

Approches de quantification d'incertitudes pour l'évaluation de la crédibilité des simulations

L. Barriere¹, C. Labouffie¹, S. Bocquet¹

¹IRT Saint Exupéry, 3 rue Tarfaya, 31405 Toulouse, France, ludovic.barriere@irt-saintexupery.com

Résumé — Toute prise de décision qui s'appuie sur des simulations pour concevoir et valider les performances d'un système critique, comme un avion ou un lanceur spatial, doit être éclairées par une évaluation rigoureuse de la crédibilité des simulations, au risque de compromettre la viabilité du système. Les présents travaux visent à proposer une approche globale et consistante de quantification d'incertitudes dans le cadre d'un processus d'évaluation de crédibilité de simulations. Les applications présentées sont celles des structures aéronautiques en composite et de simulations réalisées à partir de modèles d'endommagement des composites.

Mots clefs — VVUQ, Certification par l'analyse, Approches bayésiennes, Structures Composites

1 Contexte

L'industrie, en particulier aérospatiale, se dirige vers une utilisation accrue de capacités de modélisation et de simulation (M&S) pour soutenir le développement plus rapide de nouveaux avions, intégrant des technologies innovantes, compatibles des objectifs de réduction d'émission comme des nouveaux systèmes de propulsion et des matériaux plus légers, ou qui peuvent permettre d'accélérer les cadences de production [1]. L'utilisation de capacités de M&S pour supporter la certification est soumis à la démonstration de leur crédibilité [2]. Des guides pour la vérification et la validation (V&V) des M&S [3], [4] proposent des cadres conceptuels, des processus et des méthodes pour évaluer la crédibilité des simulations par rapport aux applications cibles. Une vérification et une validation (V&V) rigoureuse des simulations nécessite des méthodes de quantification d'incertitudes (UQ) qui prennent en compte les différentes sources d'incertitudes aussi bien aléatoires qu'épistémiques. C'est une analyse essentielle pour permettre la prise de décisions.

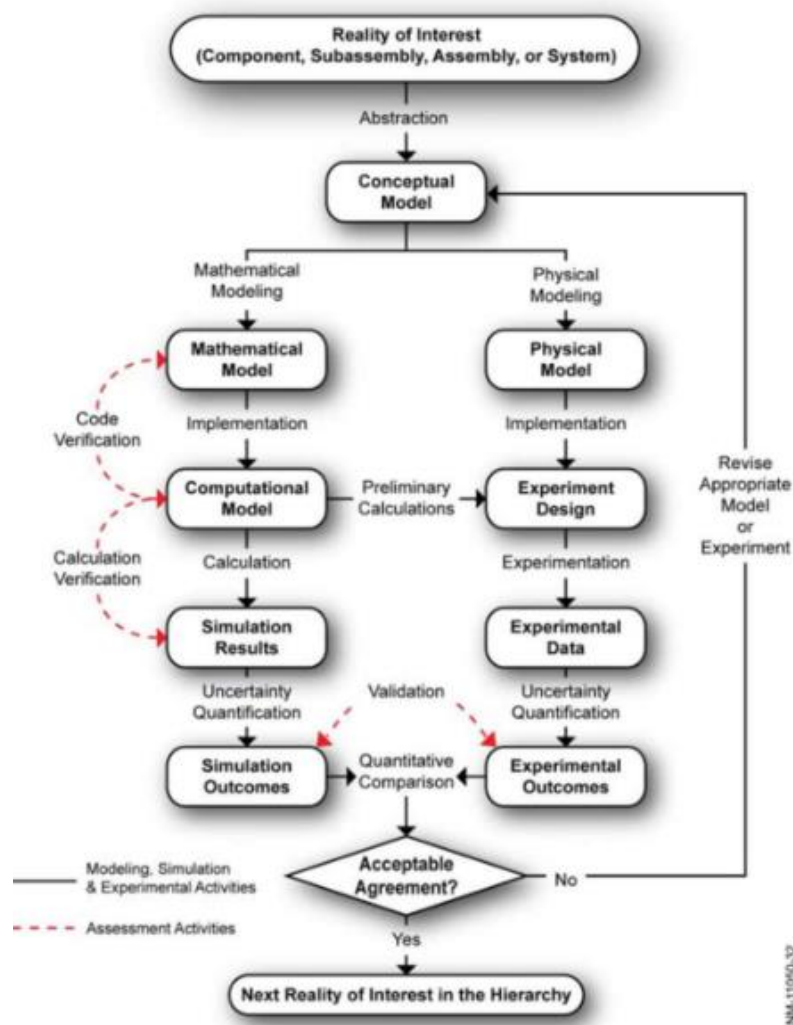


Figure 1: Etapes de modélisation et simulation dans une approche VV&UQ pour un certain cas de validation dans la décomposition hiérarchique [2]

Dans ce contexte, il est important de fournir à la communauté technique (ingénieurs, directeurs de programme, autorités) des approches UQ compréhensibles, efficaces et robustes, pour toutes les étapes du processus de VV&UQ des simulations. La Figure 1 propose une représentation simplifiée et partielle d'un tel processus mais qui met en évidence la quantification d'incertitudes comme une étape clé de la comparaison, à la fois sur les résultats des simulations et sur les données expérimentales.

