



**HAL**  
open science

## Mécanique des matériaux à topologie autobloquante

Charles Brugger, Antoine Autruffe, Yves Bréchet, Fivel Marc, Rémy Dendievel

► **To cite this version:**

Charles Brugger, Antoine Autruffe, Yves Bréchet, Fivel Marc, Rémy Dendievel. Mécanique des matériaux à topologie autobloquante. CFM 2007 - 18ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2007, Grenoble, France. hal-03360142

**HAL Id: hal-03360142**

**<https://hal.science/hal-03360142>**

Submitted on 30 Sep 2021

**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.

# Mécanique des matériaux à topologie autobloquante

C. Brugger, A. Autruffe, Y. Brechet, M. Fivel & R. Dendievel

Laboratoire SIMAP-GPM2, INPG, CNRS, UJF  
BP 46, Domaine Universitaire 38402 Saint Martin d'Hères  
charles.brugger@gpm2.inpg.fr

## Résumé :

Les matériaux à topologie autobloquante sont un nouvel exemple de "matériaux hybrides", intermédiaires entre les matériaux et les structures, tout comme les composites, les mousses structurales, les matériaux enchevêtrés, les structures sandwich. Ils sont constitués de blocs élémentaires ajustés périodiquement et maintenus en contact par des conditions aux limites de compression. Nous avons étudié expérimentalement l'influence du coefficient de frottement et des conditions limites sur le comportement en indentation d'assemblages de blocs ostéomorphes réalisés en glace. Nous avons modélisé par éléments finis le contact avec frottement entre deux blocs ostéomorphes élastiques, en fonction du confinement par les autres blocs et du coefficient de frottement. Nous implémentons actuellement un code C++ basé sur la méthode des éléments discrets qui utilisera les lois locales déterminées par éléments finis pour simuler le comportement élastique et l'endommagement de grandes structures autobloquantes.

## Abstract :

Interlocked materials are a new example of "hybrid materials", mixing materials and structures, just like composites, structural foams, entangled materials, sandwich structures. They are periodic assemblies of elementary blocks, retained by compression boundary conditions. We performed indentation tests on assemblies of osteomorphic ice blocks in order to study the influence of the friction coefficient and the boundary conditions on the mechanical behaviour. Using finite elements, we simulated the contact with friction between two elastic osteomorphic blocks, for a given lateral load and friction coefficient. The local laws given by this model will be used in a C++ code based on the DEM. This discrete code aims at simulate the elastic and damage behaviour of big interlocked structures.

## Mots-clefs :

interlocked materials ; discrete elements method

## 1 Introduction

L'idée de l'autoblocage topologique est née de la mécanique des roches. Lors de la construction d'une mine, les ingénieurs identifient les "key blocks", les seuls éléments qui peuvent tomber et qu'il suffit de soutenir pour maintenir en place tous les autres. Or dans certains cas, il n'est nécessaire de soutenir aucun bloc. C'est l'étude des formes présentant cette propriété qui a mené au concept d'autoblocage topologique.

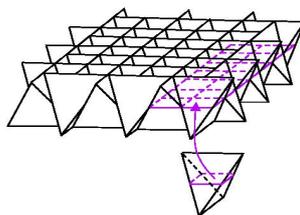


FIG. 1 – Structure autobloquante de tétraèdres réguliers

L'autoblocage topologique est une organisation structurale particulière dans laquelle les blocs constitutifs, ajustés périodiquement, sont maintenus en position uniquement par des contraintes géométriques. La cohésion de la structure est assurée par des conditions aux limites de compression. L'assemblage de tétraèdres réguliers pour réaliser une structure autobloquante (FIG. 1) a été découvert par Glickman (1984), puis indépendamment par Estrin (Dyskin *et al.* (2001a)).



FIG. 2 – Solides platoniciens permettant de réaliser une structure autobloquante

Dyskin *et al.* (2001b, 2003a) ont par la suite démontré l'extension de cette propriété aux autres solides platoniciens que sont le cube, l'octaèdre, le dodécaèdre et l'icosaèdre (FIG. 2).

