

Sous le haut patronage de
Monseigneur Jacques CHIRAC
Président de la République

L'ART DE L'INGÉNIEUR FACE AU 21^{ÈME} SIÈCLE

PARIS
4 novembre 2004

CONSEIL GÉNÉRAL
DES PONTS ET CHAUSSÉES



200ans
CONSEIL GÉNÉRAL
DES PONTS ET CHAUSSÉES

actes du colloque



actes du colloque

L'ART DE L'INGÉNIEUR FACE AU 21^{ÈME} SIÈCLE

CONSEIL ECONOMIQUE ET SOCIAL - PARIS
4 NOVEMBRE 2004



En association avec Le Moniteur
GRUPE MONITEUR

SOMMAIRE

1	OUVERTURE Jean-Pierre GIBLIN, <i>président de la section « Affaires scientifiques et techniques » du CGPC</i>	5	3	RECHERCHE ET INNOVATION : BASES DE LA CULTURE DE L'INGÉNIEUR	23
2	INTRODUCTION Jean BERTHIER <i>président du comité d'experts « Génie civil et Construction » du CNISF (Conseil national des Ingénieurs et Scientifiques de France)</i>	7	INTRODUCTION		23
	LA CONQUÊTE DES GRANDES PORTÉES Michel VIRLOGEUX, <i>ingénieur-conseil, expert, membre de l'Académie des technologies</i>	9	RECHERCHE & DÉVELOPPEMENT ET INNOVATION : APPORTS À LA FORMATION ET À LA CULTURE DES INGÉNIEURS		25
	RION-ANTIRION OU L'ART DE S'ADAPTER AUX OBSTACLES NATURELS LES PLUS REDOUTABLES Jean-Paul TEYSSANDIER, <i>directeur, VINCI Concessions, président directeur général de la société concessionnaire du pont de Rion-Antirion (Grèce)</i>	14	RECHERCHE & DÉVELOPPEMENT ET INNOVATION : ORGANISATION ET APPORTS AU DÉVELOPPEMENT DES TECHNIQUES D'AMÉNAGEMENT ET DE CONSTRUCTION		27
	DES MATÉRIAUX NOUVEAUX POUR RELEVER LES DÉFIS DE LA LÉGÈRETÉ, DE LA TRANSPARENCE ET DE LA FINESSE ARCHITECTURALE DANS LES GRANDES CONSTRUCTIONS PUBLIQUE Bernard VAUDEVILLE, <i>ingénieur-architecte, responsable du département « Génie civil » de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées, membre du directoire de RFR</i>	17	RECHERCHE & DÉVELOPPEMENT, MODÉLISATION ET SIMULATION AU SERVICE DES CITOYENS : LA VARIÉTÉ DES APPORTS DE LA MODÉLISATION ET DE LA SIMULATION		30
	► DÉBAT	20	LA MODÉLISATION MÉTÉOROLOGIQUE ET CLIMATIQUE		32
			LA RÉALITÉ VIRTUELLE AU SERVICE DE LA CONSTRUCTION ET DE L'AMÉNAGEMENT		35
			LA MODÉLISATION BIOMÉCANIQUE AU SERVICE DE LA SÉCURITÉ ROUTIÈRE : LES TRAUMATISMES VIRTUELS DE L'ABDOMEN		37
			► DÉBAT		39

4	CULTURES CROISÉES	
	INTRODUCTION	
	Jean FREBAULT, <i>président de la section « Aménagement et environnement » du CGPC</i>	
	L'ARCHITECTE ET L'INGÉNIEUR	
	Jean-Marie DUTHILLEUL, <i>ingénieur et architecte, SNCF</i>	
	PAYSAGE ET INFRASTRUCTURES	
	Bernard LASSUS, <i>architecte-paysagiste et plasticien</i>	
	L'INGÉNIEUR AU SERVICE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE	
	Dominique BIDOUE, <i>membre de la section « Aménagement et environnement » du CGPC, président de l'Association pour la Haute Qualité Environnementale (HQE)</i>	
	TABLE RONDE	
	André BROTO, <i>directeur de la construction, Cofiroute</i>	
	Robert MAUD, <i>directeur départemental de l'Équipement de l'Indre</i>	
	François PROCHASSON, <i>Association 4D</i>	
	Jean FREBAULT, <i>président de la section « Aménagement et environnement » du CGPC.</i>	
40	5 L'INGÉNIEUR ET LA SOCIÉTÉ	58
40	TABLE RONDE	58
	Pierre VELTZ, <i>ancien directeur de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, docteur en sociologie</i>	
42	Laurent VULLIET, <i>doyen de l'École d'architecture et du génie civil et environnemental à l'École polytechnique fédérale de Lausanne</i>	
45	Georges MERCADAL, <i>vice-président de la Commission nationale du débat public.</i>	
48	► DÉBAT	65
50	6 ALLOCUTION DE CLÔTURE	69
	Claude MARTINAND, <i>vice-président du Conseil général des Ponts et Chaussées</i>	

OUVERTURE

Jean-Pierre GIBLIN, président de la section
« Affaires scientifiques et techniques » du CGPC

Le titre de ce colloque, à lui seul, donne son sens à cette journée. A l'instar des autres rencontres qui ont précédé et qui le suivront, ce colloque s'inscrit dans le cadre de la célébration du bicentenaire du Conseil général des Ponts et Chaussées. Mais il n'est pas tourné vers le passé, si prestigieux soit-il, comme vous montrera le numéro spécial des *Annales des Ponts et Chaussées* qui vous sera distribué à la pause de midi, et dont je vous recommande la lecture. Il n'est pas davantage tourné vers le passé même si nous nous trouvons aujourd'hui dans un lieu qui fut celui du Musée des travaux publics jusqu'à la Libération. Cela me donne l'occasion de remercier Jacques DERMAGNE, président du Conseil économique et social, qui a bien voulu mettre cet hémicycle à notre disposition.

Nous vous proposons aujourd'hui de regarder vers l'avenir et d'apprécier quels défis nous attendent, nous ingénieurs, dans le siècle qui vient de débiter. Le titre de ce colloque, « L'art de l'ingénieur face au 21^{ème} siècle », n'est pas neutre à cet égard.

Je vous propose de commencer par réfléchir au sens des mots. Je ne parlerai pas du sens du terme « ingénieur » ; je pense que la plupart d'entre vous en connaissent l'étymologie et les origines. Je voudrais vous parler de l'art, et - au risque de vouloir imiter le très connu Alain Rey - vous proposer un voyage dans le temps, un saut non pas de deux siècles, mais de deux millénaires !

Le sens premier de **art** (*ars, artis* en latin) était la façon d'être, la façon d'agir. Il me semble que nous pouvons faire notre ce sens premier, car il se révèle d'une surprenante actualité, comme va nous le démontrer probablement cette journée.

Au Moyen Age, art signifiait science, savoir, puis moyens et méthodes. C'est d'ailleurs de là que vient l'expression « dans les règles de l'art », « état de l'art ».

Ce n'est qu'à l'époque moderne, au 19^{ème} siècle, que l'art a pris un sens nouveau, certes sans abandonner le sens premier mais en l'occultant beaucoup. Ce nouveau sens le rattache à un idéal esthétique, à un processus créatif.

Convenons que cet élargissement et cet enrichissement du sens premier nous montrent aussi un chemin à suivre. Ce colloque est en quelque sorte une façon d'illustrer la polysémie du mot « art ».

- L'art de l'ingénieur, c'est d'abord l'art de concevoir des ouvrages de plus en plus audacieux, allant de prouesses techniques en prouesses techniques, mobilisant savoirs, savoir-faire et méthodes constructives. Nous nous arrêterons donc d'abord un instant sur quelques ouvrages emblématiques qui montrent bien l'audace des ingénieurs et de nos entreprises.
- Mais l'art c'est aussi l'état de l'art, celui qui progresse en s'appuyant sur la science et sur l'expérimentation, les deux sources permanentes de l'innovation. C'est également la norme technique qui codifie l'état de l'art et évolue avec lui.
- Dans l'avenir, l'art de l'ingénieur sera de plus en plus un art composite, sachant combiner ses propres compétences avec celles de l'architecte, du paysagiste, de l'urbaniste, du spécialiste de l'environnement, dans un fructueux croisement des cultures professionnelles. Cette nécessaire évolution a évidemment un impact sur la formation des hommes et sur leurs capacités à travailler en équipe.
- L'art de l'ingénieur, c'est enfin sa capacité à utiliser ses compétences dans un environnement plus complexe, face à une société plus instruite mais également plus exigeante en ce qui concerne, notamment, l'environnement, les risques et le développement durable, et cela dans les dimensions de l'économie, du social et de l'environnemental.

Il existe donc quatre façons de décliner l'art de l'ingénieur, qui vont rythmer les quatre séquences de cette journée, que je souhaite la plus fructueuse possible. Que soient remerciés tous ceux qui m'ont aidé à préparer cette manifestation. Je voudrais adresser des remerciements particuliers à Jean BERTHIER, Georges DOBIAS, Georges MERCADAL, à mes collègues Jean FREBAULT et Jacques LARAVOIRE (qui a été la cheville ouvrière de l'organisation de ce colloque), à l'ensemble des intervenants qui vont se succéder à cette tribune, et à Bertrand FABRE, directeur des publications du groupe Moniteur, qui est par ailleurs co-organisateur de cette manifestation. Bertrand FABRE a accepté de tenir le rôle de modérateur, et va donc veiller au bon déroulement de ces quatre séquences. Merci, enfin, à vous tous de votre présence et de votre participation.

Bertrand FABRE, directeur des publications du groupe *Moniteur*

Bonjour et bienvenue à tous dans ce palais d'Iéna, siège du Conseil économique et social, mais dont l'hémicycle est aujourd'hui dévolu, dans le cadre des célébrations du bicentenaire du Conseil général des Ponts et Chaussées, à ce colloque consacré à l'art de l'ingénieur face au 21^{ème} siècle. Ce Palais d'Iéna, œuvre des frères Perret, a été conçu à l'origine, à la fin des années 30, pour être le Musée des travaux publics. Nous sommes donc quelque peu chez nous. D'ailleurs, mon journal, *Le Moniteur*, a célébré l'an dernier, ici même, presque jour pour jour, son centenaire en présence du Premier ministre et des principaux membres du Gouvernement.

Mon rôle, aujourd'hui, est modeste mais néanmoins important. Je serai le gardien du temps, car le temps perdu ne se rattrape jamais. J'invite donc chacun à respecter son temps de parole, l'organisation des interventions étant calée sur une structure de temps extrêmement audacieuse.

Sans plus attendre, rentrons dans le vif du sujet avec la première des quatre séquences qui composent cette journée, et qui est consacrée à l'art de construire. Elle sera introduite par Jean Berthier, qu'il est inutile de présenter. Il intervient aujourd'hui en sa qualité de président du comité des experts « Génie civil et Construction » du Conseil national des ingénieurs et scientifiques de France, le CNISF.

2

L'ART DE CONSTRUIRE

INTRODUCTION

Jean BERTHIER, président du comité d'experts
« Génie civil et construction » du CNISF

Je voudrais, pendant les quelques minutes qui m'ont été imparties pour introduire cette première séquence, vous dire les raisons du choix des trois sujets qui vont vous être présentés.

