

Top modèle et Top simulation : la momie de Lunéville

Observation, Modélisation, Simulation et Validation

*Dominique MÉRY et Didier FASS ©
Équipe MOSEL
LORIA - Campus Scientifique - BP 239 –
54506 Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex*

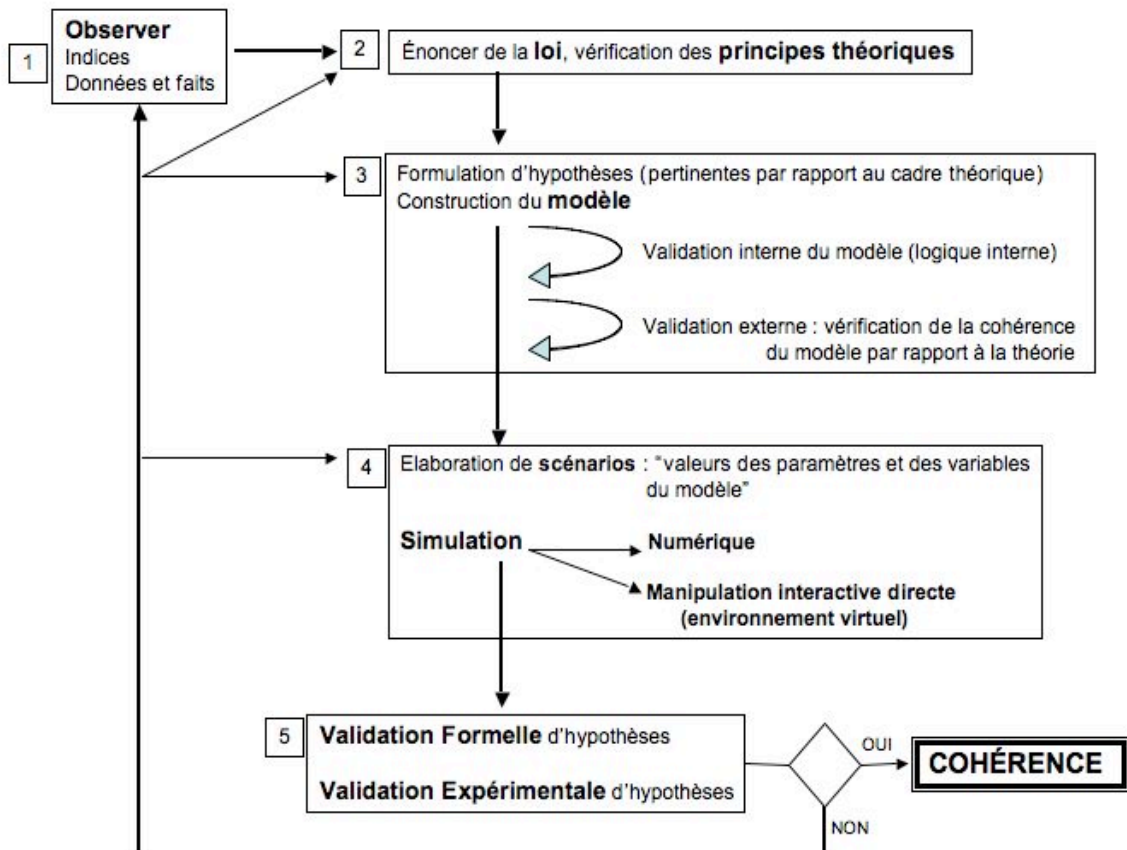


Fig. 1 : Les cinq étapes de notre méthode de formulation d'hypothèse et de preuve.

Pourquoi l'étude d'une momie intéresse-t-elle des chercheurs en informatique et intégration homme système ? Au-delà de la curiosité et de l'intérêt intellectuel qui devrait animer tout chercheur, ce n'est pas tant la momie en elle-même que la méthode de formulation d'hypothèses et de preuve concernant sa personne et son histoire et leurs validations qui nous motivent (Fig.1) . L'étude d'une momie consiste à rassembler des faits et éléments objectifs à partir du corps lui-même, sur le contexte et son environnement de découverte et sur la connaissance relative à l'histoire et aux modes de vie de son époque. Cette démarche est conduite selon un cadre scientifique et des principes vérifiés formellement ou validés par l'expérience ; tout du moins admise comme correcte par une communauté scientifique donnée. C'est ce que l'on appelle une théorie.

