

AAAF - Commission Structures

Synthèse de la Journée Scientifique

« Maîtriser la crédibilité des simulations dans l'industrie aérospatiale. Pourquoi et comment? »

ISAE-SUPAERO, Toulouse, 1^{er} Décembre 2016

Contexte

La simulation numérique est confrontée à de nouveaux défis dans l'industrie aéronautique et spatiale, parmi lesquels :

- *Une meilleure intégration aux processus de conception amont ;*
- *La rationalisation de la hiérarchie des simulations et essais physiques ;*
- *Une meilleure maîtrise des risques de certification/qualification.*

Ainsi, dès aujourd'hui, il est demandé à la simulation de jouer un rôle prépondérant voire exclusif pour la qualification et la certification pour des conditions opérationnelles ne pouvant être testées ou scénarii accidentels. Pour le futur, il y a un consensus large pour envisager un développement considérable de la «certification basée sur la simulation» (voir par exemple les préconisations ACARE).

De ces nouvelles attentes de l'industrie, il résulte une exigence d'augmentation de la capacité prédictive des simulations. Par ailleurs et de façon concomitante, le niveau de complexité des simulations et le volume des données s'accroissent considérablement du fait des progrès des capacités de calcul (simulation multi-physiques et/ou réalistes par exemple analyses non linéaires prévisionnelles de la rupture, ou analyses de tenue au crash et à l'impact...), ainsi que les processus de collaboration dans l'entreprise étendue.

Dans ce contexte, où les décisions industrielles reposent de plus en plus sur les simulations, les décideurs demandent les éléments objectifs de preuve de la crédibilité. Il est aujourd'hui largement admis que cette maîtrise de la crédibilité des simulations constitue un facteur clé de succès pour l'industrie, même si cette prise de conscience est relativement récente.

*Or la **maîtrise de la crédibilité des simulations** est une thématique complexe, conditionnée par des facteurs multiples de pertinence et de qualité sur :*

- *La vérification des codes de calcul et des simulations ;*
- *La validation par les essais physiques et la quantification des incertitudes ;*
- *Le management des processus de simulation, des données et des compétences.*

Par ailleurs le corpus des standards et documents de référence applicables (Ingénierie des Systèmes et Qualité (ISO), standards spécifiques à la simulation (ASME V&V, NAFEMS...) est volumineux et divers. Il est dommage qu'il soit relativement méconnu car il constitue une aide précieuse. Par ailleurs c'est une thématique qui interpelle tous les acteurs : autorités de certification, industriels, chercheurs, développeurs des codes de calcul, enseignants... dont la collaboration est indispensable.

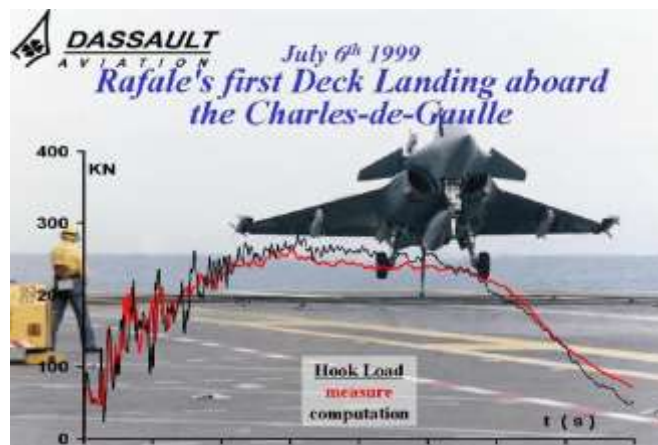
Synthèse

Cette journée organisée par la Commission Structures de l'A.A.A.F. a pour objectif d'établir l'état des attentes industrielles, de dégager les grandes tendances autour de cette thématique de la crédibilité, ainsi que les axes de progrès permettant de fédérer les acteurs concernés.

La journée s'est déroulée au sein de l'ISAE-SUPAERO à Toulouse et a réuni environ 50 participants. Elle débute par un hommage à Christian Cornuault, suivi par 8 présentations techniques de l'industrie et de la recherche sur la thématique de la crédibilité et s'achève par une table ronde animée par Jean-François Imbert.

