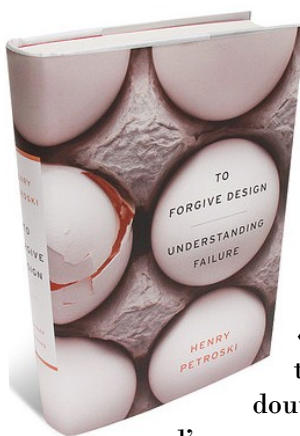


Pourquoi les ponts continueront-ils à s'effondrer ? *Ou l'ingénieur et l'échec technologique*

Hervé Dumez
École polytechnique / CNRS



Le samedi 5 mai 2012, à Bayonne, des ouvriers travaillent à la construction d'un nouveau pont ferroviaire sur l'Adour destiné à remplacer l'ancien, en service depuis 1862. Brusquement deux éléments de plusieurs centaines de tonnes basculent et tombent dans le fleuve, blessant gravement deux de ces ouvriers et mettant en péril le vieux pont voisin. Notre première réaction est ambivalente : événement finalement banal ou du moins « normal » et, en même temps, surprenant au regard des technologies d'aujourd'hui. On se dit qu'il s'explique sans doute par une série successive, exceptionnelle et imprévisible d'erreurs grossières.

Peut-être l'image de la catastrophe nous en rappelle-t-elle d'autres¹. C'était le 7 novembre 1940. Quatre mois après son inauguration, à 10h du matin, le Tacoma Narrows Bridge commence à osciller et à se tordre sous l'effet d'un vent atteignant à peine 65 km/h. Au milieu du pont, une voiture heureusement abandonnée par ses occupants. Un homme revient vers le bord, titubant sur la ligne blanche qui sépare les deux voies routières et qui constitue l'axe de torsion. Il s'agit d'un ingénieur qui a essayé de comprendre le phénomène. Une heure plus tard, la partie centrale de l'ouvrage semble exploser et tombe dans le fleuve sans qu'il y ait eu d'autre victime que le petit chien enfermé dans la voiture et qu'il avait été impossible de faire sortir.

Pourquoi et comment des ponts peuvent-ils continuer à s'effondrer aujourd'hui, alors que nous disposons de moyens de calcul incroyablement puissants et de connaissances de plus en plus fines de la mécanique et des matériaux ?

Dans son dernier livre, *To forgive design. Understanding failure*, Henri Petroski, professeur d'ingénierie civile et d'histoire à Duke, nous donne à partir de cette question une réflexion sur l'engineering et, plus profondément, sur le rapport de notre société à la technologie. Livre simple, assez peu théorique, précis, concret, reposant sur l'analyse de nombreux cas. On n'y trouvera pas de grandes explications, plutôt des analyses de bon sens. Elles ne sont sans doute pas inutiles.

*Le pont sur l'Adour
après son effondrement
(5 mai 2012)*



1. Le film est sur Youtube à l'adresse :
<http://www.youtube.com/watch?v=3mclp9QmCGs>

Le design comme compromis

Un pont est analogue à une machine : c'est un assemblage technologique de parties interdépendantes entre elles. Le *design* d'un système technologique de ce type, dit l'auteur, est une série de décisions et de compromis :

[...] the first sentence in the introduction of the first design textbook that I used in college read simply, "To design is to make decisions". Later, it added, "Decisions are always compromises". (p. 245)

Ces compromis sont techniques, esthétiques, politiques et économiques. Ce qui est cherché est un équilibre entre des contraintes contradictoires. Tout *design*, toute structure, peuvent être critiqués. Mais il faut garder à l'esprit l'ensemble des contraintes, techniques, politiques, économiques, qui ont déterminé les choix faits, les décisions prises. La difficulté du *design*, tout son art, consistent alors à identifier les points de faiblesse qui résultent de ces compromis pour rendre le système plus sûr du point de vue de la conception et durant la maintenance. Après un accident, un ingénieur donne son point de vue dans un article de journal, et Petroski commente :