Le spécialiste du corps ancien mène une enquête. En associant et en reliant des faits avérés et ses connaissances, il formule des hypothèses. Cette étape repose

essentiellement sur son expertise et son savoir-faire. Pour tester ces hypothèses, il construit un modèle qu'il associe à un ou des scénarii plausibles pour tester le comportement de son modèle. C'est la simulation.

Pour tester la cohérence du modèle et valider l'hypothèse, il y a deux étapes complémentaires et parallèles. La première concerne la construction ou l'architecture du modèle lui-même, sa validation interne ou intrinsèque. Elle utilise des méthodes formelles (mathématique, logique ou informatique) pour vérifier la cohérence et la structure logique correcte du modèle. La seconde consiste à tester la cohérence et la robustesse du modèle par rapport à la théorie de référence et aux scénarii envisagés. Traditionnellement cette seconde étape se fait par sur une argumentation orale ou écrite. Mais aujourd'hui les méthodes des technologies numériques et des environnements virtuels ouvrent de nouvelles perspectives de monstration ou de démonstration pour l'étude des corps anciens ou en criminalistique.

La question de la preuve et de la validité des hypothèses et des modèles traverse les sciences et les techniques actuelles. Fondées sur la modélisation et la simulation, elles exigent une observation de la réalité et des éléments données fiables issues de l'observation directe ou reconstruite à partir de moyens techniques spécifiques (imagerie médicale, analyse ADN, analyse toxicologique...). De plus, elles doivent se fonder sur une théorie vérifiée. Sans cela elles demeurent spéculatives. L'enjeu, d'un point de vue général, est qu'elles soient fiables, prédictives et sûres.

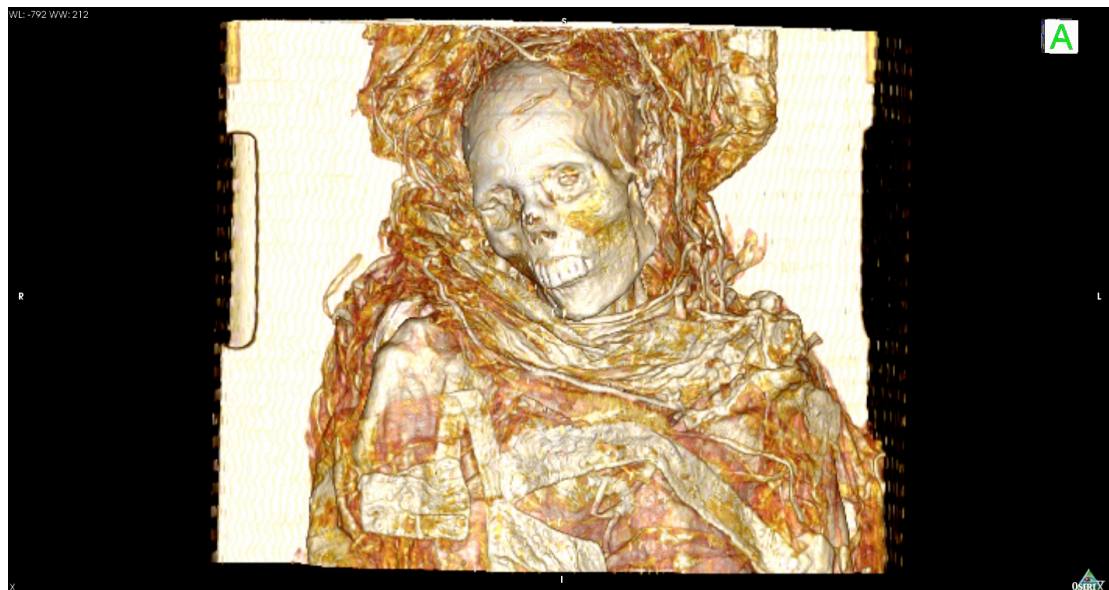


Fig. 2 : Visualisation 3D de la momie de Lunéville en rendu volumique. Le traitement d'image choisi permet de visualiser la momie dans ces linges.

