

# Décrire une hypothèse au sein d'un graphe de connaissances, d'une simulation mécanique à un fait historique

**Antoine Gros, Livio De Luca**

UMR CNRS/MC 3495 MAP

Modèles et Simulations

pour l'Architecture et le Patrimoine

13402, Marseille, France

antoine.gros@map.cnrs.fr

livio.deluca@map.cnrs.fr

**Frédéric Dubois**

UMR CNRS/UM 5508 LMGC

Laboratoire de Mécanique et de Génie Civil

34090, Montpellier, France

frederic.dubois@umontpellier.fr

**Philippe Véron**

LISPEN EA 7515

Laboratoire d'Ingénierie des

Systèmes Physiques et Numériques

13100, Aix-en-Provence, France

philippe.veron@ensam.eu

**Kévin Jacquot**

UMR CNRS/MC 3495 MAP

Modèles et Simulations

pour l'Architecture et le Patrimoine

69120, Vaulx-en-Velin, France

kevin.jacquot@map.cnrs.fr

## Résumé

L'étude d'un monument historique amène l'ingénieur en génie civil comme l'historien à reconstituer une histoire parcellaire en confrontant un ensemble incomplet de documents et de données. Ils s'inscrivent tous deux dans une démarche prospective, de formulation et argumentation autour d'hypothèses sur le passé de l'ouvrage. L'un par le travail sur les sources archivistiques, l'autre par la modélisation et simulation du vécu de l'ouvrage, vu comme un système structurel.

Le point de départ de cette contribution se situe dans les données et modèles produits par le génie civil pour aller vers un dialogue avec les autres disciplines. De ce fait, comment mémoriser et rendre interrogeable les hypothèses, modèles et résultats de simulations mécaniques ? Car, si l'ingénieur peut utiliser les faits historiques comme prémisses, comment l'historien pourrait se saisir des produits de ces travaux pour composer une source documentaire ?

Les points de jonction et la circulation de la donnée scientifique entre disciplines aux finalités hétérogènes seront identifiés par des méthodes issues des sciences de l'information. Notamment l'utilisation de *mappings*, de vocabulaires communs dans le contexte d'un graphe de connaissances en *Linked Open Data* (LOD). Cela nous amène ainsi à raffiner les liens entre le monument, sa stabilité et les événements qu'il a abrités, hypothétiques ou observés.

nés à reconstituer les parcelles de son histoire et de son contexte en confrontant un ensemble incomplet de données et de documents. Si le premier a pour objectif de déterminer la stabilité de cet ouvrage et de la pérenniser, le second se voue à rendre intelligible son passé (Ricoeur, 2003). Accordement à la distance entre ces objectifs, il existe un écart méthodologique entre ces disciplines. Pour autant, les énoncés de l'un peuvent convenir à l'autre, qu'ils soient des observations, des hypothèses, des interprétations ou des simulations. Ainsi, une hypothèse formulée depuis l'analyse de sources archivistiques peut être questionnée à travers les données non empiriques produites lors d'une simulation (Giaccone, 2020), tout comme un résultat de simulation aberrant par rapport aux observations sur l'ouvrage peut faire naître de nouvelles hypothèses (Herdt, 2015; Mainstone, 1997).

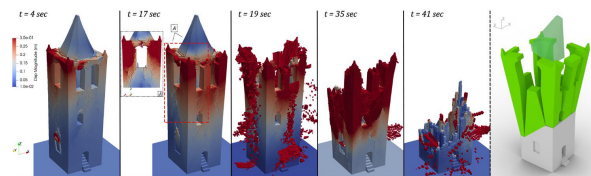


FIGURE 1 – Simulation mécanique de la tour de Rotella (Ascoli Piceno, Italie) lors d'un séisme (Ferrante et al., 2021), par la méthode des éléments discrets et le solveur LMGC90 (Dubois et al., 2011)

## 1 Introduction

Lors de l'étude d'un monument historique, l'ingénieur en génie civil comme l'historien sont ame-