According to an engineer quoted in the article, "If one chain link goes, it all goes." It does not take an engineer to understand this, of course, but in fact all structures have a metaphorical weakest link, and it is the object of design to make sure that link is still strong enough not to break under expected loads and operating conditions. (p. 163)

Repérer les échecs et catastrophes possibles dans le *design* n'est pas une tâche aisée dans la mesure où les failles sont souvent peu visibles. C'est tout l'art de l'engineering :

Failures can be obvious, as when a bridge collapses under rush hour traffic. But not all failures reveal themselves so suddenly and incontrovertibly. In fact, failure is not necessarily something of which we can say with confidence that we will know it when we see it, even if it happens right before our eyes. Failures can be so subtle that they are hardly noticed, at least consciously, because they involve matters of judgment and taste, and so it can be debated if indeed they are even failures at all. This is the case with what some observers would deem aesthetic and functional failures, such as the arrangement of cables on a cable-stayed structure or the placement of a pedestrian walkway on a bridge. And the roots of many such failures can be traced back to the give-and-take of design by committee or even to the original conceptual design, which in some cases sets such a rigid agenda that ideas are locked in place. It need not be so. (p. 263)

Du coup, l'échec fait partie par essence de la technologie :

Failures are part of the technological condition. (p. 32)

Petroski avance alors ce qu'il appelle une forme de syllogisme :

"Technology is made by people. People make mistakes. So, technology is made of mistakes." In other words, all technological systems are potentially full of bugs and gremlins. When the latent errors, faults, and mistakes are innocuous and do not interfere with the system's overall function, they can go undetected for its lifetime. Something that works, no matter how fundamentally flawed it might be, we call a success. When the flaws in a system metastasize and cause it to malfunction and possibly even cease to function entirely, we call it a failure. (p. 42)

Pourtant, la confiance en la technologie est souvent la plus forte et les petits signaux inquiétants sont parfois ignorés. Pour comprendre le phénomène, il faut le considérer en dynamique.

La dynamique des succès et des échecs de l'engineering

Des études, notamment celle de Sibly et Walker (1977), ont montré que l'histoire des accidents de ponts présentait une configuration cyclique assez régulière, avec une amplitude de trente ans. Pourquoi ?

The cyclical nature of success and failure has been well established in the field of modern bridge design and engineering, in which experience spans about two centuries. Unfortunately, the lessons learned from failures are too often forgotten in the course of the renewed period of success that takes place in the context of technological advance. (p. 32)

Regardons les choses de plus près. Quand un nouveau type de pont se développe, autour de problèmes techniques difficiles, les ingénieurs font très attention au *design* et sont soutenus par leur environnement. Tout le monde est inquiet et prête attention aux détails. C'est ce qui s'est passé lorsqu'il s'est agi de construire le pont George Washington sur l'Hudson River pour relier le haut de Manhattan au New Jersey :

Because of the heightened awareness of being engaged in an unprecedented design effort, the engineers had to pay special attention to details and anticipate how they might lead to a failure. (p. 353)

La peur de l'échec pèse sur tout le monde. Si le succès est au rendez-vous, le système technologique est décliné :

A successful design does not teach us anything beyond the fact that it works. We can ensure future successes by copying a successful design exactly, but that is often more easily said than done. A design is successful because no errors were made in its conception or planning or making or using: no corners were cut, no inadvertent substitutions were made in construction materials or method, no imperfect welds went undetected, no bolts were left untightened, no inspectors were deceitful or distracted, no maintenance was neglected. If any of these —and other—deviations from the original occurred in the design and fabrication and care of what might seem to be an exact copy of a successful design, the nit is not that. And it may contain an unknown or unseen fatal flaw that the successful artifact but had not yet been exposed by a failure. But even if we could do so, who wants just to make exact copies of successes? The world would be not only a boring place but also a limited place. If only successful bridges were copied exactly, then strictly speaking no longer one could ever be designed and built. (p. 265)

Insensiblement, trois phénomènes s'installent. Le premier est la confiance dans la technologie – puisqu'il n'y a pas eu de problème, c'est qu'elle marche :