La modélisation formelle

La science et l'ingénierie fondées sur la simulation, et donc implicitement sur la modélisation, sont des éléments cruciaux des futurs progrès scientifiques et techniques. De l'intuition à la conviction, de la rhétorique à la preuve formelle, de la théorie à la pratique, du concept au prototype, la conception d'un système hétérogène intégrant des éléments artificiels, logiciels et matériels, et des éléments naturels,

l'humain, repose en partie sur une modélisation plus ou moins explicitée et explicitable. Le rôle de la modélisation est de fournir un modèle ou des modèles contribuant à la compréhension objective du système à concevoir ou à étudier. Elle fonde en partie la qualité, le réalisme et la fiabilité des simulations et des maquettes numériques. Le processus de modélisation s'appuie sur des langages permettant de représenter les modèles et il peut être mené de plusieurs façons : il repose sur une expertise forte ou bien encore il est incrémental et progressif et s'appuie sur des techniques objectives notamment l'expérimentation et la démonstration. Parmi les systèmes envisageables, on pourra citer quelques exemples témoignant d'une grande diversité :

- Système de pilotage d'un avion
- Système de maintenance d'un avion
- Supervision assistée de personnes en milieu médical
- Système d'analyse de scènes en criminalistique
- Système d'assistance médicale

De tels systèmes¹ sont principalement caractérisés par l'aspect critique de leur utilisation et l'intégration d'entités biologiques ou logicielles ou matérielles ou humaines c'est-à-dire une hétérogénéité dans les composants interagissant. Les exigences formulées nécessitent des méthodes et des outils de modélisation intégrant à la fois des aspects formels et des aspects expérimentaux apportant conjointement fiabilité et sûreté. Conçus avec les outils et les méthodes de l'ingénierie, par exemple dans le domaine aéronautique, ou celles de l'art et des savoir-faire des praticiens, celle du médecin légiste ou du réanimateur par exemple, ces systèmes artificiels *sécurité critique* posent de nombreux problèmes de sûreté, de fiabilité, de maintenance, de reproductibilité. Enfin, la modélisation permet d'analyser les systèmes et d'étudier des aspects liés à leur prédictibilité, sans pour autant être une image fidèle du système mais en y donnant une abstraction.

C'est dans ce cadre scientifique et pratique que nous recherchons les principes théoriques ou règles d'organisation des modèles pour la criminalistique et l'archéologie criminelle et leurs applications à la conception d'outil numérique d'investigation et de preuve.

Fondements scientifiques généraux

Comprendre les bases scientifiques et technologiques de la fiabilité et de la sûreté technique, organisationnelle et déontique des systèmes artificiels et des humains en interaction ou non avec ces artefacts, est un objectif majeur pour de nombreux domaines « *sécurité critique* ». Notre approche consiste à rechercher et à vérifier les principes théoriques et à développer les méthodes de validation formelle et expérimentales pour la modélisation et la simulation au service de la criminalistique et de l'archéologie. Concevoir et valider des principes théoriques formels pour

¹ N. Levenson and C. Turner. An investigation of the Therac 25 accidents. *Computer*, July 1993.

l'expertise médico-légale, la criminalistique et l'archéologie², c'est développer des techniques de conception, d'organisation et de design des modèles et des outils de validation et de preuve expérimentale et numérique permettant de vérifier une hypothèse et d'explorer la convergence des indices pour en assurer la cohérence formelle (Il existe une forme optimale).

Les systèmes intégrant des éléments logiciels, matériels ou humains, nécessitent d'être modélisés afin de s'assurer de leur bonne conception. Cette bonne conception revient à assurer que le système conçu est en adéquation avec les exigences attendues. Ces exigences expriment des propriétés de sûreté et de fiabilité, voire des propriétés déontiques ou des propriétés qui sont parfois assez difficiles à définir notamment dans le cas de systèmes mettant en œuvre une politique de sécurité. D'une certaine mesure la difficulté est de construire un modèle du système à partir de descriptions pouvant être informelles ; un modèle formel peut permettre de mettre en évidence une structure pas toujours évidente à découvrir et il peut aussi être utilisé pour appliquer des opérations ou des transformations sur le système lui-même. Nous nous plaçons dans le cadre du triptyque défini par Dines Bjoerner³ : $D, S \rightarrow R$ où D est le domaine du système S et où les exigences R sont satisfaites par la relation \rightarrow ; ainsi, S est en quelque sorte un modèle de notre système. Si le triptyque permet d'exprimer de manière synthétique une situation liant le domaine du problème, un modèle du système et des exigences, il demeure très général et peut être instancié dans différents cadres⁴.

