

Analyse et gestion de risque

Risk Analysis and Management

Semaine 1: Introduction et notions de base

Contenu du cours – Semaine 1

- **Présentations**
- **Motivations des élèves et discussions ouvertes**
- **La gestion intégrale des risques**
- **Programme et organisation du cours**
- **Le rôle des ingénieurs face au risque**
- **Les types de risques**
- **Courte histoire de la gestion des risques en ingénierie**
- **Notions de base sur les incertitudes et les risques :**
 - Nature aléatoire des phénomènes & sources d'incertitudes en GC
 - Distributions et rappels simples de statistique
 - Approches déterministes et probabilistes
 - Terminologies et définitions

PRÉSENTATIONS



Un grand merci à:

LAURENT VULLIET

PIERRE-ANDRÉ HALDI

Qui ont enseigné ce cours pendant plusieurs années (avec moi-même) et ont mis à disposition certains documents de cours



Raphaël DEFERT

Diplôme :

- ENSEM (Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique, Nancy), spécialisation en mécanique des fluides et thermique avancée - 1999

Cursus :

- **1999-2000** : EDF, Lyon
- **2000-2004** : Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, Verneuil-en-Halatte
- **2004-2025** : BG Ingénieurs Conseils, Lausanne
 - Expert en Sécurité des tunnels et risques industriels
 - Responsable du Pôle Risques (indépendant & transversal)
 - Référent de l'innovation
 - Membre du Comité Qualité – Gestion des risques processus
 - Membre du CA de 2015 à 2021



Raphaël DEFERT

- Depuis 2025
 - Responsable du Département « Safety & Ventilation » - **Amberg**
 - Expert conseil indépendant – Société **D-Risk**
- Enseignant à l'EPFL depuis 2015
- Enseignant aux Mines d'Alès depuis 2025
- Membre du Comité Tunnel de l'Association Mondiale de la Route (PIARC / AIPCR)
- Expert indépendant pour le Ministère des transports du Québec
- Formateur professionnel (ECA, PIARC, ExpertSuisse, etc.)



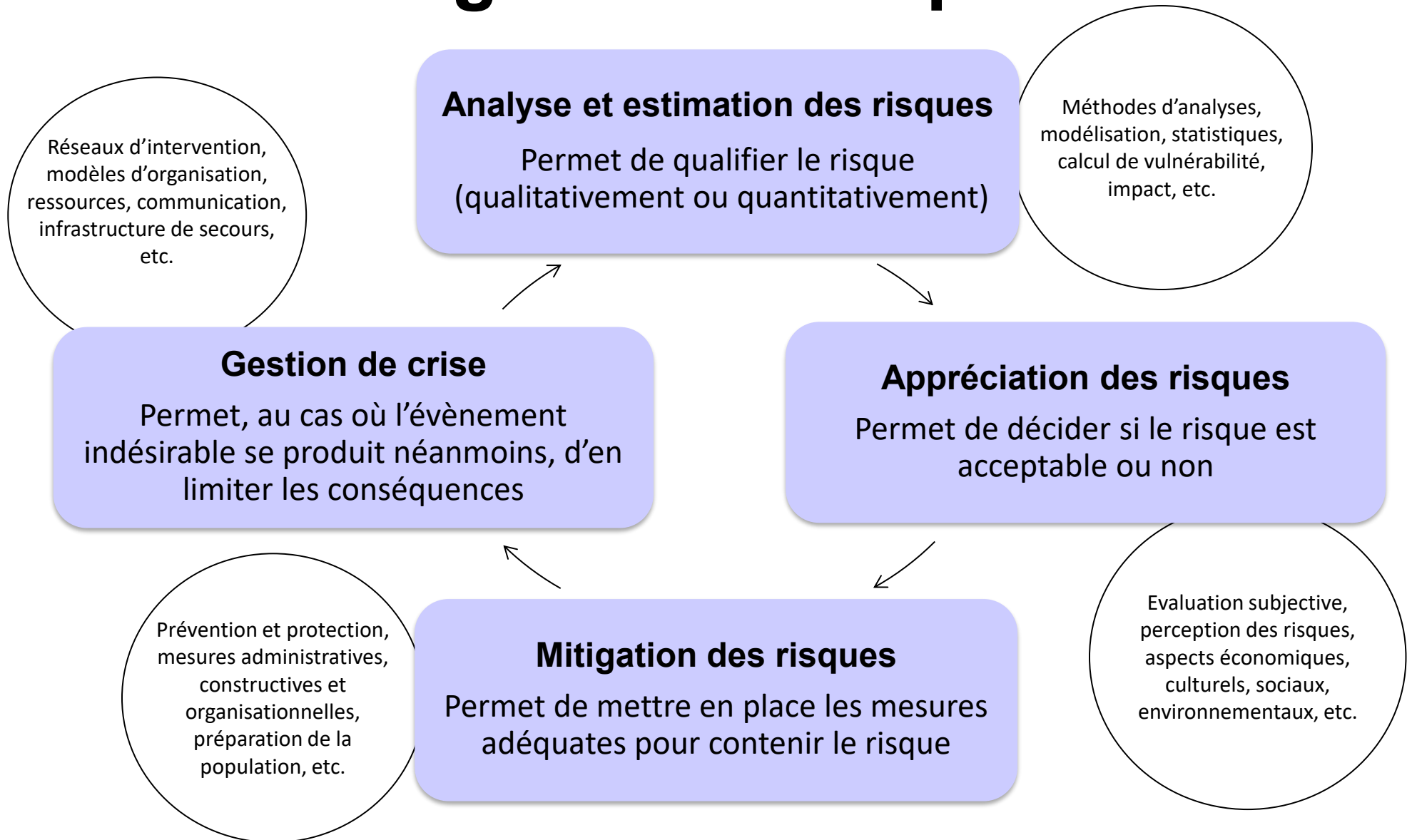
**Raphaël DEFERT**

M CH : +41 79 322 94 60

M FR : +33 6 32 28 81 78

defertraphael@gmail.com

Gestion intégrale des risques



ORGANISATION DU COURS

Contenu du cours

- 1. Introduction:** Bref historique du développement des méthodes d'analyse de risques; les leçons à tirer d'événements passés. Les incertitudes. Terminologies et définitions
- 2. Méthodes d'analyses et d'estimation des risques:** Analyses de sécurité et de fiabilité, sûreté de fonctionnement, critères pour qualifier la gravité, méthodes d'estimation de la gravité, approches déterministes et probabilistes, méthodes de Monte-Carlo, quantification des risques. Outils de représentation des risques
- 3 Evaluation des risques:** Critères d'acceptabilité, comparaison entre l'estimation des risques et ces critères, comparaison des philosophies selon les domaines et pays, l'acceptabilité du risque : perceptions vs approches rationnelles
- 4. Mitigation des risques:** Familles de mesures de prévention et de protection (constructives, techniques, organisationnelles), impact sur les composantes du risques, approches coûts-bénéfices, notions de responsabilité et parties prenantes, financement des surcouts, liens entre les réglementations / normes et limitation des risques, assurances
- 5. Intervention en cas d'événements:** Exercices, gestion de crise, reconstruction, impact sur les évolutions réglementaires, impacts sociétaux
- 6. Etudes de cas:** Introduction à la gestion intégrale des risques, avec interventions de professionnels de la gestion des risques

Intervenants externes



Jason MESSERLI

11 novembre

Gestion des
incertitudes en GC



Khalid ESSYAD

9 décembre

Risques naturels



Laurent VULLIET

16 décembre

Risques Entreprises

Programme du cours (voir Moodle)

- 7 x 4h00, avec cours, exercices et intervenants externes
- **Nécessité d'interactivité forte**
N'hésitez pas à poser des questions et à donner vos avis !



EPFL
 Faculté ENAC, Section de Génie Civil, Année académique 2023-24
Analyse et gestion des risques
 Enseignants : Raphaël Defert (RD)
 Nombre d'étudiants inscrits : n.a.
 Programme du cours
 Semestre automne 2023
 Mercredi, 8:15 – 12:00
 Enseignement en présentiel – salle GC B3-30

No	Date	Descriptif	Ens.
1	08.11	Introduction et Notions de base Objectifs, organisation générale et évaluation du cours. Notion de gestion intégrée des risques et évaluation du cours. au risque. Les types de risques. Le rôle des ingénieurs face aux risques en ingénierie. Nature aléatoire des phénomènes & sources d'incertitudes. Distributions et rappels de statistique. Approches déterministes et probabilistes. Méthodes de Monte Carlo	RD
2	15.11	Principes de l'analyse de risque Phases de l'analyse et évaluation des risques. Événements et scénarios. Barrières de sécurité. Nécessité de l'analyse de risque (systèmes complexes, systèmes simples). Rôle de l'environnement. Analyse fonctionnelle. Organisation pratique de l'analyse de risque. Quels types de risques faut-il gérer ? Établissement de grilles de cotation. Cotation en fréquence / en gravité. Biais liés aux seuils. Limites et difficultés de l'analyse de risque	RD
3	22.11	Méthodes d'analyse de risque (partie I) Les familles de méthodes (déductives / inductives, qualitatives / quantitatives). L'Analyse Préliminaire des Risques (APR). Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets et Criticité (AMDEC). HAZard and OPerability study (HAZOP)	RD
4	29.11	Méthodes d'analyse de risque (partie II) et estimation des conséquences Arbres des causes (Arbre des défaillances). Arbres des événements. Le noeud papillon Évaluations des conséquences. Types de pertes. Effets sur : Milieux physiques et infrastructures. Écosystèmes, Santé et société, Économie, Vulnérabilité.	RD
5	06.12	Quantification et représentation des risques Représentation de l'aléa. Cartes de risque et de danger Risque individuel / collectif. Fatal Accident Rate (FAR). Statistiques des catastrophes et accidents Intervention externe K.Essyad risques naturels	RD

Programme du cours – 25.11

- Déplacement de 10 jours planifié à Taiwan
- Retour le lundi 01.12 au soir
- Possibilité de mener le cours + exercices en visioconférence (le soir pour moi)

No	Date	Descriptif	Ens.
1	04.11	Introduction et Notions de base Objectifs, organisation générale et évaluation du cours. Introduction au sujet des risques, échanges avec étudiants. Notion de gestion intégrée des risques. Le rôle des ingénieurs face au risque. Les types de risques. Courte histoire de la gestion des risques en ingénierie. Nature aléatoire des phénomènes & sources d'incertitudes. Distributions et rappels de statistique. Approches déterministes et probabilistes. Méthodes de Monte Carlo	RD
2	11.11	Principes de l'analyse de risque Phases de l'analyse et évaluation des risques. Événements et scénarios. Barrières de sécurité. Nécessité de l'analyse de risque (systèmes complexes, systèmes simples). Rôle de l'environnement. Analyse fonctionnelle. Organisation pratique de l'analyse de risque. Quels types de risques faut-il gérer ? Établissement de grilles de cotation. Cotation en fréquence / en gravité. Biais liés aux seuils. Limites et difficultés de l'analyse de risque <i>Intervention de J.Messerli et E.Garin – Gestion des incertitudes dans le Génie Civil</i>	RD
3	18.11	Méthodes d'analyse de risque (partie I) Les familles de méthodes (déductives / inductives, qualitatives / quantitatives). L'Analyse Préliminaire des Risques (APR). Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets et Criticité (AMDEC). HAZard and OPerability study (HAZOP)	RD
4	25.11	Méthodes d'analyse de risque (partie II) et estimation des conséquences Arbres des causes (Arbre des défaillances). Arbres des événements. Le nœud papillon Évaluations des conséquences. Types de pertes. Effets sur : Milieux physiques et infrastructures, Écosystèmes, Santé et société, Économie, Vulnérabilité	RD
5	02.12	Quantification et représentation des risques Représentation de l'aléa. Cartes de risque et de danger Risque individuel / collectif. Fatal Accident Rate (FAR). Statistiques des catastrophes et accidents <i>Intervention K.Essyad – Gestion des risques naturels</i>	RD

Objectifs du cours

Le cours vise à fournir les **méthodes & outils** permettant d'appréhender de manière fondée et scientifique la question de l'analyse et de la **gestion des risques** sociétaux, technologiques et naturels

Il vise également à développer une **culture du risque** et un **esprit critique** pour éviter les innombrables biais de raisonnement (politiques, médias, grand public, etc.)

Objectifs pédagogiques

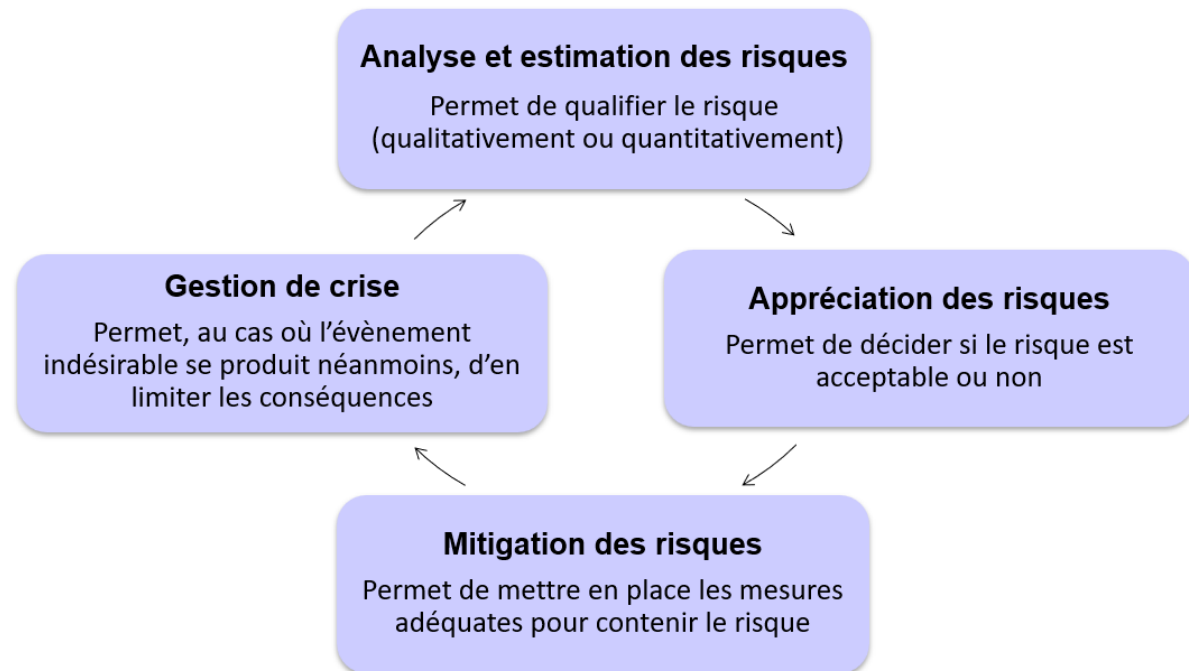
A la fin de ce cours l'étudiant doit être capable de :

- Prendre en considération et comprendre les **enjeux** liés à la gestion des risques
- Être capable de déceler les **nombreux biais de raisonnement** en matière de gestion des risques (médias, public, politiques)
- Distinguer les principales **méthodes d'analyse et être capable de choisir la plus pertinente**, connaître les méthodes d'estimation et d'évaluation des risques, et savoir les appliquer sur des cas simples
- Proposer des **mesures de mitigation** des risques, en fonction des cas de figure et sur des cas simples
- Être capable de **ré-évaluer les risques** en tenant compte des mesures

Transversalité de la Gestion des risques

La Gestion des risques dans une approche holistique* :

- Les cindyniques (sciences des risques)
- Par principe toutes les sciences de l'Ingénierie : Génie Civil, thermodynamique, hydraulique, géologie, chimie, etc.
- Politique
- Juridique
- Economie
- Sociologie
- Psychologie
- Philosophie
- Ethique...



(*) **Holistique** : qui prend en compte une chose dans sa totalité, qui analyse quelque chose sans le diviser en parties, qui traite le tout plutôt qu'une section

Présentations PowerPoint + documents

- **Cours** : seront mises à disposition sur Moodle chaque semaine avant le cours (we précèdent le cours)
- **Exercices sans les corrigés** : idem
- **Réponses aux exercices** : après le cours
- Parfois en anglais, la plupart du temps en français



Exercices

- **Les exercices sont intégrés aux cours, avec l'enseignant**
- **Ils sont identifiés par un fond spécifique**
- **Pour ceux qui sont intéressés : "extensions" possibles, travail à la maison (cours et exercices)**
- **Il n'y a pas de plage horaire spécifique pour les exercices (a minima à la fin de chaque partie théorique)**
- **Numérotation des exercices : X.Y avec**
 - X semaine de cours
 - Y numéro de l'exercice au sein du cours

Exercices d'analyse critique

- **Vous ou moi** : nous relevons des affirmations entendues dans les médias / forums en lien avec les risques (journalistes, politiques, grand public, "experts", etc.)
- Après analyse, vous m'indiquez **ce que vous pensez de ces affirmations** (analyse critique)
- Nous en discutons et nous statuons sur la **véracité des propos**
- Quelques exemples déjà identifiés...



Exercices d'analyse critique

Exemples :

- L'avion est plus risqué que la voiture
- Le nombre d'excès de vitesses augmente car il y a de plus en plus d'amendes



Exercices d'analyse critique

Exemples :

- <https://korii.slate.fr/tech/risque-accident-pietons-voiture-essence-diesel-vehicule-electrique-silencieux-danger-securite-routiere-circulation-automobile> :
 - Vous avez **trois fois plus de risques** de vous faire écraser par une voiture électrique que par une voiture à essence
 - Ayant compilé (littéralement) des milliards de kilomètres de trajet effectués par des automobiles, des chercheurs ont mis en lumière le fait que les **véhicules électriques et hybrides sont bien plus dangereux** que les voitures à essence ou diesel en présence des piétons



Exercices d'analyse critique

Exemples :

- Comment interpréter ce post ?
- Est-ce que cette interprétation est justifié ?
- Si non, quels éléments contextuels sont nécessaires / indispensables à l'analyse ?

Un adolescent de 13 ans décédé à Bourges alors que les parents avaient appelé le SAMU

ENCORE X



Exercices d'analyse critique

INVITÉE RTL - "Rien n'a changé" : la sœur de Samuel Paty redoute qu'un autre enseignant "soit tué un jour ou l'autre"

Quatre ans après le meurtre de Samuel Paty à Conflans-Sainte-Honorine, la sœur de l'enseignant redoute que ce drame puisse arriver de nouveau.

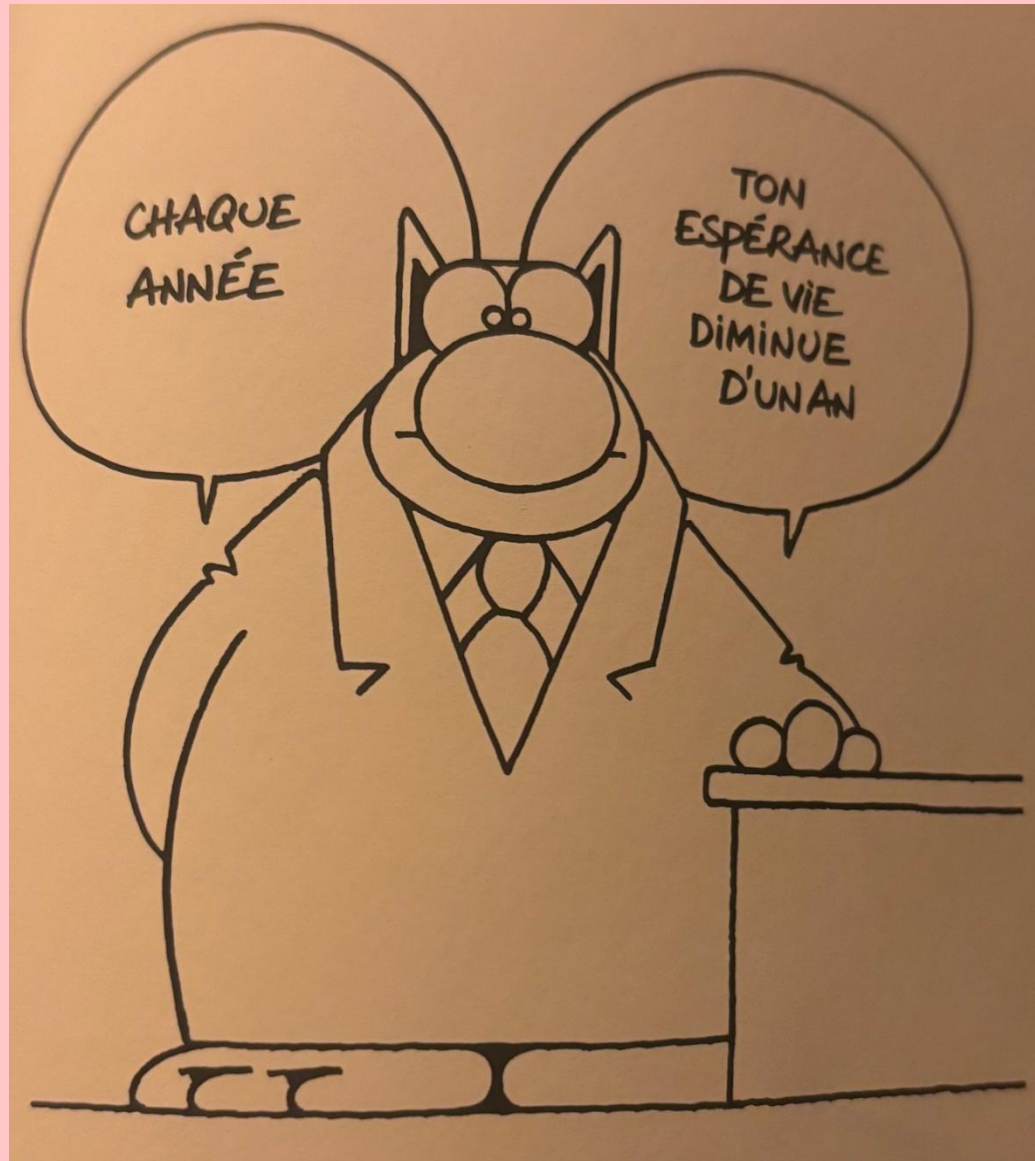
Exemples :

- Est-ce que les faits prouvent que "rien n'a changé" ?
- Est-il possible d'empêcher totalement ce type de drame ? Si oui par quels moyens ?

