



HAL
open science

Développement d'outils de calculs innovants dans l'ingénierie de génie civil

Jeremy Bleyer, Mathieu Arquier, Agnès Fliscounakis

► **To cite this version:**

Jeremy Bleyer, Mathieu Arquier, Agnès Fliscounakis. Développement d'outils de calculs innovants dans l'ingénierie de génie civil. *Transitions. Les nouvelles Annales des Ponts et Chaussées*, 2022, Bâtiments et construction en transition, 2, pp.54-59. hal-03976385

HAL Id: hal-03976385

<https://enpc.hal.science/hal-03976385>

Submitted on 17 Apr 2023

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.

Développement d'outils de calculs innovants dans l'ingénierie de génie civil

Le dimensionnement des ouvrages de génie civil repose, depuis longtemps, sur l'utilisation de méthodes numériques. Néanmoins, la pratique qu'en font actuellement les ingénieurs reste encore très limitée et ne permet pas d'évaluer précisément le comportement des ouvrages à la ruine. Il en résulte une mauvaise estimation de la marge de sécurité disponible, conduisant bien souvent au surdimensionnement de l'ouvrage. Les évolutions récentes que connaît le secteur de la construction questionnent donc le besoin d'outils numériques plus robustes et plus pertinents, notamment, pour répondre au défi écologique. Cet article dresse un panorama de cet usage et met en lumière les outils récents développés grâce à une collaboration entre le monde académique et celui de l'ingénierie.

Designing civil engineering structures has long involved the use of digital methods. Nevertheless, the way in which engineers apply said methods nowadays remains very limited and does not allow for a precise assessment of how a structure will behave in the event of failure. This results in a poor estimate of the safety margin available, often leading to oversizing of the structure. Recent developments in the construction world therefore raise questions about the need for more robust and relevant digital tools, in particular to meet environmental challenges. This article provides an overview of the use of these tools and explores recent developments in this area, made in collaboration between researchers and engineers.



Jérémie Bleyer

Chercheur,
Laboratoire Navier,
École des Ponts
ParisTech

Diplômé de l'École polytechnique et ingénieur des ponts, des eaux et des forêts, Jérémie Bleyer est titulaire d'un doctorat en mécanique des structures de l'université Paris-Est. Actuellement, chercheur au laboratoire Navier de l'École des Ponts ParisTech, il y est également maître de conférences depuis 2019 et professeur assistant à l'École polytechnique depuis 2020. Ses travaux de recherche portent sur le développement des modèles mécaniques avancés et des outils de simulation innovants pour l'étude de la rupture des matériaux et des structures, avec des applications au domaine du génie civil principalement. Il est impliqué dans l'encadrement de plusieurs thèses académiques et industrielles (Strains, Dassault Aviation, EDF).



Mathieu Arquier

Ingénieur structures,
Cofondateur de
Strains

Diplômé de l'École polytechnique et de l'École des Ponts ParisTech, Mathieu Arquier commence sa carrière en tant qu'ingénieur structures chez Setec tpi. En 2014, il cofonde la société Strains, pour laquelle il intervient sur des grands projets d'ouvrage d'art ou de bâtiments complexes. Il a également participé au développement de la suite logiciel Digital Structure vouée à des calculs volumiques locaux (connexion métallique, pièces massive en béton armée ou maçonnerie, etc.). Enseignant à l'ENPC depuis 2010, il est actuellement responsable du module Dynamique des structures et des ouvrages. En 2012, il reçoit une *Honorary Mention* de l'European Federation of Engineering Consultancy lors de la "Young Professional Competition" pour son travail sur le Pont de Ruskky et le prix AFGC en 2021.



Agnès Fliscounakis

Ingénieure structures,
Cofondatrice de Strains
Professeure associée,
Institut national des
Sciences appliquées de
Rennes (INSA)

Diplômée de l'École polytechnique, Agnès Fliscounakis intègre Setec tpi dès 2010. En tant qu'ingénieure chargée d'études, elle travaille sur des projets d'ouvrages de types variés, dans le cadre d'études techniques à forte composante scientifique. En 2014, elle cofonde la société Strains et participe, notamment, au développement de la suite logiciel Digital Structure. De 2011 à 2017, elle enseigne la plasticité et le calcul à la rupture à l'École des Ponts ParisTech, avant de rejoindre l'INSA de Rennes en 2020, en tant que professeure associée en service temporaire.