Les objectifs scientifiques visent à développer des études et des outils pour comprendre, concevoir et valider des principes de modélisation de systèmes intégrant in fine des éléments logiciels, matériels et d'interaction humaine. La figure donne des éléments de dépendance entre les différentes phases ou étapes d'analyse du modèle du système et de validation du modèle.

D'une part, nous cherchons et vérifions les principes théoriques, d'autre part nous développons les méthodes de validations formelles et expérimentales pour la criminalistique et l'archéologie. Ce travail s'appuie sur la collaboration de spécialités à la fois en modélisation et en domaine du problème. L'observation est une phase essentielle pour rejouer les actions de cette activité d'expertise. On peut imaginer la mise en évidence d'un modèle sous-jacent impliquant des optimisations des actes à mener pour cette expertise. Dans le cadre d'un projet RNRT⁵ nous avons mis en évidence une structure pour l'analyse du signal en TNT, à

² Janot, F., and Fass, D., *Le corps d'une "prophétesse"*, MDAIK-Mitteilungen der deutschen Institut für ägyptische Altertumskunde in Kairo, Berlin/Wiesbaden/Mainz, Berlin (à paraître) 2009.

³ Dines Bjoerner. Software Engineering 1 Abstraction and Model ling. Texts in Theoretical Computer Science. An EATCS Series. Springer, 2006. ISBN: 978-3-540-21149-5. Dines Bjoerner. Software Engineering 2 Specification of Systems and Languages. Texts in Theoretical Computer Science. An EATCS Series. Springer, 2006. ISBN: 978-3-540-21150-1. Dines Bjoerner. Software Engineering 3 Domains, Requirements, and Software Design. Texts in Theoretical Computer Science. An EATCS Series. Springer, 2006. ISBN: 978-3-540-21151-8.

⁴ Dines Bjoerner. DOMAIN Engineering Technology Management, Research and Engineering. COE Research Monograph Series, Vol. 4, JAIST, 2009.

⁵ D. CANS ELL, D. MÉRY, C. PROCH. – -System-on-Chip Design by Proof-based Refinement-. – International Journal on Software Tools for Technology Transfer (STTT) (2009).

partir d'études psycho-sensorielles menées en amont ; le modèle formel a permis de structurer des paramètres à calculer et d'optimiser l'outil produit.



Fig. 3 : Visualisation volumique 3D du squelette de la momie.

D'autre part, un certain nombre de systèmes médicaux à logiciel prépondérant comme des pompes d'injection, des stimulateurs ou pacemakers, etc. sont de plus en plus utilisés dans le milieu médical. La fiabilité et la sûreté de ces systèmes est posée et la question est de développer des modèles de ces systèmes afin de mieux comprendre comment les utiliser, les maintenir et les fiabiliser. Harold Thimbleby avait rapporté des incidents regrettables dans la manipulation de tels systèmes au cours de son exposé de la conférence FMIS 2006. Ces systèmes deviennent de plus en plus complexes et cette complexité apporte encore des questions liées à la décomposition et à la composition des entités logicielles induisant des interactions de service qui demeurent parfois fatales. Si le pacemaker est un système assez courant, il demeure un système à maîtriser sur le plan de la modélisation formelle comme l'indique le challenge lancé sur les systèmes critiques à l'initiative de Tony Hoare ; l'intérêt de cette activité est de valider des approches formelles sur de vrais systèmes et le cas du pacemaker est donné comme un système intéressant pour comprendre les questions posées par la modélisation et la validation de tels systèmes. Il ne s'agit pas de se limiter à ce système mais de promouvoir des relations avec le milieu médical, mes experts du domaine. Les travaux s'appuient sur des relations avec des chirurgiens, des réanimateurs et des praticiens capables de nous apporter des éléments d'expertise tant sur le plan clinique que sur celui des procédures suivies. Nous avons entrepris des relations directes avec des collègues médecins du CHU de Nancy, afin de développer des collaborations avec ces spécialistes.

À partir de ces exemples, on imagine aussi très bien les applications à l'expertise médico-légale à la conception sûre de ces systèmes *homme dans la boucle*⁶.

D. MÉRY, D. CANS ELL , C. PROCH, D. ABRAHAM, P. DI T S CH. --The challenge of QoS for digital television services-. – EBU Technical Review (avril 2005).