"Les faits relatés dans la presse montrent que rien n'a changé. Il y a [l'attentat de Dominique Bernard](#) qui a été un événement foudroyant. Tous les jours, toutes les semaines, les professeurs sont victimes d'agressions", déplore Mickaëlle Paty, invitée sur RTL. **"Le monde enseignant est convaincu qu'un autre enseignant sera tué un jour ou un autre. (...) [Je ne vois pas pourquoi cela ne pourrait pas arriver de nouveau](#)",** dit-elle.

Cette crainte d'un nouveau passage à l'acte a motivé Mickaëlle Paty à attaquer l'État en justice. "Il faut leur imposer puisqu'ils ne ne font pas d'eux-mêmes. Il faut qu'il reprenne son rôle, celui qui l'a fait naître, c'est-à-dire **défendre son peuple**", poursuit-elle, regrettant l'inaction de l'État. "Il y a une forme de déni qui n'est plus acceptable à l'heure actuelle. Il faut que les uns et les autres prennent conscience de la gravité de la situation. C'est le nombre qui va permettre de faire reculer ceux qui nous menacent", ajoute-t-elle avant de conclure : **"On ne peut plus se cacher derrière nos peurs"**.

Exercices d'analyse critique



Examen oral

- **L'étudiant tire 2 questions au hasard en entrant dans la salle d'examen (sur une centaine)**
- **Il en prépare 1 des 2 pendant 20 minutes**
- **Il est interrogé ensuite pendant 20 minutes, au tableau, sur la question choisie**
- **Note : Aucun document n'est disponible pendant l'examen**

Projets de semestre

- **Sujets en lien avec la gestion des risques : je vous inspirerai & soutiendrai !**
- **Encadrement de 2 projets en 2022 et 2023**
- **Encadrement : moi-même + Professeur EPFL "officiel"**

Discussions libres (0 piège !)

- Quelles sont vos **attentes** ? Vos **objectifs** ? Pourquoi vous avez **choisi** ce cours ?
- Que **savez-vous** de la gestion des risques ?
- Selon vous, en quoi **cela consiste-t-il** ?
- Dans la Société, qui est **responsable des risques** ?
- Pensez-vous que la Société gère les risques de manière **rationnelle** ?
- Avez-vous été **confrontés** à des événements (graves) ? Si oui à quelles **difficultés** avez-vous été confrontés ? Qu'avez-vous tiré comme **enseignements** ?
- Avez-vous déjà **alerté des services de secours** publics ?
- Certains d'entre vous sont-ils déjà impliqués en tant que **sapeurs-pompiers / protection civile** ? Autre ?

Focus sur **auditeurs libres**

En 2024 → **2 experts AEAI** inscrits au cours

En 2025 :

→ 3 personnes de **l'Etablissement Cantonal d'Assurance**

→ 2 personnes de la **Police du feu du Canton de Genève**

Exercice spécifique pour ces 5 personnes : au fur et à mesure du cours, identifiez le **rôle** de votre organisme vis-à-vis de chaque étape de la gestion des risques, en vue d'une restitution finale à la classe

- 1 pour l'ECA

- 1 pour la Police du feu

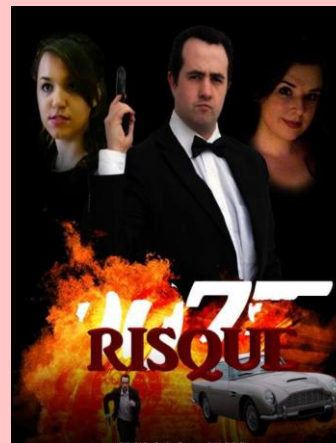
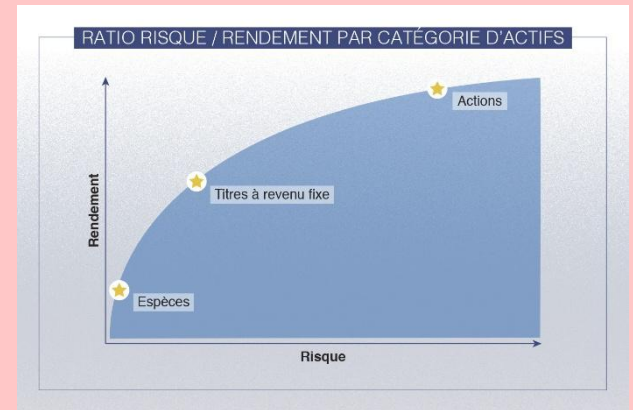
Discussions philosophiques

- Que vous inspire la notion **d'aléa / de hasard** dans votre vie ?
- Souhaiteriez-vous vivre dans un monde uniquement "guidé" par le hasard et dans lequel **vous n'avez aucune maîtrise** ?
- Souhaiteriez-vous vivre dans un monde sans aucun hasard et dans lequel **tout est déterminé à l'avance** ? Dans lequel les conséquences de vos actions sont sûres à 100% ?
- Par conséquent, quel est selon vous le **monde "idéal"** vis-à-vis des aléas ?
- Quelle sont les similitudes avec les **jeux / le sport** ?

Illustrations par le dessin

- **Pouvez-vous dessiner ce que représentent pour vous des risques ?**
- **Commentez**

Illustrations par le dessin – Sélection Google



RÔLE DES INGÉNIEURS

Role and Responsibility of the Engineer

- Creating something
- For a given function
- For a given duration
- Under a specific environment
- Following specifications

And...

- Ensuring a good **level of safety**
- Performing **without failure**



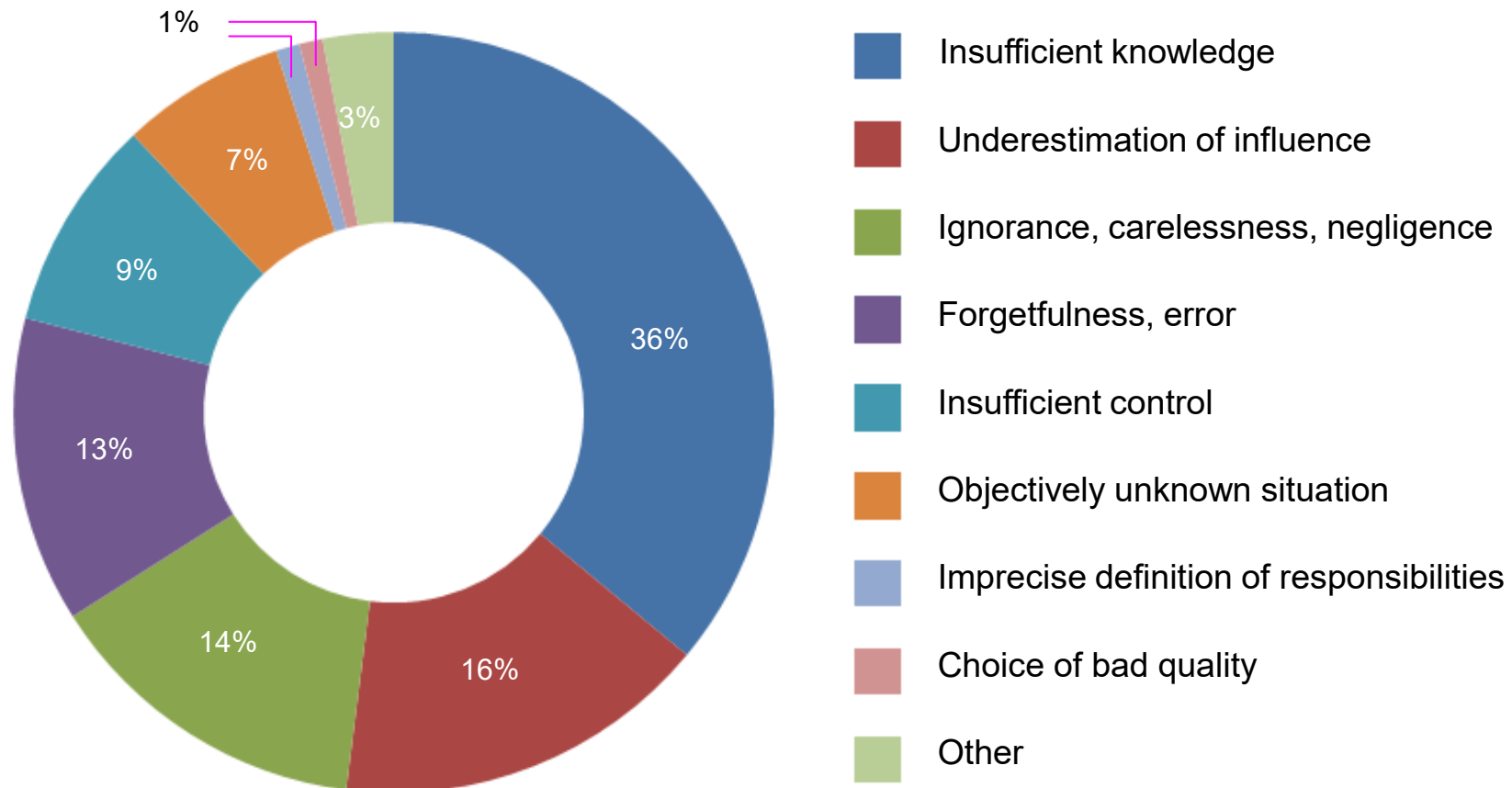
Source: <https://www.cst.ch/>

Primary causes of (civil) engineering problems

According to: M. Matousek and Schneider, J., (1976):

Untersuchungen Zur Struktur des Sicherheitsproblems bei Bauwerken

Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich, Bericht No. 59, ETH



RISK TYPES

Natural Hazards
Man made disasters
Social / Corporate Risks

Natural Hazards



Floods



Cold waves/ Frost



Storms



Hail



Earthquakes



Tsunami



Droughts / Forest
fires / Heat waves



Avalanches

Landslides

Others.....

Man made disasters



Fire / explosions / toxic releases / radioactive / corrosive / infectious



Road accident



Aviation / space disasters



Mining accidents



Shipping disasters



Bridge / tunnel / building collapse



Rail disasters



Terrorism

Social / Corporate Risks



Project management



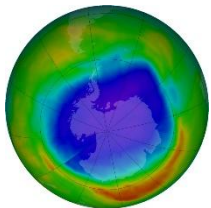
Corporate management
(incl. financial risks)



Migrations



Armed conflicts



Climate change

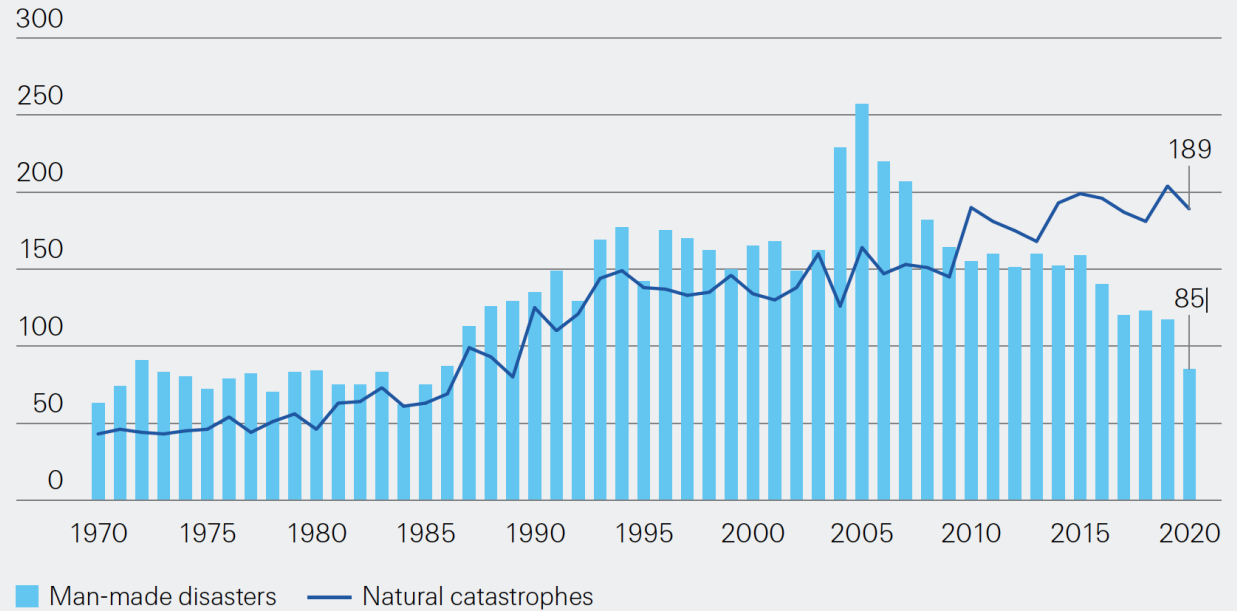


Cybersecurity

ETC...

Evolution of disasters

Figure 13
 Number of catastrophic events, 1970–2020



Source: Swiss Re Institute

sigma is available on Swiss Re Institute’s website:
<https://www.swissre.com/institute/research/sigma-research/>

HISTORY OF RISK MANAGEMENT IN (CIVIL) ENGINEERING

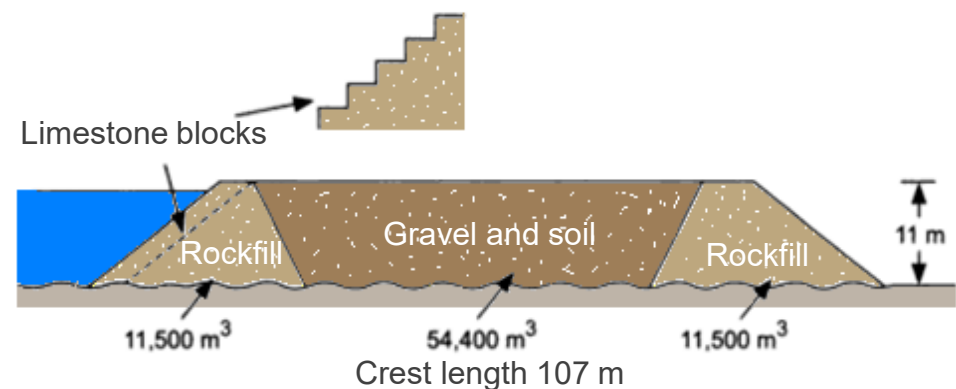
Civil Engineering: first engineering activity in History

Years of trial and errors, successes
and failures



Un précurseur malheureux : Le barrage *Saad-el-Kafara*

- Construit il y a 5000 ans en Egypte (plus ancien barrage)
- Il fut détruit par la première inondation, durant sa construction

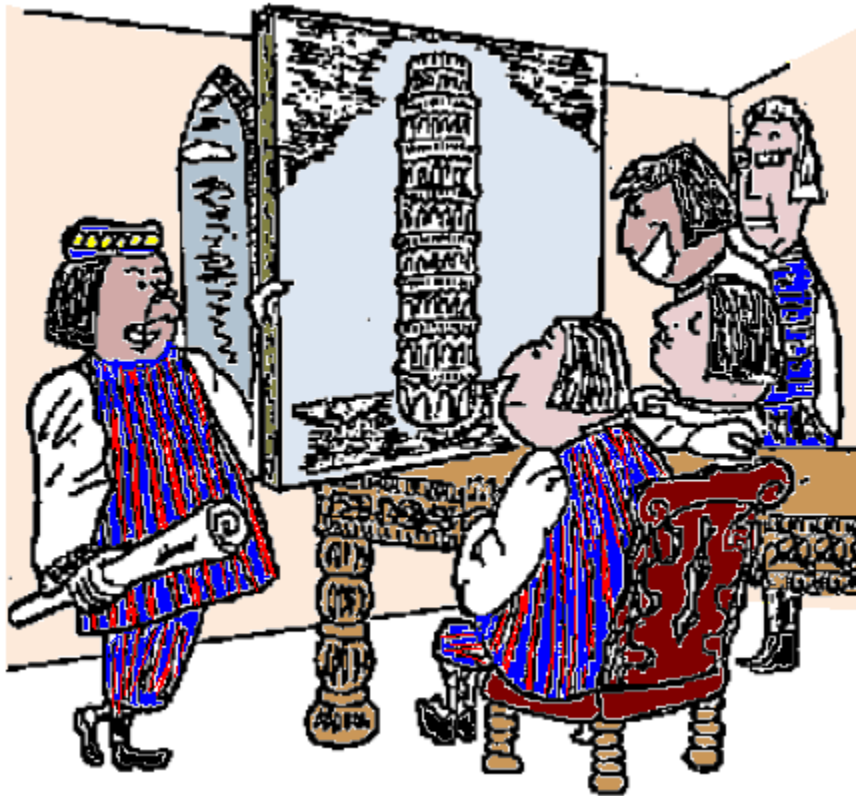


Safety trough very conservative
empirical design ... but ignoring possible
threats



The *Colossus of Rhodes* was a bronze statue of Helios (Apollo), about 33 m high; completed in 280 B.C., it was destroyed during an earthquake in 224 B.C.

