Zeitschrift: Tracés : bulletin technique de la Suisse romande

Herausgeber: Société suisse des ingénieurs et des architectes

Band: 129 (2003)

Heft: 15/16: Tenségrité

Artikel: Vers des systèmes intelligents: l'exemple d'une structure active de type "tenségrité"

Autor: Fest, Etienne / Domer, Bernd / Smith, Ian F.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-99224

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: 02.07.2025

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

Etienne Fest, Bernd Domer et Ian F. C. Smith

Vers des **systèmes intelligents** : l'exemple d'une structure active de type « tenségrité »

Une structure dite de « tenségrité » est un système structural dont des éléments comprimés sont enveloppés par des éléments tendus [1][1]. Elle acquiert sa rigidité et sa stabilité au montage par l'introduction d'un état d'autocontrainte (combinaison de barres comprimées et de câbles tendus)[2]. Grâce à l'autocontrainte, la réalisation d'une telle structure se passe notamment de fondations massives (appuis) à l'inverse de tentes ou de structures membranaires par exemple. Facilement démontable, une structure de tenségrité offre en outre des solutions novatrices pour des constructions modulaires et réutilisables.

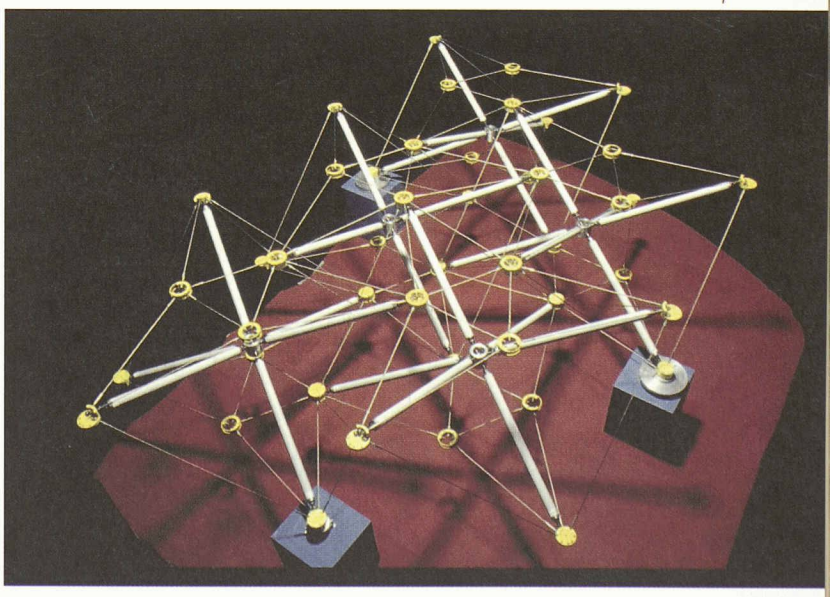
Une des particularités d'une telle structure légère étant la souplesse, son comportement à l'état de service en est d'autant plus sensible. Ce comportement revêt par ailleurs un caractère complexe en raison de la non-linéarité géométrique, de la rigidité unilatérale et du fort couplage entre les éléments. Equipée de capteurs et de vérins, une telle structure serait toutefois à même d'adapter sa géométrie ou sa forme en modifiant son état d'autocontrainte.

Le présent article décrit la première structure de tenségrité active construite en grandeur proche du réel dans un laboratoire de l'EPFL. Il présente une stratégie pour contrôler des systèmes complexes par le biais d'un nombre réduit d'éléments actifs, de même qu'il aborde une technique destinée à améliorer leur performance au cours du temps à l'aide de méthodes tirées de l'intelligence artificielle. Une structure de tenségrité réunissant toutes les difficultés de contrôle et d'exploitation pouvant se présenter, notre article illustre l'application des méthodes définies pour contrôler ce type de structure et la rendre « intelligente ».

