L'utilisation des codes de calcul pour les démonstrations de sûreté

par Bernard Beauzamy

Septembre 2019

1. Introduction

Les "démonstrations de sûreté" ont envahi notre quotidien ; on ne peut faire une construction nouvelle, vendre un appareil nouveau, un produit nouveau, que si l'on a démontré qu'ils étaient sans danger pour les consommateurs et qu'ils allaient résister à tous les aléas de la Nature. La rédaction de telles démonstrations est devenue une spécialité à part entière. Cela n'empêche évidemment pas, au quotidien, les ponts de se fissurer, les toits de s'envoler, les digues de s'effondrer. Les Romains ne faisaient pas de démonstrations de sûreté, mais ils savaient construire.

Dans le cas de phénomènes naturels "ordinaires" (tempêtes, crues, séismes, etc.), on dispose en général d'un retour d'expérience suffisant pour dimensionner convenablement les ouvrages d'art ; il dispense d'avoir recours à des modèles mathématiques artificiels. Prenons l'exemple des inondations : s'il pleut quelque part, cela peut résulter en une inondation en aval. Pour l'évaluer, on a souvent recours à un modèle "pluie-débit", mais de tels modèles sont difficiles à calibrer convenablement ; il faut en particulier connaître la perméabilité des sols à chaque endroit. Il sera bien préférable d'adopter une approche empirique, en construisant des lois de probabilité conditionnelles : à partir du retour d'expérience, voici le débit observé en aval, à partir des pluies mesurées en amont, avec un décalage temporel approprié.

Il est certainement utile de chercher à modéliser la loi de la Nature appelée "inondation", mais la valeur prédictive de tels modèles est extrêmement faible à l'heure actuelle, tant ces lois sont complexes et demandent des données importantes ; la conclusion grossière à partir d'un historique est toujours préférable. Lorsqu'ils ont construit le pont de Sommières, sur le Vidourle, les Romains (Tibère,19 à 31 ap. J.-C.) n'avaient ni informatique, ni modèles mathématiques, mais une cinquantaine d'années d'observations et cela leur a suffi pour déterminer la durée de retour des crues, l'importance de celles-ci, et construire le pont en conséquence : il tient encore.

Le fait que les approches modernes ne parviennent que très imparfaitement à rendre compte des lois de la Nature, même lorsque le retour d'expérience est abondant, devrait nous rendre modestes, mais ce n'est pas le cas.

Les choses se compliquent évidemment lorsque le retour d'expérience est pauvre, voire inexistant : c'est toujours le cas dans une situation nouvelle, lorsqu'on construit un appareil nouveau. On est alors obligé d'avoir recours à des codes de calcul : il n'existe aucun autre moyen d'investigation.

2. L'utilisation des codes de calcul

Par définition, un "code de calcul" est de la physique "en conserve" : habituellement un domaine est "discrétisé", c'est-à-dire découpé en mailles, et on calcule les valeurs prises par les variables d'intérêt en tout point du maillage ; les lois de la physique sont simplifiées (plus précisément linéarisées) à l'intérieur de chaque maille. La démarche donne généralement de bons résultats, sauf si le phénomène est "chaotique" (une toute petite modification des paramètres conduit à de grandes modifications en sortie), ou bien au voisinage d'un équilibre. Pour comprendre ce dernier point, remarquons qu'il est difficile de discrétiser la trajectoire d'un satellite : si le point de discrétisation est en dehors de l'orbite, on a le sentiment que le satellite va s'éloigner dans l'espace ; si le point de discrétisation est à l'intérieur de l'orbite, le calcul conclura que le satellite va s'écraser sur la planète.

Mais, de manière générale, un code de calcul donnera de bons résultats, par exemple s'il s'agit de déterminer les évolutions de la température dans des solides complexes.

Depuis les années 1970, avec les progrès de l'informatique, les codes de calcul ont conquis une place de plus en plus importante ; ils sont maintenant utilisés au quotidien pour la conception des avions, des automobiles, des usines, etc. Nous nous intéressons ici uniquement à leur application aux démonstrations de sûreté, qui constitue un domaine très spécifique. On peut raisonnablement admettre que les codes fonctionnent bien : certains ont plus de 50 ans d'existence et ont fait l'objet d'innombrables exploitations et validations par d'importantes communautés d'utilisateurs.