Importance of careful preliminary studies: the *Tower of Pisa*



... and we can save 700 lira by not taking soil tests

- Erected in three stages over 200 years (1173-1372)
- Began to settle after construction progressed to the third floor in 1178
- Due to a foundation on weak, deformable subsoil (i.e. design was flawed from the beginning)

Vasa (Stockholm) : construit au XVIIème siècle, un des navires de guerre les plus puissants

- Début de la construction en 1625, 400 ouvriers
- Orné de nombreuses sculptures (empereurs romains, armoiries royales, etc.)
- Lourd armement : à la demande du roi, 64 canons en bronze
- A peine a-t-il été mis à l'eau le 10 août 1628 qu'il a coulé à la sortie du port de Stockholm
- ...Sous les yeux des témoins venus assister à son voyage inaugural



A fragile giant: The "unsinkable" *Titanic*

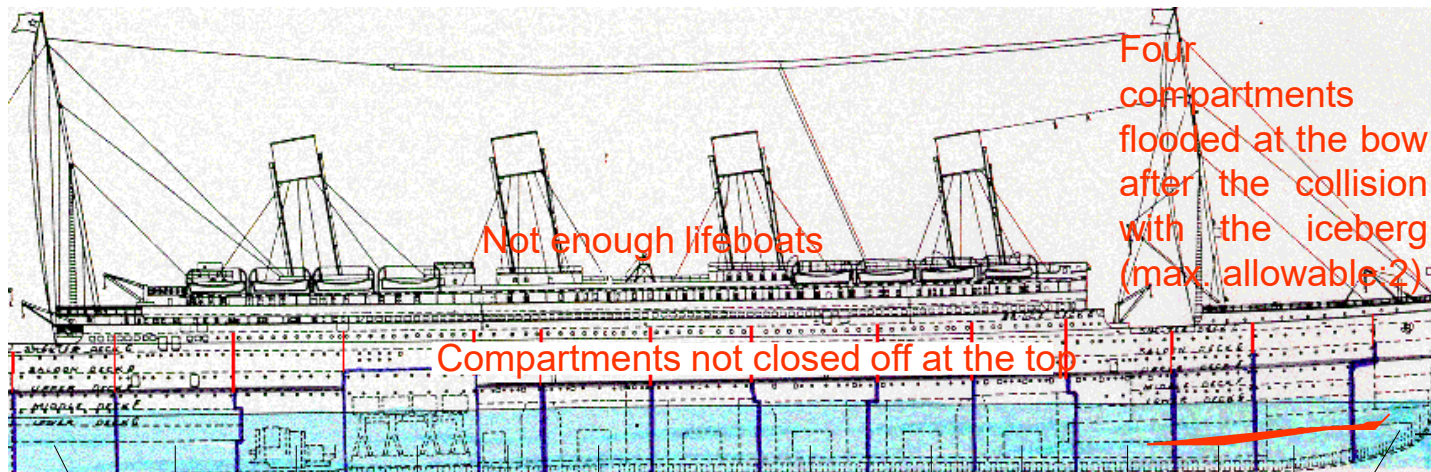
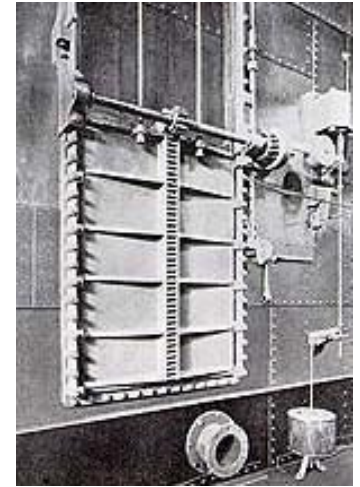
<http://www.youtube.com/watch?v=xD9-z6Nw2FM>



Night of April 14-15,
1912 (*Titanic's* maiden
voyage)

The *Titanic* disaster

- Too much confidence given to an empirical approach of risk management
- Essentially based on lessons supposedly learned (but not necessarily correctly analyzed and extrapolated) from previous experiences



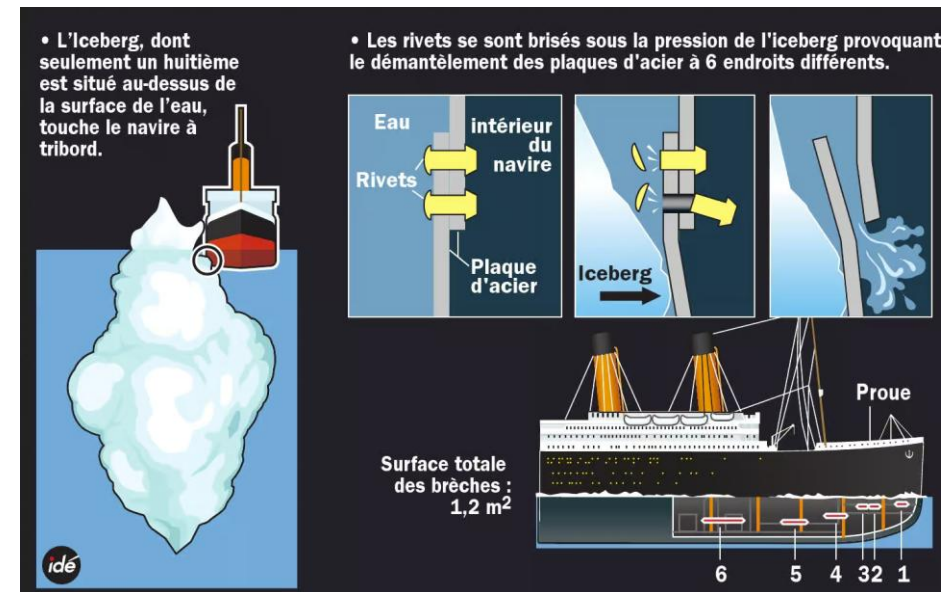
Safety must be attested, not just pro-claimed

Divided compartments that can be closed by watertight doors (see picture above)

Too brittle steel in cold waters

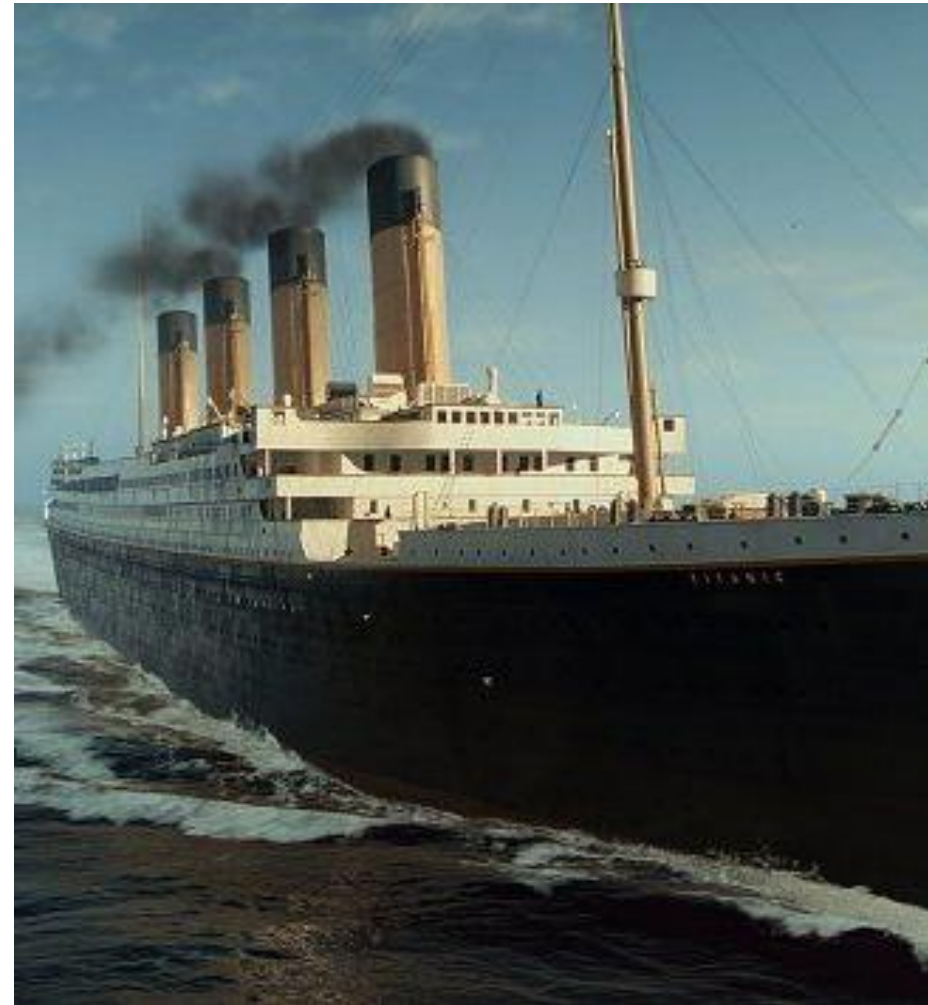
Quelques explications techniques / organisationnelles :

- Nombre de **canots de sauvetages** sous-dimensionné (même si quasi-conforme pour l'époque....)
- Mauvaise organisation de **l'évacuation**
- Erreurs de **navigation** (pour éviter l'iceberg)
- **Qualité de l'acier** (même si bonne pour l'époque), notamment à basses températures
- **Qualité des rivets** (due à la pression du chantier)
- Concept de **compartimentage**...



Quelques explications “humaines”

- Esprit de **compétition**
- Capitaine sous la **pression** de l’exploitant :
→ réaliser la traversée plus rapide
- Pression sur les **profits**
→ mesures de sécurité négligées
- Croyance dans la **toute-puissance de la techno-science**
(exemple : acier jugé indestructible)
- Incapacité à prendre en compte des **avertissements / remise en cause**
(6 signalements d’icebergs ignorés)
→ Dénier



Another fateful design of a giant passenger ship: the *Hindenburg* dirigible airship

The 6th-of-May-1937 disaster

<https://youtu.be/nSsFS4f-p8Q>



Of the 36 passengers and 61 crew, 13 passengers and 22 crew died; also killed was one member of the ground crew

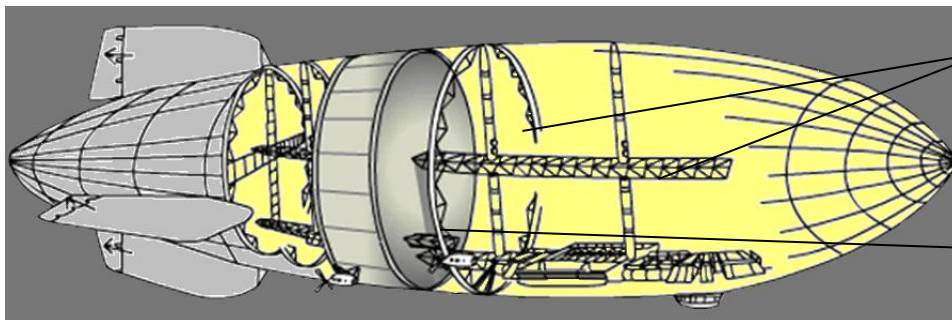
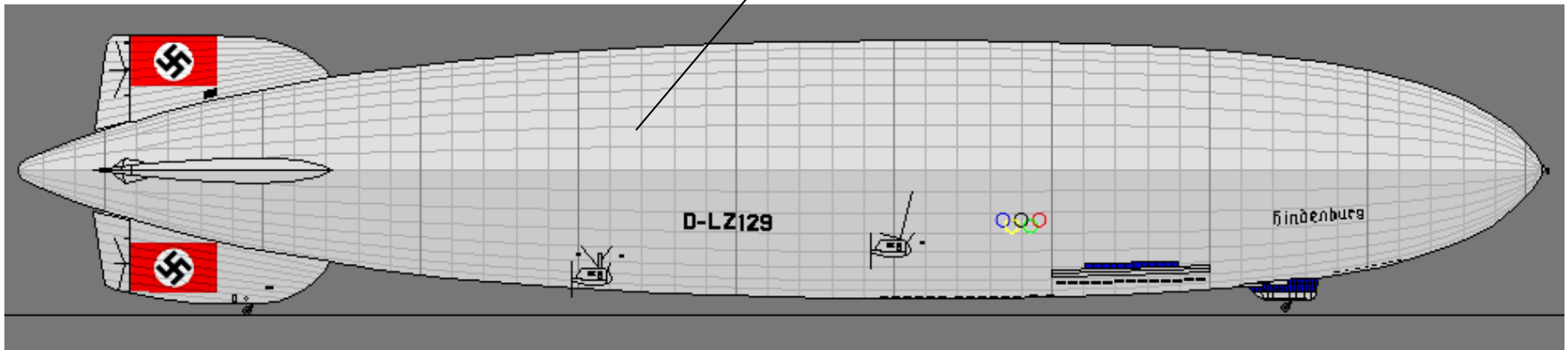
***Hindenburg* dirigeable airship**





Safety concerns

Outer layer in cotton fabrics swabbed with cellulose acetate to be waterproof, then covered with **aluminum powder** (chemical used in solid rocket boosters!)

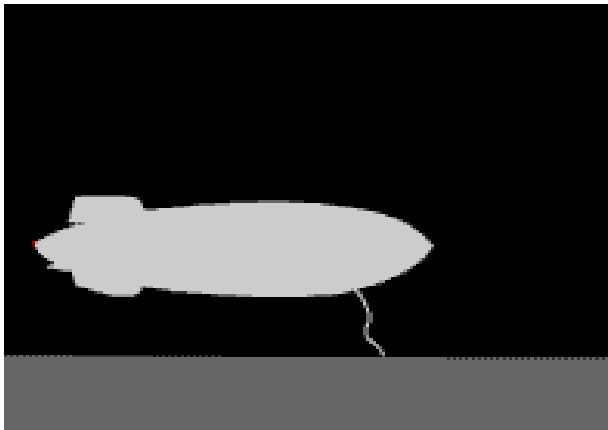


Rigid metallic skeleton

Individual cells filled with a lighter-than-air but **flammable gas** (hydrogen)



An engineering disaster of important and enduring consequences :



The largely-publicized crash of the *Hindenburg*, broadcasted live on the radio, signaled the demise of lighter-than-air commercial airship travel; the remaining German Zeppelins were broken apart by order of Adolf Hitler

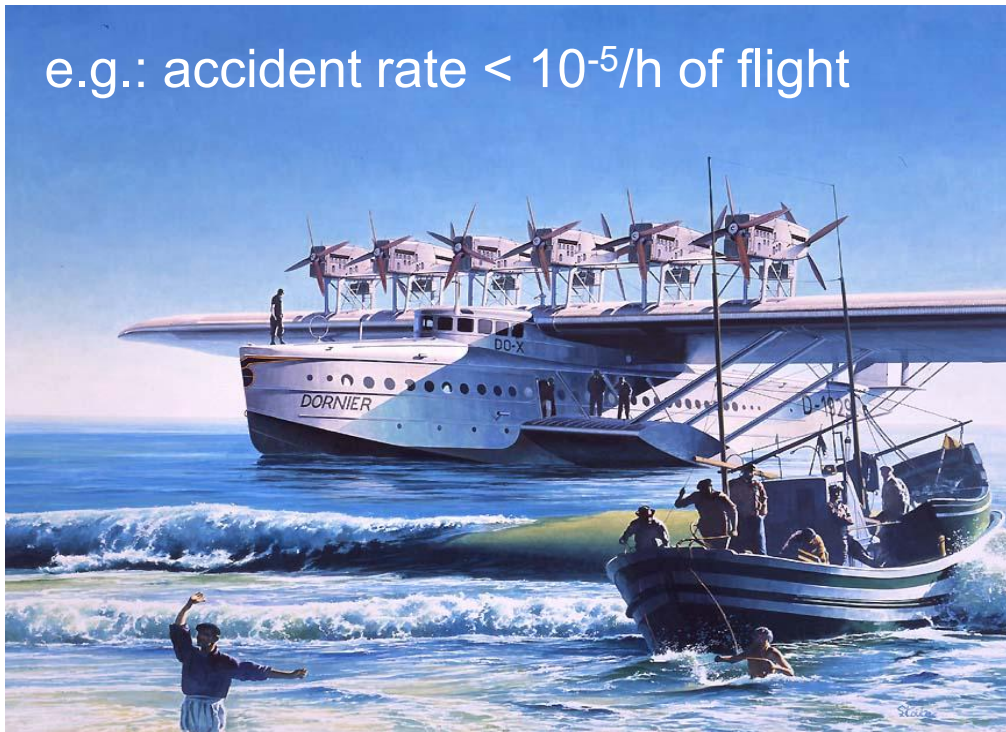
The resulting bad reputation of hydrogen still affects today the development of cars using hydrogen as what is presented as a non-polluting alternative to fossil fuels



Emergence of the concept of (probabilistic) reliability in the 1930's

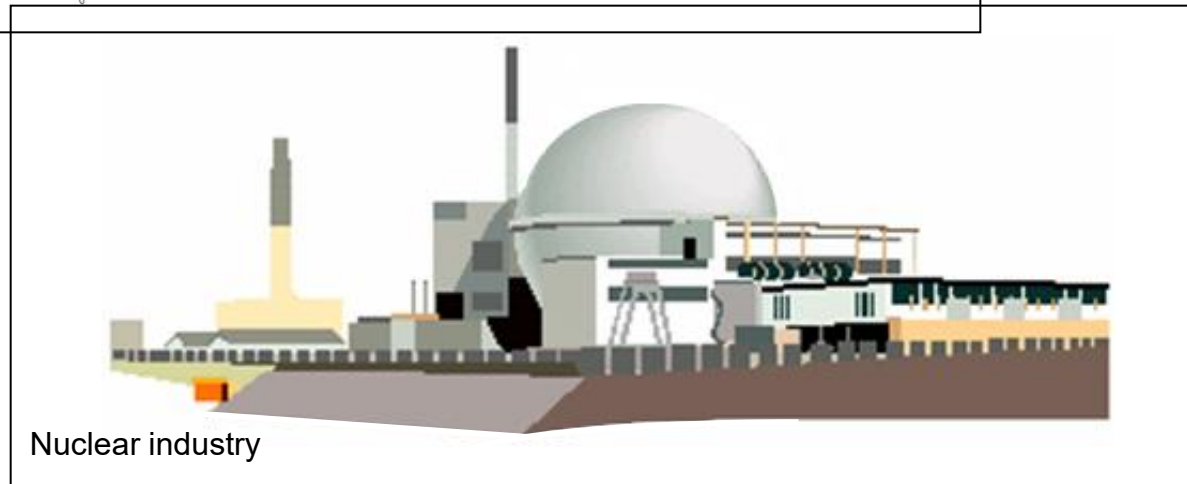
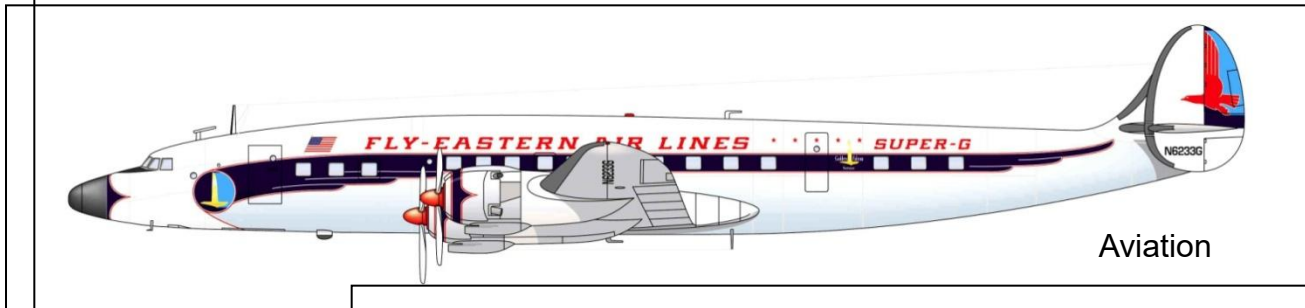
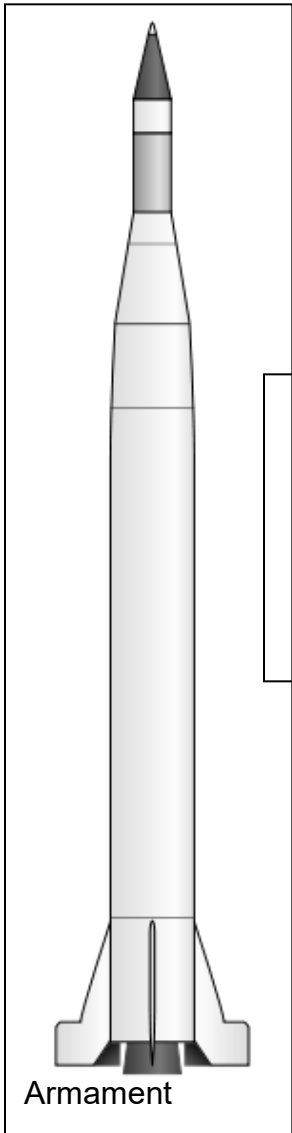
Setting of quantitative safety / reliability objectives based on statistical records (failure rates) of related past events

e.g.: accident rate $< 10^{-5}/\text{h}$ of flight




Heavier-than-air commercial planes rapidly supplanted their lighter-than-air competitors in the 1930's because they appeared to offer a much faster and safer alternative (impact of the *Hindenburg* and other similar disasters on the public)

During the 1940's and 1950's, **probabilistic safety analyses** (PSA) become standard practice in the new industries with high consequences potential



From the 1960's: new technological developments → new risks
 → new safety/reliability assessment and management tools



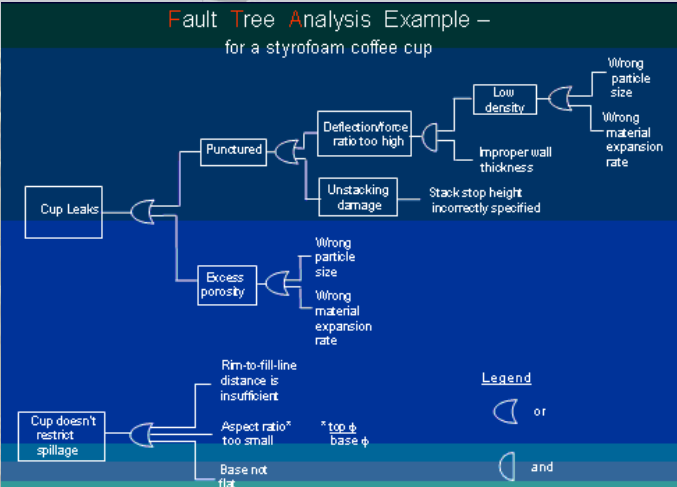
Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

FMEA Process Flow

```

            graph TD
            A[1. Process Purpose] --> B[2. Failure Mode]
            B --> C[3. Effect of Failure Mode]
            C --> D[4. Severity]
            E[5. Cause of Failure Mode] --> B
            E --> F[6. Occurrence]
            
```

Fault Tree Analysis Example –
for a styrofoam coffee cup



Fault Tree and Event Tree Analyses (FTA, ETA)

Sécurité / fiabilité aujourd'hui : l'utilisation généralisée d'outils puissants et sophistiqués permet-elle d'empêcher à 100% de nouveaux accidents / catastrophes ?



