
Introduction

Le titre choisi, *Mécanique et incertain*, réunit deux mots trop peu souvent associés. La mécanique est tout à la fois « une science, des technologies et une industrie » dont l'objet est l'étude du mouvement, des déformations et des états d'équilibre de systèmes. L'incertain est un concept philosophique souvent associé à l'éternelle interrogation sur l'homme et sa destinée, mais aussi à ses créations. La convergence de la science et de l'incertain n'est que l'acceptation de l'impossibilité d'un modèle prévisionnel déterministe et de notre obligation à placer la science mécanique dans la réalité de l'incertain.

Cette introduction revient sur une thématique aux origines anciennes à laquelle de grands savants se sont confrontés puis situe l'ambition de ce document en annonçant le plan.

Une thématique aux origines anciennes

Face à la nécessité d'assumer les risques résultant de ses inventions, c'est d'abord vers les dieux que l'Homme s'est tourné. Hammourabi a promulgué en 1755 avant notre ère un code qui impliquait une sanction, œil pour œil, dent pour dent, dans le cas où l'usager serait victime d'un défaut de construction. Les progrès du raisonnement, du calcul et de l'observation de la nature ont, petit à petit, substitué à la sanction l'idée d'une prévisibilité des événements modélisés par des algorithmes mathématiques puis la définition de leur acceptabilité. C'est ainsi que Kepler publia en 1609 ses célèbres lois établissant la trajectoire elliptique des planètes autour du Soleil puis que Galilée publia en 1638 ses discours sur deux sciences nouvelles qui constituent

une introduction à la modélisation en mécanique. Le succès de ces théories laissa croire que la nature pouvait être mathématisée par des constructions de modèles de plus en plus perfectionnés et bien des chercheurs suivirent cette voie jusqu'à se persuader, à la fin de XIX^e siècle, que la science était achevée, à quelques détails près.

De son côté, Girolamo Cardano (mort en 1576) fut à la fois mécanicien et mathématicien, mais aussi joueur et il proposa la première ébauche de ce qui est devenu la théorie des probabilités sous le titre *Liber de ludo aleae*. Blaise Pascal (1654) discuta le hasard dans les jeux économiques en introduisant l'incertain : *or, quand on travaille pour demain et pour l'incertain, on agit avec raison : car on doit travailler pour l'incertain par la règle des partis qui est démontrée*. Il inventa le très beau terme de *géométrie du hasard* qui signifie que le hasard existe, mais qu'il a une structure, terme devenu aujourd'hui théorie des probabilités, c'est-à-dire théorie de la preuve, alors qu'elle ne prouve rien. Dès 1776, Buffon fait le lien entre statistique et fiabilité pour s'assurer de la performance de poutres en bois.

Pour le mécanicien concepteur de produits, de structures et de systèmes, le premier héritage a conduit à ce qu'il est possible d'appeler l'*erreur déterministe*. Quant au deuxième héritage, il a longtemps été ignoré sauf de manière très ténue à travers l'élaboration des coefficients dits de sécurité. La théorie des probabilités, de son côté, introduit également une erreur d'interprétation : l'*erreur ludique*, car elle n'est parfaite que pour les jeux dont les règles sont parfaitement définies.

Henri Poincaré (*Sciences et méthodes*, 1903) brisa au début du XX^e siècle les certitudes déterministes de la modélisation du système solaire pourtant si parfait car observé sur une période infiniment courte par rapport à sa durée. L'erreur déterministe était mise en évidence par la sensibilité aux conditions initiales : *une cause très petite, qui nous échappe, détermine un effet considérable que nous ne pouvons pas ne pas voir, et alors nous disons que cet effet est dû au hasard*. Cette réflexion donna naissance au chaos déterministe mais laissa Poincaré disciple de Laplace : *rien ne serait incertain à une intelligence qui connaîtrait toutes les forces de la nature*. Il faudra attendre Von Neumann et Wiener pour le chaos stochastique. En ingénierie également, l'acceptation du hasard, même structuré, fut l'objet de fortes oppositions puisque Le Chatelier déclarait en 1924 que *le hasard offre un échappatoire aux incompetents qui rechignent à entreprendre la démarche scientifique*.

