



La part des mathématiques dans un processus d'innovation

"Les Mardis de l'Innovation"

Conservatoire National des Arts et Métiers, Pôle Economie et Gestion

Mardi 6 février 2007

par Bernard Beauzamy
PDG, Société de Calcul Mathématique S. A.

I. Introduction

Un processus d'innovation comporte généralement au moins deux phases qui requièrent des indicateurs quantitatifs : avant et après ; quelquefois pendant.

- Avant l'innovation, on se dit que quelque chose ne va pas, ou pourrait aller mieux : il est utile de disposer d'indicateurs quantitatifs pour conforter cette impression ;
- Après l'innovation, on se dit que tout va bien, ou que tout va mieux : il est également utile de disposer d'indicateurs quantitatifs pour le vérifier.

Et pendant l'innovation, on a souvent besoin d'outils scientifiques et techniques, soit liés au cœur de métier de l'entreprise, soit périphériques (logistique, achats, organisation du travail, etc.), et ces outils sont presque toujours de nature quantitative.

Dans tout outil quantitatif, les mathématiques interviennent nécessairement : elles constituent un langage, qui permet de transcrire l'information recueillie sous forme de nombres et de travailler dessus ; nous verrons comment tout à l'heure.

Il serait excessif de dire que tout processus d'innovation requiert des mathématiques : une entreprise qui fabrique et vend des pizzas, et qui améliore sa tournée, ne les utilise pas. Pourtant, si elle veut constater l'amélioration (température plus élevée à l'arrivée, réduction du temps de trajet), elle devra disposer d'indicateurs quantitatifs et elle devra les traiter.

Nous allons voir des exemples issus de quatre grands domaines, très distincts :

- La conception et l'exploitation d'un réseau de transport ;
- L'étude de la fiabilité, du vieillissement ;

- La prospective (démographie, énergétique, etc.) ;
- L'environnement (propagation d'une pollution).

Nous verrons à chaque fois en quoi consiste l'outil mathématique approprié.

II. La conception et l'exploitation d'un réseau de transport

Les Grecs, les Romains, disposaient déjà de réseaux de transport, pour les informations, pour les marchandises, pour les voyageurs. Ils construisaient des routes et des aqueducs. Ils avaient des relais de poste. Et Paris n'a pas attendu M. Delanoë pour avoir ses embouteillages :

*Vingt carrosses bientôt arrivant à la file
Y sont en moins de rien suivis de plus de mille ;*

(Boileau, les embarras de Paris, Satires, 1666)

Nos réseaux de transport sont plus rapides que ceux d'antan ; il n'est pas clair qu'ils soient plus efficaces. Les ordres donnés par l'Empereur de Chine au XII^{ème} siècle, portés à cheval, étaient plus promptement exécutés aux confins de l'Empire que ne le sont les directives du Gouvernement français en Corse, acheminés par satellite et fibres optiques.

Comme toujours lorsqu'il s'agit d'une situation réelle, il est très difficile de définir un critère permettant de dire qu'un réseau de transport est "bon". Il y a plusieurs critères, largement contradictoires. Nous prendrons l'exemple d'un réseau ordinaire de bus, sur lequel nous avons travaillé pour Veolia Transport en 2005 et 2006.

A l'évidence, on peut distinguer trois points de vue :

- Pour l'usager, le système doit être rapide et peu coûteux (avec des attributs supplémentaires : confort, sécurité, etc.) ;
- Pour l'exploitant, il doit être en équilibre économique ;
- Pour la collectivité locale concernée, il doit satisfaire le besoin social approprié (par exemple transporter les travailleurs, les scolaires, etc.), en minimisant le coût pour l'ensemble et la gêne pour le reste de l'activité (définition éventuelle de sites propres, etc.).

Il est évident que ces critères sont très largement contradictoires. Par exemple, la vitesse de transport, dans une agglomération dense, requiert souvent la création de sites propres, qui nuisent aux autres modes de transport et à l'activité économique en général (personne n'est capable de quantifier cela correctement).

Les réseaux de transport actuels, en France du moins, paraissent non-rentables : ils vivent avec une part de subventions qui dépasse souvent 50% du coût total d'exploitation ; cette part a augmenté au cours des années : l'usager paye une proportion de plus en plus faible et le reste est couvert par des subventions, c'est-à-dire par l'impôt.

Le rôle du mathématicien est ici très délicat : ce sont des organisations qui existent depuis des millénaires, mais dont tout le monde se plaint : aussi bien les usagers que les

hommes du métier. Il est très facile de prendre une position dogmatique "haro sur l'automobile" et de déclarer que tout le monde doit se déplacer en bus ou en vélo ; une telle attitude ne résiste pas à la confrontation avec la réalité. A l'inverse, il est extrêmement difficile de définir des critères précis, sur lesquels on pourrait travailler.

