Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses

Band: 118 (1992)

Heft: 22

Artikel: Modélisation numérique des structures massives en béton: progrès récents et défis futurs

Autor: Droz, Patrice

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-77799

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: 15.07.2025

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

Modélisation numérique des structures massives en béton

Par Patrice Droz,
ing. civil EPFL-SIA
Dr ès sc. tech.
Bonnard & Gardel
(Valais)
Condémines 3,
1950 Sion

Progrès récents et défis futurs

Connaître le comportement d'un ouvrage c'est aussi en évaluer la sécurité structurelle et donc en appréhender le ou les processus de ruine. Une telle démarche présuppose une connaissance approfondie du phénomène local de rupture (fissuration, plastification, dislocation...).

Le développement constant des techniques numériques, en particulier la méthode des éléments finis, permet de calculer et de connaître de plus en plus finement le comportement de structures massives soumises à des chargements complexes. Ainsi en est-il par exemple des caissons de réacteurs nucléaires et des barrages. Ces nouveaux outils devraient également permettre de mieux comprendre le comportement ou les dégradations observés sur des ouvrages d'art existants (ponts, réservoirs, fondation de machines...) et favoriser de nouvelles conceptions dans le domaine des détails structuraux.

Un colloque sur invitation [1][1] a réuni récemment à Lausanne les spécialistes parmi les plus reconnus en la matière. Cinq thèmes ont été présentés par des conférenciers invités [2][2]:

1. Description des mécanismes de rupture du béton massif (professeur G. Pijaudier-Cabot, ENS-LMT Cachan, France)
2. Influence de l'état initial des structures massives en béton sur leur comportement à la ruine (P. Acker, LCPC, Paris)
3. Influence des variations de température et d'humidité sur la rupture (professeur F. H. Wittmann, EPFZ)
4. Modélisation de la rupture du béton armé (R. de Borst, Université de Delft, Pays-Bas)
5. Optimisation et calcul tridimensionnel (J. Ozbolt, Université de Stuttgart)

Ces présentations ont été suivies de contributions complémentaires de la part des participants, et de nombreuses discussions [3] animées par le professeur J. W. Dougill (The Institution of Structural Engineers, Londres).

1. Description des modèles de calcul

Plusieurs types de modèles ont été développés ces dernières années. Leur but est de suivre et de décrire le comportement non linéaire des structures en béton lors du processus de rupture, en s'appuyant sur des lois constitutives du matériau ou sur la mécanique de la rupture.

1.1 Les modèles micromécaniques

Le béton est un matériau hétérogène dont les constituants sont distribués aléatoirement dans l'espace. Pour en tenir compte, l'utilisation de méthodes probabilistes peut être envisagée.

Une première approche consiste à représenter le milieu béton par un modèle formé de barres, dispersées dans le milieu, et dont les propriétés mécaniques sont distribuées aléatoirement.

Une autre approche similaire considère que les fissures, ou défauts initiaux, sont aléatoirement distribuées dans le béton avec différentes énergies de dissipation.

Relevons également le modèle «microplan» qui considère un nombre fini de plans entourant chaque point d'analyse. Des propriétés simples de comportement du matériau sont associées à chacun des plans et le comportement global au point considéré est le résultat de l'intégration sur tous les plans.

Finalement, il faut mentionner le «béton numérique» : la forme et la disposition des agrégats sont générées par un processus aléatoire. Ce modèle a surtout été utilisé pour mieux comprendre et simuler les comportements locaux du béton.

Dans la pratique, les modèles mathématiques basés sur la micro-mécanique, se révèlent trop lourds pour être réellement appliqués. Considérant que la simple simulation d'échantillons de laboratoires nécessite plus d'un million de degrés de liberté, ce domaine reste limité à la recherche.