L'INDUSTRIE de la construction connaît actuellement une profonde évolution. En effet, si les nouvelles constructions tendent à diminuer par rapport à la période d'après-guerre, elles deviennent de plus en plus complexes, en termes de géométrie ou de matériaux utilisés. Elles imposent donc aux métiers de l'ingénierie civile un changement de paradigme, passant d'une production « industrielle » d'infrastructures à la création d'ouvrages singuliers. Les différents enjeux environnementaux ou économiques incitent à poser la question du « comment construire mieux ? », moins cher, plus esthétique, plus vite ? Les réglementations, notamment, environnementales, évoluent et font également émerger de nouvelles contraintes en termes de consommation de matériaux.

De plus, le parc de structures déjà existantes vieillit. La plupart des acteurs publics et privés doivent se positionner en tant que gestionnaire d'infrastructures à maintenir autant qu'à concevoir. Gérer un patrimoine bâti présente de nombreux défis. Par exemple, pour faire face à une modification d'usage ou à une pathologie, est-il préférable de renforcer/réparer ou de détruire/reconstruire ? Les enjeux économiques et environnementaux associés à ces choix sont évidemment très importants. Une difficulté supplémentaire est également liée à l'incertitude afférente au patrimoine bâti. Comment l'ouvrage a-t-il été construit ? Quel est son état de dégradation et quelle a été son histoire de chargement ? Comment va-t-il répondre aux évolutions climatiques ? L'ingénieur doit désormais pouvoir justifier du niveau de résistance de la structure à une augmentation de charges ou à une dégradation de ses capacités, et non plus seulement, savoir si les normes sont respectées (éventuellement avec des marges importantes). Ces différents aspects induisent une pression très forte sur l'aptitude à évaluer, avec une précision accrue, les véritables limites de capacité des structures. Le cas de l'industrie nucléaire en est une bonne illustration. Elle doit adapter, à grands frais, ses infrastructures à des hypothèses (séismes, inondations, etc.) toujours plus contraignantes, notamment, suite à la catastrophe de Fukushima.

Dans tous les pays désormais, les normes de construction modernes définissent des « états limites » dont le plus important, « l'état limite ultime » (ELU), correspond à l'effondrement, c'est-à-dire, la ruine de la structure. Bien qu'essentielle, cette définition n'a pas, faute de moyens numériques adaptés, été totalement intégrée aux pratiques de l'ingénierie. L'usage général actuel revient à démontrer que ces états limites ultimes ne peuvent pas être atteints, mais sans les déterminer précisément, et donc, sans évaluer les marges de dimensionnement, souvent considérables.

Cet article dresse un bilan des travaux récents portant sur le développement de nouveaux outils numériques de calcul de structures, à la fois, fiables du point de vue de la qualité du résultat, efficaces, au niveau du temps de calcul et simples d'utilisation dans la pratique de l'ingénieur.

Outils numériques et logiciels pour le calcul de structures

Dans les années 1980, la profession du génie civil s'est dotée d'outils de calcul numérique essentiellement fondés sur la méthode des éléments finis. La base de ces calculs repose sur l'hypothèse d'un fonctionnement linéaire de la structure et de ses matériaux constitutifs. Ces calculs ne permettent pas de simuler la ruine structurelle, par écoulement plastique, instabilité, fissuration, etc. Les très nombreux « post-traitements » alors développés répondent partiellement à ces questions. Ces surcouches consistent généralement à implémenter des méthodes manuelles de vérification locale de résistance, qui, par la suite, génèrent, de manière automatique, des plans de structure ou des notes de calcul. Pour autant, bien que rassurantes pour l'ingénieur, elles ne reviennent pas sur les hypothèses de départ – à savoir, un comportement linéaire. Or, celles-ci offrent comme données d'entrée à la chaîne de conception des efforts incohérents avec la réalité physique des matériaux.

