

L'art consommé de l'ingénieur et la science balbutiante du mathématicien

–les freins à l'innovation–

par Bernard Beauzamy

Les chercheurs en général et les mathématiciens en particulier prétendent puiser leur inspiration dans les phénomènes réels, et c'est particulièrement le cas lorsqu'ils écrivent dans des revues "grand public". Malheureusement pour eux, les phénomènes en question n'ont été analysés qu'au travers de leur aptitude à fournir un problème académique ; toutes les autres facettes, et notamment les contraintes techniques, économiques et sociales, ont été ignorées. Il en résulte que lorsque le problème est résolu, ou tout du moins lorsqu'on y a réalisé des progrès significatifs, la contribution apportée à la "question" initiale est infime.

Prenons un exemple concret : le fameux problème de l'empilement des sphères. Etant donné un réceptacle (par exemple un carton cubique) et des sphères toutes identiques (des oranges), comment placer les sphères pour en mettre le plus possible dans le carton ? Cette question occupe les géomètres depuis longtemps. Elle a été mentionnée par Frederic Wan, il y a trois ans, lorsqu'il était en charge des programmes de mathématiques pour la *National Science Foundation* aux U.S.A. : il voyait à la solution d'une telle question des applications pratiques, industrielles même, et il s'en servait pour justifier le financement du programme de recherche.

Cette attitude est absurde. Je suis tout à fait partisan du financement d'un programme de recherche en géométrie ; il faut bien savoir toutefois que, quelle que soit la solution, les dockers des Halles ne changeront pas pour autant leur manière d'empiler les oranges ! Les mathématiciens *affaiblissent leur position* en prétendant que de tels travaux ont des applications pratiques : lorsqu'ils obtiennent des résultats, il ne sont pas suivis d'effet en pratique, parce que le problème initial était certes un excitant pour la curiosité intellectuelle, mais ne correspondait pas à un besoin social réel.

Les besoins des entreprises

Si l'on veut qu'une innovation soit utilisée par les entreprises, il faut, dans la très grande majorité des cas, qu'elles aient recensé un besoin *avant* que l'innovation apparaisse. Le besoin peut être dans un registre différent : les entreprises sont imaginatives et peuvent appliquer à tel domaine une innovation née dans un autre. Le besoin peut être diffus : on sent bien que telle chose ne va pas, mais on ne sait pas trop pourquoi. Mais il ne faut pas que le besoin soit totalement absent. Les entreprises, à l'heure actuelle, quelle que soit leur taille, sont trop préoccupées de leur survie pour se soucier d'une innovation "gratuite" ; d'une innovation pour l'innovation, et la laisseront aux rêves des technocrates.

Très heureusement pour les scientifiques, les besoins recensés par les entreprises sont nombreux et variés, et ils apportent des problèmes, bien réels ceux-là, largement aussi intéressants que ceux que les universitaires s'étaient artificiellement proposés. Il suffit donc d'interroger les utilisateurs. . .

Est-ce si simple ? Non, en vérité. L'utilisateur en général ne sait pas poser le problème. Il parvient à peu près à décrire la situation qui pour lui serait idéale, mais il ne sait pas formuler les contraintes, ni surtout les hiérarchiser. Lesquelles sont pour lui essentielles ? Lesquelles sont secondaires ? Il dispose d'une solution, en général construite à la main, en reprenant celle du mois précédent et en y apportant quelques variations. Comment cette solution est-elle apparue ? Cela se perd dans la nuit des temps. Si on y ajoute

ceci et qu'on y retranche cela, est-ce encore acceptable ? Il pense que oui, mais son collègue du bureau d'à côté pense que non . . .

La modélisation, c'est à dire l'art de mettre le problème en équations, promet donc d'être rude. Une chose est sûre pourtant : on aura l'aide active de l'ingénieur concerné ; il consacrera tout le temps et tous les efforts nécessaires à bien vous faire comprendre son problème. Nous sommes au coeur de son métier, il est heureux d'en parler, et tout gain, de quelques secondes sur un trajet, de quelques grammes sur un chargement, se traduit à la fin de l'année par des économies colossales pour son entreprise.

