

Société de Calcul Mathématique SA

Outils d'aide à la décision

depuis 1995



Du bon usage des probabilités

pour la sûreté industrielle

par Bernard Beauzamy

05/2015, révisé 07/2020

Résumé Opérationnel

Nous analysons ici l'usage qui peut être fait des méthodes probabilistes, dans un contexte de sûreté industrielle. Notre expérience, sur 25 ans, est que les méthodes probabilistes sont mal employées. La difficulté tient au fait que les lois de la Nature sont de nature probabiliste (on n'est jamais sûr que tel séisme se produira ou ne se produira pas), tandis que les réglementations sont nécessairement déterministes : telle construction doit avoir telle hauteur, tel tuyau tel diamètre, etc.

Les Industriels se mettent souvent en situation difficile (devant alors demander des dérogations) parce qu'ils ont mal anticipé la variabilité des lois de la Nature. Les "études amont" (en l'occurrence la collecte de l'information) ont été insuffisantes et on se retrouve trop souvent en situation non-conforme. Cette partie du travail devrait être considérablement renforcée et validée.

Mais ensuite, lorsque les lois de la Nature sont convenablement décrites, le cahier des charges qui sera rédigé ne devra plus avoir aucun caractère probabiliste. Il sera nécessairement déterministe, tiendra compte des variabilités naturelles et incorporera les situations rares et difficiles.

Nous traitons quatre exemples en détail : le fonctionnement de la centrale EDF de Cruas lorsque le débit du Rhône est faible, les crues de la Vienne, la sismicité, les débris spatiaux. A chaque fois nous montrons en quoi consiste un bon cahier des charges.

Nous avons donc deux étapes, nécessairement distinctes : utilisation des lois de probabilité pour décrire les lois de la Nature, puis rédaction d'un cahier des charges entièrement déterministe.

I. La description du problème : le cahier des charges

Un problème de sécurité industrielle concerne par définition le bon fonctionnement d'un matériel, d'un équipement, dans certaines conditions, et sa résistance à certaines "agressions" (températures extrêmes, séismes, etc.). Dans ce dernier cas, l'équipement peut être en fonctionnement ralenti, voire à l'arrêt. Il faut alors démontrer que, dans les conditions définies par le cahier des charges, il n'y aura pas de dommages aux populations, de rejets dans l'environnement, etc.

Nous allons traiter quatre exemples, assez différents, qui montrent bien en quoi les méthodes probabilistes permettent de définir un cahier des charges, nécessairement déterministe.

A. Les basses-eaux du Rhône

Pour une centrale nucléaire, comme pour tout équipement industriel, les conditions de bon fonctionnement sont en général assez faciles à définir.

L'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) définit des normes, qui doivent ensuite être respectées par l'exploitant. Prenons l'exemple des effluents radioactifs : ce sont des gaz ou des liquides contenant des substances radioactives, sous-produits d'un processus industriel ou de laboratoire. Ils peuvent être recyclés, traités ou rejetés dans l'environnement après que leur radioactivité a été réduite par des dispositifs appropriés. La réglementation est décrite dans le décret 95-540 du 04/05/95. L'exploitant a besoin d'une autorisation qui lui donne les limites annuelles imposées, ainsi que les conditions de rejet (condition de débit, limites de l'activité, etc.).

Les questions se posent lors de l'apparition de circonstances exceptionnelles : température très basse, ou bien très élevée, ou forte sécheresse, pendant un certain temps. Par exemple, en 2011, la centrale EDF de Cruas a dû demander des dérogations, en ce qui concerne le rejet d'effluents, très faiblement radioactifs, lorsque le débit du Rhône est tombé à 350 m³/s (le seuil bas "normal" est fixé à 500 m³/s). Une quantité d'eau insuffisante, et une température trop élevée, nuisent également au refroidissement de la centrale.