Description des structures

La configuration de notre prototype s'inspire de celui développé par le bureau d'ingénieurs Passera & Pedretti à Lugano [2] pour un avant-projet de l'Expo 01, à cette différence près que la structure de type tenségrité construite à l'IMAC est composée de cinq modules (fig. 1) qui contiennent chacun six barres et vingt-quatre câbles. Elle compte cinquante et un assemblages ou nœuds, trente éléments comprimés et cent vingt éléments tendus. Sa hauteur statique est de 1,10 m et sa surface de couverture s'étend actuellement sur 15 m^2 pour une masse surfacique de 30 kg/m^2. La structure est appuyée en trois points, fixant six degrés de liberté. A la différence de systèmes de tenségrité plus classiques, les barres convergent vers un nœud central afin de réduire leur longueur de flambage et d'augmenter la rigidité du module. Les tiges filetées contenues dans les extrémités de ces barres permettent d'en adapter manuellement la longueur pour stabiliser la structure et modifier sa géométrie et son état d'autocontrainte.

1



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

[2] La structure de ce type la plus connue est une œuvre d'art de Snelson, la Tour Aiguille II (30/6/6 mètres), exposée dans le jardin du musée Kröller Müller à Otterlo en Hollande.

Fig. 1 : Structure de tenségrité composée de cinq modules, sans actuateurs

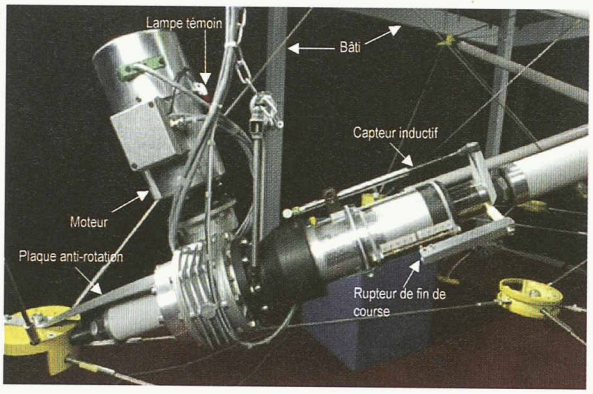
Fig. 2 : Détail d'un actuateur implanté dans une barre

Fig. 3 : Vue globale de la structure, de son système de contrôle actif et de son créateur [3]

