

# Les probabilités d'accident nucléaire majeur : calculs et perceptions

François Lévêque,

Professeur d'économie à Mines  
ParisTech

Séminaire pluraliste sur l'évaluation  
économique du risque d'accident  
nucléaire, ASN, 24 octobre 2014

# Introduction

- L'évaluation économique du risque d'accident nucléaire majeur requiert d'estimer sa probabilité d'occurrence et le coût des dommages qui s'ensuivraient
- Cette présentation porte uniquement sur le premier terme
- Elle aborde deux questions :
  - Quelle révision de la probabilité d'accident majeur la catastrophe de Fukushima-Daiichi entraîne-t-elle ? (Escobar and Lévêque, *Safety Science*, 2014)
  - Quels sont les effets des biais de perception du public en matière de probabilité d'accident nucléaire ? (Lévêque, *The Economics and Uncertainties of Nuclear Power*, Cambridge University Press, 2014)

# Accidents majeurs : fréquences observées versus fréquences calculées

- Les probabilités d'accident nucléaire calculées dans les études probabilistes ne semblent pas coller avec les observations
  - Par exemple, un accident (INES >4) tous les 50.000 an.réacteur (calcul) contre une fréquence observée d'un accident tous les 1500 an.réacteur
- « D'ici 30 ans, la probabilité d'un accident majeur est de 50% en France et de plus de 100% en Europe » !!!!!!!!!!!



The screenshot shows the top portion of a news article on the Libération website. At the top left is the Libération logo. To its right, it says 'Dernière mise à jour : Il y a 22 minutes'. Below that is a search bar with the text 'Recherche (ex: Côte-d'Ivoire, Rebonds)'. A navigation bar contains several categories: ACTUALITÉS (highlighted in red), DÉBATS, CULTURE, TECH / WEB, and VIDÉO/PHOTO. Below the navigation bar are links for 'A la Une', 'Éditorial', 'Politiques', 'Société', 'Monde', 'Économie', and 'Médias'. The main headline is 'Accident nucléaire : une certitude statistique' in bold black text, with the sub-headline 'POLITIQUES' and the date 'Le 3 juin à 0h00'. Below the headline, it says 'Par BERNARD LAPONCHE, physicien nucléaire, expert en politiques de l'énergie, BENJAMIN DESSUS, Ingénieur et économiste, président de Global Chance' and '12 commentaires'.

# Les observations

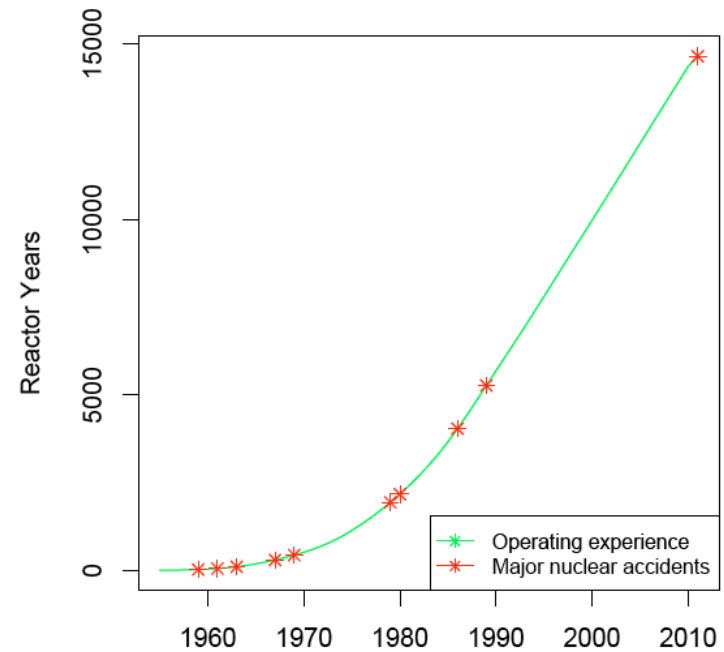
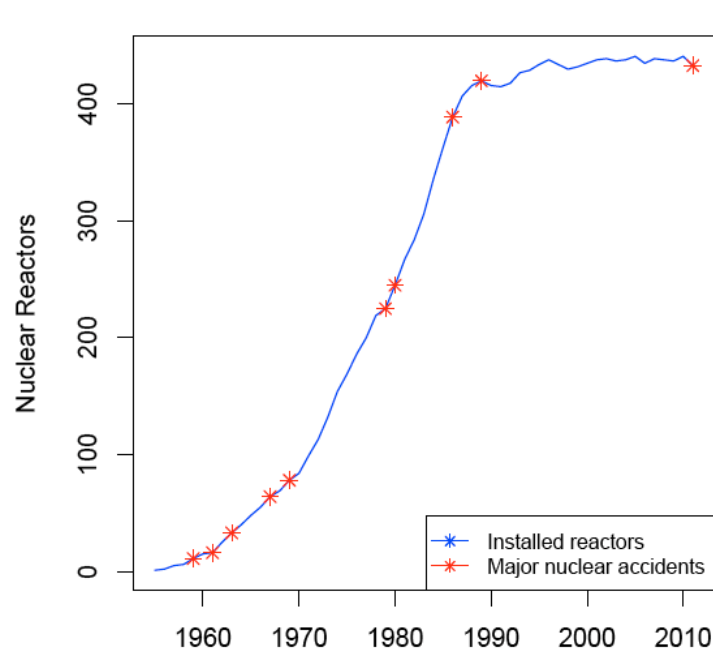