⁶ Fass, D., Integrative Physiological Design: A Theoretical and Experimental Approach of Human Systems Integration, in D. Harris (Ed.): *Engin. Psychol. and Cog. Ergonomics, HCII 2007, LNAI 4562*, pp. 52–61. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007.

La manipulation directe - les environnements virtuels

Les technologies de numérisation permettent, nonobstant certaines contraintes physiques et techniques, de capturer des ensembles d'éléments de la réalité et d'en fournir, grâce au traitement informatique ; des représentations variables et manipulables. Avec le développement des environnements virtuels, en particulier avec les interfaces de capture de geste, la manipulation directe des informations visuelles est possible.



Fig. 4 : les environnements virtuels permettent la vision stéréoscopique des objets numériques 3D et leur manipulation directe à l'aide de gants de données.

Depuis les premiers travaux de Yvan Sutherland en 1965, les environnements virtuels représentent un champ de recherche pluridisciplinaire pour l'informatique, la robotique et les technologies d'interface, les sciences de l'homme. La réalité virtuelle et la réalité augmentée en constituent actuellement les deux domaines de recherche et développement les plus connus.

La réalité virtuelle consiste à générer un environnement artificiel immersif interactif dont l'état évolue en fonction du comportement du "participant"⁷ ou utilisateur. (Remarquons qu'il n'existe pas de consensus de définition de la réalité virtuelle). Les visio-casques d'immersions et systèmes de suivi de mouvement, comme les combinaisons et gants de données, les salles immersives interactives (mur d'image ou "cave") en sont les systèmes les plus connus.

La réalité augmentée à deux acceptions. La première est synonyme d'incrustation et montage vidéo temps réel : intégration d'image de synthèse dans une image numérique ou un flux vidéo. La seconde acception fait référence à l'incrustation d'objets artificiels visuels, sonores ou tactiles, voir les trois simultanément, générés par des systèmes d'interfaces spécifiques : casques et miroirs semi-transparents, hologrammes, système acoustiques 3D, interfaces tactiles et haptiques (touché actif, lié au mouvement). Les systèmes de visé tête haute (Head-up display : HMD) développé initialement pour l'avionique (navigation et contrôle) et actuellement pour l'automotive (navigation) en sont les applications fonctionnelles les plus connus.

De nombreuses applications sont aussi en cours de développement dans le domaine de l'imagerie médicale, en particulier pour la maintenance aéronautique, la chirurgie assistée et l'expertise médico-judiciaire. Ce sont précisément ces technologies d'interaction directe avec des objets numériques que nous développons pour la validation expérimentale d'hypothèse pour l'étude de la momie de Lunéville.

Notre spécificité est d'associer les méthodes formelles avec les dernières innovations d'interface humain-machine. Le but de ces recherches et développement est de fournir aux experts des outils qui augmentent non seulement leurs capacités de perception, de décision, d'action et de contrôle, mais qui leur intuition créative et leur rationalité technique !

