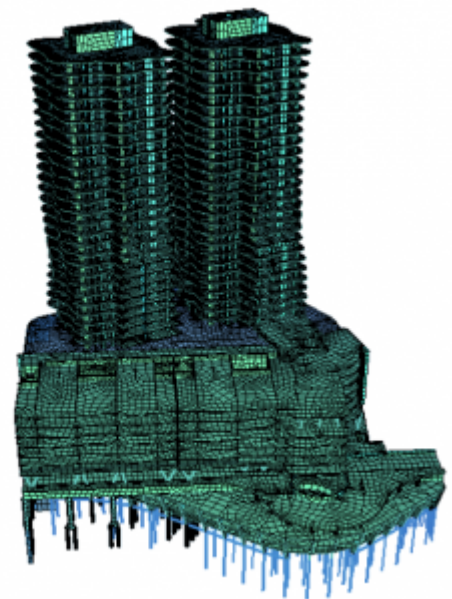
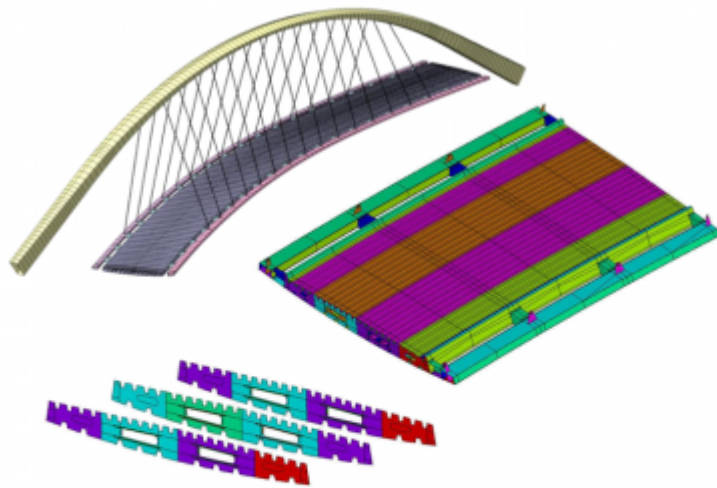


Association Française de Génie Civil



MODÉLISATIONS ET CALCULS AUX ÉLÉMENTS FINIS DANS LE DOMAINE DU GÉNIE CIVIL - BILAN DU GROUPE DE TRAVAIL AFGC 2016/2019



EDITO

[Le calcul aux éléments finis - un changement de paradigme](#)

[Le mot du Conseil Scientifique et Technique](#)

PREAMBULE

[Contenu du guide et auteurs](#)

[Laissez-nous vos commentaires et vos contributions pour améliorer le site !](#)

INTRODUCTION

[Une petite introduction générale - Analyse structurale et éléments finis](#)

PARTIE 1 - ÉLÉMENTS THÉORIQUES

Chapitre A. Généralités

[Chapitre A - Généralités](#)

Chapitre B. Dynamique

[Chapitre B - Dynamique](#)

Chapitre C. Calculs statiques non-linéaires

[Chapitre C - Calculs statiques non-linéaires](#)

Chapitre D. Génie civil

[Chapitre D - Génie civil](#)

Chapitre E. Post-traitements typiques du génie civil

[Chapitre E - Post-traitements typiques du génie civil](#)

Chapitre F. Calculs géotechniques

[Chapitre F - Calculs géotechniques](#)

PARTIE 2 - ÉLÉMENTS PRATIQUES

Chapitre A. Comprendre les éléments finis

A.1 Que fait le logiciel dans un calcul aux éléments finis ? Exemple des structures à poutres.

A.2 Concrètement qu'est-ce qu'un élément fini ?

Chapitre B. Objectifs de calcul et caractéristiques nécessaires de l'outil

La réalisation d'un modèle de calcul par éléments finis comprend plusieurs étapes. Le choix de l'outil est prépondérant et dépend de plusieurs critères. Une modélisation réussie demande une bonne organisation initiale.

B.1 à B.6 Critères à prendre en compte

B.7 Organisation du calcul

Chapitre C. Bonnes pratiques pour monter un modèle

Les différents niveaux d'études et la complexité associée du modèle ont déjà été définis avant l'étape de modélisation dans le contenu du chapitre B. Ce chapitre C présente les simplifications pouvant être adoptées pour créer un modèle structurellement représentatif de la conception de l'ouvrage réel et aux sollicitations qu'il voit.

C.1 Données d'entrée et unités

C.2 Modélisation des éléments principaux

C.3 Éléments finis et maillage

C.4 Modélisation des éléments non structuraux ou équipements

C.5 Conditions aux limites

C.6 Connections - liaisons - assemblages

C.7 Excentrements

C.8 Sections composées (poutre/dalle)

C.9 Matériaux

C.10 Comportement spécifique au cisaillement et à la torsion

C.11 Modélisation des charges

[C.12 Compléments liés aux éléments volumiques](#)

[C.13 Compléments liés aux calculs non linéaires](#)

[C.14 Compléments liés à la précontrainte](#)

[C.15 Compléments liés au calcul phasé](#)

[C.16 Compléments aux calculs dynamiques et sismiques](#)

Chapitre D. Analyse et exploitation des résultats

[D.1 Généralités sur les calculs numériques](#)

[D.2 Combinaisons d'actions](#)

[D.3 Exploitation des résultats](#)

[D.4 Validations réglementaires : comportement en béton armé des éléments](#)

[D.5 Comprendre et analyser les pics \(cas du béton\)](#)

[D.6 Comprendre et analyser les pics \(cas d'un assemblage métallique\)](#)

[D.7 Compléments spécifiques pour les calculs dynamiques](#)

Chapitre E. Comment assurer la qualité ?