2 Crédibilité des simulations et quantification d'incertitudes

Un processus d'évaluation de la crédibilité des simulations s'appuie sur une analyse du système d'intérêt dans ses conditions d'utilisation visées, par exemple une structure d'aéronef et ses différents cas de charges [5]. Ce système est décomposé dans une vision hiérarchique qui vise à isoler progressivement les éléments constitutifs d'une part (ou principes de conceptions) et les phénomènes physiques d'autre part, en garantissant la couverture d'un domaine d'application dans lequel les simulations devront démontrer leur capacité prédictive.

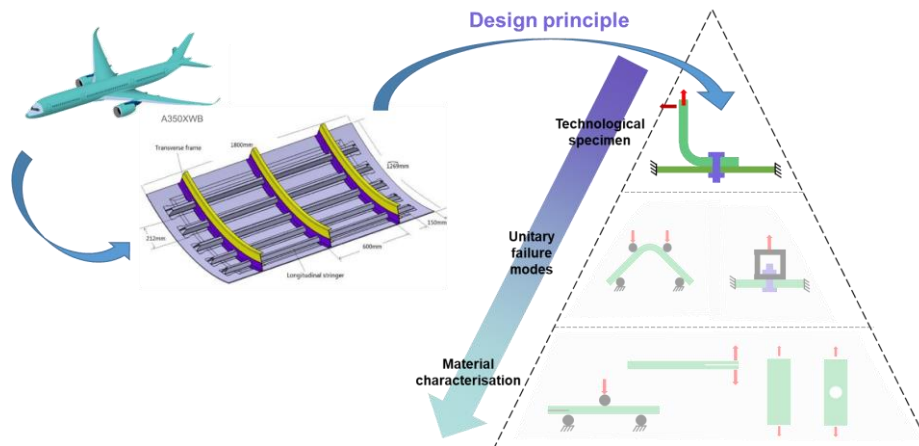


Figure 2: Décomposition hiérarchique du système d'intérêt dans une approche pyramidale. Exemple du cas d'application du projet TRUST [6]

Cette pyramide a donc pour but non pas de concevoir et certifier le système directement, mais d'évaluer la crédibilité des simulations dans une démarche qui met en œuvre leur calibration et leur validation. Ce n'est qu'ensuite dans un domaine de validité (Figure 3) défini par des critères d'acceptation, que les simulations pourront être utilisées pour supporter la prise de décision, comme par exemple la vérification que le système d'intérêt répond aux exigences, l'évaluation préliminaires des risques d'un essai échelle 1 ou la viabilité d'une technologie.

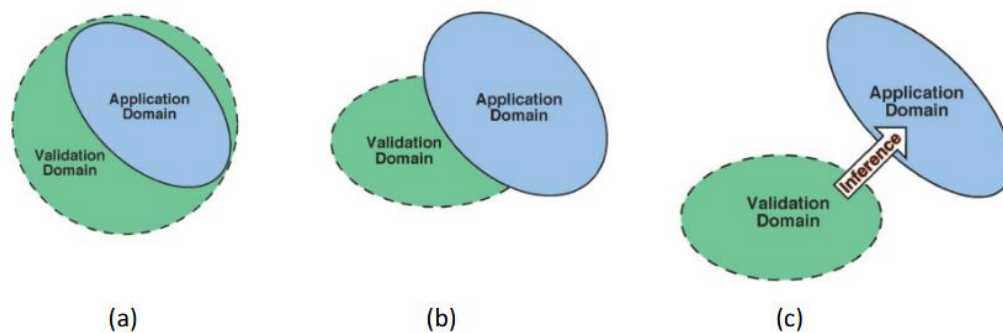


Figure 3 - Domaines d'application et de validation de simulations définis selon [2]. Plusieurs cas sont possibles: (a) représentante une situation dans laquelle le domaine de validation couvre entièrement le domaine d'application. (b) représente une couverture partielle du domaine d'application, tandis qu'en (c) les deux domaines n'ont aucun recouvrement.

