

Chapitre 2. Typologie des incertitudes (2 Semaines)

- 1.1. – Incertitudes aléatoires (variabilité naturelle)
- 1.2. – Variabilité des charges (vent, séisme, trafic, température).
- 1.3. – Variabilité des matériaux (béton

, acier, sols).
- 1.4. – Incertitudes épistémiques (manque de connaissance)
- 1.5. – Erreurs de modélisation.
- 1.6. – Limites des méthodes de mesure et d'identification des paramètres.
- 1.7. – Biais dus à l'expérience limitée ou au manque de données.
- 1.8. – Distinction incertitude / variabilité / ignorance.

Chapitre 2

Typologie des incertitudes

1.1. – Incertitudes aléatoires (variabilité naturelle).

Les incertitudes aléatoires, aussi appelées variabilité naturelle, sont une forme d'incertitude inhérente à la nature même des phénomènes, causée par des fluctuations et des variations intrinsèques qui sont irréductibles. Elles découlent de processus stochastiques, comme les variations dans un processus de fabrication ou les dynamiques des populations, et sont généralement estimées par des distributions de probabilités pour quantifier l'erreur ou l'imprécision d'une mesure ou d'un phénomène.

1.1.1. Caractéristiques principales

- **Irréductibilité** : Cette forme d'incertitude ne peut pas être éliminée, car elle est fondamentale au processus étudié.
- **Nature stochastique** : Elle est associée à des phénomènes aléatoires qui présentent des fluctuations naturelles.
- **Expression probabiliste** : On quantifie l'incertitude aléatoire en lui attribuant une distribution de probabilités, ce qui permet d'estimer la plage de valeurs possibles pour un phénomène donné.

1.1.2. Exemples de variabilité naturelle

- **Processus de fabrication** : Les variations dans la fabrication d'un composant, où chaque pièce n'est pas exactement identique, illustrent la variabilité naturelle des processus.
- **Phénomènes écologiques** : La variabilité naturelle du recrutement ou de la dynamique des populations dans un écosystème représente un exemple de ce type d'incertitude.
- **Erreurs expérimentales** : Lors d'une mesure, des fluctuations aléatoires dans l'appareil ou l'environnement peuvent conduire à des résultats légèrement différents à chaque mesure, même si les conditions sont censées être identiques.

1.1.3. Distinction avec les incertitudes épistémiques

Il est important de distinguer les incertitudes aléatoires des incertitudes épistémiques, qui, elles, sont dues à un manque de connaissances et peuvent être réduites par des efforts supplémentaires comme la collecte de données ou l'amélioration des modèles.

1.2. – Variabilité des charges (vent, séisme, trafic, température).

La variabilité des charges (vent, séisme, trafic, température) fait référence aux fluctuations et incertitudes des forces qui affectent une structure, nécessitant des normes et des modèles spécifiques (comme Eurocodes, ASCE 7, AISC 341, LM1) pour quantifier les effets dynamiques ou statiques et assurer la sécurité des constructions. Le vent et le séisme sont des charges dynamiques, tandis que les effets du trafic et de la température peuvent être statiques ou dynamiques, dépendant de leur nature et de l'analyse requise.

1.2.1. Charges de Vent.

- **Nature** : Charge dynamique causée par les mouvements de l'air.
- **Quantification** : Dépend de la vitesse du vent, de la catégorie d'exposition, des facteurs de rafale et des coefficients de pression/traînée.
- **Modélisation** : Les normes comme l'ASCE 341 déterminent la pression du vent agissant sur la structure.

1.2.2. Charges Sismiques

- **Nature** : Charge dynamique résultant des mouvements du sol lors d'un tremblement de terre, provoquant des vibrations.
- **Quantification** : Détermine par la zone de risque sismique, le type de sol, le facteur d'importance, et la période fondamentale de la structure.
- **Modélisation** : La norme ASCE 7 est utilisée pour le cisaillement sismique de la base.

1.2.3. Charges de Trafic

- **Nature**: Peut-être statique ou dynamique, dépendant du mouvement des véhicules sur une structure.

- **Quantification** : Le modèle de charge LM1 pour le trafic automobile représente des essieux uniques créant des charges ponctuelles, simulant les effets dynamiques des véhicules.
- **Modélisation** : Utilisé pour les vérifications globales et locales des éléments structuraux, particulièrement sur les éléments courts.

1.2.4. Charges de Température

- **Nature** : Charge statique ou dynamique, qui provoque une dilatation ou une contraction des matériaux, entraînant des contraintes thermiques.
- **Quantification** : Dépend de l'amplitude des variations de température et des propriétés thermiques des matériaux.
- **Modélisation** : Nécessite de prendre en compte l'expansion et la contraction des matériaux pour éviter les ruptures ou la déformation de la structure.