Il existe d'autres formes permettant de réaliser des structures autobloquantes. Robson (1978) a montré que des blocs présentant des surfaces non planes concordantes, appelés "ostéomorphes", pouvaient être assemblés en structures autobloquantes présentant des angles droits (FIG. 3). Ces blocs ont été étudiés par Khor et Dyskin (Dyskin *et al.* (2003b)).

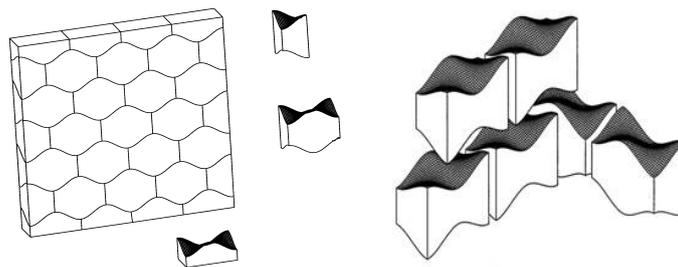


FIG. 3 – Structures autobloquantes de blocs ostéomorphes

Le principal avantage des structures autobloquantes est l'absence de lien entre les blocs. Les fissures ne peuvent donc pas se propager d'un bloc à l'autre. De plus, ces matériaux présentent une très grande flexibilité, une bonne résistance à l'impact grâce à leur capacité d'absorption d'énergie, une tolérance à l'absence de blocs, un effet d'échelle favorable et un grand potentiel de conception.

Notre objectif est de développer un outil de modélisation quantitatif du comportement mécanique des structures autobloquantes afin d'optimiser leur conception. Dans cette étude, nous nous limitons aux assemblages de blocs ostéomorphes.

## 2 Etude expérimentale

Le comportement mécanique des structures autobloquantes dépend fortement des conditions aux limites de compression et du coefficient de frottement. La glace est un matériau modèle intéressant car son coefficient de frottement varie avec la température. De plus, sa mise en forme est simple et peu coûteuse, et sa transparence permet d'observer la naissance et la propagation des fissures dans les blocs.

Des essais d'indentation à vitesse de charge imposée ont été menés sur des assemblages de blocs ostéomorphes en glace, ainsi que sur des plaques massives de mêmes dimensions, ceci pour différentes valeurs de précontrainte et de température (FIG. 4,5).

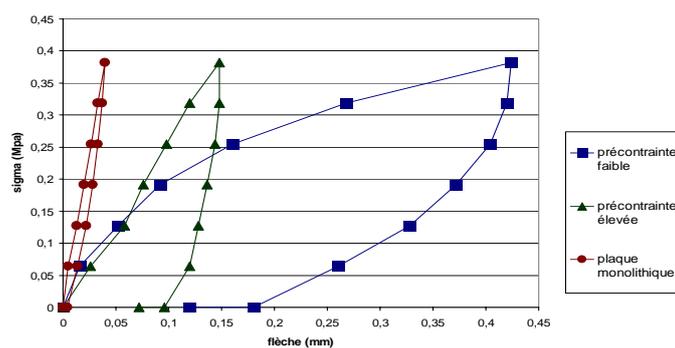


FIG. 4 – Influence de la précontrainte sur l'indentation d'un assemblage de blocs ostéomorphes en glace

La réponse de la plaque monolithique est quasiment élastique, avec une légère hystérésis due à la viscoélasticité de la glace. La réponse de la structure autobloquante se caractérise par une hystérésis très marquée, une élasticité non linéaire, des déformations maximale et résiduelle très élevées. Ces caractéristiques sont d'autant plus marquées que la structure est faiblement précontrainte et que la température est élevée, donc que le coefficient de frottement est faible.