Comme évoqué plus haut, la prise en compte des incertitudes est essentielle dans la démarche VV&UQ. Mais les sources d'incertitudes sont d'autant plus nombreuses que le système est complexe et les phénomènes physiques importants sont multiples et couplés. Aléatoires ou épistémiques, elles sont à la fois associées aux expériences physiques (maîtrises des conditions initiales et limites, variabilités matériaux, incertitudes de mesures, nombre de répétitions d'essais, ...), aux simulations (paramètres, erreurs numériques, approximations de modélisation) et aux processus d'analyses (nombre de simulations, sélection de paramètres influents, utilisation de modèles de substitution, choix de métriques, propagations des incertitudes à travers les échelles, prises de décisions humaines). Toutes ces sources d'incertitude devant idéalement être prises en compte pour établir une quantification probabiliste de l'erreur de modèle dans le domaine de validation, notamment par une forme d'agrégation de différentes incertitudes [7], il s'agit de formaliser une boîte à outil et des

processus qui permettront aux praticiens du VV&UQ de conduire de manière encadrée une évaluation de la crédibilité qui soit elle-même crédible du point de vue de la prise en compte des incertitudes, et abordable d'un point de vue de sa complexité et des ressources calculatoires.

3 Approches proposées

Les approches de quantification d'incertitudes dans le contexte de l'évaluation de la crédibilité des simulations s'inscrivent dans les mêmes concepts et méthodes que celles décrites dans la littérature et utilisées à différentes fins [8]. Le présent travail vise principalement à consolider une sélection de méthodes et leur articulation qui soient adaptées aux différentes étapes de la démarche du VV&UQ. Il s'articule autour de plusieurs aspects dont les suivants :

- **Les analyses de sensibilité**

Les analyses de sensibilité sont des étapes essentielles dans le processus VV&UQ, qui ne sont parfois pas mise en évidence dans la plupart des « workflow » présentés dans la littérature comme celui reporté en Figure 1. Elles peuvent s'utiliser pourtant à différents niveaux, en commençant par l'analyse du système d'intérêt pour identifier les phénomènes importants et orienter la décomposition du système qui définit le domaine de validation. Du point de vue de la quantification d'incertitudes, l'identification des paramètres influents permet à la fois d'orienter les efforts de caractérisation des variabilités, et de faciliter la construction d'un modèle de substitution. Les principales difficultés dans le choix des méthodes d'analyse de sensibilité résident à la fois dans un compromis précision/exploration/cout de calcul, mais aussi dans l'interprétation des indices de sensibilité et la définition d'un seuil dont l'interprétation ne soit pas dépendante de l'utilisateur. En ce sens, les indices HSIC [9] sont proposés et leur application discutée.

- **La vérification de solution et l'incertitude numérique**

Les étapes de vérification de solution consistent notamment à estimer l'erreur numérique liée par exemple à une discrétisation spatiale (ou temporelle). L'extrapolation de Richardson permet d'estimer la solution exacte pour une quantité d'intérêt à partir de quelques simulations. L'extension de cette approche par [10] permet d'estimer une incertitude associée sous forme d'un intervalle de tolérance. Un domaine de validation recouvre un ensemble de configurations pour lesquelles l'erreur numérique peut être estimée, et il peut être nécessaire d'identifier un compromis sur les paramètres numériques de façon à fixer leur valeur dans ce domaine. L'approche développée dans le présent travail prend donc aussi en compte un ensemble de cas de vérification pour proposer une façon de consolider une estimation d'erreur numérique dans un domaine de validation.

- **La validation de modèle prenant en compte les incertitudes**

Comme illustré en Figure 1, la quantification d'incertitude est une étape dans le cadre d'une validation de simulations par rapport à des expériences. Des métriques d'écart doivent permettre de rendre compte des incertitudes de part et d'autre, pour les différentes quantités d'intérêt. D'un point de vue du processus, en fonction du résultat d'analyses de sensibilités, il peut être important de prendre en compte l'incertitude sur les conditions initiales et limites des expériences, de même que l'incertitude sur leurs paramètres d'entrée nominaux (ex. géométries) qu'ils soient mesurés ou non [11]. D'un point de vue méthodologique, les limites des approches actuelles résident notamment dans la prise en compte des incertitudes épistémiques (faible nombre de réalisations/mesures expérimentales ou de simulation). Une approche pour estimer l'incertitudes des métriques de validation par rapport au nombre limité de données simulées et/ou expérimentales a donc été proposée sur la base d'inférences bayésiennes. L'extension de ces métriques à des quantités d'intérêt non-scalaires (série, courbes, champs) pour une validation plus riche a été explorée via la réduction de dimension.

