

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 probabilités 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 follows with categories: ACTUALITÉS (highlighted), 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 'POLITIQUES Le 3 juin à 0h00' followed by 'Accident nucléaire : une certitude statistique'. 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

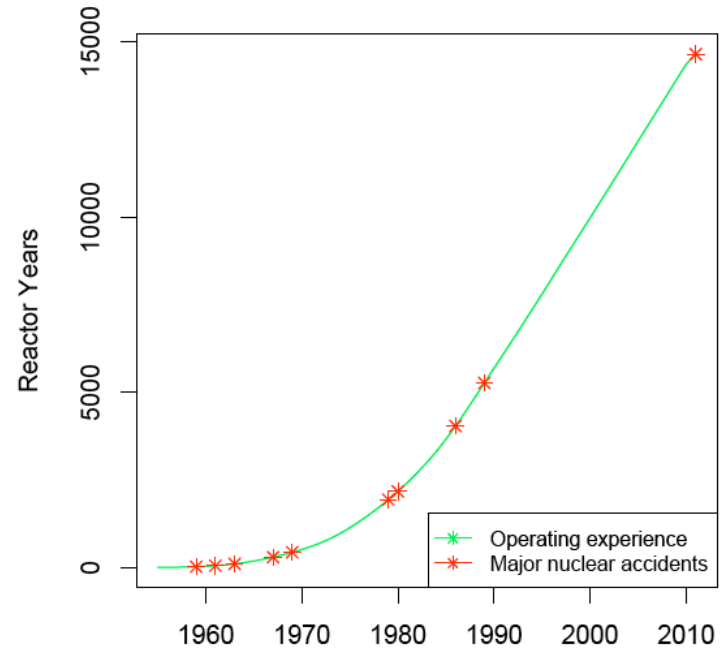
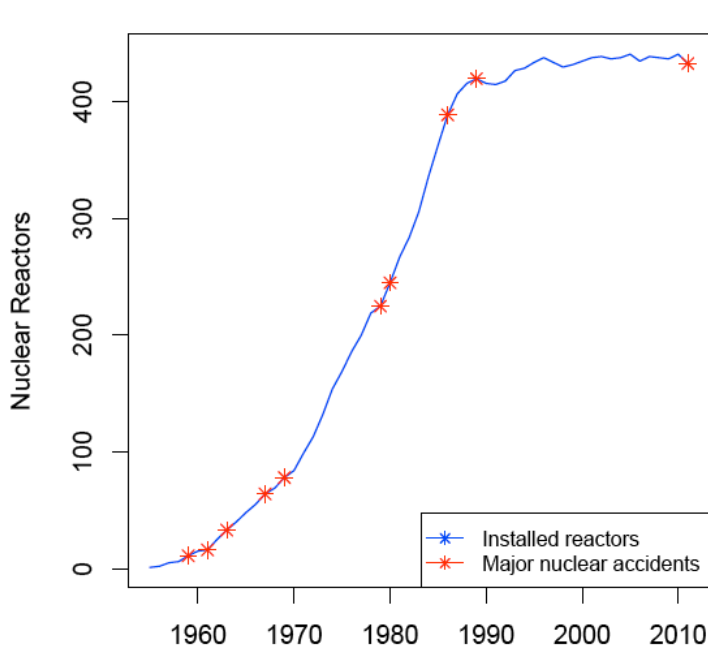


Table : Core melt downs from 1955 to 2011 in Cochran (2011)

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 ?