Malheureusement non....

Pourquoi des accidents surviennent encore ?

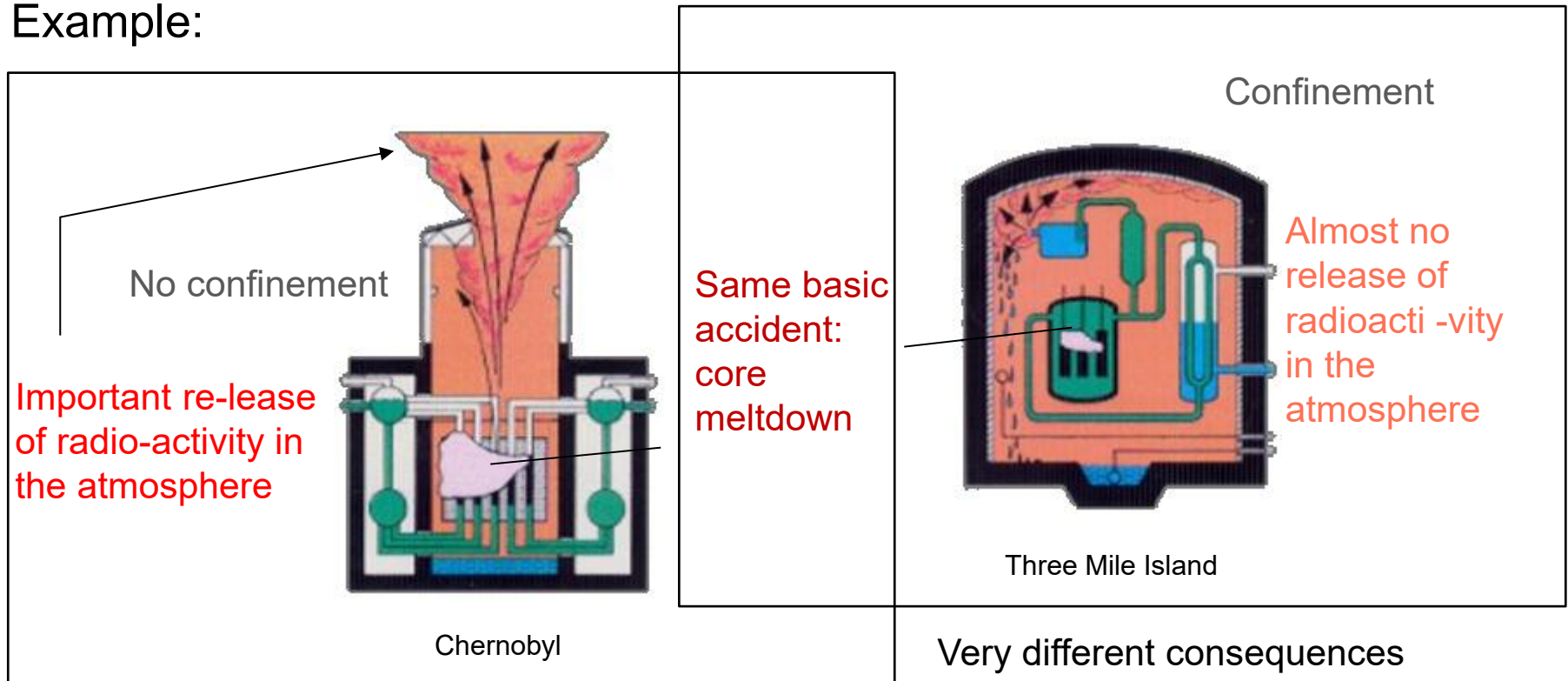
Plusieurs raisons, notamment :

- Le facteur humain (à l'origine de nombreux accidents, directement ou indirectement)
- Manque de culture de la sécurité
- Non respect des règles de maintenance et / ou d'exploitation
- Erreurs de conception / défauts
- Importance des enjeux économiques
- Combinaisons non prévues de causes et événements initiateurs



Mais : des **études de sécurité** bien menées et une **conception** appropriée peuvent néanmoins contribuer à atténuer les conséquences d'événements indésirables.

Example:



Caractéristiques des risques en Génie Civil

Les structures de génie civil sont **le plus souvent uniques** (les informations sur la sécurité / fiabilité provenant d'autres constructions ne sont pas directement applicables)



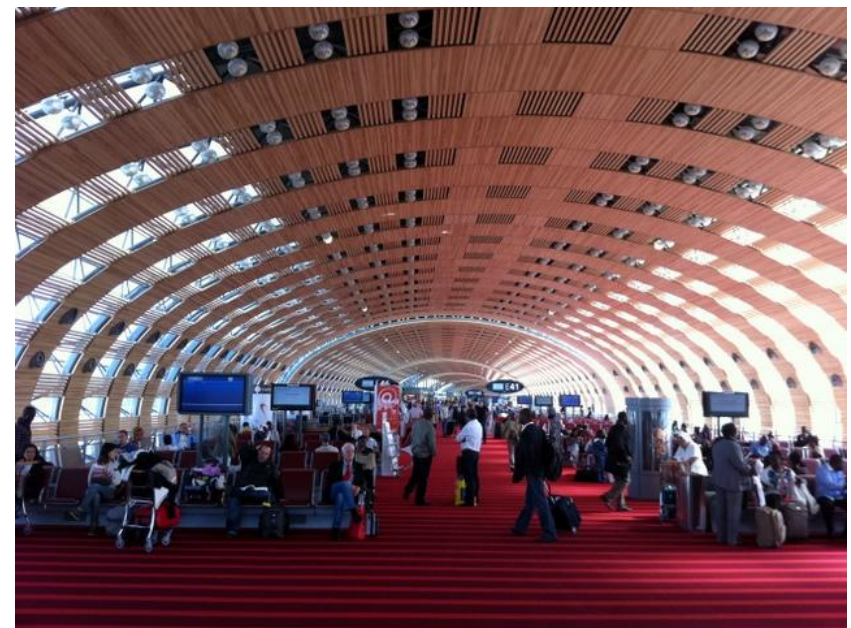
Les structures de génie civil **coûtent très cher** et tout problème, défaut ou accident entraîne des coûts importants

Roissy airport (F) - 2E terminal

Originally opened in 2003, Terminal 2E featured an open and cutting-edge design by Paul Andreu. On May 23, 2004, a portion of the terminal's ceiling collapsed, killing four people. During the reconstruction of Terminal 2E, a more traditional steel and glass structure replaced the original concrete tube style. Estimated loss above 200 M€ (unpublished).



May 23, 2004



Reopened in March 2008

La défaillance des structures de génie civil **peut être très dangereuse** pour l'environnement humain, naturel et les infrastructures

<http://www.youtube.com/watch?v=kIeNM8cm6J8>

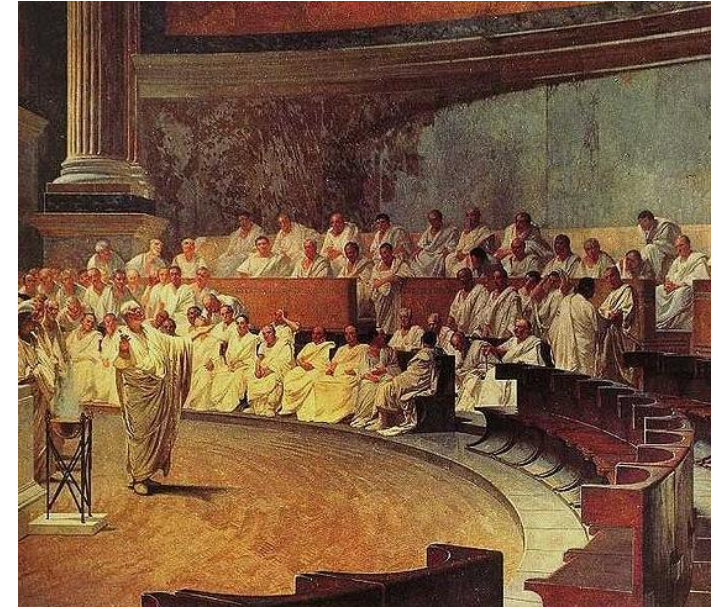


Saint Francis Dam, California (USA),
before and after failure on March 13, 1928; resulting flood
killed more than 600 people

Les ouvrages de génie civil sont généralement construits pour une **durée de vie relativement longue** par des sociétés et un environnement qui changent avec le temps ; cela peut entraîner des situations à risques car de nouveaux dangers ont pu apparaître (non intégré au dimensionnement d'origine)



Bridge of the Gard (F)...



...built under the Roman Empire

Il est complexe de prévenir les risques induits **par l'homme** pour les structures de génie civil résultant de la guerre ou du terrorisme par exemple



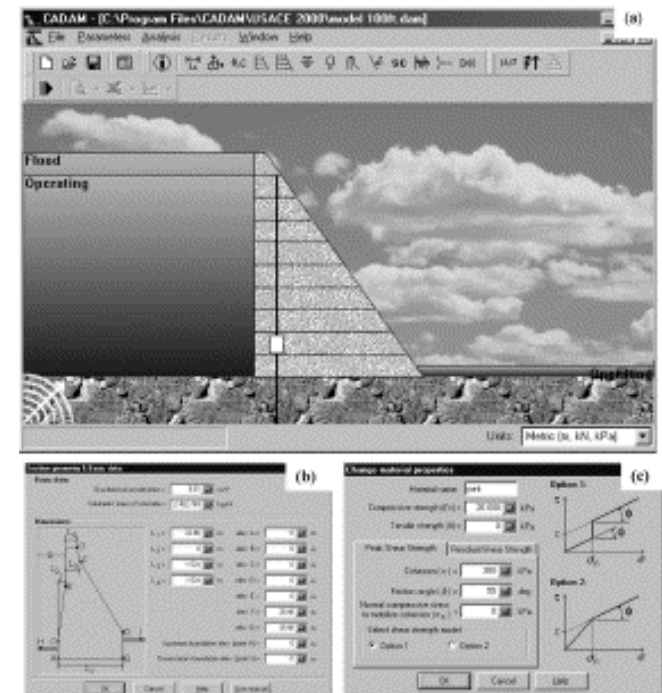
World Trade Center (USA)
"Twin Towers" collapse after a
terrorist attack,
September 11, 2001



<http://www.youtube.com/watch?v=ho6DCYggFKo>

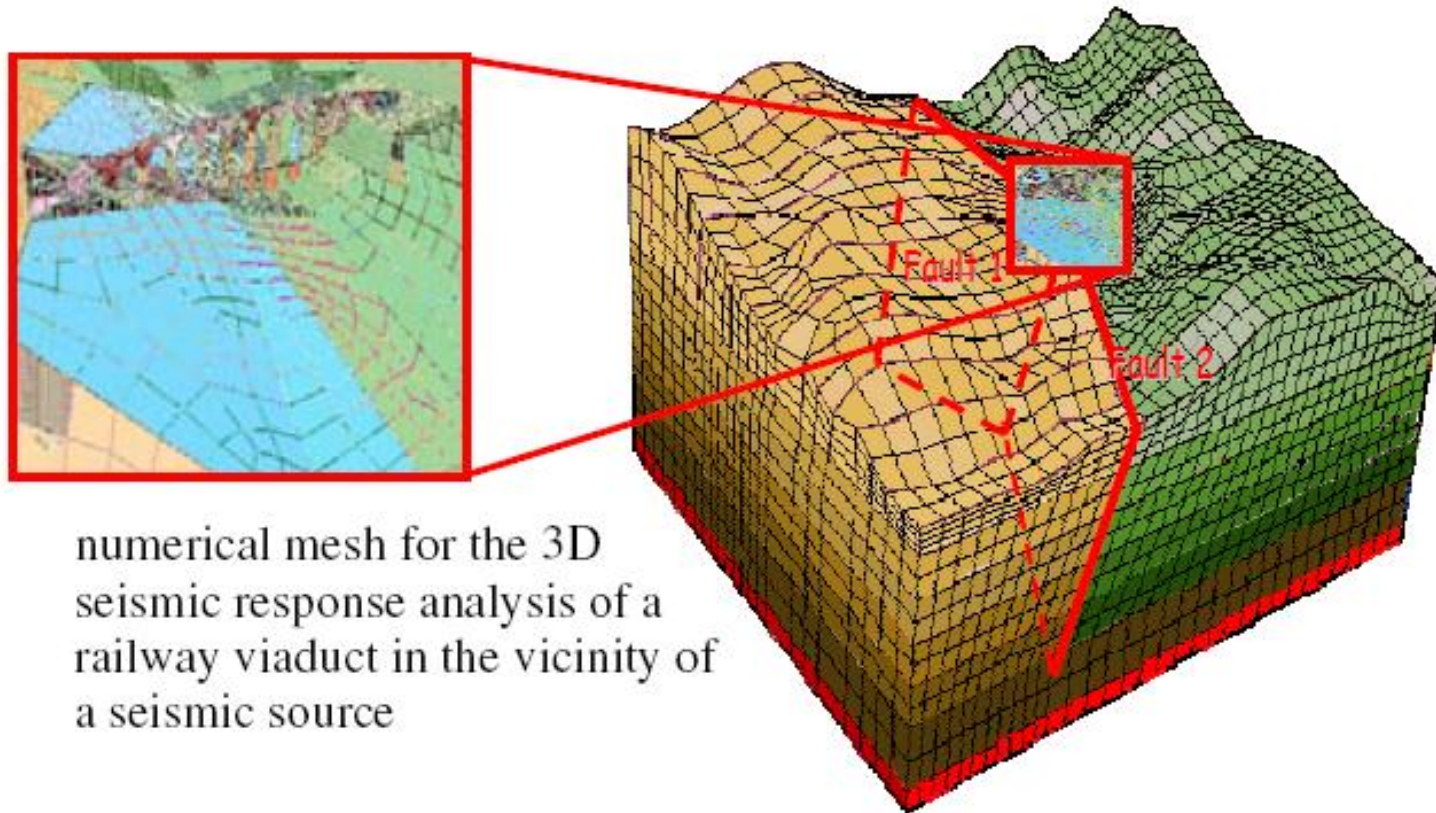
<http://www.youtube.com/watch?v=EFiEgwLQVJk&feature=related>

Il est difficile d'identifier l'exacte nature et propriétés du **sol, des fondations et des matériaux de construction**

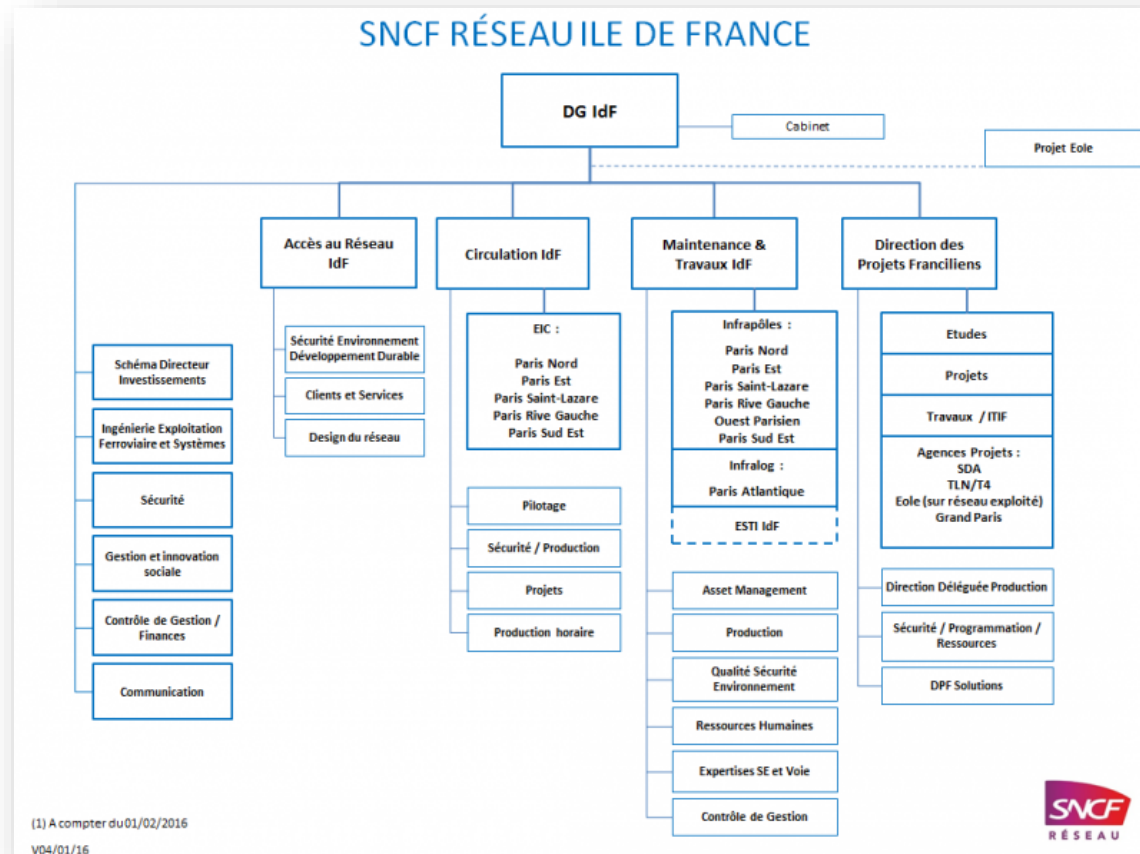


"Everything should be made as simple as possible, but not simpler". A. Einstein

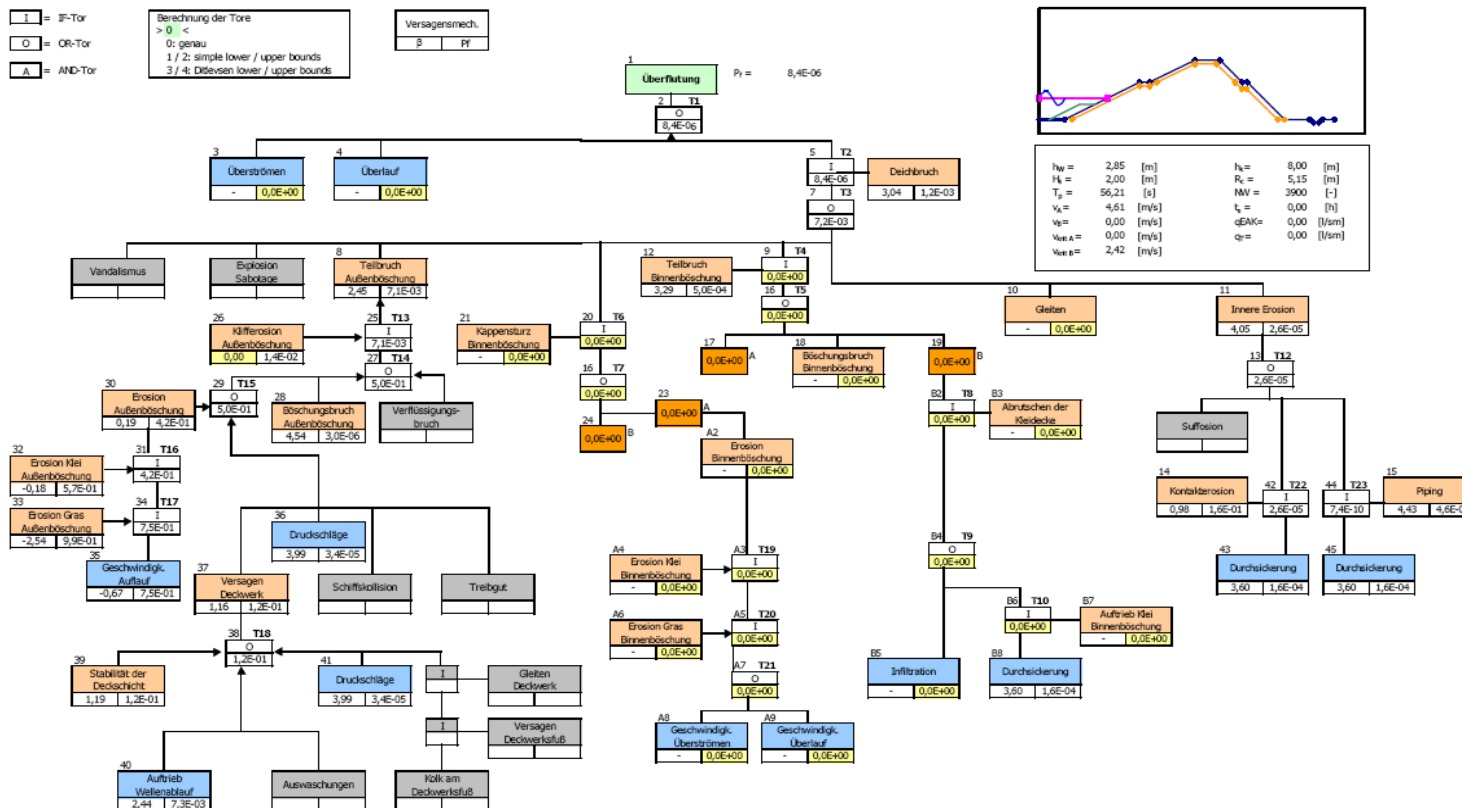
Les modèles utilisés pour évaluer la résistance mécanique des structures de génie civil ne peuvent représenter que des **approximations relativement grossières** d'une réalité très complexe



Les risques liés au génie civil sont en fin de compte liés à des **processus complexes** (projet, exécution, exploitation) et à des **organisations complexes** (gestion d'entreprise, multiples parties prenantes).



