A propos d'une probabilité supérieure à 1 d'avoir un accident nucléaire majeur.

Claudine Schwartz

Voici un extrait d'un article paru le 5 juin dans le journal Libération (http://crepy-en-valois.over-blog.fr/article-benjamin-dessus-et-bernard-laponche-l-accident-nucleaire-est-une-certitude-statistique-75800575.html), dont nous avons mis en gras la partie la plus poétique :

Les résultats de l'approche théorique, issus des travaux des experts de la sûreté nucléaire, nous indiquent que, pour les réacteurs actuellement en fonctionnement dans le monde, on distingue deux types d'accidents : «l'accident grave » avec fusion du cœur du réacteur, dont la probabilité serait de moins de 1 pour 100 000 « année.réacteur » (un réacteur fonctionnant pendant un an) et «l'accident majeur », accident grave non maîtrisé et conduisant à d'importants relâchements de radioactivité, dont la probabilité serait de moins de 1 pour 1 million d'année.réacteur…..

…. La France compte actuellement 58 réacteurs en fonctionnement et l'Union européenne un parc de 143 réacteurs. **Sur la base du constat des accidents majeurs survenus ces trente dernières années, la probabilité d'occurrence d'un accident majeur sur ces parcs serait** donc de 50% pour la France et **de plus de 100% pour l'Union européenne. Autrement dit, on serait statistiquement sûr de connaître un accident majeur dans l'Union européenne au cours de la vie du parc actuel et il y aurait une chance sur deux de la voir se produire en France.**

E.Ghys (http://images.math.cnrs.fr/Accident-nucleaire-une-certitude.html) propose un calcul de probabilité (juste celui-là !) en utilisant une loi binomiale de paramètre p=0,0003, où p est la probabilité qu'un réacteur ait un accident majeur en un an. Il trouve alors que la probabilité d'avoir au moins un accident majeur en 30 ans en Europe est 72%. C'est moins que « plus que 100% » mais terriblement élevé ! E. Ghys s'interroge donc sur le bien fondé de son calcul et une discussion est engagée, à la suite de son texte.

La démarche d'E. Ghys nous semble être de voir ce qui se passerait dans une situation fictive qui permettrait de parler de la probabilité p d'accident majeur par an et par réacteur. Une telle situation repose en particulier les hypothèses suivantes, vraiment fantaisistes :

-les réacteurs ne s'usent pas et leur sécurité ne s'améliore pas (p ne dépend pas du temps).
-on exclue la possibilité qu'il y ait plusieurs accidents graves la même année dans un même réacteur (ce serait le cas d'un réacteur qui fond, est remplacé et le nouveau fondrait de nouveau, le tout en moins d'un an) ;
-les accidents se produisent de manière indépendante (on exclut les accidents en chaîne ou une cause telle un tsunami qui produirait plusieurs accidents majeurs).
-tous les réacteurs sont identiques en termes de probabilité d'accident majeur et leur nombre ne varie pas dans la fenêtre de temps d'observation choisie.

Faire ce type de calculs[1] relève pour nous d'une lecture active des quelques chiffres qui nous sont fournis (31 ans de fonctionnement, 450 réacteurs dans le monde, 143 en Europe et 5

[1] Dans le même ordre d'idée, cette démarche peut être rapprochée de celle qui consiste à comparer le taux de réponse correctes d'un étudiant à un QCM à ce qui se passerait s'il répondait au hasard : cela ne signifie pas qu'on « modélise » son choix par une loi équirépartie sur l'ensemble des réponses possibles, mais simplement

accidents graves). **Mais il convient de savoir ce qu'on fait : on se place ici délibérément dans un monde fictif ! Le résultats des calculs faits ne parlent que de ce monde fictif et non de « la réalité », mais les procédures employées peuvent aider à mieux appréhender certains phénomènes en jeu dans notre monde.**

Comme le calcul avec la loi binomiale suppose l'indépendance entre les accidents considérons qu'on a 3 accidents majeurs et non ou 5. C'est-à-dire qu'on redéfinit le terme d'accident majeur en regroupant en un seul accident le cas de plusieurs réacteurs entrant en fusion en chaine ou détruits par une même cause.

