

Chapitre 1. Introduction générale à l'incertitude et aux risques en ingénierie

- 1.1. – Définitions : incertitude, risque, variabilité, fiabilité, robustesse.
- 1.2. – Rôle de l'incertitude dans la modélisation et la conception des structures.
- 1.3. – Différences entre approche déterministe et approche probabiliste.
- 1.4. – Cadres normatifs et réglementaires (Eurocodes, RPA en Algérie).

Chapitre 1

Introduction générale à l'incertitude et aux risques en ingénierie

1.1. – Définitions : incertitude, risque, variabilité, fiabilité, robustesse.

1.1.1. Incertitude

L'incertitude désigne l'état de ce qui n'est pas certain, qu'il s'agisse d'une personne qui ne sait pas quoi faire, d'une situation imprévisible, ou d'une mesure scientifique qui n'est pas parfaitement précise. En science, elle représente l'étendue des valeurs possibles d'une mesure, tandis que dans le langage courant, elle évoque un sentiment de doute, d'indécision, ou l'imprévisibilité d'un événement futur.

a) Incertitude de mesure : C'est un paramètre associé au résultat d'une mesure qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées à la grandeur mesurée.

b) Exemple : Le résultat d'une mesure de 25,4 m avec une incertitude de $\pm 0,2$ m signifie que la valeur réelle se situe très probablement entre 25,2 m et 25,6 m.

1.1.2. Risque

Le risque est la possibilité ou la probabilité qu'un événement indésirable se produise, entraînant des dommages ou des préjudices pour des personnes, des biens, ou l'environnement. Il se caractérise par la combinaison de la probabilité de l'événement et de la gravité de ses conséquences potentielles. Un risque n'existe que s'il y a un danger (l'agent responsable) et un enjeu (les personnes ou les biens exposés).

a) Composantes d'un risque

- **Danger :** Le phénomène ou la situation potentiellement nuisible (par exemple, le tabac pour la santé, un séisme pour une habitation).

- **Enjeu** : Les éléments qui peuvent être affectés par le danger (personnes, biens, environnement).
- **Probabilité** : La fréquence ou la vraisemblance que l'événement se produise.
- **Gravité** : L'ampleur des dommages potentiels, qu'ils soient corporels, matériels, financiers ou environnementaux.

b) Exemple

- **Danger** : Une falaise instable.
- **Enjeu** : Des promeneurs dans la zone.
- **Risque** : Le risque qu'un promeneur soit blessé ou tué par une chute de pierres (probabilité faible si peu de promeneurs, mais risque élever si beaucoup de promeneurs).

c) Quelque Types de risques

- **Risques naturels** : Séismes, inondations, tempêtes.
- **Risques d'origine humaine** : Accidents du travail, risques industriels, risques alimentaires.
- **Risques majeurs** : Événements de faible probabilité mais aux conséquences très importantes, nécessitant des moyens de secours exceptionnels.

1.1.3. Variabilité

La variabilité désigne le caractère de ce qui est susceptible de varier, de changer ou de fluctuer.

En statistiques,

- La variabilité est une mesure de la dispersion des valeurs d'une distribution de données, indiquant à quel point elles sont étalées autour de la moyenne.
- Des indicateurs comme l'écart-type ou la variance sont utilisés pour quantifier cette variabilité.

1.1.4. Fiabilité

La fiabilité désigne l'aptitude d'un dispositif, d'un système ou d'une personne à fonctionner sans défaillance pendant une période donnée, et par extension, la

qualité de quelque chose en quoi l'on peut avoir confiance. En ingénierie, c'est une mesure quantitative de la probabilité de ne pas avoir de défaillance.

a) Exemples : La fiabilité d'un sondage ou d'une méthode est le degré auquel ses résultats sont constants et précis.

1.1.5. Robustesse

La robustesse est la qualité ou la capacité de quelque chose ou de quelqu'un à être fort, résistant, stable et solide, surtout face aux perturbations ou aux sollicitations extrêmes. Le terme s'applique à des objets (une machine, une structure), des systèmes (un programme informatique, une installation nucléaire) et même des êtres vivants ou des organisations, désignant leur aptitude à maintenir leurs fonctions ou leur intégrité malgré des conditions difficiles.

a) Exemples et synonymes/contraires :

- **Exemples :** la robustesse d'un moteur, la robustesse d'une installation nucléaire, la robustesse d'une économie, ou même la robustesse d'un individu face à l'adversité.
- **Synonymes :** force, résistance, solidité, vigueur, fermeté.
- **Contraires :** fragilité, faiblesse, délicatesse.

1.2. – Rôle de l'incertitude dans la modélisation et la conception des structures.