We do have ample evidence of the irrational sense of overconfidence engendered by prolonged success, of which we are disabused only by a colossal failure. (p. 360)

Le deuxième a été mentionné dans la citation précédente, c'est le changement. En même temps que l'on gagne en confiance du fait des succès passés, on a tendance à innover, à changer des choses, à relâcher certaines contraintes, à tenter des solutions plus audacieuses. Or, les changements dans le *design* mènent souvent au désastre :

[...] making any change in a design can alter the entire context in which the detail is embedded and thereby introduce a failure mode that would have been impossible in the original design. A single change can change everything. (p. 39)

L'exemple le plus célèbre est le Dee Bridge, en Écosse. Une partie de la structure du pont est en bois. Or, quelque temps auparavant, un pont de chemin de fer londonien a pris feu à cause des cendres brûlantes tombées d'une locomotive. Des travaux sont donc entrepris pour éviter ce problème, et la structure en bois est recouverte d'un ballast. Au premier passage d'un train après ces travaux, le 24 mai 1847, le pont s'écroule. Sans ballast, il supportait les trains ; sans passage de trains, il supportait le nouveau ballast ; mais il ne supporta pas le poids du ballast plus celui d'un train...

Le troisième est lié aux interactions entre les ingénieurs et les managers. En l'absence de problèmes, les managers poussent aux économies, à la rentabilité, et donc souvent aux relâchements des contraintes. Tout fonctionne bien, que vient-on leur rebattre les oreilles avec des risques potentiels ? C'est qu'un système technologique de grande ampleur, un pont, une navette spatiale, un grand logiciel, est toujours inséré dans un environnement économique-politique :

Wherever managers—especially those who do not have a technical background—interact with engineers, there is the potential for a dysfunctional relationship. When something goes wrong in such an environment, the first instinct is often to blame the engineers and their designs, but on further probing, the root cause of a failure is often something much more subtle and complex than just a sticky mechanical component, a shorted electrical switch, or a flawed design detail. It almost invariably involves conflicts between risk-adverse engineers and risk-tolerant managers. (pp. 273-274)

Ces trois facteurs – excès de confiance, changements technologiques de toutes sortes affectant le *design* et pressions économiques – génèrent la configuration cyclique des accidents – prudence, confiance, excès de confiance, jusqu'à la catastrophe :

The accidents happened not because the engineer neglected to provide sufficient strength as prescribed by the accepted design approach, but because of the unwitting introduction of a new type of behaviour. As time passed during the period of development, the bases of the design methods were forgotten and so were their limits of validity. Following a period of successful construction a designer, perhaps a little complacent, simply extended the design method once too often. (Sibly & Walker, 1977, cité in Petroski, 2012, p. 339)

Il faut voir dans le processus un effet de génération, les raisons de la prudence des anciennes générations disparaissant dans l'oubli et n'étant plus présentes à l'esprit des jeunes ingénieurs, toujours tentés par l'audace de solutions innovantes :

Without a knowledge of the fundamental design assumptions that were made during the development stage—assumptions that implicitly if not explicitly limit the applicability of the method or structural type—younger engineers can be effectively designing blind in uncharted territory, all the while thinking they are just following a well-worn path. The phenomenon is not unique to bridge engineering. (p. 340)

Pour l'auteur, la prochaine catastrophe devrait toucher les ponts haubanés aujourd'hui très prisés des ingénieurs. On a déjà constaté que les haubans vibrent dans ce type de *design*. On a cherché à stabiliser ces vibrations par des solutions techniques (amortisseurs hydrauliques). Mais



Un pont haubané : le pont de l'Iroise à Brest

aucune grande catastrophe n'étant encore intervenue, les ingénieurs restent très confiants. Ce qui laisse Petroski songeur.