Enfin, malgré les efforts d'automatisation évoqués ci-dessus, le dimensionnement de structures complexes, notamment lorsque certains détails sont atypiques ou de conception ancienne, repose encore beaucoup sur des analyses manuelles fastidieuses. Généralement réalisées selon des méthodes très anciennes qui ne sont plus enseignées, elles sont d'application très difficile (et parfois non maîtrisée) pour les nouvelles générations d'ingénieurs.

L'approche du calcul à la rupture pour le dimensionnement aux ELU

En 1773, Charles-Augustin Coulomb publie un texte fondateur, dans lequel il combine les conditions d'équilibre sous un certain chargement, à celles relatives à la résistance du matériau constitutif (Coulomb, 1773). Il pose ainsi les bases conceptuelles de la théorie du « calcul à la rupture » qu'il applique à divers problèmes d'ingénierie (compression d'une colonne, stabilité d'un mur de soutènement, d'une voûte en maçonnerie, etc.). Ces concepts sont encore aujourd'hui à la base de nombreux principes de dimensionnement à la ruine des ouvrages ou des massifs géotechniques. Néanmoins, leur utilisation dans la pratique courante de l'ingénieur reste généralement cantonnée à une méthode de calcul manuelle spécifique, propre à un matériau ou à un type de structure. Le seul cours sur le sujet – à une ou deux exceptions près – est dispensé par l'École des Ponts ParisTech (en deuxième année de la formation d'ingénieur en génie civil). Il succède à celui initié par Jean Salençon dans les années 1980, qui a contribué à une mise en cohérence rigoureuse de cette approche, indépendamment d'un domaine d'application spécifique (Salençon, 1983). Jusqu'à récemment, les difficultés de mise en œuvre numérique ont empêché la création d'outils de calcul à la rupture véritablement automatiques. De fait, la profession s'est orientée vers des outils exclusivement destinés au calcul élastique, comme mentionné précédemment.

Avancées récentes de la recherche académique

La mise en œuvre de cette approche est difficile car les problèmes numériques du calcul à la rupture sont formulés comme des problèmes d'optimisation convexe, non différentiables et de très grande dimension. Or, de récents travaux de recherche ont montré qu'ils bénéficient d'une structure particulière. De fait, ils peuvent être formulés comme des problèmes dits « d'optimisation conique » (Bleyer, Hassen, 2021 ; Makrodimitopoulos, 2010). Fréquents dans d'autres domaines d'application (finance, gestion de réseaux électriques, *supply chain*, etc.), ces derniers ont fait l'objet d'avancées importantes grâce aux mathématiques de l'optimisation. Des solveurs très efficaces sont aujourd'hui disponibles et permettent de résoudre des problèmes de très grande taille de façon extrêmement robuste.

Les travaux de recherche en mécanique des structures se sont également attachés à développer diverses stratégies de discrétisation du problème de calcul à la rupture par la méthode des éléments finis (Krabbenhøft, Lyamin, Sloan, 2008 ; Makrodimitopoulos, Martin, 2007). En effet, il est possible, en découpant la structure en un maillage de différents éléments (triangulaires ou tétraédriques), de raisonner sur le champ de contrainte régnant à l'intérieur de la structure et équilibrant un certain chargement. Est alors obtenue une estimation sécuritaire de la charge maximale supportable par la structure sous ce chargement, compte-tenu des propriétés de résistance des différents matériaux la constituant. Du point de vue de l'ingénieur, cette approche conservatrice est très intéressante car elle permet, même avec un maillage grossier, et donc, un faible coût de calcul, d'aboutir à une estimation sécuritaire de la ruine de la structure. Il est également possible de raisonner sur un mécanisme de ruine potentiel de la structure qui fournit, quant à lui, une estimation par excès de la charge maximale. La combinaison de ces deux calculs permet alors d'obtenir un encadrement garanti de la charge supportable exacte et de renseigner sur le besoin, ou non, d'affiner le calcul.