Table : Core melt downs from 1955 to 2011 in Cochran (2011)

Year	Location	Unit	Reactor type
1959	California, USA	Sodium reactor experiment	Sodium-cooled power reactor
1961	Idaho, USA	Stationary Low Reactor	Experimental gas-cooled, water moderated
1966	Michigan, USA	Enrico Fermi Unit 1	Liquid metal fast breeder reactor
1967	Dumfrieshire, Scotland	Chapelcross Unit 2	Gas-cooled, graphite moderated
1969	Loir-et-Cher, France	Saint-Laurent A-1	Gas-cooled, graphite moderated
1979	Pennsylvania, USA	Three Mile Island	Pressurized Water Reactor (PWR)
1980	Loir-et-Cher, France	Saint-Laurent A-1	Gas-cooled, graphite moderated
1986	Pripyat, Ukraine	Chernobyl Unit 4	RBKM-1000
1989	Lubmin, Germany	Greifswald Unit 5	Pressurized Water Reactor (PWR)
2011	Fukushima, Japan	Fukushima Dai-ichi Unit 1,2,3	Boiling Water Reactor (BWR)

INES	3	4	5	6	7
Observations	20	13	5	1	2

# Peut-on appliquer la théorie des probabilités 1/2 ?

- Certitude : une urne contenant uniquement des boules rouges. Je suis sûr de tirer une boule de cette couleur en plongeant ma main dans l'urne
- Risque : une urne contenant 30 rouges et 60 blanches. Je ne suis plus sûr de tirer une rouge  $p(r)=1/3$ ,  $p(b)=2/3$ 
  - L'ensemble des états du monde est connu et à chaque état correspond une probabilité connue
- Incertitude : une urne contient 30 rouges et 60 autres noires ou blanches  $p(r) = 1/3$ ,  $p(n) = ?$   $p(b) = ?$ 
  - Peut-être ramenée à un risque en introduisant une hypothèse sur les probabilités inconnues. e.g.,  $p(n)=p(b)$
- Incomplétude : une urne remplie de boules de couleurs, non spécifiées
  - Tous les états du monde ne sont pas connus
- Le calcul des probabilités s'applique aux situations de risque et d'incertitude (i.e., un monde sans surprise), mais non aux situations d'incomplétude : les surprises sont exclues