## 1.1 Éléments de contexte sur la simulation mécanique d'un ouvrage bâti

Une simulation mécanique appliquée à un bâtiment existant retrace en accéléré le vécu de cet ouvrage à travers le temps. Elle reproduit la phénoménologie d'un système mécanique, c'est-à-dire qu'elle décrit les états successifs des contraintes, déformations, variables internes de ce système depuis un état initial. Cela au moyen d'équations approxinant le comportement des corps et des lois d'interaction entre ces corps [Figure 1]. L'état actuel est composé d'un ensemble d'énoncés particuliers à l'ouvrage : ses conditions initiales (la géométrie et les matériaux de l'ouvrage), ses conditions aux limites (les appuis, les chargements appliqués à l'ouvrage) et des variables internes traduisant les altérations des comportements des matériaux. Il en revient à l'ingénieur d'interpréter et expliquer les résultats de la simulation au vu de la connaissance et des données empiriques de l'ouvrage étudié.

## 2 Problématique

Prise isolément dans le contexte opérationnel, la question d'archivage des simulations mécaniques est secondaire. Elle devient primordiale lors du suivi d'un chantier complexe ou d'un parc d'ouvrages ; elle est cruciale dans un contexte interdisciplinaire, requérant la possibilité de qualifier la simulation comme partie d'une source documentaire. De ce fait, comment mémoriser et rendre interopérables les observations, hypothèses, modèles et résultats relatifs à une simulation mécanique ?

## 3 Approche méthodologique

Nous proposons de traiter cette question sous l'angle des sciences de l'information, à travers l'élaboration des métadonnées. Leur usage conjoint vise à véhiculer le sens d'une donnée dans un langage formel, les rendant interrogeables aussi bien par l'homme que par la machine. Précisons ces deux notions :

### 3.1 Métadonnées et Provenance

D'une part les métadonnées sont des ensembles de propriétés élaborées pour décrire une donnée ou une ressource. Dans le cas de la donnée scientifique, ce sont autant d'éléments venant étayer la reproductibilité et la transparence d'un résultat (Leipzig et al., 2021; Schriml et al., 2020). D'autre part, la provenance contient le lignage de la donnée, son

histoire (Guillem and Lercari, 2022). Soit des informations pour établir un cadre de confiance et d'utilisation. Dans le cas de la donnée scientifique, l'attention portée à la provenance est conjointe à l'explicitation de la valeur de vérité d'une proposition liée à cette donnée, dans un contexte qui peut être spécifique.

### 3.2 Web sémantique et *Linked Open Data*

À l'instar du web sémantique, nous traitons la donnée sous la forme de *Linked Open Data* (LOD), de façon à constituer un graphe de connaissances. Il permet d'enregistrer notamment les caractéristiques physiques d'un objet, tout comme l'évaluation de données qui y serait liée (Gros et al., 2023). Les métadonnées sont rédigées selon des schèmes standardisés, facilitant la circulation des propriétés les plus génériques, tout en pouvant être spécialisés selon la donnée et son usage. Élaborer la provenance d'une donnée rejoint les impératifs de la modélisation sémantique. Elle est considérée en *LOD* par la manipulation d'ontologies, des modèles abstraits partagés au sein de communautés et exprimés dans un langage formel (Studer et al., 1998). Ces modèles abstraits contiennent des classes et des propriétés permettant de caractériser les données et leurs relations de sorte à retracer leur lignage. Choisir ou concevoir une ontologie, c'est définir quelles assertions pourront être formulées : des changements d'état, des attributs, la reproduction de modalités logiques comme le *nécessaire* (p.ex. un fait observé), le *possible* (p.ex. une hypothèse valide dans un contexte précis), etc.

### 3.3 Ontologies et Modélisation des données

De ce fait, l'utilisation d'une ontologie conditionne autant l'intégration des informations que l'expressivité des métadonnées de l'archive. Donc sa capacité à être qualifiée comme source documentaire.

Prenons un exemple issu de l'état de l'art : si l'objectif est de constituer une base de connaissances de résultats de simulation destinée à l'entraînement de modèles d'apprentissage automatiques, l'utilisation de la *Physics-based Simulation Ontology*, une extension de *Basic Formal Ontology* (BFO) est un choix pertinent car tous les liens entre le résultat de simulation mécanique et le solveur de calcul sont pris en compte (Cheong and Butscher, 2019).

