



**HAL**  
open science

# Un outil interactif graphique pour l'étude de la stabilité des maçonneries patrimoniales

Paul Nougayrède, Thierry Ciblac, François Guéna

## ► To cite this version:

Paul Nougayrède, Thierry Ciblac, François Guéna. Un outil interactif graphique pour l'étude de la stabilité des maçonneries patrimoniales. Journées Nationales Maçonnerie 2021, Jun 2021, Toulouse, France. hal-03690375

**HAL Id: hal-03690375**

**<https://hal.science/hal-03690375>**

Submitted on 8 Jun 2022

**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.



## UN OUTIL INTERACTIF GRAPHIQUE POUR L'ÉTUDE DE LA STABILITÉ DES MAÇONNERIES PATRIMONIALES

NOUGAYRÈDE, P.<sup>1</sup>, CIBLAC, T.<sup>2</sup>, GUÉNA, F.<sup>3</sup>

L'objectif de cette communication est de décrire le fonctionnement et les possibilités d'un outil opérationnel intégré dans le logiciel *Rhinoceros* pour l'étude de la stabilité des édifices en maçonneries patrimoniales, fondé sur la détermination de lignes de pression : LITHFI (Line of Thrust Finder).

### Contexte

La recherche MONUMENTUM, financée par l'ANR entre 2014 et 2017, a pour objectif de faciliter et d'automatiser le plus possible les étapes du processus de diagnostic d'un monument patrimonial en maçonnerie, depuis l'acquisition et le traitement numérique de la géométrie du bâtiment jusqu'à l'analyse structurelle, le diagnostic des différentes pathologies et l'aide quant aux décisions de conservation du bâti. L'un des maillons de cette chaîne de traitement consiste à réaliser une analyse de la stabilité de la structure à partir d'un relevé géométrique numérique. Cette analyse préalable permet alors de tirer des premières conclusions sur les capacités portantes et les fragilités éventuelles de la structure, permettant ainsi de nourrir les réflexions de conservation du bâti. Outre la possibilité d'un certain intérêt pédagogique, le développement d'un outil interactif simple et intuitif mais néanmoins précis facilite également l'accessibilité pour une variété d'utilisateurs différents (architectes, ingénieurs ou historiens). Ainsi, un objectif est de proposer un outil pouvant s'adapter à des cas d'étude de géométries et de complexité variées. Dans cette optique, Thierry Ciblac et François Guéna ont démontré, dans un premier temps, la faisabilité d'un tel outil en utilisant une logique de programmation orientée objet permettant la mise en place d'un système multi-agent et en mobilisant un algorithme génétique [1]. A partir du prototype réalisé dans l'environnement de travail de Grasshopper (plugin de modélisation paramétrique du logiciel Rhinoceros), le développement de l'outil interactif et de ses différentes fonctionnalités sous la forme d'un plugin de Rhinoceros, programmé en langage Python, fut l'objet du Travail de Fin d'Études de Paul Nougayrède effectué avec la Faculté Polytechnique de Mons.

### Cadre théorique : le calcul à la rupture et l'analyse limite

Le calcul à la rupture, tel que formalisé par Salençon [2], permet de déterminer le domaine de stabilité potentielle d'une structure en ayant simplement connaissance de la géométrie de la structure et des critères de résistance du matériau qui la constitue, pour un mode de chargement donné. Plus spécifiquement, l'analyse limite permet

---

<sup>1</sup> NOUGAYREDE, Paul, GSA / Ensa Paris-Malaquais, [paul.nougayrede@gmail.com](mailto:paul.nougayrede@gmail.com)

<sup>2</sup> CIBLAC, Thierry, GSA / Ensa Paris-Malaquais, [thierry.ciblac@paris-malaquais.archi.fr](mailto:thierry.ciblac@paris-malaquais.archi.fr)

<sup>3</sup> GUENA, François, Map-maacc Umr Cnrs-mcc 3495 / Ensa Paris-la-villette, [francois.guena@paris-lavillette.archi.fr](mailto:francois.guena@paris-lavillette.archi.fr)

d'appliquer les approches du calcul à la rupture en considérant que le matériau possède un comportement élastique parfaitement plastique : cette hypothèse de comportement permet de déterminer le domaine de stabilité stricte de la structure (et non plus potentielle, comme dans le cadre plus général du calcul à la rupture), pour un mode de chargement donné. Ainsi, Heyman [3] a posé les bases de l'analyse limite appliquées aux structures en maçonneries : en supposant trois hypothèses de comportement des structures clavées (résistance des blocs à la compression infinie, résistance à la traction nulle au niveau des joints et glissement entre deux blocs impossible) l'approche statique par l'intérieur permet, grâce au théorème statique, de poser un critère géométrique nécessaire et suffisant pour la stabilité de la structure, particulièrement efficace et simple à visualiser. En évaluant le critère de résistance du matériau au niveau des plans des joints rectilignes de la maçonnerie, on peut définir la ligne de pression comme l'ensemble des points d'application des forces résultantes au niveau des joints, pour une combinaison de forces aux joints des blocs de la structure qui assure l'équilibre statique de chacun des blocs (exemple de lignes de pression sur la Figure 1). Le critère géométrique résultant du théorème statique stipule alors que si l'on peut trouver une ligne de pression quelconque contenue dans les frontières des joints de la maçonnerie alors la structure est considérée comme stable. La connaissance de l'état effectif de la structure, et donc de la ligne de pression réelle de la structure n'est donc pas nécessaire dans ce cadre-là pour conclure sur la stabilité.