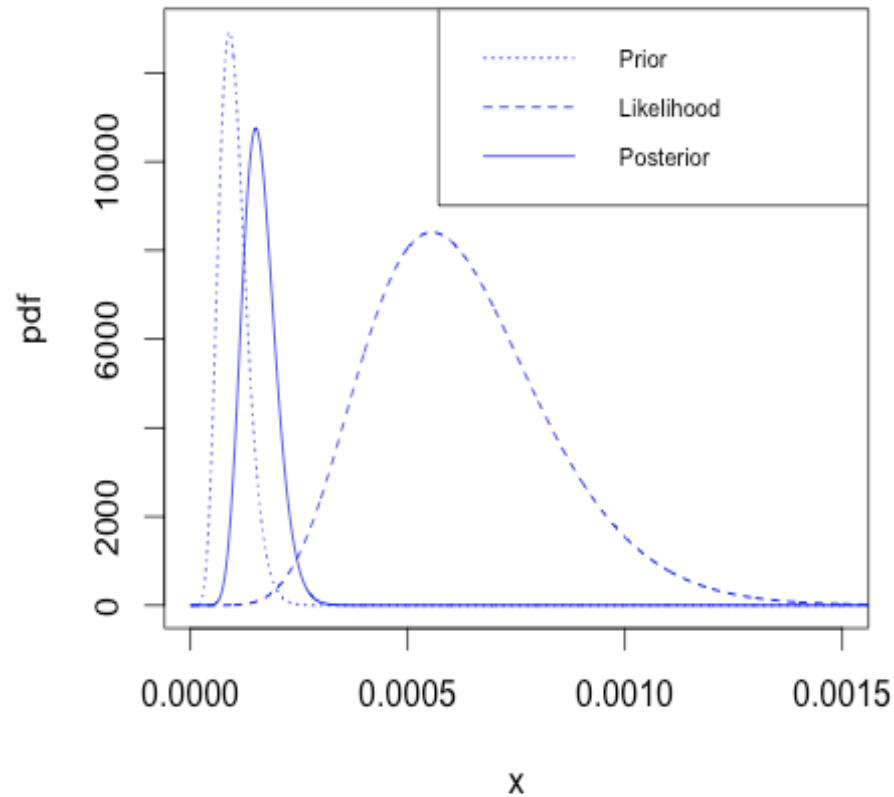
- Keynes, *Traité de probabilité* (1920)
 - Applique l'analyse probabiliste à la logique (probabilité qu'une hypothèse, ou une assertion, soit vraie ou fausse)
La répétition d'événements n'est pas nécessaire
 - La théorie des probabilités a « pour sujet la part de nos connaissances acquises par l'argumentation 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

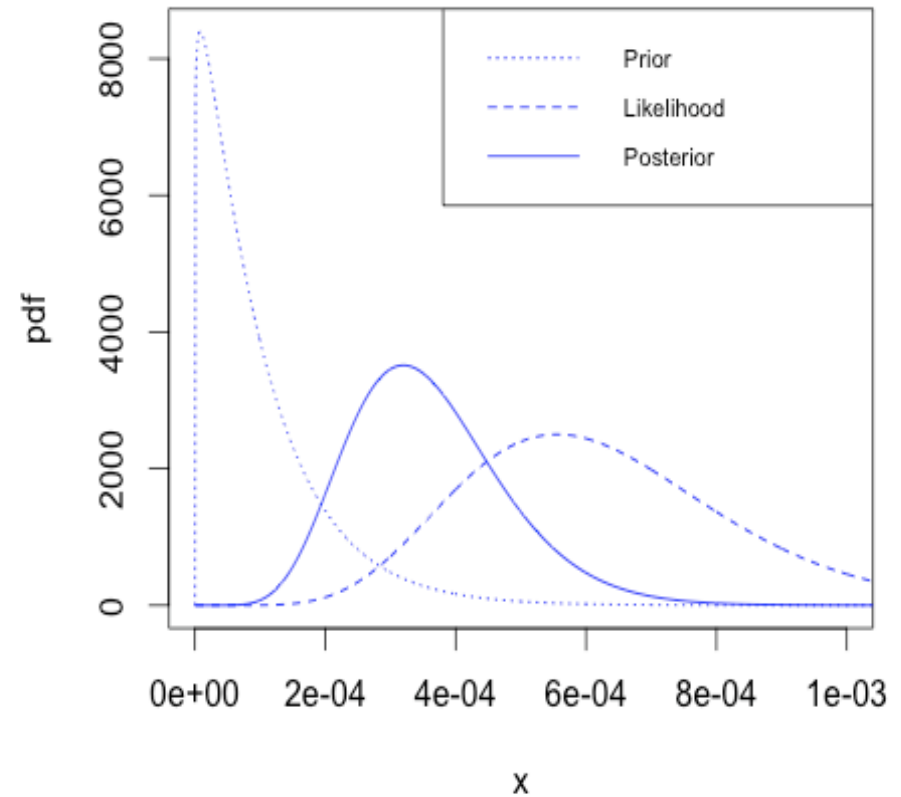
- Quelle est la chance de tirer une boule rouge dans une urne au $n+1$ ^{ème} tirage sachant que les n précédents tirages ont produit k boules rouges ?
- $(k+1)/(n+2)$ selon Laplace (1825)
 - La formule revient à ajouter 2 tirages virtuels, dont l'un a donné une rouge et l'autre une non-rouge, aux n 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