Les travaux menés s'intéressent également à la calibration des paramètres de modèles selon des approches bayésiennes et leur validation, à l'optimisation des configurations d'essai pour réduire les incertitudes de calibration, ou encore à l'agrégation finale des différentes incertitudes quantifiées.

4 Cas d'application

Les présents travaux méthodologiques sont appliqués à des structures composites stratifiées utilisées en aérospatiales, et des modélisations de leur réponse mécanique qui prennent en compte l'endommagement et la rupture des plis et des interfaces [12], [13]. Comme illustré en Figure 2, les méthodologies développées dans ces travaux sont appliquées à des simulations à l'échelle de coupons et d'éléments, constituant la base d'une pyramide d'essai et simulations pour le système d'intérêt. La complexité des phénomènes pris en compte par les modèles, les nombreux paramètres qui les décrivent et les coûts de calculs associés sont des caractéristiques qui influent également sur la sélection des méthodologies proposées.

Remerciements

Les travaux présentés s'inscrivent dans le cadre du projet TRUST (Towards cRedible simUlation of compoSiTes) mené par l'IRT Saint Exupéry, financé par le gouvernement français (France 2030) et par Airbus, Airbus Atlantic, Ariane Group, Hexcel, Eikosim et en collaboration avec l'Université de Gérone, INEGI, l'INSA Toulouse (Institut Clément Ader) et l'ONERA.

Références

- [1] T. Mauery *et al.*, 'A Guide for Aircraft Certification by Analysis', NASA/CR-20210015404, May 2021. Accessed: Dec. 03, 2025. [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20210015404>
- [2] 'Proposed Certification Memorandum on Modelling & Simulation – CS-25 Structural Certification Specifications', EASA. Accessed: Nov. 16, 2023. [Online]. Available: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/product-certification-consultations/proposed-certification-memorandum-modelling>
- [3] 'V&V 10 Standard for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics - ASME'. Accessed: Feb. 28, 2023. [Online]. Available: <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/v-v-10-standard-verification-validation-computational-solid-mechanics>
- [4] H. Coleman and C. Members, *ASME V&V 20-2009 Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer (V&V20 Committee Chair and principal author)*. 2009.
- [5] W. L. Oberkampf, T. G. Trucano, and C. Hirsch, 'Verification, validation, and predictive capability in computational engineering and physics', *Appl. Mech. Rev.*, vol. 57, no. 5, pp. 345–384, Dec. 2004, doi: 10.1115/1.1767847.
- [6] F. Grotto, S. Miot, and L. Barrière, 'Assessment of the credibility of simulations for composite Bolted L-Angle in a building block approach', presented at the Composites 2025, Vienna, Sept. 2025.
- [7] S. Riedmaier, B. Danquah, B. Schick, and F. Diermeyer, 'Unified Framework and Survey for Model Verification, Validation and Uncertainty Quantification', *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 28, no. 4, pp. 2655–2688, June 2021, doi: 10.1007/s11831-020-09473-7.
- [8] E. de Rocquigny, N. Devictor, and S. Tarantola, *Uncertainty in Industrial Practice: A Guide to Quantitative Uncertainty Management*. John Wiley & Sons, 2008.
- [9] M. De Lozzo and A. Marrel, 'New improvements in the use of dependence measures for sensitivity analysis and screening', *J. Stat. Comput. Simul.*, vol. 86, no. 15, pp. 3038–3058, Oct. 2016, doi: 10.1080/00949655.2016.1149854.

- [10] P. Krysl, ‘Confidence Intervals for Richardson Extrapolation in Solid Mechanics’, *J. Verification Valid. Uncertain. Quantif.*, vol. 7, no. 3, p. 031005, Sept. 2022, doi: 10.1115/1.4055728.
- [11] V. Romero, ‘Comparison of Several Model Validation Conceptions against a “Real Space” End-to-End Approach’, *SAE Int. J. Mater. Manuf.*, vol. 4, no. 1, pp. 396–420, 2011.
- [12] F. Laurin, N. Carrère, and J.-F. Maire, ‘A multiscale progressive failure approach for composite laminates based on thermodynamical viscoelastic and damage models’, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 38, no. 1, pp. 198–209, Jan. 2007, doi: 10.1016/j.compositesa.2006.01.018.
- [13] A. Turon, P. P. Camanho, J. Costa, and J. Renart, ‘Accurate simulation of delamination growth under mixed-mode loading using cohesive elements: Definition of interlaminar strengths and elastic stiffness’, *Compos. Struct.*, vol. 92, no. 8, pp. 1857–1864, July 2010, doi: 10.1016/j.compstruct.2010.01.012.