Malgré leurs particularités, les caractéristiques de sécurité / fiabilité des structures de génie civil peuvent être (et sont) étudiées par les **mêmes méthodes et outils analytiques** développés pour d'autres domaines technologiques ...



Nouvelles tendances du "Risk Management"

- **Les décideurs politiques / entrepreneurs doivent réglementer les risques :**
 - Politiques gouvernementales
 - Gestion des risques Entreprises
- **Nouvelles professions, exemple "Chief Risk Officer (CRO)"**
- **Réchauffement climatique :**
 - Evolution des risques climatiques
 - Evolutions technologiques génèrent de nouveaux risques, ex. captage et transport de CO₂
- **Nouvelles énergies & modes de propulsion: exemple H₂, batteries, etc.**
- **Approche intégrale des risques naturels et technologiques (voir slide suivante)**

Approche transversale pour les territoires

Modèle de Maturité pour accompagner l'administration communale en vue de mettre en place son organisation pour la gestion des risques

→ L'organisation de gestion des risques est-elle :

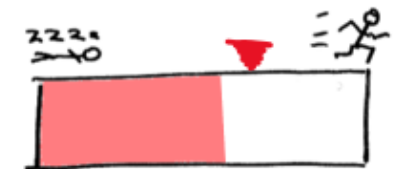
■ **Efficiente ?**



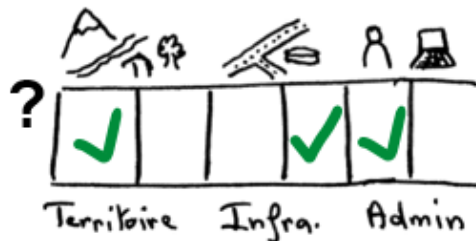
■ **Apte à prioriser ?**



■ **Évolutive ?**



■ **Exhaustive ?**



Conclusion intermédiaire

- Le cours promeut une approche **intégrale** de la gestion des risques
- Au cours des dernières décennies, les enjeux et les besoins de la société à l'égard du risque ont connu une **évolution rapide** :
 - Complexité / diversification de la **nature** et **ampleur** de ces risques (financière, technologique, naturelle, politique, sociale, etc.)
 - **Responsabilité croissante** / **pression médiatique et sociétale** sur ces enjeux
 - **Acceptabilité des risques** toujours moindre...
- Un changement de paradigme est attendu pour imposer la **gestion des risques dans toutes les activités humaines**, de la politique à la gouvernance d'entreprise, des sciences exactes aux sciences humaines

Exercice 1.1

- 1. Décrivez une situation de risque vécue**
- 2. Estimez le niveau de risque (fréquence et gravité)**
- 3. Ce risque est-il acceptable ? Pourquoi ?**
- 4. Comment contenir / maîtriser / réduire ce type de risque ?**
- 5. Que faire si événement se produit ?**
- 6. Quelles leçons en avez-vous tiré ?**
- 7. Est-ce que cette situation a permis de changer vos pratiques ?
Impact psychologique ?**

Notions de base

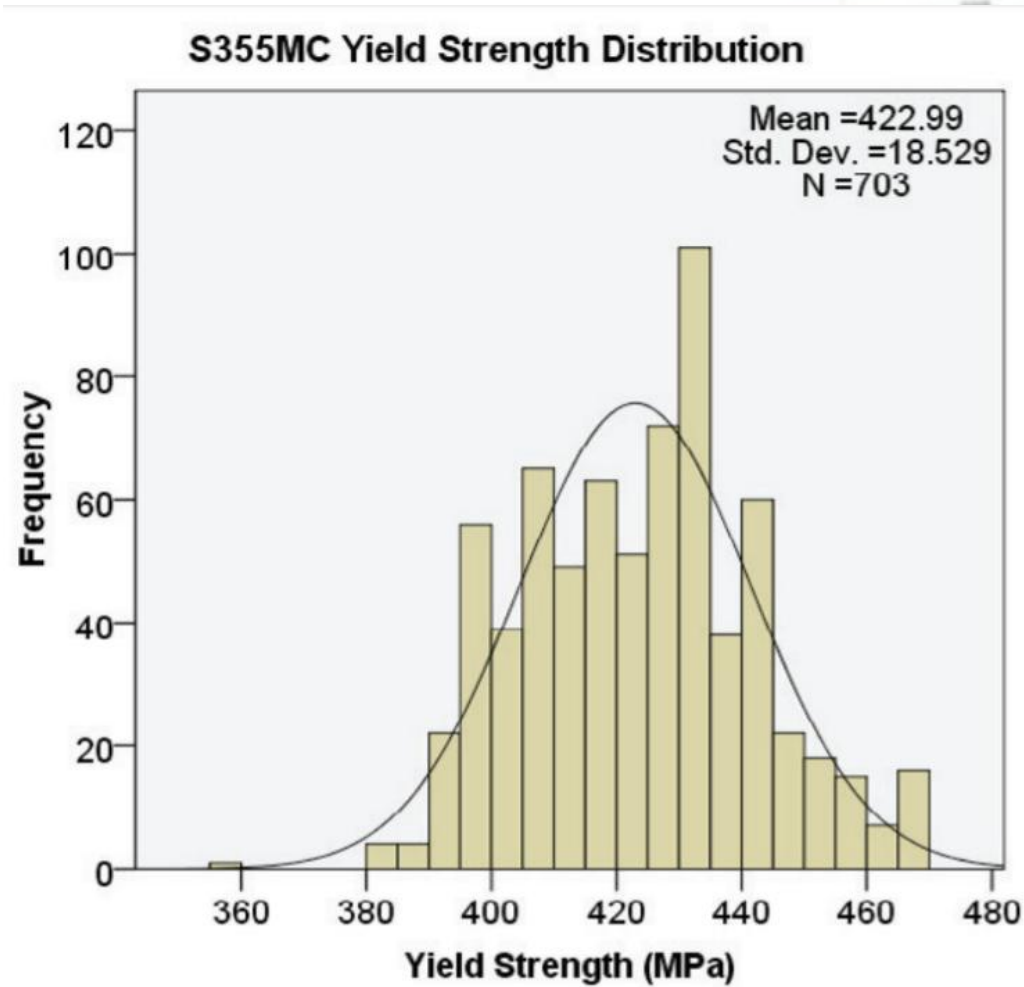
- **Nature aléatoire des phénomènes & sources d'incertitudes en génie civil**
- **Approches déterministes et probabilistes**
- **Terminologies et définitions**

NATURE ALÉATOIRE DES PHÉNOMÈNES & SOURCES D'INCERTITUDES EN GÉNIE CIVIL

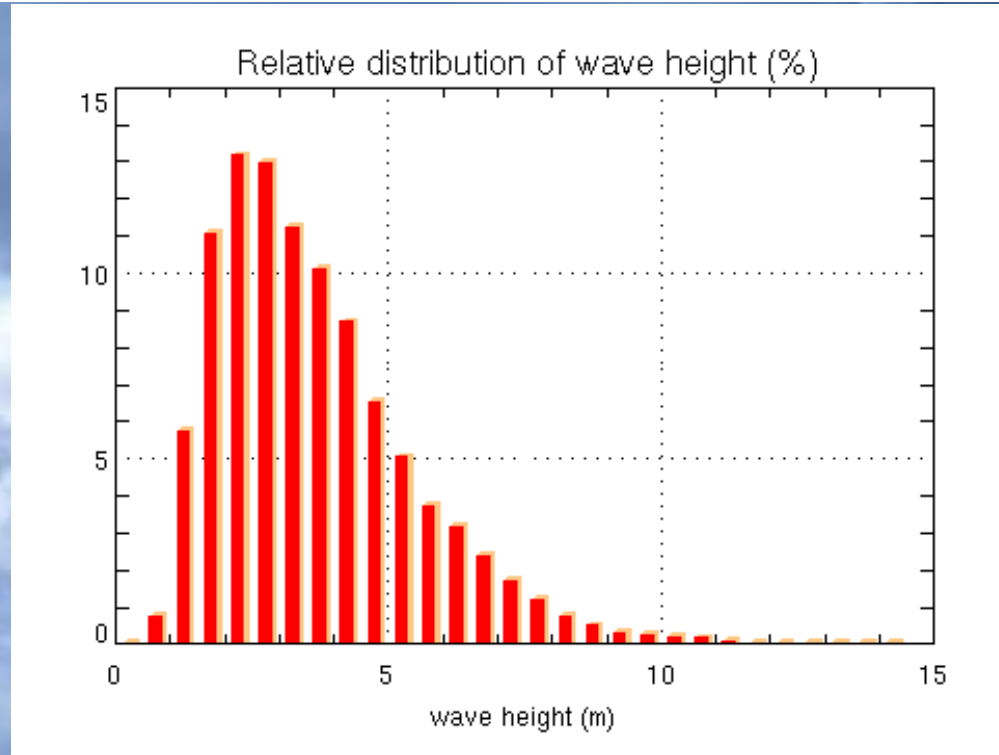
Source:

Vulliet L. (1997). Fiabilité et sécurité des systèmes civils, Partie I. Notes de cours. EPFL

Example: Steel yield strength



Example: Offshore wave heights



Example: Wind speed frequency

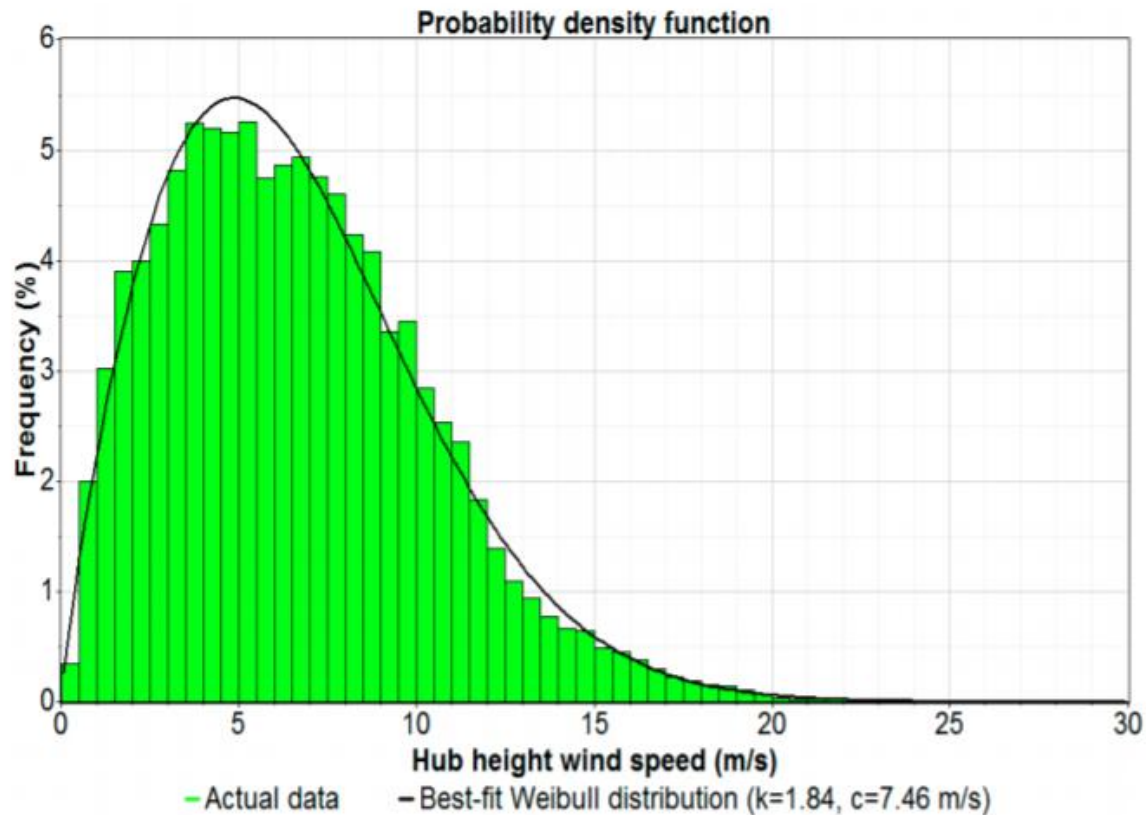
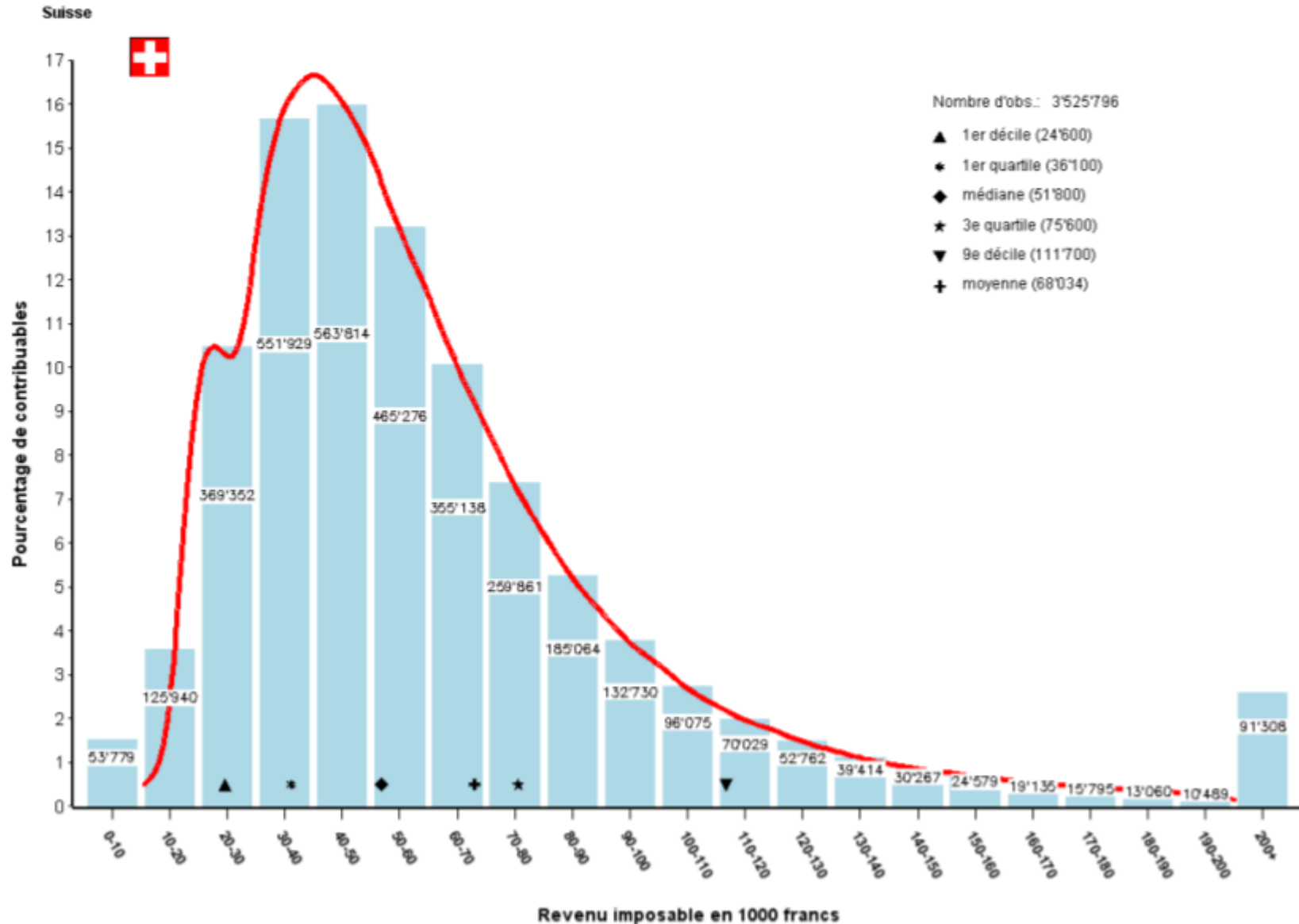


Figure 5. Hub-height wind speed frequency for 12 months.



Example: Swiss incomes 2006



Exercice 1.2

Sources d'incertitudes en génie civil

1. Prendre individuellement 15 minutes pour lister les sources d'incertitudes dans la pratique de l'ingénieur civil
2. Restituer en commun en constituant des regroupements
3. Discuter des conséquences

Solution 1.2 - Sources d'incertitudes (1/3)

(Attention, non exhaustif)

Caractéristique du site prévu pour la construction

- Topographie
- Géologie
- Hydrologie
- Géotechnique
- Environnement

Définition de la fonction de l'ouvrage / du système

- Performance
- Tolérance
- Coût / Revenus

Sollicitation de l'ouvrage / du système

- Durée de vie
- Condition d'utilisation, d'affectation
- Charges (dans l'espace et le temps)
- Maintenance de l'ouvrage

Solution 1.2 - Sources d'incertitudes (2/3)

Nature de l'ouvrage

- Géométrie
- Matériaux
- Mise en place

Qualité des essais (exécution et interprétation)

- Campagnes de reconnaissance
- Essai in situ et en laboratoire
- Modèles d'interprétation

Modèles de calcul, dimensionnement

- Limites théoriques des modèles
- Approximations
- Erreurs de calcul
- Expérience (information subjective)
- Qualité des plans

Solution 1.2 - Sources d'incertitudes (3/3)

Qualité de l'exécution de l'ouvrage

- Méthode d'exécution
- Qualité des entreprises
- Conditions météorologiques

Relations entre acteurs de la construction

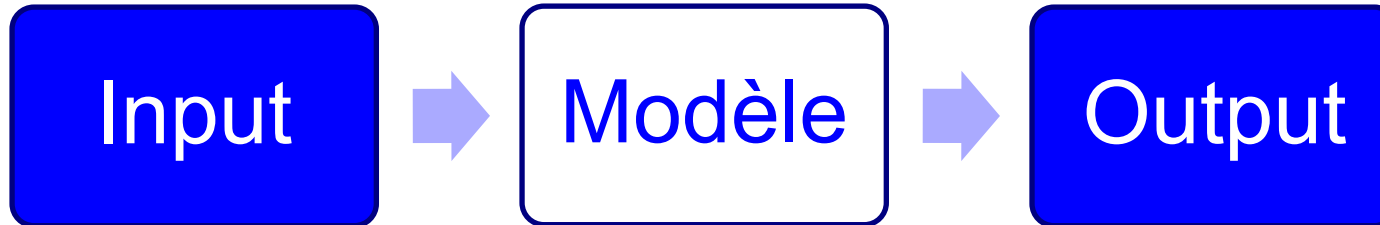
- Management de projet
- Bases contractuelles, définition des responsabilités
- Facteurs politiques et légaux
- Facteurs sociaux
- Facteurs économiques
- Influence des médias

APPROCHES DETERMINISTES – PROBABILISTES

Source:

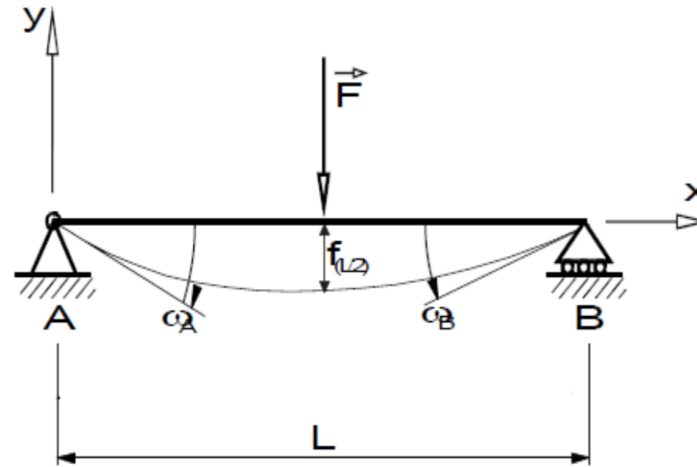
Vulliet L. (1997). Fiabilité et sécurité des systèmes civils, Partie I. Notes de cours. EPFL