Le laboratoire Navier de l'École des Ponts ParisTech développe ces approches des points de vue théorique et numérique, pour plusieurs types d'application : ouvrages géotechniques (sols renforcés) ou maçonnerie (Colas, Morel, Garnier, 2008), structures en béton armé ou métalliques, sécurité incendie (dans le cadre d'un partenariat avec le CSTB). Récemment, les travaux de thèse de Leyla Mourad (Mourad, Bleyer, Mesnil *et al.*, 2021) les ont également étendues au concept de l'optimisation de forme. Il s'agit de trouver une forme optimale de structure, permettant de maximiser sa capacité portante, pour un volume de matière minimal. Le principe de l'approche repose sur l'introduction d'un champ de densité fictive représentant, ou non, la présence du matériau à améliorer. Pour pouvoir utiliser les solveurs d'optimisation conique évoqués précédemment, il est nécessaire de recourir à des formulations originales préservant la convexité du problème. La formulation peut être enrichie en considérant, par exemple, deux matériaux différents, l'un, permettant de reprendre des efforts de traction, l'autre, ceux de compression. De plus, il est possible d'imposer, dans la formulation convexe, des orientations privilégiées à l'un des matériaux (par exemple, selon des directions verticales et horizontales uniquement). Grâce à ces travaux, on retrouve des résultats très proches des méthodes de dimensionnement traditionnelles dans les cas simples. Leur intérêt majeur consiste alors à rationaliser les modes de ferrailage de structures en béton armé dans les cas complexes pour lesquels les méthodes manuelles font défaut (cf. figure 1). Enfin, les travaux de recherche actuels se concentrent sur la prise en compte d'incertitudes (matériau, chargement) dans la détermination de la charge de ruine grâce aux avancées récentes en mathématiques de l'optimisation.

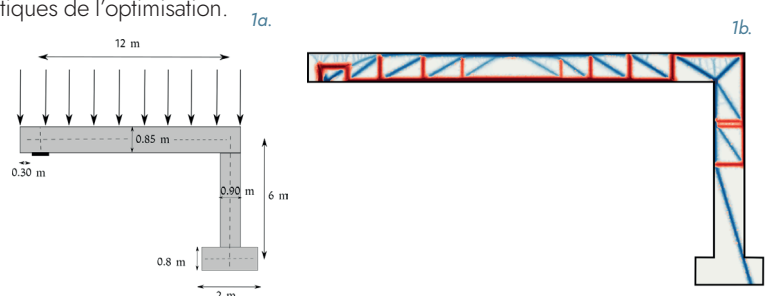


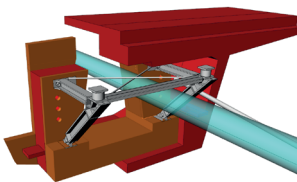
Figure 1a. Chargement d'un ensemble poutre-poteau ; 1b. Schéma optimal de bielles en béton (en bleu) et renforts d'aciers orthogonaux (en rouge) © Leyla Mourad, 2021.

Développement logiciel et transfert à l'ingénierie

Des applications aux structures de génie civil ont pu être développées grâce à des thèses CIFRE (convention industrielle de formation par la recherche), menées en partenariat avec la société Strains, spécialisée dans les ouvrages d'art, les structures complexes et le développement de logiciels de calculs de structures. Dans sa thèse, Hugues Vincent a, par exemple, appliqué ces méthodes au cas de structures massives tridimensionnelles en béton armé (Vincent, Arquier, Bleyer *et al.*, 2020). Ses travaux ont permis d'initier le développement d'un logiciel dédié à l'analyse de telles structures. De même, la thèse de Chadi El Boustani a porté sur l'analyse d'assemblages complexes de charpentes métalliques (El Boustani, Bleyer, Arquier *et al.*, 2020), prenant notamment en compte des aspects de contact (platines, boulons, *etc.*), d'élastoplasticité et de non-linéarités géométriques.

L'intégration de ces différents développements issus de partenariats académiques dans des outils métiers permet d'apporter des réponses rigoureuses à des questions complexes d'ingénierie, comme illustré par les deux exemples suivants.

2a.



Rénovation du pont de l'Île de Ré

Lors des travaux de rénovation du pont de l'Île de Ré, notamment le changement des câbles de précontraintes, un dispositif de transfert de

2b.