Applications pratiques

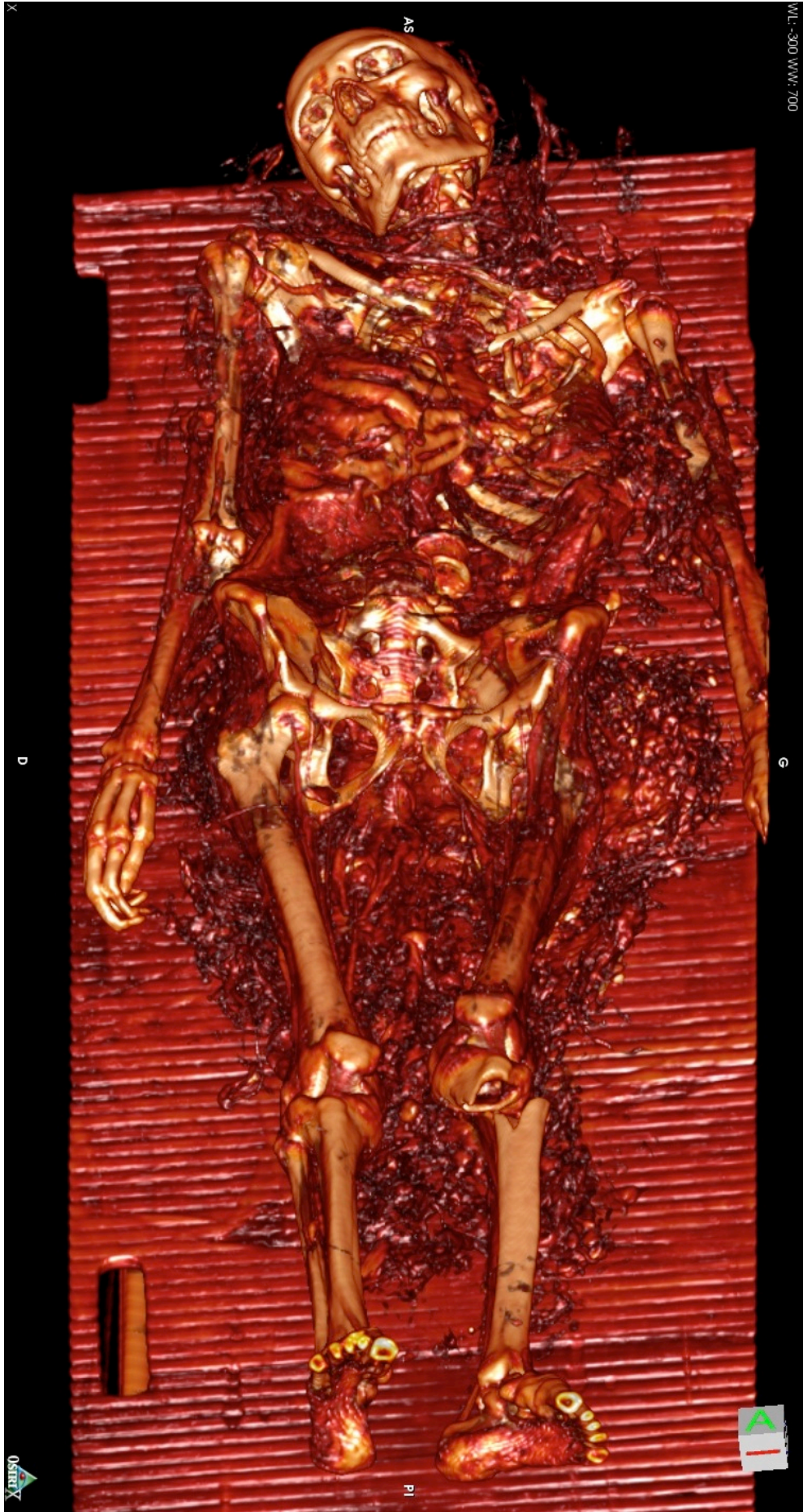
Ces recherches fondamentales trouvent déjà de nombreuses applications pratiques. Elles ont des impacts divers notamment :

- **Impact sociétal** : analyse critique de raisonnement diagnostique et de plan de traitement pour l'expertise médico-légale et analyse critique de raisonnement en criminalistique et archéologie => validations des indices et techniques de preuve.
- **Impact pour la criminalistique**: la convergence de faisceaux d'indices identifiés, répertoriés puis la démonstration de leurs relations entre eux, et, enfin, la synthèse doit guider, par la primauté des preuves indiciales, à valider ou non l'identité d'une victime, d'un suspect et son mode opératoire.
- **Impact pour l'archéologie** : la reconnaissance des objets, leur positionnement entre eux et leur relation avec le(s) corp(s) et la position

⁷ Participant : dénomination anglo-saxonne de la personne qui interagit avec et dans l'environnement virtuel. Il dénote l'intégration homme système.

imposée aux connexions anatomiques dans une architecture reconstituée doit permettre l'identification et la validation des rituels funéraires, des remaniements secondaires dans la tombe et ainsi réaliser la synthèse de la « vie » de l'espace funéraire au cours du temps.

- **Impact pour la médecine légale et l'expertise médico-légale :** Les raisonnements diagnostiques et les connaissances utilisées par les praticiens pour prendre leurs décisions ou élaborer leur plan de traitement peuvent être mis en évidence et critiquer...La convergence de faisceaux d'indices médico-légaux aide au diagnostic de la cause et de l'heure de la mort.



WL: -300 MM; 700

AS

X

D

G

PI



Fig. 5 : Visualisation 3D du corps entier de la momie.