faire des réparations souvent longues et coûteuses.

5. Système expert pour le diagnostic et la réparation des désordres dans les structures en béton armé

5.1 Nécessité :

La réparation des endommagements de structures en béton est devenue plus coûteuse à l'heure actuelle et souvent, elle ne donne pas satisfaction. Ceci est dû au fait que dans de nombreux cas, la pratique et l'expérience des ingénieurs ne sont pas assez importantes pour se décider sur le bon travail de réparation. Il y a de bons modèles scientifiques pour la conception de la structure mais pas pour la réparation des désordres qu'elle subit. Cette lacune est dû essentiellement à la dispersion des savoirs dans les ouvrages et manuels et chez les experts (David and Lenat, 1982). Il est donc nécessaire d'analyser ces savoirs et expériences et de les rassembler pour en faire un moyen d'aide pour le diagnostic et la réhabilitation des bâtiments.

Une construction peut être examinée sur la base d'observations directes, sur le site ou en laboratoire pour des tests et analyses numériques : ces observations seront si besoin réajustées ultérieurement. Il faut noter cependant qu'une façon rationnelle d'opérer demanderait une estimation économique des risques pas à pas. Ces risques relatifs à une situation fragile nécessitent une évaluation de connaissances plus profondes, possible par de nouveaux tests ou analyses grâce au système expert.

5.2 Objectifs :

L'objectif de cette étude vise l'élaboration d'un prototype de système qui utilise les techniques de l'Intelligence Artificielle pour faire face à la complexité de l'analyse des désordres d'origine structurelle qui se produisent dans les bâtiments et pour proposer des solutions de réparations.

Quelques principales caractéristiques d'un tel système sont :

- de fournir une liste de désordres sévissant dans les bâtiments et parmi lesquels l'utilisateur retrouvera ceux affectant l'ouvrage qu'il souhaite traiter.
- d'établir les causes des désordres observés parmi une liste de causes potentielles car il faut se rappeler que les endommagements résultent assez souvent de la conjugaison de plusieurs facteurs.
- d'apporter - suivant le coefficient de sécurité qui permet d'indiquer s'il faut entamer des réparations ou non, et, selon l'avis du maître d'ouvrage - des solutions de réparation avec suppression de la cause ou des suggestions d'intervention de " petites ampleurs ". Il reste entendu que le traitement des incertitudes relatives à la connaissance profonde des causes de désordres et aux procédures de réparation (intégration de solutions de réhabilitation dans le contexte urbain) joue un rôle important dans un tel système.

5.3 Petit guide pour la recherche des causes de désordres :

Les désordres dans un ouvrage sont généralement dus à la conjonction de plusieurs causes. Dans les ouvrages en béton, ces désordres se traduisent le plus souvent par l'apparition de la corrosion des armatures qui gonflent et font éclater le béton et/ou par la désorganisation de la cohésion du matériau mais surtout par des fissures

dont l'ouverture apparente dépasse les valeurs (0,1 à 0,3 mm) correspondant à un fonctionnement normal du béton armé (fissures fines et réparties) ou des fractures (fissures d'ouverture dépassant le centimètre). Pour ces fissures, le plus couramment observées (Gambardella and Moroni,1989). Ces problèmes qui peuvent être résolus par l'expérience des heuristiques sont adaptés pour l'usage de système expert.

5.4 Intégration des coefficients de sécurité et des facteurs de certitudes :

Un coefficient de sécurité résiduel renseigne sur le "niveau de sécurité" d'un ouvrage existant et indique s'il faut oui ou non entamer une réparation. Cependant, après le diagnostic, on peut toujours se poser la question de savoir si la solution de réparation préconisée est vraiment la bonne. Afin de lever les doutes qui subsistent, certains chercheurs recommandent l'utilisation de facteurs de certitudes (FC) dans les règles. En nous inspirant des travaux de Reinhardt et Sohni(IABSE,1989) de sur l'utilisation de système expert en génie civil, nous pouvons envisager d'intégrer les facteurs de certitudes dans notre système. Ces facteurs viennent étayer les enseignements tirés des calculs de coefficients de sécurité et constituent une argumentation appréciable quant aux choix des solutions de réparation.