Ici, nous avons une réglementation contraignante : interdiction de tout rejet si le débit est inférieur à 500 m³/s, mais à laquelle on peut demander des dérogations. Ce principe n'est jamais sain et il est mal vu de l'opinion publique : pourquoi le seuil de 500 m³/s et pourquoi la dérogation ? A quoi bon fixer un seuil et une réglementation, si celle-ci est contournée par une dérogation dès que le seuil est franchi ?

C'est ici qu'une approche probabiliste permet d'éclairer la décision, parce qu'elle tient compte de la variabilité naturelle, ce que ne fait pas l'approche déterministe.

Pour mettre en œuvre une telle approche, on procédera de la manière suivante :

- Déterminer la probabilité que le Rhône ait un débit inférieur à 500 m³/s ; plus précisément, en rangeant les débits par tranche de 50 m³/s, déterminer la probabilité des tranches 200-250, 250-300, etc.

Ceci est fait en regardant un historique, aussi long que possible : dix ou vingt ans ne suffisent pas, contrairement à ce que l'on voit souvent faire. Les extrêmes climatiques doivent être recherchés sur de longues périodes ; comme pour les séismes, mille ans paraissent être la bonne échelle d'investigation.

Bien sûr, on ne mesure pas exactement le débit du Rhône depuis mille ans (cent ou cent cinquante ans de mesures exactes, au maximum), mais les épisodes de forte sécheresse ont laissé une trace dans la mémoire collective, dans les écrits, dans les actes enregistrés dans les mairies, etc. On peut alors reconstituer, "à dire d'expert", un débit approximatif, et ceci suffit pour l'objectif visé.

- On documente aussi la durée de la période d'étiage : combien de jours (approximativement) a-t-on observé chaque tranche de débit définie ci-dessus ?
- On recherche la composition naturelle du Rhône pendant ces périodes, en amont de la centrale.

Bien entendu, lorsque le débit est faible, le fleuve est beaucoup plus chargé en débris de toute sorte. Il n'est pas certain que cette analyse ait été correctement faite lorsque les réglementations ont été décidées.

Le Rhône charrie naturellement environ 30 tonnes d'uranium par an, soit 80 kg par jour (chiffres à vérifier). Il faudrait préciser ces valeurs en période d'étiage, et les déterminer pour les autres éléments susceptibles d'apparaître dans les rejets, en particulier le tritium.

- On dispose alors d'un ensemble de données, de nature probabiliste, qui est mieux approprié à la prise de décision que ne l'est un seuil brutal. On pourra proposer, par exemple, la chose suivante : en période d'étiage 350-400 m³/s, le rejet dû à la centrale (pour chaque catégorie de produit) ne doit pas dépasser 10% de la valeur naturelle.

L'analyse préliminaire de la variabilité du phénomène est le premier apport des probabilités ; cette analyse aide à prendre conscience du fait que la Nature est éminemment changeante.

B. Les crues de la Vienne

Prenons un exemple d'une autre nature. Lors de notre contrat en 2013 avec Vinci Construction Grands Projets (construction de la LGVSEA, ligne TGV Paris-Bordeaux), Vinci était confronté à la difficulté suivante : démontrer que l'impact de la construction de la ligne, en cas de crue de la Vienne, n'excéderait pas un centimètre sur toutes les habitations. En d'autres termes, on se trouve en présence d'une réglementation totalement déterministe et très contraignante : soit une crue quelconque, de hauteur inconnue ; il s'agit de montrer que l'effet des ouvrages d'art (ponts, qui ralentissent l'écoulement de l'eau) ne se traduira pas par une augmentation de hauteur de crue de plus d'un centimètre. Une telle démonstration est de fait totalement impossible. Nous avons fait observer qu'elle n'avait aucun sens, dans la mesure où la hauteur de crue elle-même est inconnue ; elle est évaluée à 0.5 m – 2 m, sans qu'on puisse la préciser davantage.