# Peut-on appliquer la théorie des probabilités 2/2 ?

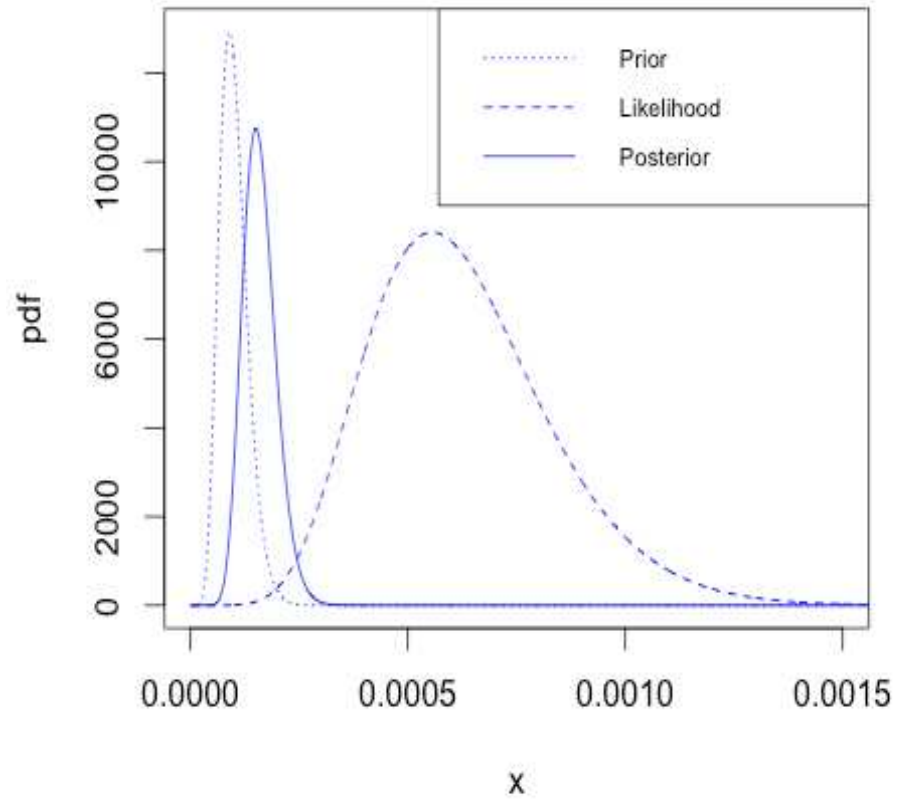
- Keynes, *Traité de probabilité* (1920)
  - Applique l'analyse probabiliste à la logique (probabilité qu'une hypothèse, ou une assertion, soit vraie ou fausse).  
La répétition d'événements n'est pas nécessaire
    - La théorie des probabilités a « pour sujet la part de nos connaissances acquises par l'argumentation et traite des différents degrés dont les résultats ainsi obtenus sont conclusifs ou non conclusifs »
  - Rejette le recours au calcul de probabilité dans l'étude de phénomènes dynamiques et de changements rapides
    - la loi des grands nombres devrait porter le nom de loi de stabilité des fréquences statistiques