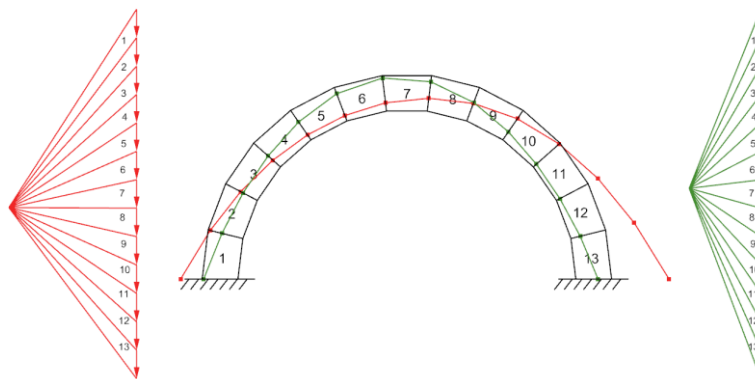


Figure 1 : Exemples de différentes lignes de pression (contenues ou non à l'intérieur des frontières de la maçonnerie) et les polygones des forces correspondants, pour une géométrie donnée

### Fonctionnement de l'outil

L'outil informatique LITHFI (Line of Thrust Finder) a été développé en langage Python sous la forme d'un plugin couplé à un logiciel de dessin assisté par ordinateur (Rhinceros). Cet outil permet d'appliquer le théorème statique à n'importe quelle structure, dessinée en deux dimensions dans l'interface graphique du logiciel, pour un chargement donné quelconque. La section de l'édifice étudié doit être donnée sous la forme de blocs successifs en deux dimensions. Les joints sont détectés aux interfaces des blocs. Certains points de la ligne de pression sont considérés comme des paramètres la définissant. Ils sont choisis en fonction de la topologie de la structure et leur nombre dépend du degré d'hyperstatisme. Les autres points de la ligne de pression sont déduits de la position de ces premiers points. Les lignes de pression intérieures aux frontières de la maçonnerie de la maçonnerie sont recherchées en utilisant une optimisation par algorithme génétique où les gènes sont les paramètres. Le système multi-agent permet d'assurer à tout moment de l'algorithme, et ce de manière dynamique, la compatibilité statique de l'intégralité des blocs de la structure.

## Description de l'outil

Le logiciel, disponible en licence libre (<https://www.food4rhino.com/app/lithfi>), est un plugin aisément intégrable au logiciel Rhinoceros et utilisant son interface graphique. La première étape pour l'utilisateur consiste à enregistrer la géométrie, préalablement dessinée dans l'interface graphique de Rhinoceros : il faut alors sélectionner les blocs qui constituent la structure et les supports de cette structure qui seront considérés comme fixes. Les blocs doivent être sous la forme de polygones fermés et une fonctionnalité permet à l'utilisateur de régler la précision souhaitée pour la détection des joints entre les blocs (dans l'éventualité d'un tracé approximatif).

En plus de permettre d'imposer des chargements divers (modélisation de charges séismiques sous forme quasi-statique, charges extérieures quelconques) et des hypothèses de calcul spécifiques (localisations d'éventuels points de passage de la ligne de pression connues, épaisseurs des blocs, masses volumiques, etc...) l'outil retourne à l'utilisateur une visualisation graphique de la ligne de pression valide, trouvée par l'algorithme génétique. Il est alors possible de manipuler de manière interactive les points de cette ligne de pression pour modifier leurs positions ainsi que les caractéristiques des forces résultantes en chacun des joints de la structure tout en visualisant en parallèle l'évolution dynamique de la ligne de pression et du polygone des forces de la statique graphique (Figure 2). L'outil permet également d'évaluer en chacun des joints le risque de glissement au sens de Coulomb.

Enfin, une commande de l'outil permet de déterminer, pour n'importe quelle structure ayant un degré d'hyperstatisme égal à 3 (par exemple, un arc sur deux appuis), les lignes de pression correspondant aux poussées horizontales maximale et minimale (poussées active et passive). La détermination de ces deux lignes de pression particulières permet d'évaluer le domaine de stabilité de la structure et donne une indication sur les mécanismes cinématiques probables dans les cas où la structure est soumise à une poussée horizontale trop élevée ou trop faible, en identifiant clairement les points de contact au niveau desquels apparaissent les articulations.