Ce que le mathématicien peut faire, c'est élaborer des outils grossiers d'aide à la décision. Vous choisissez tel critère, voici quelles en seront les conséquences. On dévide alors une chaîne de raisonnements logiques, qui aboutit à une situation (en principe claire) sur laquelle le politique peut se prononcer, y compris en la refusant. Il s'agit, si l'on veut, d'une sorte de simulation, sans toutefois aller nécessairement jusqu'à la représentation sur une carte.

Prenons un exemple concret. Le politique veut une bonne desserte (des stations partout) et en même temps une bonne vitesse de croisière. Le mathématicien expliquera que les deux sont antagonistes : si l'on met des stations partout (par exemple tous les 200 m), le trafic en est ralenti d'autant : il faut tenir compte du temps pour ralentir, laisser descendre les voyageurs, monter les nouveaux, repartir. Nous montrerons, par des calculs précis, que des stations nombreuses arrangent chacun, mais pénalisent tout le monde.

Un autre exemple : des rocade circulaire (interconnexions) paraissent utiles : elles permettent aux voyageurs en bout de ligne de gagner un autre bout de ligne sans avoir à transiter par le centre. En réalité, elles sont coûteuses et nuisibles parce qu'elles ajoutent une correspondance : lorsque le temps de correspondance est significatif, un théorème mathématique montre que le meilleur réseau est celui avec un seul nœud central.

On multiplierait les exemples concrets de ce type. Ils montrent bien quel est le rôle du mathématicien : développer de manière quantitative les conséquences de chaque choix politique et avertir lorsque ces choix sont contradictoires.

III. Fiabilité, vieillissement

N'importe quel système, vivant ou industriel, vieillit et tombe en panne. Les raisons de cette détérioration sont l'objet d'une discipline que j'appellerai globalement "fiabilité" ; nous nous restreindrons aux systèmes industriels mais on pourrait aussi bien y inclure la médecine et l'épidémiologie.

Il y a deux préoccupations majeures :

- Savoir quelles pièces remplacer (maintenance) ;
- Savoir estimer la durée de vie restante.

Quelle que soit la complexité d'un produit ou d'un système, qu'il s'agisse par exemple d'une automobile ou d'une centrale nucléaire, la connaissance des caractéristiques de fiabilité est essentielle : elle conditionne la maintenance et décrit les durées de vie. L'usure, la présence inévitable de défauts et les impératifs de renouvellement des équipements engendrent des coûts.

Parmi les questions sur lesquelles un mathématicien est à même d'intervenir, citons principalement :

1. *Comment établir une maintenance optimale pour les systèmes à longue durée de vie ? Comment améliorer la maintenance existante ?*

Si on sait que telle pièce va normalement tomber en panne au bout d'un an, alors que l'appareil tout entier est supposé durer trois ans, on prévoit un remplacement systématique. Cette maintenance préventive est couramment réalisée dans les secteurs du Nucléaire et de l'Aéronautique.

Comment planifier ces remplacements pour qu'ils coûtent le moins cher possible ? Si l'on remplace certaines pièces, il peut être avantageux d'en remplacer d'autres en même temps, plutôt que de tout redémonter (en immobilisant à nouveau la machine) quelques mois plus tard. Et comment calculer l'espérance de vie du nouveau système, après réparations ?

2. *Est-il possible de prolonger le fonctionnement d'une installation au delà de sa durée nominale ?*

Une idée se fait jour petit à petit : mettre en place des « indicateurs dynamiques » qui viendraient montrer que le système commence à donner des signes d'usure, de fatigue : sans attendre la panne, ces indicateurs préviendraient qu'une maintenance va devenir nécessaire. C'est ce que font les indicateurs d'usure dont les pneus sont munis.

3. *Comment fixer les garanties pour les équipements à grand volume de diffusion, afin d'améliorer l'impact commercial et de réduire le risque lié au coût d'appel de la garantie ?*

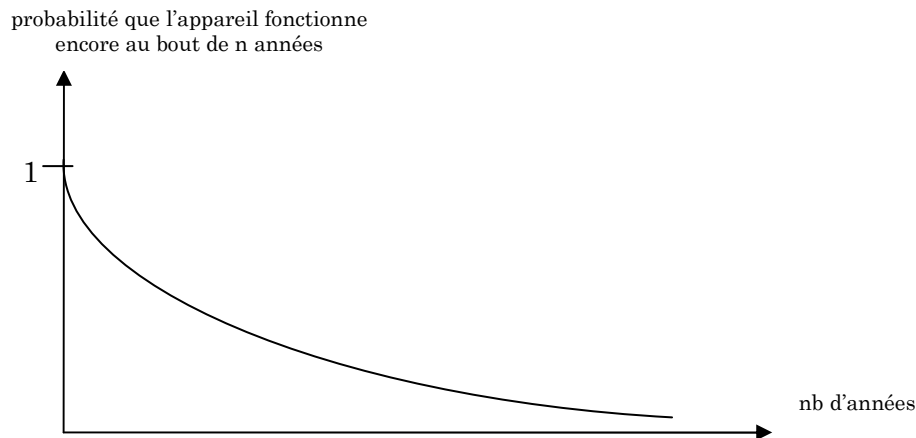
Les machines et les équipements nécessaires vont naturellement tomber en panne, ce que l'utilisateur aimerait éviter. Jusqu'à présent, on se contentait d'une période de garantie, et, dans les cas les plus critiques, on prenait un contrat d'assistance, de maintenance, de dépannage.