# Observation et calcul : la probabilité de l'événement d'après

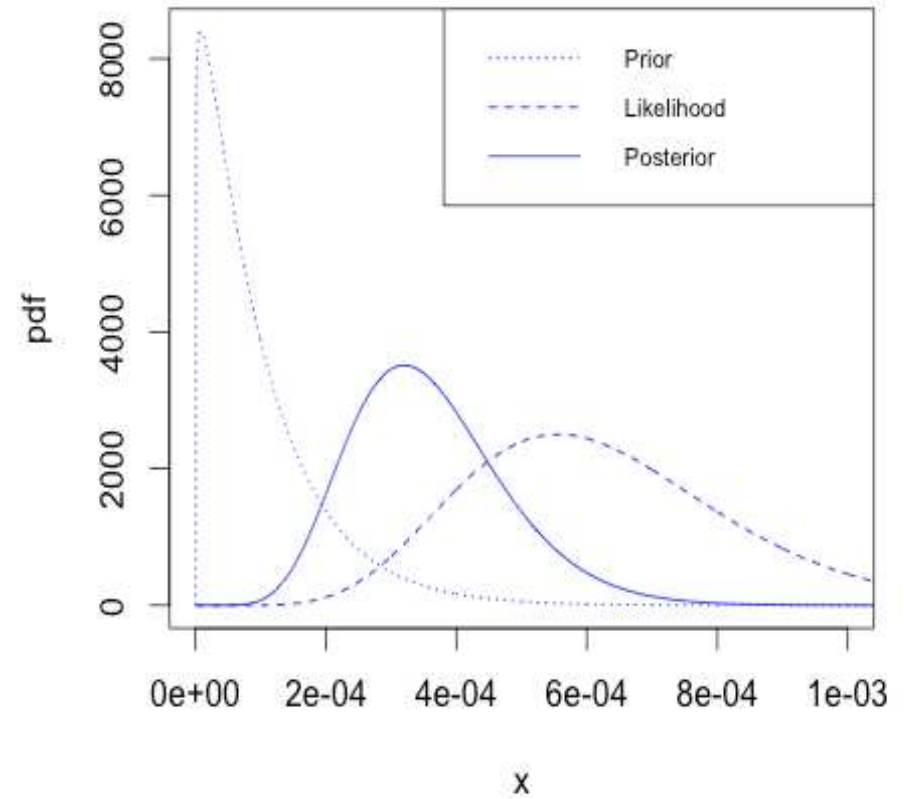
- Quelle est la chance de tirer une boule rouge dans une urne au  $n+1$  <sup>ème</sup> tirage sachant que les  $n$  précédents tirages ont produit  $k$  boules rouges ?
- $(k+1)/(n+2)$  selon Laplace (1825)
  - La formule revient à ajouter 2 tirages virtuels, dont l'un a donné une rouge et l'autre une non-rouge, aux  $n$  tirages ayant produits  $k$  rouges
- Généralisation :  $(k+st)/(n+s)$  où  $t$  est la probabilité attendue a priori (ex. 0,5 en cas d'événements équiprobables dans un choix binaire) et  $s$  le paramètre qui mesure la force de l'a priori (i.e., l'incertitude qui entoure l'a priori ou encore la dispersion autour de la moyenne)
  - Plus  $s$  est grand moins les observations modifient l'évaluation initiale, et inversement plus  $s$  est petit plus les observations l'emportent
- Le choix de  $s$  et  $t$  peut se baser sur des connaissances scientifiques (ex. on a mesuré le risque d'accident majeur grâce à de multiples études probabilistes) ou sur des croyances (ex. je crois fermement ou mollement que la probabilité d'accident est élevée ou faible)

