

Prise en compte probabiliste des incertitudes dans le cycle de vie du produit avion

Régis LEBRUN

EADS Innovation Works



regis.lebrun@eads.net

3 et 4 octobre 2007

Plan de l'exposé

- 1 Prendre en compte les incertitudes
 - Qu'entend-on par incertitude ?
 - Pourquoi choisir un modèle probabiliste ?
- 2 Le cycle de vie du produit avion
 - Les avants-projets
 - La conception détaillée
 - Le tolérancement
 - Le contrôle non destructif
- 3 Les incertitudes à EADS Innovation Works
 - Présentation
 - Méthodologie
 - OpenTURNS
- 4 Conclusion

Qu'entend-on par incertitudes ?

Deux réalités derrière la notion d'incertitudes

incertitude = **incapacité à donner une valeur unique**
à un paramètre à un instant donné.

Deux catégories d'incertitudes :

- Les incertitudes à caractère épistémique, qui traduisent essentiellement un manque de connaissance (ex. Combien de réacteurs pour le futur avion ?).
- Les incertitudes à caractère stochastique, qui traduisent essentiellement une variabilité intrinsèque de la grandeur concernée (ex. Quelle est la charge aérodynamique subie en vol ?).

Qu'entend-on par incertitudes ?

Deux réalités derrière la notion d'incertitudes

La différence essentielle porte sur la capacité à *réduire* l'incertitude attachée à la grandeur :

- On peut espérer **réduire les incertitudes épistémiques** par une meilleure connaissance du paramètre.
- On ne peut qu'espérer **mieux décrire l'incertitude stochastique** d'un paramètre en ayant plus de mesures de ce paramètre.

Pourquoi choisir un modèle probabiliste ?

Représentation et propagation des incertitudes : contexte

On dispose :

- des **paramètres incertains** $\underline{X} = (p_1, \dots, p_n) \in \mathbb{R}^n$;
- un **modèle numérique** $f \in \mathcal{F}(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^q)$;
- une **grandeur d'intérêt** incertaine $\underline{Y} = f(\underline{X})$.

On souhaite :

- **représenter** les incertitudes sur \underline{X} ;
- **propager** ces incertitudes via f ;
- **analyser** les incertitudes sur \underline{Y} .

Pourquoi choisir un modèle probabiliste ?

Représentation et propagation des incertitudes : propriétés

Propriétés attendues d'une représentation des incertitudes :

- Interprétation facile (ou au moins facile à acquérir) ;
- Théorie mathématique mature, à même de traiter la variété des situations de propagation d'incertitude ;
- Algorithmes établis et performants de propagation d'incertitude ;
- Possibilité de condenser ou de détailler la description selon le contexte.

Pourquoi choisir un modèle probabiliste ?

Les modèles déterministes

Les méthodes déterministes fréquemment utilisées sont :

- Modélisation de l'incertitude par un intervalle pour chaque paramètre incertain ;
- Propagation de l'incertitude par traitement de cas extrêmes ;
- Utilisation d'une arithmétique d'intervalle ;
- Utilisation d'une minimisation globale sous contraintes (moins fréquent).

Pourquoi choisir un modèle probabiliste ?

Abandon des modèles déterministes

Principales difficultés :

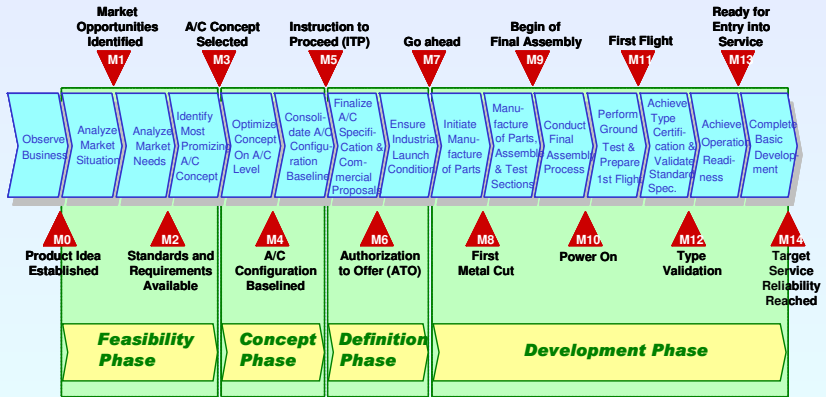
- L'intervalle de variation est souvent obtenu par analyse statistique, les bornes sont en fait des quantiles et non des majorants/minorants absolus.
- Comment définir un cas extrême pour un modèle f non monotone ?
- L'arithmétique d'intervalle est (très) majorante, et nécessite de gros travaux logiciel. Le résultat final ne permet bien souvent pas de conclure.
- L'optimisation sous contrainte est coûteuse et ne donne qu'une information limitée sur \underline{Y} , le plus souvent très loin de l'information souhaitée (répartition entre les bornes).
- Pas de prise en compte de la dépendance entre paramètres.
- ...