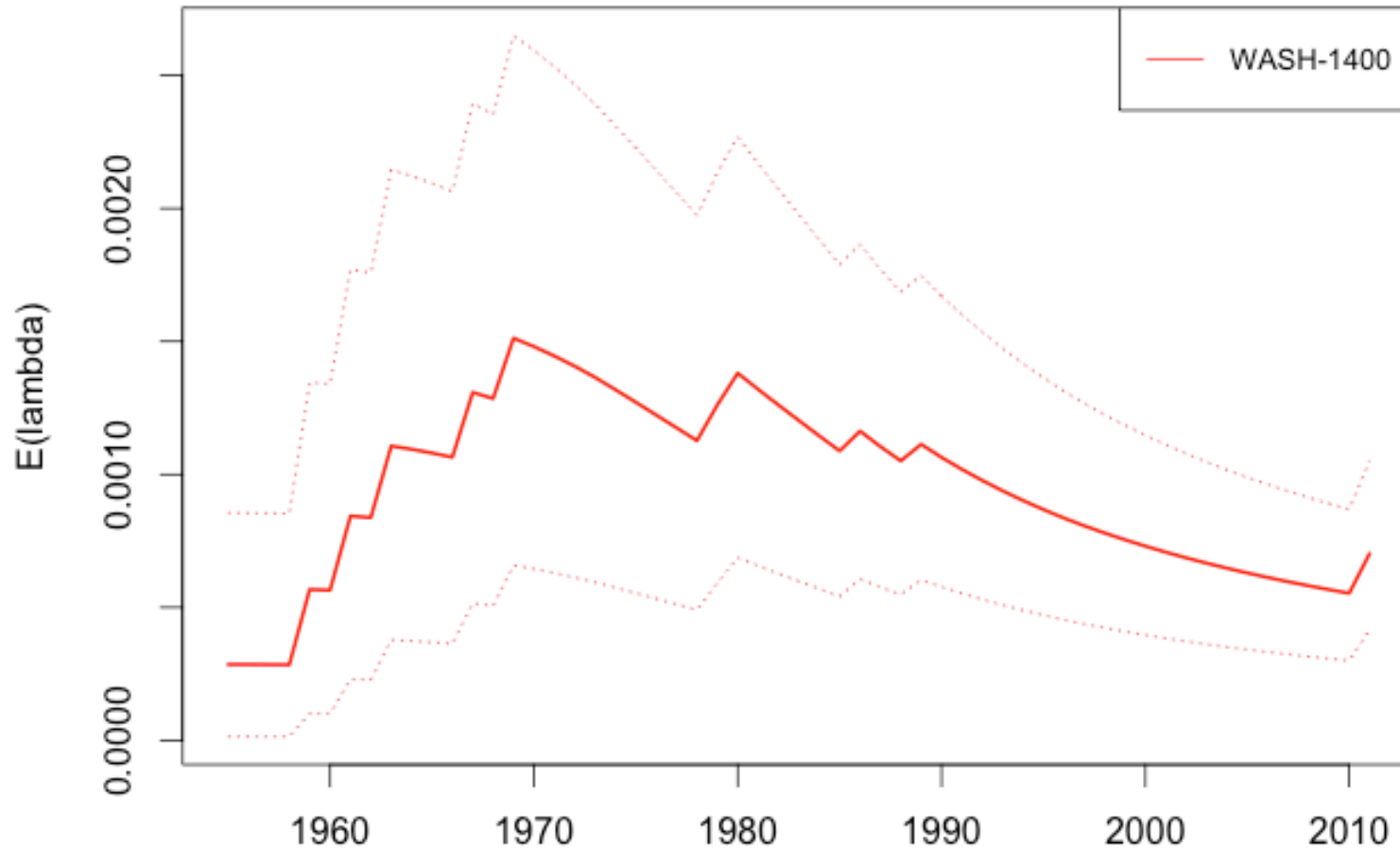
Strong prior



Weak prior



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



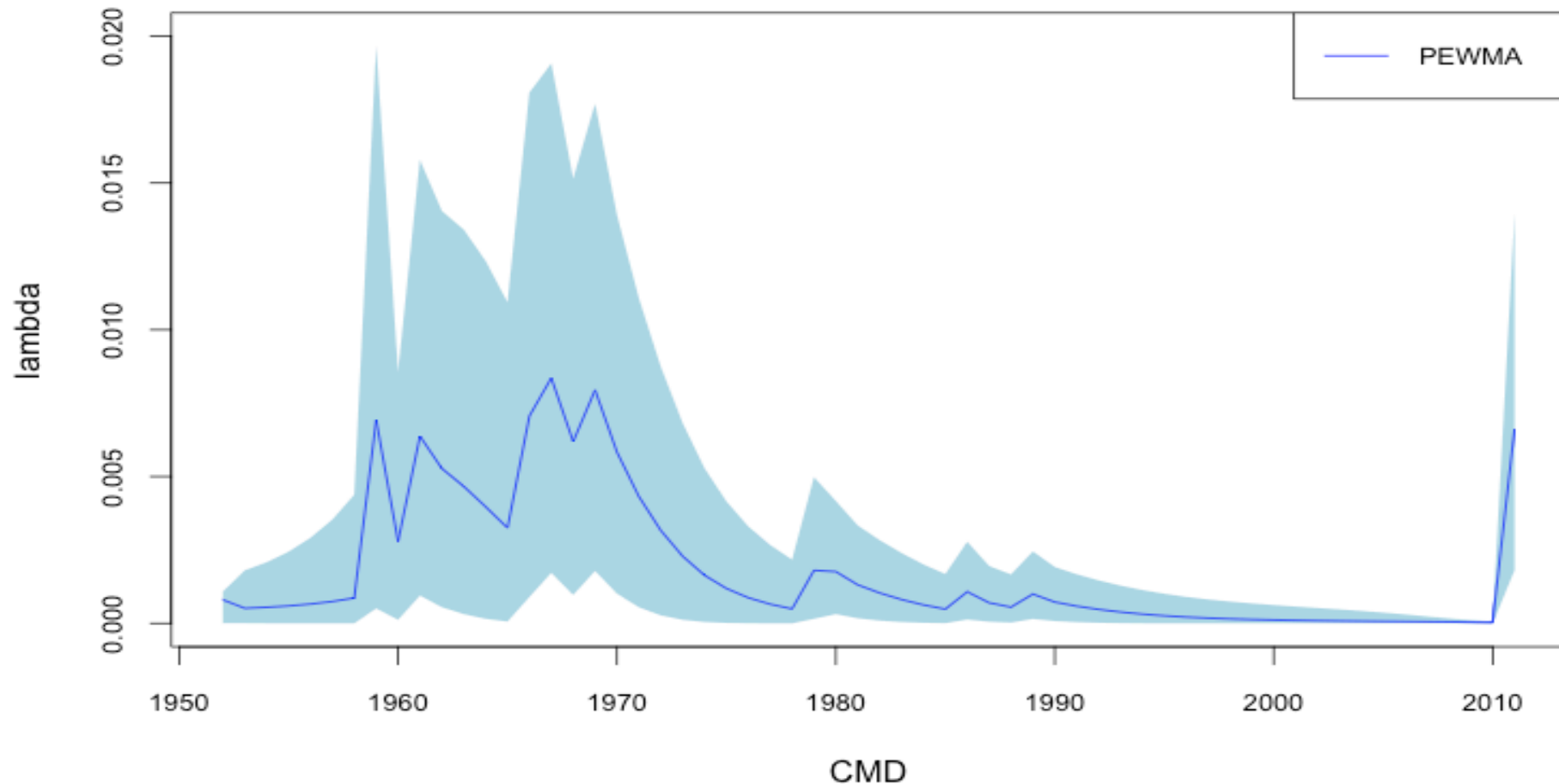
Modèle bayésien Poisson Gamma, Escobar-Rangel and Lévêque, *Safety Science*, (2014)

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	$\hat{\lambda}_{2010}$	$\hat{\lambda}_{2011}$	Δ
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

