

Limites, insuffisances et apports des approches probabilistes actuelles : quelles leçons tirer ?

André Lannoy, IMdR, www.imdr.eu



Plan

*La réalité est beaucoup plus compliquée
que les modèles que l'on peut faire.*

Paul Deheuvels (2013)

- 1 Le problème posé
- 2 L'observation
- 3 Les conditions de la modélisation
- 4 L'approche probabiliste est pourtant essentielle
- 5 Les défauts d'anticipation
- 6 Quelles méthodes peut-on utiliser pour l'estimation de la probabilité d'un événement rare?
- 7 Conclusions
- 8 Principales références

Évènement imprévisible: évènement inconnu auparavant, rare, difficile à identifier et donc à prévoir, aux causes non prévisibles et qui surprend par ses conséquences très graves, très commenté et étudié a posteriori, marquant une rupture

Le risque: une dimension probabiliste

- **Valeur moyenne des conséquences d'évènements affectés de leur probabilité**
(Bernoulli, 1738, *Specimen theoriae novae de mensura*)
- **Effet de l'incertitude sur l'atteinte des objectifs** (ISO 31000, 2009)

L'approche probabiliste n'est pas nouvelle...

Date		Approche probabiliste
1721	Cotton Mather	Arguments probabilistes
1776	Buffon	Essais de fiabilité de poutres
Années 1930	Sir Alfred Grenville Pugsley	Critères probabilistes de sûreté (pour les structures aéronautiques puis le génie civil)
1975	Norman Rasmussen et al	Wash 1400 : première EPS des centrales BWR et PWR

1 Le problème posé

- Comment expliquer les écarts entre les prévisions des modèles probabilistes et le retour d'expérience observé ?
- Quels sont les défauts d'anticipation?
- Peut-on estimer la probabilité d'un évènement rare aux risques extrêmes?

2 L'observation



Dans le secteur spatial

	Objectif	Retour d'expérience	Probabilité d'un échec
Navette spatiale américaine	10^{-4}	2 échecs/ 135	0.015
Ariane V, 1996 version boostée, 2002	0.015	2 échecs et 38 réussites successives	0.050
Arianespace	?	10 échecs/ 240 lancements	0.042 (février 2015)

Ces écarts peuvent s'expliquer par les difficultés (Ravet, 2010):

- prise en compte du retour d'expérience,
- prise en compte du facteur humain,
- *test as you fly and fly as you test.*

Dans le secteur de la production nucléaire d'électricité

Palier	Objectif alloué	Valeurs prévues calculées (2010)	Retour d'expérience toutes filières (calcul au 31/12/2014)	Retour d'expérience PWR (calcul au 31/12/2014)
900	5.10^{-5}	$7.7 .10^{-6}$	$3.1. 10^{-4}$ / (réacteur x an) Intervalle de confiance à 90% [$1.2 . 10^{-4}$, $5.7 . 10^{-4}$]	$1.0. 10^{-4}$ / (réacteur x an) Intervalle de confiance à 90% [$0.5 10^{-5}$, $4.7 10^{-4}$]
1300	10^{-5}	$7.2 .10^{-6}$		
N4	10^{-5}	$5.7. 10^{-6}$		

Valeur de la probabilité de fusion du cœur = 5.10^{-5} / (réacteur x an) (selon le (Wash 1400, 1975), pour les centrales BWR (Peach Bottom 2) et PWR (Surry 1)).

Une première explication

Un retour d'expérience insuffisant

- 31/12/2014 – 438 réacteurs en exploitation (dont 277 PWR-REP)
- 31/12/2014 – **15947 réacteurs x ans**, toutes filières

Dans le secteur des plateformes en mer

Valeurs objectifs	Valeur prévue pour Brent Bravo (Campbell, 2006)	Retour d'expérience	Valeur observée	Intervalle de confiance à 90%
API : 4×10^{-4} CNS : 10^{-5} DNV : 10^{-6}	$10^{-5} < \dots < 10^{-4}$	21 accidents majeurs de 1976 à 2012	$1.7 \cdot 10^{-3}$ / (plateforme x an)	$[0.5 \cdot 10^{-3} \text{ } 4.4 \cdot 10^{-3}]$

API : American Petroleum Institute ; CNS: Canadian Standard Association;
DNV: Det Norske Veritas.