Input - Output



- **En ingénierie, le processus de création utilise des données d'entrée (input) pour aboutir à un résultat (output)**
- **Le lien entre les deux est un modèle pouvant prendre des formes diverses:**
 - Analytique
 - Numérique
 - Conceptuel
 - Etc.
- **Les incertitudes en entrée vont se propager sur les résultats ("garbage in, garbage out") !**

Exemple 1: Flexion d'une poutre élastique sur deux appuis



Input

- Force F
- Longueur L
- Module d'élasticité E
- Moment d'inertie I

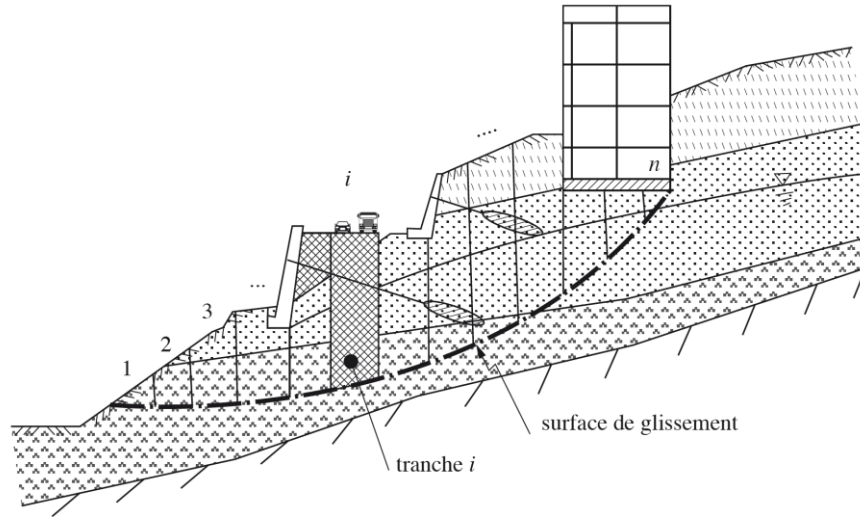
Modèle

$$f_{(L/2)} = \frac{FL^3}{48EI}$$

Output

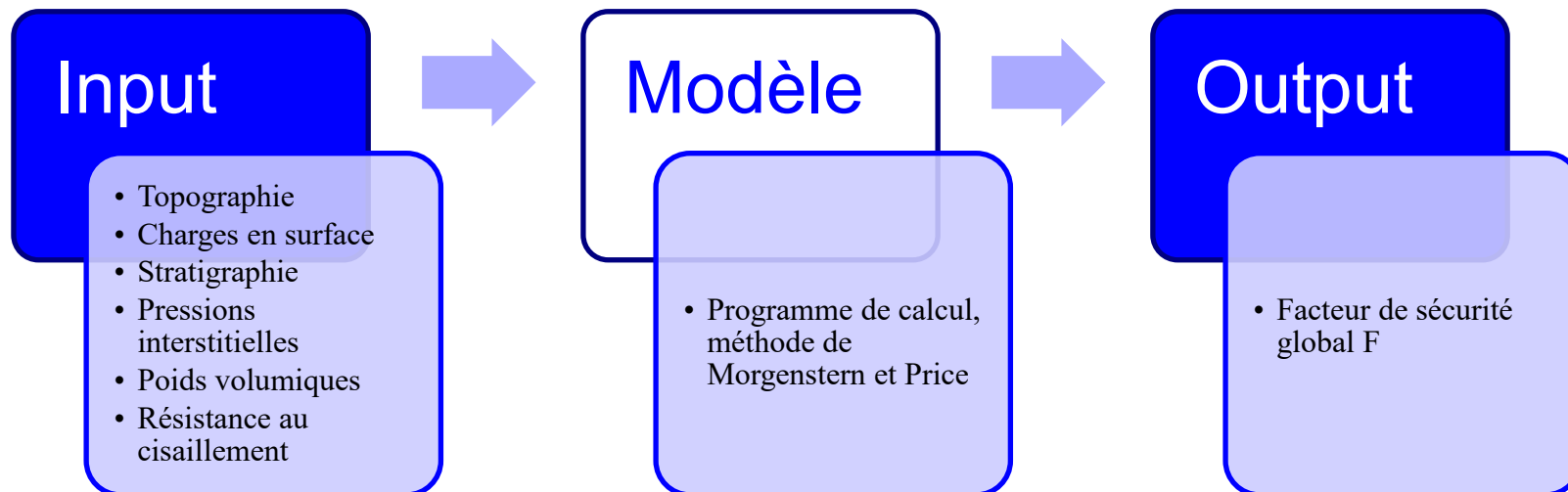
- Flèche $f(L/2)$

Exemple 2: Stabilité d'une pente, méthode des tranches



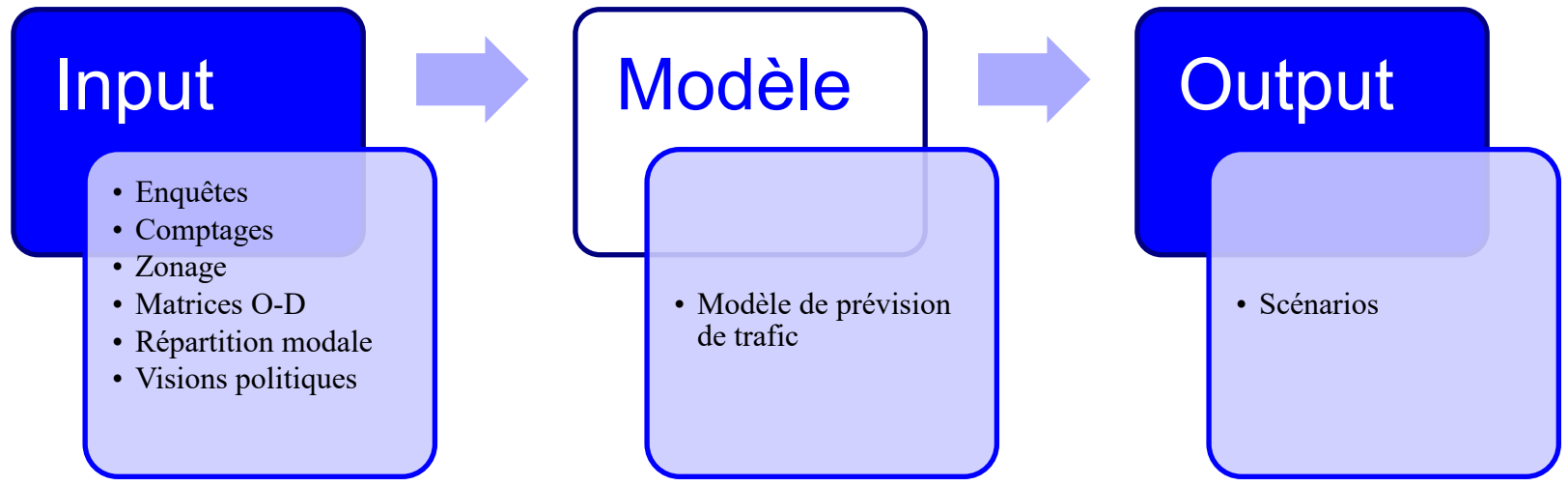
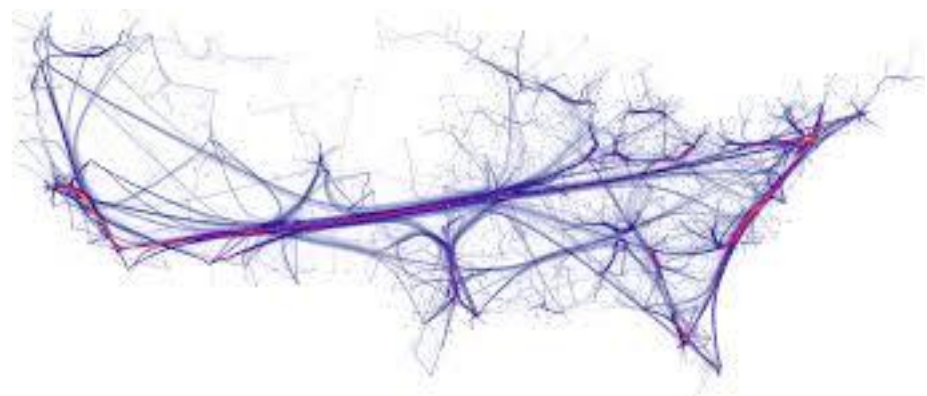
Vulliet, L., Laloui, L., Zhao, J. *Mécanique des sols et des roches*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR), Lausanne, 600 p., 2016

Fig. 14.18 Délimitation du massif en tranches.

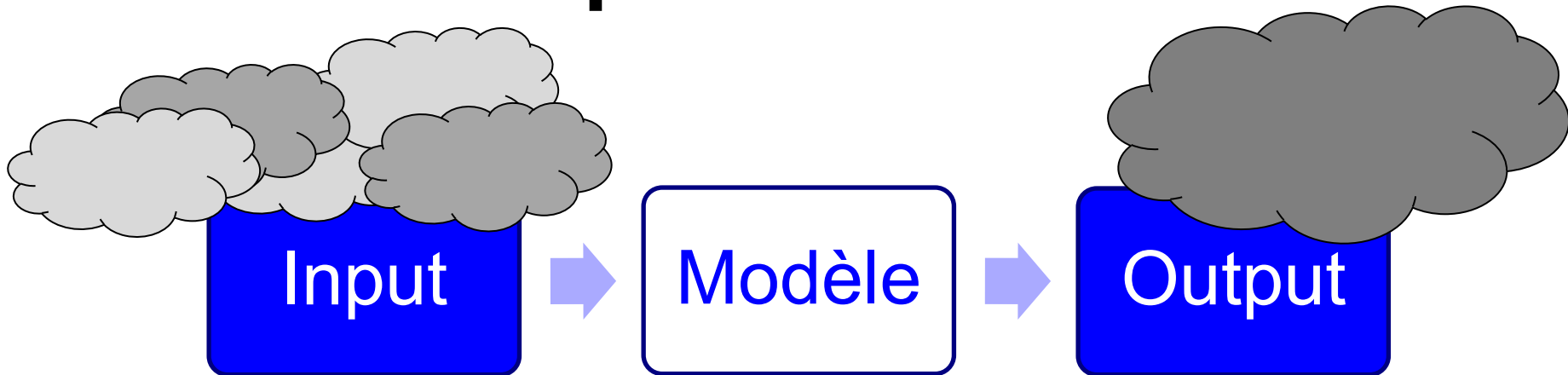


Exemple 3: Modélisation des transports

		Destination							
		a	b	c	d	e	f	g	h
Origine	a	0	75	15	30	0	20	0	0
	b	70	0	45	60	5	35	5	5
	c	5	50	0	40	5	15	0	0
	d	10	40	50	0	35	45	10	5
	e	5	30	5	40	0	100	10	0
	f	10	40	10	40	100	0	35	10
	g	0	10	5	15	10	35	0	15
	h	0	5	0	10	0	5	15	0
	Total	100	250	130	235	155	255	75	35



Prise en compte des incertitudes



- **Deux méthodes:**

- **Calcul déterministe** avec prudence dans le choix des valeurs en entrée (facteurs de sécurité partiels)

Exemple de calcul de résistance selon Eurocodes:

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{R_d}} R \left\{ \eta_i \frac{X_{d,i}}{\gamma_{m,i}}; a_d \right\}$$

- **Calcul probabiliste**, prise en compte des distributions des paramètres d'entrée; p. ex. calcul de probabilité de défaillance

Exemple de calcul de probabilité de défaillance en comparant la capacité C avec la sollicitation D :

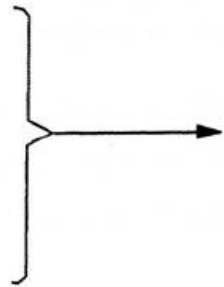
$$p_f = P[C \leq D] = P[C - D \leq 0]$$

Déterministe vs. probabiliste

Approche déterministe

Paramètres d'entrées

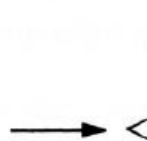
x_1
 x_2
 x_3
 \vdots
 x_n



Modèle
 mathématique

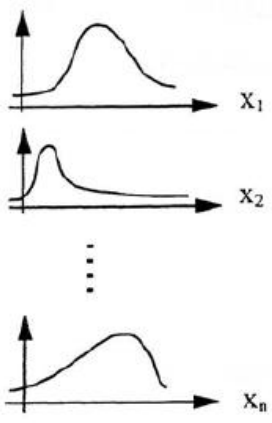
Résultats

y_1
 y_2
 \vdots
 y_k



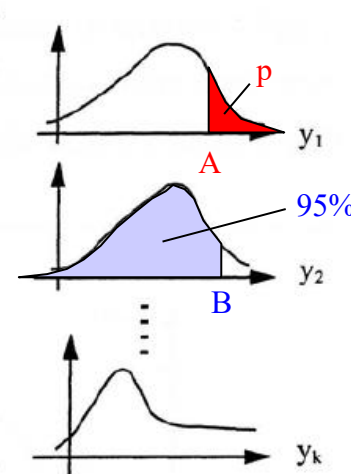
Approche probabiliste

Paramètres d'entrées



Modèle
 mathématique

Résultats



L'approche probabiliste permet un résultat en terme de probabilité d'occurrence, p. ex.:

- Quelle est la probabilité p que la valeur y_1 dépasse une certaine limite A ?
- Quelle est B la valeur caractéristique de y_2 correspondant à une probabilité cumulée de 95%?

Méthodes pour passer de variables d'entrée aléatoires à des variables de sorties aléatoires

1. Méthodes d'approximation "au deuxième moment"

- i. Développement en série de Taylor
- ii. Estimations ponctuelles (Rosenblueth)

2. Méthodes d'intégration complète

- i. Intégration directe
- ii. Monte Carlo

Méthode	Input	Output	Remarque
Taylor	Moyennes, écart-types	Moyennes, écart-types	Hypothèse à faire sur type de distribution output
Rosenblueth	Moyennes, écart-types	Moyennes, écart-types	Hypothèse à faire sur type de distribution output
Intégration directe	Distributions complètes	Distributions complètes	
Monte Carlo	Distributions complètes	Distributions complètes	

Bibliography

- Ang A.H.S. & Tang W.H. (1975): "Probability concepts in engineering planning and design - Volume I - Basic principles", John Wiley & Sons, New York, 409 p.
- Ang A.H.S. & Tang W.H. (1984): "Probability concepts in engineering planning and design - Volume II - Decision, risk and reliability", John Wiley & Sons, New York, 562 p.
- Frankel E.G. (1988) Systems Reliability and Risk Analysis. Springer ed.
- Haldi P.-A. (1999). Reliability & Safety Analysis, Course Notes, EPFL
- Villemeur A. (1997) Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, Editions Eyrolles, Paris
- Vulliet L. (1997) Fiabilité et sécurité des systèmes civils. Partie I. Notes de cours. EPFL, Lausanne

TERMINOLOGIES ET DEFINITIONS

Sources:

Haldi P.-A. (1999). Reliability & Safety Analysis, Course Notes, EPFL

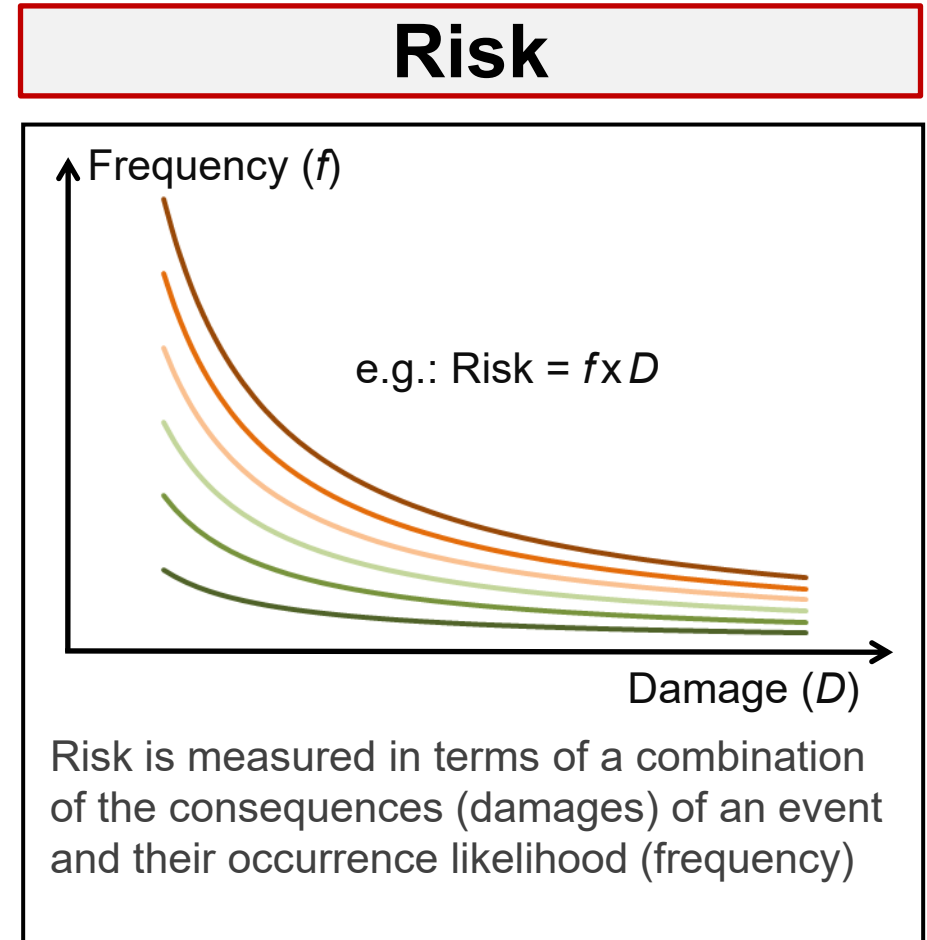
Vulliet (1997). Fiabilité et sécurité des systèmes civils, Partie I. Notes de cours – EPFL

Basic notions

"Risk is the chance of something happening that will have a negative impact on objectives"

From "risk management standard AS/NZS 4360-2004"

Risque



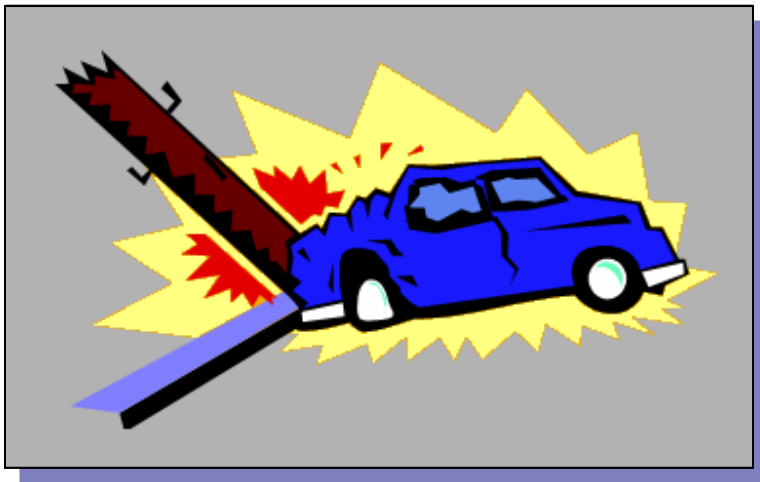
Risk metric

Generally, $R = \text{multiplication of the frequency by the Damage} = (f \times D)$

f : Frequency

D : **Damage ~ Consequences ~ Gravity ~ Severity**

Car accidents



$$f_1 = 400 \text{ acc./yr}$$

$$D_1 = 1 \text{ death/acc.}$$

?