1.3. – Variabilité des matériaux (béton, acier, sols).

La variabilité des matériaux de construction – béton, acier et sols – provient de leur nature intrinsèquement hétérogène et de divers facteurs de production et d'environnement. Pour le béton, elle est influencée par le rapport eau-ciment, la granulométrie et les conditions de cure. L'acier présente une variabilité liée à sa composition chimique et à ses procédés de fabrication. La variabilité des sols est principalement due à leur composition géologique et à leurs propriétés physiques, qui diffèrent d'un site à l'autre.

1.3.1. Variabilité du Béton

- **Composition et fabrication** : La résistance du béton varie en fonction du dosage en ciment, du rapport eau-ciment et de la qualité des granulats. L'ajout de bulles d'air peut aussi affecter ses propriétés.
- **Mise en œuvre** : Les méthodes de vibration, de mise en place et les conditions de cure du béton influencent sa compacité et sa durabilité.
- **Variabilité Spatiale** : Les propriétés du béton sont hétérogènes au sein d'une même structure, nécessitant des mesures pour en estimer la moyenne et la dispersion, comme la résistance à la compression.

1.3.2. Variabilité de l'Acier

- **Propriétés Mécaniques** : Bien que l'acier soit souvent utilisé pour sa robustesse en traction, sa résistance peut varier en fonction de son type et de son processus de fabrication.
- **Composition Chimique** : L'alliage de l'acier influence sa dilatation thermique et sa résistance à la corrosion, des facteurs qui doivent être pris en compte dans l'association avec le béton.

1.3.3. Variabilité des Sols

- **Nature Géologique** : La composition des sols (lithologie) est un facteur déterminant de leur variabilité.
- **Propriétés Physiques** : Des caractéristiques comme la densité, la perméabilité et la pression limite (mesurée par des essais pressiométriques) varient considérablement d'une zone à l'autre et d'une profondeur à l'autre.
- **Hétérogénéité Spatiale** : Les sols présentent une hétérogénéité tridimensionnelle qui doit être prise en compte pour une conception structurelle fiable.

1.4. – Incertitudes épistémiques (manque de connaissance)

Les incertitudes épistémiques désignent les manques de connaissances sur un système, un phénomène ou un modèle, qui peuvent être réduits par l'acquisition de plus d'informations, d'expertises ou par l'amélioration des modèles. Elles contrastent avec les incertitudes aléatoires, qui sont dues à la variabilité intrinsèque d'un phénomène et sont considérées comme irréductibles.

1.4.1. Origine et caractéristiques

- **Manque de savoir** : Elles résultent d'hypothèses, d'approximations et de simplifications utilisées dans la construction des modèles, ce qui reflète un savoir incomplet sur le phénomène étudié.
- **Caractère réductible** : Contrairement à l'incertitude aléatoire, l'incertitude épistémique peut être diminuée par des efforts supplémentaires.

1.4.2. Comment les réduire

L'acquisition de connaissances supplémentaires permet de réduire les incertitudes épistémiques :

- **Collecte de données** : Obtenir davantage de données pertinentes sur le phénomène.
- **Amélioration des modèles** : Développer des modèles plus précis et plus représentatifs de la réalité.
- **Expertise** : Consulter des experts pour enrichir la compréhension du système étudié.
- **Efforts supplémentaires** : Mener des essais ou des expériences pour acquérir de nouvelles informations.

1.4.3. Implications

- **Modélisation** : L'incertitude épistémique est cruciale en apprentissage automatique, car une forte incertitude peut indiquer des prédictions sur des données pour lesquelles le modèle a moins d'expérience, ce qui peut conduire à des erreurs.
- **Gestion des risques** : Identifier et quantifier les incertitudes épistémiques aide à une meilleure évaluation des risques et à une prise de décision plus éclairée.

1.5. – Erreurs de modélisation.

Les erreurs de modélisation sont les inexactitudes qui surviennent entre une représentation simplifiée (le modèle) et la réalité qu'elle cherche à décrire ou à prédire. Elles proviennent de diverses sources, comme les approximations mathématiques, les simplifications de la structure, les erreurs dans les données d'entrée, les lacunes dans les mesures ou des problèmes de qualité du modèle lui-même (maillage, incohérence). Identifier et quantifier ces erreurs est essentiel pour assurer la validité et l'utilité des modèles.

1.5.1. Causes courantes des erreurs de modélisation

- **Inexactitude du modèle mathématique** : Le modèle peut faire des hypothèses trop simplificatrices qui ne capturent pas toutes les complexités du phénomène réel.