L'incertitude joue un rôle fondamental en modélisation et conception de structures en permettant de quantifier et gérer les imprécisions inhérentes aux données et aux hypothèses du modèle, ce qui améliore la fiabilité des analyses et la robustesse des conceptions. Elle permet d'évaluer la sensibilité du modèle aux variations des entrées, de comprendre les risques potentiels, et d'optimiser les conceptions pour résister aux conditions réelles, conduisant à une réduction des coûts et à une meilleure assurance de la qualité de la conception.

1.2.1. Rôle dans la modélisation

- **Quantification des variabilités :** L'incertitude est utilisée pour décrire la dispersion et l'intervalle dans lequel se situent les valeurs exactes, reflétant l'imprécision des mesures ou des paramètres du modèle.

- **Compréhension de l'impact des incertitudes :** Elle aide à comprendre comment les variations des données d'entrée affectent le résultat d'un modèle, permettant de réaliser des analyses de sensibilité.
- **Tests de validité des hypothèses :** L'analyse d'incertitude permet de vérifier la validité des hypothèses du modèle, ce qui est crucial pour s'assurer qu'il représente adéquatement le monde réel.
- **Optimisation des modèles :** En identifiant les paramètres les plus influents, l'incertitude guide les efforts pour réduire l'incertitude globale du modèle et simplifier sa structure.

1.2.2. Rôle dans la conception des structures

- **Évaluation de la fiabilité :** L'intégration de l'incertitude permet d'évaluer la fiabilité d'une conception en anticipant les performances sous diverses conditions.
- **Prise en compte des risques :** Elle fournit un cadre pour identifier et comprendre les risques potentiels liés aux conditions réelles d'exploitation, permettant de concevoir des structures plus résilientes.
- **Optimisation des choix de conception :** En comprenant l'impact de l'incertitude sur les performances, les ingénieurs peuvent prendre des décisions éclairées pour optimiser la conception, réduisant potentiellement les coûts de développement et de fabrication.
- **Amélioration de la robustesse :** Les méthodes de modélisation de l'incertitude, comme l'optimisation robuste ou la programmation stochastique, aident à concevoir des structures capables de fonctionner de manière fiable même en présence d'incertitudes.

1.3. – Différences entre approche déterministe et approche probabiliste.

L'approche déterministe repose sur des certitudes et des lois établies, prédisant des résultats fixes à partir de conditions identiques, tandis que l'approche probabiliste intègre l'incertitude et l'aléatoire, évaluant les probabilités d'occurrence de différents scénarios pour fournir une estimation plus réaliste des risques ou des résultats possibles. La première se concentre sur la maîtrise des

conséquences d'un événement, tandis que la seconde vise à estimer la probabilité de sa survenue.

1.3.1. Approche déterministe

- **Principe** : Fonctionne sur des lois figées et des certitudes, où un même ensemble de conditions initiales produit toujours le même résultat.
- **Application** : Idéale pour les tâches bien définies et les systèmes où la précision et la cohérence sont primordiales, comme la programmation informatique classique ou les bilans de masse.
- **Objectif** : Démontrer la tolérance d'une installation ou d'un système aux dangers identifiés en définissant les limites d'une exploitation sûre.
- **Exemple** : L'analyse déterministe d'un risque postule une défaillance et calcule l'intensité des conséquences sur l'équipement ou les personnes.

1.3.2. Approche probabiliste

- **Principe** : Intègre l'incertitude, les aléas et les biais, en utilisant des probabilités pour estimer la vraisemblance de différents événements ou résultats.
- **Application** : S'applique dans des environnements complexes, incertains et changeants, où les événements ne peuvent pas être prédits avec certitude.
- **Objectif** : Fournir une estimation réaliste du risque en évaluant conjointement les probabilités de survenue des accidents et leurs conséquences.
- **Exemple** : L'analyse probabiliste d'un risque vise à estimer la probabilité de défaillance d'un composant, puis à évaluer les conséquences possibles.

1.3.3. Comparaison et complémentarité

- **Information** : Les prévisions probabilistes sont plus riches d'un point de vue informationnel que les déterministes, car elles fournissent une distribution des résultats possibles, et non juste une "meilleure estimation".
- **Flexibilité et adaptabilité** : L'approche probabiliste apporte plus de flexibilité et une meilleure adaptabilité face à l'inconnu et à la complexité,

tandis que l'approche déterministe offre une plus grande rigueur et un meilleur contrôle dans les domaines bien définis.

- **Modèles hybrides** : Ces deux approches sont souvent complémentaires et peuvent être utilisées conjointement pour renforcer la sûreté et résoudre des défis complexes, en mariant la rigueur déterministe à la puissance prédictive du probabiliste.