Nous proposons ci-dessous quelques conseils simples pour déployer une démarche qualité dans les calculs aux éléments finis. Les enjeux principaux sont :

- La bonne utilisation du logiciel
- La modélisation appropriée du comportement des structures
- La traçabilité des hypothèses de modélisation et des résultats.

Les conseils ci-dessous traitent de la bonne prise en main d'un logiciel par un ingénieur ou une équipe, des tests d'autocontrôle que doit impérativement effectuer chaque ingénieur à la fin de sa modélisation, et enfin des éléments minimaux à tracer pour permettre le travail à plusieurs ou la reprise ultérieure d'un modèle.

[E.1 Prise en main d'un nouveau logiciel](#)

[E.2 Validation d'un modèle par autocontrôle](#)

[E.3 Traçabilité et travail à plusieurs](#)

Chapitre F. Comment bien présenter la note de calcul aux éléments finis ?

Le présent paragraphe fournit les éléments minimaux qui doivent figurer dans une note, si l'on veut

fournir une description claire d'un modèle de calcul aux éléments finis.

[F. Comment bien présenter la note de calcul aux éléments finis ?](#)

PARTIE 3 - EXEMPLES DE CAS D'ÉTUDE COMPLETS

Cette partie contient des exemples de modélisations, pour des objets simples ou plus complexes, sous forme d'études complètes ou partielles, ou encore de comparatifs de modélisations pour une même structure.

Si vous possédez un exemple en stock que vous souhaitez partager (cela peut être une note d'un projet réel rendu anonyme), ou une complexité ou un paradoxe relevé sur un bout de modèle, proposez-nous votre contribution à l'adresse suivante: elements.finis@afgc.asso.fr.

Exemple A - Modélisation d'un immeuble complexe de grande hauteur

[Exemple A - Exemple de modélisation d'un immeuble complexe de grande hauteur](#)

Exemple B - Modélisation des ponts mixtes

[Exemple B - Modélisation des ponts mixtes et métalliques](#)

Exemple C - Modélisation de grillages de poutres

[Exemple C - Modélisation de grillages de poutres](#)

Exemple D - Exemple simple : modélisation d'une roue Br

[Exemple D - Modélisation d'une roue Br](#)

Annexe 1 - Fichier de l'exemple de calcul matriciel

[Annexe 1 - Fichier Excel](#)

BIBLIOGRAPHIE

[Lien vers la bibliographie](#)

From:

<https://wiki-gtef.frama.wiki/> - **Bilan du Groupe de Travail AFGC sur les éléments finis**

Permanent link:

<https://wiki-gtef.frama.wiki/accueil-gtef>

Last update: **2020/06/25 14:00**



L'édito de l'AFGC

Thierry Kretz était président du Conseil Scientifique et Technique de l'AFGC au moment du lancement du groupe de travail sur les éléments finis. Il nous livre sa vision de ce travail.

Le calcul aux éléments finis - un changement de paradigme

Il n'est pas exagéré d'affirmer que le calcul aux éléments finis des structures de génie civil relève d'un changement de paradigme dans le calcul des structures. Il est en effet possible de transposer à l'ingénierie des structures le concept de paradigme défini par Thomas Kuhn dans *La structure des révolutions scientifiques* : les paradigmes sont des « découvertes scientifiques universellement reconnues, qui pour un temps, fournissent à une communauté de chercheurs des problèmes types et des solutions ».

Malgré son caractère apparemment classique, l'émergence du calcul aux éléments finis est bien une révolution de cette nature. L'ancien monde est celui de la résistance des matériaux classique, basée sur l'hypothèse de Saint Venant et l'hypothèse de Navier-Bernoulli, qui se traduisent dans la théorie des poutres et la théorie des plaques minces. L'ancien monde s'appuie donc sur un ensemble cohérent d'hypothèses et de méthodes de résolution, puis de traduction des résultats en principe de dimensionnement des structures et de leurs renforcements.

Le nouveau monde, celui des éléments finis dans toute leur généralité, se construit sur d'autres bases. Le comportement des matériaux eux-mêmes n'est pas remis en cause, mais les hypothèses de calcul des structures changent. Elles concernent d'une part le maillage, c'est-à-dire le principe et la finesse de discrétisation des structures, d'autre part le choix des types d'éléments, c'est-à-dire les champs de déplacements considérés. Les résultats demandent de nouvelles méthodes d'analyse, pour permettre le dimensionnement sûr des structures et de leur renforcement.

Les règlements de calcul, et en particulier les Eurocodes, sont très largement établis dans la logique des théories classiques d'application de la RDM. Ils proposent des règles simples, largement basées sur l'expérience, et dont le domaine de validité est bien connu. Il s'agit par exemple de l'inclinaison des bielles d'effort tranchant, du dimensionnement des consoles courtes, du contrôle du poinçonnement, etc... Ces règlements autorisent le calcul des structures aux éléments finis, mais restent discrets sur les méthodes de calcul (maillage, choix des éléments) et d'interprétation des résultats. Différentes techniques existent pour traduire les résultats dans des termes compatibles avec les règlements, mais il est certain que « la doctrine du calcul aux éléments finis » est encore en cours d'élaboration.