Engineering et science : les échecs

Pourquoi les ponts continuent-ils – et continueront-ils à l'avenir – de s'effondrer ? Parce que l'on est dans l'engineering. Ce dernier s'appuie certes sur des disciplines scientifiques faisant toujours des progrès, essentiellement les mathématiques et la physique, mais il reste ce qu'il est : la détermination d'un *design* qui repose sur des choix sous contraintes, choix qui sont technico-économiques. La question demeure ce qu'elle a toujours été, selon Petroski, la conscience des limites du savoir scientifique dans des situations multidimensionnelles complexes, et le jugement. Chaque catastrophe donne lieu à enquête. Celle-ci fait fleurir des théories diverses. Mais on ne sait quasiment jamais avec certitude, de manière scientifique, ce qui s'est réellement passé :

The difficulty in reconciling competing theories of why a structure collapsed is largely due to the fact that strictly speaking they are just that—theories. Like scientific hypotheses, they should be tested to see which if any is valid. Unfortunately, when a structure collapses, it is obviously no longer available in its pre-collapsed form for rigorously testing any hypotheses. Rebuilding a collapsed structure to its pre-collapsed condition to test it under failure causing conditions is virtually impossible, since its parts are bent, broken, twisted, or lost. Using new materials to reconstruct the structure leaves any test of it open to the criticism that it is not the same structure as the failed one. Models (physical and computer) can be devised and built, but testing models is open to the criticism that they are just models, not the real thing. (p. 237)

C'est le cas pour le Tacoma Narrows Bridge : beaucoup de théories ont été émises (on sait qu'un vent de 65 km/h ne peut pas à lui seul être l'explication de l'entrée en résonance du pont), des tests en soufflerie ont eu lieu. Il est probable qu'un des cables a faibli, provoquant le mouvement de torsion. Mais on n'a toujours pas l'explication à 100% du phénomène et on ne l'aura sans doute jamais.

Bien sûr, la science cherche à répondre au problème et se développent aujourd'hui des « ponts intelligents » (*smart bridges*) bourrés de capteurs transmettant des données en temps réel aux laboratoires des écoles d'ingénieurs. Lorsque le premier de ces ponts s'effondrera, on disposera donc de plus de données...

Qu'est-ce qu'un ingénieur, et qu'est-ce que l'engineering ?

Les ponts, qui continuent au XIX^{ème} siècle de s'effondrer, jettent un éclairage réflexif sur ce qu'est l'engineering et le travail d'un ingénieur.

Des succès, on n'apprend rien. Ils induisent au contraire peu à peu en erreur. Des catastrophes et des échecs, on peut sans doute apprendre :

Every failure is a revelation of ignorance, an accidental experiment, a found set of data that contains clues that point back to causes and further back to mistakes that might have been made in design, manufacture, and use. Not to follow the trail to its source is to abandon an opportunity to understand better the nature of the technology and our interaction with it. Because successful design is the anticipation and obviation of failure, every new failure—no matter how seemingly benign—presents a further means toward a fuller understanding of how to achieve a fuller success. There will always be plenty of new mistakes to make, without repeating the old. These mistakes include, of course, not only those involving hardware and software but also

those involving engineers and managers and the dropped or ignored communications that result from their insulation from each other. (p. 45)

Encore faut-il, là aussi, être capable de prendre du recul. Comme il a été dit, on ne sait souvent pas de manière scientifique, prouvée sans aucun doute subsistant, pourquoi une catastrophe est intervenue. Penser que l'on a compris les raisons d'un échec alors que rien n'est certain est encore pire que tout :

Indeed, a familiarity with case studies of failures is among the most efficacious means of avoiding similar failures in the future. However, if the explanations accompanying the case studies are themselves flawed or misleading, they have the potential for doing more harm than good. (p. 213)

On touche là à la grandeur et aux limites de l'engineering qui touche forcément, dans son développement pratique, aux limites de la connaissance, à la frontière entre savoir et non-savoir, qui se matérialise par un échec à chaque fois que l'on croit savoir ce que l'on ne sait pas. L'échec venant aussi du fait que l'engineering se déploie toujours dans un environnement politico-économique qui pèse sur lui :

Unfortunately, when complicated technology and complex professions and flawed individuals interact we can expect failure to follow, maybe not today, or next week, or next year—but invariably it will happen. Indeed, the longer it does not, the more likely the human component of the machines/people system will believe that it will never happen again. That attitude breeds complacency, which leads to a relaxation of guards of all kinds—technological, political, organizational, and psychological—against failure. (p. 301)