Mais maintenant chacun, que ce soit le fabricant ou l'utilisateur, souhaite connaître la durée de vie des appareils. Le fabricant ne veut pas assurer pour trois ans la garantie d'un appareil dont la qualité ne permet qu'un an de bon fonctionnement. A l'inverse, l'utilisateur ne désire pas payer un supplément de garantie (par exemple pour trois ans) pour un appareil qui a peu de chances de tomber en panne.

4. *Comment réduire le time-to-market en optimisant les essais préalables à la mise sur marché ? Jusqu'où peut-on réduire la taille des échantillons et le temps requis pour les essais tout en conservant un résultat aussi précis que possible ?*

Les essais préliminaires coûtent cher, et il est souhaitable de les réduire autant que possible. Une analyse statistique appropriée permet de déterminer le nombre d'essais nécessaires pour annoncer un objectif de fiabilité. Par exemple, si on se fixe un taux de retour (appareils défectueux) d'au plus 5 / 1000, un résultat mathématique montre qu'il suffit de tester 400 appareils : si aucun, sur ce lot, n'est défectueux, on peut annoncer que l'objectif de fiabilité sera tenu avec une probabilité de 87 %.

L'analyse de la fiabilité emprunte beaucoup aux statistiques. On cherche à enregistrer les pannes qui sont intervenues, sur des produits similaires, et à en déduire une espérance de vie. C'est une courbe du genre suivant :



Les difficultés rencontrées par les Industriels

Bien souvent, les données sont de piètre qualité. L'Industriel dispose en général d'un certain nombre de données qui constituent le "retour d'expérience" : historique des pannes, réparations effectuées, maintenances réalisées.

En pratique, ces informations sont peu exploitables, pour plusieurs raisons :

- Echantillon souvent insuffisant ;
- Qualité des données insuffisante ;
- Difficultés d'ordre technique (rupture dans les séries, changements de modèles, etc.)

Les outils statistiques utilisés sont également sujets à caution. On ne connaît pas la qualité de la prédiction ainsi obtenue. De plus, les taux de panne évalués de cette manière sont généralement faux, en raison des hypothèses peu réalistes qui sont faites :

- Taux de panne supposé constant ;
- Indépendance supposée entre les facteurs de panne ;
- Effet des maintenances intermédiaires négligé.

Dans ces conditions, la maintenance planifiée est soit excessive et les coûts le sont également, soit insuffisante et l'on accroît dangereusement le risque d'exploitation.

La maintenance

Tandis qu'un objet vieillit, la maintenance est l'art de le garder en état de marche. Si on savait *comment* l'objet vieillit, on pourrait évidemment améliorer les maintenances : on

saurait quelles pièces doivent être remplacées, avec quel délai. On voit donc immédiatement l'impact que peut avoir une amélioration des connaissances fondamentales sur le vieillissement, car les maintenances sont nécessaires au quotidien, que ce soit pour les appareils ménagers, les réseaux domestiques, l'énergie, etc.

Une maintenance pose en vérité deux problèmes, assez distincts :

- Un problème scientifique : quelles pièces doivent être remplacées, et pourquoi ?
- Un problème d'organisation, lié au coût : lorsqu'on démonte pour remplacer une pièce, ne faut-il pas mieux remplacer aussi la pièce voisine ? Comment planifier ces maintenances, pour réduire le coût et réduire l'immobilisation ou l'indisponibilité de l'objet ?

IV. La prospective

Il s'agit de répondre à des questions du type : combien serons-nous en 2050 et combien d'énergie consommerons-nous ?

La réponse à ces questions est difficile, pour plusieurs raisons :

- On cherche à extrapoler à partir du passé, à réaliser des "courbes de tendance", mais le passé, surtout lointain, est mal connu. Les données sont peu fiables.
- Les choses ont changé. L'humanité a connu un très grand accroissement démographique au XXème siècle (essentiellement à cause des progrès de l'hygiène), mais cet accroissement tend à ralentir. Le nombre total d'êtres humains sur la planète a doublé en 50 ans ; on peut penser qu'il ne doublera pas à nouveau au cours des prochaines 50 années.
- Par ailleurs, des procédés techniques nouveaux apparaissent : on ne se chauffe plus maintenant comme on le faisait il y a 100 ans. Des besoins nouveaux apparaissent aussi (climatisation, par exemple).
- Enfin, l'une des difficultés majeures est que les experts mélangent très souvent leurs souhaits et la réalité. Ce sont des domaines politiquement sensibles, et les experts se croient obligés (consciemment ou non) de mettre en évidence les scénarios "politiquement corrects", selon les doctrines du moment (par exemple : réduction de la consommation d'énergie).

