Zeitschrift: Tracés : bulletin technique de la Suisse romande
Herausgeber: Société suisse des ingénieurs et des architectes
Band: 129 (2003)
Heft: 15/16: Tenségrité

Artikel: Derrière la "tenségrité"
Autor: Smith, Ian F.C. / Perret, Jacques
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-99223

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. Siehe Rechtliche Hinweise.

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. Voir Informations légales.

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. See Legal notice.

Download PDF: 01.05.2025

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

Entretien avec le professeur Ian F. C. Smith
Propos recueillis par Jacques Perret

Derrière la « tenségrité »

Outre les enseignements directement liés aux structures de tenségrité, l'étude de ces dernières conduit à des réflexions plus larges sur les méthodes de calcul utilisées dans le domaine du génie civil. Le point de la situation à l'IMAC, avec son directeur, le professeur Ian F. C. Smith.

TRACÉS : « Tenségrité » est un mot qui ne fait pas partie de la culture constructive de beaucoup d'entre nous : quelle est son origine et comment en est-on arrivé au concept de « structures de tenségrité » ?

Ian F. C. Smith : Comme pour beaucoup de nouveaux concepts, son origine est incertaine. Les liens avec les disciplines artistiques, la sculpture et l'architecture notamment, sont indéniables. Par ailleurs, la notion est plus ou moins contemporaine de la période qui voit apparaître les câbles dans les structures.

Dans les années 1960, l'Américain Buckminster Fuller[1] (1895-1983), inventeur du mot, a décrit la structure de tenségrité comme « des îlots de compression dans un océan de traction » et avoué son attrait pour ces « barres qui flottent dans l'espace ».

Une première définition relativement stricte impose qu'il n'y ait aucun contact direct entre les barres en compression. Par la suite, le Professeur Motro (Université de Montpellier, F) a élargi cette définition en stipulant que si les barres en compression peuvent être en contact, les zones de compression doivent quant à elles être entourées d'éléments en traction. Ainsi, la structure construite à l'EPFL (voir article p. 13 à 18) ne remplit pas le critère énoncé par la première définition - en raison des assemblages placés au centre des éléments en compression pour diminuer leur longueur de flambage - mais répond en revanche totalement à l'exigence de la seconde. Entre modules, la première définition est néanmoins respectée.

T. : La vue d'une structure de tenségrité renvoie instinctivement l'esprit de l'ingénieur ou de l'architecte aux images des treillis. Quelles sont les principales différences entre ces deux types de structures et comment se traduisent-elles du point de vue du calcul ?

I. S. : La première différence fondamentale est que les treillis classiques acceptent la mise en compression ou en traction de la plupart des éléments. Dans une structure de tenségrité, les éléments destinés à reprendre les tractions (normalement des câbles) ne peuvent en aucun cas être mis en compression. La structure fonctionne grâce à un effet d'autocontrainte qui n'agit qu'une fois effectuée la mise en tension de ses éléments. Sans l'autocontrainte, il n'y pas de stabilité. Par rapport à d'autres systèmes câblés, telles les structures suspendues ou haubanées, la conception d'une tenségrité permet en outre de se passer d'ancrages coûteux et de faciliter sa réutilisation dans le cas d'une structure provisoire.

Sur le plan du calcul, la principale difficulté introduite par les structures de tenségrité et d'autres structures légères tient à leur comportement géométrique non-linéaire qui impose la prise en compte de leurs positions déformées. Contrairement aux structures admises comme linéaires - pour lesquelles les déplacements des nœuds sont négligés lors du calcul statique - il est en effet nécessaire de définir une nouvelle géométrie de la structure de tenségrité avant de pouvoir l'évaluer statiquement. Cet état de fait implique un calcul en au moins deux étapes distinctes : d'abord la définition de la géométrie déformée, puis le calcul des efforts dans la géométrie définie.

Excluant par ailleurs le recours au principe de superposition, cette non-linéarité implique notamment de calculer tous les cas de charge de façon indépendante, mais aussi, en principe, de prendre en compte l'ordre dans lequel les charges sont appliquées sur la structure.