Il faut bien comprendre ici que c'est la Nature qui fait la crue sur la Vienne et que c'est la même Nature qui fait la sécheresse sur le Rhône ; l'homme n'y est pour rien. Il ne faut donc pas fixer la réglementation sur des valeurs absolues, qui n'ont aucun sens (tel rejet, telle hauteur de crue), mais en relatif, par rapport aux variations imposées par la Nature. On peut proposer que l'impact de la construction ne se traduise pas par une élévation supplémentaire de plus de 10% ; de la même manière, réglementer les rejets pour qu'ils n'excèdent pas 10% de ce que fait la Nature.

On dispose à ce stade d'un cahier des charges fonctionnel, que les probabilités ont aidé à constituer. Nous allons voir de la même manière comment traiter la sismicité.

C. La sismicité

L'usage des probabilités est indispensable lorsqu'il s'agit de rendre compte de notre ignorance, pour un phénomène quelconque. On ne doit jamais attribuer une valeur précise à ce que l'on ne connaît pas, mais utiliser une loi de probabilité (peu importe à ce stade comment elle est définie). Par exemple, pour représenter la naissance d'un séisme dans une zone, une année donnée, on pourra dire qu'on attribue la probabilité 10^{-3} (par an) à une magnitude entre 4.5 et 5, la probabilité 10^{-4} à une magnitude entre 5 et 5.5, 0 au-delà. Peu importe les chiffres exacts : nous montrons ainsi que nous ne savons pas exactement quelle sera la magnitude du séisme. En général, une telle loi de probabilité se construit à partir d'un historique des séismes dans la zone en question ; c'est exactement la même chose avec les crues ou les étiages, vus précédemment.

L'ensemble de la documentation ayant conduit à construire cette loi de probabilité doit être communiqué aux Autorités de Sécurité : voici ce que nous savons de l'historique du phénomène. Les données doivent être soigneusement recoupées, vérifiées et analysées (voir le travail préliminaire que nous avons fait, à propos des données de crues sur la Vienne et la Creuse, pour Vinci Construction Grands Projets, en 2013). Les Autorités de Sécurité sont fondées à demander des réexamens, des analyses complémentaires, à propos des données qui sont utilisées : qu'est-ce qui vous permet d'attribuer la magnitude 4.5 au séisme qui s'est produit à tel endroit en 1642 ? Il faut pouvoir justifier :

- Ou bien que ce choix de la magnitude retenue est suffisamment corroboré par un certain nombre d'observations (et pas simplement par un dire d'expert) ;
- Ou bien que ce choix de la magnitude n'est pas critique ; ceci est obtenu en réalisant une "analyse de sensibilité", c'est-à-dire en reprenant tous les calculs avec des magnitudes 4.4 ou 4.6 (voir notre travail pour Vinci, cité plus haut).

On peut bien entendu combiner les deux approches.

Cette loi de probabilité est censée représenter ce que fait la Nature, dans tous ses caprices. Elle doit impérativement être construite à partir des observations, de l'historique, du retour d'expérience (avec toutes les difficultés que cela comporte pour valider les données) et non à partir d'une loi particulière, type loi de Gumbel ou Weibull. Le recours à une loi factice :

- conduira inévitablement à une dispute entre experts (selon la manière dont les données sont prises en compte pour caler la loi) ;
- conduira inévitablement à une suspicion de la part de la population ;
- sera rejeté par les Autorités de Sûreté.

Dans la Règle Fondamentale de Sûreté no 2001-01 (référence ci-dessous), l'Autorité de Sûreté Nucléaire décrit la manière dont doit être déterminé le risque sismique pour une installation donnée. Cette règle fait référence à un historique (essentiellement sur 1 000 ans) et ne mentionne d'aucune manière l'ajustement par des lois de type Gumbel ou Weibull.