Dans le domaine du stockage de GNL

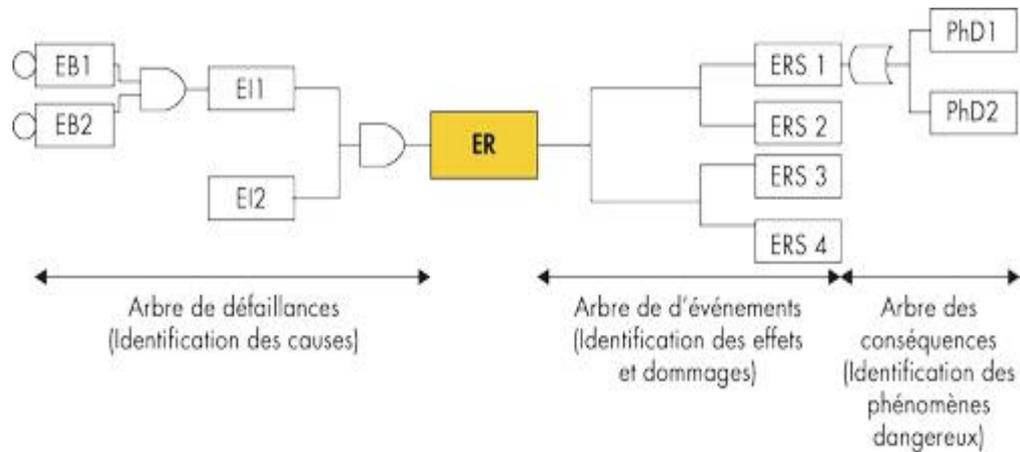
Valeurs allouées	Valeur prévue (Rijnmond, 1982)	Retour d'expérience	Valeur observée	Intervalle de confiance à 90%
Démarche ALARP (1)	$0.8 \cdot 10^{-6}$ / (stockage x an) (2)(4)	1 seul accident majeur (Cleveland, 1944) (3)	$5.8 \cdot 10^{-5}$ / (stockage x an)	$[0.3 \cdot 10^{-5} ; 27.4 \cdot 10^{-5}]$

- (1) *As Low As Reasonably Practicable (HSE, 1988)*
- (2) Rupture catastrophique du confinement primaire (scénario G1); rupture catastrophique des confinements primaire et secondaire (scénario G2) : $1.0 \cdot 10^{-9}$ (Rijnmond, 1982)
- (3) Problème de matériau, un tel accident ne peut plus se reproduire - Retour d'expérience: 24 accidents: 11 sur stockages, 2 sur lignes de transfert, 2 sur les torches (1 seul majeur, Cleveland, 1944, problème de fragilisation)
- (4) Valeur du rapport de **Canvey-Island (1978) : $3.2 \cdot 10^{-4}$**

En résumé...

- Des exigences probabilistes
- Fréquence observée = (2 à 10) x fréquence allouée
- Fréquence observée = (15 à 60) x fréquence prévue
- L'observation d'un évènement imprévu, rare, dépend de l'échelle de temps considérée.
- Lorsque le retour d'expérience est insuffisant, un seul accident suffit pour multiplier la fréquence par un facteur de l'ordre de 10.

3 Les conditions de la modélisation



Les modèles les plus couramment utilisés

Modèles probabilistes	Modèles de conséquences
<ul style="list-style-type: none"> • Analyse Préliminaire des Risques • AMDEC • Arbre de défaillance et arbre d'évènement • Nœud papillon • Diagramme d'influence et réseau bayésien • Analyse de données • Méthodes fréquentielles et bayésiennes • Méthodes de fiabilité des composants et des structures • Méthodes d'optimisation et d'aide à la décision • Modèles de Markov, réseaux dePetri, ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Intégrité des structures • Modèles d'écoulement (rejet diphasique, nappe, pollution, jet turbulent, ...) • Modèles de dispersion (nuages gazeux, inflammables, toxiques, radioactifs) • Rayonnement thermique (incendie, bleve, ...) • Détonique (détonation, déflagration, combustion à volume constant, éclatement, effets missiles...) • Modèles démographiques

Un retour d'expérience insuffisant

- Des échantillons de taille insuffisante
- Des données incertaines
 - Liste des événements initiateurs (limitée)
 - Données de fiabilité (**incomplètes, censurées à droite...; importance de la maintenance et de son efficacité**)
 - Données FH (il faudrait: homme dans son contexte, récupération... , mais certaines valeurs sont représentatives)
 - Des défaillances de cause commune
 - Un profil de fonctionnement (du passé, défini à la conception, représentatif?)
- **Des données utilisées dont la qualité n'est pas toujours assurée:** sont-elles validées au sens de la **justesse** et de la **pertinence**?
- **Ambigüité**

Les modèles probabilistes

- **Une représentation simplifiée** (mais complexifier peut obscurcir plus encore la prévision).
- Le modèle généralement fonctionne, il est bon, mais il peut se trouver non adapté à une situation.
- **Les évènements rares qui ne se sont pas produits échappent à la modélisation. S'ils se sont déjà produits, leurs effets sont surestimés, faussant ainsi les probabilités des autres situations.**
- ***Un futur à l'image du passé***
- Des outils « classiques » (AdD, AdE, nœud papillon, réseau bayésien, ...), statiques
- Des conditions environnement – conduite – maintenance supposées connues
- Des barrières, utiles en « statique »
- ***Exemple: néanmoins***, pour un modèle d'indisponibilité fortuite, sur le système RCV (circuit de contrôle volumétrique et chimique), important pour la sûreté (Degrave et al, 1997):

écart (prévision-retour d'expérience) < 5%.