- **Erreurs dans les données d'entrée** : Les données utilisées pour alimenter le modèle peuvent être inexactes en raison de limitations des instruments de mesure, de fluctuations statistiques ou d'erreurs de transcription.
- **Simplification de la structure** : La représentation d'un système physique peut être trop simplifiée, omettant des éléments ou des interactions importantes.
- **Problèmes de maillage** : Dans les modèles numériques, un maillage de mauvaise qualité, avec des éléments trop petits ou mal connectés, peut entraîner des erreurs.
- **Manque de précision dans les objectifs** : Ne pas définir clairement l'objectif de la modélisation peut conduire à des modèles qui ne répondent pas aux attentes ou qui sont inadaptés.
- **Absence de validation** : Une modélisation qui n'est pas vérifiée et validée par les parties prenantes ou par des tests rigoureux risque de contenir des erreurs importantes.
- **Erreurs de troncature ou d'itération** : Dans l'utilisation de méthodes numériques, le fait de s'arrêter après un nombre fini de termes ou d'itérations peut introduire des erreurs d'approximation.

1.5.2. Exemples concrets

- **Modélisation de processus** : Un processus modélisé peut ne pas refléter fidèlement l'activité réelle, ou ne pas intégrer les informations essentielles recherchées par les utilisateurs, devenant ainsi inutilisable.
- **Modélisation d'un système physique** : Un modèle ne peut pas prédire le temps de trajet d'une voiture en considérant une vitesse constante si la réalité inclut des embouteillages ou des changements de vitesse.
- **Ingénierie de la construction** : La modélisation d'une structure peut être erronée si des éléments comme les escaliers ou les poutres ne sont pas correctement représentés dans le modèle numérique, menant à des calculs instables.

1.5.3. Comment les gérer

- **Définir des objectifs clairs:** et une méthodologie de modélisation adéquate.
- **Assurer la participation des experts:** métier et des utilisateurs pour une modélisation pertinente.
- **Vérifier la qualité du modèle:** (par exemple, le maillage) et les données d'entrée.
- **Utiliser des outils de visualisation:** pour identifier et corriger les problèmes de connexion entre les éléments du modèle.
- **Considérer les erreurs de manière statistique:** pour mieux évaluer l'incertitude des prédictions.

1.6. – Limites des méthodes de mesure et d'identification des paramètres.

Les limites des méthodes de mesure et d'identification des paramètres incluent l'incertitude intrinsèque de toute mesure, la complexité et la variabilité des systèmes à étudier, le bruit dans les données, les limitations des modèles mathématiques, et le caractère parfois arbitraire des choix méthodologiques et des algorithmes utilisés, qui peuvent affecter la précision et la fiabilité des résultats obtenus.

1.6.1. Limites des méthodes de mesure

- **Précision et exactitude :** Aucune mesure n'est parfaite. Il existe toujours une incertitude liée aux instruments de mesure, aux erreurs humaines, et aux conditions environnementales qui peuvent affecter la précision et l'exactitude des données.
- **Bruit et interférences :** Les mesures sont souvent affectées par le bruit, c'est-à-dire des signaux aléatoires ou des interférences qui peuvent masquer les données réelles et rendre plus difficile l'identification des paramètres pertinents.
- **Erreurs d'échantillonnage :** Si les données ne sont pas représentatives du système étudié, l'échantillonnage peut introduire des biais et des erreurs dans les résultats.

- **Limites de détection** : Les instruments ont une limite en dessous de laquelle ils ne peuvent pas détecter ou mesurer des paramètres, ce qui peut entraîner une perte d'information pour les paramètres faibles.

1.6.2. Limites des méthodes d'identification de paramètres

- **Complexité des systèmes** : Les systèmes réels sont souvent très complexes, et les modèles mathématiques simplifiés utilisés pour les identifier peuvent ne pas capturer toute la complexité du système, conduisant à des modèles qui ne décrivent pas parfaitement le comportement du système.
- **Unicité et non-unicité des solutions** : Dans certains cas, les données disponibles peuvent permettre de trouver plusieurs ensembles de paramètres qui expliquent les observations de manière similaire, rendant l'identification non unique et ambiguë.
- **Choix du modèle** : Le choix du type de modèle mathématique (paramétrique ou non paramétrique) et de sa structure peut influencer significativement les paramètres identifiés et leur pertinence.
- **Sensibilité aux données d'entrée** : Les algorithmes d'identification peuvent être sensibles aux données d'entrée, et un choix inadéquat des signaux d'entrée peut entraîner des résultats d'identification erronés ou peu fiables.
- **Traitement des données** : La manière dont les données brutes sont traitées (filtrage, normalisation, etc.) peut introduire des artefacts ou des biais qui affectent le processus d'identification.

1.7. – Biais dus à l'expérience limitée ou au manque de données.

Un biais en analyse de données est une erreur systématique qui fausse la collecte, l'analyse ou l'interprétation des données, conduisant à des conclusions inexactes ou trompeuses. Ces biais peuvent provenir de l'échantillonnage (biais de sélection), de la conception de l'étude, ou de facteurs cognitifs et humains, comme le biais de confirmation, et peuvent avoir un impact significatif sur la fiabilité des résultats et l'équité des modèles d'intelligence artificielle.