En ouverture de la journée, l'hommage à notre regretté Christian Cornuault a été prononcé par Bruno Stoufflet (Dassault-Aviation). Après avoir retracé les grandes étapes de sa carrière, notamment le développement du code ELFINI, et sa contribution à la conception des avions de Dassault Aviation, Bruno Stoufflet a particulièrement souligné ses apports novateurs principaux :

- Le calcul non-linéaire implicite avec fortes non-linéarités : le « line search exact », appliqué avec succès à de nombreuses applications notamment le calcul en post-flambage de panneaux en composite, l'appontage du Rafale...



Calcul d'appontage du Rafale sur le Porte Avions Charles de Gaulle

- Le calcul de choc à l'oiseau avec modélisation de l'oiseau par une méthode de type SPH (Smooth Particle Hydrodynamics) appliqué avec succès pour la qualification du Mirage 2000 et du Rafale, ainsi que pour la certification du Falcon7X ;
- La conception et la justification des structures d'aéronefs par la modélisation avec forte synergie calcul-essais s'appuyant sur une approche pyramidale.

Enfin il faut noter que Christian Cornuault a montré de brillantes qualités pédagogiques et a toujours eu le souci de transmettre son savoir aux jeunes ingénieurs.

Le premier exposé par Jean-François Imbert (SIMconcept Consulting) introduit la thématique de la journée (« *Maîtrise de la crédibilité en simulation numérique pour le secteur aérospatial* ») et fait une synthèse des méthodologies et bonnes pratiques recommandées dans les standards internationaux.

Tout d'abord, il montre que la crédibilité repose sur:

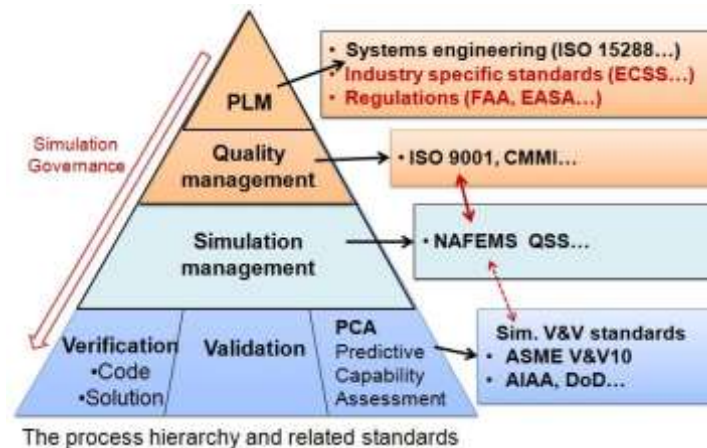
- Le management des processus et données de simulation ainsi que des compétences¹ ;
- La Vérification et la Validation (V&V) des simulations.

Ensuite il présente pour chacun des processus ci-dessus les principaux concepts de V&V et les standards existants:

- Pour le management des processus et données de simulation, les standards de management de la qualité ISO9000 et ISO 9001, leur interprétation pour la simulation (NAFEMS QSS et Primer) ainsi que les modèles de maturité des processus (CMM/CMMI) ;

¹ Pour mémoire, le management des compétences a été exclu du périmètre de la journée et n'a pas été traité

- Pour la V&V en simulation, les standards ASME (V&V10 pour la Mécanique des Solides) ainsi que le standard NASA STD 7009.



La pyramide de la crédibilité en simulation numérique

Il faut noter que le standard ASME V&V10 recommande :

- Une approche hiérarchique (multi-niveaux) de la modélisation et de la V&V, y compris les essais physiques de validation ;
- « La vérification des codes » spécialement des algorithmes numériques ;
- « La vérification des solutions » incluant l'évaluation des erreurs numériques ;
- La validation par corrélation avec des essais physiques de qualité, (avec une collaboration étroite simulation essais), et l'utilisation de métriques statistiques nécessitant la quantification des incertitudes.

En outre, cet exposé précise les difficultés relatives à la démonstration de la capacité prédictive des simulations en dehors du domaine de validation physique, notamment lorsqu'aucun essai représentatif du système n'est possible.

Enfin la question cruciale de la démonstration de crédibilité par des éléments objectifs de preuve est abordée par un examen des différentes méthodologies existantes.

En conclusion, il s'avère que la diffusion des standards est aujourd'hui relativement limitée dans le secteur aérospatial même si elle progresse notablement dans le spatial (NASA, ECSS) et en aéronautique aux USA (FAA...). De même les attentes fortes sur la certification basée sur la simulation (ACARE) et la réduction des essais contrastent avec le faible niveau de priorité porté à la V&V en simulation numérique, tant dans l'industrie que dans la recherche. L'exposé s'achève par des recommandations sur l'amélioration des processus de V&V et le développement de standards aéronautiques et spatiaux s'appuyant sur les standards génériques existants.