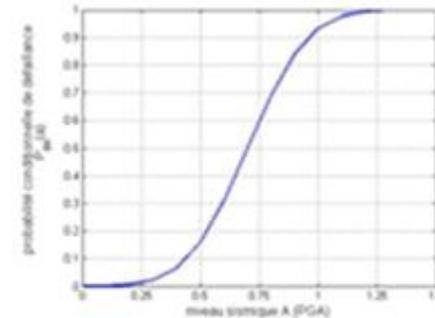
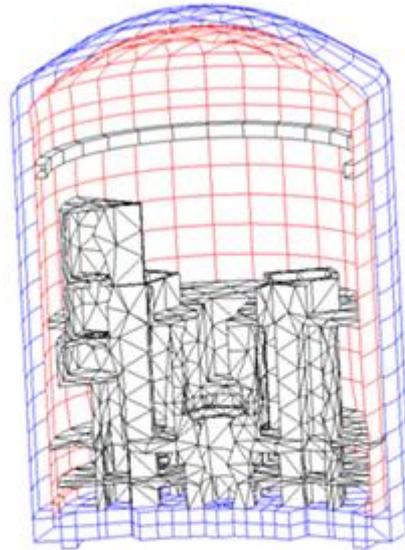
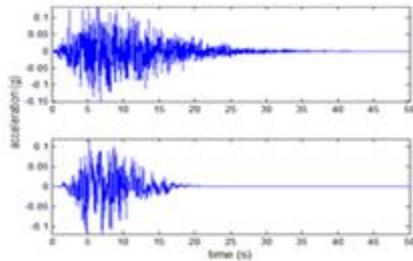
Des causes multiples

- **Un manque de connaissances physiques**, notamment pour les ruptures technologiques, le vieillissement, ou tout simplement parce que les connaissances passées n'ont pas été capitalisées
- **Des causes multiples: techniques, naturelles, humaines, organisationnelles**, défaillances de cause commune, interactions, effet domino. Les prévisions sont donc très difficiles.
- **Un enchaînement d'évènements** non intentionnels et fortuits provoquant des dommages **et une occurrence simultanée de plusieurs facteurs**, indépendants ou non, **interagissant** dans un contexte particulier
- Une **complexité** que les modèles ne savent pas traiter
- **Une évolution temporelle**, l'effet du vieillissement
- **Une variabilité** du contexte, des performances et des conditions
- Des conditions latentes existantes
- De nombreuses règles, procédures, ...

En résumé, les limitations sont essentiellement dues à:

- **L'incertitude du modèle:** il n'y a pas de modèle parfait; la connaissance physique, le niveau de détail et les hypothèses déterminent la précision du modèle
- **L'incertitude des données:** l'utilisation de données d'expertise, les problèmes de l'existence, de la collecte et de l'accessibilité, de la qualité (au sens de la justesse et de la pertinence), de la variabilité du retour d'expérience rendent complexe l'utilisation des données.
- **L'évolution du contexte:** *Les choses ne peuvent être connues avec une parfaite certitude, à cause de leur continuel changement.*
- **Conclusion:** trouver un juste compromis entre les besoins de l'aide à la décision et les efforts à mettre en œuvre pour des modèles et des données « raffinés »

4 L'approche probabiliste est pourtant essentielle



X paramètres incertains
N accélérogrammes



Simulations



Courbes de fragilité
Probabilité de défaillance

Les apports...(1)

- L'analyse de risque prépare la décision.
- De nombreuses AdR (AFS, risque sismique, UVCE, ...) ne peuvent pas être effectuées si on ignore l'analyse probabiliste.
- **Se méfier des valeurs absolues.**
- **Les résultats sont pleins d'enseignements en relatif.**
- Privilégier **l'analyse de sensibilité**, la recherche des facteurs influents, l'analyse coûts – bénéfices, l'appréciation des marges.

Les apports... (2)

- **L'apport des méthodes quantitatives** est essentiel, il **est complémentaire de l'analyse experte**: il permet de calibrer, de recommander une analyse appropriée s'appuyant sur les compétences expertes et la connaissance des comportements physiques, de prendre les mesures de prévention – précaution adaptées.
- **Les modèles probabilistes** sont efficaces et **peuvent mettre en évidence des faits que les experts ne soupçonnent pas**. Ne pas les utiliser ne peut que conduire à des sous-sécurités ou à des surcoûts.

TMI

- **1975 – publication du Wash 1400 , première étude probabiliste du risque (examen systématique des scénarii accidentels) faisant appel:**
 - aux analyses de fiabilité,
 - au retour d’expérience des industries nucléaires ,
 - aux modèles statistiques,
 - aux connaissances acquises sur les phénomènes de dégradation du cœur, d’émission de radionucléides, et de conséquences à l’extérieur du site,
 - aux défaillances humaines,
 - aux défaillances dues à des causes communes,
 - à l’étude de la propagation des incertitudes.
- Rapport mal interprété à sa publication, considéré trop complexe, conduisant à une controverse sur les méthodes probabilistes (toujours actuelle).
- **1979 – On constate que le Wash 1400 avait prévu des suites d'événements semblables à celles qui ont abouti à l'accident de TMI.** Outre le rôle du facteur humain mis en évidence par cet accident, on peut aussi remarquer les difficultés d’analyse physique des différentes situations accidentelles (écoulement diphasique, mesure du niveau, hydrolyse de l’eau, combustion d’hydrogène, ...).
- 1985 – Premières EPS françaises.
- **Maintenant, on emploie les méthodes probabilistes dans le domaine de la sûreté nucléaire, mais aussi dans les domaines pétrolier, gazier, militaire, le génie civil,**

L'aérogare 2E



L'analyse déterministe

d'une structure innovante en forme d'œuf

(Chateauneuf et al, 2012)