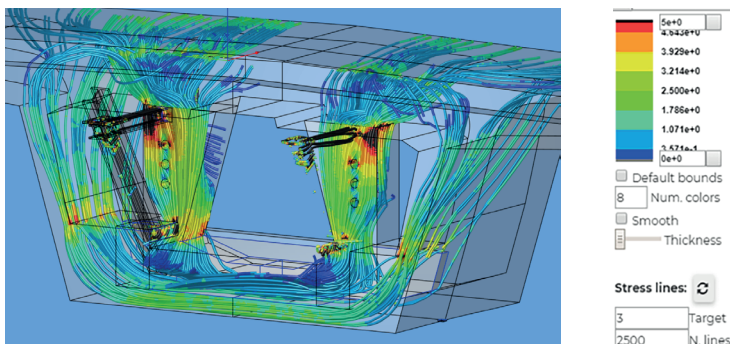


Figure 2. Rénovation du pont de l'Île de Ré

2a. Modèle 3D du dispositif de transfert de charge ; 2b. Flux de contrainte élastique en équilibre au droit du dispositif © Luciano Tosini/Strains, 2020.

charge au droit des articulations (cf. figure 2a) a dû être imaginé. N'étant pas prévu par la structure, il a nécessité des renforcements qu'il a fallu optimiser du fait du peu de place, tout en s'assurant d'un degré de sécurité suffisant. Après une première analyse classique en contrainte plane, une analyse plus fine à l'aide d'un modèle volumique, par un calcul élastique basé sur des éléments de type équilibre, a permis de calculer les efforts aux points critiques et de justifier les renforcements (cf. figure 2b). Si l'utilisation d'éléments de type équilibre est très rarement mise en œuvre car non proposée dans la grande majorité des codes de calculs, elle présente cependant de grands intérêts. Elle permet de donner accès à des flux de contrainte qui respectent, de façon forte, l'équilibre, d'obtenir un résultat conservateur et d'encadrer l'erreur résultant de la discrétisation.

Terminal 2F de l'aéroport Roissy Charles-de-Gaulle

Le nouveau salon Air France installé dans le terminal 2F de l'aéroport CDG à Roissy a nécessité le percement de la coque précontrainte existante. Avant les travaux, un relevé exhaustif de la structure a été effectué (fissuration, nuage de points 3D, *etc.*). L'objectif de l'analyse était d'expliquer, par la simulation, le comportement observé (fissuration du béton) et de quantifier l'impact potentiel sur la capacité de la structure. Dans un premier temps, une analyse conventionnelle en éléments de coque à comportement élastique permet d'identifier l'existence ou non d'un risque de fissuration du béton. Pour une information plus fine (largeur de fissure, capacité ultime), il est alors nécessaire de prendre en compte le comportement non linéaire du béton armé (cf. figure 3), au risque d'occulter l'absence de résistance du béton en traction et la redistribution des efforts occasionnée par la fissuration. Il est donc primordial d'appréhender les effets de cette non-linéarité, et ce, bien que la modélisation convenable de la réponse du milieu inhomogène que constitue le béton armé s'avère numériquement très complexe.