On peut approximer la loi binomiale par une loi de Poisson, ce qui donne une probabilité d'avoir au moins un accident pendant 31 ans égale à 1- exp(3×143/450)=0,61. Cette probabilité est terriblement élevée- dans le monde fictif où nous nous plaçons !

En fait, dans les calculs faits avec la loi binomiale (ou la loi de Poisson), le regard porté sur les observations dont on dispose me gêne. Les auteurs de l'article de Libération indiquent ce qui a déterminé les dates de début et de fin de leur fenêtre d'observation : début lors de l'accident de Three Mile Island (mars 1979) et fin lors de l'accident de Fukushima (mars 2011)[2]. On n'a donc pas observé 3 accidents, mais 2 durées inter-accidents [3] :
-7 ans entre Three Mile Island etTchernobyl (avril 1986).
-25 ans entre Tchernobyl et Fukushima.

Reprenons cette lecture des données : 450 réacteurs, deux durées inter-accidents, 7 et 25 ans. On va reprendre les hypothèses déjà faites, sans toutefois discrétiser le temps en tranches d'un an. Dire qu'un réacteur ne s'use pas et ne s'améliore pas[4], c'est dire ici que sa durée de fonctionnement sans accident majeur suit une loi exponentielle de paramètre $1/\mu$ (densité $(1/\mu)\exp(-x/\mu)$), où le paramètre μ est l'espérance (ou moyenne théorique) de fonctionnement sans panne. On considère des réacteurs identiques (même valeur de μ pour chacun d'eux) et les accidents indépendants les uns des autres. On démontre alors que la loi de durée de fonctionnement sans accident majeur du système composé de *n* réacteurs est une loi exponentielle de paramètre n/μ (densité $(n/\mu)\exp(-nx/\mu)$, espérance μ/n). Le modèle a minima serait ainsi un processus de Poisson de paramètre n/μ. On démontre alors que la probabilité du nombre d'accidents pendant une durée τ est une loi de Poisson de paramètre $n\tau/\mu$. La moyenne des deux (!!) durées observées est 16 ans. On va prendre comme paramètre du processus de Poisson $1/\mu$, avec $16=\mu/450$, soit $\mu=7200$ ans. (La « durée moyenne de fonctionnement sans accident majeur d'un réacteur » est ici un raccourci de la phrase « la durée moyenne de fonctionnement sans accident majeur d'un site contenant un réacteur » ; la durée de vie d'un réacteur donné est petite au regard de 7200 ans et le remplacement de réacteur fait partie, dans nos hypothèses, de la maintenance du site).

---

qu'on compare son résultat à celui d'un automate répondant au hasard. De même, on fait en physique des calculs avec des situations idéalement sans frottement pour avoir des points de repère.

[2] Entre mars 1979 et mars 20011, il s'est écoulé 32 ans et non 31 ans, mais cela n'a pas d'impact sur les résultats numériques.

[3] Pour prendre une analogie : si des arbres sont assez régulièrement espacés sur un chemin, qu'on part d'un arbre, qu'on marche jusqu'à observer un autre arbre à une distance *d* du premier, on va considérer que la distance entre les arbres est *d* et non d/2.

[4] Les accidents sont le fait d'une erreur humaine, d'un événement extérieur, d'un défaut jamais repéré, etc.

La probabilité d'avoir au moins un accident majeur pendant 30 ans avec 143 réacteurs est alors : 1-exp(-143×30/7200)=0,45. Même si c'est loin du « plus que l'unité » de l'article dans Libération et différent du 0,72 calculé avec une loi binomiale, cette probabilité reste énorme (mais nous sommes dans un monde fictif, ne l'oublions pas !).