Résultats du code EF: ST1	Déplacement vertical maximal (cm)	Déplacement horizontal maximal (cm)	Rotation maximale (degrés)
Résultats du code mécanique EF ST1	Déplacement vertical maximal (cm)	Déplacement horizontal maximal (cm)	Rotation maximale (degrés)
Modèle court terme (63 jours)	11.74	6.63	1.05
Modèle long terme (915 jours)	18.58	10.56	1.99
Variation relative (%)	58	59	90
Mesure court terme (mesure sur site)	11	5	1.4
Mesure long terme	20	12	-
Prévision court terme à la conception	5	-	0.5

L'analyse probabiliste

- Les facteurs d'influence

Parameter	Temperature	Openings in the horizontal beams	Concrete of keyings	Creep	Shrinkage
Relative variation of the deformation	7.5%	0.11%	1%	55.5%	5.3%

- **L'analyse déterministe n'est pas suffisante, l'analyse probabiliste est décisive.**
- Méthode approchée FORM
 - indice de fiabilité $\beta = -\Phi^{-1}(P_f) = 1.8244$ soit **Pf = 0.034**,
 - ce qui peut être considéré inacceptable (Calgaro, 1996; EN 1990, 2002).

5 Les défauts d'anticipation



L'anticipation

- De nombreux événements néfastes apparaissent faute d'anticipation.
- **Anticiper, c'est** faire une prévision en contexte incertain ou **préciser le futur « probable »** en utilisant les informations du passé et du présent et peut-être les tendances pour l'avenir.
- On ne peut pas se limiter à une analyse déterministe pour prévoir l'évolution future.

Retour d'expérience et aide à l'analyse experte

- **Le retour d'expérience procède à une démarche d'anticipation.** Les accidents résultent le plus souvent d'une accumulation de défaillances élémentaires. L'un des objectifs du retour d'expérience est de détecter puis de réduire la majeure partie de ces défaillances avant que leur combinaison conduise à un accident critique.
- Les experts travaillent sur des expériences, utilisent leurs connaissances pour anticiper. Ce n'est guère suffisant pour les événements imprévus. **Il faut peut-être remettre en cause les méthodes classiques de l'expertise et être plus imaginatif,** tout en soulignant qu'il ne faut pas que travailler sur les accidents les plus graves et que **les accidents moins graves et plus fréquents sont souvent pleins d'enseignements et les prémisses de situations extrêmes.**
- Les méthodes probabilistes doivent être utilisées le plus possible, elles sont objectives et aident les experts. On peut penser que **les réseaux probabilistes,** les méthodes de prospective **peuvent procurer une aide précieuse à l'expert** notamment lorsqu'il s'agit de facteurs humains et organisationnels.
- Ces méthodes probabilistes ont été utilisées *dans le secteur nucléaire* avec des variables incertaines, techniques ou de comportement, qualitatives et quantitatives. Elles sont utilisées aussi *en sciences humaines, en sociologie et en criminologie* (Schindler, Wiedmann-Schmidt, 2015, exemple du logiciel Precobs).

Les principaux défauts d'anticipation (1)

Il y a incompréhension physique des processus, par manque de connaissances.

L'incertitude épistémique est donc très forte. **Les connaissances scientifiques et techniques ne sont pas disponibles**: innovation de rupture ou ignorance de l'état physique. Ce défaut ne peut être combattu que par la R&D, l'expérience, le management des connaissances et la formation. **On peut noter aussi que souvent on ne sait pas appliquer ce qu'on connaît.**

Les recommandations de l'analyse de risque ne sont pas suivies, contrôlées. Un retour d'expérience n'est pas engagé. Finalement l'analyse de risque (dans sa phase « piloter et revoir », ISO 31000) n'est pas appliquée.

C'est une phase managériale correspondant au suivi des actions, à la revue et au contrôle des actions, au recueil, à l'analyse et à l'interprétation du retour d'expérience. Il s'agit notamment de suivre les faits techniques et les incidents, de juger des mesures préventives et correctives adoptées lors de la phase 3 (leur efficacité et leur efficacité opérationnelles), de mémoriser les bonnes pratiques pour les conception et exploitation futures). Cette phase « piloter et revoir » est trop souvent ignorée : non suivi des actions décidées, absence d'un retour d'expérience, aucune évaluation de l'efficacité des options de prévention ou de protection, absence d'un management des connaissances.

Le retour d'expérience est mal utilisé.

Le retour d'expérience est inexistant ou très dégradé, ou les données ne sont ni validées, ni analysées. Les enseignements du retour d'expérience ne sont ni diffusés ni utilisés. Le management ne croit pas au retour d'expérience. Le retour d'expérience n'est pas utilisé en temps réel

Les principaux défauts d'anticipation (2)

L'analyse de risque n'est pas réactualisée

Les contextes environnemental, technique, organisationnel , réglementaire évoluent en permanence. L'analyse de risque est une photographie, un diagnostic à un instant donné. Il convient de réactualiser régulièrement l'analyse de risque afin d'adapter les mesures de prévention / protection.