La règle édictée par l'ASN fait référence à l'intensité du séisme, mesurée selon l'échelle Medvedev-Sponheuer-Karnik (MSK), qui comporte 12 niveaux. Ce sont des niveaux qualitatifs grossiers (par exemple : niveau 7 : "quelques lézardes apparaissent dans les édifices"). La RFS stipule que le niveau à prendre en compte est une unité de plus que ce qui a été observé en mille ans. Plus précisément, la RFS parle de "séisme maximum historiquement vraisemblable" (SMHV), obtenu à partir des historiques sur mille ans, interprétés par des experts, et dit que l'intensité à retenir est un échelon de plus sur l'échelle MSK. Cette façon de procéder est suffisamment claire et suffisamment conservatrice pour être admise par la population. Par exemple, si le plus fort séisme jamais observé a eu pour effet dans la zone considérée de faire quelques lézardes, on prendra le niveau 8 : "les cheminées tombent".

Il faut bien noter que l'ASN raisonne en terme d'intensité sur zone : bien évidemment, le séisme générateur peut s'être produit ailleurs, et c'est l'effet sur la zone de construction qui nous occupe. L'ASN ne raisonne donc pas en termes de magnitude du séisme en son point de naissance, qu'il faudrait assortir de considérations sur la propagation du séisme et l'amortissement des ondes sismiques entre le point de naissance et la zone d'intérêt.

Cela étant, l'approche retenue par l'ASN présente à ce stade une difficulté : elle n'est pas directement exploitable par l'Industriel. Si nous retenons comme "séisme de projet" un séisme d'intensité de niveau 8 sur l'échelle MSK ("les cheminées tombent"), comment traduire ceci en termes de résistances pour les équipements ?

Il faudra faire une traduction quantitative en terme de "Peak Ground Acceleration" (habituellement mesurée en m/s^2 : il s'agit d'une accélération), et la conversion n'est pas claire ; elle sera une source intrinsèque de difficultés. De la même façon, cette PGA ne tient pas compte de la durée du séisme, qui joue un rôle important en ce qui concerne les effets observés.

Le cahier des charges fonctionnel, qui doit être négocié entre l'Etat et les Industriels concernés, portera sur la nature des tests à faire subir aux installations pour montrer qu'elles peuvent résister au séisme retenu. Par exemple, il faut obtenir un énoncé du type : l'armoire électrique devant être installée à tel endroit de telle centrale sera soumise à un test sur table vibrante, de telle durée, avec telle intensité verticale et telle intensité horizontale.

Le cahier des charges fonctionnel est la traduction en termes déterministes, susceptibles d'exploitation par l'Industrie, d'un phénomène qui est naturellement probabiliste.

D. Les débris spatiaux

La législation est simple : celui qui lance le satellite est responsable des dégâts qu'il peut causer, lors de sa réentrée dans l'atmosphère, et ce quel que soit l'exploitant. Le risque est facile à décrire : quelqu'un peut être tué, ou blessé, par la retombée d'un débris. Le CNES s'interroge donc sur la nature du risque et sur la conduite à tenir pour y faire face. L'exploitant a généralement la possibilité de guider le satellite vers une zone moins peuplée, ou bien au-dessus de l'océan. Mais, même ainsi, le risque n'est pas nul : il y a des habitations isolées, des promeneurs ; sur l'océan il y a des navires, etc.

Une possibilité est de prendre une assurance. Cela n'élimine pas le risque, mais permet d'en faire supporter les conséquences par une structure dont c'est le métier. Le coût très faible de cette assurance (voir plus bas) est en outre de nature à rassurer les populations.

Les méthodes que nous avons développées en 2004 dans le cadre d'un contrat avec le CNES nous ont permis de tracer des "cartes probabilistes" relatives à la chute d'un débris. On détermine une zone allongée (de l'ordre de 100 km de long, 30 km de large) dans laquelle le débris "a toute chance" de tomber. Les dimensions de la zone dépendent de la précision des données d'entrée : masse du satellite, vitesse et position au moment du début de la réentrée, densité de l'air, etc. L'expression "a toute chance de tomber" n'est pas précise, mais elle suffit à la prise de décision, qui consistera simplement à mettre cette zone là où la densité de population est la plus faible.