Le rôle du mathématicien est ici, tout naturellement, de faire preuve de logique et d'aborder les choses sans passion : vous prenez un scénario de réduction de 2 % par an, qui nous mène à une valeur A au bout de 20 ans, mais je ne vois rien dans les chiffres de ces 50 dernières années qui conforte ce scénario. Si à la place je prends une augmentation de 3 % par an, cela nous mène à une autre valeur B dans 20 ans.

Le mathématicien peut aussi mener une analyse de risque et dimensionner les ressources en conséquence : le risque d'épidémie et la taille des stocks de vaccins sont un bon exemple. En 2006, nous avons réalisé une étude pour l'Observatoire de l'Energie (Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières) relative aux risques d'interruption des livraisons de gaz en France et à la taille nécessaire pour les stocks.

V. L'environnement

C'est sans doute le plus récent des sujets d'intervention, et c'est aussi le plus actuel, en ce sens que les politiques et les journalistes (beaucoup moins la population elle-même) s'émeuvent à chaque frisson : un oiseau qui perd une plume, une amibe qui a trop chaud sont autant de croisades.

Quotidiennement, la presse rend compte d'inquiétudes qui apparaissent ici ou là : la preuve n'a pas été faite que telle substance n'était pas dangereuse, que les ondes n'avaient pas d'effet nocif, qu'une installation était sans effet sur l'environnement. Il faut donc poursuivre les études : c'est la conclusion invariable. Les études faites, on en réclame d'autres, sans pour autant apaiser le public ou les journalistes. Le nucléaire, la téléphonie mobile, sont des exemples évidents, mais aussi les problèmes de toxicité (amiante), de contamination (vache folle), et plus généralement d'influence de l'homme sur l'environnement (réchauffement climatique).

Tout ce brouhaha, en définitive, crée plus d'inquiétude qu'il n'en calme. Je suis persuadé que la majorité de la population, aujourd'hui, pense que nous vivons plus dangereusement qu'il y a cinquante ans, alors que l'espérance de vie a considérablement augmenté : nous vivons en fait mieux et plus longtemps.

Ce "décalage" entre les faits et l'opinion tient à ce que l'analyse scientifique est mal faite. On ne sait pas ce qu'on analyse, ni comment on l'analyse, si bien qu'en définitive le résultat est dépourvu de contenu. Le rôle du mathématicien est ici de participer à cette analyse, avec logique et sans passion. Voyons des exemples.

1. Indémontrable innocuité

Si l'on réfléchit un peu, on s'aperçoit que la preuve de l'innocuité d'une substance, d'une onde, d'une installation, ne peut JAMAIS être apportée, quelles que soient la durée et l'ampleur des études qu'on y consacre.

Prenons l'eau pure. Vous ne pourrez jamais conclure que l'eau pure est sans danger :

- Il y a une certaine fraction de la population qui est allergique à l'eau, même en faible quantité, que ce soit par contact ou par absorption ;
- N'importe qui ressent des troubles divers s'il a trop peu d'eau ou trop, et les valeurs-seuil ne sont pas les mêmes pour tout le monde ;
- Le mode d'absorption n'est pas indifférent : on peut la boire, mais non se l'injecter ;

Sur les 1 500 personnes qui meurent chaque jour en France (environ), il y en a un certain nombre qui buvaient de l'eau avant leur mort. Il est donc légitime de se demander s'il y a un lien de cause à effet.

Ces arguments très simples sont applicables de manière très générale, et on en conclut que l'innocuité d'une substance ne peut jamais être démontrée, quelle que soit la masse des travaux qui y sont consacrés. Cette vérité élémentaire devrait être portée à la connaissance du public et des journalistes. Toute substance est potentiellement dangereuse, hors de ses limites d'utilisation, et ces limites sont différentes d'une personne à l'autre.

Selon *l'Environmental Protection Agency*, aux USA, seuls 7 % des produits de consommation courante ont fait l'objet d'une étude toxicologique approfondie.

2. Protection déterministe, ou protection statistique ?

En mathématiques, nous avons un concept qui nous aide à savoir de quoi nous parlons : cela s'appelle un système d'axiomes. Les mathématiciens savent qu'à l'intérieur de tel système d'axiomes on peut démontrer telle chose, et que si l'on omet l'un d'entre eux on n'y parvient plus.