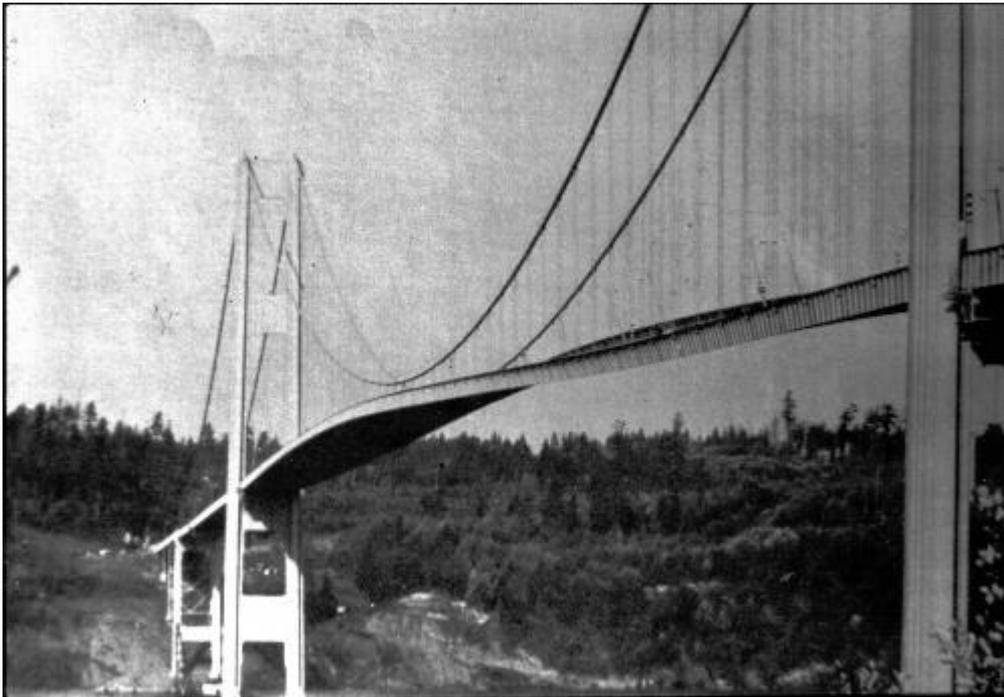
Les modèles de prévision ne sont pas appropriés ou non validés ou les données de l'expérience sont trop insuffisantes.

Les modèles doivent être utilisés dans le cadre strict des hypothèses qui ont servi à leur élaboration. On démarre toujours avec les données disponibles et les modèles sont améliorés dès qu'une nouvelle information, une nouvelle expérience parviennent. On améliore alors les modèles, à défaut on change les modèles. **Une prévision, une extrapolation sont toujours des opérations hasardeuses**, on peut sortir du domaine de validité. **Il faut donc confronter les modèles à la réalité physique, à l'expérience**, ce qui montre encore l'importance du retour d'expérience. Enfin **les modèles ne doivent pas être des boîtes noires**, ils seraient refusés par les ingénieurs comme par les décideurs. **Ils doivent être physiquement compréhensibles.**

La communication entre les différentes entités d'une organisation est défailante.

Il n'y a pas diffusion et transmission des informations, des données, des résultats des modèles déterministes et probabilistes, des solutions de prévention / protection entre les différentes entités de l'entreprise: conception, exploitation , maintenance, départements de sécurité/ sûreté.

Tacoma (1940), « flottement de décrochage »



Flixborough (1974)

- Prise de conscience du **risque majeur**.
- Défaillance organisationnelle certes: modification d'un système sans étude de nocivité
- Mais aussi et surtout **manque de connaissances sur les effets** des UVCE (régime d'explosion et impact sur les structures), **sur l'analyse de risque**, aucune pratique de l'analyse probabiliste



Buncefield (2005)

- Non prise en compte du retour d'expérience de Flixborough
- Absence d'approche probabiliste
- Oubli des connaissances acquises sur l'impact d'une *bang box explosion*



Donges (2008)

- Circonstances: pollution de la Loire suite à une fuite sur une canalisation de transfert
- Défaillances organisationnelles:
 - Non prise en compte de signaux précurseurs
 - Non utilisation du retour d'expérience
 - Organisation de la maintenance
 - Formation
- Mais manque de connaissances physiques concernant:
 - La gestion du vieillissement
 - Les CND
 - Les lois de dégradation par corrosion
- L'approche probabiliste RBI permet de réduire la probabilité de fuite sur une tuyauterie critique de 10^{-3} / an/ 4600m à 10^{-4} / an/ 4600m.