Dans l'exposé suivant « *Qualité des simulations numériques à EDF R&D* », Eric Lorentz (EDF R&D) décrit les processus et méthodologies mises en œuvre par EDF R&D pour assurer la crédibilité des simulations numériques. Après une introduction sur les objectifs d'EDF, sont abordées les exigences d'EDF relatives à la qualification des codes de calcul, et notamment la vérification des codes et des solutions numériques. Une attention particulière est portée au taux de couverture des tests de vérification et à l'identification des zones d'ombre éventuelles. Les estimateurs d'erreurs ne sont pas considérés comme une solution satisfaisante de vérification. L'exposé porte également sur la démarche de modélisation et de validation hiérarchique, y compris la méthodologie PIRT², qui est conforme à l'approche ASME V&V. Enfin les difficultés et stratégies d'implantation sont présentées, notamment le management du changement, la certification des compétences dans un contexte de renouvellement des équipes.

² Phenomena Identification and Ranking Technique: méthodologie de planification et de priorisation hiérarchique des activités de V&V

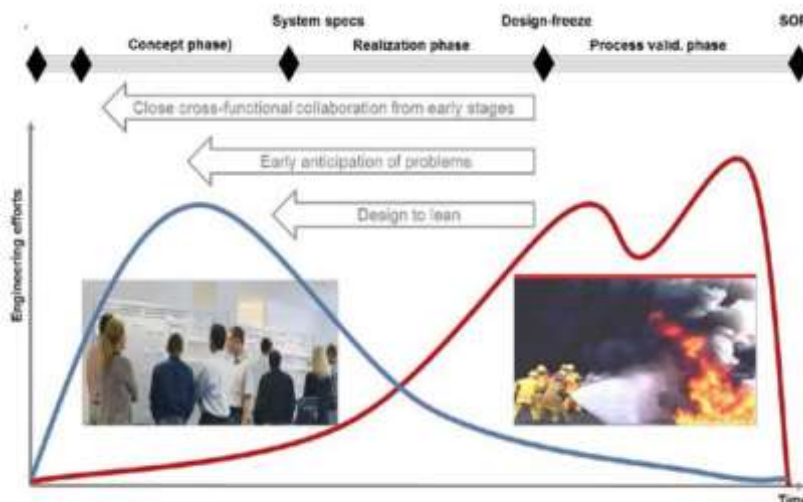
Dans l'exposé suivant, les « *différentes philosophies de vérification et de validation dans le domaine des satellites* » sont présentées par Jérôme Buffe (Thales Alenia Space). Après avoir décrit le contexte et les objectifs industriels actuels, il résume ainsi les perspectives :

« Les Calculs, ce serait tellement bien d'y croire.

Les Essais, ce serait tellement bien de ne pas les faire. ».

Ensuite il présente l'état de l'art du dimensionnement structural, les approches actuelles de validation des satellites, ainsi que la philosophie des coefficients de sécurité et des marges définis dans les standards ECSS. Il faut noter que la vérification et la validation des exigences (tenue structurale, rigidité, stabilité dimensionnelle) reposent sur des essais et des analyses aux différents niveaux hiérarchiques. La rationalisation des activités de validation satellite se fait par les matrices de validation, dont l'utilisation est illustrée par 2 cas simples. Il insiste sur l'importance des corrélations par rapport à des essais de référence et l'évaluation des incertitudes. Enfin il présente les perspectives actuelles, notamment l'importance des simulations en l'absence d'essais, par exemple les calculs de dépointage thermo élastique en orbite, ainsi que la réduction des essais nécessitant l'extrapolation par rapport aux essais de validation de référence.

L'exposé suivant par Stéphane Muller (Airbus Safran Launchers) décrit « *les défis de développement du futur lanceur Ariane 6 avec qualification par essais partiels* ». Des contraintes programmatiques sévères imposent en effet une logique de développement avec des cycles fortement réduits et conditionnée par la production.



Nouvelle approche de développement pour Ariane 6

Les principaux défis sont les suivants :

- En phase de conception, réaliser des évolutions de conception avec des boucles rapides et dans un contexte de spécifications évolutives, et donc faire de la conception robuste sans trop surdimensionner.
- En phase d'intégration et de V&V lanceur, réduire de façon drastique les essais et notamment :
 - Les essais de sous-ensembles avec approche proto-flight (pas d'essais à rupture) ;
 - Les essais d'ensemble, ce qui implique une conformité démontrée par calcul, et donc une capacité prédictive accrue.