C'est exactement la même chose dans le débat qui nous occupe ici. La question fondamentale est : voulons-nous une précaution statistique ou déterministe ? Expliquons ces termes.

La précaution statistique signifie que l'on admet un seuil de risques. Il serait admis, pour une substance nouvelle, qu'elle doit être sans danger pour (mettons) 99,999 % des utilisateurs. Mais reste 0,001 %, soit un pour cent mille, et on me rétorquera que pour un million d'utilisateurs cela fait dix morts, soit dix morts de trop : c'est inacceptable socialement. Soit.

Passons donc à la précaution déterministe : il faut tout contrôler. Mais on retombe sur les quatre arguments du paragraphe précédent qui font que, quoi qu'on fasse, il y aura toujours des morts, réelles ou suspectées.

En pratique, les autorités sanitaires fixent en général des seuils : seuil de rejet, seuil de toxicité, etc. On considère que ces seuils, grâce à des études préalables, permettent de préserver une fraction très importante (mettons 99,9 %) de la population, de l'environnement, de l'écosystème, etc. De plus, ils intègrent des "facteurs de sécurité" très élevés : partout où l'on ne sait pas bien, on divise par dix, cent, mille, la dose acceptable.

La notion de seuil est évidemment nécessaire d'un point de vue réglementaire, mais elle est mal perçue du public : tous ceux qui sont juste au dessous considèrent qu'ils sont en danger. Alors, sous la pression des médias, le pouvoir politique abaisse le seuil, ce qui a évidemment un coût économique (il faut produire autrement). L'effet sur la population est entièrement négatif : ceux qui étaient juste au dessous du premier seuil clament qu'on leur a menti, et qu'ils étaient en danger, comme cela est maintenant reconnu (et ils réclament réparation), tandis qu'une fraction plus large de la population est maintenant à proximité du nouveau seuil !

Il est nécessaire de faire comprendre à la population qu'un seuil relève toujours de la précaution statistique : quoi qu'on fasse, si bas que soit le seuil, il y aura toujours des gens qui seront des victimes, comme expliqué au premier paragraphe. Il ne faut jamais abaisser un seuil sous la pression du public (ou des journalistes), s'il n'y a pas une raison scientifique absolument fondée pour cela. Bien au contraire, il faut avoir le courage politique de relever certains seuils, lorsqu'il apparaît, comme cela arrive souvent, que des études scientifiques complémentaires ont montré que le produit était moins dangereux qu'on ne le pensait initialement. Il faudrait aussi avoir le courage scientifique de dire que l'on réexaminera toute la question, par exemple tous les cinq ans, en fonction des nouveaux résultats d'expérience.

3. Les études finissent toujours par montrer un résultat inquiétant

L'AFSSE (Agence Française de Sécurité Sanitaire Environnementale) s'intéresse, dans un rapport récent, aux dangers potentiels causés par le téléphone mobile (risques de cancers). Elle constate qu'il n'y a rien à constater, mais conclut évidemment qu'il faut poursuivre les études.

Si on les poursuit assez longtemps, elles finiront bien par montrer quelque chose d'inquiétant. Sur les milliers de rats qu'on mettra en présence d'ondes de faible ou de forte puissance, de micro-ondes, ou à qui on injectera des substances diverses, il s'en trouvera

bien un pour développer un cancer, ou au moins une rougeur sur une patte. Cela suffira aux spécialistes pour clamer qu'il y a danger. La multiplication des études n'est pas un gage d'honnêteté, puisqu'on ne retient que celles qui sont inquiétantes.

La multiplication des expérimentations, dont on ne retient que les résultats dangereux, ne peut qu'inquiéter le public. On lui dit : dans telles circonstances, où l'on a injecté telle substance dans le cerveau, le rat a développé telle variante de la maladie de Creutzfeldt Jacob. Mais on ne dit pas combien de rats n'ont rien développé du tout, si bien que la probabilité d'attraper la maladie de cette manière, pourtant bien particulière, reste infime. Les journaux reprennent l'information sous la forme "la maladie de la vache folle est transmissible à l'homme", et il en résulte un délire collectif. On pourrait tout aussi bien titrer : danger, le verre d'eau tue !, parce qu'il y a beaucoup plus de gens morts en buvant un verre d'eau que de gens morts de la maladie de C. J.

Pour y remédier, on pourrait obliger les scientifiques (et les journalistes qui en rendent compte) à publier les conditions expérimentales, comme le font les statisticiens lors des sondages : nous avons interrogé un panel de 805 personnes. Ici, il faudrait préciser : nous avons travaillé sur N rats, et, sur ces N, dans telles conditions, nous avons observé telle réaction. Ne pas se contenter des résultats inquiétants, mais les donner tous.

4. Méconnaissance des arguments statistiques relatifs à la santé publique

Cela fait maintenant plus de dix ans que la téléphonie mobile existe, et a des millions d'utilisateurs. Or la fréquence des cancers et des tumeurs n'a en rien augmenté. Mais cet argument statistique, qui n'est pas politiquement correct, n'est jamais employé.