6 Quelles méthodes peut-on utiliser pour l'estimation de la probabilité d'un évènement rare?

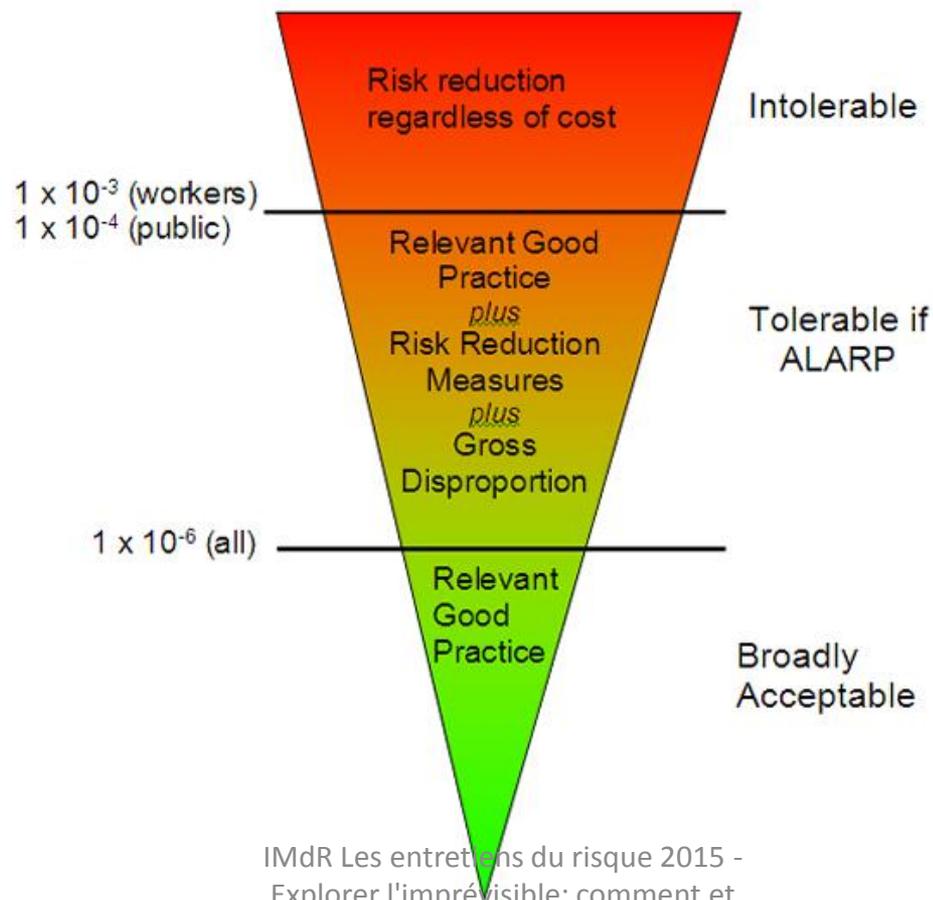


Les territoires de l'incertain

- **Domaine du médianistan** (*fréquentiel* ou *bayésien*) (Taleb, 2010; Lemaire, 2014) : valeurs proches de la **médiane**; un nombre limité d'observations suffit pour estimer le risque; **les méthodes habituelles de la sûreté de fonctionnement donnent toute satisfaction**; on utilise des lois à décroissance exponentielle (Gauss, Poisson, famille des lois exponentielles ...)
- **Domaine de l'extrémistan: le « *cygne noir* »** (Taleb, 2010): probabilités très faibles, conséquences très graves; **dans ces conditions, la compréhension physique est fondamentale et il y a lieu de construire et d'évaluer les scénarii d'accident et leurs conséquences**; un investissement peut valoir la peine; on utilise des lois « leptokurtiques » à décroissance puissance (Pareto, ...)
- Domaine de l'ignoristan: *terra incognita*
- Domaine de l'idéalistan: connaissance parfaite! Y-aurait-il risque?

Un majorant par la démarche ALARP?

(as low as reasonably practicable)



Les évènements de la zone « *broadly acceptable* »

- Les évènements prévus mais non pris en compte par le décideur (probabilité $<$ seuil acceptable) car considérés non plausibles
- Les évènements prévus aux très graves conséquences (gravité \gg gravité estimée)
- Les évènements nouveaux liés à une évolution du contexte (modification du profil de fonctionnement, vieillissement, environnement naturel...)
- Les évènements imprévisibles (omission, manque de connaissances, peut-être trop abstraits ou innovants), fortuits et difficilement quantifiables

Le cas du 0 défaillance

- Le problème de **l'estimation d'un taux de défaillance** (et plus généralement d'un taux d'occurrence d'un phénomène) **en l'absence de défaillance** (ou d'évènement redouté) se pose depuis longtemps. Il n'y a pas de solution vraiment satisfaisante.
- La **méthode contraintes / résistance** est utilisée pour les composants passifs. Elle nécessite la connaissance du champ des contraintes et de la résistance et donc la détermination de leurs queues de distribution.

Dans le cas des composants actifs...

- Milieu très censuré, à droite
- Hypothèse exponentielle
- Plusieurs méthodes (Welker, Lipow, 1974; Gerville-Reache et al, 2011)
- Choix de la médiane
- Vision pessimiste pour les échantillons de faible taille
- Méthode dite du X^2 , acceptée par les AS (nucléaire, pétrolier)

$$\lambda = X^2\alpha (2) / 2T = - \ln (1 - \alpha) / T \approx 0.7/ T , \text{ quand } \alpha = 50\%$$

Le vol Germanwings (24 mars 2015)

- 31/12/2014, avant le crash: 10 accidents majeurs soit une fréquence de $\approx 1.8.10^{-4}$ / (A320 x an)
- Circonstance: suicide du copilote
- Méthode du Khi-2: $1.3.10^{-6}$ / (A320 x an) pour ce scénario
- 5 cas de suicide recensés sur d'autres avions, entre 1982 et 2013, évènement donc plausible; une *alerte* en février 2015
- 29/03/2015, après le crash et l'accident de Halifax: 12 accidents majeurs soit: $[1.3.10^{-4}, 3.1.10^{-4}]$ / (A320 x an) au niveau 90%
- Sur la base d'un temps de vol annuel de 3000h, on retrouve l'objectif de 10^{-7} / heure de vol.