Contrairement à ce que les gens croient, le danger provenant des débris spatiaux est extrêmement faible, même si la retombée concerne une zone habitée.

Pour le compte du CNES, nous avons réalisé une simulation concernant une zone habitée dans les environs de Grenoble, en y ajoutant une centrale nucléaire qui n'existe pas dans la réalité. Nous avons retenu les hypothèses de dommages suivants : si le débris touche une personne, coût 1 million d'Euros ; si le débris touche la centrale, coût 10 millions d'Euros. L'espérance du dommage (et donc le coût approximatif de l'assurance) était de 105 Euros au total.

La méthode probabiliste permet ici une décision totalement déterministe : voici la zone vers laquelle il convient de guider le satellite pour sa retombée. Nous ne garantissons pas un risque nul, mais nous savons expliquer pourquoi il est infime. Nous savons aussi comparer diverses zones (le satellite n'a pas assez de carburant pour aller partout) et expliquer pourquoi tel choix est meilleur que tel autre.

II. Le raisonnement probabiliste pour l'analyse de sûreté

Nous avons vu que les méthodes probabilistes étaient essentielles pour construire un cahier des charges déterministe à partir de circonstances mal connues. Elles peuvent également être employées pour réaliser l'analyse elle-même :

1. Hiérarchisation des paramètres influents

Une situation "à risque" dépend généralement d'un grand nombre de paramètres ; les méthodes probabilistes vont permettre une hiérarchie de ces paramètres ; ceux qui sont reconnus comme plus influents devront être plus surveillés. Voir notre fiche détaillée :

http://scmsa.eu/fiches/SCM_Hierarchisation.pdf

2. Caractérisation des configurations "à risque"

Prenons un exemple concret pour illustrer ceci : une machine de soudage par faisceau d'électrons est très complexe (notre contrat DCNS, 2013) ; il est très difficile de déterminer précisément les bons réglages. Une méthode probabiliste permet, à partir d'un historique, de valider des plages de réglage, et de dire que si tel paramètre est entre telles valeurs, la probabilité de réussite est grande, ou l'inverse.

3. Transfert de l'information

On dispose souvent d'une information recueillie dans des circonstances particulières (par exemple sur un matériau, dans certaines conditions de température, de pression), et on voudrait la "transférer" dans des circonstances un peu différentes (autre matériau, ou bien autres conditions). Les méthodes probabilistes qui permettent ce transfert sont décrites dans le livre [NMP].

Une autre application concerne l'exploitation de mesures : on dispose par exemple de mesures de pollution faites en certains endroits d'un domaine et on voudrait reconstituer la pollution globale sur tout le domaine. Les méthodes qui permettent cette extrapolation sont décrites dans notre livre [PIT].

Sur toutes ces questions, les méthodes probabilistes consistent à déterminer des lois de probabilité, à partir du retour d'expérience, et à les exploiter ensuite par des procédés qui relèvent de la théorie de la mesure (calcul d'une aire, comparaison de courbes, etc.). Tout ceci pourrait s'intituler : connaissance de la variabilité naturelle. En revanche, nous ne recommandons pas l'utilisation du hasard comme moyen d'investigation

L'idée selon laquelle on pourrait s'en remettre à un hasard bienveillant pour mettre en évidence des situations que l'on ne comprend pas est entièrement inacceptable pour un mathématicien, surtout s'agissant d'une analyse de sûreté !

III. L'usage des probabilités pour l'aide à la décision

Une fois le cahier des charges défini et une fois l'analyse technique réalisée, vient le moment où une décision doit être prise. Les probabilités peuvent-elles y aider ? Bien que l'on constate que la plupart des décisions soient en pratique prises sur critères probabilistes, notre réponse sera clairement "en principe non". Si les probabilités interviennent encore, c'est que le cahier des charges a été mal défini : c'est ce que l'on constate souvent dans la pratique.