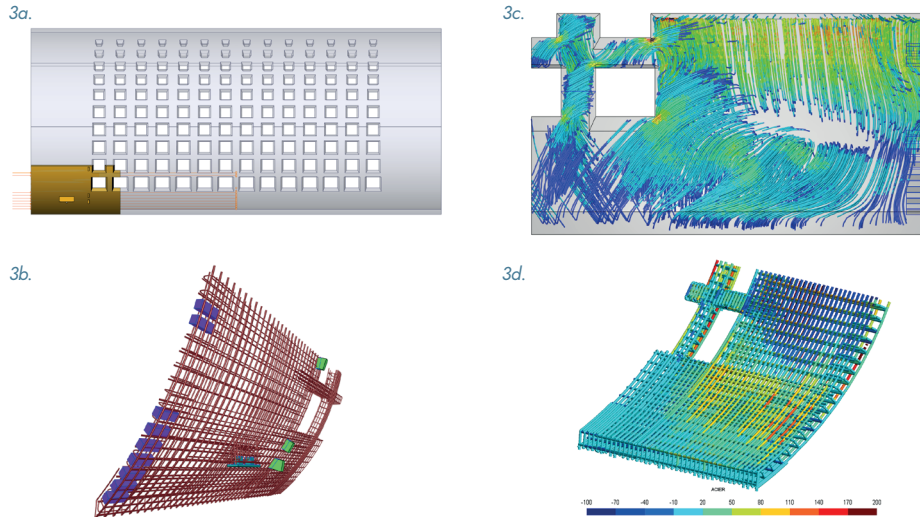


Figure 3. Terminal 2F de l'aéroport Roissy Charles-de-Gaulle : Géométrie

- 3a. du coffrage ;
- 3b. des aciers passifs de la coque précontrainte — états de contrainte associés, calculés en prenant en compte le comportement non linéaire du béton armé dans ;
- 3c. le béton ;
- 3d. les aciers

© Luciano Tosini/Strain, 2020.

Conclusion

Tendre vers une expertise en constante progression n'est pas sans contrepartie. Toute évolution du classique vers l'innovant nécessite une phase de transition durant laquelle la constante remise en cause exige de mener, de front, les vérifications traditionnelles et des calculs plus innovants. La mise en place de cette nouvelle méthode alourdit temporairement le travail de

l'ingénieur. Cet investissement est néanmoins un passage incontournable pour acquérir l'expertise que nécessitera le génie civil de demain et diminuer la consommation en matériaux de construction. La formation initiale d'ingénieur est le vecteur privilégié pour réaliser cette transition. Outre la maîtrise des concepts et méthodologies classiques, les futurs ingénieurs doivent également être confrontés aux approches innovantes, afin de leur fournir les outils nécessaires au changement de leur domaine.

Bibliographie

BLEYER, Jérémy et HASSEN, Ghazi, 2021. Automated formulation and resolution of limit analysis problems. *Computers & Structures*, vol. 243, 106341.

BOUSTANI (EL), Chadi, BLEYER, Jérémy, ARQUIER, Mathieu *et al.*, 2020. Elastoplastic and limit analysis of 3D steel assemblies using second-order cone programming and dual finite-elements. *Engineering Structures*, octobre 2020, vol. 221, 111041.

COLAS, Anne-Sophie, MOREL, Jean-Claude et GARNIER, Denis, 2008. Yield design of dry-stone masonry retaining structures — Comparisons with analytical, numerical, and experimental data. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, octobre 2008, vol. 32, n° 14, pp. 1817-1832.

COULOMB, Charles Augustin, 1773. *Essai sur une application des règles de Maximis et Minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture. Mémoires de mathématique et de physique, présentés à l'Académie Royale Des Sciences, par divers savans, Année 1773*, vol. VII, pp. 343-382.

KRABBENHØFT, Kristian, LYAMIN, Andrei V. et SLOAN, Scott W., 2008. Three-dimensional Mohr–Coulomb limit analysis using semidefinite programming. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, novembre 2008, vol. 24, n° 11, pp. 1107-1119.

MAKRODIMOPOULOS, Athanasios et MARTIN, Chris M., 2007. Upper bound limit analysis using simplex strain elements and second-order cone programming. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, vol. 31, n° 6, pp. 835-865.

MAKRODIMOPOULOS, Athanasios, 2010. Remarks on some properties of conic yield restrictions in limit analysis. *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*, vol. 26, n° 11, pp. 1449-1461.

MOURAD, Leyla, BLEYER, Jérémy, MESNIL, Romain *et al.*, 2021. Topology optimization of load-bearing capacity. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, septembre 2021, vol. 64, n° 3, pp. 1367-1383.

SALENÇON, Jean, 1983. *Calcul à la rupture et analyse limite*. Paris : Presses de l'École nationale des ponts et chaussées.

VINCENT, Hugues, ARQUIER, Mathieu, BLEYER, Jérémy *et al.*, 2020. Numerical upper bounds to the ultimate load bearing capacity of three-dimensional reinforced concrete structures. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 44, n° 16, pp. 2216-2240.