Les queues de distribution (1)

(Deheuvels, 2013)

- **Le risque se cache dans les queues de distribution.**
- *Exemples: problème de la crue extrême* (Beauzamy et al, 2013); problème récurrent pour les agressions naturelles extrêmes et en AFS lorsqu'il s'agit de modéliser les queues de distribution des chargements et des propriétés des matériaux.
- **Soit une chronique d'observations X_i , $i=1,n$ indépendantes de même loi.** Le problème est de caractériser la loi de répartition du maximum $M = \text{Max}(X_i)$, càd la probabilité $P(M > x)$ qui exprime que M excède un niveau x .
- Si on connaît $F(x) = P(X \leq x)$, on connaît aussi la loi de M .
- $F(x)$ est estimé à partir des observations, *à partir d'une estimation empirique ou à partir d'un modèle $F(x, \vartheta)$*

Les queues de distribution (2)

- *Modélisation* (Deheuvels, 2013)
 - Utilisation de la loi de Gauss (qui s'avère non adaptée)
 - Actuellement, loi lnN (modèle standard de coût de sinistre, fdp d'un taux de défaillance...)
 - La distribution des observations s'interprète comme un **mélange d'une loi normale et de lois de Pareto.**
 - La loi de Pareto modélise de nombreuses grandeurs économiques (ex: chroniques de cours)
- *Ajustement* d'une loi extrême par l'estimateur de Hill
 - On classe les observations par ordre croissant
 - **Si n est la taille de l'échantillon, on choisit les k plus grandes valeurs**
 - **La méthode marche si: $k \rightarrow \infty, n \rightarrow \infty, k/n \rightarrow 0$**

Les queues de distribution (3)- Dans la pratique

- Les lois de Pareto donnent une interprétation des grandes fluctuations observées.
- Il faut **un très grand nombre d'observations dans une chronique; en pratique on ne peut utiliser qu'un petit nombre d'observations, suffisamment grand; k est souvent estimé par expertise.**
- Toujours faire appel à l'expert du domaine: problème des valeurs aberrantes, aide à la modélisation, aide à l'interprétation.
- Il faut rester prudent lorsqu'il s'agit de prévoir des extrêmes d'observations futures.
- Le décideur doit décider sans avoir toutes les informations, souvent l'extrême apparait a posteriori.