En effet, un facteur de certitude est une valeur numérique qui indique une mesure de confiance dans la valeur d'un paramètre. Dans la base de connaissance, il observe l'expérience réelle que les faits ou les opinions ne connaissent pas toujours avec une certitude absolue. Ainsi, un système expert peut prendre en compte deux incertitudes :

* Les faits et relations du champ du problème recouvrent des incertitudes. Souvent l'expert doit faire des constats tels que : *" si les conditions sont rencontrées, le résultat revient presque toujours. Toutefois, un résultat différent peut arriver. "*

* Nous pouvons ressentir un petit doute quant aux conditions d'exécution ou environnementales de l'ouvrage. Par exemple, *" je ne sais pas exactement s'il y a eu certains événements dans la vie de la structure (exemple : températures élevées), mais je suppose que oui "*. L'exemple suivant montrera comment notre prototype peut s'intéresser au coefficient de sécurité et au facteur de certitude.

Supposons que nous trouvions des fissures dans la structure de béton et que nous ayons à en trouver la cause.

Les quatre règles suivantes font partie de la base de connaissances :

- R1** Si coefficient sécurité = faible
alors réparation = nécessaire
- R2** Si désordre = fissures
type de fissure = modèle sinueux
condition d'environnement pendant l'hydratation = basse température
alors cause = perte de chaleur d'hydratation FC = 50
- R3** Si début de désordre = premiers jours après mise en oeuvre
type de ciment = pas de ciment de basse température
alors cause = perte de chaleur d'hydratation FC = 90
- R4** Si diagnostic = perte de chaleur d'hydratation
alors réparation = réagréage de la fissure par technique du béton projeté

La discussion peut aller dans ce sens. La première règle est nécessaire pour pouvoir entamer un diagnostic et effectuer un traitement du désordre observé. Après avoir répondu que l'on a trouvé un modèle sinueux et que l'élément était du béton de masse, le système peut demander : *" décrivez les conditions d'environnement et indiquez votre degré de certitude "*. Nous pouvons répondre *" froid avec 70 % de certitude "*. Les conditions, dès les premières règles " SI ", sont rencontrées et le système combine le facteur de certitude approprié, et nous entrons dans les règles " ALORS ".

cause = perte de chaleur d'hydratation FC = 35 (70% de 50)

Le système prend alors en compte d'autres causes parce que la conclusion n'est pas vraie à 100 %. Nous regarderons les valeurs des paramètres de la règle 2. Si nous savons que le dommage a commencé pendant les premiers jours de la mise en oeuvre, sans pour autant connaître exactement le type de ciment utilisé, supposons que ce n'est pas un ciment de basse température d'hydratation qui a été employé. Nous répondons avec un degré de certitude de 50 %. Le système expert, quant à lui, utilise les équations suivantes pour combiner les facteurs de certitudes :

- [1] $(FC (\text{règle})_FC \text{ de } ("si") \times FC \text{ de la fonction de conclusion} + 50)/100$
- [2] $(FC (\text{antérieur}) + FC (\text{règle}) \times (100 - FC (\text{antérieur}) + 50)/100$



FC(antérieur) est le facteur de certitude avec la valeur des paramètres avant que le système expert apporte l'action du "ALORS" de la règle suivante. Notons que le dernier 50 dans le numérateur des équations est compris pour arrondir et seule la partie entière est utilisée.

Exemple :

$$[1] \quad FC(\text{règle } 2) ((70 \times 50 + 50)/100) \times 35,5 \implies FC = 35$$

$$FC(\text{règle } 3) ((50 \times 90 + 50)/100) \times 45,5 \implies FC = 45$$

$$[2] \quad FC = 35 + (45(100 - 35) + 50)/100 + 35 + 29 = 64$$

$$\implies FC = 64$$

La cause des fissures est encore la perte de la température d'hydratation, mais la preuve additionnelle augmente le facteur de certitude à 64. Ainsi, de proche en proche, le système en combinant toutes les règles et les facteurs de certitudes rassure sur le diagnostic. L'utilisateur peut alors, sans appréhension, retenir la solution de réparation de la règle 4.

