

Le risque d'accident nucléaire : calcul et perception des probabilités

François Lévêque, Professeur
d'économie à Mines ParisTech

Journée de dialogue sur la transition
énergétique (Cired, 22 octobre 2013)

Fukushima Daiichi et les probabilités

- Les probabilités d'accident nucléaire calculées dans les études 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
- La perception des probabilités d'accident nucléaire semble écarter tout calcul et toute rationalité
 - Par exemple, « il y a plus de 100% de chances qu'un accident se produise d'ici 30 ans en Europe » !!!
- Comment expliquer (et réduire) ces écarts entre fréquence observée, probabilité calculée et accident perçu ?

Réponse

- En conjuguant les observations d'accident et les autres éléments de connaissance de la sûreté
 - Eviter à la fois l'empirisme aveugle (seules les observations d'accident comptent) et l'expertise scientifique bornée (seules les études probabilistes de sûreté valent)
- En continuant d'enrichir les analyses théoriques de la décision en incertitude par les observations sur les comportements
 - En particulier sur les biais cognitifs dans l'évaluation des probabilités

Plan et références

- I La combinaison des fréquences d'accident observée et calculée
- II La prise en compte des biais de perception des probabilités dans la théorie de la décision
- Lina Escobar Rangel and François Lévêque, How Fukushima-Daiichi core meltdown changed the probability of nuclear accidents? *Safety Science*, Forthcoming 2014
- François Lévêque, *Nucléaire On/Off, analyse économique d'un pari*, Editions Dunod, chapitres 5 et 6, novembre 2013

Rappel de définitions

- **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, par exemple $p(n)=p(b)$
- **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 observations

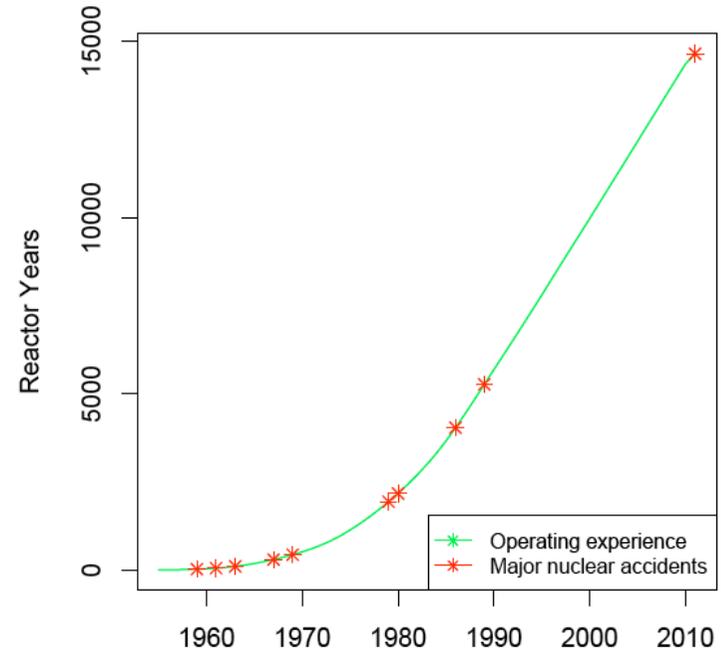
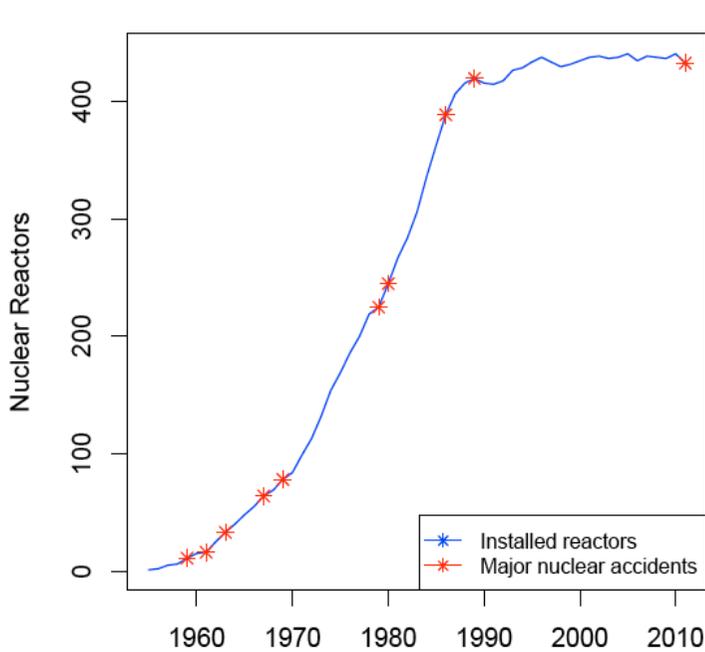