1.4. – Cadres normatifs et réglementaires (Eurocodes, RPA en Algérie).

1.4.1. Les Eurocodes

Les Eurocodes intègrent la gestion des incertitudes en utilisant une approche basée sur des facteurs de sécurité partiels à travers différentes méthodes de calcul des états limites, comme décrit notamment dans l'Eurocode 7 pour les fondations. L'objectif est d'assurer la fiabilité des structures en tenant compte des variabilités des actions (charges), des résistances des matériaux et de la géométrie des éléments, tout en assurant la durabilité et l'aptitude au service des ouvrages.

a) Principes fondamentaux de la gestion de l'incertitude dans les Eurocodes

- **Approche aux états limites** : C'est la méthode de calcul principale des Eurocodes, où l'on utilise des facteurs de sécurité pour évaluer la probabilité de défaillance des structures.
- **Facteurs de sécurité partiels** : Ils sont appliqués aux actions (charges), aux effets des actions et aux résistances des matériaux. Cette méthode permet de gérer l'incertitude de manière plus pratique que le calcul direct de la probabilité de défaillance.
- **Modélisation des incertitudes** : L'Eurocode 0 (EN 1990) établit les principes fondamentaux de la fiabilité, tandis que les autres Eurocodes (2 pour le béton, 3 pour l'acier, etc.) fournissent des règles de conception qui tiennent compte des incertitudes spécifiques à chaque matériau et à chaque type de structure.

b) Comment l'incertitude est gérée en pratique

- **Actions et résistances** : Les facteurs partiels de sécurité sont répartis entre les actions (par exemple, poids propre, charge de vent), les résistances des matériaux et les modèles de calcul.
- **Durabilité** : L'Eurocode 9 (EN 1990) impose que les structures soient projetées pour conserver leurs performances pendant leur durée d'utilisation, en tenant compte des environnements et des niveaux de maintenance attendus, ce qui implique de gérer les incertitudes liées à la détérioration des matériaux.
- **Différentes approches possibles** : Dans l'Eurocode 7 (calcul géotechnique), par exemple, il est possible de vérifier les états limites en utilisant des calculs, des modèles expérimentaux, ou des méthodes observationnelles, en fonction de la complexité du projet et des incertitudes associées.

En bref, les Eurocodes permettent de gérer l'incertitude en définissant des règles communes pour la conception des structures, en utilisant des facteurs de sécurité et des méthodologies basées sur des données statistiques et des essais, afin de garantir la sécurité, l'aptitude au service et la durabilité des ouvrages.

1.4.2. Règlements parasismiques algériens (RPA),

Dans les règlements parasismiques algériens (RPA), l'incertitude est prise en compte principalement en estimant les probabilités de défaillance des structures et les incertitudes inhérentes aux propriétés des matériaux et des dispositifs de conception à travers des études comme la méthode Monte Carlo. Cela permet d'évaluer la performance sismique des bâtiments et de garantir un niveau de sécurité optimal en analysant des paramètres comme le rapport longueur/largeur.

a) Conception parasismique et incertitudes

- **Objectif de la réglementation** : Les règles parasismiques algériennes (RPA) visent à limiter les risques d'effondrement des bâtiments et les dommages structuraux majeurs lors d'un séisme, protégeant ainsi la vie humaine.

- **Méthodes d'analyse** : Des études sont menées pour évaluer la performance sismique des bâtiments, en tenant compte des incertitudes. La méthode Monte Carlo est un exemple de technique utilisée pour générer des distributions probabilistes des paramètres incertains, comme les propriétés de l'amortissement.

b) Évaluation des incertitudes dans la conception

- **Régularité en plan** : L'étude de la régularité en plan d'un bâtiment, telle que la relation entre sa longueur et sa largeur (L_x/L_y), est un aspect important pour évaluer sa performance sismique, car elle ne dépend pas que de la zone sismique.
- **Analyse et adaptation** : Le rapport L_x/L_y n'est pas toujours pris en compte de manière adéquate. C'est pourquoi une étude de type push over peut être entreprise pour évaluer la performance sismique de divers bâtiments avec des rapports L_x/L_y variés, en fonction du niveau d'incertitude lié à l'élancement en plan.

c) Application aux bâtiments

- **Méthode statique équivalente** : La méthode statique équivalente des règles RPA99/V 2003 est applicable seulement si certaines conditions de régularité (hauteur, plan) sont respectées, ce qui peut être restrictif.
- **Évolution des règles** : Les règles parasismiques algériennes ont évolué avec le temps pour intégrer de nouvelles connaissances sur la sismicité et améliorer la conception des bâtiments.