Pourtant, des ingénieurs s'interrogeant sur la prise de risque introduisent des notions statistiques (M. Mayer, 1926 pour les constructions) dans l'expertise des variables de conception ; une exigence sur le taux d'accident d'un aéronef (A. Grenville Pugsley, vers 1930) ; des lois de probabilité (R. Lévi, 1949 ; A.-R. Rjanitzyne, 1949). A.-M. Freudenthal (1949) appela à *placer le concept de la sûreté des structures dans le royaume de la réalité physique où il n'y a pas d'absolu et où la connaissance n'est pas parfaite*. Constatant la répartition aléatoire des défauts d'amorçage, Weibull (1951) plaça la rupture dans un cadre probabiliste ouvrant ainsi la voie à la fiabilité mécanique.

Ce contexte, mais aussi la puissance de calcul des ordinateurs, sont à l'origine des recherches de la seconde moitié du XX^e siècle qui ont conduit aujourd'hui à un important développement de la mécanique probabiliste et de son application à la fiabilité et à l'analyse de risque. Il est aussi à la source de réflexions d'ingénieurs comme J.-C. Ligeron et C. Marcovici (1974) ou A. Villemeur (1988) s'interrogeant sur la prévision de la sûreté de fonctionnement des composants électroniques puis mécaniques.

De son côté, la théorie des probabilités devenait sous l'impulsion de A.-N. Kolmogorov (1903-1987) un outil mathématique rigoureux dont s'emparèrent les économistes qui ont été alors confrontés à l'erreur ludique : en économie encore plus qu'en mécanique, la règle du jeu est inconnue.

Le document *Les sciences mécaniques et l'avenir industriel de la France*, publié en 1980 par l'Académie des Sciences [INS 80], appelait à la constitution d'équipes scientifiques où se rencontrent à niveau égal des compétences en mécanique et en probabilités. 30 ans après, cet appel n'a été que partiellement entendu et aujourd'hui il est à renouveler en rappelant que mécanique et probabilités ne sont pas suffisantes. Les enjeux de la conception, mais aussi ceux de l'exploitation, de la maintenance et de la durabilité, se placent dans un incertain auquel les probabilités seules ne peuvent répondre pour satisfaire à la prise de risque tant dans les domaines techniques, économiques que sociétaux.

Mécanique et probabilité sont évidemment liées dans le modèle physique standard mais il ne s'agit pas d'une échelle d'observation que revendique la mécanique concernée par ce document. Quant à savoir si le hasard existe, c'est un débat philosophique. Nous devons être ici eulériens et non lagrangiens. Placés au XXI^e siècle, nous observons le cours d'événements qui nous

semblent hasardeux, car il est impossible de reconstruire leurs trajectoires. Une démarche scientifique de l'incertain en mécanique reste à construire.

Objectif et plan de ce document

De plus en plus de chercheurs prennent conscience de la nécessité de placer leurs travaux scientifiques dans un cadre incertain, c'est-à-dire un cadre définissant une structure de leur connaissance imparfaite, une géométrie du hasard aurait dit Blaise Pascal. Les technologies ne sont jamais absolument robustes et fiables et les productions industrielles sont soumises à de nombreux aléas lors de leur élaboration ou lors de leur implémentation. Les points de vue mathématiques, physiques, technologiques et industriels ont conduit à un foisonnement considérable de méthodes et procédés, chacune ou chacun apportant une contribution à une meilleure maîtrise de l'incertain. L'ambition de ce document est alors de tenter une synthèse qui permette à chacun de bien situer toute contribution partielle dans la démarche scientifique de la maîtrise de l'incertain.