Pourquoi choisir un modèle probabiliste ?

Choix d'une modélisation probabiliste

- Les paramètres incertains forment un vecteur aléatoire ;
- Les incertitudes épistémiques = interprétation bayésienne ;
- Les incertitudes stochastiques = interprétation fréquentiste ;
- Théorie mathématique très développée ;
- Méthodes numériques nombreuses, éprouvées et efficaces ;
- Vocabulaire incertitude homogène sur tout le cycle de vie du produit.

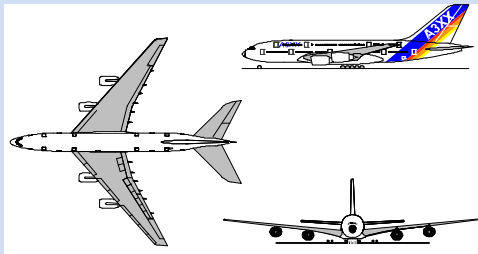
Le cycle de vie du produit avion : un zoom sur la conception



Les avant-projets

Objectifs

- Fournir des caractéristiques générales d'un avion capable de répondre à un cahier des charges ;
- Donner un point de départ commun aux départements spécialisés ;
- Assurer un rôle d'intégrateur au niveau global avion.



Les avant-projets

Problématique

- Nombreux paramètres macroscopiques à régler ;
- Modèle numérique de l'avion très simplifié ;
- Assurer une conception robuste.

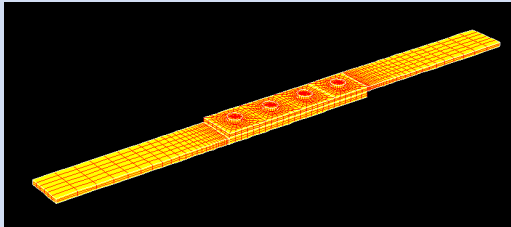
Mathématiques mises en œuvre

- Optimisation sous contrainte probabiliste → Prekopa, gradient probabiliste ;
- Indices de sensibilité → Sobol, intégration en grande dimension ;
- Maximum d'entropie pour déterminer les lois ;
- Explorer différentes structures de dépendance → Nelsen, copules.

La conception détaillée

L'analyse de structure : objectifs

- Valider la tenue aux efforts statiques et dynamiques ;
- Valider la tenue en fatigue ;
- Valider les principes constructifs ;
- Préparer la certification.



La conception détaillée

L'analyse de structure : problématique

- Paramètres physiques et numériques nombreux ;
- Qualité et volume des mesures très variable selon le type d'analyse ;
- Modèles numériques complexes, coûts de simulation élevés ;
- Paramètres incertains non gaussiens, dépendants ;
- Critères de décision complexes.

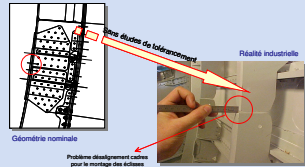
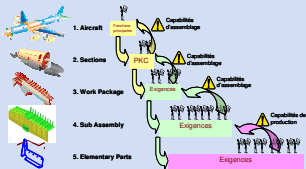
Mathématiques mises en œuvre

- Statistique robuste → les quantiles remplacent les moments ;
- Estimation non paramétrique → reconstruction à noyaux, ondelettes ;
- Calcul de probabilité faible → FORM/SORM, Monté Carlo avec réduction de variance ;
- Explorer différentes structures de dépendance → Nelsen, copules.