3. Les démonstrations de sûreté

Néanmoins, dans le contexte précis des démonstrations de sûreté, deux questions principales apparaissent :

– Sur quels ensembles de données faut-il utiliser le code ? Ces données sont-elles représentatives des situations que l'on souhaite analyser ?

– Que faire des résultats obtenus ? Comment démontrer qu'ils ont une valeur probante ?

Pour bien comprendre la portée de ces questions, il faut bien avoir à l'esprit que les codes de calcul dont nous parlons ici sont supposés décrire une situation physique complexe, comportant donc de nombreux paramètres.

Pour donner un exemple, le code CATHARE (Code avancé de thermohydraulique pour les accidents de réacteurs à eau), développé depuis 1979 par le CEA, EDF, AREVA et l'IRSN (voir [1]), est utilisé pour les analyses de sûreté des réacteurs. Un tel code, selon les versions, comporte plus de 50 paramètres ; si on admet que chaque paramètre peut prendre 10 valeurs (en fait, généralement une infinité), on se retrouve avec un espace de configuration de 10^{50} valeurs : quelle que soit la rapidité de calcul, il est impossible de les explorer toutes. Même si chaque "run" ne prenait qu'une seconde (on appelle "run" l'exécution du code sur un ensemble de données d'entrée), même si on calculait pendant des mois, on n'explorerait qu'une partie infime de l'espace de configuration. En pratique, chaque run prend des heures, et on est limité à quelques milliers de runs.

L'attitude la plus répandue, au sein des communautés d'utilisateurs, consiste à dire : lançons ces runs au hasard, et Dieu fera en sorte de les guider vers les zones d'intérêt. Cette attitude est profondément naïve et absurde ; elle traduit une méconnaissance complète des lois générales des probabilités.

Pour bien faire comprendre ces lois, prenons l'exemple d'un code extrêmement simple, infiniment plus simple que CATHARE. Il ne dépend que de dix paramètres, tous entre 0 et 1, par la formule élémentaire d'un produit de toutes les variables :

$$y = x_1 \times x_2 \times \cdots \times x_{10}$$

et convenons que la zone dangereuse est celle où $y > \dfrac{3}{4}$. Demandons-nous quelle est la probabilité d'obtenir de telles valeurs, si nous jetons les variables x_i selon une loi uniforme entre 0 et 1. La réponse théorique est le nombre :

$$\varepsilon = \int_{3/4}^{1} \frac{\left(\ln(1/t)\right)^9}{9!} dt \approx 0.6 \times 10^{-9}$$

nombre qui est extrêmement petit. Le sens commun le dit bien : si nous jetons dix nombres au hasard, c'est bien le diable si l'un d'eux n'est pas $<1/2$ et en ce cas le produit des dix nombres sera automatiquement $<1/2$, puisque tous sont ≤ 1. En d'autres termes, si nous voulons que le produit soit $>3/4$, il faut <u>forcer</u> tous les nombres à être proches de 1. Dans le cas de ce code très simple, si nous faisons au hasard un milliard de runs, nous ne trouverons pas la zone dangereuse : elle est trop petite, elle est dans un "coin" de l'espace des configurations. Dans le cas de CATHARE, il faudrait de l'ordre de 10^{50} runs : c'est irréalisable.

L'approche "tout à l'aveugle" est donc bannie par principe. C'est du bon sens : quand on ne comprend pas un phénomène, on ne peut pas s'en remettre au hasard pour l'expliquer, surtout lorsqu'il s'agit de sûreté !

Par conséquent, on ne peut pas se contenter des tableaux de nombres issus du code de calcul ; il faut s'aider des lois de la physique, qui, à chaque fois, sont assez bien connues des spécialistes, puisqu'ils ont conçu le code. Deux investigations doivent être faites :

- Déterminer les paramètres qui influent le plus sur la variable de sortie ;
- Déterminer le sens de variation de cette variable, pour chacun des paramètres retenus.

Pour le premier point, comme la combinatoire est trop élevée, il faut s'efforcer de la réduire, en éliminant tous les paramètres qui seront jugés insignifiants. Des méthodes mathématiques existent pour ceci (méthodes de "hiérarchisation de paramètres", voir [2]), mais elles travaillent sur les données expérimentales recueillies, et supposent donc que ces données sont à la fois pertinentes et en nombre suffisant. La méthode de hiérarchisation, à elle seule, ne suffit pas à conclure la démonstration de sûreté ; là encore, elle doit être étayée par des arguments physiques. En effet, il ne suffit pas de dire, à partir d'un relevé de données, que tel paramètre joue un rôle très faible pour que ceci soit accepté de manière générale.