[1] http://www.bfi.org/introduction_to_bmf.htm

T. : Existe-t-il des applications construites ou des projets de structures de tenségrité ?

I. S. : Les buses d'eau du nuage artificiel d'Yverdon étaient fixées sur une tenségrité dont le rôle structural était peu important. Un projet pour la couverture du vélodrome de l'Union internationale du cyclisme à Aigle comporte des modules de type tenségrité. Motro a aussi réalisé une toiture dans un laboratoire à Montpellier. Des sculptures en forme de tours ont été construites en Hollande et aux Etats-Unis il y a plusieurs années et, récemment, une autre a été montée en Allemagne. De façon générale et selon une opinion assez largement répandue, ces structures manquent de rigidité ce qui conduit à des amplitudes de déplacement souvent incompatibles avec les exigences d'exploitation. Or une solution à ce problème réside dans les structures actives.

Des applications plus prometteuses sont peut-être à chercher du côté des structures actives pour les antennes, où les tenségrités pourraient faire valoir des qualités liées à leur mise en place, à leur démontage, à leur adaptation dans des environnements inconnus ou encore à des possibilités de déploiement, notamment dans l'espace.

T. : Avec des potentiels d'exploitation aussi limités, en quoi l'étude des structures de tenségrité peut-elle se révéler enrichissante pour les ingénieurs civils ?

I. S. : Pour nous, c'est sans doute au niveau des techniques de calcul et de l'utilisation de l'informatique avec une structure active que les résultats sont les plus intéressants. Comme déjà souligné et compte tenu du comportement géométrique non-linéaire, un calcul traditionnel par éléments finis nécessite une approche en deux étapes. Pour contourner cette obligation, nous avons utilisé la méthode dite de « relaxation dynamique » qui est une approche vectorielle présentant l'avantage d'éviter l'inversion des matrices - processus très coûteux en temps de calcul - et permettant un calcul direct. Il est intéressant de souligner que les principes de cette méthode, utilisée notamment pour le calcul des structures légères, sont bien antérieurs à ceux des éléments finis. Aujourd'hui cette méthode retrouve sa place dans les bureaux d'ingénieurs.

Un autre aspect particulièrement intéressant concerne nos tentatives d'introduction d'un processus d'apprentissage de la structure active. Les compensations des variations de la pente obligent à rechercher de nouvelles positions d'équilibre après que la structure a subi un chargement. Pour un modèle comme celui construit à l'IMAC, une procédure de recherche exhaustive traditionnelle de toutes les situations géométriquement possibles nécessiterait des temps de calcul beaucoup trop importants (de l'ordre de plusieurs milliers de siècles !) en raison de la nature combinatoire du problème. Or ce type de problème est similaire à ceux traités par la recherche opérationnelle en mathématiques et il présente également de nombreux points communs avec ceux posés dans le domaine de l'intelligence artificielle.

Ce constat nous a conduit vers l'utilisation d'algorithmes de recherche guidée, qui ont permis de réduire à environ une heure les temps de calcul pour obtenir une solution, puis au développement d'une procédure de recherche spécifique dans notre laboratoire (PGSL[2]). Ensuite, la combinaison de ce logiciel avec des méthodes de raisonnement par cas a permis de réduire les temps de calcul à une minute environ.

Les cas étant fixés par les bonnes solutions trouvées pendant les chargements précédents, plus il y a de cas, plus le potentiel pour réduire le temps de calcul augmente. L'addition des cas représente ainsi une occasion pour la structure d'apprendre de sa propre expérience et nous pensons que nous sommes les premiers à démontrer cette possibilité pour les structures du génie civil. A ce point, la structure de tenségrité devient donc une plate-forme de recherche, tandis que l'analyse des avantages et des inconvénients des structures de tenségrité comme structures porteuses se trouve reléguée sur un autre plan.