Ceci nécessitera l'exploitation des essais au banc à des fins de validation partielle des MEF.

Enfin il conclut cet exposé en décrivant les améliorations requises des processus et capacités de calcul : quantification des incertitudes, réduction de modèles (« surrogate models » compris), analyse modale en conditions opérationnelles (essais au banc), utilisation d'essais à échelle réduite, analyses de sensibilité...

Le dernier exposé de la matinée par Jacques Demolis (Safran Helicopter Engines) décrit « *l'état de l'art pour la validation et l'évolution des codes à Safran Helicopter Engines* ». Tout d'abord il présente le contexte et les objectifs industriels dans lesquels s'inscrit la simulation numérique multi-

physique utilisée pour la conception robuste du produit. Une attention particulière est portée à l'exploitation des essais physiques pour la validation des simulations, pour laquelle la prise en compte des incertitudes est à l'étude. Enfin la maturité des simulations numériques est évaluée au sein du Groupe Safran par un processus basé sur le concept de TRL³.

Le premier exposé de l'après-midi par Laurent Risse (Airbus) présente « *les perspectives de la simulation appliquée au dimensionnement des structures d'avions* ». La simulation numérique est aujourd'hui une pratique courante pour le dimensionnement et la justification des structures. Au delà de cette pratique courante (modèles GFEM linéaires et modèles locaux non-linéaires) d'importants progrès ont été réalisés, notamment :

- Le calcul global haute fidélité (« large scale NLFEM » avec 70M ddl) dans le cadre du projet «Virtual Full Scale Test» pour l'A350XWB qui a permis de maîtriser les risques de rupture prématurée dans l'essai statique de certification.



Projet «Virtual Full Scale Test» pour l'A350XWB

- Le calcul dynamique non-linéaire pour la conception de structures composites au crash qui a permis une certification sans essai de certification de fuselage.

Malgré ces avancées, de nombreuses améliorations des capacités de calcul sont requises et notamment :

- Les modèles d'endommagement et de prévision de la rupture au niveau élémentaire (coupon) mais aussi
- Leur passage à l'échelle du panneau raidi (« scalability ») et l'amélioration de leur capacité prédictive pour les fuselages en composite :
 - Phénomènes de décollement de raidisseur ;
 - Résistance résiduelle en présence de grandes coupures.
- Les techniques de calcul multi-échelle par exemple pour les calculs d'endommagement pour les impacts à basse énergie ;
- La réduction des cycles de modélisation et l'amélioration du post-traitement pour faciliter la prise de décision ;
- L'utilisation de la simulation réaliste en amont.

³ Technology Readiness Level

L'évolution actuelle du rôle des essais va se poursuivre avec l'intensification des essais de recalage de modèles, l'exploitation rapide des essais de qualification des matériaux (« virtual allowables »), la réduction des essais aux niveaux intermédiaires (virtual testing), et le remplacement des essais par la simulation pour les démonstrations de conformité. Ceci nécessitera une meilleure synergie calcul-essais et l'amélioration des processus de validation.

L'exposé conclut par une vision du futur avec un rôle prépondérant de la simulation multi-physique, et multi-échelles, dont la crédibilité peut être démontrée, et utilisée tout au long du cycle de vie (end to end process avec une meilleure prise en compte des aspects fabrication) dans le cadre des démarches de l'avion numérique (digital aircraft engineering) et des jumeaux numériques (« digital twins »).

Ensuite Stéphane Pécault (CEA/CESTA) expose « *le déploiement du standard V&V pour crédibiliser la garantie par calcul d'une structure hydraulique* ». Ce déploiement a été réalisé pour garantir par la simulation les performances fonctionnelles en comportement hydraulique d'une structure, en conformité avec les standards V&V internationaux NAFEMS, ASME, NASA...

Cette démarche se caractérise par :

- Une planification et une priorisation des activités de V&V par la méthode PIRT en trois étapes :
 - Recensement exhaustif des phénomènes régissant le comportement ;
 - Evaluation qualitative en termes de niveau de contribution et de niveau de maîtrise ;
 - Effort de développement à faire porter sur les contributeurs significatifs, peu ou partiellement maîtrisés.
- Un effort particulier sur :
 - La vérification (matrice de cas tests, indicateurs numériques pour des choix de modélisation),
 - Une pyramide d'essais avec validation au niveau « système » et calibration aux niveaux inférieurs avec conception d'une maquette de calibration dédiée.
- La mise en place d'une évaluation de la maturité basée sur le standard NASA-STD-7009 (Méthode CAS).