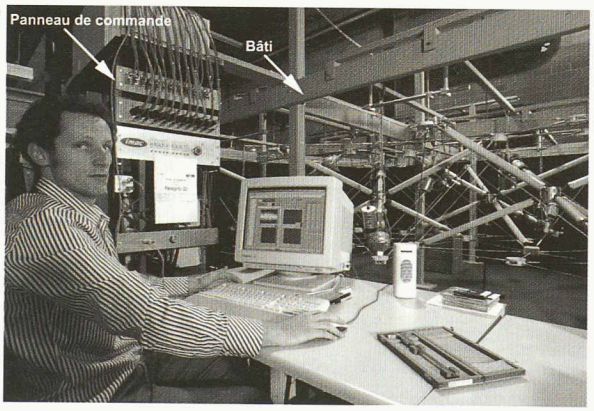
Fig. 4 : Schéma du contrôle de la pente

Fig. 5 : Position des charges, des vérins et du triangle de contrôle

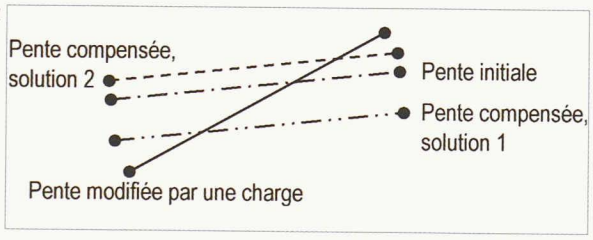
2



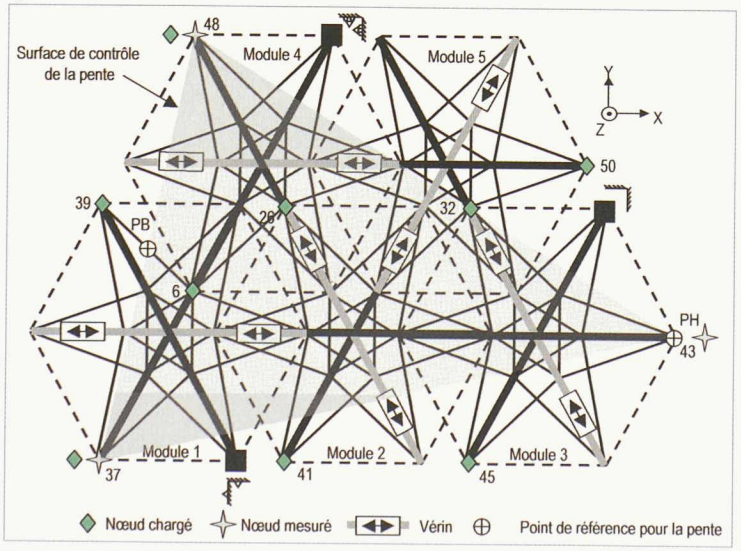
3



4



5



Des câbles en acier inoxydable de 6 mm de diamètre forment une structure à double couche interconnectée par des câbles latéraux. De deux longueurs différentes, les câbles composant chaque couche forment un squelette de trois triangles isocèles et d'un triangle équilatéral au centre du module. Les barres choisies sont des profilés ronds en polyester renforcés de fibres *Fiberline*. Comparé à l'acier, ce matériau offre un compromis intéressant entre poids et module de Young. La modularité de la structure est assurée par l'ajout possible de modules supplémentaires pour en augmenter la surface couvrante, des assemblages de connexion modulables ayant été développés à cet effet (voir encadré).

Le but du système de contrôle actif est de compenser les déformations de la structure soumise à une perturbation en modifiant la longueur des barres actives. Les éléments permettant le contrôle de la structure comprennent dix actuateurs (fig. 2), treize capteurs de déplacements et un ordinateur, placés en série sur le bus de communication CAN et gérés par un programme Labview (fig. 3). Deux vérins électriques disposés symétriquement et en ligne équipent chacun des cinq modules (deux barres sur six par module sont actives). Le choix de la position des actuateurs sur la structure globale et sur le module a été guidé par les critères suivants :

- vérin non connecté à un nœud mesuré ;
- vérin non connecté à un appui ;
- symétrie maximale, les vérins de chaque module sont disposés de la même façon ;
- nombre maximal de directions de mouvement sur la structure ;
- couplage maximal des vérins ;
- couches supérieure et inférieure connectées à un vérin ;
- répartition optimale des directions et des valeurs des forces sur le nœud central.

Une commande correspond à une combinaison de changement de longueur des barres actives effectuée par les vérins. Cette commande est appliquée de façon séquentielle ou quasi-statique : dès qu'un vérin a atteint la position désirée, un autre est actionné et ainsi de suite jusqu'à ce que l'intégralité de la commande soit effectuée.

Contrôle actif d'une structure couplée, non-linéaire et sous-actionnée

Scénario de contrôle

Un objectif consiste à remplir un critère d'aptitude au service. Notre choix s'est orienté vers le contrôle de la pente de la couche supérieure de la structure tenségrité sur laquelle serait attaché le toit d'une halle d'exposition, par exemple.

Fig 6 : Noeud central assurant la stabilité des barres en compression

Fig. 7 : Assemblage modulable permettant la liaison entre les barres et les câbles et la connexion entre les modules [4] ; l'imbrication de la pièce (a) dans la pièce (b) permet de lier deux modules (c).

En respectant la pente initiale, il est ainsi possible de garantir l'écoulement de l'eau de pluie vers l'extérieur de la structure. L'évolution de la pente est suivie par l'intermédiaire des déplacements de trois noeuds formant un triangle, 37, 43 et 48 (fig. 5). La tâche du contrôle de la forme consiste alors à déterminer une commande pour maintenir la pente initiale de la structure dès que celle-ci est altérée par une sollicitation extérieure (fig. 4).