Voyons donc, au travers d'exemples concrets dont nous suivrons la construction pas à pas, comment se présente le besoin d'une entreprise.

Les besoins des entreprises

Fondamentalement, une entreprise a deux besoins : vendre plus et dépenser moins. Tous les autres ne sont que conséquence de ces deux-là. Il importe donc, lorsqu'on cherche à identifier un besoin, de savoir dans quelle catégorie il se range : cela permet d'être sûr de son authenticité. Dans la plupart des cas, les besoins où l'optimisation intervient se rangent dans la catégorie "dépenser moins". Encore faut-il savoir répondre à la question "en quoi la solution de ce problème permettra-t-elle de dépenser moins ?" Cela ne doit pas rester théorique. Mentionnons au passage qu'il y a des exemples où l'optimisation permet de produire davantage : mieux disposer les ouvriers dans un atelier permet d'améliorer la productivité.

Nous allons maintenant développer des exemples où l'on suivra, à partir d'un besoin clairement exprimé, les progrès de la modélisation et la construction de la solution, ou plutôt de la solution approximative, car les mathématiques parviennent rarement à trouver l'optimum.

Le schéma de transport d'un constructeur automobile

Un constructeur fabrique des automobiles dans différentes usines, réparties un peu n'importe où (mettons qu'il y en ait 5 en France). Il veut ensuite acheminer ces voitures neuves auprès des concessionnaires, qui les revendront aux clients. Mettons, pour fixer les idées, qu'il y ait 2 000 concessionnaires. Avant de parvenir au concessionnaire, les véhicules passent généralement par un "centre de transit" où on les dispatche par régions, où on met un auto-radio, etc.

Le constructeur ne possède pas, par lui-même, les camions nécessaires au transport. Il va donc faire appel à des sous-traitants, appelés "transporteurs". Comment s'y prend-il ? Très simplement : chaque année il fait un appel d'offres. J'aurai, au cours de l'année, tant de véhicules à transporter de tel endroit à tel endroit, combien me prendrez-vous pour cela ? Le constructeur sélectionne alors, sur chaque tronçon, le transporteur le moins cher. L'ensemble de ces sélections constitue le "schéma de transport" : les véhicules partant de l'usine U et à destination de la zone Z passent par le centre C et sont confiés au transporteur T.

Il n'y a pas besoin de mathématiques pour cela, ni même d'un ingénieur : il suffit de regarder les listes reçues en réponse aux appels d'offre, et, sur chaque tronçon, de prendre le moins cher. C'est l'affaire d'un enfant de cinq ans.

Eh bien non ! Parce que chaque transporteur ne dispose que d'un nombre fixé de camions (différent d'un transporteur à l'autre, bien sûr), que l'on appelle sa "capacité". Et si vous utilisez le transporteur Tartempion sur le segment Brest-Quimper, parce qu'il était le moins cher sur ce segment, vous courez le risque d'épuiser tous les camions de Tartempion, et de vous retrouver avec le seul Dugenou sur le segment Brest-Saint Malo. Or Dugenou est horriblement cher !

C'est ici que l'on voit la différence d'état d'esprit entre un ingénieur et un mathématicien. L'ingénieur va résoudre petit à petit les morceaux du problème qu'il sait résoudre. Il lui restera à la fin quelques morceaux du puzzle qui ne s'emboîtent pas : tant pis, la solution obtenue est quand même bonne dans l'ensemble.

Le mathématicien, lui, va essayer de résoudre le problème *globalement*. Il va écrire l'ensemble des inconnues, l'ensemble des contraintes, une fonction de coût dépendant des inconnues, et essayer de minimiser globalement la fonction de coût sur l'ensemble des variables, en respectant les contraintes. Bien entendu, il n'y arrive pas, alors que l'ingénieur y parvient tout à fait. Mais n'y a-t-il pas quelque noblesse à avoir essayé ?