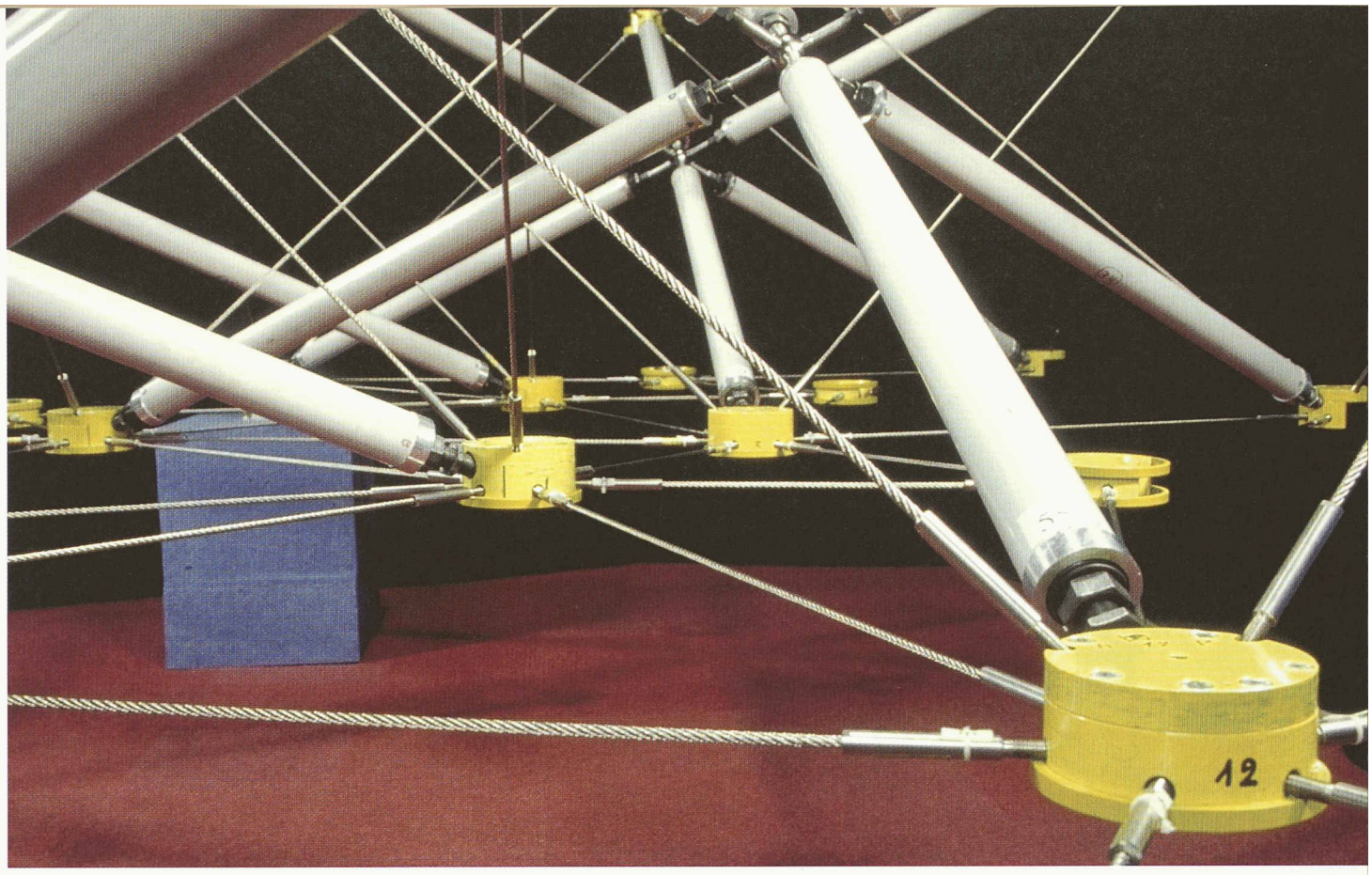
T. : Les développements pour l'utilisation de votre prototype sont-ils dès lors plutôt à envisager dans cette direction ?