Le premier sujet porte sur la conquête des grandes portées. Il n'a pas été choisi en fonction du chiffre d'affaires des ponts de très grande portée, qui est marginal par rapport à celui de l'ensemble du secteur des ouvrages d'art. Il a été retenu parce que, tout d'abord, les enjeux économiques de ces ponts sont tout à fait considérables (et cela sera illustré par l'intervention de Michel VIRLOGEUX), et ensuite parce que la conquête des grandes portées a toujours été un formidable moteur, un formidable catalyseur pour le progrès des techniques, avec des retombées sur l'ensemble du secteur de la construction. Ces progrès sont réels dans le domaine des matériaux, dans celui des méthodes de calcul, dans le domaine de la modélisation aérodynamique (qui est fondamental compte tenu de l'importance du vent pour les grandes portées), dans celui des techniques et des matériels de construction, mais également dans celui de la maîtrise des phases intermédiaires, qui sont essentielles. En effet, ces phases sont souvent les plus critiques pendant le processus de construction. En outre, ce qui s'y passe marque souvent assez profondément le comportement futur de l'ouvrage.

Ce sujet sera traité par Michel VIRLOGEUX, qu'on ne présente plus. Rappelons néanmoins qu'il est le père du pont de Normandie, osant proposer un ouvrage qui, à l'époque, doublait le record du monde, et qu'il a piloté, en 1985, un projet commandé par la direction des routes, qui associait un groupe de prestigieux bureaux d'études français, sur le thème « Quelle est la plus grande portée actuellement réalisable ? ». Je précise également que Michel VIRLOGEUX est membre de l'Académie des technologies.

2

Avec le sujet suivant, qui traite de la construction du pont de Rion-Antirion, nous abordons un autre défi : celui des obstacles naturels. Le site de Rion-Antirion regroupe en effet des difficultés dont chacune, à elle seule, aurait dissuadé, il y a quelques décennies, d'entreprendre la construction de l'ouvrage. Si, dans les premiers temps du projet, ils semblaient vraiment très difficiles à surmonter, ces obstacles ont pu être dépassés et l'ouvrage a été magnifiquement réalisé. Ceci a été possible grâce aux progrès techniques extraordinaires survenus au cours des dernières décennies, dans différents domaines, en particulier ceux de la maîtrise des fondations sur sol mou, de la compréhension des mécanismes qui accompagnent les séismes, de l'adaptabilité des ouvrages pour tenir compte des failles.

Ce second sujet sera présenté par Jean-Paul TEYSSANDIER, qui a travaillé successivement dans le public puis dans le privé, et dont le trait majeur est d'avoir consacré toute sa carrière au domaine des grands ouvrages, d'abord sous l'angle technique puis sous le double angle technique/management. Son expérience capitalisée lui a permis de conduire avec succès ce gigantesque projet. J'ajoute que Jean-Paul TEYSSANDIER a enseigné pendant treize ans au Conservatoire national des arts et métiers, de 1982 à 1995.

Le troisième sujet s'intitule « Des matériaux nouveaux pour relever les défis de la légèreté, de la transparence et de la finesse architecturale dans les grandes constructions publiques ». Le titre résume, je crois, à lui seul le contenu de la présentation de Bernard VAUDEVILLE. Je voudrais néanmoins préciser que le terme « matériaux nouveaux » traduit probablement mal ce qu'il va vous dire car si certains de ces matériaux sont effectivement nouveaux, d'autres, en revanche, sont tout à fait traditionnels, le verre par exemple. Mais c'est la façon dont il propose de les utiliser, c'est-à-dire comme composants de la structure, qui est nouvelle. De toute façon, qu'ils soient nouveaux ou traditionnels, ces matériaux font rarement partie de ceux auxquels l'ingénieur pense pour ses réalisations. Ils sont, il faut bien le dire, assez largement ignorés dans les enseignements, sauf, je l'espère, dans celui de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées (ENPC), puisque Bernard VAUDEVILLE y est professeur.

La beauté des réalisations qui vont vous être présentées vous incitera, je l'espère, à donner à ces matériaux leur juste place. Bernard VAUDEVILLE est à la fois ingénieur et architecte (il a été formé à l'école de Renzo Piano), il est membre du directoire de RFR, bureau d'études français connu de tous, créé par l'Irlandais Peter RICE. Ce

bureau compte à son actif de très nombreuses et magnifiques réalisations dans le monde entier. J'ajoute que Bernard VAUDEVILLE est par ailleurs responsable du département « Génie civil » de l'ENPC.

Le temps qui est imparti à cette première séquence est bien trop court pour couvrir un sujet aussi vaste que l'art de construire, et c'est avec regret que j'ai dû renoncer à présenter deux autres domaines dans lesquels les progrès réalisés ont été également impressionnants.

Celui des tunnels tout d'abord, qu'il s'agisse des tunnels réalisés « au tunnelier », dont la flexibilité et les possibilités d'adaptation au terrain ont énormément progressé, ou des tunnels « au rocher », dont la méthode de « convergence-confinement » a bouleversé les conditions de réalisation.

Le deuxième domaine est celui du renforcement des sols, qui sera abordé sous un angle particulier par Jean-Paul TEYSSANDIER. Ce domaine a connu des développements absolument incroyables depuis une cinquantaine d'années, qui permettent aujourd'hui de faire participer le sol au fonctionnement de la structure, s'inscrivant de ce fait dans une double philosophie qui, très certainement, sera dominante dans le siècle que nous venons d'aborder : l'économie des matériaux, et la discrétion des ouvrages de génie civil.

Les trois exposés donneront lieu à une discussion groupée. J'invite donc les orateurs à respecter leur temps de parole, du moins mieux que je ne l'ai fait.

LA CONQUÊTE DES GRANDES PORTÉES

Michel VIRLOGEUX, *ingénieur-conseil, expert,*
membre de l'Académie des technologies

Jean BERTHIER vous a parlé des causes de l'évolution et des progrès dans le domaine des grands ouvrages. Il est bien évident qu'elles sont nombreuses. La puissance des moyens informatiques est la plus fréquemment évoquée, mais ce n'est qu'un moyen, et ce n'est pas de là que résultent les progrès, comme nous allons le voir.

Une autre des voies importantes est l'évolution des matériaux, dont parlera Bernard VAUDEVILLE, ainsi que les moyens de plus en plus grands (et cela est particulièrement important pour les très grandes portées) à la fois au plan du matériel, des méthodes d'exécution et des finances des grandes entreprises.

Mais il y a surtout une avancée importante dans la maîtrise des actions naturelles (le vent et les séismes). La construction d'ouvrages de grande portée est essentiellement due aux progrès réalisés dans ce domaine.

Jean-Paul TEYSSANDIER parlera bien entendu des séismes, quant à moi j'évoquerai à plusieurs reprises l'action du vent, qui est déterminante dans la conception des ouvrages. J'insiste sur ce terme « conception », car il s'agit bien de la façon dont la pensée des ingénieurs évolue, dont les idées structurelles évoluent pour s'adapter aux défis des portées, faisant progresser nos connaissances à grands pas. Ces connaissances sont très primitives : nul besoin d'utiliser un ordinateur pour construire des structures suspendues.

I. Brève histoire des ponts suspendus

Les ponts suspendus datent des Chinois : les moines tibétains ont été pionniers dans la construction de ponts suspendus, à l'aide de chaînes de fer et de câbles rudimentaires, et ce dès les 6^{ème} et 8^{ème} siècles. D'ailleurs, pendant très longtemps, le plus grand pont du monde a été un pont chinois, un pont suspendu sur la rivière Dadou, qui a été le siège d'une célèbre bataille pendant la Longue Marche.

Dans le monde occidental, les premiers ponts suspendus – après des croquis et des dessins qui n'ont jamais eu d'application, hormis les ponts-levis des châteaux forts – sont dus à un américain, M. Finley, qui a construit quelques ouvrages de portée modeste. Un grand pas en avant (vous verrez, à ce propos, que les progrès dans le domaine des grandes portées se sont faits par des sauts techniques) est dû à un très célèbre ingénieur anglais, Thomas TELFORD, qui était tailleur de pierre et qui s'est progressivement imposé comme le plus brillant ingénieur de sa génération. Il a été fondateur et président de l'institution des ingénieurs civils britanniques. Thomas TELFORD a construit le pont sur le détroit de Menai vers 1820, avec une portée de 200 mètres, grâce, en particulier, au développement d'une nouvelle technique de suspension, qui consistait à remplacer les chaînes de fer par des chaînes à barres à œillets, des plaques de fer reliées par des axes d'articulation. La portée a été doublée avec le pont de Fribourg, en Suisse, qui faisait de mémoire 370 mètres.

A l'époque, qu'il s'agisse du pont de Fribourg ou du pont de Wheeling sur l'Ohio, la conception des ouvrages était quelque peu rudimentaire. En effet, on s'occupait essentiellement de reprendre les charges permanentes et les charges des petits convois tirés par des chevaux qui passaient sur le pont, avec des tabliers relativement légers. Néanmoins, on pouvait déjà observer la présence de haubans, qui participaient à la suspension de l'ouvrage.

Nombre de ces ouvrages ont eu une vie mouvementée. Plusieurs se sont écroulés, de l'effondrement du pont de Broughton en Angleterre lors du passage d'une troupe au pas cadencé, à celui du pont de la Basse Chaîne, qui se voulait une imitation de nos amis anglais (bien que, à ce sujet, nombreux étaient ceux qui pensaient que le froid pouvait causer une rupture des ancrages dans les chambres). D'autres ouvrages se sont effondrés sous l'action du vent : ce fut le cas du pont de La Roche-Bernard, en France.

Les idées ont évolué sous l'influence d'un grand ingénieur américain d'origine allemande, John ROEBLING, qui a commencé à fabriquer des câbles formés de fils de fer parallèles (suivant ainsi les idées des frères Seguin, qui avaient commencé à remplacer les chaînes à barres par des fils parallèles de bien plus grande résistance). John ROEBLING a construit un premier grand pont suspendu sur le Niagara, qui comportait une véritable poutre de rigidité, une sorte de tablier suffisamment rigide pour permettre à la fois de répartir les charges dues aux convois ferroviaires (il s'agissait d'un pont à deux étages, avec des voies ferrées à l'étage supérieur) et de

résister à l'action du vent. Cependant, le grand chef d'œuvre de ROEBLING a été sans conteste le pont de Brooklyn, l'un des trois plus célèbres ponts du monde. En fait, il en a conçu le projet, mais c'est son fils Washington ROEBLING qui l'a construit. Pour la petite histoire, rappelons que Washington ROEBLING, comme son père, avait été victime d'un accident pendant la construction du pont et n'avait plus été capable de suivre directement le chantier. Cette tâche a alors été assumée par sa femme, qui n'avait pourtant suivi aucune étude d'ingénieur, mais qui a su s'imposer comme le véritable ingénieur en chef des travaux !

Je parlais tout à l'heure de l'intérêt très secondaire de la puissance des moyens de calculs. John ROEBLING était parfaitement capable d'organiser sa conception avec à la fois une suspension et des haubans, ce qui donnait au final une structure hautement hyperstatique, et de la dimensionner sans l'aide de calculs informatiques.

J'ai peu parlé des ingénieurs français car, malheureusement, ils sont peu nombreux à s'être illustrés dans les très grandes portées. Je mentionnerai néanmoins Gustave EIFFEL, qui est le premier à avoir réellement commencé à prendre en compte le vent d'une façon scientifique dans l'analyse des ouvrages. Il avait d'ailleurs construit une soufflerie (qui, je crois, était la première au monde à l'époque), située à proximité de la Maison de la Radio, et aujourd'hui propriété de nos amis du CSTB. Cette soufflerie a permis d'évaluer, dans le cadre d'essais, l'effet de l'action du vent sur les structures. Cependant, il s'agit d'une action purement statique, comme nous le verrons tout à l'heure.