1.2 Les modèles continus

Bien qu'il paraisse contradictoire de modéliser la fissuration du béton, phénomène discret au sens mathématique du terme, par un modèle continu, c'est certainement ce type de relation constitutive qui est le plus couramment utilisé. Les modèles phénoménologiques tiennent compte des bases physiques de la dégradation du matériau pendant la ruine et limitent l'interprétation mathématique aux effets macroscopiques globaux de l'endommagement (perte de rigidité et déformations permanentes).

Modèles basés sur la plasticité

Les relations non linéaires qui tentent de décrire le comportement du béton sont souvent issues de la théorie de la plasticité. Ce comportement est caractérisé par la présence de déformations permanentes résiduelles, la phase de déchargement étant décrite parallèlement au chargement élastique. Une telle description va à l'encontre de celle proposée par les théories micromécaniques, pour lesquelles la raideur en phase de déchargement est moindre que celle de chargement (fig. 1).

En compression, les déformations plastiques sont importantes et elles doivent être représentées. Ce problème est d'une grande importance car, lors du processus de rupture, toutes les parties de la structure ne subissent pas un chargement monotone: certaines se déchargent après rupture locale alors que, par redistribution des efforts, d'autres vont être plus sollicitées. La représentation correcte du comportement sous charge et décharge va donc directement influencer l'analyse de la structure.

Modèles de bande fissurée

Dans ces modèles, l'incrément de déformation est composé d'une part élastique et d'une part provenant de la fissuration, dont l'évolution est contrôlée en tenant compte de son histoire (état d'ouverture des fissures dans une bande d'épaisseur déterminée, direction de celles-ci...). Le comportement en déchargement peut être soit sécant, soit élastique.

[1]Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

[2]Le lecteur intéressé trouvera dans la référence [2] ainsi que dans l'excellent article de synthèse du professeur J. W. Dougill [4] les références aux différents travaux dont il est fait mention dans ce texte.

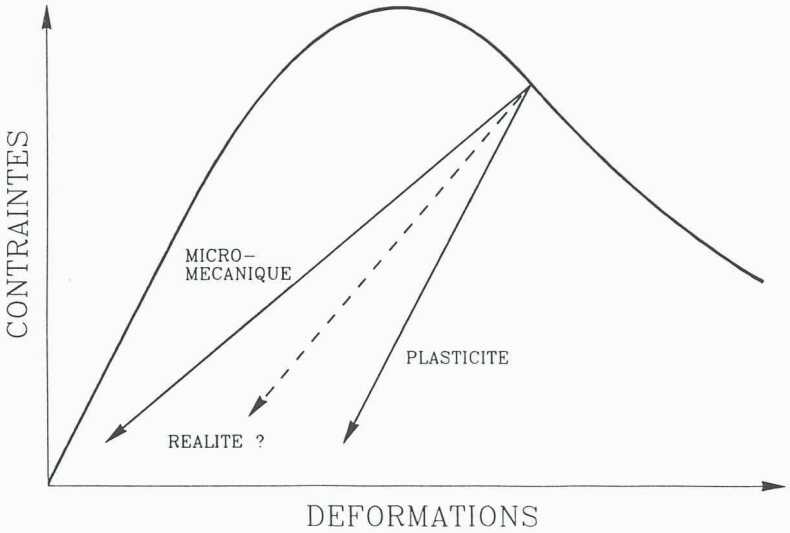


Fig. 1. – Courbe contraintes-déformations indiquant diverses manières de modéliser le déchargement (d'après G. Pijaudier-Cabot)

Mécanique de l'endommagement des milieux continus

Les équations qui régissent ces modèles sont fort similaires à celles des modèles de bande fissurée. Le matériau est supposé incapable de déformations plastiques, ce qui implique que la courbe contrainte-déformation suit, en phase de déchargement, une ligne droite passant par l'origine. L'endommagement que subit la matière lors du processus de rupture est décrit en général de façon isotrope. Il se traduit par une perte de raideur, dont l'importance a été relevée plus haut, et par une déformation inélastique permanente.