Essayons donc de modéliser. Pour la compréhension du lecteur, on va se limiter à deux usines, U_1 et U_2 desservant chacune deux zones de livraison : Z_1 et Z_2 pour la première usine, Z_3 et Z_4 pour la seconde. Notons D_1 la quantité d'automobiles à acheminer dans la zone Z_1 , D_2 pour Z_2 , etc : c'est ce que les clients ont commandé. Disons que nous avons trois transporteurs en tout, T_1 , T_2 , T_3 , qui chacun ont fait connaître leur prix au km pour le transport d'une voiture. Nous sommes alors en présence d'un problème standard de recherche opérationnelle.

Il en va de même si le schéma comporte cinq usines, 2 000 zones et 600 transporteurs. N'importe quel ordinateur bien né, lorsqu'on le munit du logiciel approprié, résout en un clin d'oeil les problèmes de ce type (dits "linéaires") et le mathématicien est content : il va faire économiser beaucoup d'argent à l'entreprise.

Eh bien non : on lui rit au nez. Parce que les prix ne sont pas du tout fixés de cette manière. Les prix ne sont pas proportionnels au volume transporté. Dans telle tranche, c'est tant du km, au delà c'est tant, et ainsi de suite (par exemple, si on me confie 100 véhicules à transporter, ce sera 10 F du km, si j'en ai entre 101 et 200 ce sera 9 F du km, au delà, 8 F du km). La fixation du prix n'est plus linéaire, elle n'est même plus continue, et l'algorithme du simplexe s'effondre avec un bruit mou, particulièrement désagréable.

Aucun transporteur sensé, du reste, ne se contenterait de fixer les prix de manière aussi abstraite. Tout dépend si ses camions vont revenir à vide ou non. S'ils sont utilisés ailleurs sur une autre tranche, les prix vont chuter (plus exactement, le constructeur automobile sera en position de force pour négocier les prix avec ce transporteur-là, en lui disant "voyez, je vous donne du travail là aussi, faites moi un rabais global"). Il y a donc une interdépendance entre les différentes branches du schéma. Les choses commencent à ne plus être aussi simples.

Et ce n'est pas tout ! On ne transporte pas les véhicules un par un, mais en général 8 par 8. Si vous avez un seul véhicule à transporter, ou deux, vous payez quand même le camion de huit. A moins, évidemment, que le camion ne soit plein sur le tronçon suivant, auquel cas le transporteur vous fera probablement une faveur en acceptant de transporter à bon compte vos deux véhicules esseulés sur le premier tronçon. . .

Bien sûr, ce n'est qu'une partie du problème : nous n'avons parlé que des prix ; on peut aussi parler des trajets (quelles sont les routes les plus courtes ?), de l'implantation des usines et des centres de transit (que l'on peut vouloir modifier), etc.

Ecrivons rapidement les équations, pour le lecteur curieux. Il suffit de prendre pour variable le nombre x_{ij} d'automobiles confiées au transporteur T_i , à destination de la zone Z_j ($j = 1, \dots, 4$). On aura ($i = 1, 2, 3$) les contraintes $\sum_i X_{ij} = D_j$ (la somme des livraisons réparties entre les différents transporteurs satisfait la demande).

$\sum_i x_{ij} \leq C_{ji}$, où C_i est la capacité maximale du transporteur T_i et on veut minimiser $\sum_i C_{ij} x_{ij}$, où C_{ij} représente le coût de transport, pour le transporteur T_i , d'une automobile sur la ligne j . Ce type de problème (si on considère que les variables sont de nombres réels et pas seulement des entiers, se résout par l'algorithme du simplexe, qui date de 1940.

A ce stade, le mathématicien s'enfuit en hurlant, tandis que l'ingénieur pavoise : il sait, lui, résoudre le problème, tant bien que mal, alors qu'aucune théorie mathématique ne permet d'aborder, fût-ce de très loin, des questions aussi complexes, aussi non linéaires, et aussi hétérogènes (mélangeant des prix et des distances).