Après le pont de Brooklyn, qui faisait 487 mètres de travée centrale, et deux ou trois ouvrages qui comptaient 5 ou 10 mètres de plus, un grand bond en avant est réalisé par Otmar Amman, un américain d'origine suisse. Otmar Amman est le concepteur du pont Georges Washington sur l'Hudson, qui fait plus de 1 000 mètres de portée. Dans sa configuration initiale, que vous voyez sur l'image, il comportait uniquement le tablier supérieur du projet (qui prévoyait deux étages). Déjà, à l'époque, les ingénieurs s'entendaient difficilement avec les architectes. Pour l'architecte du pont Georges Washington, l'aménagement de cet ouvrage devait comporter de superbes constructions néo-babyloniennes au-dessus des pièces d'ancrages. Le salut de cet ouvrage, si je puis m'exprimer ainsi, est dû à un tour du destin typiquement américain : toutes les décorations qui étaient prévues n'ont pas pu être réalisées faute de financement dans les dernières phases de construction. Curieusement, c'est après l'accident du pont de Tacoma (voir plus loin) qu'on a

installé le deuxième étage de cet ouvrage, ce qui donne un très bel ensemble, malheureusement moins connu que ses trois frères : les ponts de Brooklyn, du Golden Gate et du Firth of Forth.

La construction du Golden Gate Bridge, à San Francisco dans les années 30, marque un défi de taille pour les ingénieurs. Cet ouvrage suit la voie qui a été ouverte par le pont Georges Washington, mais passe à une portée voisine de 1 300 mètres, dans un site extrêmement difficile. Autant dire que personne ne croyait à ce projet. Ce pont est le fruit d'un labeur collectif, dans lequel se sont investis la plupart des grands ingénieurs américains, sous la direction de Joseph Strauss, lequel pourtant n'était pas réellement un concepteur. Vous pouvez voir, sur l'image, les pylônes, l'installation des câbles et le montage, avec le tablier qui part des pylônes et qui, progressivement, par l'introduction de sa charge, vient tendre les câbles porteurs et prendre sa position finale sous l'arrivée des poids successifs. Ce projet a été le théâtre d'une des premières mesures de sécurité puisque des filets ont été tendus sous le chantier de construction pour récupérer les ouvriers en cas de chute. Au-delà de ses prouesses techniques, le Golden Gate est également immortalisé dans le septième art : c'est sous ce pont que Hitchcock vient faire suicider ses acteurs !

Le mois de novembre 1940 marque tristement l'histoire des grandes portées, avec l'effondrement du pont de Tacoma. Cet ouvrage était extrêmement audacieux. Estimant que les grandes poutres de rigidité en treillis comme celles du pont Georges Washington et du Golden Gate n'étaient pas nécessaires, les ingénieurs ont recherché une structure plus mince et plus légère. C'est dans cette optique que Léon MOISSEIV a dessiné un ouvrage avec deux poutres latérales d'assez faible rigidité, et en particulier avec très peu de rigidité de torsion. Malheureusement, ce pont, qui avait commencé à vibrer dès sa mise en service (ce qui lui avait d'ailleurs valu le surnom de « *galloping Gertie* »), s'est mis à osciller verticalement, puis en torsion. À l'époque, beaucoup de gens ont cru que c'était dû à un problème de couplage « flexion-torsion ». Les études les plus récentes montrent qu'il s'agissait, en réalité, d'une simple rupture de l'ouvrage en galop de torsion. Concrètement, le vent, tournant autour de chacune des membrures de la poutre, créait des tourbillons qui étaient décalés entre le haut et le bas. Leur progression créait des efforts de torsion qui se sont accélérés. L'effondrement du pont a été un véritable choc. Son successeur, le nouveau pont de Tacoma, comportait un treillis qui était sans commune mesure avec ce qui avait été réalisé jusque-là.

Il a fallu attendre la fin des années 50 (1957 précisément) pour qu'un ingénieur, Steinmann, qui avait toujours tiré ombrage du succès d'Otmar Amman, construise le pont du Mac Kinack. C'est le premier grand pont construit après l'effondrement du pont de Tacoma, qui intègre les enseignements des études en soufflerie réalisées par Steinmann, soucieux de s'assurer de la stabilité aérodynamique de l'ouvrage. Mais Otmar Amman n'avait pas dit son dernier mot ! C'était un combattant, qui trouvait toujours les moyens de revenir sur un projet dont il avait été écarté ! Cette pugnacité lui a permis de construire le pont de Verrazzano, qui a détenu pendant longtemps le record mondial de portée.

Cette époque marque le chant du cygne des ponts suspendus en grand treillis de l'école américaine. En effet, les Anglais, qui ne sommeillaient pas, avaient construit à la même époque, en Ecosse, juste à proximité du pont de Firth of Forth, le Queen's Ferry. Ce grand pont suspendu comportait un immense et robuste treillis. Les Anglais avaient par ailleurs entamé la construction du grand pont de la Severn. D'après Leonhardt, la maquette de ce pont, qui était en cours d'essai au British Maritime Institute, a échappé des mains d'un manipulateur, s'est effondrée puis cassée. La construction d'une nouvelle maquette demandant beaucoup trop de temps, Scrutton, le directeur du laboratoire, s'est alors inspiré d'une maquette établie par Leonhardt pour un projet de pont avec caisson profilé et qui avait donné d'excellents résultats.

Cet épisode consacre une véritable rupture épistémologique : alors qu'on construisait jusque là des treillis de plus en plus grands pour franchir des portées de plus en plus grandes, ce qui générait des effets au vent de plus en plus importants, on s'est mis à chercher à définir des formes qui diminuent l'action du vent sur l'ouvrage, notamment des formes profilées qui assurent au tablier une stabilité aérodynamique. Le pont de la Severn, construit en 1966 par Freeman, Fox & Partners, avec Wex & Brown pour adjoints, marque cette rupture. Comme vous pouvez le voir sur l'image, les anglais construisaient les ponts suspendus à partir du centre, alors que les américains partageaient des pylônes. Cela leur permettait de ne pas réaliser la soudure complète entre les différents voussoirs, de faire un assemblage provisoire de ces éléments, ce qui représentait un gain de temps précieux sur les délais de construction. Les ailes latérales, comme vous pouvez le voir, sont des trottoirs. Elles sont décalées par rapport au tablier, et contribuent à une très grande stabilité aérodynamique du pont. Cependant, il avait fallu renforcer le platelage orthotrope, qui était sousdimensionné.

Fort de ce succès, Freeman, Fox & Partners a ensuite construit le premier pont sur le Bosphore, recourant aux mêmes techniques et aux mêmes idées. Le relais est alors fait du treillis au caisson profilé. Le record du monde est détenu, à l'époque, par le pont de la Humber (Royaume-Uni).

Sur cette planche, j'ai essayé de rappeler la chronologie des records du monde de portée en matière de ponts suspendus, avec, en rouge, les grands sauts (pont de Brooklyn, pont Georges Washington, pont du Golden Gate, pont d'Akashi au Japon). Pour la petite histoire, une certaine concurrence s'était instaurée entre les Japonais et les Danois, qui voulaient achever la construction du Storebelt avant le pont d'Akashi. Les caissons du pont de la Humber, que vous pouvez voir sur cette image, sont très épais. Freeman et Fox voulaient que ce pont, qui fait 1 408 mètres de portée, soit suffisamment stable. Cette image illustre également le levage des voussoirs et leur assemblage par des clames avec la soudure finale.

On ne peut pas dresser cet historique sans évoquer les constructions japonaises et, en particulier, les trois grandes lignes de liaison entre Honshu et Shikoku, qui sont devenues un véritable musée des ponts. Sur cette image, vous pouvez voir la ligne centrale (Kojima Sakaide), la ligne Onomishi Imabari (qui détient le record du monde de portée des ponts à haubans), ainsi que la ligne Kobe Naruto, avec le célèbre pont d'Akashi.

L'école américaine a rencontré du succès au Japon longtemps après le succès des ponts anglais : le pont de Bisan-Seto, de 1 000 mètres de portée ; une série de ponts à haubans particulièrement lourds, une série de deux ponts suspendus accolés... Le pont d'Akashi détient le record du monde de portée, avec 1 991 mètres, un mètre supplémentaire ayant été gagné en janvier 1995, au cours du séisme de Kobe.

Désormais, pour chacun de ces grands ouvrages, des études au vent extrêmement poussées sont réalisées. Les Japonais, à cet égard, sont à la pointe de la recherche. Le coût de construction d'un pont, au Japon, est entre quatre à cinq fois celui d'un pont en France. A Tsukuba, on a construit une soufflerie spéciale pour le projet du pont d'Akashi, qui permettait de mettre une maquette au centième, qui faisait donc 40 mètres de longueur. Grâce à un ensemble de ventilateurs on pouvait envoyer un vent jusqu'à 15 à 18 mètres par seconde. Cette maquette était également aéroélastique, puisqu'elle représentait à la fois la rigidité et les masses de l'ouvrage. Le vent sur le site peut atteindre 80 mètres par seconde, soit l'équivalent d'un vent

de typhon. Sous l'effet de ce vent, le déplacement transversal du tablier du pont d'Akashi atteint les 20 mètres. Sur l'image, vous pouvez voir la construction d'une culée, qui fait quelque 300 000 mètres cubes de béton, ainsi qu'un pylône en acier avec, dessous, une pile qui, elle aussi, fait 300 000 mètres cubes de béton. La pile fait de l'ordre de 30 mètres de diamètre pour environ 30 mètres de hauteur, dans un détroit extrêmement fréquenté (une centaine de bateaux chaque jour).

Parallèlement, les Danois, qui souhaitent rattraper le record du monde, se sont engagés dans la construction du pont de Storebelt, qui suit l'école anglaise et dont la portée fait 1 624 mètres (imposée par les conditions de navigation dans le détroit). Cet ouvrage a intégré d'emblée un tablier profilé qui, malgré ce profilage et les études aérodynamiques réalisées, a connu quelques difficultés. Par exemple, les échappements tourbillonnaires, qui n'avaient pas été décelés pendant les études en soufflerie, ont provoqué des oscillations verticales de flexion, qui atteignaient près d'un mètre (on ne voyait plus que la moitié de la hauteur des camionnettes circulant sur le pont !).

II. Quels progrès techniques pour demain ?

La diapositive qui est projetée est née du cerveau de l'ingénieur René Walther, et illustre son ambition de franchir de très grandes portées à l'aide de ponts suspendus haubanés. Il propose, concrètement, d'élargir le tablier au voisin des pylônes, pour tenir compte des problèmes de déplacement transversal et horizontal (sous l'action du vent) qui se sont posés dans le cadre du pont d'Akashi, par exemple. Cette solution est néanmoins extrêmement lourde et n'a eu, à ce jour, aucune application.

Une autre idée, bien vieille, consiste à stabiliser les ouvrages par des câbles transversaux extérieurs, comme vous pouvez le voir sur cette belle passerelle en Côte d'Ivoire. Cette idée a été utilisée au 19^{ème} siècle, sur le pont de Wabco, au Texas, où l'on a stabilisé le tablier par deux câbles antagonistes. D'autres ouvrages ont été construits sur ce mode, comme vous pouvez le voir sur cette image de pipeline en Alaska.