Le second point est en général plus facile : on voit aisément si un paramètre agit sur la variable de sortie en la faisant croître ou décroître ; dans le cas de l'exemple précédent, la variable de sortie est une fonction croissante de chacun des paramètres, et ceci est immédiat.

Ces deux précautions prises, la démonstration de sûreté devient beaucoup plus facile. On se concentre sur les paramètres jugés prépondérants, et on lance les runs en fonction de l'influence de chaque paramètre. Si l'on sait que la variable de sortie est fonction croissante de tel paramètre, on donnera à celui-ci les valeurs les plus élevées possible ; la physique nous guide ainsi dans le choix des runs. La démonstration est alors possible, mais elle sera longue et difficile à rédiger, parce que toutes les étapes doivent être validées, y compris les assertions à propos des lois physiques.

4. Investigation fine et démonstration de sûreté

Tous les codes de calcul existants à ce jour sont "fins", en ce sens qu'ils cherchent, dans une situation donnée, bien caractérisée, à reproduire au mieux les lois de la physique. Cela n'a rien de répréhensible, mais ne répond pas à un besoin de sûreté. Si vous voulez explorer le sous-sol de la Sibérie, un outil d'excavation d'un diamètre de 30 cm sera d'une faible utilité : il faudrait faire d'innombrables trous ! On préférera le survol en avion, même s'il donne des indications imprécises.

Les Industriels œuvrant en ces domaines auraient donc intérêt à développer progressivement de nouveaux codes de calcul, beaucoup plus grossiers, adaptés aux démonstrations de sûreté, dans lesquels on demande une conclusion grossière, tenant compte de toutes les incertitudes.

Ceci se lit bien dans le "Décret n°99-1046 du 13 décembre 1999 relatif aux équipements sous pression" [3] :

2.2.3. Méthode de calcul.

a) Confinement de la pression et autres charges

Les contraintes admissibles des équipements sous pression doivent être limitées eu égard aux défaillances raisonnablement prévisibles dans les conditions de fonctionnement. ***A cet effet, il y a lieu d'appliquer des facteurs de sécurité permettant d'éliminer entièrement toutes les incertitudes*** *découlant de la fabrication, des conditions réelles d'utilisation, des contraintes, des modèles de calcul, ainsi que des propriétés et du comportement du matériau.*

Un code de calcul fin, par sa conception même, ne permettra jamais d'éliminer toutes les incertitudes : il éclaire finement, mais très localement.

L'idée générale de l'approche que nous préconisons est la suivante : l'espace des configurations est découpé en zones homogènes (peut-être 10, 100, 1000, pas 10^{50} !) et dans chaque zone les lois de la physique sont remplacées par des majorants : c'est ce qu'on appelle "prendre des marges" et c'est ce qu'on faisait communément par le passé. Mais ici les marges dépendent de la zone homogène considérée ; ce ne sont pas les mêmes partout (d'où une économie par rapport à la marge prise globalement). Ensuite, il est beaucoup plus facile, pour chaque zone, de démontrer que les valeurs limites ne peuvent être atteintes. Les marges prises incluent les incertitudes sur les lois et sur les mesures, ce qui facilite considérablement le travail et répond à la contrainte imposée par le décret ci-dessus.

Une telle approche rencontre souvent le scepticisme de principe des ingénieurs, qui aiment à calculer précisément : pour eux, 16 chiffres après la virgule valent mieux que 15 ; ils ont passé quarante ou cinquante ans à concevoir, perfectionner, valider, des codes de calcul fins, et ils aimeraient que ces codes permettent, une fois pour toutes, de répondre à toutes les questions qui se posent. Mais ce n'est pas le cas : une démonstration de sûreté procède d'une logique différente, dans laquelle il faut conclure alors que les données recueillies ne sont précises qu'à 20% près, alors que les lois de la physique sont largement inconnues. Il faut s'accommoder de ces incertitudes, en concevant une génération de codes qui saura les prendre en compte.

5. Références

[1] https://www.irsn.fr/FR/Larecherche/outils-scientifiques/Codes-de-calcul/Pages/Le-code-CATHARE2-4661.aspx

[2] http://scmsa.eu/fiches/SCM_Hierarchisation.pdf

[3] https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000580255&categorieLien=cid