Ce déploiement s'est avéré tout à fait concluant avec le retour d'expérience suivant :

- Lisibilité de la démarche pour **tous** les intervenants ;
- Bénéfices multiples découlant du recours à un cadre méthodologique indépendant ;
- Réussite subordonnée à l'adaptation concertée de la démarche au sujet d'intérêt.

Enfin dans le dernier exposé de la journée, Pierre Ladevèze (ENS Cachan) présente « *l'état de l'art et les challenges de la V&V en calcul de structure* ». Après une introduction des concepts fondamentaux de la V&V, il présente dans un premier temps l'état de l'art sur les estimateurs d'erreur globale, mais qui ne répondent pas à l'exigence d'estimation de bornes d'erreur garanties et précises. La méthode des erreurs en relation constitutive répond à cette exigence ; elle est aujourd'hui la seule méthode « mature » pour les applications linéaires statiques et dynamiques. Un effort de recherche est indispensable pour l'extension de la méthode aux problèmes non-linéaires, de dynamique transitoire, multi-échelles, ainsi que pour les modèles réduits. La suite de l'exposé est consacrée à la validation et au recalage des modèles par rapport à des essais physiques pertinents. Un effort considérable a été consacré au recalage de modèles linéaires statiques et dynamiques avec amortissement, notamment pour les applications spatiales. Les travaux actuels de recherche sont présentés pour les applications suivantes :

- Recalage de paramètres en temps réel (Dynamic Data Driven Application Systems DDAS) : soudage en situation variable ;
- Identification/validation d'un modèle de matériau/ Images 4D (Eikology) ;
- Quantification des méconnaissances.

Substructure	Basic LOKs			Reduced LOKs		
	Law beeing sough	$[\overline{m}_E^{-0}, \overline{m}_E^{+0}]$	Statistical moment	Law	$[-\overline{m}_E; \overline{m}_E^+]$	Statistical moment
E_1	normal	$[-0.25, 0.25]$	$\mu = 0.00 / \sigma = 0.097$	normal	$[0; 0.144]$	$\mu = 0.072 / \sigma = 0.028$
E_2	uniform	$[-0.25, 0.25]$	$\mu = 0.00 / \sigma = 0.097$	uniform	$[-0.060; 0]$	$\mu = -0.030 / \sigma = 0.012$
E_3	normal	$[-0.25, 0.25]$	$\mu = 0.00 / \sigma = 0.097$	normal	$[-0.016; 0]$	$\mu = -0.008 / \sigma = 0.003$
E_4	uniform	$[-0.75, 0.75]$	$\mu = 0.00 / \sigma = 0.289$	uniform	$[0; 0.521]$	$\mu = 0.261 / \sigma = 0.150$

Réduction des méconnaissances d'une structure spatiale (LMT Cachan)

En conclusion, la maturité des méthodologies issues de la recherche⁴ contraste avec leur utilisation industrielle limitée, principalement à cause de leur indisponibilité dans les codes de calcul commerciaux. Par ailleurs il faut malheureusement constater le faible niveau de priorité alloué actuellement aux thématiques de V&V dans les programmes de recherche en France et en Europe.

La journée se conclut par une *table ronde* animée par Jean-François Imbert. Elle permet de dresser un bilan et d'établir les perspectives de la V&V en calcul de structures dans le secteur aérospatial tant pour la recherche que pour la pratique industrielle.

La recherche semble actuellement au point mort dans ce domaine, et la V&V n'est pas considérée comme une thématique de recherche.

S'agissant de la pratique industrielle, on constate un fort contraste entre :

- Des attentes industrielles fortes vis-à-vis de la simulation : optimisation robuste du produit, réduction des programmes d'essais, certification basée sur la simulation (Cf. ACARE), ... et
- La faible priorité actuelle sur la V&V et l' « assurance de la crédibilité » pour la simulation.

Ceci peut s'expliquer par des causes multiples :

- Déclinaison insuffisante des objectifs industriels en besoins d'amélioration de la simulation et de la V&V associée ;
- Soutien insuffisant du « top management » ;
- Situation budgétaire fortement contrainte.

Par ailleurs la culture V&V semble insuffisamment développée, ce qui pose la question de la formation initiale dans les Ecoles d'Ingénieurs⁵. De plus les standards (ASME, NASA...) sont généralement méconnus dans le secteur aérospatial en Europe.