Une autre approche consiste à diviser le tablier, comme l'a proposé Richardson, un ingénieur anglais. Il s'agit, concrètement, de relier deux tabliers par une série d'entretoises. Cette technique présente de multiples avantages. Tout d'abord, en

écartant les tabliers, on crée une grande inertie transversale. En outre, par la division du tablier, on diminue les actions de torsion dues au vent. Cela a déjà été appliqué au Japon, sur la ligne Kojima-Sakaide : puisque le treillis est immense, le platelage peut être interrompu au centre, ce qui permet la circulation du vent, et de ce fait un équilibrage des pressions qui est extrêmement favorable pour la stabilité aérodynamique de l'ensemble. Par ailleurs, dans de telles structures, il est possible de multiplier les caissons.

Il est également possible d'associer, d'une part la technique de division du tablier en plusieurs caissons et, d'autre part celle de la stabilisation de l'ouvrage par une série de câbles. Nous avons exploré cette voie dans les années 80, sur une proposition de Jean Berthier. Les faiblesses de certains schémas ont d'ailleurs été mises au jour dans ce cadre. Par exemple, on sait aujourd'hui que le système à seulement deux câbles latéraux inclinés crée un terreau propice à un mouvement de balançoire, ce que Ove Arup a pu constater à ses dépens avec la célèbre passerelle londonienne du Millenium.

III. Quels fantasmes pour demain ?

De nombreux projets ont été conçus dans les années 80 pour franchir la Manche. Citons tout d'abord le projet de pont suspendu à travées multiples de William Brown, qui pose très clairement la question de la résistance aux chocs de bateaux. William Brown a également imaginé un projet pour le détroit de Gibraltar. Dans cette zone, les profondeurs d'eau sont particulièrement importantes, sans oublier les chocs de sous-marins russes ! Schématiquement, ce projet consiste en une division du tablier en huit petits caissons portés par de multiples pièces de pont, avec des câbles porteurs déviés sur chaque pylône, qui centrent sur les pylônes voisins (avec les problèmes de répartition des charges que cela peut poser). Citons également le projet de Messine, avec une portée de 3 300 mètres. Sur ce projet, Leonhardt était convaincu qu'il serait beaucoup plus simple de construire deux appuis dans le détroit. Le projet initial repose sur un tablier formé de multiples petits caissons, avec, en dessous, une grande structure qui vient porter, dans l'axe, les voies de chemin de fer et des poutres latérales. Le projet définitif, qui devrait être bientôt mis en construction, et qui a été élaboré par nos amis italiens, comporte trois caissons parallèles : un caisson central qui porterait les voies ferrées, un caisson latéral de chaque côté pour les voies routières.

Bertrand FABRE, *directeur des publications du groupe Moniteur*

Je vous remercie de cette lumineuse mise en perspective historique et technique, que vous avez su faire déboucher sur ce que vous avez appelé des « fantômes ». Que demander de mieux !

Nous allons à présent écouter Jean-Paul TEYSSANDIER, sur le projet de Rion-Antirion, qui se veut un défi à Poséidon et à bien d'autres dieux telluriques de la Grèce antique.

RION-ANTIRION OU L'ART DE S'ADAPTER AUX OBSTACLES NATURELS LES PLUS REDOUTABLES

Jean-Paul TEYSSANDIER, directeur, VINCI Concessions,
président directeur général de la société
concessionnaire du pont de Rion-Antirion (Grèce)

Au cours des dernières décennies, les bâtisseurs de ponts se sont clairement fixé une grande ambition : celle de franchir des bras de mer de plus en plus larges. Le Storebelt, l'Oresund, le grand pont d'Akashi et, plus près de nous, les deuxièmes ponts de la Severn et du Tage, le pont de Rion-Antirion en témoignent.

Un pont chez Poséidon

Le pont de Rion-Antirion est situé en Grèce de l'Ouest, où il franchit le golfe de Corinthe, bras de mer qui sépare le Péloponnèse du continent. Je ne m'étendrai pas sur l'histoire extrêmement mouvementée de cette zone géologique, mais sachez simplement que le golfe de Corinthe, il y a un million d'années, n'existait pas. La dérive du Péloponnèse, qui se poursuit aujourd'hui encore, de quelques millimètres par an, explique d'ailleurs tous les problèmes qui se sont posés à nous.

I. Un site difficile

Le golfe de Corinthe présente une combinaison de caractéristiques physiques et géologiques qui rendent le site particulièrement complexe :

- une grande profondeur d'eau (65 mètres) ;
- d'épaisses couches alluvionnaires peu résistantes avec un substratum rocheux • inaccessible (le *bedrock* se trouve en effet à 1 000 mètres de profondeur) ;
- une importante activité sismique avec des accélérations du sol pouvant atteindre 0,5 g (et un plateau très large qui monte à 1,2 g) ;
- enfin, d'éventuels mouvements tectoniques de 2 mètres entre piles.

Au plan technique, le pont devait offrir une résistance à un choc de pétrolier de 190 000 tonnes, lancé à 18 nœuds. Je ne m'attarderai pas sur l'action du vent, qui est tout à fait accessoire.

Pourquoi avoir choisi le titre « Un pont chez Poséidon » ? Dans la Grèce antique Poséidon est le dieu de la mer, mais il est également le dieu des tremblements de terre. Homère, d'ailleurs, ne le désignait que sous ce dernier vocable. Ce titre s'est donc naturellement imposé à moi.

Face à un tel projet, il fallait résoudre le problème des fondations. D'emblée, la conception de l'ouvrage s'orienta vers de grosses fondations capables de résister aux forces sismiques, dans un environnement de grande profondeur d'eau. Dans un premier temps, nous avons imaginé des fondations sur pieux, qui se sont vite révélées peu appropriées compte tenu de la nature des sols et des forces sismiques en jeu. Avec cette option, il aurait fallu construire une véritable forêt de pieux, excessivement longs de surcroît. Cela n'était pas possible au plan financier, et était difficile au plan technique. Nous avons également envisagé d'installer des caissons « descendus », à l'instar des fondations *off shore* en Mer du Nord. Au final, nous avons opté pour la seule solution faisable : des fondations superficielles (aussi surprenant que cela puisse paraître), à la condition, bien sûr, de renforcer les sols sous chaque fondation.

Avec une telle approche, la question des fondations a très vite cédé la place à la problématique du renforcement des sols. Dans ce cadre, plusieurs options de renforcement sous l'eau ont été étudiées (colonnes ballastées, colonnes traitées à chaud ou au ciment, compactage dynamique, etc.), qui n'étaient guère adaptées à notre projet. Nous n'avons pas eu d'autre choix que d'imaginer une solution nouvelle, que nous avons baptisée « inclusions ». Il s'agit de « clouages » extrêmement rigides du sol, créés par des tubes de 2 mètres de diamètre et de 30 mètres de long, qui sont espacés d'environ 4 à 5 mètres. Sous l'effet d'un basculement de la fondation pendant un séisme, les clous empêchent la constitution d'un cercle de glissement, forçant tout cercle de glissement potentiel à descendre plus bas, là où le sol est de meilleure qualité et où le cercle, par ailleurs, développe des surfaces plus importantes.

Il a fallu mettre en musique cette idée fondamentale, réaliser des études théoriques, effectuer des essais sur modèles en centrifugeuse (à Bordeaux, qui abrite une des plus grandes centrifugeuses au monde, ainsi qu'au LCPC de Nantes). La tâche n'était pas aisée, car il fallait assurer la convergence entre des essais sur modèles, sur une approche novatrice, et des études théoriques.

Il a également fallu résoudre la question des travées. Nous avons penché en faveur de grandes travées, donc une solution de pont haubané, pour limiter le nombre des fondations. Nous avons opté pour une succession de travées de 560 mètres, avec quatre pylônes. Pourquoi avons-nous écarté la solution du pont suspendu ? Nos considérations étaient à la fois économiques (le pont haubané était moins onéreux) et techniques (la rive nord étant totalement liquéfiable sur 40 mètres de profondeur, il aurait été extrêmement délicat d'implanter de gros massifs d'ancrage dans de telles conditions).

Vous pouvez voir, sur cette diapositive, la silhouette de Rion-Antirion, que vous pouvez comparer avec celle du pont de Tatara, qui détient le record mondial de portée, ainsi qu'à un pont de Hongkong, qui repose également sur une série de pylônes.

II. Composantes techniques du projet

Les fondations ont 90 mètres de diamètre, ce qui en fait les plus grosses fondations jamais réalisées en ouvrage (plus que les fondations d'Akashi). Les inclusions sont nombreuses : environ 150 pour chaque pile. La fondation et le pylône font au total environ 220 mètres de haut. Nous avons retenu un système de pylône à quatre jambes, ce qui est assez exceptionnel pour un pont à haubans (en général, on n'en trouve que deux). Ce choix s'explique par la nécessité d'assurer une rigidité longitudinale à l'ensemble, du fait de la succession des travées haubanées. Cet aspect a constitué un des problèmes majeurs de la résistance sismique de l'ouvrage, les quatre jambes étant particulièrement exposées. En cas de séisme, il est possible d'avoir trois jambes en traction, et une quatrième en compression, qui récupère la totalité du poids propre, à laquelle s'ajoute la composante verticale des tractions des trois premières jambes. Inutile de dire qu'on peut avoir, par ce biais, des jambes excessivement comprimées, avec des risques de flambement notamment.

Quant au tablier, il fallait résoudre la question de l'écartement de 2 mètres d'une pile par rapport à l'autre, du fait des mouvements tectoniques. Je ne m'attarderai pas sur les recherches qui ont été conduites en ce sens. Sachez néanmoins que nous avons fini par retenir un tablier continu et suspendu, comme une immense balançoire. Il fait 2 252 mètres de longueur, de culée à culée, et est entièrement suspendu à ses haubans. Cela présente un double avantage : une isolation vis-à-vis des forces sismiques et la souplesse nécessaire pour reprendre les mouvements

tectoniques, comme une sorte de grand serpent s'adaptant aux mouvements des piles. La structure du tablier est mixte puisqu'elle comporte deux poutres longitudinales en acier et une dalle de béton. C'est la seule option classique du projet. La stabilité aérodynamique du tablier est assurée par un bracon « fusible » : il tient le tablier jusqu'à une force de 1 000 tonnes, donc contre les vents les plus violents et contre des séismes modérés. En cas de séisme important, les forces qui sont développées dans le tablier font « céder » le bracon, libérant ainsi le tablier dont le balancement assure l'isolation par rapport au séisme. Bien évidemment, les balancements doivent être limités. C'est la raison pour laquelle quatre amortisseurs ont été installés par pylône, qui limitent le mouvement du tablier, pour éviter qu'il n'aille heurter les jambes du pylône.

III. Méthodes de construction

Nous avons fait appel aux techniques de l'offshore en matière de fondations, ainsi qu'aux méthodes de construction des grandes travées haubanées pour ce qui concerne les parties émergentes.

S'agissant des techniques offshore, elles consistent à installer une cale sèche, dans laquelle nous pouvons construire deux fondations simultanées. Lorsque l'embase de la fondation est achevée sur 15 mètres de hauteur, on peut mettre la cale sèche en eau, pour la remorquer jusqu'au *wet dock* (une sorte de « cale humide »), dans lequel on ancre la fondation. On peut ensuite poursuivre la construction de la fondation en flottaison. En la matière, nous n'avons rien inventé.

En parallèle, il a fallu réaliser un dragage par soixante mètres de fond, pour obtenir une surface plane. Il a également fallu enfoncer plus de 500 inclusions, avec une précision rigoureuse. Enfin, il a fallu placer par-dessus ces inclusions un tapis de gravier de 3 mètres d'épaisseur, avec une précision d'environ 10 centimètres, sur une surface équivalente à celle d'un terrain de football. Bien entendu, tout ceci a été réalisé sans recourir à des plongeurs : il était hors de question de faire travailler des plongeurs à 65 mètres de profondeur !