Le guide de l'AFGC que vous avez entre les mains vise à contribuer à l'établissement de cette nouvelle doctrine. Il reflète la volonté de l'AFGC d'accompagner le développement et l'innovation dans le domaine du Génie Civil, en étant le lieu de partage et de transmission des savoirs et des avancées techniques.

Je remercie le groupe de rédaction et en particulier les deux animateurs, Didier Guth et Claude le Quééré, pour leur travail remarquable et je suis persuadé que ce guide, complété par le site web, restera longtemps un ouvrage de référence pour les ingénieurs des bureaux d'études.

Thierry Kretz - mai 2020

From:

<https://wiki-gtef.frama.wiki/> - **Bilan du Groupe de Travail AFGC sur les éléments finis**

Permanent link:

<https://wiki-gtef.frama.wiki/accueil-gtef:edito>

Last update: **2020/05/21 00:26**



Emmanuel Ferrier est le président du Conseil Scientifique et Technique de l'AFGC. Il nous livre sa préface.

Préface

De nombreux étudiants, ingénieurs, scientifiques et chercheurs utilisent des méthodes numériques, afin de développer ou d'utiliser des programmes informatiques pour résoudre des problèmes d'ingénierie dans le domaine de la construction. Ces méthodes numériques s'appuient sur les calculs aux éléments finis. L'AFGC a souhaité apporter une contribution dans ce domaine et a proposé en 2016 l'ouverture d'un groupe de travail sur les méthodes de calculs aux éléments finis appliquées au secteur de la construction. L'objectif principal de ce groupe de travail est de répondre à un besoin récurrent, fréquemment exprimé : avoir un document pédagogique, à destination, notamment, des jeunes ingénieurs en bureau d'études TP/GC, sur l'exemple des anciens guides du SETRA, traitant de la modélisation aux éléments finis (barres, plaques, coques, ...) de structures de génie civil.

L'analyse des éléments finis est un sujet fondamental que tous les ingénieurs des grandes entreprises et bureaux d'ingénierie doivent comprendre pour en faire des outils de conception indispensables.

Ce document fournit un traitement introductif de l'analyse des éléments finis avec un aperçu des différents concepts et applications. Il introduit les concepts de base de la méthode des éléments finis et des exemples d'analyse à l'aide de méthodologies systématiques. Les concepts d'éléments finis impliquant des problèmes unidimensionnels sont discutés en détail afin que le lecteur puisse bien comprendre les concepts et progressivement s'appuyer sur ces problèmes pour l'aider à analyser les problèmes bidimensionnels et tridimensionnels.

Parce que ce domaine est en évolution perpétuelle l'AFGC n'a pas souhaité figer le document sous forme de recommandations comme à son habitude mais a proposé pour la première fois un format numérique qui se veut évolutif dans le temps. Il ne s'agit donc pas de recommandations prénormatives comme pour de nombreux guides de l'AFGC mais d'un document d'aide à la compréhension et de la bonne pratique des éléments finis dans le secteur de la construction.

Le CST de l'AFGC tient à remercier les animateurs du groupe de travail, **Claude Le Quéré et Didier Guth, et tous les participants qui par leur travail ont rendus possible la publication de ce document.**

From:

<https://wiki-gtef.frama.wiki/> - **Bilan du Groupe de Travail AFGC sur les éléments finis**

Permanent link:

<https://wiki-gtef.frama.wiki/accueil-gtef:edito2>

Last update: **2020/05/26 11:24**



Contenu du guide

Ce travail collaboratif élaboré par des praticiens confrontés dans leur quotidien à l'utilisation des éléments finis se destine avant tout à un public sortant juste des écoles d'ingénieurs, où souvent seules les bases du calcul EF ont été enseignées, ou en début de carrière. Il vise à répondre à certains questionnements récurrents (par exemple la taille des mailles, comment lisser les pics, ...), à éviter certains pièges et à préciser ce que ne font pas les éléments finis.

Le contenu de ce site se veut évolutif. Le Groupe de Travail est preneur de toute proposition de correction et de contenu complémentaire, notamment des exemples pour compléter la Partie 3. Pour cela, le lecteur pourra se rendre sur la [page des commentaires](#) ou nous écrire à elements.finis@afgc.asso.fr

Les trois parties peuvent être consultées indépendamment.

On trouvera tout d'abord dans la partie 1 les éléments théoriques.

Seront abordés successivement :

- Le chapitre 1 concerne les généralités sur la méthode ;
- Le chapitre 2 développe les concepts des calculs aux EF en dynamique ;
- Le chapitre 3 décrit les calculs statiques non linéaires ;
- Le chapitre 4 traite de la modélisation des matériaux de génie civil et des questions de prise en compte du phasage ;
- Le chapitre 5 explicite pourquoi des post-traitements sont nécessaires pour traduire la spécificité du « matériau composé » que constitue le béton armé ;
- Enfin le chapitre 6 montrera l'utilisation possible de la méthode des éléments finis dans les problèmes géotechniques La suite du document ne traite plus de ce sujet spécifique

La partie 2 donne ensuite les éléments à mettre en place dans une étude de structure avec la méthode des éléments finis.