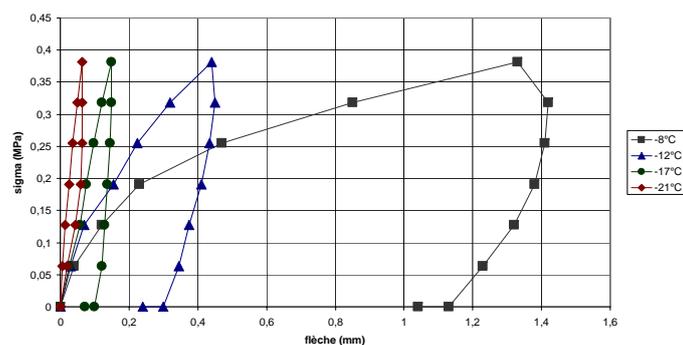


FIG. 5 – Influence de la température sur l'indentation d'un assemblage de blocs ostéomorphes en glace

### 3 Démarche de modélisation numérique

L'objectif est de construire un modèle numérique de type éléments discrets afin de modéliser des assemblages de grandes quantités de blocs.

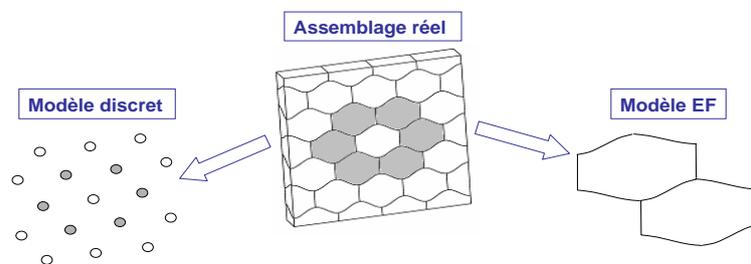


FIG. 6 – Deux modélisations d'un assemblage de blocs ostéomorphes

La méthode des éléments discrets permet en effet de simuler le comportement de grandes assemblées de blocs ostéomorphes en un temps raisonnable, chaque bloc étant décrit par seulement six degrés de liberté : la position du centre de gravité et l'orientation du trièdre associé.

Nous allons utiliser la formulation dynamique de cette méthode pour résoudre un problème quasi-statique. A chaque itération, les efforts appliqués par un bloc sur son voisin sont déterminés en fonction de leurs positions relatives, puis l'équation d'équilibre de chaque bloc est résolue pour déterminer sa nouvelle position.

Afin d'identifier le torseur des efforts entre deux blocs en fonction des positions relatives de leurs centres, nous avons modélisé par éléments finis le contact avec frottement entre deux quarts de blocs ostéomorphes. Nous allons voir que ces lois locales dépendent du coefficient de frottement et des contraintes appliquées à la structure.

#### 4 Modélisation éléments finis du contact entre deux blocs

Afin de modéliser l'interface et la matière comprises entre les centres de deux blocs ostéomorphes, nous avons étudié à l'aide du logiciel ABAQUS le contact avec frottement entre deux quarts de blocs ostéomorphes (FIG. 7). Nous avons fixé la face de droite (X maxi) et appliqué un mouvement de solide rigide à la face de gauche (X mini). Par symétrie, il suffit d'appliquer quatre types de sollicitations : compression (Dx), cisaillement (Dz), torsion (Rx) et flexion (Ry). Les six composantes du torseur des efforts sont mesurées au centre de la face de droite.