De même, on montre à la télévision une école, voisine de pylônes portant des antennes, où quelques cas de cancers sont apparus. Mais on ne montre pas les écoles, tout aussi voisines d'antennes, où il n'y a pas de cancers, ni les écoles, éloignées des antennes, où il y a des cancers. Il faut à l'opinion et aux journalistes une relation de cause à effet entre antenne et cancer.

Pourtant, ces arguments statistiques simples seraient de nature à rassurer l'opinion. Lui dire tout simplement que, depuis que la téléphonie mobile existe, la santé publique ne s'est pas dégradée mettrait fin au débat.

5. Méconnaissance des lois fondamentales des probabilités

Le hasard ne réclame pas l'homogénéité, mais crée la disparité. Si le cancer est dû au hasard, il est normal que le taux de cancers varie significativement d'une ville à l'autre. Il serait anormal que toutes les villes de 10 000 habitants aient le même nombre de cancers. Il existe des tests statistiques qui permettent de déterminer quelles déviations sont significatives et lesquelles ne le sont pas.

En tout état de cause, l'apparition de 4 cas de cancers sur une population de 2 000 habitants (par exemple une école) ne justifie pas sa mise en relation avec la proximité d'une antenne : on peut aisément trouver des communautés de 2 000 habitants, éloignées de toute antenne, où il y a beaucoup plus de cancers.

De la même façon, les tempêtes enregistrées en France en 1999 n'ont absolument rien d'anormal ni d'inquiétant, comme l'a dit Météo France, mais il se trouve quantité de gens pour croire que le climat est dérégulé (et, bien entendu, que c'est l'homme qui est à l'origine de ce dérèglement).

6. Des modèles trop précis pour être honnêtes

Les scientifiques (et nous pensons surtout ici aux ondes hertziennes) veulent faire des études extrêmement détaillées. Ils voudraient par exemple pouvoir décrire complètement le champ électromagnétique à tout endroit, à tout instant, pour voir s'il respecte bien les normes de sécurité imposées. Mais cette description est évidemment impossible parce que la situation est trop complexe (bâtiments, réverbérations, etc.), si bien que d'innombrables études extrêmement détaillées vont être nécessaires.

De surcroît, ce que les scientifiques ne voient pas, c'est que ces études détaillées vont en réalité susciter la méfiance du public, qui est persuadé que sous ce monceau de chiffres on lui cache quelque chose.

L'objectif devrait être de répondre à la demande du public, sous une forme simple : nous sommes partout à 20 % de la norme autorisée. Il suffit donc de dimensionner les études pour valider ou réfuter une conclusion de ce type. Il n'est pas nécessaire d'entrer trop finement dans les détails. L'approche du problème, tout entière, doit être "grossière" et non pas fine. Elle doit être homogène : il ne faut pas que tel module soit fin et tel autre grossier, sans quoi toute l'approche est mise en question. Elle doit surtout être robuste, pour être convaincante : compte-tenu des insuffisances sur les données, compte-tenu des variantes qui peuvent être faites sur les diverses hypothèses (tel mode de propagation, etc.), nous sommes en mesure de vous affirmer que le champ ne dépasse nulle part 20 % du seuil autorisé. Point final.

La notion de modèle robuste est très mal comprise aujourd'hui. Ce qu'on voit typiquement, c'est la démarche suivante : on écrit les lois fondamentales de la physique (équations de Maxwell, Navier-Stokes, etc.), en négligeant ce qu'on ne sait pas incorporer (réverbérations, frottements, échanges, etc., suivant le cas). Après quoi on discrétise (toutes les secondes, tous les mètres, etc., selon la capacité de calcul de l'ordinateur), après quoi on alimente en données (tous les 30 km !) suivant la disponibilité de celles-ci. Mais évidemment sur une large échelle ce qu'on avait négligé localement n'est plus négligeable, si bien que l'approche est globalement incorrecte. Le résultat ne s'apparente pas à un château fort, mais bien plutôt à des festons de dentelle posés sur un tumulus de sable...

7. Les journalistes ne représentent pas l'opinion

En France, sauf situation électorale, on n'a pas accès direct à l'état de l'opinion. Les sondages et enquêtes sur les questions environnementales sont extrêmement difficiles à réaliser. On a donc tendance à accorder une importance excessive aux informations apportées par les journaux, qui ne représentent pas nécessairement l'état de l'opinion. Les journalistes accentuent les aspects spectaculaires et ils passent sous silence les aspects rassurants.

Une bonne partie des inquiétudes du public proviennent d'informations fallacieuses, propagées et entretenues par des journalistes. On s'aperçoit, presque à chaque fois, que les faits réels sont connus des organismes publics en charge de ces questions (CEA, IRSN, INERIS, INSERM, Météo France, SHOM, etc.) et que la vérité a été publiée dans des revues internes à ces organismes, mais elle ne circule pas auprès du grand public, qui reste persuadé qu'on lui cache quelque chose.