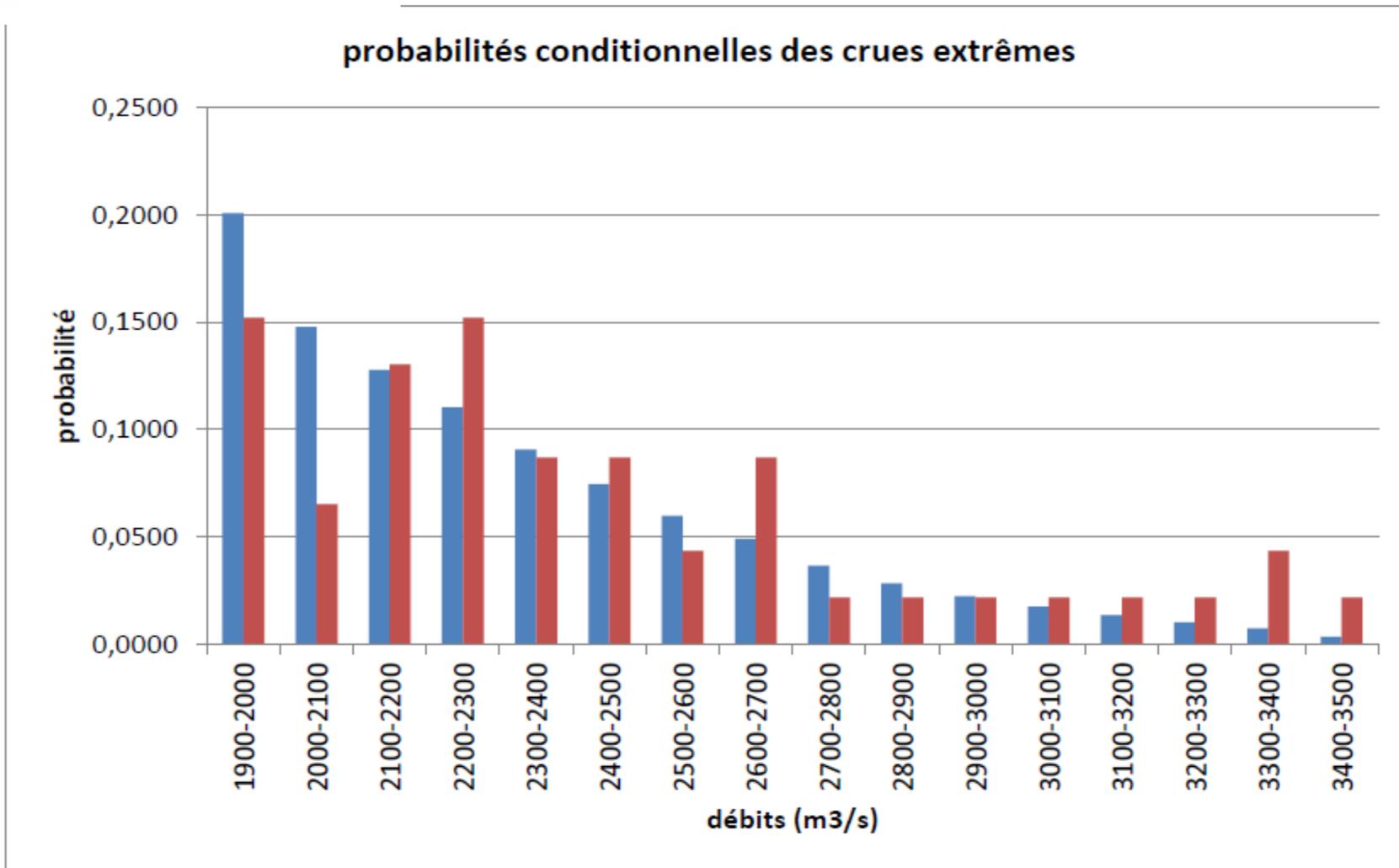


Figure 5 : les probabilités conditionnelles des crues extrêmes à Nouâtre

7 Conclusions

Penser probabiliste, agir déterministe.

Conclusions

- Les causes des évènements accidentels sont multiples ; l'évolution continue des contextes, les nombreuses interactions, la complexité rendent **la modélisation probabiliste et donc la prévision difficiles.**
- **La compréhension physique des phénomènes et des processus est indispensable.** Une des premières raisons des accidents est la non compréhension physique alliée à l'incertitude épistémique, mais aussi à l'oubli des connaissances, faute de capitalisation. Il ne peut y avoir analyse probabiliste sans analyse physique préalable.
- **Le retour d'expérience est stratégique.** Il est habituel d'affirmer qu'il faut le développer, qu'il faut fonder les résultats sur l'expérimental et privilégier l'observation au modèle. *L'expertise des seuls grands accidents n'est pas suffisante. L'analyse des situations plus fréquentes, leur estimation probabiliste, un regard plus imaginatif sur leur potentialité, doivent être systématiques.*

Conclusions

- **Toute analyse de risque nécessite une quantification probabiliste. Il faut examiner les résultats en relatif.** Il faut se méfier des analyses uniquement qualitatives, nécessaires mais insuffisantes, et bien souvent non objectives. ***Lorsque l'estimation de la probabilité est difficile ou lorsqu'un évènement plausible est très peu probable, il devient très important de se pencher sur les modèles physiques de calcul des conséquences*** ; ces conséquences sont-elles acceptables? L'estimation des conséquences est donc le premier pas, la première parade pour se protéger des évènements imprévisibles.
- L'approche probabiliste doit être pratiquée. Elle est un bon indicateur de la sécurité / sûreté d'un système socio- technique, d'un processus, ... Même si souvent elle n'est que relative aux aspects fonctionnels et matériels, elle peut refléter implicitement les faiblesses des comportements humains et organisationnels. *Une présentation quantitative est toujours utile car elle permet de comprendre les risques, de les hiérarchiser, d'orienter l'analyse experte, de mettre en évidence les criticités, de fonder les décisions qui seront prises.*
- Un système de management des risques nécessite une approche globale concernant en premier lieu les exigences techniques de sécurité/ sûreté mais aussi les performances humaines et organisationnelles (incluant principalement la formation, le retour d'expérience et la capitalisation des connaissances).

Efforts opérationnels	Efforts de R&D
<ul style="list-style-type: none"> • Meilleurs suivi et contrôle des mesures de prévention / protection • Prise en compte de l'évolution de contextes • Surveillance, maintenance conditionnelle • Retour d'expérience, recueils de données, expertise et méthodes de traitement • Management des connaissances • Communication, formation 	<ul style="list-style-type: none"> - Modélisation de la complexité - Mécanismes de dégradation - Modélisation de l'incertitude - Statistiques des petits échantillons et probabilités des évènements rares - Méthodes quantitatives sur les facteurs humain et organisationnel - Efficacité des parades - Diagnostic – pronostic, réseaux probabilistes - Méthodes probabilistes d'aide à l'expertise - Modèles de conséquences

8 Principales références

- Deheuvels Paul (2013), *Evénements rares et risques extrêmes*, Conférence au congrès Qualita 2013, UTC Compiègne, <http://www.utc.fr/fim/fc/video/watch/id/1298/>
- HSE (1988). Health and Safety Executive: *The Tolerability of Risk from Nuclear Power Stations*. Discussion Document, HMSO, London. Revised edition, 1992.
- ISO 31000: 2009 (2009), *Management du risque – Principes et lignes directrices – Risk management – principles and guidelines* (voir aussi ISO/TEC 31010 (2009) – *Risk management-risk assessment techniques*).
- Lemaire Maurice (2014), *Mécanique et incertain*, Collection Génie mécanique et mécanique des solides, iSTE Editions, Wiley.
- Taleb Nassim Nicholas (2010), *Le cygne noir – la puissance de l'imprévisible*, Les Belles Lettres, Paris.
- US NRC (1975), *Reactor Safety Study: an Assessment of Accident Risks in US Commercial Nuclear Power Plants*, **WASH-1400**, NUREG675/014, 1975.
- Every Welker, Myron Lipow (1974), *Estimating the Exponential Failure Rate From Data with No Failures*, Proceedings of the 1974 Annual Reliability and Maintainability Symposium, Los Angeles, California, page 420 – 427, IEEE Catalog Number 74CHO820-1RQC, Volume 7, Number 2, Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, New York, 1974.