Une fois cet emplacement achevé, on pouvait remorquer la fondation, l'immerger, et poursuivre la construction de façon classique.

Des diapositives illustrant des vues du chantier sont projetées et commentées.

Dans certains cas, notamment pour la pose du tapis de gravier, il a fallu développer des outils adaptés et nouveaux. C'est ainsi que nous avons inventé une barge à pieds tendus (plate-forme que nous avons baptisée « Lisa ») qui est ancrée sur des lests posés au fond de la mer. Jusque-là, ce concept avait été utilisé pour des plates-formes offshore fixes, mais jamais pour des plates-formes mobiles. Cet outil a donné pleinement satisfaction.

Nous avons mis en place un entretoisement important pendant toute la période de construction du pylône, pour pouvoir résister à un éventuel séisme. Il est évident que des jambes en encorbellement sur des hauteurs de 80 à 90 mètres présentent une grande sensibilité à la moindre secousse sismique.

La tête de pylône ressemble à celle du pont de Normandie, en intégrant toutefois des améliorations : à l'inverse du pont de Normandie, où la tête avait été découpée en « tranches de saucisson », nous avons opté pour une barge avec une flèche de 200 mètres de haut, pour placer la tête du pylône en deux morceaux seulement. Pour la construction du tablier, nous avons utilisé la même barge, mais avec une flèche beaucoup plus faible, car nous avons besoin d'une capacité d'environ 400 tonnes pour mettre en place les différents éléments.

Le clavage définitif du tablier a eu lieu au mois de mai de cette année (2004). La construction du tablier a été relativement rapide puisque nous avons mis treize mois pour construire les 2 200 mètres, avec des éléments de tablier faisant 12 mètres de long.

Le pont a été inauguré le 8 août dernier, à l'occasion du passage de la flamme olympique. À cette occasion, un immense feu d'artifice a été réalisé, par le même artificier qui avait travaillé sur la Tour Eiffel lors du passage à l'an 2000.

IV. Conclusions

Quels enseignements peut-on tirer d'un projet de cette envergure ?

La conception de ce pont a été entièrement commandée par les conditions du site. Cela est, finalement, extrêmement rare. En général, plusieurs solutions se présentent à l'ingénieur qui construit un pont de grande portée. Comme par exemple ce fut le cas pour le pont de Millau, l'art de l'ingénieur consiste à étudier les diverses solutions possibles, et à retenir celle qui se révèle la meilleure à la lueur d'une

analyse multicritères (coût, implantation dans l'environnement, etc.). Mais ici, eu égard aux conditions exceptionnelles du site de Rion-Antirion, nous n'étions même pas certains, en débutant nos études, d'aboutir à une solution. Pendant toute la durée des études, qui ont été très longues, nous avons l'impression d'explorer un tunnel aux nombreuses ramifications, à la lampe électrique, sans savoir s'il existait une sortie. Au final, nous avons pu trouver cette sortie, mais il aurait pu en être autrement.

Avec le recul, nous éprouvons une immense satisfaction : celle d'avoir trouvé non seulement « la » solution en surmontant les contraintes du site, mais également une solution élégante, notamment en ce qui concerne les fondations et le tablier.

Par ailleurs, le pont de Rion-Antirion est un projet qui, à mon sens, allie pour la première fois les techniques de grandes travées et les techniques offshore, avec en plus des développements annexes (les inclusions, le tapis de gravier...). Il nous faudra faire appel à cette capacité d'innovation dans les grands projets que nous aurons à conduire à l'avenir. De ce point de vue, le pont de Rion Antirion est un précurseur en ce qu'il ouvre des voies nouvelles dans le domaine des grands franchissements sur des bras de mer.

Bertrand FABRE

La France a malheureusement obtenu très peu de médailles d'or aux derniers Jeux olympiques, mais si la construction des grands ponts avait figuré au menu des disciplines olympiques, nul doute que l'« athlète » GTM-Vinci aurait décroché la médaille d'or !

Le prochain exposé porte sur les matériaux nouveaux qui, comme vous le savez, permettent de distinguer les ingénieurs des architectes puisque les ingénieurs construisent des murs droits avec des matériaux tordus, tandis que les architectes bâtissent des murs tordus avec des matériaux droits !

DES MATÉRIAUX NOUVEAUX POUR RELEVER LES DÉFIS DE LA LÉGÈRETÉ, DE LA TRANSPARENCE ET DE LA FINESSE ARCHITECTURALE DANS LES GRANDES CONSTRUCTIONS PUBLIQUES

Bernard VAUDEVILLE, *ingénieur-architecte*,

responsable du département « Génie civil et Construction »

à l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées, membre du conseil de direction de RFR

I. L'ingénieur et le bricoleur

Il y a plus de deux cents ans, vers 1770, notre illustre ancêtre Jean-Rodolphe Peyronnet innovait en proposant, pour le pont de Neuilly, des voûtes en pierre particulièrement surbaissées (au quart) et un amincissement audacieux des piles. Cette innovation était rendue possible notamment par un affinement des calculs, ainsi que par une réflexion poussée sur les méthodes de construction.

A la même époque, la troisième génération d'une dynastie d'industriels quakers, les Abraham Darby, issue d'une petite vallée des Midlands, en Angleterre, innovait également en construisant le pont de Coalbrookdale. Cette innovation était cependant de nature différente de la première, dans la mesure où le projet anglais résultait d'un transfert de technologie étonnant, du « pot de fer » au « pont de fer », en passant par le rail et le cylindre de la machine à vapeur. Achevé en 1779, ce pont, conçu avec l'architecte Prichard, eut un grand retentissement en Angleterre. Les touristes affluèrent immédiatement, et on en grava des images, diffusées partout en Angleterre, dès la première année.

Ces deux exemples, situés à l'orée de la Révolution industrielle, quand la profession d'ingénieur commençait seulement à émerger, sont représentatifs de deux voies différentes pour innover, notamment dans le génie civil :

- l'une, qui nous est plus coutumière, consiste à répondre à un besoin identifié (par exemple augmenter la portée d'un pont) en optimisant, ou même en inventant *ex-nihilo*, méthodes et matériaux ;
- l'autre, qui s'inscrit plus dans les pratiques et la tradition anglaises, consiste à détourner des matériaux ou des processus mis au point par ailleurs (le pot de fer), pour les utiliser ou les appliquer dans le génie civil, sans s'inquiéter *ex-ante* de la pertinence de cette application.

Cette deuxième voie rappelle ce que Levi-Strauss met en relief dans son ouvrage *La pensée sauvage*, qui oppose la démarche de l'ingénieur à celle du bricoleur, le bricoleur travaillant à partir de données existantes et tentant de voir ce qu'il peut en dégager. S'agissant de l'application des nouveaux matériaux au Génie Civil, cette démarche du bricoleur a certainement une efficacité et paraît incontournable dès lors que l'on veut accélérer l'innovation dans ce secteur.

II. Des nouveaux matériaux industriels à foison

Il faut souligner d'emblée que les nouveaux matériaux foisonnent dans le monde industriel, le plus souvent hors de la sphère du génie civil. Certains de ces matériaux commencent à apparaître, mais de façon marginale, dans les constructions.

Ainsi en est-il des toiles enduites, qui permettent de réaliser des toitures légères tendues ou escamotables, ou encore des structures gonflables ; des systèmes de collage au silicone, utilisés pour assembler structurellement les panneaux de verre des façades rénovées de la Maison de la Radio, à l'exclusion de toutes pièces de connexion métallique. Ainsi en est-il aussi des aciers duplex qui forment la récente aiguille de 100 mètres de haut placée en plein centre de Dublin, ou du titane, mis en œuvre par Frank Ghery pour habiller le musée Guggenheim de Bilbao (c'est, à mon avis, sans grand avenir en tant que matériau structurel). Ces exemples ne sont bien sûr pas exhaustifs.

Ces matériaux ont d'abord été mis au point pour l'industrie, avec des moyens financiers que l'on aurait des difficultés à réunir pour un ouvrage unique de génie civil. Pour entrer dans une démarche d'innovation, et donc pour ne pas manquer le train de l'avenir, je pense que l'on gagnerait grandement à favoriser les transferts de technologies, d'abord petitement, et à tester ainsi les potentialités pour la construction des nouveaux matériaux industriels.

III. Quelques exemples de matériaux nouveaux

Pour cette présentation, je retiendrai une sélection de matériaux qui sont soit absolument nouveaux, soit plus anciens mais faisant l'objet d'évolutions telles qu'ils changent de nature. Ces matériaux sont regroupés dans les quatre grandes catégories suivantes :

- les matériaux qui apportent une nouveauté par l'amélioration des performances structurelles (une meilleure résistance, une plus grande légèreté, par exemple) ;

- les matériaux qui permettent de réunir l'enveloppe et la structure (matériaux surfaciques par exemple) ;
- les matériaux qui permettent de complexifier les formes, permettant de répondre à des demandes industrielles ou architecturales ;
- les matériaux qui présentent un meilleur bilan écologique (à dégagement réduit de CO₂, économes en énergie, facilement recyclables, etc.).

LES ACIERS À TRÈS HAUTE RÉSISTANCE

Les aciers à très haute résistance font partie de la première catégorie. Le groupe Arcelor a développé des aciers à très haute résistance, qui frisent les 680 MPa, et sont néanmoins soudables. Les applications sont jusqu'à présent limitées : un pont ferroviaire à Ingolstadt fait appel à ces aciers pour réaliser des appuis glissants (en utilisant la haute limite d'élasticité du matériau), en remplacement d'appuis néoprène ; de même ces aciers ont permis de réduire les hauteurs structurelles du pont de Nesenbachtal, à Stuttgart.

Ces aciers à très haute résistance ont un avenir prometteur pour les structures dont la raideur n'est pas prépondérante ou peut être obtenue par un moyen externe (tel qu'une précontrainte). Si cette résistance est utilisée à plein, la structure qui en résulte est en effet *a priori* plus souple qu'avec un acier moins résistant.

A titre d'exemple, nous étudions actuellement un projet, pour Shanghai, consistant en une longue façade, en forme de vague, détachée du bâtiment, que nous envisageons de construire en acier à haute résistance (pour la Chine, nous nous en tenons à 450 MPa). Les poutres verticales sont considérablement amincies, la raideur de la façade étant obtenue par précontrainte au moyen de câbles qui la relie au bâtiment.

LES COMPOSITES

Les matériaux composites, qui constituent un vrai saut technologique en matière de structure, commencent tout juste à pénétrer la sphère du génie civil. Ils y sont notamment utilisés pour leur durabilité (ils ne corrodent pas) et pour leur très grande résistance (dans le cas des fibres de carbone). Ils ont été mis en oeuvre pour réaliser l'intégralité de la structure de certains petits ponts, tel le pont de Petresin, des poutres en treillis de Techtonics, ou des tabliers en composite Martin Marietta.

Le LAMI, laboratoire à l'ENPC, travaille actuellement sur l'application des composites aux structures de pont, en tirant parti de la possibilité de débiter des profilés en très grandes longueurs (à l'instar des câbles), et d'obtenir ainsi, par cintrage à froid et sans soudage, des formes structurelles de grande portée, efficaces et légères.

LE BÉTON DE FIBRES ULTRAPERFORMANT (BEFUP)

Le BEFUP, développé sous plusieurs marques, dont le Ductal, est un béton à grain très fin, présentant de ce fait une grande résistance à la compression. On peut y adjoindre des fibres, qui lui confèrent une certaine résistance à la traction, permettant notamment de supprimer les armatures passives, ainsi qu'une plus grande ductilité. Au final, la structure s'en trouve allégée, sans oublier que cela permet d'accélérer le chantier et de réduire les contraintes d'entretien.