Table : Core melt downs from 1955 to 2011 in Cochran (2011)

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

Les modèles

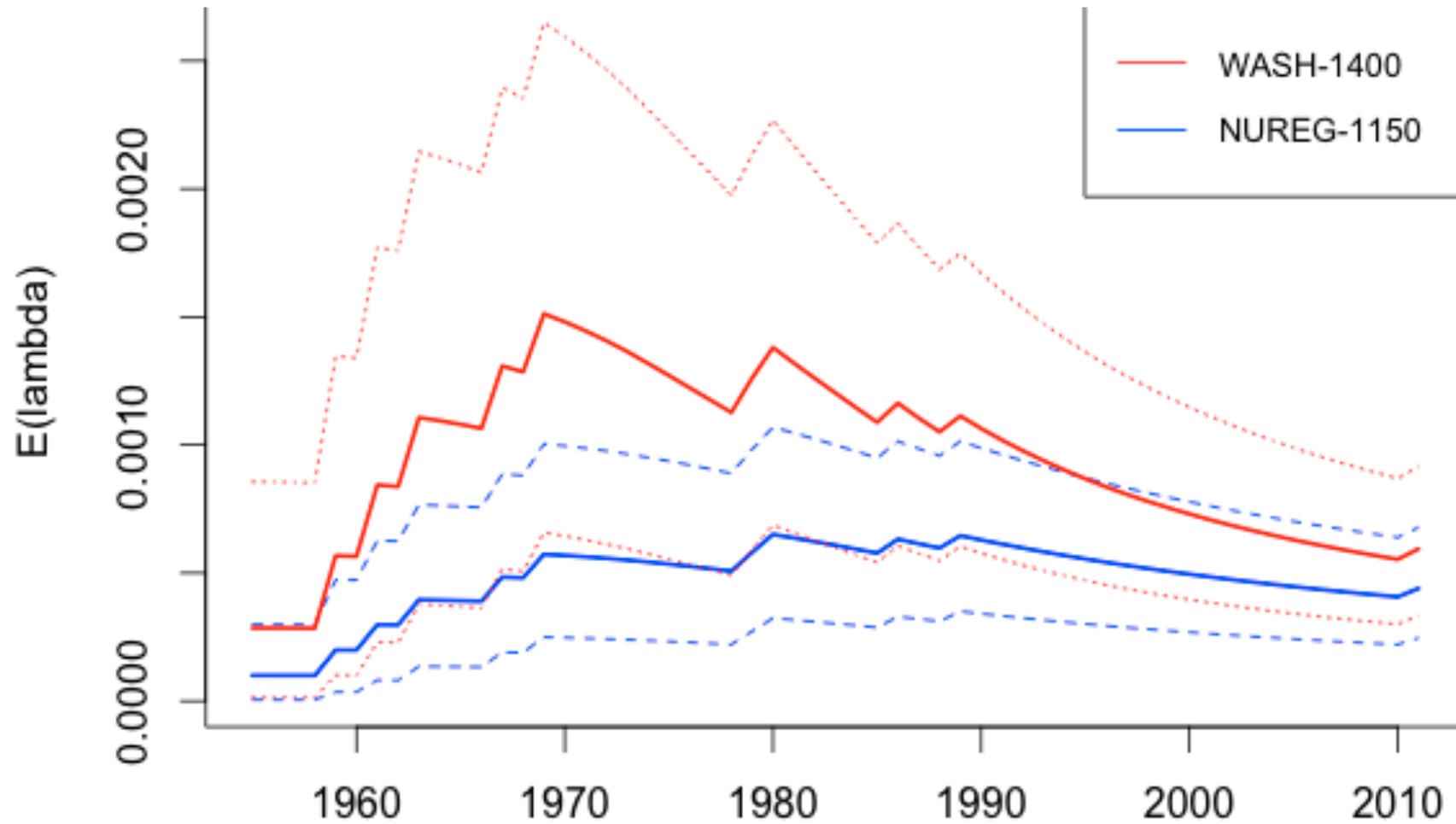
Dans quelle mesure l'accident de Fuskushima Daiichi nous conduit-il à réviser les calculs de probabilité de fusion de cœur ?