De ce fait, le document embrasse un grand nombre de concepts sans tenter de les approfondir tous, en soulignant ce qu'ils peuvent apporter et en dégageant les hypothèses et les perspectives de mise en œuvre. Sur chaque point, la bibliographie ne peut pas être exhaustive. Les principales références sont citées et une part importante est faite aux équipes françaises, illustrant ainsi la richesse de leurs travaux et ouvrant à de larges listes de références.

La rédaction ne fait que peu appel à des démonstrations à caractère mathématique et devrait être d'une lecture aisée pour tous ceux, scientifiques, ingénieurs, industriels, élèves en formation, qui s'interrogent sur la nécessité d'inclure l'incertain dans leur démarche, parce qu'il est constitutif de notre univers, parce qu'il peut apporter un avantage stratégique et opérationnel.

Le document est divisé en une introduction, 3 chapitres et 8 sections explorant l'incertain en mécanique selon le schéma de la figure 1 :

– chapitre 1 « *Comprendre l'incertain* »

Comprendre l'incertain se décline sous trois points de vue : accepter l'incertain, définir des mesures et construire une démarche :

Mécanique et Incertain - « Introduction »	
Chapitre 1 « Comprendre l'incertain »	
Section 1.1 « Incertain et réalité » - Prendre conscience de l'incertain	
Section 1.2 « Robustesse et Fiabilité » - Définir des mesures de l'incertain	
Section 1.3 « Concevoir pour produire robuste » - Le processus de conception	
Chapitre 2 « Modéliser l'incertain »	
Section 2.1 « Incertain aléatoire » - Modélisation de l'incertain	
Section 2.2 « Incertain du modèle de comportement » - Modèle physique	
Section 2.3 « Propagation des incertitudes » - Sensibilité et fiabilité	
Chapitre 3 « Décider dans l'incertain »	
Section 3.1 « Aide à la décision en conception » - Optimiser le compromis	
Section 3.2 « Synthèse et conclusion » - Trois points de vue et des défis	

Figure 1. *L'incertain en mécanique : comprendre, modéliser, décider*

- section 1.1 « Incertain et réalité »

Cette section prolonge les considérations historiques et souligne les différentes modalités d'approche de l'incertain selon l'information disponible. Elle conclut sur la nécessité de ne pas se contenter du modèle probabiliste ;

- section 1.2 « Robustesse et fiabilité »

Cette section discute les termes robustesse et fiabilité, deux facettes d'une même exigence de qualité d'un produit, pour laquelle des mesures sont introduites ;

- section 1.3 « Concevoir pour produire robuste »

Cette section analyse les phases et étapes du cycle de conception et la démarche de maîtrise de la robustesse et de la fiabilité ;

– chapitre 2 « *Modéliser l'incertain* »

Modéliser l'incertain se décline à travers les modèles pour la représentation des données et des comportements et la propagation de celles-ci dans ceux-là :

- section 2.1 « Incertain aléatoire »

Cette section examine comment la connaissance permet la construction de modèles représentatifs de l'incertain : de l'épistémique à l'aléatoire ;

- section 2.2 « Incertain du modèle de comportement »

Discussion sur la modélisation des données et des comportements ;

- section 2.3 « Propagation des incertitudes »

Propagation des incertitudes, en fonction de l'avancement du projet, pour des variables probabilisées ou non ;

– chapitre 3 « *Décider dans l'incertain* »

Décider dans l'incertain exige un compromis entre les exigences en conception et la satisfaction des points de vue de l'utilisateur, de l'ingénieur et du chercheur :

- section 3.1 « Aide à la décision en conception »

Optimiser le compromis ;

- section 3.2 « Synthèse et conclusion »

Quelques éléments de synthèse selon les points de vue de l'utilisateur, de l'ingénieur et du chercheur et des perspectives pour une science de l'ingénierie dans l'incertain.