Ce matériau a été utilisé pour des passerelles au Japon et au Canada, ainsi que pour un ouvrage réalisé par des entreprises françaises et l'architecte Ricciotti en Corée (la « Ductal Arch »).

Le BEFUP est tout à fait approprié pour des constructions en arc, qui travaillent principalement en compression, et des constructions précontraintes. Il ne faut pas sous-estimer néanmoins les difficultés à claver les éléments préfabriqués en à fait.

LE VERRE STRUCTUREL

Le verre structurel fait partie des matériaux qui permettent d'allier l'enveloppe (c'est-à-dire l'étanchéité) à la structure. De tels matériaux sont très recherchés pour le bâtiment.

Le verre est un matériau très ancien. Il est résistant, raide et cependant fragile. Le verre structurel est une évolution du verre ancien. Cette utilisation structurelle a été développée pour les serres de La Villette par la société RFR, il y a environ vingt-cinq ans. Chaque panneau de verre est suspendu au précédent, au moyen d'une double rotule, sans le recours à une structure en acier. Cette technologie a vu son coût considérablement réduit depuis le projet des serres de La Villette.

Autre exemple d'utilisation structurelle du verre : un prototype d'arc de verre, développé à Stuttgart par l'institut de recherche IL. Cet arc est constitué de verres feuilletés, par lesquels transitent les compressions, et est simplement stabilisé par de fins câbles radiaux. Les essais de résistance, allant jusqu'à l'effondrement complet de l'arc, montrent que le collage de feuilles plastiques entre les verres confère une sorte de ductilité artificielle au matériau.

Ce principe a été décliné sur une coupole de verre, elle aussi expérimentale, ainsi que pour la réalisation d'une verrière au musée Maximilian, à Augsburg, l'acier étant utilisé dans cet ouvrage dans le seul but de stabiliser et précontraindre la voûte de verre.

LES COUSSINS GONFLÉS EN MEMBRANE ETFE

Les coussins gonflés en membrane ETFE présentent une grande résistance. Cette membrane est stable chimiquement, étanche et extrêmement transparente. Ce matériau a été utilisé pour le siège social du couturier Jean-Paul Gaultier et à plus grande échelle pour un projet de grande serre tropicale (Eden Park) dans le Devon, en Angleterre. Dans ce dernier projet, les coussins gonflés sont des hexagones irréguliers de plus de 6 mètres de diamètre. Ils sont perméables au rayonnement ultra violet, ce qui est très appréciable pour la bonne santé de la faune et de la flore à l'intérieur.

LE POLYCARBONATE STRUCTUREL

Le pavillon itinérant IBM, qui fut monté à Paris dans les années 80, allie structurellement le bois, le polycarbonate et l'aluminium. Les pyramides de polycarbonate assurent le clos du pavillon, tout en étant mises à profit pour la structure (elles forment les diagonales de la structure treillis des arcs).

LE FAÇONNAGE NUMÉRIQUE DU BOIS

Le bois fait partie de la catégorie des matériaux appréciés pour un bon « comportement écologique ». Il a été mis en œuvre pour un auvent de stade, à Nanterre, réalisé par l'entreprise vosgienne Houot. Cet auvent est constitué de poutres tridimensionnelles accolées, chacune étant recomposée à partir d'une multitude de petits éléments. Cependant chaque élément est différent et s'assemble différemment. Pour cela, la société Houot a utilisé une machine numérique dite « 5 axes », qui permet de véritablement sculpter des pièces de bois à partir d'un dessin informatique, et de rendre ainsi à nouveau possibles les assemblages bois/bois de la charpente traditionnelle, à base d'embrèvements et de queues d'aronde, particulièrement efficaces pour transmettre les efforts mais abandonnés depuis plus d'un demi-siècle en raison du coût de la main d'œuvre.

IV. Conclusion

Les projets que je viens de présenter sont de petite taille. Tous utilisent un matériau nouveau ou une technique nouvelle pour un usage décalé par rapport à la raison initiale du développement de ce matériau ou de cette technique. On se trouve donc en situation d'avoir à chercher, pour ces matériaux et techniques, un usage et une expression constructive qui leur correspondent.

L'expérimentation est le seul moyen pour y parvenir. Elle passe par une phase de recherche en laboratoire, mais également par la réalisation de prototypes ou d'ouvrages modestes. Il y a là un paradoxe apparent : du fait même de la modestie de l'ouvrage expérimental, les problèmes techniques à résoudre sont limités et peuvent être résolus par des techniques éprouvées. L'usage d'un matériau nouveau relève donc de l'action « proactive », volontariste, une action payante à mon sens à long terme car elle permet de constituer un savoir-faire autour de ces matériaux et d'en trouver les meilleures applications.

► **DÉBAT****Bertrand FABRE**

Jean-Paul TEYSSANDIER a souligné les contraintes physiques et géologiques du golfe de Corinthe. Au lieu de réaliser des fondations profondes très coûteuses, qui auraient remis en cause le projet, il a fait le pari d'exploiter au mieux le sol, et de construire des fondations superficielles. Faut-il en conclure qu'à l'avenir, lorsqu'il faudra construire un ouvrage sur un site dont le sol n'est naturellement de bonne qualité, de bonne portance, on pourra voir se multiplier des technologies inspirées sur projet de Rion-Antirion, en particulier des piles prenant appui sur des structures superficielles (si cette option est moins onéreuse, bien sûr) ?

Jean-Paul TEYSSANDIER

Je pense qu'il n'y a pas de règles prédéfinies à chaque ouvrage. Chaque projet est un cas particulier. Sur le projet de Rion-Antirion, les techniques d'inclusions – et donc de clouage – que nous avons développées étaient pertinentes parce qu'elles permettaient de répondre à des moments de renversement considérables. On pourrait donc les appliquer à nouveau dans un projet présentant des conditions similaires. Si, au contraire, les mouvements de renversement avaient été faibles, les inclusions auraient été inutiles. Des pieux classiques auraient suffi.

Je voudrais profiter de cette prise de parole pour saluer les acteurs principaux du projet, dont certains sont présents dans cet hémicycle. Le projet de Rion-Antirion a été développé, tant dans sa conception que dans sa construction, par le Groupe Vinci. Les études ont été réalisées par Vinci Construction Grands Projets et par Ingerop, avec comme consultants extérieurs Michel Virlogeux et Jacques Combault, et comme architecte le cabinet Mikaelian.

Michel CHADUTEAU, *Ecole normale supérieure de Cachan*

Ma question s'adresse à Monsieur Teyssandier. Quelle est la part de l'innovation-conception dans le projet global ? Comment avez-vous planifié le coût d'une telle opération et assuré son financement ? Enfin, quel dispositif de gestion des risques avez-vous mis en place ?

Jean-Paul TEYSSANDIER

L'innovation-conception n'a été possible que parce que nous étions dans un processus de conception-construction. La parfaite symbiose entre l'équipe des études et celle des méthodes a été un facteur-clé pour le succès du projet. Le coût de l'innovation est intégré au coût global du projet. Les risques techniques correspondants ont été assumés par l'entreprise.

Intervenant de la salle

Il y a environ un siècle, lorsque le béton armé a été inventé, on s'est préoccupé de la résistance à la compression du béton, de la résistance à la traction de l'acier, de l'adhérence... On a même obtenu une sorte de miracle : le fait que l'acier et le béton présentent, par un heureux hasard, sensiblement le même coefficient de dilatation thermique. Cela a permis d'écarter un certain nombre de difficultés.

Cependant, la relaxation de l'acier et le fluage du béton ont conduit, pour les ouvrages déformables comme l'étaient les ponts en béton précontraint, à des ravages assez redoutables. Avec les matériaux composites nouveaux, pourrait-on prévenir ces problèmes tant vis-à-vis des effets thermiques que d'une éventuelle rhéologie ?

Bernard VAUDEVILLE

Aucun des matériaux mentionnés dans mon exposé n'est la panacée. Les matériaux nouveaux doivent être utilisés lorsque cela est pertinent. Il faut donc rechercher cette pertinence. Les composites présentent des inconvénients, je vous l'accorde. Par exemple, en terme de fluage, la fibre de carbone est intéressante, mais comme tout matériau, cette matière présente aussi des inconvénients.

Pour ma part, j'avais d'abord compris votre question, qui tourne autour de la thermique, en termes d'isolation et de résistance au feu de ces matériaux. Mais j'ai bien compris que tel n'était pas le sens de votre interrogation. Il est vrai que je n'ai pas présenté cet aspect, mais à mon avis nous ne disposons pas encore, pour une application dans un avenir proche, de matériaux qui soient à la fois très résistants au feu et qui présentent une bonne résistance structurelle (à l'exception du titane).

Jean BERTHIER

En 1985, dans le cadre de la réflexion qui avait été initiée sur le thème « Quelle est la plus grande portée actuellement réalisable ? », j'avais été très surpris que Michel VIRLOGEUX et Roger LACROIX, qui pilotaient le projet, n'aient pas envisagé l'utilisation de fibres de carbone ou de Kevlar pour la réalisation des câbles. Michel VIRLOGEUX, qui est présent aujourd'hui, pourrait peut-être nous éclairer.

Michel VIRLOGEUX

Je dirais, très simplement, que nous sommes quelque peu frileux vis-à-vis de ces matériaux nouveaux ! Ces matériaux, notamment les fibres de carbone, sont très fragiles malgré leur très forte résistance. Ils sont peu ductiles et, sauf précautions particulières, résistent mal aux effets des contraintes. Par exemple, lorsqu'on place un collier sur un câble de pont suspendu, on crée des flexions locales, donc un phénomène de concentration des contraintes. L'avantage majeur de l'acier est sa ductilité : les petites erreurs locales peuvent y être résorbées ou corrigées. Ce n'est pas le cas pour un matériau fragile. Bernard Vaudeville a montré l'effondrement d'une passerelle de verre : ce matériau résiste pendant un certain temps, mais finit par s'effondrer. Pour passer d'une recherche théorique à une construction pratique intégrant des exigences de sécurité, il faut acquérir la certitude, la conviction profonde que le matériau utilisé est tolérant et qu'il est à même d'offrir les garanties nécessaires vis-à-vis de petites erreurs et imprécisions, tout ce qui, par définition, échappe à la précision.

Intervenant de la salle

Les Norvégiens ont développé, il y a quelques années, une idée originale pour la traversée de bras de mer : ils ont utilisé des tubes sous-marins à flottaison positive ancrés sur des corps morts. Je souhaiterais connaître le sentiment de Monsieur Teyssandier et de Monsieur Virlogeux sur cette technique.

Michel VIRLOGEUX

Cette technique est plus ancienne que ce que vous laissez entendre ! Pour ma part, je suis intervenu à titre d'expert pour l'ONU (alors que j'étais, je dois l'avouer, absolument incompetent dans ce domaine) sur le projet de tunnel immergé de Gibraltar. Ou peut-être était-ce Roger LACROIX... Bref, la solution qui a été développée par les Norvégiens est en effet pertinente, mais elle fait peur à plusieurs égards, ne serait-ce que l'idée de faire passer des voitures et des individus dans un tube qui flotte entre deux eaux, même avec un système d'ancrage ! Se posent également des problèmes de tolérance géométrique et de mouvements.

Les Norvégiens ont par ailleurs développé une autre technique : celle des ponts flottants. Deux ponts flottants, en arc, ont été construits en Norvège, où tous les effets de dilation thermique sont repris par les mouvements de l'arc entre deux culées.