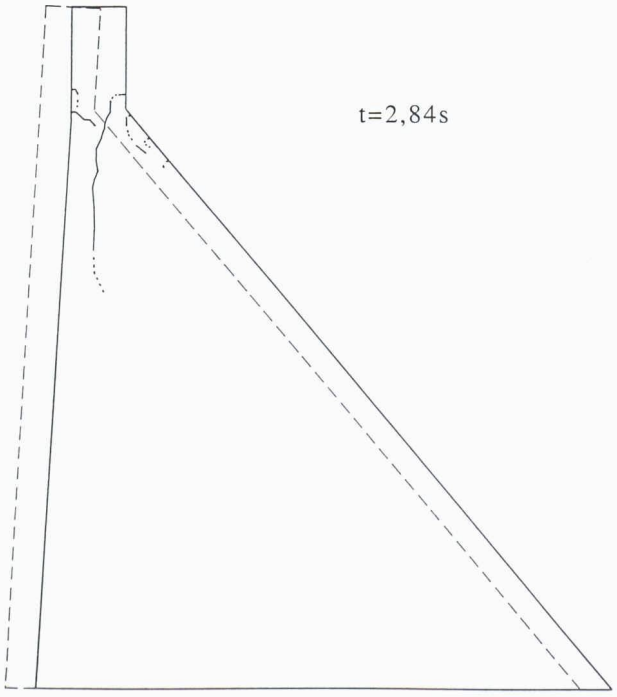


Fig. 2. – Exemple de calcul utilisant la mécanique de la rupture: fissuration d'un barrage lors d'un séisme [5]

2. Description des mécanismes de rupture

2.1 La mécanique de la rupture

Pour les structures en béton de grandes dimensions telles que les barrages, la taille des hétérogénéités (agrégats), et donc des zones microfissurées, est très réduite par rapport à la structure elle-même. Il est dans ce cas possible d'utiliser la mécanique de la rupture. Une telle analyse tend à quantifier les effets de la présence de fissures discrètes dans une structure pour évaluer leur tendance à la propagation (fig. 2).

Afin de pouvoir effectuer des simulations simples de structures de moindres dimensions en béton armé, cette approche a été modifiée pour tenir compte de phénomènes non linéaires en pointe de fissure qu'il importe alors de modéliser. Tout comme dans le modèle de bande fissurée, le comportement en pointe de fissure est dicté par l'histoire de l'ouverture de celle-ci.

2.2 Adoucissement et localisation

Plusieurs approches réunissant les caractéristiques des modèles continus et celles issues de la mécanique de la rupture ont été proposées récemment. Elles ont pour but de décrire le processus de ruine depuis le début, quand les zones micro-fissurées sont relativement bien distribuées dans la structure, jusqu'à la rupture ultime, où des fissures discrètes apparaissent (localisation des déformations). De telles approches doivent faire appel à des lois constitutives du matériau présentant un adoucissement (strain-softening: branche descendante de la figure 1). Cela se traduit, en plasticité, par une diminution de la limite élastique avec la déformation.

Un des problèmes auxquels ces modèles ont à faire face est d'assurer l'indépendance du résultat obtenu vis-à-vis du maillage d'éléments finis utilisé. En effet, au moment où la structure passe d'un état diffus de dégradation ou d'endommagement à un mode localisé, les déformations tendent à se développer dans des régions dont l'étendue est fonction du maillage, ce qui n'est justifiable ni théoriquement, ni numériquement. Ce problème est résolu en introduisant un limiteur de localisation, soit sous forme d'une bande fissurée d'épaisseur prescrite, soit en définissant les variables d'état qui contrôlent l'adoucissement de façon non locale.

3. Influence de l'état initial sur le comportement à la ruine

Il est indéniable que pour les structures massives en béton, le comportement à la rupture va être grandement influencé par leur état initial. En particulier les aspects thermomécaniques peuvent se révéler déterminants, bien avant tout chargement.