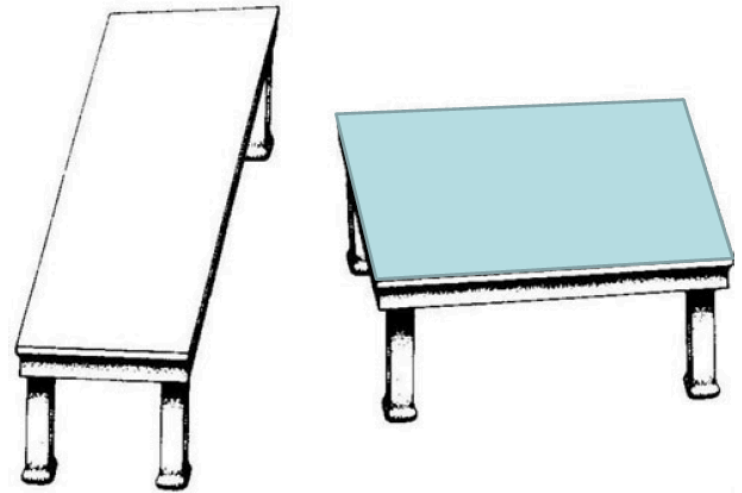
- Le risque d'accident majeur doit être significativement révisé à la hausse à la suite de la catastrophe de Fukushima-Daiichi car celle-ci montre les effets extrêmement négatifs de l'absence d'une autorité de sûreté nucléaire nationale indépendante, compétente, et transparente alors que cette situation 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

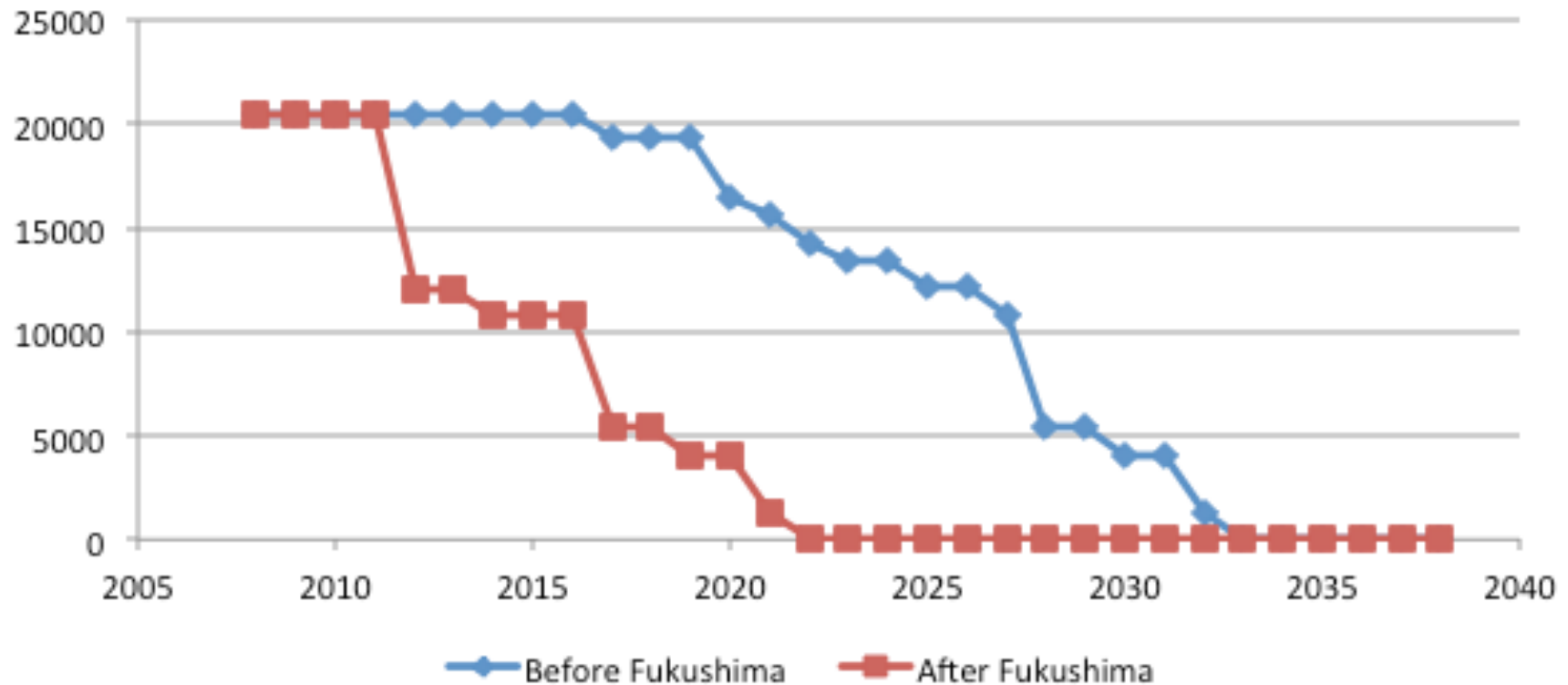
La probabilité perçue d'accident nucléaire majeur

- 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 ?