Pourtant, le besoin est là, et bien là. Un grand constructeur automobile produit environ 5 000 véhicules par jour, 300 jours par an, soit 1 500 000 véhicules. L'acheminement de chaque véhicule, entre l'usine et la destination, revient en moyenne à 1 000 F : cela donne un budget annuel de transport de 1,5 milliard de F. Si on parvient à économiser 10 % par un meilleur choix des transporteurs, cela fait une économie de 150 millions de F... Cela vaut la peine d'y réfléchir !

Le remplissage des soutes d'un avion

Tous les jours, des centaines de fois par jour, des centaines de compagnies d'aviation sont confrontées au problème suivant : des containers s'entassent sous un hangar, il faut les mettre dans les soutes des avions en remplissant ces soutes au mieux. Ces containers sont en général des parallélépipèdes, de dimensions et de poids connus. Les soutes sont des emplacements rectangulaires, où les containers sont arrimés. Pour optimiser le chargement, il faut donc mettre le plus de containers possible dans les soutes. Fort heureusement, il existe en mathématiques des algorithmes de type "knapsack" (sac à dos) qui servent précisément à cela : optimiser le rangement d'objets connus dans un volume connu. Ils reposent sur des théories d'optimisation combinatoire.

Nous sommes donc particulièrement bien placés pour résoudre ce problème : encore une victoire de l'esprit humain.

Pourtant, un doute nous vient d'un coup. Qu'est ce que cela veut dire "optimiser le chargement" ? Est-ce maximiser le poids de ce que l'on emporte (prendre le plus de choses possible) ou le prix de ce que l'on emporte ? Ce n'est pas du tout la même chose : un container peut être énorme et de faible valeur. Si on l'emporte, on risque de laisser de côté un petit, qui lui avait une valeur considérable.

A la réflexion, nous balayons ce doute. Il faut fixer un critère, certes, mais peu importe lequel. Poids, volume ou prix, n'importe, notre algorithme marchera aussi bien avec chacun d'eux (il produira, bien sûr, des résultats différents selon le critère utilisé).

Nous disposons donc d'un outil solide et, tout fiers, nous bavardons avec les ingénieurs des compagnies d'aviation. Nous découvrons ainsi, avec étonnement, que ce qui les intéresse, c'est aussi la *répartition* du poids : plus celui-ci est en arrière, et plus la consommation de carburant sera réduite.

Pour un mathématicien, ceci est inquiétant, et prouve une nouvelle fois que l'univers réel est mal fait (à la différence de l'univers académique, qui lui est fort bien fait, tout forgé qu'il est par quelques siècles de vie contemplative). On ne peut pas, en effet, optimiser deux choses à la fois : le volume emporté, d'une part, et la position du centre de gravité du chargement, d'autre part. Si on maximise le chargement, on court le risque que le centre de gravité soit trop en avant ; en revanche si on place bien le centre de gravité, on risque de devoir se limiter à un chargement incomplet.

Consultés, les experts des compagnies d'aviation disent que pour eux c'est le volume qui est prépondérant ; la position du centre de gravité sera traitée comme une contrainte : on fixera quelque chose comme $a < g < b$, en assignant le centre de gravité à résider entre deux bornes a et b considérées comme admissibles. Là, nous retombons sur nos pieds : avec quelques modifications, c'est à nouveau une situation de type "knapsack". On dispose d'algorithmes approximatifs, mais nul ne sait si ce type de problème admet une solution optimale, encore moins si on peut la calculer en temps raisonnable ! Quant au problème de la "double" optimisation, inutile d'en parler...