Pour les barrages, si le séchage a surtout un effet superficiel sans conséquence sur la structure elle-même, il n'en va pas de même pour la chaleur d'hydratation, qui induit des contraintes initiales importantes. Ces contraintes peuvent provoquer une fissuration qui entraîne un vieillissement prématuré du matériau. Le couplage entre des modèles prenant en compte l'évolution de la chaleur d'hydratation, la diffusion de chaleur, et les modèles de fissuration, relève encore du domaine de la recherche.

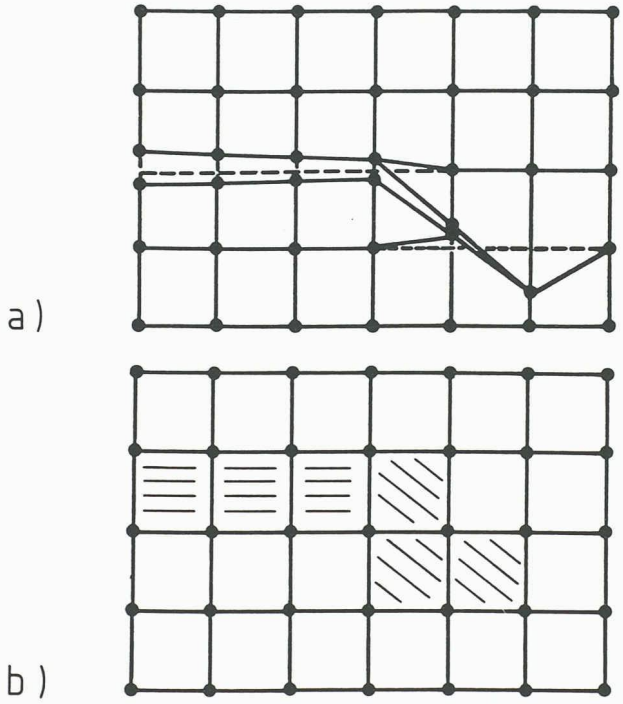


Fig. 3. – Modélisation d'une fissure:
a) fissuration discrète b) fissuration répartie

Une approche simple des aspects thermomécaniques dus à la chaleur d'hydratation peut être faite sur la base de deux analyses distinctes. La première résout le problème de conduction, sans oublier le terme de production interne de chaleur (source). La seconde utilise la distribution de température obtenue précédemment comme donnée du problème thermoélastique et débouche sur une analyse mécanique (éventuellement non linéaire). La répartition de la fissuration ou de l'endommagement est obtenue une fois que les équations d'équilibre sont résolues.

4. Influence des variations de température et d'humidité sur la rupture

Des cycles de variation de température imposent des gradients qui peuvent gravement influencer le comportement du matériau et donc celui de la structure. C'est la cas notamment des caissons de réacteurs nucléaires.

L'influence d'une augmentation notable de la température sur la fissuration est liée à celle de l'humidité dans le béton. En effet, lorsque la température approche les 100 °C, l'eau libre se vaporise. La pression de vapeur d'eau devient alors un paramètre déterminant de la fissuration. Tant que la température reste inférieure à 85 °C, l'influence de l'humidité se fait essentiellement sentir au niveau de la résistance à la fissuration du béton. L'évolution de la distribution de l'humidité en fonction de gradients thermiques et hydriques dans le béton sous température élevée ne peut, à l'heure actuelle, être qu'estimée. Les calculs de fissuration qui en résultent sont donc basés sur des hypothèses simplificatrices que les recherches expérimentales en cours pourront améliorer.

5. Modélisation de la rupture du béton armé

5.1 Modélisation des fissures

La présence d'une ou plusieurs fissures dans une structure analysée par la méthode des éléments finis peut être modélisée de différentes façons (fig. 3).