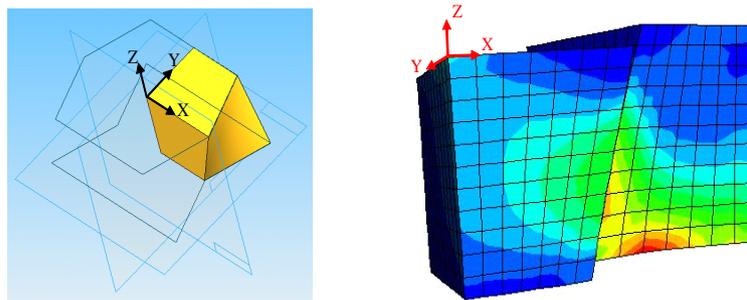


FIG. 7 – Quart de bloc ostéomorphe et exemple de calcul EF

Pour un coefficient de frottement, un type de sollicitation et une composante de l'effort donnés, la courbe (Effort, Déplacement) est systématiquement hystérétique et composée de trois phases, qui peuvent être décrites par trois raideurs. C'est le cas par exemple de l'évolution de l'effort de compression  $F_x$  en fonction du cisaillement normalisé  $Dz/h$  (FIG. 8a). La loi (Effort, Déplacement) ne peut pas être inversée, c'est la raison pour laquelle nous allons devoir utiliser une formulation dynamique de la méthode des éléments discrets.

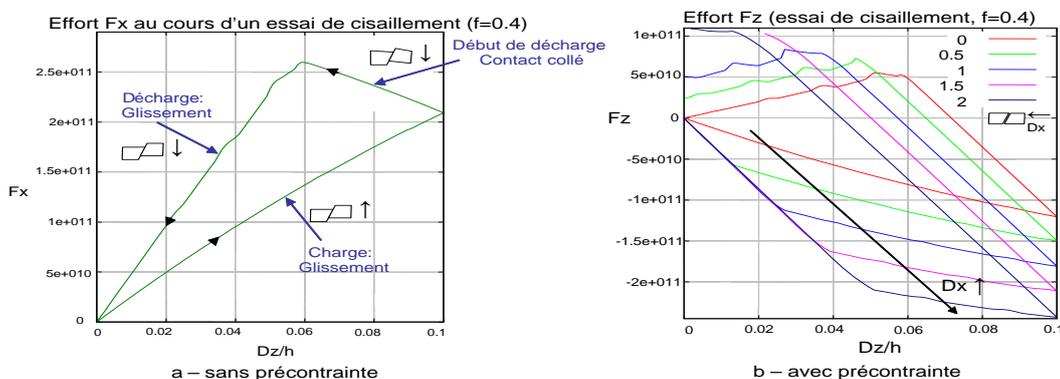


FIG. 8 – Trois phases de la réponse hystérétique

Au cours du chargement, les deux blocs glissent l'un par rapport à l'autre, créant une compression. Au début de la décharge, il n'y a pas de mouvement relatif au niveau de l'interface car le vecteur réaction passe d'un bord du cône de frottement à l'autre, les blocs sont simplement déformés élastiquement. Enfin, les blocs glissent à nouveau pour atteindre leur position initiale.

Lorsqu'on applique une précontrainte de compression, une quatrième phase analogue à la deuxième apparaît : le contact est collé jusqu'à ce que le vecteur réaction atteigne le bord du cône de frottement (FIG. 8b).

Certaines composantes du tenseur des efforts sont négligeables pour certains types de sollicitations et pourront donc être négligées dans le modèle discret. De plus, la simulation par éléments finis de l'indentation d'un petit assemblage hexagonal de blocs ostéomorphes (FIG. 9) a permis d'identifier des déplacements relatifs de blocs qui étaient interdits par le reste de la structure et pouvaient donc être négligés.