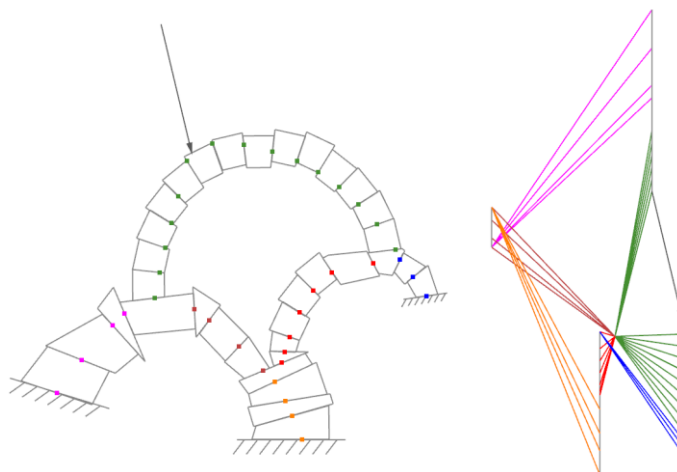


Figure 2 : Exemple d'une ligne de pression valide trouvée par l'outil pour une géométrie donnée, soumise à une force extérieure, et polygone des forces correspondant à cette ligne de pression

## Exemples et applications

La précision de l'outil a tout d'abord été testée en vérifiant des applications déjà connues et documentées. La valeur de l'épaisseur minimale d'un arc en plein cintre possédant des joints radiaux et soumis uniquement à son poids propre a notamment

été retrouvée avec une précision comparable à l'épaisseur théorique calculée par Makris et Alexakis [4] pour un arc infinitésimal, et la manière avec laquelle un nombre fini de claveaux influence la valeur de l'épaisseur minimale a également été redémontrée à l'aide des différentes fonctionnalités de l'outil.

Une application a été réalisée pour l'étude de la stabilité d'une géométrie inspirée d'une section de travée de la nef de la basilique Sainte Marie-Madeleine à Vézelay dans le but, notamment, de vérifier les descriptions des éventuels désordres (évoqués notamment par Viollet-le-Duc) qui se seraient manifestés à l'époque de sa construction lorsque, dans un premier temps, les arcs-boutants de la nef n'avaient pas encore été construits (Figure 3).

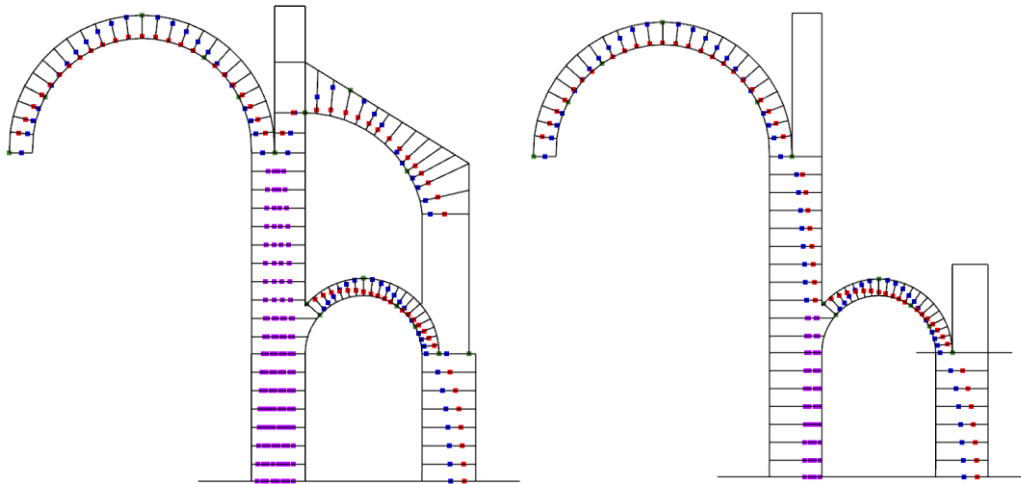


Figure 3 : Cas de lignes de pression extrémales pour une géométrie inspirée de la basilique de Vézelay, avec et sans arcs-boutants

## Conclusion

L'outil proposé présente l'avantage de permettre l'étude interactive de structures maçonnées 2D pour tous types de géométries, topologies et chargements. L'étude de cas complexes passe par une démarche itérative mobilisant les fonctionnalités de base. L'outil n'a donc pas vocation à être utilisé comme une boîte noire pour aborder un problème dans sa globalité mais plutôt comme un outil spécifique mobilisé dans une démarche globale structurée et construite par l'utilisateur. En ce sens, la diffusion de l'outil a pour vocation de permettre l'exploration de ses usages et potentialités auprès d'un large public. Une étape suivante consistera à faire évoluer les fonctionnalités de l'outil en fonction d'usages nouveaux identifiés.

## Références

- [1] T. Ciblac et F. Guéna. Un outil interactif pour l'étude de la stabilité des maçonneries patrimoniales, Construire ! Entre Antiquité et époque contemporaine, Actes Sud, (à paraître) 2019, p. 707-715.
- [2] J. Salençon, Calcul à la rupture et analyse limite, Paris, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 1983.
- [3] J. Heyman, The stone skeleton: Structural engineering of masonry architecture, Cambridge, Cambridge University Press, 1995.
- [4] Makris, N. et H. Alexakis. The effect of stereotomy on the shape of the thrust-line and the minimum thickness of semicircular masonry arches, Archive of Applied Mechanics, 2013 vol. 83, n°10, p. 1511-1533.