Nous souhaitons lier les informations afférentes à l'observation du monument sur site, la formula-

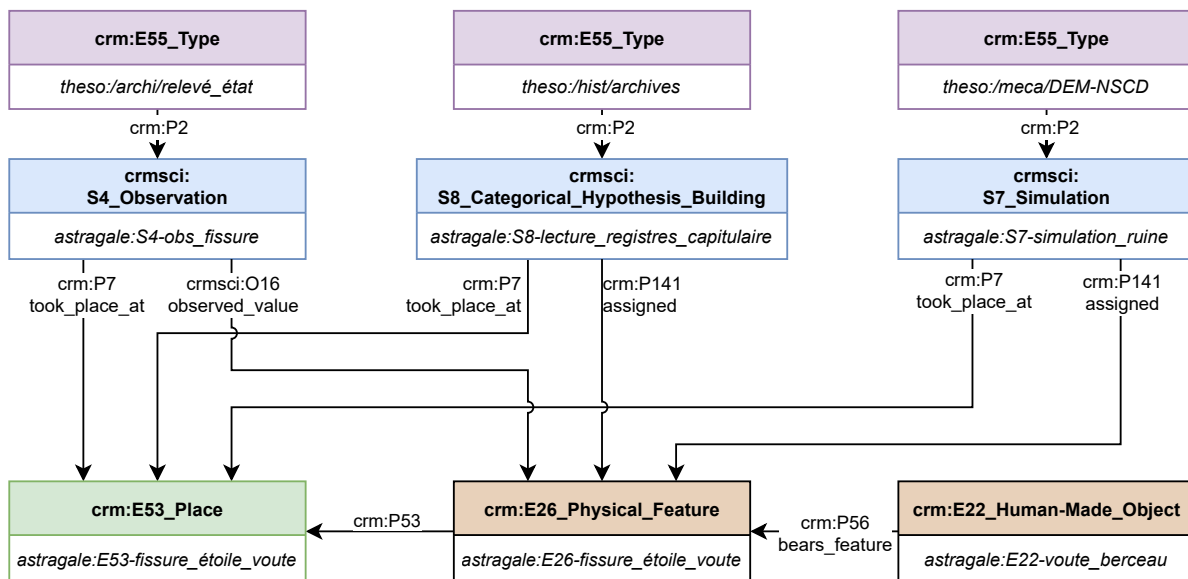


FIGURE 2 – Diagramme de mapping pour la mise en donnée d'un même fait décrit de trois manières différentes (*CRMcore*, *CRMsci*)

tion d'hypothèses historiques, les résultats de simulation mécanique. On remarque que la production de chacune de ces informations vient d'une donnée scientifique, produite par une démarche expérimentale ou hypothético-déductive (Ricoeur, 2003; Imbert, 2017). De ce point de vue, les données concernant l'étude de la stabilité et de l'histoire d'un monument historique proviennent d'une collaboration entre les différentes méthodes des disciplines conviées. Il suffit alors de concevoir ou de sélectionner un modèle de données non seulement capable de représenter l'objet et ses attributs, mais aussi la démarche relative à son étude.

## 4 Expérimentation

Nous proposons une expérimentation réutilisant *CRMcore*, *CRMsci* et *CRMinf*, trois ontologies formelles de la famille CIDOC CRM. Ce sont des ontologies orientées événement qui permettent : (a) l'intégration de données hétérogènes et (b) "d'accommoder des opinions alternatives et des informations incomplètes" (Bekiari et al., 2021). Le champ d'application relatif à *CRMcore* est celui de la conservation et des sciences du patrimoine (Le Boeuf, 2013). Il est élargi par *CRMsci* et *CRMinf* à l'ensemble des sciences descriptives et empiriques en intégrant pour l'une : les activités d'observation, de mesure et de simulation, pour l'autre : la mise en données d'inférences et d'argumentations. Afin d'adapter ces ontologies aux données de notre étude, leurs classes et propriétés sont ty-

pées au moyen de vocabulaires contrôlés.