Deux raisons amènent l'ingénieur à procéder par étapes itératives, et en menant différentes étapes de contrôle, et des traitements spécifiques :

- Tout d'abord le fait que les méthodes de calcul des éléments finis, découlant des hypothèses de la RDM, et ne sont pas systématiquement compatibles avec les [méthodes de]calcul réglementaires C'est le cas du béton armé, où le diagramme règlementaire de déformations des sections n'est pas celui représenté par les éléments finis, et où le règlement prévoit des opérations que tous les logiciels ne prennent pas en compte (largeurs participantes, décalage de la courbe des moments lié au fonctionnement en bielles, prise en compte de la fissuration, ...), ou encore du métal, où il y a également des écarts entre le calcul réglementaire des assemblages ou des instabilités et les résultats que peuvent donner des calculs éléments finis trop précis ;
- Ensuite le fait que le calcul théorique se base sur des éléments homogènes et ne traite pas directement tels que le béton armé. Dans ce cas, des post-traitements sont nécessaires pour traduire le comportement spécifique du béton et de l'armature. Une attention toute particulière doit être apportée aux cartographies de ferrailage (surtout pour les voiles) qui peuvent donner l'illusion que le logiciel fait un calcul règlementaire alors que ce n'est pas toujours le cas ;

La partie 2 donne en préalable des conseils pour entreprendre l'étude d'une structure avec les EF. Ensuite, il présente dans son premier chapitre les objectifs des calculs à mener et dans le second chapitre la modélisation de la structure, en s'attachant à détailler les différents matériaux, le

traitement des interfaces, (compléter), dans les différents types de calcul, du plus simple au plus complexe. Le troisième chapitre traite de l'exploitation des résultats. Enfin, les deux derniers chapitres reviennent dans le détail sur les vérifications à mener pour valider les résultats et la présentation finale de la note de calcul qui rendra compte du travail effectué, de la bonne prise en compte des objectifs de service de la construction et des phases intermédiaires de construction, et enfin de sa conformité aux règlements en vigueur.

A toutes les étapes, et en se basant sur des exemples, les auteurs se sont employés à montrer les précautions à prendre dans les simplifications, les contrôles à mener pour s'assurer de la validité des hypothèses et obtenir, comme recherché, une modélisation et des résultats qui traduisent au plus près de la réalité le comportement de la structure étudiée.

Les auteurs

Ce guide a été rédigé entre 2016 et 2019 dans le cadre du Groupe de Travail sur les Éléments Finis de l'Association Française de Génie Civil (AFGC). Un grand remerciement à tous les contributeurs de ce groupe, rédacteurs et relecteurs. Ce guide est publié en ligne de manière à pouvoir recueillir les remarques, observations, questions des utilisateurs.

Pilotes généraux du guide : C. Le Quéré (Egis) et D. Guth (Arcadis)

Pilotes de la partie 1 : G. Hervé-Secourgeon (EDF R&D) et P. Bressolette (UCA)

Auteurs principaux des différents chapitres :

- Chapitre 1 : P. Bressolette (UCA), L. Adelaide (IFSTTAR), L. Jouval (ARTELIA)
- Chapitre 2 : G. Hervé-Secourgeon (EDF R&D)
- Chapitre 3 : S. Michel-Ponnelle (EDF R&D)
- Chapitre 4 : J.-J. Brioist (CEREMA), H. Somja (INSA de Rennes), M. Scalliet (CERIB)
- Chapitre 5 : G. Hervé-Secourgeon (EDF R&D)
- Chapitre 6 : Leopoldo Tesser (GDS), S. Burlon (IFSTTAR)

Contributeurs et relecteurs des différents chapitres :

- Chapitre 1 : G. Hervé-Secourgeon, S. Michel-Ponnelle, J.-J. Brioist, L. Adelaide, J. Waeytens (IFSTTAR)
- Chapitre 2 : P. Bressolette (UCA), S. Michel-Ponnelle (EDF R&D)
- Chapitre 3 : J.-J. Brioist (CEREMA), H. Somja (INSA de Rennes)
- Chapitre 4 : G. Hervé-Secourgeon (EDF R&D), S. Michel-Ponnelle (EDF R&D)
- Chapitre 5 : P. Bressolette (UCA), Yury Shaparevich (EGIS)
- Chapitre 6 : E. Bourgeois (IFSTTAR)

Pilotes de la partie 2 : S. Juster (CPA Experts), D. Guth (Arcadis) et C. Le Quéré (Egis)

Auteurs principaux de cette partie 2 :

- Arnaud Bouard (SCE)
- Franck Dubois (VINCI Construction France)
- Christian Gallois (Areva)
- Didier Guth (Arcadis)

- Landry Jouval (Artelia)
- Sandrine Juster-Lermitte (CPA Experts)
- Claude Le Quéré (Egis)
- Emilie Leroux (Tractebel Engineering)
- Pascal Mangin (CTICM)
- Pierre Mazurelle (Arcadis)
- Jean Michalewicz (ETPO)
- Gildas Potin (Tractebel Engineering)
- Vincent Rousseau (Bouygues TPRF)

Relecture de la partie 2 :

- Valentina Bruno (Setec tpi)
- Olivier Cheray (A.Aegerter & Dr.O.Bosshardt AG - Ingenieure und Planer)
- Yavuz Demir (CTE Strasbourg)
- Franck Dubois (VINCI Construction France)
- Sylvie Ezran (Setec tpi)
- Didier Guth (Arcadis)
- Sébastien Miossec (VINCI Construction France)

* Vous? Nous cherchons des volontaires !