Stratégie de contrôle

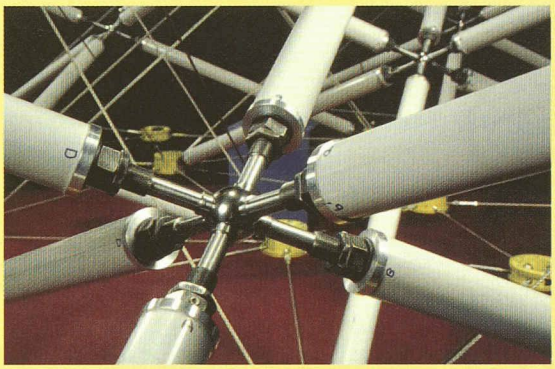
Fest et Smith [4] ont montré que le comportement de la structure est linéaire dans un intervalle donné (relation linéaire force / déplacement dans une fourchette de charge) pour des charges ponctuelles ou de petites déformations des éléments. Ces observations ont contribué à vérifier si cette linéarité autorise l'application de l'hypothèse de superposition pour ce type de structure. La superposition consiste à

Assemblages

Les assemblages entre éléments constituent les clés de construction et de modélisation d'une structure de tenségrité. Un soin particulier est apporté à leur réalisation afin que, en même temps qu'on favorise la création de rotules à leurs extrémités, tous les éléments offrent des facilités pour le montage modulaire. Les rotations libres caractérisant la rotule sont réalisées par un contact bille-cône. Dans la configuration proposée, les deux types d'assemblage ci-après ont été fabriqués.

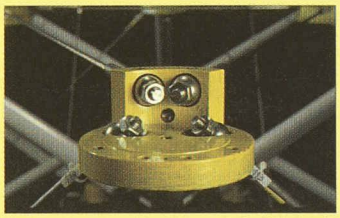
D'une part, le nœud central qui regroupe les extrémités des six barres de chaque module et qui a été conçu dans l'idée de faire converger les barres le plus près possible du point de convergence virtuel de leur axe de révolution, afin d'éviter les excentricités qui induiraient des moments parasites faisant tourner le noeud. Le nœud est simplement constitué d'une sphère en acier trempé, lubrifiée, sur laquelle viennent s'appuyer six cônes très ouverts à l'extrémité des barres **(fig. 6)**. Dans un usage pratique, une telle sphère et ses barres ne seraient pas laissées sans protection, mais pourraient être noyées dans un matériau coulé très souple, tel que l'élastomère.

D'autre part, l'assemblage **(fig. 7)** divisé en deux éléments qui est en interaction avec tous les éléments de la structure et dont la modularité autorise la connexion aisée des modules les uns dans les autres. Ces pièces en acier ont été développées pour assurer un montage rapide et facile des modules, en tenant compte du fait que chaque module est construit indépendamment avant d'être relié aux autres dans une étape ultérieure. Pour réaliser la structure étudiée au laboratoire, ces pièces ont été usinées ; cela étant, leur fabrication en série par coulage serait plus adaptée et moins onéreuse pour une application à une plus grande échelle.

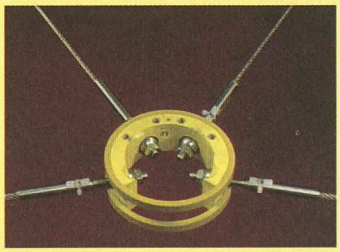


6

7a



7b



7c

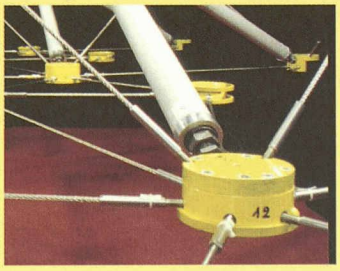


Fig. 8 : Réponse de la structure en fonction du nombre de barres modifiées [4]; comparaison des deux méthodes prédictives

Fig. 9 : Compensation de la pente pour les cas de charge ponctuelle (trois valeurs de charge pour chaque noeud); une valeur de compensation supérieure à 95% montre que la pente a été rétablie grâce à une commande.