Certains participants proposent une vision du futur où la V&V serait réservée à des experts pour des applications avancées, alors qu'une part importante des simulations serait réalisée par des utilisateurs peu qualifiés utilisant des applications « métier » intégrant des règles de modélisation satisfaisant les exigences de V&V.

- En ce qui concerne **la vérification des codes**, se pose la question de la disponibilité pour l'utilisateur des éléments de preuve tangibles (documentation de test) pour les logiciels commerciaux. Cette question de la couverture des tests devient critique pour les applications avancées. Notons que l'utilisateur ne peut s'exonérer de sa responsabilité, et en cas de couverture insuffisante, il lui appartient de faire lui-même les tests requis. Cette situation contraste avec la pratique industrielle courante, où les utilisateurs n'ont généralement pas le temps de faire de tests de vérification de leur code. Pour ce qui est de la vérification des solutions, on note une insuffisante disponibilité d'estimateurs d'erreurs fiables, ce qui contraste avec la maturité de certains estimateurs développés dans le cadre de la recherche.

⁴ Notamment les estimateurs d'erreur

⁵ L'enseignement des concepts de base en V&V dans les Ecoles d'Ingénieurs ne semble pas usuel. Pour mémoire le cours spécialisé de NAFEMS s'adresse à un public d'ingénieurs confirmés et de managers.

- Pour ce qui est de la **validation** des simulations par des essais physiques, il y a un consensus pour reconnaître la nécessité de maintenir et planifier des essais de validation aux différents niveaux de la pyramide, malgré le besoin général de réduction des essais physiques. Il faut noter la nécessité reconnue d'améliorer la qualité et la pertinence des essais et des corrélations, notamment par l'adoption de métriques statistiques et la prise en compte des incertitudes. Il faut encourager la pratique de l'évaluation des incertitudes de mesures par les méthodologies des standards ad hoc⁶.
- D'une manière générale, **la quantification des incertitudes** a une importance reconnue et devient possible pour beaucoup d'applications, mais son adoption industrielle est largement freinée par les pratiques courantes de conception et de certification.
- L'évaluation objective de la crédibilité des simulations est aujourd'hui peu pratiquée dans le secteur aérospatial européen, malgré la disponibilité de procédures standard éprouvées⁷. Cette pratique est amenée à se développer dans un contexte d'exigence de capacité prédictive accrue (réduction des essais physiques, certification basée sur les simulations...) et constitue un langage commun indispensable entre les décideurs industriels et les experts de la simulation.
- La certification basée sur la simulation semble aujourd'hui au point mort en Europe, ce qui contraste avec les objectifs ambitieux fixés par le comité ACARE, ainsi que l'intérêt croissant aux USA et les initiatives de la FAA.

Sur la base de cette journée, la Commission Structures établit les recommandations suivantes :

- Décliner les objectifs industriels actuels et futurs en une stratégie commune de la simulation numérique fédérant tous les acteurs, recherche, industrie et autorités de certification. Cette stratégie pour la simulation numérique doit adresser les aspects assurance de la crédibilité et V&V ;
- Développer toutes les compétences nécessaires aux simulations des produits futurs et notamment la culture de la V&V en simulation numérique au travers de la formation initiale des ingénieurs ;
- Sensibiliser les décideurs de la recherche et de l'industrie à l'importance de la gouvernance de la simulation et de l'assurance de la crédibilité ;
- Décliner les objectifs ACARE en projets de recherche sur la capacité prédictive des simulations, la quantification des incertitudes et l'assurance de la crédibilité avec une coopération accrue des différents acteurs ;
- Promouvoir l'application industrielle des standards (ASME, NASA...);
- Promouvoir au travers de projets de recherche et d'applications industrielles pilotes les améliorations spécifiques requises par exemple :
 - Vérification : couverture de la vérification des codes, estimateurs d'erreur ;
 - Validation : métriques statistiques de corrélation, évaluation des incertitudes ;
 - Evaluation objective de la crédibilité : élaboration d'un standard pour les structures d'aéronefs.

Jean-François Imbert
SIMconcept Consulting
Mai 2017

⁶ ISO GUM ("Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement.") 1995, ASME PTC 19.1-2005, Test Uncertainty.

⁷ CAS (Credibility Assessment Scale) du standard NASA-STD-7009, et PCMM (Predictive Capability Maturity Model) développé par Sandia Labs.