≡

$$R = 400 \text{ deaths/yr}$$

Train accidents



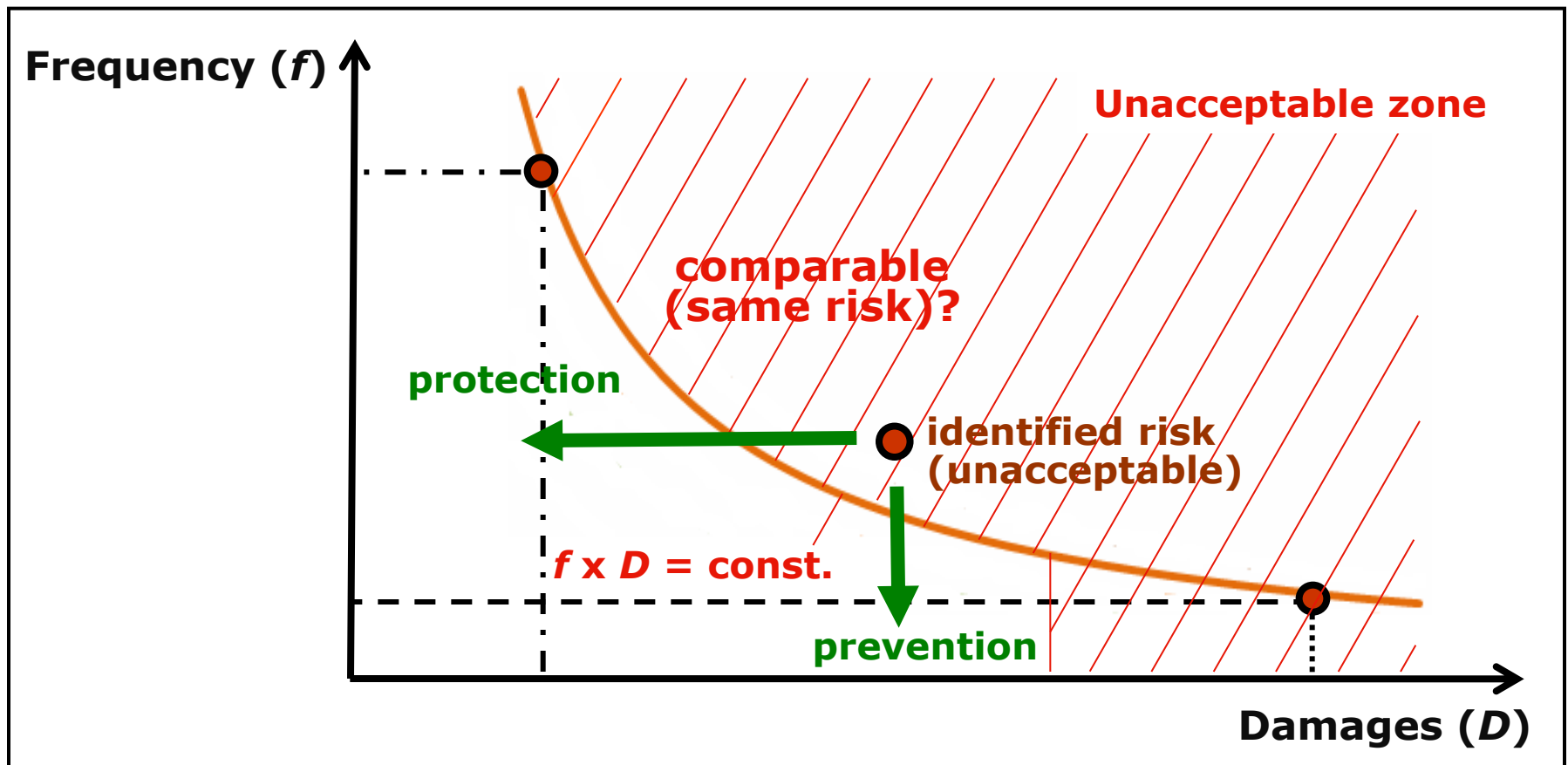
$$f_2 = 1 \text{ acc./yr}$$

$$D_2 = 400 \text{ deaths/acc.}$$

In terms of risk evaluation, these risks have not the same level of **acceptability**.....

Reducing the fundamentally two-dimensional risk to a single figure is not always pertinent and requires some precautions

$$\rightarrow R = (f, D)$$



Risque majeur

Major Risk

Risque majeur

*"La définition que je donne du risque **majeur**, c'est la menace sur l'homme et son environnement direct, sur ses installations, la menace dont la gravité est telle que la société se trouve absolument **dépassée** par l'immensité du désastre"*

Haroun TAZIEFF

Le risque majeur est la possibilité d'un événement **d'origine naturelle ou anthropique**, dont les effets peuvent mettre en jeu **un grand nombre de personnes**, occasionner des **dommages importants** et dépasser les **capacités de réaction** de la société



Risque majeur / Accident majeur

- La survenance d'un accident majeur est liée :
 - D'une part à la présence d'un **événement**, qui est la manifestation du phénomène
 - D'autre part à l'existence **d'enjeux**, qui représentent l'ensemble des personnes et des biens pouvant être affectés par un phénomène
- Un risque majeur est caractérisé par **sa faible fréquence et par son énorme gravité**.

	Classe	Dommmages humains	Dommmages matériels
0	Incident	Aucun blessé	Moins de 0,3 M€
1	Accident	1 ou plusieurs blessés	Entre 0,3 M€ et 3 M€
2	Accident grave	1 à 9 morts	Entre 3 M€ et 30 M€
3	Accident très grave	10 à 99 morts	Entre 30 M€ et 300 M€
4	Catastrophe	100 à 999 morts	Entre 300 M€ et 3 000 M€
5	Catastrophe majeure	1 000 morts ou plus	3 000 M€ ou plus

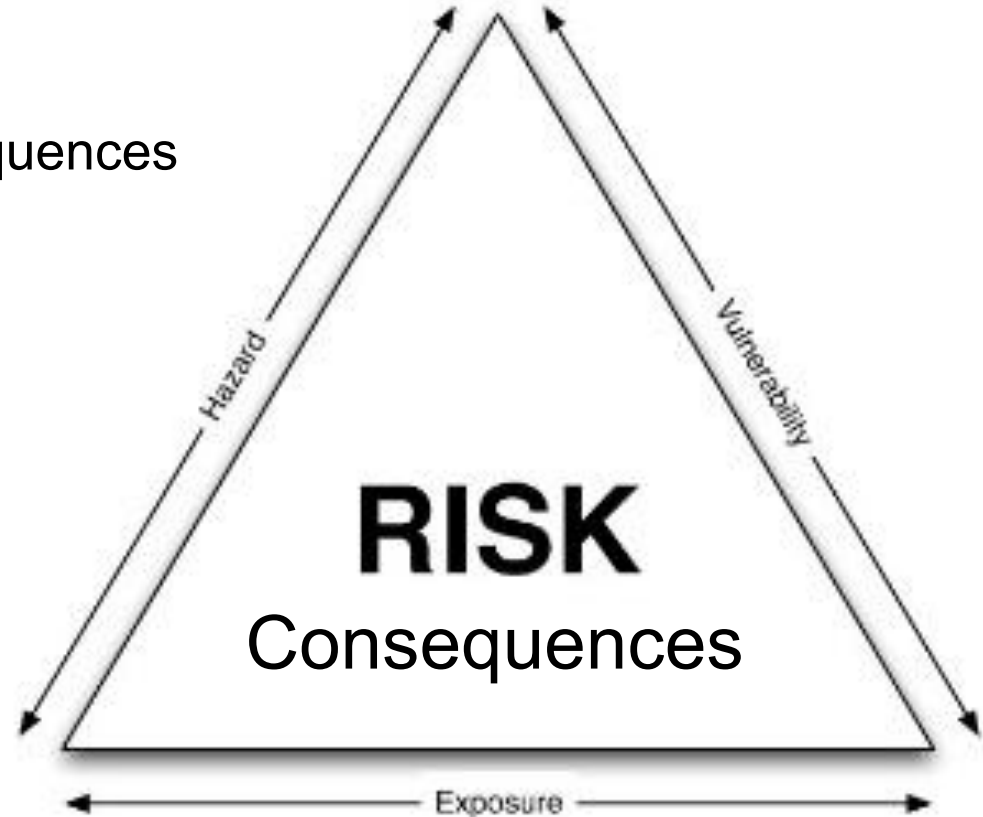
Ministère de l'Écologie et
 du Développement durable
 (France)

Components of risk: consequences

Risk consequences in disaster management depends on 3 factors :

- Hazard (intensity)
- Exposure and
- Vulnerability

Changing any one of the three components changes the consequences of the risk (gravity)



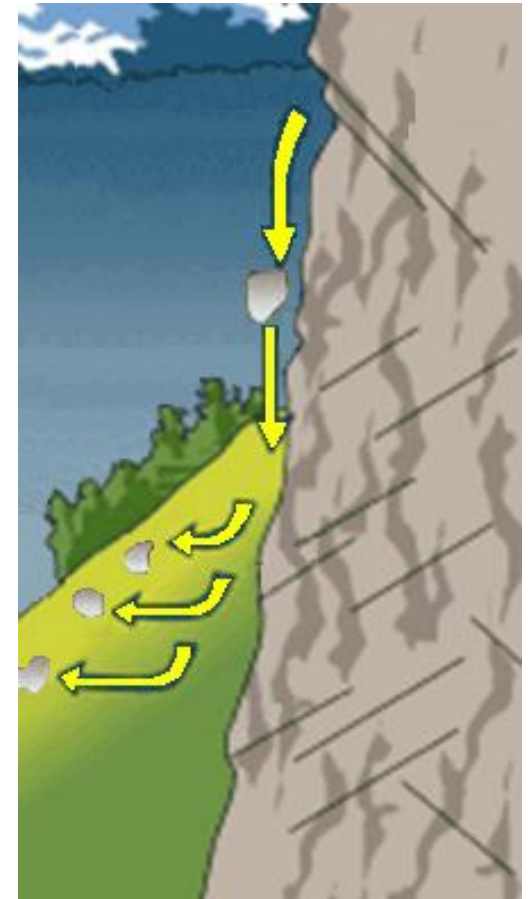
Danger / aléa

Hazard

"A hazard is a source of potential harm or a situation with a potential to cause loss; it may also be referred to as a potential or existing conditions that may cause harm to people or damage to property or the environment"

Federal Emergency Management Agency,
FEMA (1998)

Autre définition : "Propriété intrinsèque d'une substance ou d'une situation physique de pouvoir provoquer des dommages pour la santé humaine et/ou l'environnement"



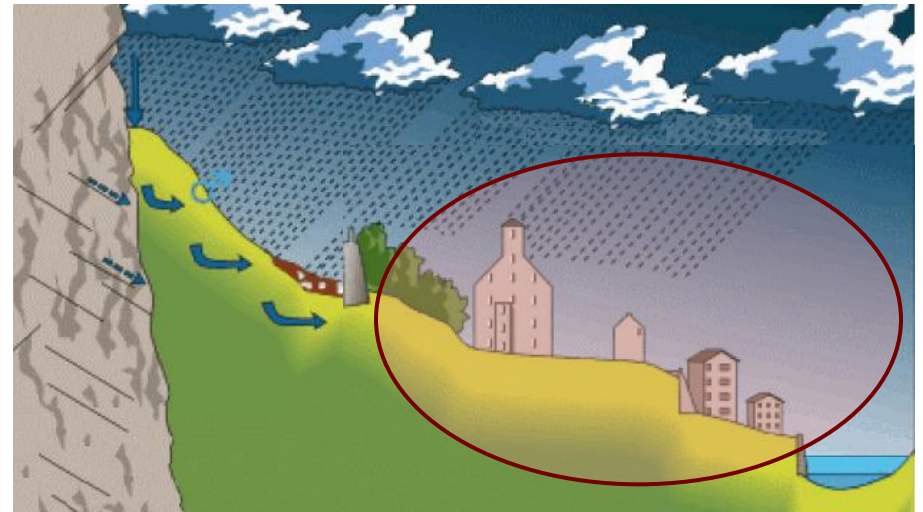
Exposition

Exposure

"Elements that are subject to the impact of a specific hazard"

"People and assets exposed to hazards"

- Population, building and infrastructures, economic activities, public services and infrastructure, etc. exposed to dangers / sources of risk
- The elements at risk may be divided into tangible (people, buildings, ...) and intangible (heritage, personal memorabilia, ...) ones



Vulnérabilité

Vulnerability

"The vulnerability is inversely related to the capacity of a person, group of persons, or system, to anticipate, cope with, resist and recover from the impact of a natural or technical hazard"

Adapted from Blaikie & al. (1994)

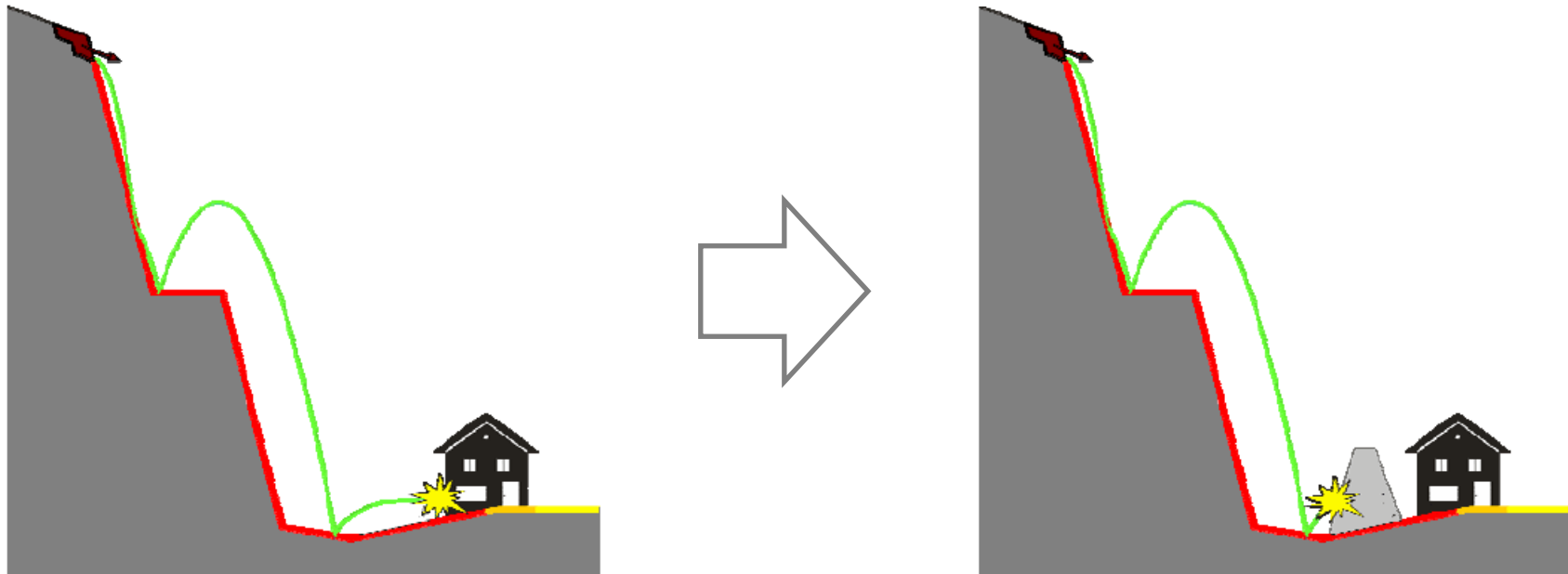


Aussi facteur de proportionnalité entre les effets et les dommages



Both exposure and vulnerability can be reduced by adequate technical, constructive or organizational counter-measures

The cost-benefit efficiency of these measures should of course be evaluated in each case



Gravité

Severity

The average amount of harm or more conservatively the maximum credible amount of harm

Examples:

Severity Scale	1	2	3	4	5
Likely injury	Minor non-immobilising injury or trauma not requiring hospital treatment	Non-immobilising injury or trauma but requiring hospital treatment	Immobilising injury or trauma requiring hospital treatment	Severe injury or trauma requiring urgent hospital treatment	Very severe life-threatening event

Source: <http://geographyfieldwork.com/RiskAssessmentSeverityScale.htm>

Operational Risk Management Severity

- Catastrophic - Complete mission failure, death, or loss of system.
- Critical - Major mission degradation, severe injury, occupational illness or major system damage.
- Moderate - Minor mission degradation, injury, minor occupational illness, or minor system damage.
- Negligible - Less than minor mission degradation, injury, occupational illness, or minor system damage.

Défaut

Fault

For a technical entity or system, any nonconformity to imposed specifications under given conditions constitutes a *fault* of the considered entity or system

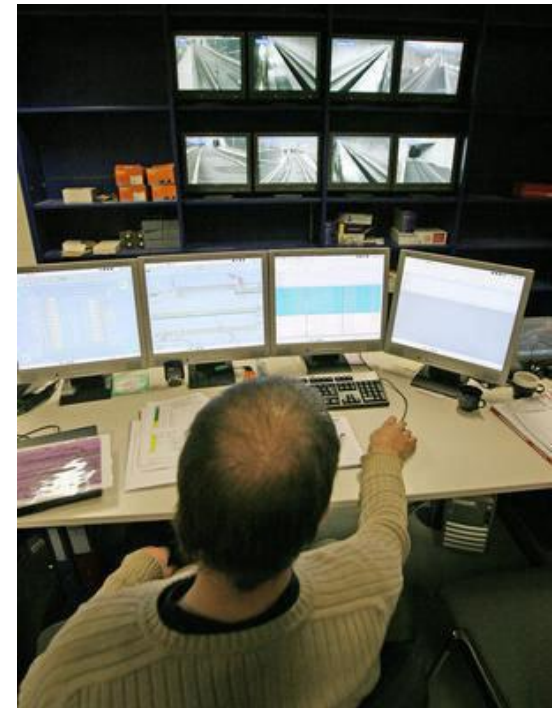


Qantas Airways flight Hong-Kong Melbourne, July 25, 2008 (Boeing 747-400)

Rupture / Défaillance

Failure

For a technical entity or system, a *failure* is the suspension of the aptitude of this entity or system to achieve a required function



Failure may result from a pre-existing fault

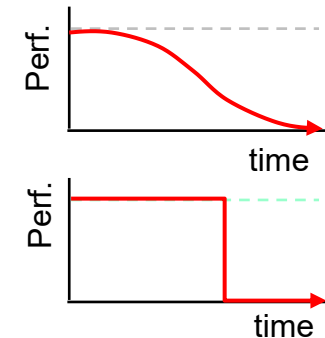
► Failure classification according to evolution in time

Gradual failure

Gradual loss of performances

Sudden failure

Sudden occurrence, without warning signs



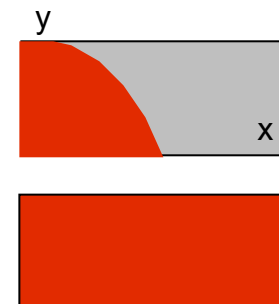
► Failure classification according to amplitude

Partial failure

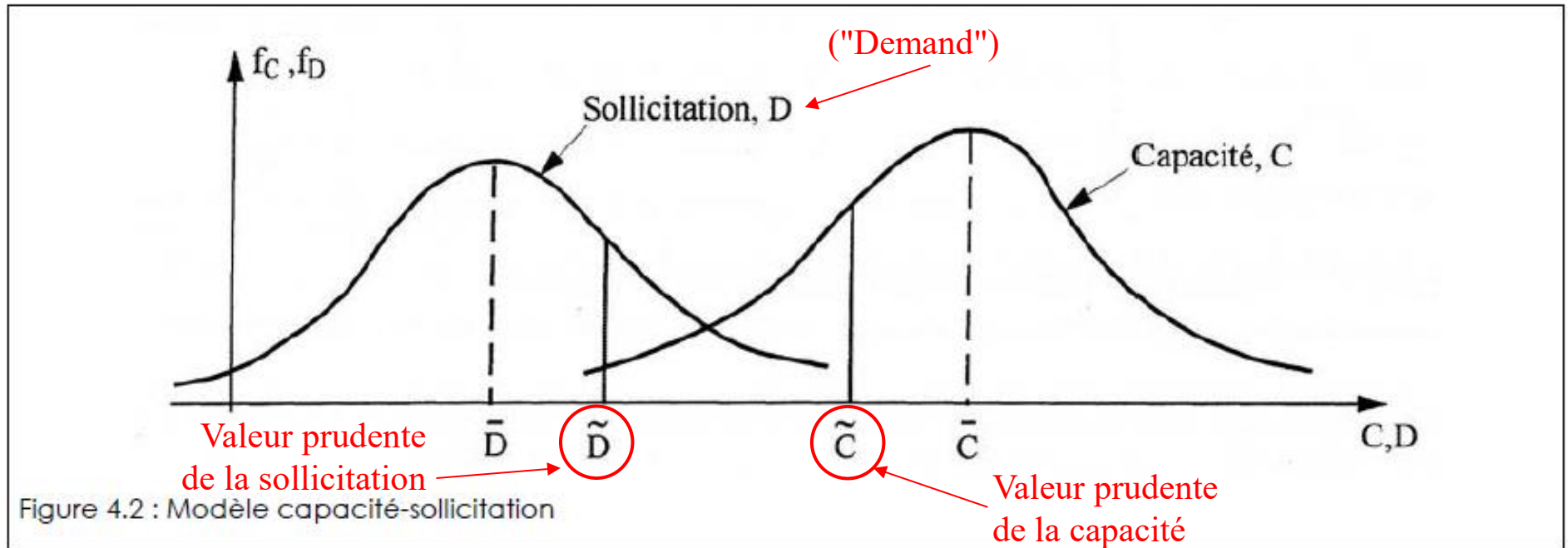
Departure of parameters from accepted limits, but without complete loss of the function(s)

Complete failure

Complete loss of the function(s)