Relecteurs des parties 1 et 2 :

- Fabien Coulon (VINCI Construction Grands Projets)
- Thierry Kretz (Ifsttar)
- Michel Marchetti (Formule Informatique)
- Stéphane Velin (VINCI Construction Grands Projets)

Pilote de la partie 3 : Christian Gallois (ex-Areva)

Auteurs principaux de cette partie 3 :

- Valentina Bruno (Setec tpi)
- Jacques Combescure (Artès)
- Franck Dubois (VINCI Construction France)
- Sylvie Ezran (Setec tpi)
- Samy Guezouli (INSA de Rennes)
- Didier Guth (Arcadis)
- Pierre Perrin (Dir Est)
- Albert Lepeltier (Setec tpi)
- Aymeric Perret du Cray (Setec tpi)
- Thierry Richard (VINCI Construction France)
- Hughes Somja (INSA de Rennes)
- Benjamin Tritschler (Arcadis)

[A suivre : Introduction du guide](#)

[Retour à l'accueil](#)

From:

<https://wiki-gtef.frama.wiki/> - **Bilan du Groupe de Travail AFGC sur les éléments finis**

Permanent link:

<https://wiki-gtef.frama.wiki/accueil-gtef:preambule>

Last update: **2020/07/03 17:07**



Laissez nous vos commentaires pour nous permettre d'améliorer le site

Ce peut être :

- un point de désaccord ;
- une proposition d'une meilleure formulation ;
- une proposition de références bibliographiques ;
- une proposition de lien vers une page Internet pertinente ;
- un exemple concret, illustré ou non ;
- une question.

Merci de laisser vos commentaires sous la forme suivante :

Date	Nom	Moyen de vous contacter (facultatif)
Partie 1	Chapitre A3.3	Mon commentaire
Partie 2	Chapitre Ex	Mon commentaire
Partie 3	Exemple y	Mon commentaire

A vous de jouer

Date	Nom	Moyen de vous contacter (facultatif)
Partie 1	Chapitre A3.3	Mon commentaire
Partie 2	Chapitre Ex	Mon commentaire
Partie 3	Exemple y	Mon commentaire
Date	Nom	Moyen de vous contacter (facultatif)
Partie 1	Chapitre A3.3	Mon commentaire
Partie 2	Chapitre Ex	Mon commentaire
Partie 3	Exemple y	Mon commentaire

ou de nous envoyer un mail à elements.finis@afgc.asso.fr

From:

<https://wiki-gtef.frama.wiki/> - **Bilan du Groupe de Travail AFGC sur les éléments finis**

Permanent link:

<https://wiki-gtef.frama.wiki/accueil-gtef:commentaires>

Last update: **2020/06/19 17:24**



Introduction générale du guide

Les projets de construction de génie civil nécessitent de justifier les ouvrages vis-à-vis d'un ensemble de risques identifiés sur la base d'un référentiel technique, s'appuyant en principe sur une réglementation en vigueur ou bien choisie par le maître d'ouvrage. Pour cela les ingénieries procèdent à des études de conception et d'exécution avec des niveaux plus ou moins affinés en fonction de la complexité de l'ouvrage et du stade d'avancement du projet. De plus, en matière de génie civil, il s'agit d'en étudier les aspects structurels, en tenant compte des diverses interactions possibles en fonction de leur prédominance.

Performance structurale

La modélisation et les éléments finis sont des outils au service de l'évaluation de la performance structurale pour la conception et la vérification des projets d'ouvrages de génie civil qui peuvent concerner la construction d'ouvrages neufs, ou encore la réutilisation ou la réhabilitation d'ouvrages existants. Ainsi, la modélisation et les éléments finis répondent avant tout à un besoin, et ne sont pas une fin en soi.

L'appellation « performance structurale » désigne la capacité de la structure à remplir les exigences pour lesquelles elle est conçue, qui se répartissent en trois catégories :

- la sécurité structurale, qui assure la résistance de la structure aux actions prévues en situation normale ainsi que sa robustesse en situation exceptionnelle ;
- l'aptitude au service, qui assure le maintien de l'exploitation de la structure ;
- la durabilité, qui décrit l'aptitude de la structure à demeurer en état d'accomplir ses performances de sécurité structurale et d'aptitude au service dans des conditions données d'utilisation et de maintenance sur une durée de service définie.

L'évaluation de la performance structurale des ouvrages neufs ou existants s'appuie sur la théorie de la fiabilité, et peut se traiter par différentes approches d'évaluation :

- déterministe (toutes les données sont supposées complètement connues),
- probabiliste (les données sont entachées d'incertitudes et sont représentées par des variables ou fonctions aléatoires)
- ou encore semi-probabiliste (reposant sur les notions d'état limite et de coefficients partiels de sécurité).

Analyse structurale

En génie civil, l'évaluation de la performance structurale se traite par une approche semi-probabiliste selon la méthode dite des états limites, comme par exemple proposée par les Eurocodes qui permettent de traiter la plupart des cas d'ouvrages. On parle alors d'analyse structurale, qui est une notion fondamentale des Eurocodes.

L'analyse structurale se fait sur la base d'une modélisation qui résulte d'une réflexion de l'ingénieur et de choix d'hypothèses, en tenant compte des données disponibles (à défaut poser des hypothèses les plus pertinentes possibles, et les vérifier par la suite) : il s'agit en d'autres termes de « bien poser le problème » à résoudre et de définir le système à étudier.

L'analyse structurale est un processus par lequel l'ingénieur établit une représentation simplifiée de la structure mais reproduisant le mieux possible le comportement mécanique de celle-ci.