Le traitement des incertitudes à travers le calcul des coefficients de sécurité et l'intégration de facteurs de certitudes dans les règles de diagnostic joue un rôle important dans un tel système. Néanmoins dans ce qui suit, ce thème ne sera pas traité particulièrement dans nos règles de diagnostic ou de réparation puisqu'il peut être abordé séparément du développement du corps principal de notre prototype de système. En effet, un pré-diagnostic, à travers une auscultation sérieuse de l'ouvrage et des calculs rigoureux de coefficients de sécurité, permet de lever un certain nombre de doutes.

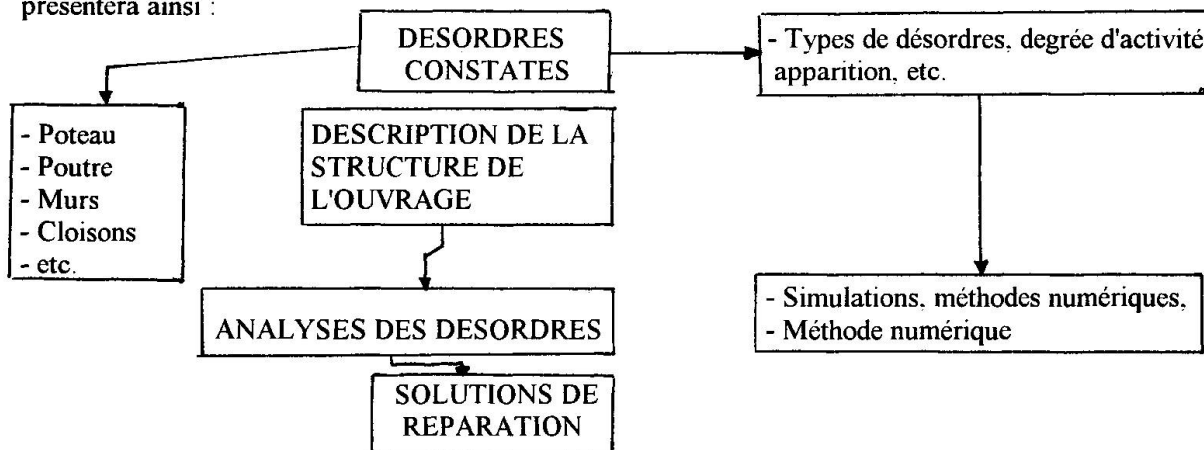
5.5 Pour le diagnostic des désordres d'origine structurelle :

D'abord, la structure et la destination de la construction doivent être spécifiées. Quelques informations importantes peuvent aider à trouver les causes des désordres, comme la nature du sol ou le matériau utilisé. Il sera ensuite établi une base de faits à partir de toutes ces informations disponibles. Auparavant, un examen de la construction sur la base d'observations directes sur le site ou au moyen d'instruments d'auscultation a permis de savoir la nature des désordres qui apparaissent très généralement, comme nous l'avons déjà signalé, à travers les fissures.

Sur la base de faits existants et de désordres constatés, les causes de ces derniers vont être établies et analysées dans un dialogue entre l'utilisateur et le système. Différents types de désordres - tels que l'éclatement du béton, armatures apparentes des poteaux, fissuration généralisée du bâtiment, etc. - sont présentés dans les règles de la base de savoir. On note alors que leurs causes à établir par le système expert sont parfois multiples.

5.6 Pour la réparation des désordres :

Une fois le diagnostic effectué, différentes solutions de réparation seront données. Nous établissons ainsi des règles liant les désordres observés au choix de la méthode de réhabilitation. L'architecture du système se présentera ainsi :



Références :

David R., Lenat D.B. "Knowledge - based Systems in artificial intelligence, (Mc Graw - Hill , 1982).

IABSE Colloquium - Bergamo 1989 : Expert Systems in civil engineering - Report .

Gambardella, L., Moroni L.: "Expert systems application to Building pathology Diagnosis : Methodology" Actes de EuropIA 90

Mougou J.-P. : "cours de béton armé aux états limites suivant les règles BAEL 83 (Eyrolles, Paris 1986)