# Le poids de l'a priori

Strong prior

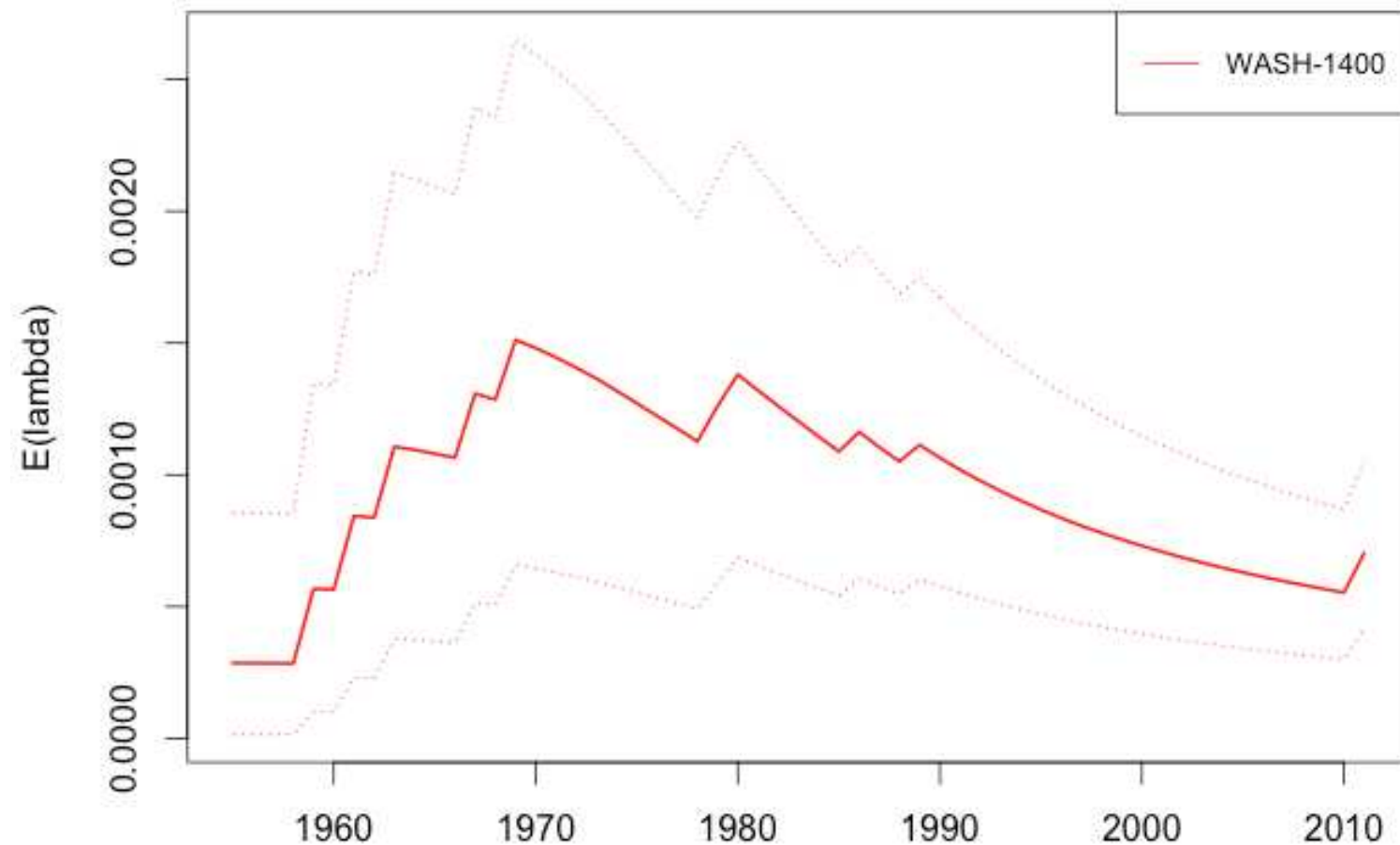


Weak prior





# Combiner les observations et les autres éléments de connaissance sur les accidents nucléaires majeurs



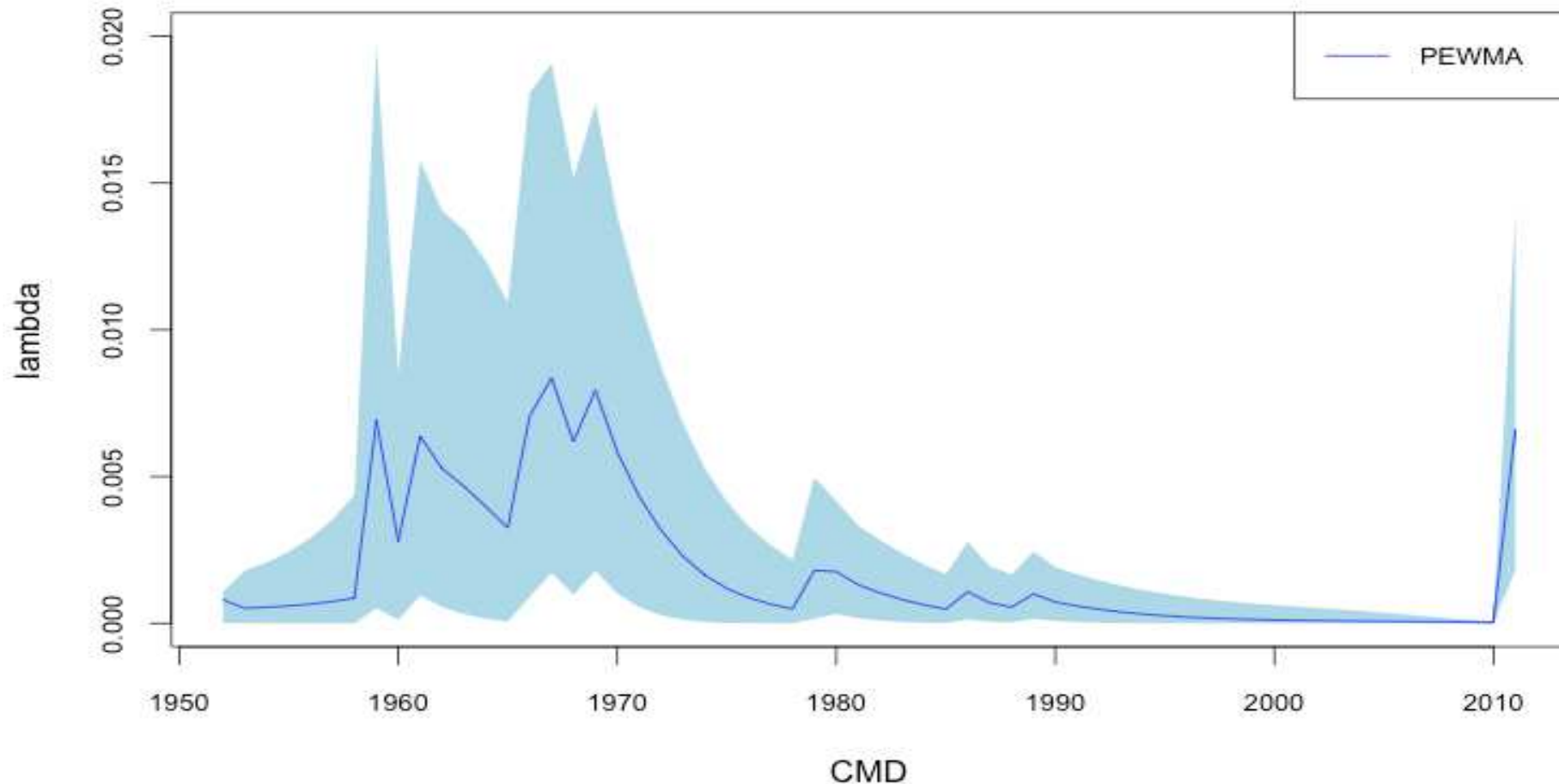
Modèle bayésien Poisson Gamma, Escobar-Rangel and Lévêque, *Safety Science*, (2014)