Modélisation

Selon l'Eurocode, la modélisation structurale doit impliquer des calculs qui doivent être effectués à l'aide de modèles appropriés incluant les variables concernées. Il convient que les modèles structuraux permettent de prédire le comportement structural avec un niveau de précision acceptable. Il convient également que les modèles structuraux soient appropriés aux états-limites considérés, et ce pour chaque étape du projet. Les modèles structuraux utilisés doivent être fondés sur une théorie et une pratique établie, et être vérifiés expérimentalement si besoin est.

La modélisation est donc une démarche, ou encore un processus, qui consiste à concevoir et établir un modèle. Selon ses objectifs et les moyens utilisés, la modélisation peut être menée suivant des approches et des méthodologies distinctes. Il s'agit de représenter un objet ou un phénomène réel extrait de son environnement en le simplifiant par un système isolé suivant un concept ou bien une théorie. Il est construit à partir des phénomènes physiques mis en jeu, et intègre par conséquent les lois de la physique. Cela se traduit par le choix de lois de comportement formulées selon des équations mathématiques adaptées pour chaque matériau et chaque partie d'éléments structurels de l'ouvrage à analyser ; cela conduit donc à résoudre des systèmes d'équations complexes de la mécanique des milieux continus, formulées sous forme d'équations aux dérivées partielles.

La principale spécificité des calculs de génie civil, au regard d'autres domaines de l'ingénierie, tient à la nécessité de prendre en compte des phases de construction, telles que le déblaiement ou le remblaiement, la prise d'un massif de béton, la fixation d'une lierne, la mise en tension ou l'ancrage de câbles. La modélisation traduit ces événements dans le langage de la statique, de différentes façons : par une reprise de calcul avec des contraintes internes (« contraintes initiales »), le changement de raideur de certains éléments (passage d'une raideur nulle à une raideur positive), la disparition ou le changement de nature de certains appuis, des changements de point d'application des chargements, etc.

Les « structures modernes » du génie civil (celles d'après la première révolution industrielle) présentent des caractéristiques favorables à leur calcul : géométrie régulière, motifs répétés, qualité des matériaux de construction (par conformité aux « normes produit »). Elles sont néanmoins affectées par une multitude de facteurs peu ou pas contrôlables : facteurs d'ambiance, comme la nature des terrains sur lesquels elles sont fondées, qualité de leur réalisation, puisque la mise en œuvre des matériaux de construction s'opère parfois dans des conditions d'accès ou dans un contexte météorologique défavorables (sensibilité de certains matériaux comme le bois à l'humidité qui impacte les dimensions et les caractéristiques mécaniques en situations normale (créations de jeux, de frettages...) ou comme l'acier avec la température en situation d'incendie...), enfin vieillissement hétérogène de leurs différentes parties.

Face au problème du dimensionnement ou de la vérification de l'équilibre des constructions réelles, le calcul des structures repose sur des modélisations, c'est-à-dire des simplifications de constructions réelles : modèles de matériaux, hypothèses cinématiques idéales (liaisons parfaite, bilatérales, indépendantes des réactions), et même sélection arbitraire de ce que l'on fait intervenir dans l'équilibre des constructions (en ne prenant pas en compte certaines parties des édifices, ou en négligeant la participation de certains composants matériels). Ces simplifications impliquent naturellement que les résultats des calculs n'ont qu'un rapport contingent avec les constructions réelles, dans leur environnement. Les résultats d'une modélisation doivent, par conséquent, toujours être examinés avec un regard critique, y compris en remontant aux hypothèses plus ou moins explicites sur lesquelles elle s'est appuyée : avant tout, une isolation du système de son environnement, puis la sélection d'un modèle mathématique et d'une méthode de résolution...

Les solutions exactes étant très rares (limitées à quelques cas d'école), on est amené dans la pratique

à procéder à une résolution par utilisation de méthodes approchées :