ajouter les déplacements issus des charges verticales ou des allongements des barres. Elle doit permettre de simuler la combinaison de changements de longueur des barres correspondant à une commande, tandis qu'une matrice d'influence résume l'action de chacune de ces modifications sur les déplacements de la structure. Chaque ligne exprimant l'influence de l'allongement d'une barre sur le déplacement de tous les nœuds, la matrice déterminerait les déplacements issus de plusieurs changements de longueur de barres en effectuant une combinaison linéaire des lignes. Pour le contrôle de la forme notamment, une telle matrice présenterait un avantage notable puisqu'elle relierait directement la longueur des barres aux déplacements des nœuds, réduisant non seulement le temps de calcul, mais évitant aussi de répéter le calcul pour chaque nouveau cas proposé.

Or la figure 8 montre que même pour de petits changements ou de petits déplacements, le principe de superposition issu d'une hypothèse de linéarité n'est pas applicable. Cette observation vaut aussi pour la superposition de charges verticales ponctuelles dans la tentative de simuler une charge multipoint. Des résultats qui confirment la particularité connue du comportement géométriquement non-linéaire de la tenségrité. Par conséquent, une analyse structurale du comportement doit être entreprise pour chaque nouveau cas de charge touchant ce type de structure.

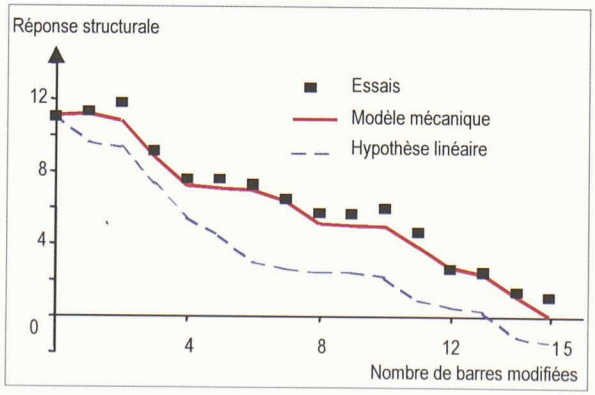
La relaxation dynamique, méthode vectorielle d'analyse non-linéaire antérieure à celle des éléments finis, contribue à analyser le comportement complexe de la structure. Cette méthode est d'ailleurs largement reconnue pour son application à l'analyse des structures câblées et des membranes [5].

La recherche d'une commande de contrôle pour un tel système non-linéaire n'est pas triviale, car il n'existe pas de formulation directe ou déterministe entre la pente de la structure et les allongements des barres (comme on l'a vu, une matrice d'influence ne peut être validée pour le problème qui nous occupe). S'imposent donc la recherche et la génération d'une multitude de commandes, suivies d'une analyse structurale, afin de vérifier que la commande satisfasse l'objectif et que les contraintes ne soient pas excessives (limite de flambage des barres et limite d'élasticité). La taille de l'espace exhaustif des solutions varie exponentiellement avec le nombre de barres télescopiques [6]. L'outil de recherche doit définir la barre à modifier et l'amplitude de la modification. Sachant que chacune des dix barres de la structure peut réellement adopter cinq cents longueurs différentes, l'espace des solutions s'élève à 500^{10} possibilités de commandes différentes. En comptant un temps d'exécution de 0,1 s par analyse structurale et en ne craignant pas l'informatique stupide, l'espace des solutions serait donc exploré en $3{,}1 \cdot 10^{19}$ siècles !

Cela dit, les méthodes de recherche stochastique (Probabilistic Global Search Lausanne, PGSL [7]), le recuit simulé [8,9] ou les algorithmes génétiques [10] offrent d'autres pistes pour naviguer dans un tel espace et définir des solutions selon des objectifs et des contraintes. Un nouvel algorithme de recherche global, PGSL, développé à l'IMAC par Raphael et Smith [7], est employé pour déterminer les commandes de contrôle.

Le système étant sous-actionné, la tâche du contrôle s'en trouve encore complexifiée : en effet, le nombre d'actuateurs est largement inférieur au nombre de degrés de liberté de la structure. Ce cas de figure s'avère toutefois similaire à la réalité des constructions concrètes, dans lesquelles les moyens d'action sont limités pour gérer un problème complexe multiparamètres.