Comment un ingénieur doit-il alors procéder dans sa pratique ? Il doit, c'est le message de l'auteur, toujours avoir la possibilité de l'échec à l'esprit, et anticiper cette possibilité plutôt que de développer une confiance excessive en la réussite. Pour cela, il doit garder à l'esprit les catastrophes passées et travailler sur l'histoire de ces cas. Une sécurité consiste à garder trace de ces choix et compromis (puisque le *design*, on l'a vu, est affaire de décisions) :

In any project, large or small, each engineer's work is expected to be consistent and transparent so that another engineer can check it—by following its assumptions, logic, and computations—for inadvertent errors. (p. 30)

Or, paradoxalement, les choses ne vont pas en s'améliorant sur ce plan. Les ingénieurs d'antan étaient beaucoup plus rigoureux de ce point de vue que beaucoup d'ingénieurs d'aujourd'hui :

Perhaps precisely because of the tradition of writing about and explaining them in detail, the engineers of such projects tended to be more explicit about what motivated, drove, and checked their designs than are engineers today, whose reasoning can be lost amid mathematical and computer models, codes, graphics, and printouts. During a discussion of the relevance of history to structural engineering, one participant confessed that he found it somewhat easier to get into the heads of designers from earlier times than to do so with design teams typical of the computer age. (p. 346)

Comme l'a fait remarquer un ingénieur célèbre, la confiance dans le quantitatif et le modèle mathématique est dangereuse. Ralph Peck déclarait en effet : « *Problems are essentially nonquantitative.* » et : « *The solutions are essentially nonquantitative.* » (cité in Petroski, 2012, p. 347).

Dans les périodes de doute, il conviendrait de suivre de manière plus rigoureuse les procédures formelles héritées du passé, qui intègrent les problèmes enregistrés dans des époques antérieures. Mais c'est rarement le cas, malheureusement :

Formal procedures may embody lessons learned, but engineers and managers alike are notorious for deviating from past procedures. After all, we are always seeking to improve on the past, and this means changing the way we design, make, and do things. Unfortunately, in the course of making changes, we can effectively discard the experience embedded in that which we think we are improving upon. For this reason we can, ironically, expect failures to continue to take us by surprise. (p. 343)

C'est la raison pour laquelle des ponts continueront à s'effondrer à l'avenir. Il y a comme une loi d'airain de l'engineering, qui fait que l'on franchit à chaque fois, sans s'en rendre compte, par excès de confiance, la limite entre le savoir et le non-savoir, et que les échecs sont inscrits dans le développement technologique :

Our studies show that in each case, when the first example of a technologically advanced structure was built, great care and research went into its design and construction. But as the new design concept was used again and again, confidence grew to complacency and contempt for possible technical difficulties. Testing was considered unnecessarily expensive and so it was dispensed with. But in each case, the design was steadily modified and the changes not understood, until a previously ignored second order effect dominated, and the structure collapsed. (Sibly & Walker, 1976 cité in Petroski, 2012, p. 344)

Conclusion

Quelques questions simples, revisitées, touchent à ce que nous vivons de plus profond. « Pourquoi des ponts s'effondrent-ils toujours au XXI^{ème} siècle ? » est de celles-là. L'échec technologique nous renvoie au rapport entre l'engineering, les sciences et l'économie et aux illusions que nous développons autour du développement technologique. Derrière l'analyse de Petroski se profile par ailleurs la question de la formation des ingénieurs : sont-ils suffisamment confrontés à l'histoire des échecs de l'engineering qui devrait être un élément fondamental de cette formation ?

Références

- Petroski Henry (2012) *To Forgive Design. Understanding Failure*, Cambridge MA, Harvard University Press.
- Sibly Paul G. & Walker Alistair C. (1977) "Structural Accidents and Their Causes", *Proceedings Institution of Civil Engineers*, vol. 62, Part 1, pp. 191-208 ■