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

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)

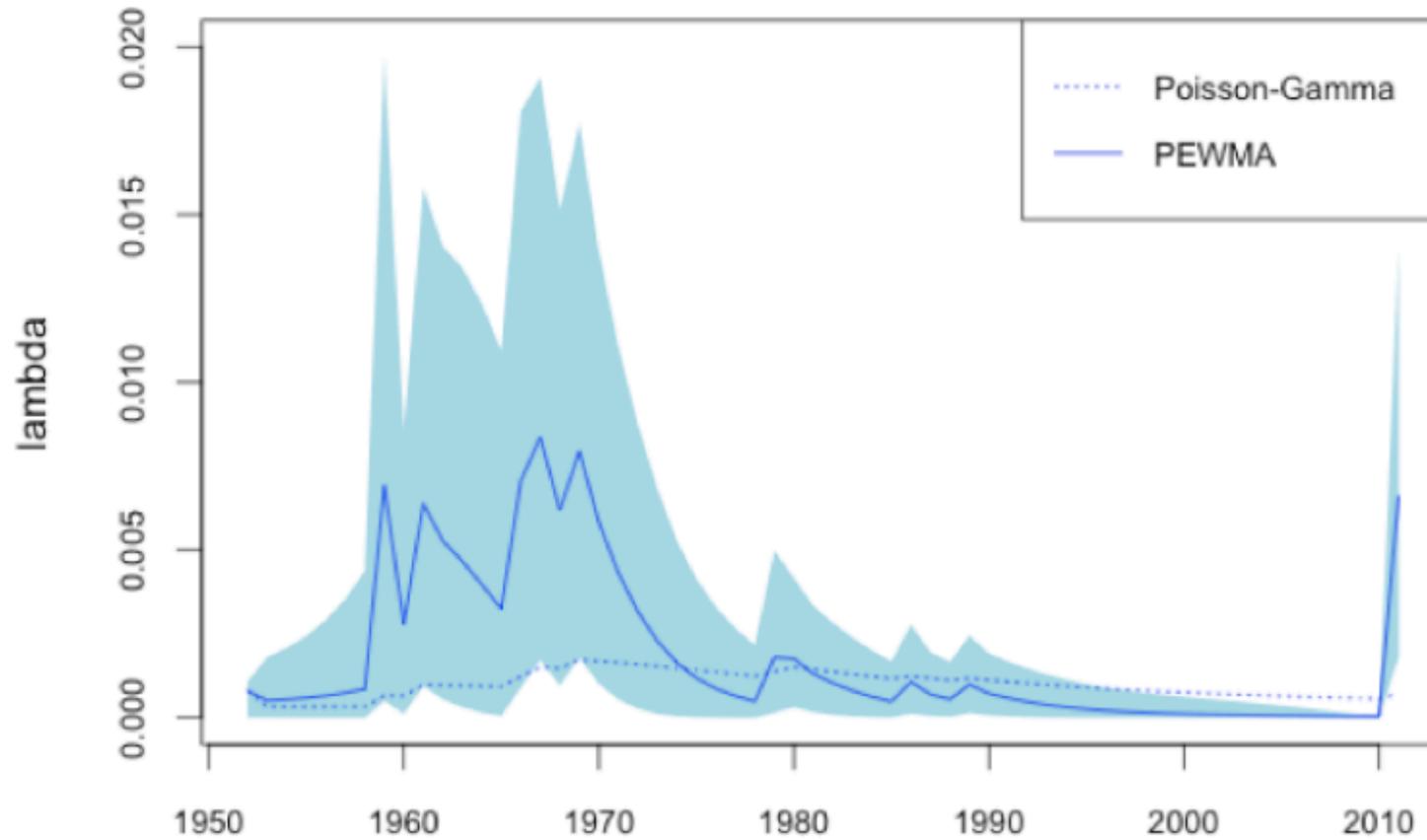
Modèle bayésien Poisson Gamma (données d'EPS américaines)