Comme on ne peut pas se fier à l'estimation du paramètre μ faite avec deux valeurs, regardons les résultats pour quelques autres valeurs. Les deux tableaux ci-dessous donnent, en fonction de la durée moyenne μ de fonctionnement sans panne d'un seul réacteur (réacteur fictif rappelons le), la probabilité d'avoir au moins un accident majeur en 30 ans, 50 ans et un siècle pour un seul réacteur (tableau 1) et pour 143 réacteurs (tableau 2).

μ	*Prob. au moins un accident* 1 réacteur, 30 ans	*Prob. au moins un accident* 1 réacteur, 50 ans	*Prob. au moins un accident* 1 réacteur, 100 ans
1000	0,0296	0,0488	0,0952
5000	0,0060	0,0100	0,0198
10 000	0,0030	0,0050	0,0100
100 000	0,0003	0,0005	0,0010
1 000 000	0,0000	0,0000	0,0001

Tableau 1

En fait, si q est la probabilité qu'il n'y ait pas de panne sur un réacteur en un an (q=exp(-1/μ)), la probabilité, pour le processus de Poisson considéré, de ne pas avoir de panne en n année est exp(-n/μ))=q^n (la loi du nombre de pannes étant alors une loi de Poisson de paramètre n/μ). Même si q est proche de 1, comme q<1, la décroissance de q^n vers 0 quand n croit est exponentiellement rapide et 1- q^n croit « rapidement ».

Face à l'éventualité d'un accident lié à une technologie, il convient d'estimer la probabilité qu'il survienne et son coût. On peut alors comparer le produit de sa probabilité par son coût avec le bénéfice apporté par cette technologie (ou le coût de son arrêt). Dans le cas du nucléaire, le coût d'un accident majeur n'est absolument pas chiffrable (et celui de l'arrêt de la technologie peut être pas non plus). Il est donc difficile de décider si une probabilité égale à 0,02 peut être considérée comme acceptable !

μ	*Prob. au moins un accident* 143 réacteurs, 30 ans	*Prob. au moins un accident* 143 réacteurs, 50 ans	*Prob. au moins un accident* 143 réacteurs, 100 ans
1000	0,986	0,999	1,000
5000	0,576	0,761	0,943
10 000	0,349	0,511	0,761
100 000	0,042	0,069	0,133
1 000 000	0,004	0,007	0,014

Tableau 2

Dans notre monde fictif, pour 143 sites avec un réacteur, même si chacun d'eux à une durée moyenne de fonctionnement sans panne égale à 10 000 ans, on a plus d'une chance sur 3 d'avoir un accident grave en 30 ans. En fait, si r est la probabilité de ne pas avoir d'accidents pendant un certain temps, la probabilité de ne pas en avoir pendant le même temps avec k centrales est $r^{k.}$ En effet, avec les hypothèses faites (indépendance des accidents et même valeur de μ pour chaque réacteur) le fonctionnement du système composé de k réacteurs est encore un processus de Poisson, mais de paramètre k/μ

Les calculs ci-dessus sont ceux qu'on peut faire a minima, sans être spécialiste du nucléaire et « sur un coin de table », pour réfléchir au problème. Ils ne font que montrer comment est susceptible de se propager le risque (en terme de probabilités) si le nombre de réacteurs augmente et sur une période qui s'accroît.

Par ailleurs, il est clair qu'on ne souhaite pas du tout disposer d'une longue série de durées inter-accidents (on ne serait peut-être plus là pour les exploiter). Pour modéliser l'apparition d'accidents ou même établir des comparaisons avec des situations plus ou moins idéales, les spécialistes utilisent donc d'autres démarches (conduisant à des lois de Pareto notamment).

Enfin, imaginer toutes les causes possibles d'accidents, même les plus rarissimes, et faire en sorte d'éviter l'accident majeur face à une telle cause reste le plus fondamental. On peut se faire peur ou se rassurer avec des probabilités, mais penser le risque nucléaire ne relève quand même pas essentiellement d'un calcul de probabilités, car quel serait le seuil en dessous duquel la probabilité d'un accident majeur serait acceptable ?