# Fukushima Daiichi : révision faible ou forte du risque d'accident ?

Le risque d'accident majeur avant et après Fukushima (9 observations de fusion de cœur, minimales ou non, avant l'accident japonais, 12 après)

Model	$\hat{\lambda}_{2010}$	$\hat{\lambda}_{2011}$	$\Delta$
MLE Poisson	6.175e-04	6.66e-04	0.0790
Bayesian Poisson-Gamma	4.069e-04	4.39e-04	0.0809
Poisson with time trend	9.691e-06	3.20e-05	2.303
PEWMA	4.420e-05	1.95e-03	43.216

# Un effet Fukushima Daiichi de grande ampleur



Poisson Exponentially Weighted Moving Average (paramètre d'indépendance : 0,82)  
Escobar-Rangel and Lévêque, *Safety Science*, (2014)

# Interprétation

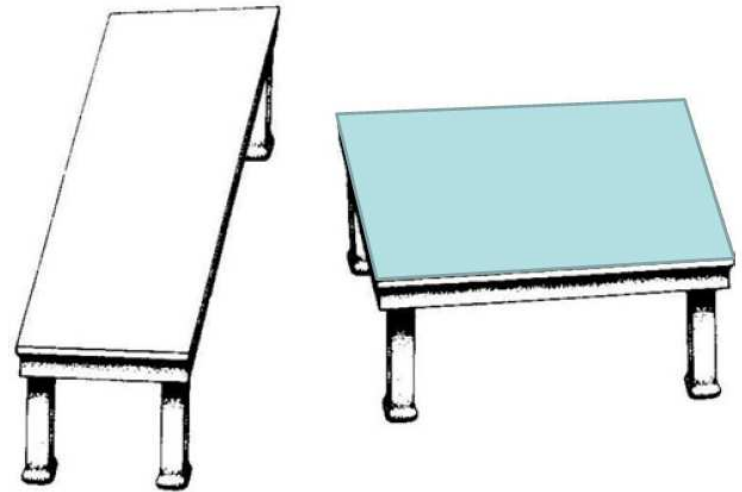
- Le risque d'accident majeur doit être significativement révisé à la hausse à la suite de la catastrophe de Fukushima-Daiichi car celle-ci montre les effets extrêmement négatifs de l'absence d'une autorité de sûreté nucléaire nationale indépendante, compétente, et transparente alors que cette situation ne se rencontre vraisemblablement pas uniquement au Japon
- A contrario, la catastrophe de Fukushima-Daiichi montre que la mise en place partout dans le monde d'autorités de sûreté nucléaire dignes de ce nom serait un facteur puissant de réduction du risque de nouveaux accidents