Nous présentons un extrait de cette expérimentation sous la forme de deux diagrammes de mapping, [Figure 2] et [Figure 3], produits lors de la modélisation ontologique. Le premier montre la liaison entre trois démarches différentes - une observation sur site, une hypothèse dérivée de la lecture d'une source archivistique, le résultat d'une simulation mécanique - par un même fait [Figure 2]. Le second expose l'intégration d'une hypothèse dérivée d'une source archivistique dans le contexte d'une simulation mécanique [Figure 3].

## 5 Conclusion

Au fil de cette contribution, nous avons identifié et formalisé un lien existant entre la donnée scientifique produite par l'étude d'une archive historique et les résultats d'une simulation mécanique relative à un monument. Ce lien a été présenté sous la forme de deux diagrammes de mapping, en accord avec l'outillage technique proposé par le web sémantique. Ainsi, le graphe de connaissances élaboré peut être étendu à d'autres aspects du monument par les schémas relatifs aux ontologies de la famille CIDOC CRM, ou densifié pour décrire plus finement un résultat de simulation au moyen de la *Physics-Based Simulation Ontology*.

Dans une perspective interdisciplinaire et du point de vue de l'information, l'utilisation de schémas de métadonnées au sein d'un graphe connaissances permet d'archiver les propriétés d'un objet

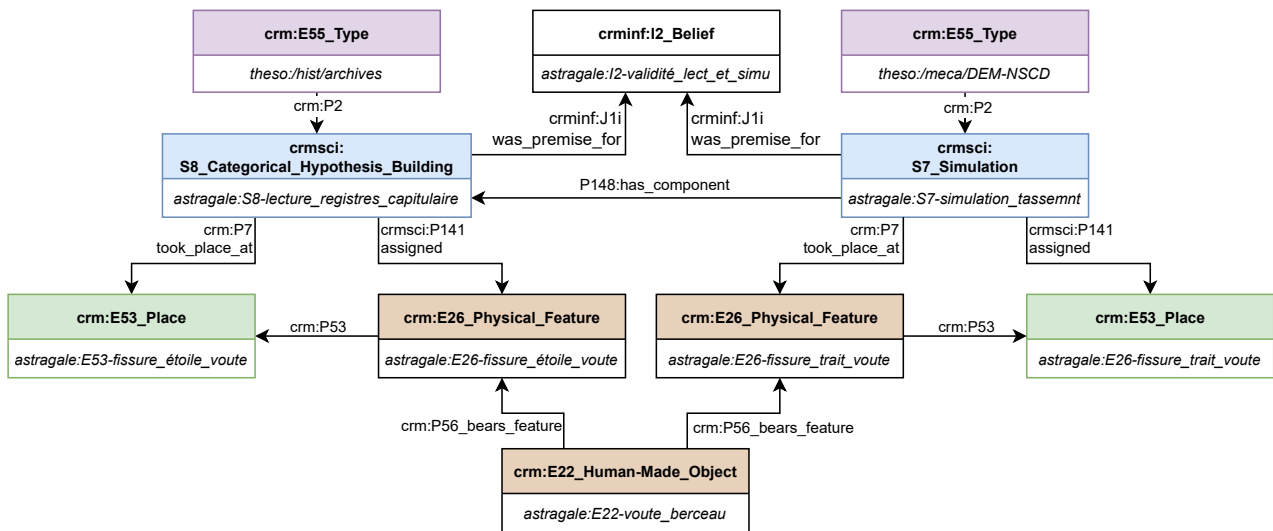


FIGURE 3 – Diagramme de mapping pour la mise en donnée d'un résultat de simulation prenant pour prémisses une hypothèse issue d'une source archivistique (CRMcore, CRMsci, CRMinf)

aux côtés des processus hétérogènes qui les ont étudiés. Du point de vue de la collaboration entre les disciplines, la maîtrise de l'information favorise le déroulement de méthodes co-construites. Ici, l'association de l'ingénieur en génie civil et de l'historien évoque alors la redécouverte de procédure de construction, la restitution de structures ou encore l'analyse de son comportement à la ruine et des raisons qui y mèneraient.