8



9

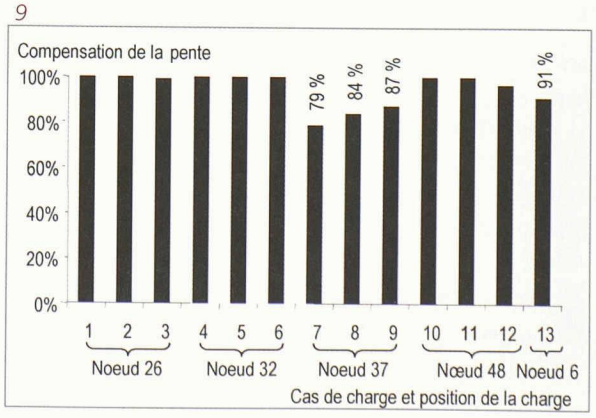


Fig. 10 : Distribution du temps de recherche de commande par intervalles (la recherche stochastique permet de réduire le temps de calcul d'une commande efficace de milliards de siècles à moins d'une heure).

Fig. 11 : Comparaison de l'efficacité entre la recherche d'une commande pure et la recherche à partir d'une commande issue d'un cas proche grâce au CBR (le CBR permet de démarrer la recherche par une valeur de 100 au lieu de 1000).

Comme le scénario consistant à contrôler la pente par les déplacements des sommets d'un triangle est bien adapté à une petite structure, le contrôle de plusieurs triangles permettrait d'atteindre simultanément plusieurs objectifs basés sur ce même support pour une structure comportant des dizaines ou des centaines de modules. En effet, le contrôle local de triangles autoriserait celui de la pente globale ou de la courbure de la toiture.

Essais

Le contrôle de la pente est étudié pour treize cas de charge incluant des charges verticales descendantes et ponctuelles appliquées aux nœuds de la couche supérieure. Faisant partie des charges de service, celles-ci représentent les charges auxquelles ce type de structure est le plus sensible.

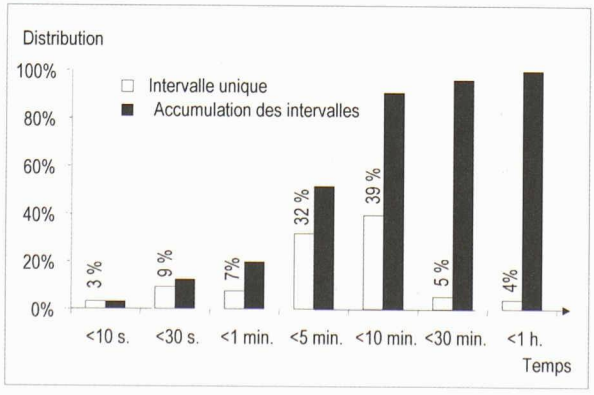
Pour tous les cas de charge, la commande appliquée autorise une compensation de la pente supérieure à 78% (fig. 9). Pour neuf cas sur treize, les modifications de longueur des barres permettent de compenser la pente modifiée par une charge et de retrouver la pente initiale (cas de charge n°1 à 6 et 10 à 12 - compensation > 95%). Dans les cas où l'application d'une seule commande ne suffit pas à atteindre l'objectif de contrôle, il est possible de poursuivre ce dernier et les modifications des longueurs des barres, en partant de la nouvelle configuration déformée.

Ces résultats montrent que la modélisation de la structure est cohérente et que la position des actuateurs est adéquate pour les cas de charge considérés. De plus, bien que la taille de l'espace des solutions soit exponentielle, la combinaison de la recherche stochastique (PGSL) et de la relaxation dynamique permet de naviguer dans cet espace et de déterminer au moins une commande efficace.