- La modélisation «discrète», obtenue par déconnexion des nœuds des éléments finis de chaque côté des lèvres, semble a priori le moyen le plus simple de rendre compte de la présence d'une fissure dans la structure. En se basant sur des critères issus de la mécanique non linéaire de la rupture, il est possible d'évaluer les forces nodales en pointe de la fissure et d'en déduire l'éventuelle propagation de celle-ci. Néanmoins, lorsque la fissure se propage, elle entraîne la création de nouveaux nœuds à l'intérieur du réseau, et donc de nouveaux degrés de liberté. Ce «remaillage» est particulièrement délicat dans le cas d'une analyse tridimensionnelle.
- Le modèle de fissuration «répartie» considère que la zone fissurée correspond à un domaine de l'élément fini dans lequel une dégradation du matériau a été détectée. Il n'y a donc pas modification du maillage au cours du calcul. Seules les propriétés mécaniques de certains points situés sur le parcours de la fissure sont changées en fonction de la loi constitutive choisie (plasticité, bande fissurée, endommagement).

5.2 Modélisation des armatures

Des approches similaires à celles utilisées pour simuler les fissures ont été développées pour prendre en compte les armatures.

- Une première approche consiste à modéliser les armatures par des éléments-barres unidimensionnels, attachés aux nœuds du réseau d'éléments finis du béton. L'interaction acier-béton peut être modélisée en utilisant des éléments d'interface entre les deux matériaux. La réponse non linéaire du béton est alors concentrée dans un interface fictif obéissant à des équations constitutives spéciales. Les caractéristiques de ces éléments sont obtenues à l'aide d'essais d'arrachement. Le désavantage évident de cette méthode est que chaque barre ou groupe de barre doit être modélisé, ce qui implique que le maillage et le réseau de barres doivent coïncider.
- Une deuxième méthode beaucoup plus simple, mais moins précise pour des études de détail, consiste à modéliser le béton armé comme un milieu homogène. Le champ de déplacement du béton est étendu à l'armature, ce qui présuppose une liaison parfaite entre acier et béton. Les contributions des rigidités des deux sont additionnées dans chaque élément.

5.3 Optimisation et calcul tridimensionnel

Appliqués à des structures simples et de petites dimensions, les modèles de rupture du béton nécessitent déjà un gros effort de calcul et une grande expérience en la matière, pour juger de la pertinence des données et de la validité des résultats. Une approche pragmatique du problème consiste à étudier tout d'abord la structure de façon globale à l'aide de modèles relativement grossiers, puis d'analyser les détails de plus en plus finement en faisant appel à des modèles constitutifs plus complexes.

Quant à l'analyse tridimensionnelle, on peut rappeler qu'elle est de l'ordre de trois fois plus coûteuse en temps et en place mémoire que son équiva-

lent bidimensionnel. Les algorithmes de maillages adaptatifs (modification du maillage au cours du calcul afin de modéliser plus finement les zones endommagées et plus grossièrement les autres) peuvent être ici d'un grand secours, afin d'optimaliser le nombre d'inconnues du problème et rendre ainsi le programme de calcul plus efficace.

6. Conclusions

De grands progrès ont été faits ces dernières années dans le domaine de la modélisation numérique du comportement des structures massives en béton. Ils sont le fruit de nombreuses recherches aussi bien expérimentales que théoriques et numériques. Au cours de la dernière décennie, un nombre considérable de modèles et de méthodes d'analyse a été proposé dans la littérature. La tendance actuelle consiste à unifier ces différentes approches, et même à les combiner, afin de décrire au mieux le comportement du matériau sous sollicitations complexes.

Du point de vue numérique, les recherches entreprises semblent très prometteuses, en particulier en ce qui concerne l'indépendance des résultats par rapport au maillage d'éléments finis utilisé (apparition des théories non locales), et le traitement des difficultés algorithmiques et des problèmes d'instabilité consécutifs à la modélisation de l'adoucissement du matériau.

De nombreux efforts sont également entrepris pour mieux comprendre les divers phénomènes physiques influençant le comportement du béton (température, humidité).