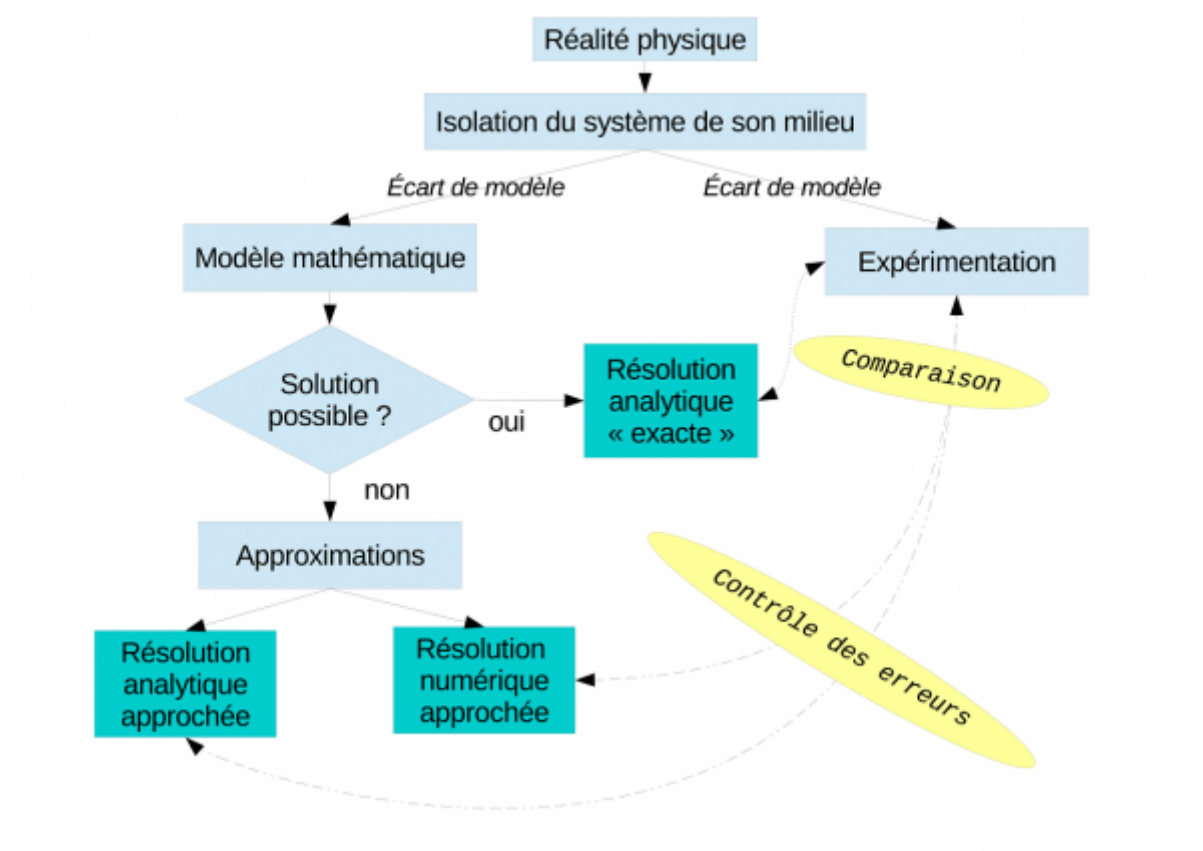
- soit de type analytique : par exemple par utilisation de la Résistance des Matériaux (RdM) pour laquelle des considérations géométriques amènent à simplifier la résolution du problème tridimensionnel à un problème bidimensionnel (feuillet moyen des plaques et coques) ou monodimensionnel (fibre moyenne des poutres) ...
- soit de type numérique : méthode des éléments finis (MEF), différences finies ...

Afin de valider les résultats obtenus, une comparaison avec des mesures expérimentales peut être réalisée. Il est important de souligner que différentes sources d'erreur sont présentes dans cette comparaison. On peut notamment distinguer :

- l'erreur de modèle, provenant de la simplification du problème réel par un modèle simplifié,
- l'erreur de discrétisation, due à la résolution numérique du problème,
- l'erreur de mesure, liée à l'instrumentation et à la prise de mesure,

les résultats obtenus étant, dans le cas idéal, à comparer aux mesures expérimentales, pouvant être elles-mêmes entachées d'erreurs... Il est de plus possible de combiner les deux familles de méthodes approchées : MEF en théorie des poutres, différences finies en théorie des plaques...

La simplification doit permettre de résoudre le problème afin d'évaluer numériquement les effets (efforts, contraintes, déplacements) des différentes sollicitations vues par la structure. Elle doit néanmoins coller le mieux possible avec la structure réelle.



Du problème à sa résolution approchée

Méthode aux éléments finis

La méthode aux éléments finis (MEF) est avant tout un outil de modélisation, qui permet la résolution

numérique approchée des problèmes posés à base d'équations aux dérivées partielles. La méthode des éléments finis est applicable aux ouvrages de génie civil, dans la mesure où les matériaux des constructions modernes, comme l'acier ou le béton, permettent l'hypothèse de matière continue, hypothèse structurante pour la formulation des éléments finis. Cela suppose qu'avant son emploi, l'ingénieur a procédé à une première réflexion sur son utilisation dans ses études, et qu'il est conscient de la démarche de modélisation.

La MEF est une méthode numérique générale permettant de traiter des problèmes réels (« industriels ») de différents domaines (mécanique des solides, des fluides, thermique...) sur des milieux continus, en statique ou dynamique, linéaire ou non-linéaire, ainsi que des problèmes couplés : thermo-mécanique (structure en situation d'incendie), fluide-structure (vibrations d'un réservoir contenant un liquide), chimie-mécanique (prise en compte de la corrosion des armatures dans le béton armé) ... Son essor est lié à celui de l'informatique depuis les années 1980 et a donné lieu à la création d'un grand nombre de logiciels. Ce guide ne traite que de l'utilisation des éléments finis, mais cette méthode n'est naturellement pas la seule technique en calcul de structure : outre certaines approches traditionnelles comme la statique graphique, l'emploi d'abaques ou les techniques analogiques sur maquettes (reconnues par les Eurocodes structuraux), on dispose aujourd'hui de bien d'autres outils (méthodes spectrales, éléments de frontière (BEM), éléments discrets, etc.), certains encore proches de la recherche, mais la MEF est la plus générale et la plus utilisée dans la pratique, ayant eu un grand essor lié à l'essor de l'informatique depuis les années 1980 et donné lieu à la création d'un grand nombre de logiciels.

D'une manière très globale, le principe général de la MEF peut être résumé de la façon suivante : le domaine d'étude, de forme a priori complexe, est découpé (discrétisé) en un grand nombre de sous-domaines de formes simples (les **éléments finis**) sur lesquels sont distingués des points (les nœuds) : on définit de la sorte un **maillage**. La solution approchée du problème n'est calculée qu'aux nœuds (solution discrète), la solution approchée continue sur le domaine étant obtenue en tout point par interpolation des valeurs aux nœuds.