8. Un modèle n'est pas la réalité

L'outil principal pour les prédictions, quelle qu'en soit la nature, est la modélisation. Faire un modèle c'est, à partir de faits, d'informations, de lois plus ou moins connues, plus ou moins empiriques, prévoir comment les choses vont évoluer. Mais un modèle comporte toujours une part d'hypothèses et une part d'incertitudes.

Les hypothèses portent sur le comportement (on pense que telle chose se produira de telle manière) ; les incertitudes portent sur les données. Un modèle est une construction intellectuelle ; il ne représente pas la réalité. Il représente un scénario possible, ou plusieurs. Il donne des indications sur ce qui peut se passer : sous telles hypothèses, telles choses peuvent arriver. Mais rien de plus, et un modèle ne devrait jamais être utilisé pour fonder une décision politique. Comme la Société de Calcul Mathématique vit de la fabrication de modèles, on voudra bien accepter que j'en sois le principal critique !

9. Les scientifiques peuvent se tromper et ils peuvent être malhonnêtes

L'histoire regorge d'erreurs commises par des scientifiques en toute bonne foi (et, à titre personnel, je réclame le droit d'en commettre : la science ne progresse jamais de manière linéaire). Un passé récent a vu l'apparition de "scientifiques médiatiques", qui se font filmer en blouse blanche devant un ordinateur, et annoncent un nouveau danger pour l'homme : la mer monte, l'atmosphère se réchauffe, l'air est pollué, etc. Il serait bon de remettre tout ceci en perspective. Par exemple, les mesures réalisées par l'EPSHOM à Brest font état d'une élévation moyenne du niveau de la mer, sur 200 ans, de l'ordre du millimètre par an (sans qu'on en soit réellement sûr) : cela ferait 10 cm en un siècle ; on est bien loin des mètres annoncés par une certaine presse.

Pour parvenir à ces prédictions alarmistes, les scientifiques utilisent bien sûr des modèles, mais ils "oublient" d'en préciser les incertitudes et les insuffisances. La presse fait le reste.

10. Le public peut être ignorant ou abusé

Il est complètement légitime que les gens s'interrogent pour savoir si leurs enfants sont en sécurité dans leur école, alors que des émetteurs sont situés à proximité ; il est complètement légitime que les politiques reprennent cette interrogation et que les scientifiques s'efforcent d'y répondre (voir en particulier la consultation du RNRT). Mais une certaine fraction du public est ignorante ou abusée, et il ne faut pas faire semblant de l'ignorer. Bien au contraire, il faut en tenir compte.

- Pour une certaine fraction, il s'agit, par tous moyens, de lutter contre la civilisation industrielle (nucléaire, téléphonie, amiante, etc.) et tout procès est bon à prendre. Aucun argument scientifique ne les convaincra jamais.

A ceux-là, il est bon de ne pas répondre de manière trop détaillée. Il vaut mieux répondre : nous sommes partout à 20 % du seuil autorisé, que se mettre à discuter à perdre haleine avec des gens qui, de toute façon, ne sont pas réceptifs à des arguments scientifiques.

- Pour une certaine fraction, qui a effectivement subi un dommage (maladie par exemple), il s'agit d'obtenir une compensation financière supérieure. On voit des fumeurs faire des procès aux fabricants de tabac.

Comme la précaution (nous l'avons vu plus haut) est nécessairement statistique, il se trouvera nécessairement un petit nombre de personnes qui, quel que soit le seuil fixé, développeront des maladies. Ces maladies seront prises en charge par la Sécurité Sociale, sans qu'il soit besoin d'en rechercher précisément la cause (qui est, du reste, impossible à établir en général).

- Pour une certaine fraction enfin, il s'agit de gens qui n'ont subi aucun dommage mais voient là une occasion de recevoir de l'argent. Beaucoup de plaintes s'adressant aux industriels de l'amiante proviennent de gens qui n'ont développé aucune pathologie.

Sur ce dernier point, c'est au système judiciaire de revoir son fonctionnement. Il est difficilement concevable que quelqu'un puisse recevoir compensation pour un dommage qu'il n'a pas subi.

VI. Le danger d'un abus de modèles

La notion de modèle est à la mode, surtout parce qu'elle permet de réaliser des économies et d'aller plus vite dans le développement industriel. On construit les automobiles, les avions, les ponts, plus vite qu'on ne le faisait il y a trente ans. Les progrès de l'informatique y sont pour beaucoup, mais aussi les progrès des mathématiques.

Un modèle est par définition une représentation de la réalité ; selon l'usage, selon les circonstances, elle est plus ou moins détaillée. Selon notre degré de connaissance, elle est plus ou moins juste.