# Le raisonnement économique appliqué à la réduction du risque nucléaire

- Incitations privées
  - Pas suffisantes, mais à ne pas ignorer : l'amélioration de la sûreté diminue les arrêts de réacteurs, et donc augmente la disponibilité de la centrale
- Régulation ex post au travers des règles de responsabilité
  - Littérature économique appliquée au nucléaire abondante sur ce sujet
  - Pas suffisante en pratique : plafond très bas
  - Pas suffisante en théorie : la responsabilité est toujours de facto limitée par la valeur des actifs de l'opérateur et le patrimoine des actionnaires
- Régulation ex ante
  - Nécessaire du fait des défaillances du marché (externalités et absence d'assurance)
  - Comment fixer l'objectif de sûreté ?
  - Quels instruments pour l'atteindre ?
  - Comment l'atteindre au moindre coût ?

# Décider à partir des probabilités perçues ou calculées ?

- Les travaux de psychologie expérimentale (ex. D. Kahneman, 2011) montrent que notre perception des probabilités est déformée
- Par exemple, la probabilité d'une perte de 0,0001 est perçue comme plus faible qu'une probabilité de 1/10.000 par négligence du dénominateur



# Rappel : La décision rationnelle en incertitude entre théorie et comportement

- Une fonction d'utilité décroissante (Bernouilli, 1738) pour expliquer l'aversion au risque
- Le paradoxe d'Allais (1955) peut être expliqué par des préférences non linéaires en matière de probabilité : surestimation des petites probabilités et sous-estimation des grandes probabilités
- Le paradoxe d'Ellsberg (1961) qui montre que les individus préfèrent le risque à l'incertain
- Bref, la théorie économique de la décision avance en complexifiant la fonction d'utilité pour tenir compte de certains comportements observés