Il faut souligner que les temps de recherche des commandes de contrôle (temps d'exécution de PGSL) diffèrent quand bien même l'espace de recherche original ne varie pas. La figure 10 illustre ce temps distribué dans des intervalles de durée pour un nombre total d'exécutions de 225 (les recherches de commandes ont été réalisées plusieurs fois pour chaque cas de charge). La colonne claire représente le rapport (pourcentage) du nombre de recherches accompli dans un intervalle de temps unique. Par exemple, 9% des commandes nécessitaient de dix à trente secondes pour être déterminées. La colonne foncée correspond au rapport du nombre accumulé de processus de recherche commençant à l'heure zéro pour une certaine durée. Au vu des cas de charge, tous les processus de recherche ont été réalisés en moins d'une heure (PC 512 MB/ 2,2 GHz). Comme l'indique la figure 10, la plupart des commandes (71%) ont été déterminées dans un intervalle de une à dix minutes. Il est important de noter que le temps de recherche est lié à la complexité de l'objectif de commande.

Si le recours à la recherche stochastique permet certes de réduire le temps de détermination d'une solution à moins d'une heure, le temps maximal peut néanmoins s'avérer trop élevé pour assurer l'aptitude au service (4% des commandes nécessitaient de trente minutes à une heure (fig. 10)). Pour pallier cette difficulté, toutes les bonnes commandes de contrôle sont stockées dans une base de données afin d'être réutilisées pour déterminer de nouvelles commandes dans les situations de perturbation semblables à celles stockées. La technique permettant de retrouver un cas stocké proche est le « raisonnement par cas » (Case-based Reasoning - CBR) [11]. La commande récupérée par le CBR est alors exploitée comme point de départ de la recherche d'une nouvelle commande en utilisant PGSL. La figure 11 illustre ainsi le recours habile à l'information du passé (bonnes commandes stockées) pour déterminer une commande.

10



11

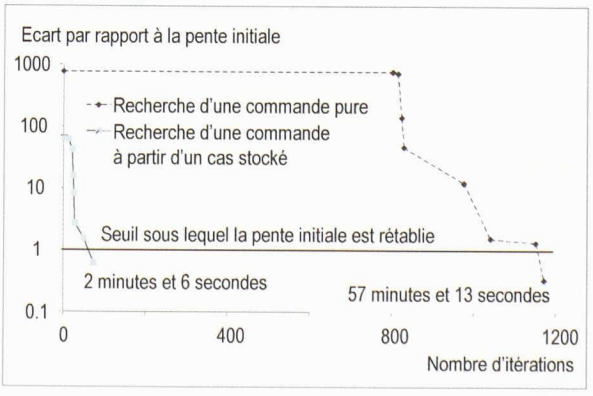


Fig. 12 : Evolution du temps de recherche d'une commande en fonction du nombre de cas dans la base de données [12]

(Tous les documents illustrant le dossier ont été fournis par les auteurs ; les photos sont de Alain Herzog)

Par ailleurs, la richesse de l'information passée conditionne la recherche d'une commande (fig. 12). L'augmentation du nombre de cas stockés équivaut à une augmentation de l'expérience qui se traduit par une amélioration de la performance au cours du temps : la structure apprend de son expérience. Dans ce cas, la structure est qualifiée d'« intelligente ».

Conclusions

Une structure active de type tenségrité, composée de cinq modules et proche d'une configuration réelle, a été construite et testée avec succès par le laboratoire de l'IMAC. L'implantation de capteurs et de vérins dans une boucle de contrôle a mis en évidence la capacité d'apprentissage d'une telle structure, qui peut être qualifiée d'intelligente car elle apprend. En effet, grâce à un schéma computationel inédit, elle améliore ses performances d'aptitude au service au cours temps. Ce résultat découle de la mise en œuvre d'une stratégie de contrôle appliquée à un système non-linéaire hautement couplé, sous-actionné et dépourvu de relation directe entre entrées et sorties. Une stratégie qui pourrait aussi bien s'appliquer à d'autres systèmes caractérisés par une haute complexité.