Mais discutons encore un peu avec les ingénieurs de la compagnie d'aviation. Nous nous rendons compte que le problème n'est pas *du tout* celui-là ! Tout est à refaire. En effet, nous optimisons notre chargement, et nous laissons de côté tel conteneur qui a une sale tête. Pouvons-nous le laisser de côté le lendemain encore ? Non, certainement pas, parce que quelqu'un l'attend quelque part, et va se mettre à hurler s'il n'a pas

son conteneur au bout d'un certain temps. La compagnie devra payer des pénalités (montant quantifiable) et perdra des clients (montant non quantifiable). Pour optimiser correctement, il faudrait donc accorder à chaque conteneur un "poids moral" tenant compte de son degré d'urgence, lorsqu'il est connu. En ce cas, deux vols successifs ne sont plus indépendants : le second (ou le troisième) doit emporter ce que le premier a laissé. Le problème est beaucoup plus compliqué : il faudrait par exemple optimiser les chargements, pour une destination donnée, sur une semaine. Trop compliqué !

On pourrait multiplier les exemples de cette nature, qui se caractérisent tous de la même façon : un besoin réel provenant des entreprises et une absence presque complète de solution scientifique. Les solutions mises en oeuvre par les ingénieurs sont empiriques : on fabrique à la main –au mieux avec un tableur– quelque chose d'à peu près satisfaisant, et on le reprend l'année suivante, en le modifiant un peu.

Comment se fait-il que, sur des questions aussi importantes, les entreprises ne fassent pas davantage appel à la recherche scientifique, Comme se fait-il, inversement, que les chercheurs ne se soucient pas plus des besoins des entreprises ? Quels sont, en d'autres termes, les freins à l'innovation, de part et d'autre ?

Tout d'abord, il faut bien voir que la question a pris toute son ampleur avec l'apparition de l'informatique rapide et à bas coût. Un chef d'entreprise rêve maintenant d'une optimisation qui tourne sur son PC ; il y a dix ans, ce n'était pas le cas.

Les entreprises –même les PME– comprennent de plus en plus qu'elles auront besoin d'outils scientifiques sophistiqués, et que ces outils seront indispensables à leur compétitivité. Mais, souvent, la culture de l'entreprise ne permet pas d'obtenir les données sur lesquelles les outils pourraient être appliqués. Ces données sont manquantes, on ne les a pas reçues, on les a jetées, on a oublié de les demander ...

Prenons un exemple. Tel groupe pétrolier souhaite optimiser les livraisons d'essence aux stations service (ce qui permettrait de diminuer les stocks) mais ne peut le faire, parce que personne ne sait, à chaque instant, ce qui reste dans chaque station. On pourrait le savoir : il suffit de noter la date et le volume de la précédente livraison, et de noter ce que chaque pompe débite chaque jour. Mais le gérant de la station service est un franchisé ; à qui personne n'a demandé de noter ces renseignements. Il attend que la cuve soit vide pour téléphoner.

Les choses à cet égard vont changer, car les entreprises intégreront très vite dans leur culture ce besoin d'outils quantitatifs, que les réseaux informatiques de toute sorte rendront disponibles en temps réel.

Du côté des scientifiques, la rigidité est beaucoup plus structurelle, et n'est pas susceptible d'amélioration à échéance prévisible. Elle tient au mode de jugement des travaux, appelé "jugement par les pairs". D'autres scientifiques, spécialistes du même sujet, évaluent le contenu des résultats et décident s'ils sont dignes d'être publiés ; sans publications pas de promotions. Dans ces conditions, les scientifiques ont tout intérêt à donner à leur travaux un tour suffisamment académique pour mériter la publication, plutôt que de se soucier d'apporter une réponse concrète à un problème concret.

Il y a une autre raison, plus profonde encore. Si on cherche à apporter une réponse concrète à un problème concret, on risque un démenti par les faits : la réponse qu'on a apportée ne convient pas. Non pas qu'elle soit fautive, mais parce qu'elle néglige les innombrables contraintes dont je parlais tout à l'heure. Or il est très désagréable d'être démenti par les faits. Il est beaucoup plus confortable, intellectuellement parlant, de démontrer des théorèmes.