Probability of failure



Global safety factor

$$F_g = \frac{\tilde{C}}{\tilde{D}}$$

Safety margin approach

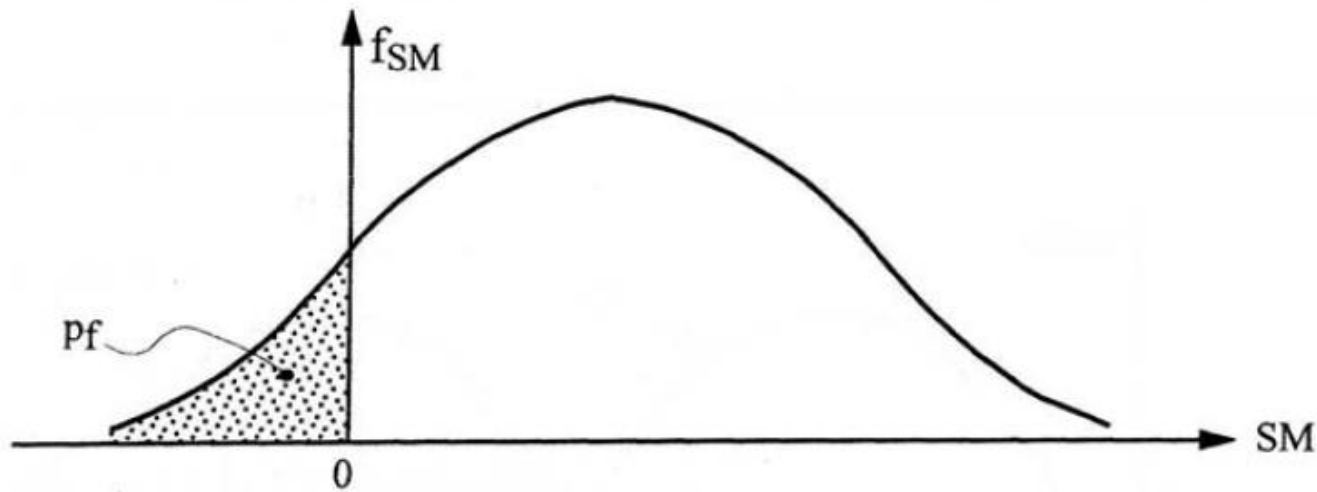


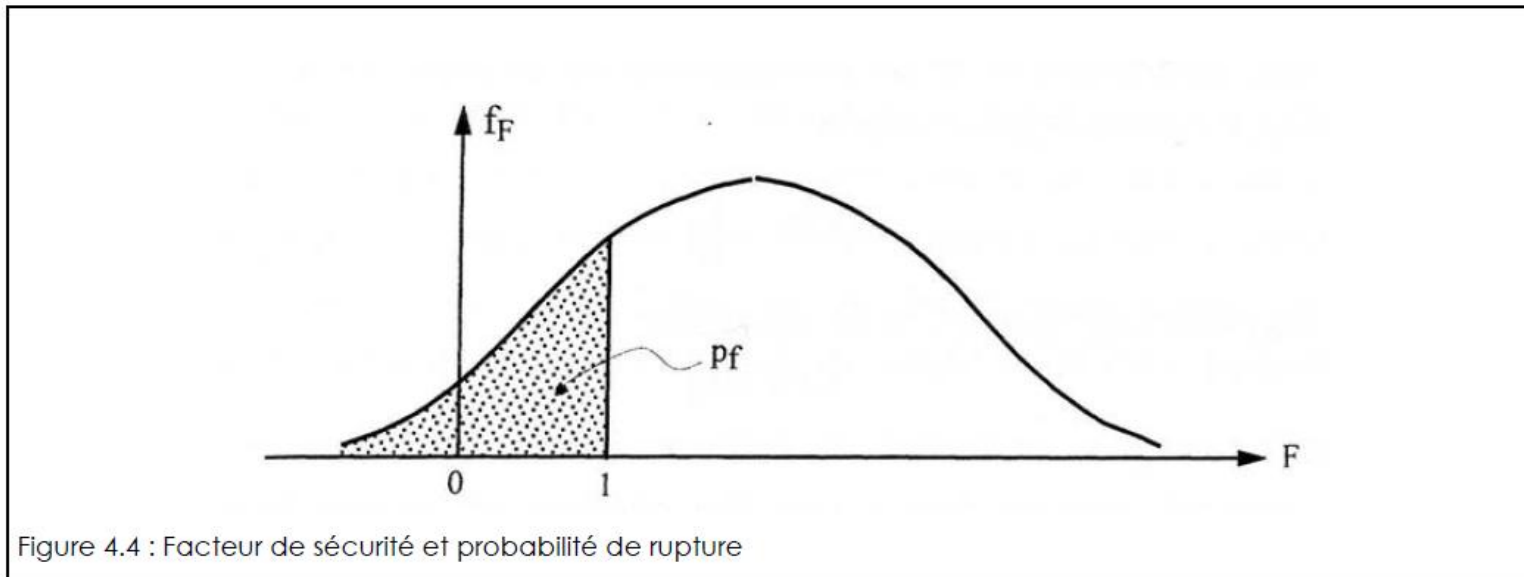
Figure 4.3 : Marge de sécurité et probabilité de rupture (ou probabilité de défaillance)

$$SM = C - D$$

$$p_f = P[C - D \leq 0]$$

Reliability: $R = 1 - p_f$

Safety factor approach



$$F = \frac{C}{D}$$

$$p_f = P[F \leq 1]$$

Fiabilité

Reliability, $R(t)$

Reliability is the aptitude of an entity to achieve one (or several) required function(s), under given conditions and for a determined length of time t



La fiabilité est appropriée pour caractériser le comportement d'une entité ou d'un système qui est utilisé en permanence

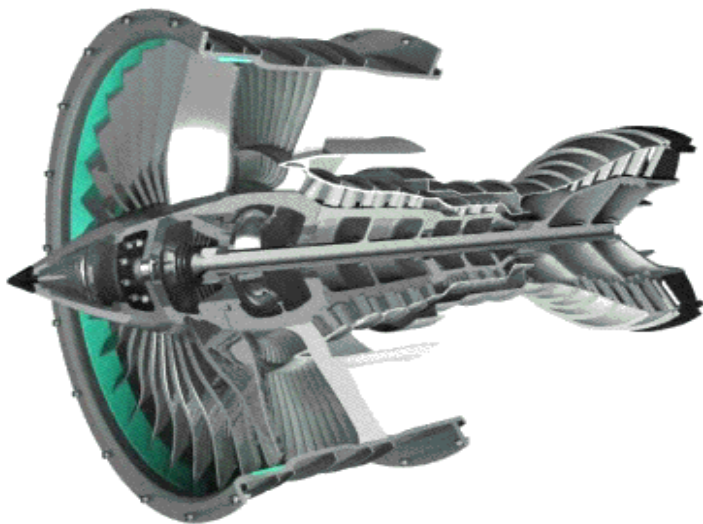
Mathematical expression:

$$R(t) = \text{prob} [E \text{ not failing on } \{0, t\}]$$

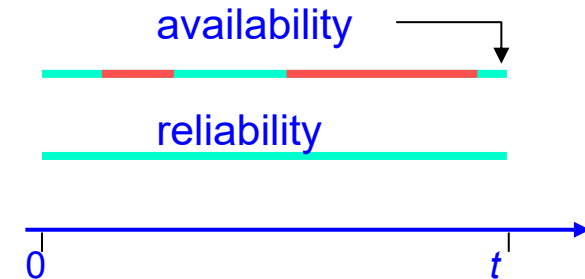
Disponibilité

Availability, $A(t)$

Availability is the aptitude of an entity to achieve one (or several) required function(s), under given conditions and at a determined time t



Used rather than reliability for
reparable entities



$$A(t) \geq R(t)$$

Mathematical expression:

$$A(t) = \text{prob} [E \text{ not failing at } t]$$

Accident

Accident

Un accident peut être défini comme un événement soudain, non intentionnel, qui provoque des blessures, des pertes de vies humaines, des dommages à l'environnement et/ou la perte de biens et d'intérêts financiers

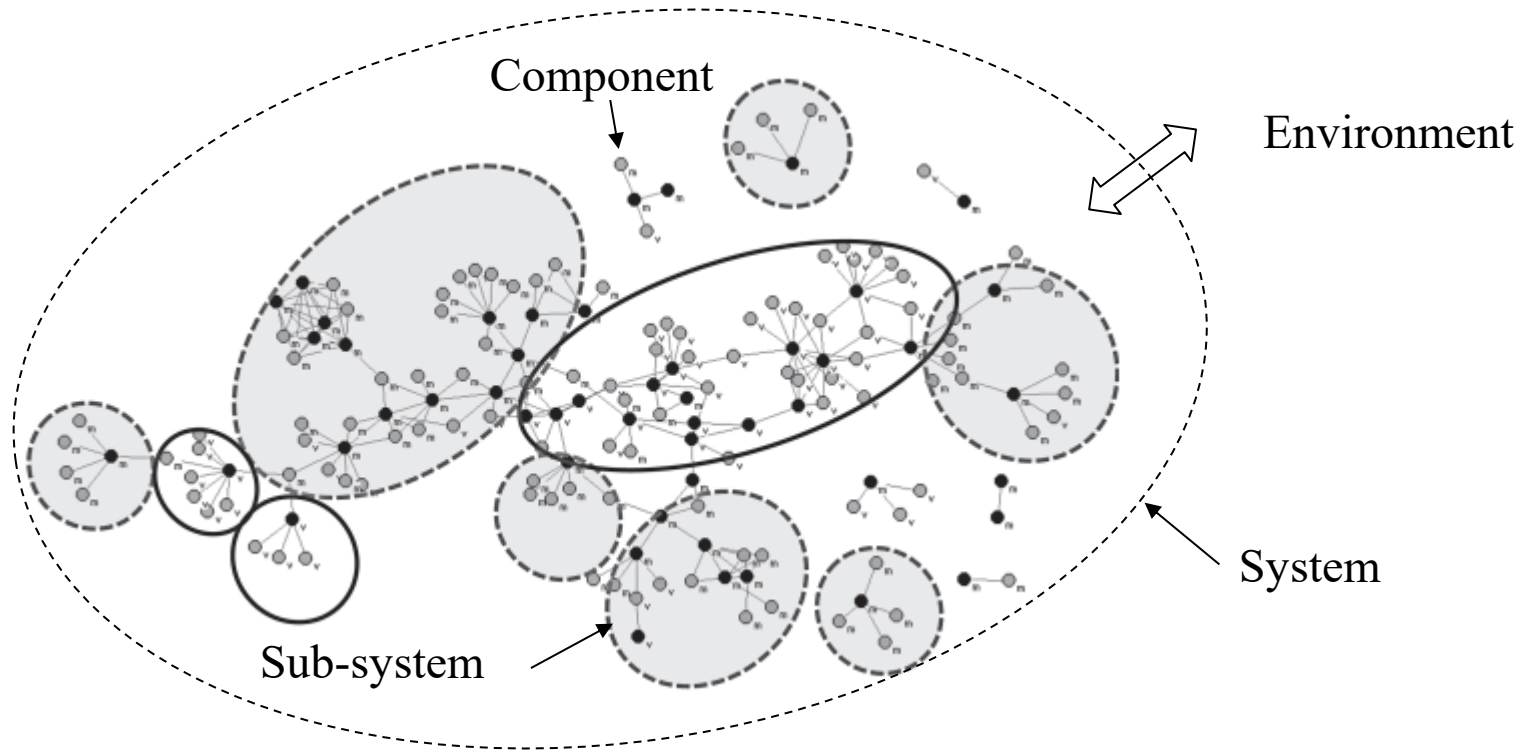
Il n'est pas possible de prédire avec précision le moment où un accident se produira (sinon ce ne serait plus un « accident » !)



Taiwan, 2015

Systeme

System



Systeme

System

A *system* is a determined set of elements (or components) that are interconnected or in interaction

The system is not simply equal to the sum of its subsystems or components

The boundary between the system and its environment must be clearly defined

If the internal structure is not important : "System" → "Entity"

Taux de défaillance

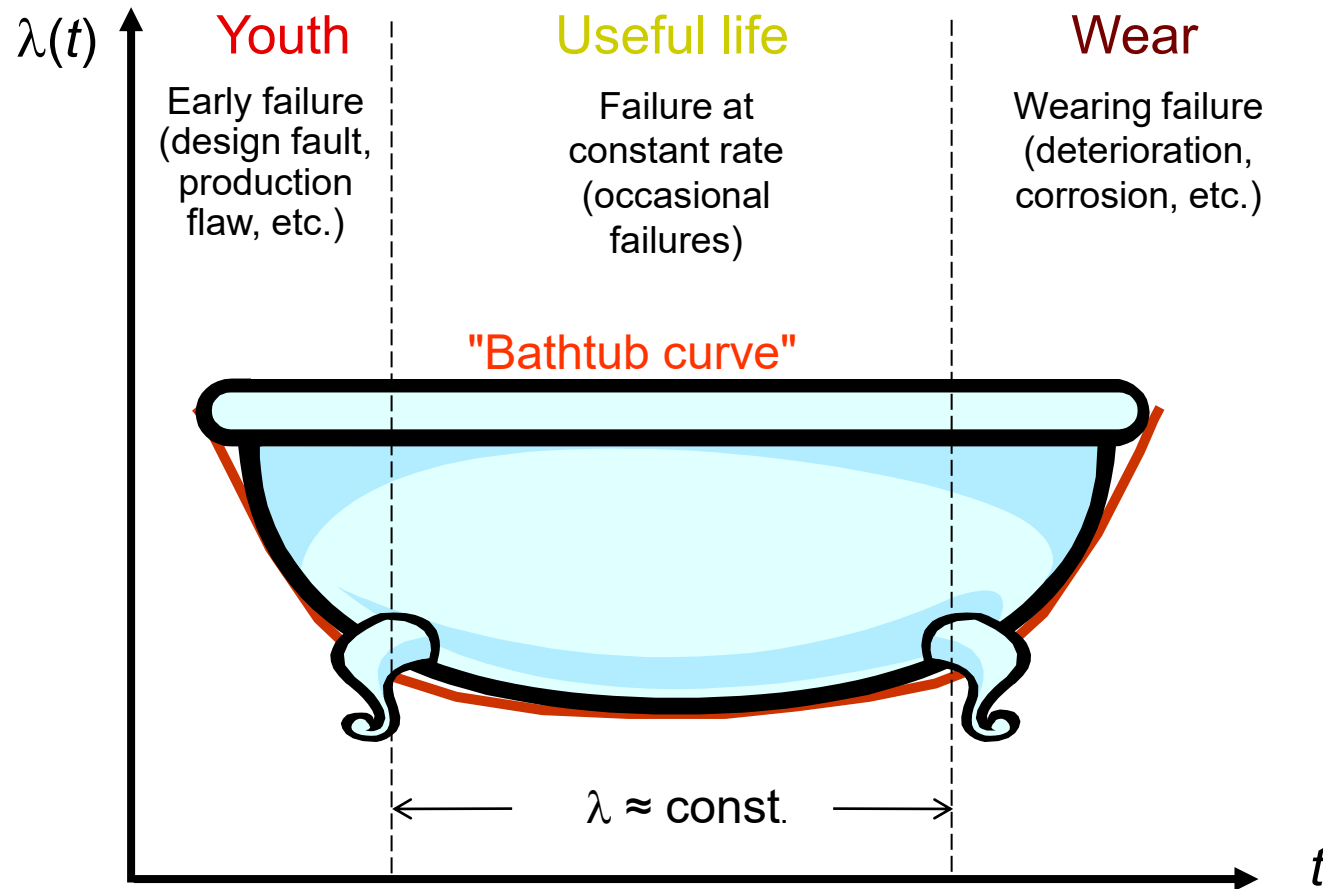
Failure rate, λ 

Probability of failure : $F(t) = \frac{N_0 - N(t)}{N_0} = 1 - \frac{N(t)}{N_0}$ N(t) : ventilateurs en fonctionnement à un instant t

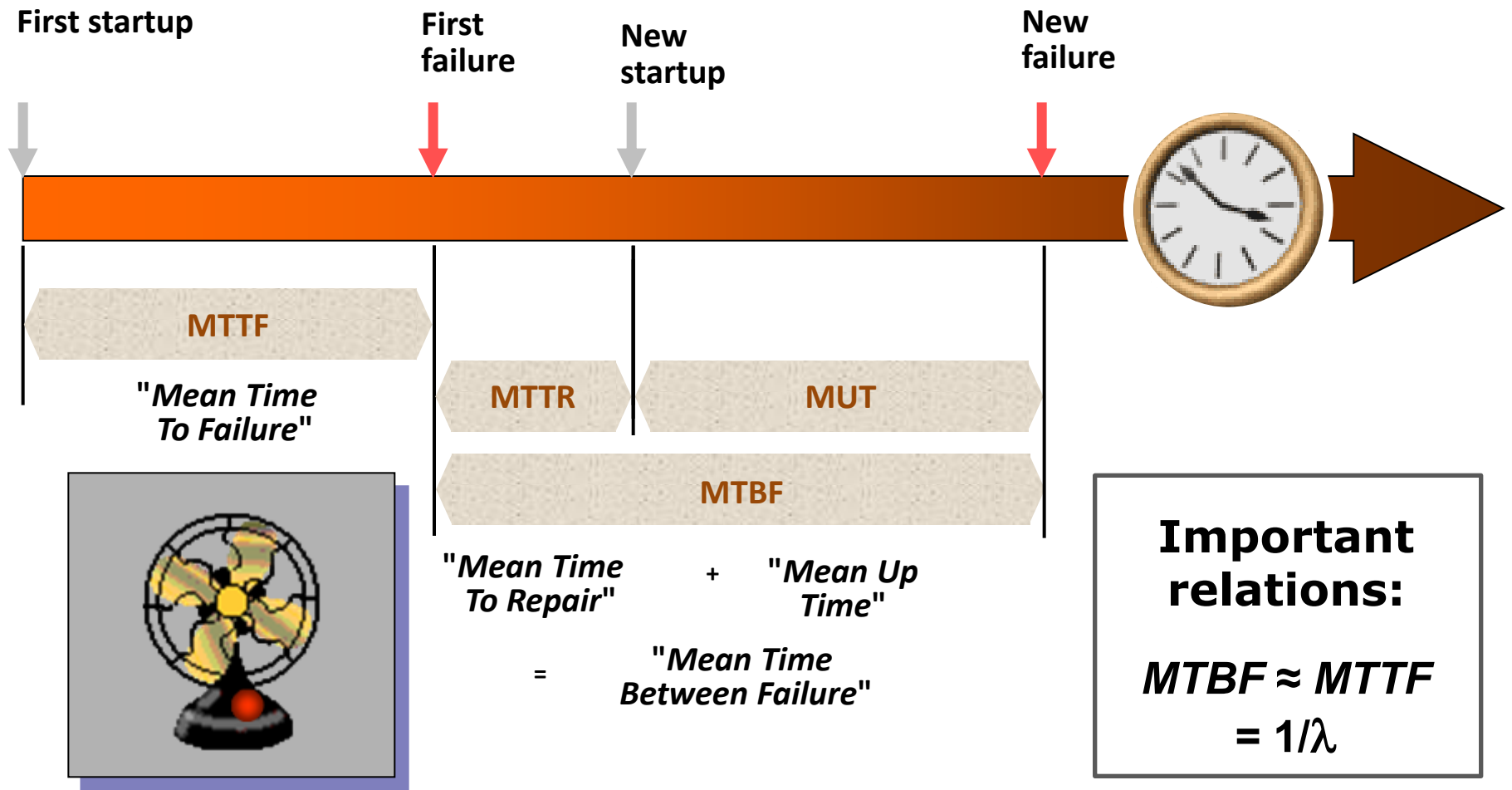
Failure rate: $\lambda = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{-(\Delta N) / N}{\Delta t} \Rightarrow \frac{dN}{N} = -\lambda dt$

Hyp.: $\lambda = \text{const.} \Rightarrow N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \Rightarrow F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \approx \lambda t$

Typical time evolution of the failure rate



MTTF, MTBF, etc.



Bibliography

- Ang A.H.S. & Tang W.H. (1975): "Probability concepts in engineering planning and design - Volume I - Basic principles", John Wiley & Sons, New York, 409 p.
- Ang A.H.S. & Tang W.H. (1984): "Probability concepts in engineering planning and design - Volume II - Decision, risk and reliability", John Wiley & Sons, New York, 562 p.
- Frankel E.G. (1988) Systems Reliability and Risk Analysis. Springer ed.
- Haldi P.-A. (1999). Reliability & Safety Analysis, Course Notes, EPFL
- Villemeur A. (1997) Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, Editions Eyrolles, Paris
- Vulliet L. (1997) Fiabilité et sécurité des systèmes civils. Partie I. Notes de cours. EPFL, Lausanne