## Remerciements

Ce travail a été soutenu par le projet ASTRAGALE et financé par la Mission pour les Initiatives Transverses et Interdisciplinaires, Centre National de la Recherche Scientifique, France.

## Jeu de données

Un jeu de données traitées selon les diagrammes présentés est disponible à l'adresse <https://github.com/cnrs-mc-umr3495-map/miti-astragale>.

## References

Chryssoula Bekiari, George Bruseker, Martin Doerr, Christian-Emi Ore, Stephen Stead, and Athanasios Velios. 2021. *Definition of the CIDOC conceptual reference model v7.1.1*.

Hyunmin Cheong and Adrian Butscher. 2019. Physics-based simulation ontology : An ontology to support modelling and reuse of data for physics-based simulation. *Journal of Engineering Design*, 30(10-12) :655–687.

Frédéric Dubois, Michel Jean, Mathieu Renouf, Rémy Mozul, Alexandre Martin, and Marine Bagneris. 2011. Lmgc90. In *10e Colloque National En Calcul Des Structures*.

Angela Ferrante, Dimitrios Loverdos, Francesco Clementi, Gabriele Milani, Antonio Formisano, S. Lenci, and Vasilis Sarhosis. 2021. *Discontinuous approaches for nonlinear dynamic analyses of an ancient masonry tower*. *Engineering Structures*, 230.

Domenico Giacccone. 2020. The peristyle of the Temple of Apollo at Syracuse : Historical hypotheses of reconstruction revisited through a finite element analysis. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 16 :e00138.

Antoine Gros, Anaïs Guillem, Livio De Luca, Élise Baillieul, Benoit Duvocelle, Olivier Malavergne, Lise Leroux, and Thierry Zimmer. 2023. *Faceting the post-disaster built heritage reconstruction process within the digital twin framework for Notre-Dame de Paris*. *Scientific Reports*, 13(1) :1–12.

Anaïs Guillem and Nicola Lercari. 2022. *Global Heritage, Knowledge Provenance, and Digital Preservation: Defining a Critical Approach*. In Nicola Lercari, Willeke Wendrich, Benjamin W. Porter, Margie M. Burton, and Thomas E. Levy, editors, *Preserving Cultural Heritage in the Digital Age : Sending Out an S.O.S.*, pages 26–41. Equinox Publishing Ltd.

Georg Herdt. 2015. On the architecture of the Toumba Building at Lefkandi. *Annual of the British School at Athens*, 110 :203–212.

Cyrille Imbert. 2017. *Simulations, explication, compréhension : essai d'analyse critique*. *Philosophia Scientiae*, (21-3) :49.

Patrick Le Boeuf. 2013. Le modèle conceptuel de référence du CIDOC : De la sémantique des inventaires aux musées en dialogue. *Culture & musées*, 22(1) :89–111.

- Jeremy Leipzig, Daniel Nüst, Charles Tapley Hoyt, Karthik Ram, and Jane Greenberg. 2021. The role of metadata in reproducible computational research. *Patterns*, 2(9) :100322.
- Rowland J. Mainstone. 1997. Structural analysis, structural insights, and historical interpretation. *The Journal of the Society of Architectural Historians*, 56(3) :316–340.
- Paul Ricoeur. 2003. *La Mémoire, l'Histoire, l'Oubli*. Seuil, Paris.
- Lynn M. Schriml, Maria Chuvochina, Neil Davies, Emily A. Eloë-Fadrosh, Robert D. Finn, Philip Hugenholtz, Christopher I. Hunter, Bonnie L. Hurwitz, Nikos C. Kyrpides, and Folker Meyer. 2020. COVID-19 pandemic reveals the peril of ignoring metadata standards. *Scientific data*, 7(1) :188.
- Rudi Studer, V. Richard Benjamins, and Dieter Fensel. 1998. Knowledge engineering : Principles and methods. *Data & knowledge engineering*, 25(1-2) :161–197.