(Source : Lévêque et Rangel, 2014)

Modèle PEWMA

Poisson Exponentially Weighted Moving Average (paramètre d'indépendance : 0,82)

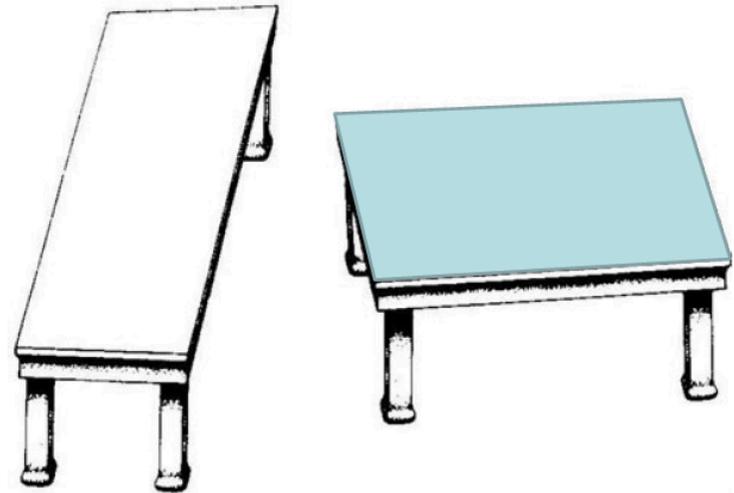


La décision rationnelle en incertitude : théorie et comportement

- 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 psychologie expérimentale : les biais de perception des probabilités

- L'individu ne maximise ou n'optimise plus, il décide en suivant des routines et en prenant des raccourcis (heuristiques)
- Observer la déformation des probabilités devient un moyen d'accès pour comprendre comment fonctionne notre cerveau
 - ex. la probabilité d'une perte de 0,0001 est perçue comme plus faible qu'une probabilité de 1/10.000 par négligence du dénominateur



Le risque perçu 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

Les conséquences de l'attentat du 11 septembre 2001

- Immédiates : 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)
- Durables : inflation des mesures de sécurité dans les aéroports du monde entier d'un coût très élevé et d'une efficacité controversée

Conclusions

- Mêler observations et autres éléments de connaissance pour mieux approcher les probabilités d'accident
- Rapprocher théorie de la décision et biais de perception des probabilités
- Les probabilités perçues d'accident resteront cependant durablement écartées de celles calculées par les experts
- La décision publique doit-elle tenir compte des probabilités perçues ? Doit-elle les corriger ? Doit-elle se fonder uniquement sur les probabilités calculées ? Tenir compte des deux ? Comment ?