A l'heure actuelle, peu de programmes commerciaux offrent la possibilité de modéliser la rupture d'une structure en béton, en faisant appel à l'essentiel des ingrédients exposés ci-dessus. Néanmoins, plusieurs programmes offrent déjà à l'ingénieur un outil puissant, propre à vérifier la conception de la structure projetée, à s'assurer de la sécurité d'un ouvrage existant qui présente des signes d'endommagement, et à concevoir les mesures «confortatives» appropriées. Leur utilisation nécessite cependant beaucoup d'expérience et un solide esprit critique!

Bibliographie

[1] «Colloquium on numerical analysis of massive concrete structures», Lausanne, les 21 et 22 novembre 1991. Organisé conjointement par l'Office fédéral de l'énergie, l'EPFZ, l'EPFL et Bonnard & Gardel Ingénieurs-conseils SA.

[2] «Colloquium on numerical analysis of massive concrete structures, Invited lectures», Bonnard & Gardel Ingénieurs-conseils SA, Lausanne, 1991

[3] La transcription complète des discussions (y compris les contributions complémentaires) est en cours de préparation pour publication.

[4] Dougill J. W.: «Physical and mechanical aspects of failure in concrete and concrete structures», transactions of the 9th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Lausanne, August 1987 (ed. F. H. Wittmann)

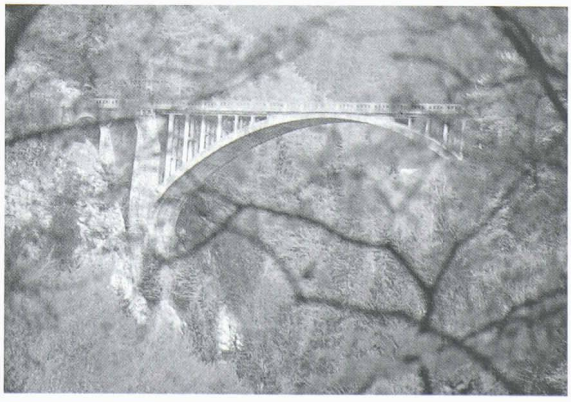
[5] Droz P.: «Modèle numérique du comportement non linéaire d'ouvrages massifs en béton non armé», thèse n° 682, EPFL, Lausanne, 1987

Par Jean-Pierre Weibel, rédacteur en chef

Notes de lecture

A propos d'une ligne de chemin de fer menacée: le sort d'un pont historique

On sait qu'une vaste action est en cours pour mobiliser tous les milieux intéressés au maintien de la ligne de chemin de fer Aigle-Sépey-Diablerets, modernisée il y a quelques années. Parmi les solutions étudiées pour en améliorer l'attrait, figure la suppression du rebroussement au Sépey, station atteinte après franchissement du pont des Planches. Cela permettrait de raccourcir sensiblement le temps de parcours et de ménager le pont, actuellement en mauvais état.

Ce pont représente un intéressant témoin de l'histoire de la technique. En effet, sa conception est inspirée de celle du pont Chauderon, à Lausanne, récemment rénové, puisqu'il utilise le système développé à la fin du siècle dernier par le professeur tchèque Josef Melan (1853-1941), visant à protéger les structures métalliques par du béton. Cela permettait de tirer parti de ce dernier, sans exiger les lourds échafaudages nécessaires au coffrage, en l'accrochant à l'arche métallique traditionnelle, qui constituait le coeur de la structure porteuse. Les colonnes supportant le tablier, le tout en béton armé, prenaient appui sur l'arche ainsi enveloppée et renforcée. Alors que les portées du pont de Chauderon mesuraient moins de 30 m chacune, le pont des Planches, achevé en 1913, franchit quelque 65 m en une portée unique. Cette technique a même permis la réalisation, en 1930, d'une portée de 130 m. Le pont des Planches constitue donc bien un jalon de l'histoire de la technique et mérite à ce titre d'être rénové comme l'a été le pont Chauderon. Une petite brochure retrace son histoire ainsi que celle des protagonistes de sa réalisation.

Hahling Albert: «Le pont des Planches, près du Sépey», brochure illustrée, 15,5 x 23 cm, 18 pages; tiré à part de la *Revue historique vaudoise*, Lausanne, 1990