I. S. : Cette structure nous fournit une excellente base expérimentale pour la validation de nos calculs informatiques. Or compte tenu du nombre de problématiques présentant des similitudes avec notre modèle - non-linéarité, couplage, etc. -, il est évident que nos résultats peuvent être appliqués à d'autres structures et même dans d'autres domaines.

Afin d'illustrer l'utilité de nos méthodes pour des applications concrètes hors du domaine des structures, nous allons étudier d'autres possibilités. Par exemple, pour une autre recherche impliquant l'informatique et les structures, nous effectuons actuellement des calculs visant à détecter la position des fuites dans le réseau d'eau de la ville de Martigny. Le but de ce programme est de localiser le plus précisément possible les positions potentielles des fuites à partir d'un nombre limité de mesures.

Quant à la structure conçue par l'IMAC, nous souhaitons poursuivre nos travaux visant à la rendre plus intelligente. J'utilise de façon quelque peu provocatrice le terme d'intelli-

[2] PGSL : Probabilistic Global Search Lausanne



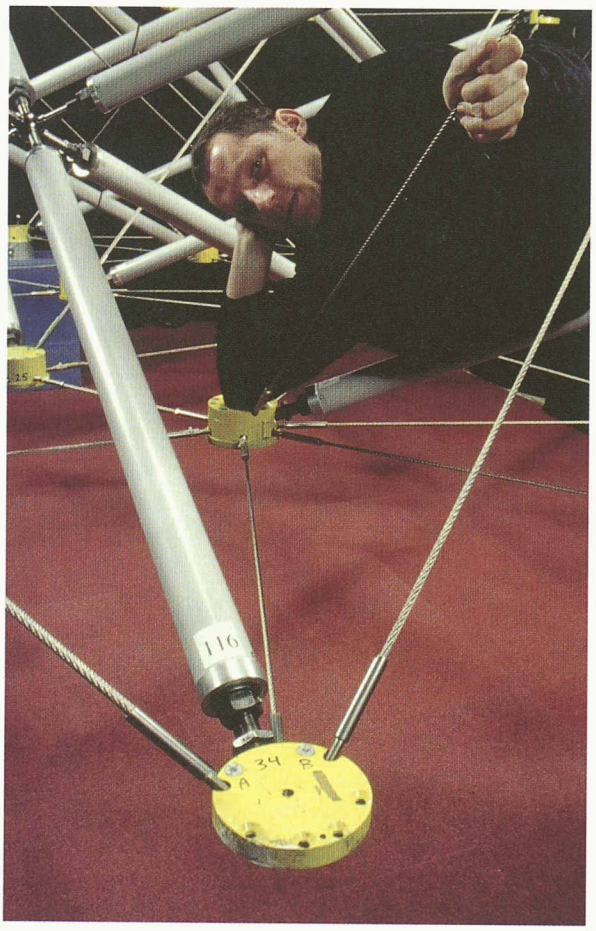
gence et ce, dans un sens proche de celui de l'intelligence artificielle (IA) : nous considérons qu'une structure peut être qualifiée d'intelligente si elle est à même de modifier son comportement en fonction des expériences de chargement qu'elle a subies. Nous avons ainsi constaté que la structure reste stable si un élément se casse et le système de contrôle devrait pouvoir être doté de fonctions permettant un autodiagnostic. Si l'un des composants de la structure - par exemple un câble - venait à manquer, un tel système assurerait la capacité de cette même structure à déceler cette absence, à la situer et à calculer une nouvelle répartition de ses efforts internes pour adopter un état aussi proche que possible de son état initial. Dans les mois à venir, nous visons donc l'introduction d'un autodiagnostic et d'une autoréparation partielle de notre structure.

T. : Comment pensez-vous pouvoir transmettre ces résultats aux ingénieurs et quel bénéfice peut-on en attendre ?

I. S. : Nous avons mis sur pied un cours d'« Informatique de l'ingénieur » enseigné en seconde année de la section de génie civil. Nous y présentons des réflexions sur les problèmes combinatoires et des méthodes permettant de mieux définir la structure des problématiques auxquelles peut être confronté un ingénieur. Ce cours est né du constat que les ingénieurs civils utilisent souvent l'informatique de façon peu efficace, probablement en raison d'une formation théorique trop limitée dans ce domaine.