Pierre-André DUFETEL, *architecte, membre de l'Académie d'architecture*

Vous n'avez pas évoqué les voiles minces de béton et la morphologie de la matière. Pourriez-vous en dire quelques mots, sachant que ce matériau a été très largement utilisé dans le bâtiment il y a quelques années, notamment au CNIT ?

Bernard VAUDEVILLE

Mon propos portait sur les nouveaux matériaux, et non sur les nouvelles structures. J'ai quand même projeté des images de voiles minces, des voiles de verre stabilisés soit par des tirants extérieurs, soit tout simplement du fait de leur forme en dôme. Dans la pratique, très peu de voiles minces en béton sont réalisés actuellement – et vous en parleriez sans doute mieux que moi –, en raison des difficultés de mise en œuvre et des coûts induits. Les recherches sur ces structures devraient être reprises, car ces voiles sont à la fois superbes et très efficaces tant du point de vue de la quantité de matière que de l'espace intérieur qui peut être créé. Cependant, tant qu'on n'aura pas développé des systèmes de cintrage et de coffrage plus performants, leur généralisation dans un futur proche me paraît peu probable.

Alain FRYBOURG, *Natexis Banques Populaires*

Je voudrais revenir sur la question qui a été posée à Jean-Paul TEYSSANDIER sur le financement du pont de Rion-Antirion. Il me semble qu'il existe une différence de nature entre le financement qui a été mis en œuvre sur le viaduc de Millau par le groupe Eiffage, qui est entièrement supporté par l'entreprise, et celui qui a été mis en place – du moins pour la période de construction –, par la société Gefyra, qui a consisté en un financement sans recours sur ladite société et qui, de surcroît, a été mis en place d'une manière différée par rapport à la signature du contrat de concession (soit après la période d'étude initiale).

Jean-Paul TEYSSANDIER

Je maintiens et je signe car, précisément, les banques sont entrées dans le concert lorsque le *design* a été approuvé ! Le risque d'étude a été supporté par l'entreprise, même si nos amis les banquiers nous ont rejoints plus tard.

Jean BERTHIER

Jean-Paul TEYSSANDIER m'autorisera à dire que, au final, c'est l'usager qui assumera le coût d'un tel projet puisque c'est lui qui devra payer. Dans ce cadre, le relais est incontestablement assuré par l'entreprise !

Jean GUENARD, *président d'Eiffage TP, Compagnie du Viaduc de Millau*

Dans les deux projets évoqués, Rion-Antirion et Millau, il convient de souligner que c'est à l'occasion d'un projet privé que le risque a été endossé. Ce risque était cependant plus important dans le cadre du projet de Millau. J'ajoute que nous mettons en place à Millau, sur la barrière de péage, un projet de 2 500 tonnes de béton à ultra haute résistance (le BSI Ceracem), aux frais et risques de l'entreprise. Pour notre part, nous souhaiterions que les pouvoirs publics, le ministère de l'équipement en particulier, soient beaucoup plus vigoureux, volontaires et « efficaces » dans le domaine du développement des matériaux. Les ponts de Bourg-lès-Valence, que nous avons réalisés en BSI, sont les seuls exemples que je connaisse en France, mais cela date déjà de quatre ans !

Jean BERTHIER

La prochaine séquence va traiter de la recherche et de l'innovation comme fondements de la culture de l'ingénieur. A mon avis, Michel VIRLOGEUX est tenté de conclure par le constat que l'innovation résulte des conditions d'exécution du chantier, des contraintes environnementales, physiques et géologiques. Mais je nuancerais son propos en soulignant la nécessité de conduire des recherches à même de permettre aux différents acteurs d'anticiper les obstacles et les contraintes. En ce sens, une complémentarité très forte dans nos domaines me paraît souhaitable, notamment entre la recherche et le chantier.

3

RECHERCHE ET INNOVATION,
BASES DE LA CULTURE
DE L'INGÉNIEUR

INTRODUCTION

Georges DOBIAS, *président du comité d'experts « Transports » du CNISF*

Dans un ministère à dominante technique, comme c'est évidemment le cas pour celui de l'équipement et des transports, la recherche et l'innovation conditionnent à la fois le progrès technique et le progrès social, à partir de la connaissance des besoins et des comportements des usagers citoyens. Dans cette séquence, je souhaite illustrer l'importance, la variété et l'apport dans la vie quotidienne de la recherche qui est menée au ministère de l'équipement.

Témoigne en particulier de cette importance l'ampleur du dispositif de recherche et d'innovation du ministère, qui comporte de nombreuses écoles nationales (notamment celles des Ponts et Chaussées et de l'Aviation civile, que je salue ici), avec leurs laboratoires internes, les instituts de recherche (notamment le CSTB, l'INRETS, le LCPC), ainsi que le « Réseau scientifique et technique », qui est chargé notamment de la diffusion de cette innovation, avec les organismes dits « têtes de réseau » et les CETE. Ce sont plusieurs milliers d'agents de catégorie A qui travaillent dans ce domaine.

En témoigne également l'organisation de la recherche, avec le PREDIT (Programme de recherche et d'innovation dans les transports) et le Plan Construction, programmes qui ont été élaborés et exécutés en partenariat avec d'autres ministères (ministère de la recherche, ministère de l'écologie et du développement durable, ministère de l'industrie, de l'économie et des finances).

En témoigne également la forte participation française aux recherches menées dans le domaine des transports dans le cadre des PCRD successifs (Programmes-cadres de recherche et développement communautaires).

Les exposés de Bernard DECOMPS - qui intervient ici davantage en tant qu'ancien directeur de l'ENS de Cachan et de président des conseils scientifiques de l'ENPC et de l'INRETS - et celui de François PERDRIZET, directeur de la recherche et des affaires scientifiques et techniques au ministère de l'équipement, illustreront l'importance de la recherche pour la formation et la culture des ingénieurs (Bernard DECOMPS), l'organisation et des moyens qui lui sont affectés (François PERDRIZET).

La variété des pistes de recherche et d'innovation au sein du ministère de l'équipement est liée à la variété des missions qui lui sont confiées et des services qui lui sont rattachés : aménagement et équipement du territoire, mobilité et organisation des transports des personnes et des biens, sécurité dans les déplacements, prévention des risques naturels, météorologie, développement durable, tourisme, pour ne citer que ces domaines.

Ces sujets touchent de nombreuses personnes, suscitent de nombreux questionnements et préoccupent les citoyens dans leur vie quotidienne. Ces thèmes conjuguent des recherches technologiques et des recherches socio-économiques, dans une vision qui doit être prospective à long terme (à quinze ou vingt ans au minimum) pour tenir compte de l'inertie des organisations spatiales et des systèmes. Je rappelle que la durée de vie d'un avion est d'une quarantaine d'années, celle d'une voiture - contrairement aux idées reçues - d'une quinzaine d'années ; et je ne parle pas de la durée de vie des infrastructures ou de celle de l'aménagement des villes.

La connaissance des comportements est également essentielle pour apporter aux citoyens les bonnes réponses. François PERDRIZET en illustrera la variété, qui implique la plupart des disciplines scientifiques, qu'elles soient qualifiées de « dures » ou de « molles ».

Puis, quatre exposés montreront les apports de ces recherches dans notre vie quotidienne, à partir du développement du calcul scientifique. Il s'agit, naturellement, d'un choix relativement arbitraire que je revendique. Le développement des théories mathématiques et de la puissance des moyens informatiques permet aujourd'hui de simuler des réalités complexes. Ces simulations sont des outils puissants, par exemple pour gérer les trafics, en particulier grâce aux technologies de l'information et de la communication, et cela qu'il s'agisse du transport aérien,

ferroviaire, maritime, routier ou urbain. Mais nous n'en parlerons pas car le temps qui nous est imparti aujourd'hui ne nous le permet pas.

Nous parlerons davantage de la puissance du calcul scientifique d'aujourd'hui, avec Bernard LARROUTOUROU, des applications dans le domaine des changements météorologiques et climatiques avec Philippe COURTIER, de l'amélioration de la sécurité routière à partir de la modélisation des conducteurs et des passagers en situation d'accident avec Christian BRUNET, et enfin de la définition de projets d'aménagement à l'aide de l'imagerie virtuelle avec Bertrand DELCAMBRE. Bien d'autres présentations auraient pu être faites, mais celles-ci, je pense, vous montreront toute la richesse de ce qui se fait au sein du ministère et autour de lui.

R & D ET INNOVATION : LEURS APPORTS À LA FORMATION ET À LA CULTURE DES INGÉNIEURS

Bernard DECOMPS, *président de la Commission nationale de certification professionnelle*

J'intitulerais volontiers le bref exposé que je voudrais vous faire de la manière suivante : « La R&D et l'art de l'ingénieur de l'Équipement au 21^{ème} siècle : une alliance féconde mais tumultueuse ». La première partie de la journée a illustré bien mieux que je n'aurais su le faire la part de la fécondité. Ne souhaitant pas diminuer cet effet, j'évoquerai sans plus attendre les questions qui, à mon sens, sont incontournables pour l'ingénieur dans ce 21^{ème} siècle.

I. Comment définir l'ingénieur de l'Équipement ?

Il me semble nécessaire de rappeler que l'ingénieur est un agent économique doté de connaissances et de compétences scientifiques ou techniques pour concevoir, réaliser ou exploiter un système d'organisation de personnes, de données abstraites et de moyens matériels, en vue d'apporter la meilleure réponse possible à un besoin exprimé à partir de critères rationnels convenus, en prenant en compte les facteurs humains, sociaux et économiques de la société pour laquelle il travaille.

Cette définition, banale et généralisée, doit néanmoins être rappelée si on veut définir l'ingénieur de l'Équipement. On considère généralement que c'est un ingénieur généraliste. Je vous invite à résister à cette facilité, parce que cette terminologie est à la fois trop superficielle et difficile à exporter. Un ingénieur généraliste est bon à tout, mais à l'étranger, malheureusement, il n'est bon à rien ! A mon sens, l'ingénieur de l'Équipement est un ingénieur qui exerce ses talents dans et sur des territoires qu'il doit modeler, aménager, développer et préserver. Dès lors, l'innovation, la science et la technologie doivent être mis au service des femmes et des hommes dans les territoires, ce qu'on pourrait résumer sous le slogan « du béton en environnement durable ». Je précise que par « environnement », j'entends logiquement ici les interactions avec les individus qui peuplent les territoires.

Dans ce contexte, un corpus de savoirs et une culture collective, construits sur une panoplie de filières technologiques (au sein desquelles les sciences de l'homme et de la société ont un rôle essentiel), sont nécessaires. Dans cette trame, l'ingénieur de l'Équipement est non seulement un prescripteur, un réalisateur, mais il assume forcément, à une étape de sa carrière, un rôle de régulateur, qui prend appui sur un pan de connaissances (qui est rarement rencontré chez la plupart des autres ingénieurs) et sur une intelligence du fait juridique (qui est bien plus prégnante que dans bien d'autres situations).

Dès lors, il me semble que la qualité dominante de l'ingénieur de l'Équipement est celle d'intégrateur. Et je dis tout de suite que c'est là que le bât blesse : car la recherche, en France, est peu intégrative, elle est davantage analytique.