La conception d'un avion, d'une automobile, se font très largement, de nos jours, grâce à des modèles numériques ; l'expérimentation, les prototypes, ne viennent qu'ensuite. Ces modèles numériques incluent nos connaissances en résistance des matériaux, en aérodynamique, etc., sous forme de lois qui sont largement empiriques (choix arbitraire de coefficients, connus d'expérience).

Nous dirons donc ceci, de manière très grossière : là où l'expérience, là où le corpus de connaissances emmagasinées pendant des décennies est suffisant, il est évidemment utile de le transférer à l'ordinateur. Cela revient à construire de gros "systèmes experts", qui accumulent le savoir acquis par des générations d'ingénieurs.

Par contre, là où les connaissances sont insuffisantes, là où la question est toute récente (et c'est typiquement le cas de l'environnement), il est extrêmement dangereux de se réfugier derrière un modèle mathématique. Cela donne une fausse impression de sécurité, mais en réalité cela ne masque en rien l'ignorance fondamentale. Redisons-le souvent : aucune décision politique ne devrait être prise sur la base d'un modèle mathématique.

Lorsqu'un modèle est réalisé, il devrait l'être en fonction des incertitudes sur les objectifs, sur les lois et sur les données. Contrairement à ce que font beaucoup d'adeptes du "calcul scientifique", il ne sert à rien de développer un modèle fin, précis, qui prendra des heures d'ordinateur, si les données ne sont connues qu'à 20% près. Or, dans tous les exemples que nous avons vus, 20% c'est déjà bien !

VII. Conclusion : rôle des mathématiques et des mathématiciens

Au travers des exemples parcourus plus haut, on constate que le rôle des mathématiques dans les changements sociaux est considérable, que ce soit à l'échelle du pays, d'une ville, ou d'une entreprise. Cela tient au fait évident que tout changement requiert l'usage d'outils de plus en plus "pointus", et que ces outils contiennent une part croissante de mathématiques, qu'ils soient purement scientifiques (recherche technique) ou bien qu'ils s'adressent à l'organisation.

A l'inverse, le rôle des mathématiciens dans ces changements, dans ces innovations, est infime, et je suis probablement le premier à avoir été invité aux "Mardis de l'innovation".

La raison principale de cette absence des mathématiciens est très claire : l'école mathématique, surtout en France, est exclusivement académique. Depuis les années 1960, elle travaille, au nom des "choix bourbachiques" dans des directions purement axiomatiques, sans aucun lien avec les réalités économiques. Nous en sommes maintenant à la troisième génération de mathématiciens, au sein du monde académique, qui n'ont jamais vu un contrat de leur vie. Et comme ces mathématiciens s'auto-reproduisent, au nom du sacro-saint "jugement par les pairs", les choses n'ont aucune raison d'évoluer favorablement. Un mathématicien, au 21^{ème} siècle, reste persuadé que son devoir est de "démontrer des théorèmes" (expression de G. H. Hardy, première moitié du 20^{ème} siècle), alors que ce devoir est d'apporter des outils exploitables aux autres disciplines. Le système fermé des publications, rédigées par des spécialistes pour des spécialistes, aide à cet enfermement.

L'absence quasi-complète des mathématiciens professionnels de la scène de l'innovation, en même temps que les besoins pressants que j'ai décrits, laisse le champ libre à une aimable anarchie. N'importe qui crée son propre modèle mathématique, que ce soit le glaciologue dont le réfrigérateur fuit, le climatologue qui craint pour ses vacances, le physicien qui veut son trou noir, l'épidémiologiste qui rêve d'un nouveau virus : un peu de papier, un peu de crayon, un peu d'ordinateur, et hop! voici un beau modèle ; il ne reste plus qu'à le vendre à la presse, aux politiques, pour en retirer de juteuses subventions. La mystification du réchauffement climatique, qui a probablement encore de beaux jours devant elle, ne tiendrait pas dix minutes si l'on faisait expertiser les modèles sous-jacents par des mathématiciens, et si on écoutait leurs conclusions !

« Il est clair que les savants, comme tous les citoyens, doivent s'intéresser aux affaires de leur pays. Dès qu'ils ont lieu de penser que leur intervention peut servir utilement les intérêts de la nation, il faut qu'ils sacrifient tout à ce devoir. Ont-ils à cet égard des obligations spéciales qui n'incomberaient pas aux autres citoyens ? Doivent-ils plus que les autres à la Chose Publique ? Oui, s'ils peuvent lui être plus utiles ; et ils peuvent lui être plus utiles si leur voix a plus de chance d'être écoutée. Mais y a-t-il des raisons pour qu'elle le soit ? Le langage de la passion est le seul que la foule comprenne et ce langage n'est pas le leur ».

Henri Poincaré, « Sur la participation des savants à la politique » (1904).