Plus précisément, les différentes étapes de la MEF sont :

1. Discrétisation de la structure en un ensemble de nœuds reliés par des éléments de comportement connu. Établissement du vecteur colonne déplacement D , regroupant les N degrés de libertés de la structure. Les degrés de liberté sont les déplacements (translations et rotations, selon le type de modélisation) possibles de la structure. Ce sont les inconnus du problème, qui se traite donc dans l'espace R^N
2. Établissement du comportement des éléments. Ce comportement comporte deux parties :
 1. La détermination des forces de déplacement f_{ed} : ce sont les forces exercées par les nœuds reliés à l'élément sur cet élément, pour lui imposer leur déplacement d_e . La relation est établie dans un repère local propre à l'élément, puis transposée dans l'espace des degrés de liberté : $F_{eD} = K_e \cdot D_e$. On peut reprendre ici la relation donnée en 1 p 8, mais dans un but didactique, il peut être préférable de traiter séparément la question du comportement unitaire des éléments (qui relève d'une sorte de bibliothèque comportementale dans laquelle on vient piocher)
 2. La détermination des forces de blocage f_{eb} : ce sont les forces exercées par les nœuds sur un élément directement chargé, pour l'empêcher de bouger ; les nœuds jouent ici un rôle virtuel d'appui pour l'élément, et on détermine les réactions d'appui, d'abord dans un repère local de l'élément, f_{eb} , puis dans l'espace des degrés de liberté : F_{eB}
3. Assemblage. Établissement de la matrice de rigidité de la structure et des forces exercées par les nœuds sur les éléments en raison de leur chargement. Ceci se fait par addition, dans l'espace R^N pour les vecteurs et $R^N \times R^N$ pour les matrices, des matrices de rigidité élémentaires

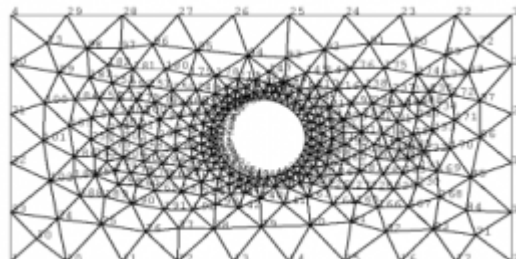
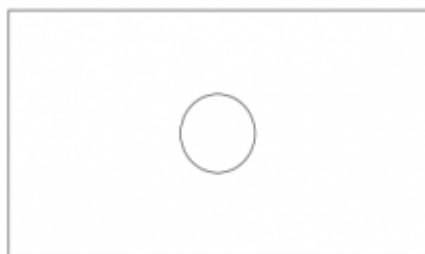
et des forces de blocage : $K = \sum K_e$ et $F_B = \sum F_{Be}$

4. Écriture et résolution de l'équation en déplacements, qui est en fait l'équation d'équilibre des nœuds. Les nœuds exercent sur les éléments des forces pour leur imposer un déplacement D (KD) et des forces de blocage en réaction des charges directement appliquées sur les éléments (F_B). Les nœuds peuvent être soumis à des forces extérieures qui seraient directement appliquées aux nœuds (F_N), comme les réactions d'appui par exemple. L'équation général s'écrit : $KD = F$ (avec $F = F_N - F_B$)

5. Résolution : calcul des déplacements : $D = K^{-1}F$. On pratique, on doit distinguer les degrés de liberté dont les valeurs sont connues (les appuis) des autres. On note D_1 les degrés de liberté inconnus et D_2 les degrés de liberté connus et on organise l'espace des degrés de liberté en

mettant d'abord ceux qui sont inconnus. L'équation générique s'écrit alors $\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix}$. Dans cette équation, F_1 et D_2 sont connus. On détermine donc $D_1 = K_{11}^{-1}(F_1 - K_{12}D_2)$ puis F_2 .

6. Connaissant les déplacements, on peut déterminer les efforts sur les éléments en revenant sur les équations de comportement élémentaire de chaque élément.



Géométrie et maillage (éléments finis triangulaires et nœuds)

Le présent guide s'attache à décrire les outils disponibles couramment dans les programmes de calcul de structures par éléments finis, en statique et en dynamique. Pour des raisons de place et de clarté, nous avons choisi de laisser de côté les problèmes d'écoulements interstitiels, malgré leur grand intérêt en géotechnique ; du point de vue des difficultés de modélisation, ce champ d'application, couvert lui aussi par la méthode des éléments finis, pose des problèmes tantôt analogues à ceux que l'on rencontre en dynamique des structures (choix du pas de temps), tantôt en élastoplasticité (contrastes de perméabilité, frontière entre zone saturée et non-saturée, etc.).

La méthode des éléments finis est un outil numérique de résolution numérique. La modélisation qui précède cette résolution peut s'appuyer sur l'ensemble des principes de l'analyse structurale qui préexistaient.

[A suivre : Partie I - Éléments théoriques](#)

[Laissez vous vos commentaires pour améliorer le site !](#)

[Retour à l'accueil](#)

From:

<https://wiki-gtef.frama.wiki/> - **Bilan du Groupe de Travail AFGC sur les éléments finis**

Permanent link:

<https://wiki-gtef.frama.wiki/accueil-gtef:intro>

Last update: **2020/07/03 17:08**