1.7.1. Types courants de biais

- **Biais de sélection** : Se produit lorsque les données collectées ne sont pas représentatives de la population cible, par exemple si un échantillon est constitué uniquement de volontaires (biais d'auto-sélection) ou si l'échantillon sous-couvre certains groupes.
- **Biais de confirmation** : C'est la tendance à rechercher, interpréter et se souvenir des informations qui confirment ses propres croyances ou hypothèses, tout en ignorant ou discréditant les informations contradictoires.
- **Biais de survivants** : Ce biais survient lorsqu'on ne prend en compte que les données des "survivants" (par exemple, les avions qui sont revenus de la guerre) et que l'on néglige ceux qui n'ont pas survécu, menant à des conclusions erronées sur les points faibles.
- **Biais liés aux données d'entraînement** : Les biais présents dans les ensembles de données d'entraînement des modèles d'IA peuvent affecter négativement leur comportement, créant des modèles qui peuvent être discriminatoires ou inéquitables envers certains groupes de personnes.

1.7.2. Impact des biais

- **Conclusions erronées** : Les biais peuvent fausser les résultats d'une étude, la rendant moins fiable et moins valable.
- **Prise de décision inexacte** : Des rapports financiers biaisés, par exemple, peuvent induire les investisseurs en erreur, conduisant à des décisions négatives.
- **Discrimination** : Dans le domaine de la technologie, les algorithmes entraînés sur des données biaisées peuvent cibler ou exclure injustement certains groupes, comme le montre le cas de la reconnaissance faciale.

1.7.3. Comment éviter les biais

- **Conception minutieuse de l'échantillonnage** : Assurer une collecte de données qui représente fidèlement la population cible est crucial.
- **Diversité des sources** : Utiliser une variété de méthodes et de sources de données pour obtenir une vue plus complète et objective.

- **Formation des annotateurs :** Pour les applications d'IA, une formation adéquate et des consignes claires pour les annotateurs peuvent aider à réduire les biais introduits lors de l'annotation des données.
- **Outils et méthodes avancés :** L'utilisation de la technologie peut aider à identifier, analyser et corriger les biais potentiels avant qu'ils n'affectent les conclusions.

1.8. – Distinction ignorance / incertitude / variabilité.

L'ignorance est l'absence de connaissance, tandis que l'incertitude est un état de doute quant à la valeur d'une grandeur, même si l'on possède des informations pour l'estimer. La variabilité se réfère à la dispersion naturelle de multiples instances d'une quantité, distincte d'une valeur unique. L'ignorance peut être réduite par l'acquisition de connaissances, tandis que l'incertitude peut être quantifiée par des probabilités ou réduite par plus d'informations, et la variabilité est traitée par des statistiques, comme l'écart-type.

1.8.1. Ignorance

- **Définition :** L'ignorance est le manque de connaissance ou la présence de données manquantes sur un système, un phénomène ou une quantité. C'est l'absence de toute information sur la vraisemblance d'un événement ou d'une valeur.
- **Comment y remédier :** Pour réduire l'ignorance, il faut acquérir des connaissances, par exemple en menant des études plus poussées, en faisant appel à des experts ou en partageant des informations.

1.8.2. Incertitude

- **Définition :** L'incertitude est l'état de doute concernant la valeur d'une seule quantité unique ou l'issue d'un événement. Elle est intrinsèque au processus d'évaluation et résulte de la non-disponibilité de facteurs influençant la précision des conclusions.
- **Sources :** Les sources d'incertitude sont nombreuses, incluant des facteurs techniques, méthodologiques, et des lacunes dans les connaissances.

- **Comment la gérer :** L'incertitude peut être quantifiée à l'aide de distributions de probabilités. Elle peut être de Type A, basée sur l'analyse statistique de données répétées, ou de Type B, estimée à partir de l'expérience ou d'autres informations disponibles.

1.8.3. Variabilité

- **Définition :** La variabilité représente la dispersion naturelle et l'étendue des valeurs observées pour un ensemble de plusieurs instances d'une quantité.
- **Exemple :** La mesure de la longueur d'un tuyau métallique peut varier à cause de la dilatation thermique.
- **Comment la traiter :** La variabilité est caractérisée par des distributions statistiques, telles que la moyenne, la variance, et l'écart-type. Elle est souvent gérée par des méthodes statistiques, permettant de décrire la dispersion des données.

1.8.4. En résumé

- L'ignorance est le "rien savoir".
- L'incertitude est le "douter" d'une valeur unique malgré les informations disponibles.
- La variabilité est la "dispersion" de multiples valeurs ou instances.