Pour dissimuler cette lâcheté à l'égard des réalités du monde, les chercheurs-fonctionnaires ont développé, au fil des années, toute une panoplie de justifications qui sont autant de mystifications : la recherche fondamentale ne pourrait pas être finalisée ; la recherche de base est noble et la recherche appliquée est servile, bouillie conceptuelle à la sauce syndicale.

Le monde académique réalise une formation en circuit fermé : le jeune étudiant, sitôt sa thèse terminée (thèse réalisée au sein d'institutions académiques), devient enseignant chercheur à l'Université, souvent sans jamais avoir vu de sa vie un problème concret, issu des besoins d'une entreprise. Imaginerait-on un professeur de médecine qui n'aurait jamais vu de malades ?

Il y a peu d'espoir, donc, que les scientifiques en place s'intéressent réellement aux besoins des entreprises : même si beaucoup font semblant, ni leur statut, ni leur personnalité, ni leurs aspirations, ne les y disposent.

On pourrait ici se dire : la génération montante sera mieux disposée. Il n'en est rien. Très peu de jeunes, aujourd'hui, se destinent à une carrière scientifique, au-delà d'un diplôme d'ingénieur. Prisonnier d'une idéologie sécuritaire, incapables de distinguer entre recherche et enseignement, sensibles aux faussetés distillées par des professeurs ingorants, les jeunes se bornent à préparer l'agrégation, préfèrent un savoir pétrifié aux inquiétudes de l'inconnu et aux joies de la découverte.

Les rares charnières qui existaient entre le monde de la recherche et le monde de l'entreprise, les rares points de contact entre science théorique et science finalisée, sont aujourd'hui en voie de disparition. Ces "interfaces" étaient réalisées au sein d'organismes prestigieux, tels le Commissariat à l'Energie Atomique, le Centre National d'Etude des Télécommunications, la Délégation Générale pour l'Armement, EdF (je pourrais en mentionner bien d'autres) : tous sont en restructuration, et, partout, cette restructuration se traduit par la diminution –voire la disparition– de la composante scientifique au sein de ces établissements. Une logique financière spéculative conclut qu'il est plus efficace, moins onéreux, de "faire faire" plutôt que de faire sous-traiter la partie scientifique. Sans doute, mais tous ensemble tous ces organismes représentaient le potentiel scientifique français : si par extraordinaire un jeune était assez courageux pour embrasser une carrière scientifique non académique, vouloir contribuer au programme spatial, aux télécoms, au nucléaire, ... il passait normalement par l'un de ces organismes, avant d'entrer dans l'industrie.

"Faire faire" plutôt que faire soi-même ? Pourquoi pas, s'il y a quelque part les compétences : c'est affaire de coûts et de répartition des tâches. Mais chaque organisme qui s'occupait de formation scientifique décide de s'en dessaisir, au profit des structures universitaires et du CNRS, viscéralement et structurellement incapables de contributions significatives.

La myopie des responsables politiques n'est pas pour nous surprendre ; nous y sommes habitués. Laissons les technocrates ministériels croire que relier toutes les entreprises à Internet résoudra d'un coup tous les problèmes de l'innovation ; moment merveilleux où, téléchargeant d'un coup, grâce à "Acrobat Reader" à 56 600 bds, un fichier .pdf, le chef d'entreprise découvre d'un coup la formule magique de la colle qui fera sa fortune ; il tombe à genoux en remerciant le Secrétariat d'Etat à l'Industrie qui lui rembourse la moitié de son modem.

Le renouveau viendra le jour où, sous la pression des besoins du marché, les entreprises décideront d'assurer la formation scientifique, par le biais d'écoles d'ingénieurs ou d'universités privées. Cela exige qu'elles en aient les moyens financiers ; cela exige aussi que les jeunes cessent de croire qu'il n'est de recherche que publique, qu'il n'est d'employeur que l'Etat, qu'il n'est d'autre statut que celui d'enseignant, d'autre consécration que les publications, d'autre notoriété qu'être cité dans les revues scientifiques : toute une révolution culturelle ont nous ne voyons même pas l'amorce.