Traditionnellement, les problèmes du génie civil sont souvent abordés d'une manière déductive conduisant à une solution unique. Cette procédure se révèle extrêmement efficace pour autant qu'elle soit appliquée dans un monde clos, ce qui peut être admis pour des situations simples. Cependant, le théâtre du travail de l'ingénieur est en réalité un monde ouvert au sein duquel de nombreux paramètres non maîtrisés agissent. Les problèmes auxquels nous sommes confrontés sont abductifs, ce qui peut être résumé en disant que le processus aboutissant au résultat final n'est généralement pas unique. Il s'agit de problèmes combinatoires, qui impliquent le recours à une informatique adaptée, et leur résolution passe par la recherche non d'une solution unique, mais de réponses au voisinage des valeurs optimales nécessitant une exploration globale et rapide de l'espace des solutions. Ce sont des problèmes qui présentent des similitudes avec ceux de l'intelligence artificielle, un domaine dans lequel j'ai effectué une partie de ma carrière auprès du professeur Boi Faltings et qui peut s'avérer très riche en enseignements lorsqu'on aborde les thématiques de l'apprentissage ou de l'autodiagnostic pour des structures.

Le cours que nous donnons repose sur un livre co-écrit avec le Dr. Benny Raphael - dont je tiens à souligner le rôle clé dans ces travaux - et il apprend aux ingénieurs à analyser et à classifier les types de problématiques afin de définir et de choisir l'outil informatique le plus judicieux. Cette démarche doit permettre d'améliorer l'efficacité de l'utilisation des puissances de calcul à disposition et d'en tirer un bénéfice nettement supérieur à celui obtenu actuellement en génie civil. On oublie un peu rapidement que nous avons joué un rôle de pionnier dans l'utilisation de l'informatique par les ingénieurs: le premier calcul d'une structure s'est fait à l'université de Cambridge (GB) en 1956 déjà. De plus, les ingénieurs civils sont également à l'origine des calculs par éléments finis, un outil utilisé maintenant dans bien d'autres domaines. La recherche dans le domaine des structures reste très fertile pour développer d'autres méthodes novatrices.



T. : A vous entendre, le rôle de l'ingénieur risque de prendre un contour voisin de celui des informaticiens ?

I. S. : En aucun cas! Il faut être clair à ce sujet : l'informatique ne pourra jamais remplacer l'essentiel de ce qui fait la qualité d'un ingénieur. La place de l'ordinateur demeurera celle de l'assistant qui guide les choix du concepteur face à des tâches par essence complexes, mais il ne saurait s'y substituer : c'est à l'ingénieur de faire la synthèse des informations à disposition, dont celles fournies par les calculs, pour définir la solution à adopter. En même temps, le mot « outil » comme description de l'utilité de l'informatique est trop réducteur, puisqu'un outil implique seulement la capacité d'effectuer des tâches traditionnelles plus rapidement et avec plus de précision. Or l'informatique permet aujourd'hui à l'ingénieur de faire des choses impossibles auparavant.

De ce point de vue, il est intéressant de tirer un parallèle entre l'apprentissage d'une structure et l'évolution professionnelle d'un ingénieur. Pour apprendre, tout deux ont un besoin vital de cet élément qui s'appelle l'expérience. Sinon pourquoi les bureaux privilégieraient-ils quasi-systématiquement cette dernière au détriment de la formation la plus récente apportée par de jeunes professionnels ? Parce que, à l'instar d'une structure dite intelligente (en considérant que l'apprentissage est une forme d'intelligence), un ingénieur fonctionne lui aussi « par cas », exploitant tout au long de sa carrière ses expériences personnelles pour résoudre les nouveaux problèmes auxquels il est confronté.