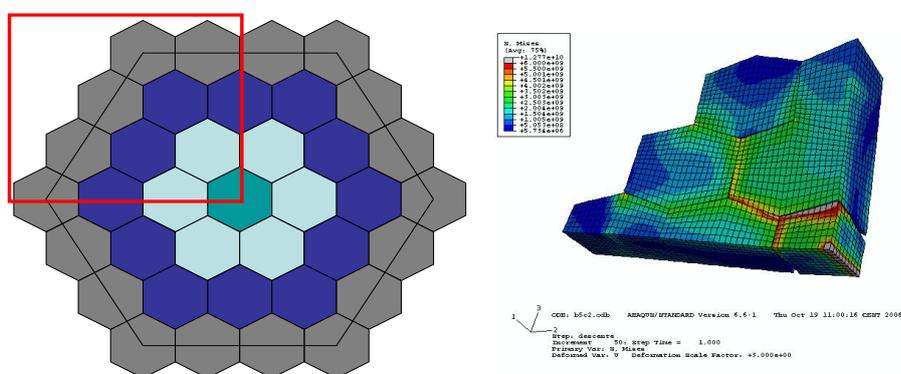


FIG. 9 – Assemblage de blocs ostéomorphes et exemple de calcul EF

En appliquant une succession de charges et de décharges (FIG. 10 : points A à H), on observe que l'histoire du chargement a une influence au cours de la deuxième phase, qui correspond à l'interface collée. Dans ce cas, plusieurs efforts sont possibles (P1,P2,P3) pour une même position relative des blocs ( $Dz/h=0.03$ ). Dans ce cas, il faut garder en mémoire le déplacement maximal atteint au cours de la charge (abscisse du point D) en plus des trois raideurs caractéristiques pour déterminer complètement le point de fonctionnement (P2). Ce paramètre devra être pris en compte dans le modèle discret.

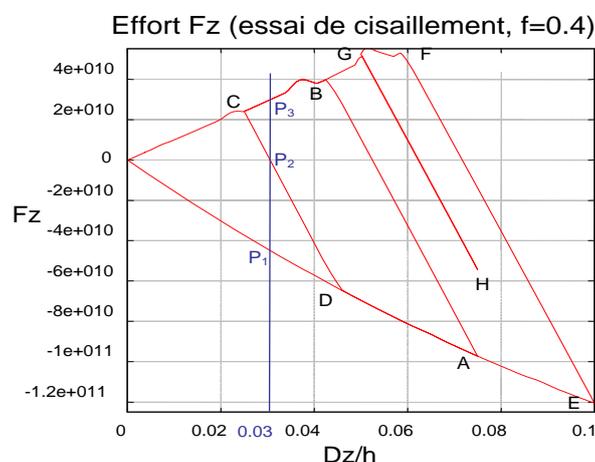


FIG. 10 – Influence de l'histoire de chargement

## 5 Conclusions

Les matériaux à topologie autobloquante présentent des propriétés intéressantes de tolérance à l'impact et au dommage. Des essais d'indentation d'un assemblage de blocs ostéomorphes réalisés en glace ont montré l'importance de la précontrainte sur la réponse du système. D'autres essais permettant de quantifier l'influence du coefficient de frottement sont en cours de réalisation.

Un modèle numérique fondé sur la dynamique d'éléments discrets est développé pour modéliser ce type de structure. Dans ce modèle, les règles locales définissant le contact entre deux blocs sont obtenues par éléments finis.

Les premiers résultats ont montré que la loi au contact pouvait être entièrement définie par trois droites maîtresses et une variable d'état mémorisant l'histoire du chargement.

Une simulation d'indentation d'un petit assemblage de blocs a montré que certains mouvements relatifs de blocs sont interdits par l'assemblage et peuvent par conséquent être négligés dans le modèle discret.

## Références

- Dyskin A.V., Estrin Y., Kanel-Belov A.J., Pasternak E. 2001 A new concept in design of materials and structures : assemblies of interlocked tetrahedron-shaped elements *Scripta Materialia* **44** 2689-2694
- Dyskin A.V., Estrin Y., Kanel-Belov A.J., Pasternak E. 2001 Toughening by fragmentation - How topology helps *Adv. Eng. Mater.* **3** 885-888
- Dyskin A.V., Estrin Y., Kanel-Belov A.J., Pasternak E. 2003 Topological interlocking of platonic solids : A way to new materials and structures *Phil. Mag. Letters* **83** 197-203
- Dyskin A.V., Estrin Y., Pasternak E., Kohr H.C., Kanel-Belov A.J. 2003 Fracture resistant structures based on topological interlocking with non-planar contacts *Adv. Eng. Mater.* **5** 116-119
- Glickman M. 1984 The G-block system of vertically interlocking paving *Second International Conference on Concrete Block Paving (Delft, April 10-12)* pp. 345-348
- Robson D.A. 1978 Deutsches Patent DE-AS 25 54 516