# La probabilité perçue d'accident nucléaire majeur

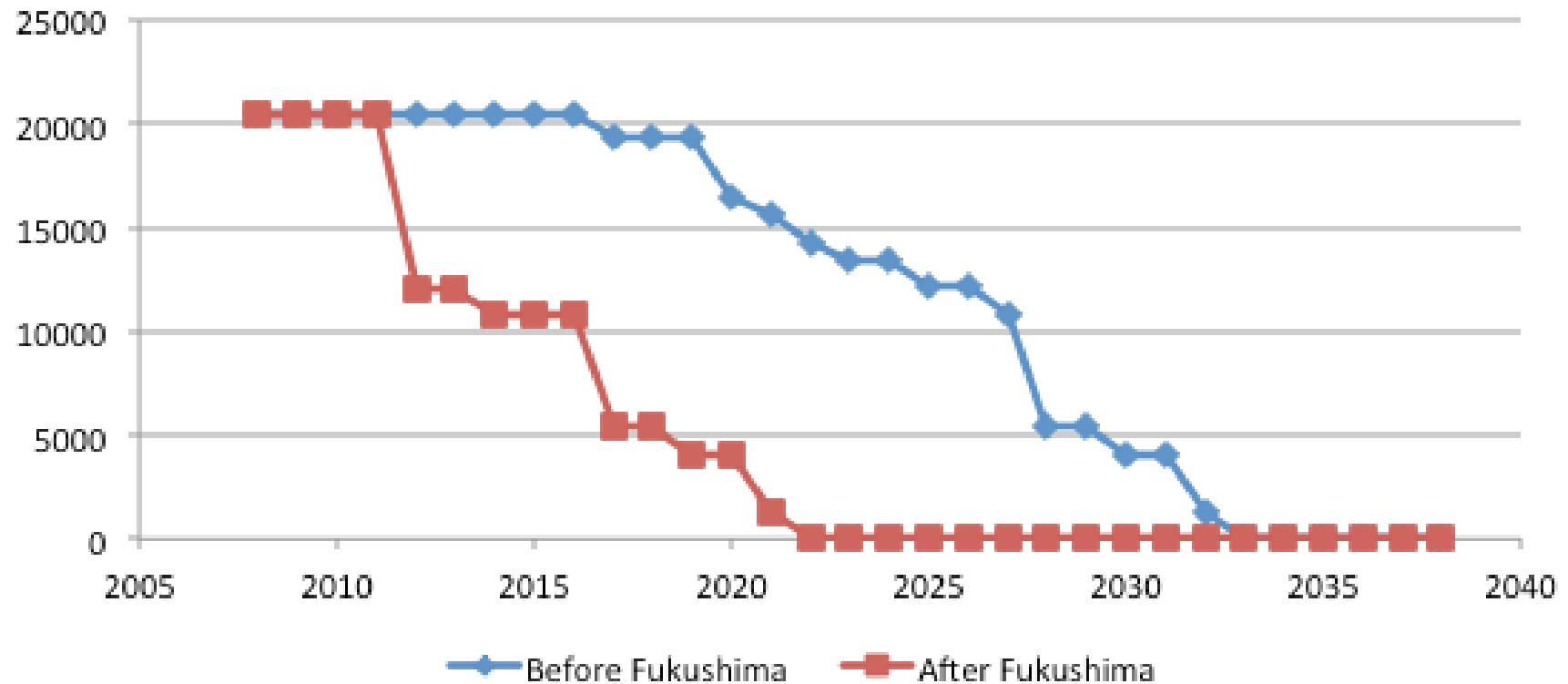
- Événement rare, donc de probabilité perçue surestimée, d'où sur-assurance et demande de protection plus grande
- Événement ambigu, donc biais à retenir la probabilité la plus haute et le niveau de dommage le plus élevé
- Événement effroyable, donc négligence du dénominateur et focalisation sur l'accident lui-même qui laisse une forte empreinte
- D'où des choix entre investissements alternatifs distordus (ex. : plus de charbon ou d'hydraulique car moins d'accidents mortels que pour le nucléaire, alors que c'est l'inverse qui est vrai)
- D'où un risque de surinvestissement en sûreté lorsque les décideurs publics suivent le mouvement



# L'exemple du 11 septembre 2001

- Conséquence immédiate : les images effroyables de l'effondrement des tours jumelles a entraîné une sous-utilisation transitoire de l'avion et une sur-utilisation de la voiture
  - Avec plus de morts dans les accidents de voiture en surnombre que de passagers décédés dans les deux avions (Gigerenzer, 2010)
- Conséquence durable : inflation des mesures de sécurité dans les aéroports du monde entier d'un coût très élevé et d'une efficacité controversée

# L'exemple de l'accélération de la sortie allemande du nucléaire



Keppler (2012) estime à 97,25 milliards d'euros le coût de la fermeture accélérée par rapport au scénario de fermeture progressive. Cette somme correspond au remplacement d'un MWh bon marché à produire par rapport à un MWh moins bon marché et à la perte de surplus pour le consommateur lié au renchérissement du prix de l'électricité

# Conclusions

- De la même façon que **le** coût de l'accident nucléaire et a fortiori **le vrai** coût de l'accident nucléaire n'existent pas, **la** probabilité d'accident nucléaire et a fortiori **la vraie probabilité** d'accident nucléaire n'existent pas
- Calculer les probabilités en combinant les observations d'accident majeur et les connaissances des ingénieurs de sûreté
- Les réformes institutionnelles et juridiques permettant de mettre en place une autorité de sûreté nucléaire, indépendante, compétente, transparente et puissante offrent un moyen à faible coût d'améliorer la sûreté du nucléaire sur la planète
- Convaincre les décideurs publiques de ne pas prendre leurs décisions sur la seule perception des probabilités
- Les autorités de sûreté doivent-elles fixer l'objectif de sûreté ? Doivent-elles tenir compte de la perception des probabilités ou seulement des probabilités calculées par les experts ?