Reprenons l'exemple du CNES. Si le cahier des charges initial est "démontrez-nous que vous pourrez faire en sorte que le satellite se désintègre sans aucun danger", l'exploitant est dans

l'embaras : ceci est impossible à démontrer. Comme, de surcroît, le satellite devra rentrer dans l'atmosphère un jour ou l'autre, l'exploitant devra opter pour différents choix, plus ou moins mauvais, sur critères probabilistes.

Par contre, si le cahier des charges initial a été correctement négocié, il dira : "l'exploitant s'engage à guider le satellite, lors de sa réentrée, vers une zone où le risque de dégât est infime", les méthodes que nous avons présentées permettent de déterminer de telles zones et le choix sera déterministe.

Pour la sismicité, si le cahier des charges dit : démontrer que l'installation pourra résister à un séisme de magnitude 5.5, on sera bien en peine d'y satisfaire, parce qu'un tel énoncé est flou. Il y aura d'innombrables querelles d'expert pour déterminer ce qui résiste ou ne résiste pas à un séisme d'une telle magnitude. Par contre, si le cahier des charges dit : telle armoire électrique aura été homologuée par tel test, aucune contestation n'est possible. Il n'y a plus trace de probabilités.

Pour les crues, si le cahier des charges dit "vous devez démontrer que votre ouvrage d'art ne se traduira pas par une élévation du niveau de crue de plus d'un centimètre par rapport à la crue elle-même", ceci est impossible à réaliser en pratique. Personne ne connaît exactement le niveau de la crue de référence et personne ne connaît exactement l'influence qu'aura l'ouvrage d'art. Par contre, si le cahier des charges dit : l'influence de l'ouvrage d'art sera limitée à 10% du niveau de la crue, ceci est relativement facile à démontrer.

Prenons enfin l'exemple des rejets de la centrale de Cruas. Si le cahier des charges dit "aucun rejet si le débit du fleuve est inférieur à 500 m³/s", l'exploitant est pénalisé d'une manière artificielle. Si le cahier des charges dit "les rejets doivent être limités à 10% de ce que fait la Nature", l'exploitant jouira d'une beaucoup plus grande souplesse.

IV. Conclusion

Notre conclusion est donc très claire : l'utilisation des méthodes probabilistes lors de la prise de décision est une erreur, qui ne peut conduire qu'à des divergences entre experts. Les méthodes probabilistes doivent, impérativement, être utilisées pour l'élaboration d'un cahier des charges déterministe.

V. Références

[RFS 2001-01] : Règle fondamentale de Sûreté no 2001-01, Autorité de Sûreté Nucléaire.

[NMP] Bernard Beauzamy : Nouvelles Méthodes Probabilistes pour l'évaluation des risques. Ouvrage édité et commercialisé par la Société de Calcul Mathématique SA. ISBN 978-2-9521458-4-8. ISSN 1767-1175, avril 2010.

[PIT] Olga Zeydina et Bernard Beauzamy : Probabilistic Information Transfer. Ouvrage édité et commercialisé par la Société de Calcul Mathématique SA. ISBN: 978-2-9521458-6-2, ISSN : 1767-1175, mai 2013.

SCM SA, 2007, CEA, site de Saclay : Méthodes probabilistes en sismologie : analyse critique des modèles et prise en compte des incertitudes.

SCM SA, 2013, Vinci Construction Grands Projets : Analyse de la durée de retour des crues extrêmes pour la Vienne et la Creuse (réalisation de la ligne à grande vitesse Sud Europe Atlantique)

http://www.scmsa.eu/archives/SCM_COSEA_Rapport_Cruces_Vienne_2013_10_01.pdf