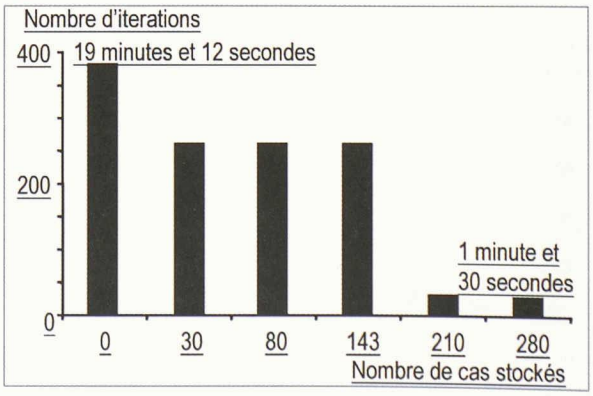
Pour un usage en tant que toiture d'exposition temporaire, la structure active deviendrait partie intégrante de l'exposition, dans la mesure ou sa configuration et sa forme peuvent être modifiées et améliorées durant l'exploitation. D'autres applications potentielles concernent les antennes ou les radars et, dans les domaines spatial et aéronautique, les mâts déployables, les radiotélescopes, les ailes d'avion...

Remerciements

Nous tenons d'abord à remercier l'organisme de financement du projet, le Fonds national suisse de la recherche scientifique. Notre reconnaissance va ensuite aux sociétés *Hi-Tech Engineering* (vérins), *Maag Technic* (barres), *HBM* (capteurs) et *Lust-Tec* (variateurs de fréquence), qui ont facilité l'acquisition des équipements. Nous avons également apprécié les précieux conseils dispensés par MM. R. Delez, P. Gallay et M. Pascual, de même que le soutien informatique et technique prodigué par les Dr S. Rossier, K. Shea et B. Raphael. Enfin, nous remercions encore Y. Perelli, F. Baumann, A. Landschulz et D. Marguccio, étudiants à l'EPFL, de leur collaboration aux travaux expérimentaux.

Etienne Fest, Bernd Domer, Ian F. C. Smith
IMAC (Informatique et Mécanique Appliquées à la Construction)
EPFL, CH - 1015 Lausanne

Bibliographie

[1] R. Motro, V. Raducanu : « Tensegrity Systems and Tensile Structures », Extended Abstracts International Symposium on Theory, Design and Realization of Shell and Spatial Structures, H. Kunieda, Nagoya, pp. 314-315, 2001
[2] M. Pedretti : <www.ppeng.ch> (dernier accès 07/2001)
[3] E. Fest : « Une structure active de type tenségrité », thèse de doctorat N° 2701, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 168 p., 2002
[4] E. Fest, I. F. C. Smith : « Deux Structures Actives de Type Tenségrité », CTICM - Revue *Construction Métallique*, 3, pp. 19-27, 2002
[5] D. S. Wakefiel : « Engineering Analysis of Tension Structures : Theory and Practice », *Engineering structures* 21, pp. 680-690, 1998
[6] E. Fest, K. Shea, B. Domer, I. F. C. Smith : « Adjustable Tensegrity Structures », *ASCE-Structural Engineering* 129(4), pp. 515-526, 2003
[7] B. Raphael, I. F. C. Smith : « A Probabilistic Search Algorithm for Finding Optimally Directed Solutions », Proceedings of Construction Information Technology, Icelandic Building Research Institute, Reykjavik, pp. 708-721, 2000
[8] K. Shea, E. Fest, I. F. C. Smith : « Developing intelligent tensegrity structures with stochastic search », *Advanced Engineering Informatics* 16, N° 1, pp. 21-40, 2002
[9] K. Dowsland : « Simulated Annealing », in Reeves, C. (ed.) : « Modern heuristic techniques for combinatorial problems », McGraw-Hill, pp. 20-69, 1995
[10] D. E. Golberg : « Genetic Algorithm for Search, Optimization and Machine Learning », Addison-Wesley, Reading, MA, 1989
[11] J. Kolodner : « Case-Based Reasoning », Morgan Kaufmann, San Mateo, 668 p., 1993
[12] B. Domer : « Performance enhancement of active structures during service lives », thèse de doctorat N° 2750, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 151 p., 2003

12