Le tolérancement

Objectifs

- Spécifier les pièces à produire ;
- Déterminer les séquences d'assemblage ;
- Gérer la complexité du produit ;
- Définir les moyens de contrôle de qualité.



Le tolérancement

Problématique

- Minimiser le taux de rebus et les dérogations ;
- Modèle hiérarchique très profond (jusqu'à 7 niveaux de détail) ;
- Nombre de paramètres incertains très élevé (10^5), non gaussiens ;
- Modèle numérique linéaire par rapport aux paramètres incertains ;
- Grand volume de données disponibles.

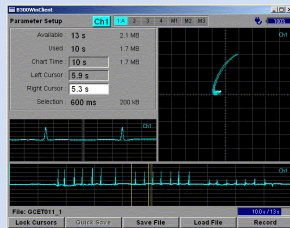
Mathématiques mises en œuvre

- Méthode de propagation spécifique → formules sommatoires de Poisson, d'Euler ;
- Synthèse d'incertitudes → projection de lois ;
- Statistique robuste → les quantiles remplacent les moments ;
- Estimation non paramétrique → reconstruction à noyaux, ondelettes.

Le contrôle non destructif

Objectif

- Définir les procédures de contrôle ;
- Établir le cahier de maintenance de l'avion ;
- Valider les procédures de contrôle.



Le contrôle non destructif

Problématique

- Campagnes d'essai coûteuse ;
- Grande variabilité liée à l'opérateur ;
- Expertise pour l'interprétation de la mesure ;
- Modèles numériques non matures ;
- Définition probabiliste à finaliser.

Mathématiques mises en œuvre

- Régression non paramétrique robuste → régression de quantiles par noyaux ;
- Plans d'expérience → méthodes séquentielles ;
- Inversion probabiliste → Tarentola, assimilation de données.

Présentation

L'équipe

- De 2002 à 2004, activité dispersée dans plusieurs services ;
- Depuis 2005, équipe intégrée ;
- 3 personnes à temps plein, 10 personnes en périphérie.

Les thèmes

- Méthodologie ;
- Formation ;
- Algorithmie ;
- Développement.

Méthodologie

Une méthodologie générale...

- Etape A : Identifier le modèle numérique, les variables incertaines en entrée et en sortie, le critère de décision
Nécessite une expertise métier (mécanique, tolérancement etc.) et fiabiliste.
- Etape B : Quantifier les sources d'incertitude
Estimation statistique, modélisation de la dépendance, maximum d'entropie.
- Etape C : Propager les incertitudes
Méthodes analytiques, méthodes de transformation, Monté Carlo.
- Etape D : Hiérarchiser les incertitudes
Facteurs d'importance, sensibilité.

Méthodologie

... dont la mise en œuvre n'a rien d'immédiat !

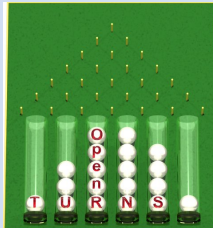
- Construction du critère probabiliste ;
- Automatisation de la chaîne de calcul ;
- Obtention d'information sur les paramètres incertains et leurs interactions ;
- Le budget calcul est-il compatible avec l'évaluation du critère choisi ?
- Problème de culture et de communication autour de la démarche.

OpenTURNS

OpenTURNS = Open source Treatment of Uncertainty, Risks aNd Statistics

Outil développé depuis 2005 en partenariat avec EDF R&D et PhiMECA, constitué de :

- Une librairie C++ pour l'intégration directe dans des chaînes de calcul ;
- Un module Python pour un usage en ligne de commande ;
- Le tout disponible sous licence Open Source LGPL !



OpenTURNS

Plus qu'un outil, une matérialisation de la méthodologie

La documentation d'OpenTURNS couvre :

- Installation ;
- Architecture, interfaçage ;
- Référence des fonctions utilisateur ;
- Recueil de cas d'études commentés ;
- Référentiel méthodologique et théorique.

Rendez-vous sur www.openturns.org !

Conclusion

Le verre à moitié plein...

- Un champ d'application très large pour le traitement des incertitudes ;
- Une grande diversité de situations ;
- Un cadre mathématique structurant ;
- Des outils industriels.

..le verre à moitié vide

- Un choc culturel ;
- Une grande inertie des autorités de certification ;
- Le coût de calcul ;
- Le problème du recrutement !