II. La recherche, oui, mais quelle recherche ?

Pourquoi faut-il de la recherche dans une formation initiale ? Il convient, à mon sens, de passer de « la voix du maître » à l'autonomie, pour diverses raisons :

- premièrement, toute question n'a pas forcément une solution ; l'exposé de Jean-Paul TEYSSANDIER était très éclairant à cet égard ;
- deuxièmement, plusieurs solutions offrent une réponse à des questions voisines ; et je renvoie aux exposés de Michel VIRLOGEUX et de Bernard VAUDEVILLE ;
- troisièmement, l'ingénieur doit dégager la réponse la moins mauvaise à une question donnée, voire, mieux encore, trouver une réponse à une question qui n'est pas sensiblement différente de la question posée, ce qui permet de dénouer la situation ; là encore, l'exposé de Jean-Paul TEYSSANDIER a admirablement illustré ce point de vue.

La recherche doit s'inscrire dans le courant de l'activité professionnelle. Elle doit permettre de poser des questions nouvelles, d'ouvrir des voies nouvelles, de préparer l'avenir. Je ne m'attarderai pas sur cet aspect, qui sera développé au cours des exposés qui vont suivre. Je voudrais néanmoins souligner la nécessité pour la recherche d'assurer un véritable contact avec les savoirs mondiaux, cette liaison internationale me paraissant inéluctable en dépit des « secrets de fabrique » et des brevets.

III. La R&D et l'Équipement : une relation d'attraction et de répulsion

La relation entre la R&D d'une part et l'Équipement d'autre part me fait penser à cette phrase populaire « Je t'aime, moi non plus ! ». Dans le déroulement des activités professionnelles, et avec de brillantes exceptions, la pratique de la recherche en France ne cultive que modérément les compétences d'intégrateur. C'est pour moi un fait majeur. Cela est vrai dans la recherche académique, mais je crains que cela soit vérifié aussi dans la recherche industrielle. Plus exactement, je redoute que le chercheur soit perçu comme un simple spécialiste, et non comme un spécialiste dont la vocation est de devenir un décideur, un stratège ou le régulateur d'un ensemble.

Cet objectif n'est pas celui qui est confié à la recherche outre-Rhin. Précisons à cet égard que pour franchir une étape dans la hiérarchie des entreprises outre-Rhin, il faut être juriste, et à défaut détenir un doctorat ! Ce mouvement n'est pas circonscrit à l'Allemagne : il se répand dans le monde entier. En dehors des juristes et des titulaires d'un PhD, il semble que toute une série de positions professionnelles ne sont plus accessibles aux ingénieurs. Nous avons le meilleur modèle du monde, c'est bien connu, mais saurons-nous le défendre encore longtemps ?

IV. Le dilemme du nouveau Bac + 8 (système LMD)

Avec le LMD (Licence-Maîtrise-Doctorat), les écoles d'ingénieurs françaises sont prises dans un étau absolument redoutable. Rassuré par le fait qu'il a déjà décroché le « M », l'ingénieur ne se dit pas que le « Bac + 8 » peut devenir indispensable. En outre, combien d'ingénieurs, aujourd'hui, capitalisent sur ce secteur ? D'ailleurs, est-il souhaitable qu'ils le fassent, dans la mesure où il n'y a pas d'autre solution actuellement en France que de passer par un « D » académique, soit trois années *a minima* de spécialisation ? À l'inverse, aux États-Unis, si l'équivalent du « M » correspond à un niveau spécialisé, le « D » (c'est-à-dire le PhD), lui, ouvre à une généralité.

En France, le « D » enferme dans une spécialité. À mon avis, entre 25 et 30 ans, ce n'est probablement pas la meilleure option. Certains des jeunes, une fois qu'ils ont décroché leur diplôme d'ingénieur, tentent de s'engager dans une recherche de type académique. À mon sens, ils perdent leur temps, si ce n'est leur âme. Ils s'enferment au lieu de s'ouvrir et de capitaliser pour l'avenir.

V. Vers un « PhD technologique » ?

L'ingénieur du 21^{ème} siècle est condamné à lever ce dilemme. De même, il doit relever quelques défis majeurs.

Si on attend d'être ingénieur diplômé pour démarrer la recherche, on perd nécessairement trois années par rapport aux concurrents qui, eux, engagent une activité de recherche entre 20 et 25 ans !

Par ailleurs, il est clair qu'une organisation sans calendrier n'est pas pertinente. En la matière, une organisation par projet est infiniment supérieure à une organisation par sujet, mais il doit s'agir de projets faisant appel à la multiplicité des talents. En outre, il me paraît nécessaire d'examiner très sérieusement la question de l'alternance entre des responsabilités de décideur sur des terrains internationaux et des activités de chercheur. De la même façon qu'on a « inventé » un accès au titre d'ingénieur par l'alternance, on pourrait aujourd'hui plaider en faveur d'un accès au PhD par alternance et par validation (sous toutes ses formes) des acquis professionnels.

Il me semble qu'en s'engageant dans cette voie, le CGPC ferait beaucoup plus qu'œuvrer pour son compte. Il travaillerait pour lever un défi majeur qui se pose aujourd'hui aux ingénieurs en France : comment atteindre normalement le « D » et les responsabilités qui sont aujourd'hui confiées aux titulaires d'un PhD ? Pour cela, je crois qu'il suffit de suivre les « grands anciens », et les « un peu moins grands anciens » comme ceux que nous avons pu écouter au cours de la première séquence de cette journée.

R & D ET INNOVATION, ORGANISATION ET APPORTS AU DÉVELOPPEMENT DES TECHNIQUES D'AMÉNAGEMENT ET DE CONSTRUCTION

François PERDRIZET, directeur de la recherche et des affaires scientifiques et techniques, au ministère de l'Équipement

Ma mission, aujourd'hui, est de vous présenter la recherche au sein du ministère de l'équipement. J'ai choisi de l'illustrer à travers trois exemples de projets de recherche.

I. Le ministère de l'Équipement

Dans notre ministère, qui est considéré comme un ministère technique, on trouve trois piliers fondateurs : le service public, le territoire (ou plutôt le rapport au territoire) et la technique (ou plutôt le lien avec la technique). Plusieurs missions constituent nos « raisons d'être » :

- développer et valoriser le patrimoine collectif ;
- participer à l'aménagement du territoire ;
- mettre en œuvre les politiques publiques ;
- offrir des services qui permettent de satisfaire les besoins de nos concitoyens, notamment les plus exposés d'entre eux ;
- et enfin conduire la technologie et la science vers l'intérêt général.

Cette dernière raison d'être justifie la place de la recherche au ministère, notamment dans son rôle d'anticipation d'un certain nombre de défis :

- les enjeux énergétiques et environnementaux ;
- l'exigence accrue de nos concitoyens pour la sécurité ;
- les évolutions accélérées des technologies et des matériaux.

La recherche du ministère est dite « finalisée », mais à mon sens, il serait plus approprié de dire qu'elle est au croisement des systèmes techniques et sociaux, avec une forte « coloration » d'action publique. Plus précisément, le ministère conjuge de front trois objectifs :

- apporter des éléments de connaissance vis-à-vis des milieux et des phénomènes ;

- fournir des instruments pour guider, orienter et mettre en œuvre les stratégies publiques (celles de l'État en général, et des autres acteurs publics en particulier) ;
- favoriser le développement des technologies et des prestations, en partenariat avec les industriels et les opérateurs.

Cette recherche s'exerce dans les champs du ministère : les transports et la mobilité, le génie civil, la construction et le bâtiment, la ville et l'urbanisme, l'observation de la terre, l'aéronautique. D'un point de vue quantitatif, la recherche publique et privée liée à nos activités représente de l'ordre de 15 000 chercheurs, dont la moitié travaille dans le domaine des transports. La recherche publique représente environ 4 500 chercheurs, dont 1 000 sont spécialisés dans le domaine des transports.

La recherche du ministère est liée à un certain nombre d'organismes scientifiques : le LCPC, l'INRETS, le CSTB, les laboratoires des écoles, sans oublier la recherche conduite par Météo France, par l'IGN et par d'autres établissements. Il convient de souligner que notre recherche est insérée dans un réseau scientifique et technique où l'on retrouve, par ailleurs, des services techniques centraux et des centres d'études techniques. Des passerelles sont donc possibles entre l'application et la recherche, facilitant le dialogue dans les deux sens.

Les Programmes nationaux incitatifs de recherche constituent une autre modalité de gouvernance de la recherche. Ils font partie des « réseaux technologiques » du ministère de la recherche. Il s'agit de programmes en partenariat public-privé, comme le PREDIT (le vaste programme des transports), le RGCU (dans le domaine du génie civil et urbain), sans oublier le tout nouveau PREBAT (sur le thème de l'énergie dans le bâtiment), et le Plan Urbanisme Construction et Architecture (PUCA).

II. Trois exemples de projets de recherche

LAVIA : LE LIMITEUR S'ADAPTANT À LA VITESSE AUTORISÉE

Le projet LAVIA a été initié par la direction de la sécurité et de la circulation routières et la direction de la recherche. Ce projet, dont le coût est estimé à 6 millions d'euros (dont une partie, d'un montant de 4 millions d'euros, a été subventionnée par l'État), repose sur trois éléments de structure :

- une cartographie embarquée sur les véhicules, qui comporte des informations sur la vitesse autorisée par segment de route ;

- un système de positionnement satellitaire ;
- une IHM (Interface Homme-Machine), qui permet d'interagir avec la voiture, soit par le biais d'un système d'alerte sonore, soit par le truchement d'un système de régulation directement au niveau du moteur.

Le projet LAVIA, qui est en cours, a consisté principalement à tester la faisabilité technique et l'acceptabilité du dispositif par les conducteurs, à travers une phase expérimentale extensive. Expérimenté sur l'Ouest parisien, il s'est agi, pendant six mois, de suivre le comportement des conducteurs dans leur voiture. Trois points me paraissent importants dans ce projet.

• **la diversité des disciplines**

Ce projet allie des disciplines aussi diverses que l'automatique, la psychologie et la cartographie du positionnement, le recueil et l'analyse de données.

• **la variété des partenaires**

Le projet a été initié par le ministère de l'équipement, mais il a été porté par un laboratoire - le LIVIC - qui est commun au LCPC et à l'Inrets. En outre, il a été soutenu par un groupement d'industriels, par des laboratoires privés et des laboratoires de recherche publique.

• **la mise en évidence d'un certain nombre d'interrogations pour l'action publique**

Ces questions sont diverses : quel est le lien entre ce système d'aide à la conduite et la politique de renforcement du respect des limites de vitesse ? comment mettre en œuvre une base de données sur les vitesses autorisées, disponible et à jour, à un coût raisonnable ? comment en extraire une information pertinente sur la sécurité des systèmes embarqués ?...

Par ailleurs, le projet LAVIA est une parfaite illustration des trois objectifs évoqués précédemment :

- il fournit à la fois des éléments de connaissance sur la sécurité routière, les limitations de vitesse et la sécurité du conducteur ;
- il s'inscrit, au final, dans une volonté politique qui vise à agir sur la vitesse autrement que par le contrôle-sanction ;
- il se veut une application technologique combinant les différents champs de l'automatisme, du positionnement et de la cartographie.

LES PROJETS DE RECHERCHE-DÉVELOPPEMENT LIÉS AUX ÉVOLUTIONS DU BÉTON

Le béton résulte de progrès incrémentaux dans le temps. Depuis la naissance de l'industrie du ciment au 19^{ème} siècle, et tout particulièrement avec la révolution du béton armé à la fin du 19^{ème} siècle, le béton a connu une évolution qualitative régulière jusqu'au début du 20^{ème} siècle, pour devenir un matériau dominant dans la construction. Le béton précontraint, dans les années 30, a consacré une véritable rupture technologique.

Cette première génération de bétons est améliorée au cours du 20^{ème} siècle, grâce à de meilleures connaissances scientifiques sur les empilements granulaires et la chimie des adjuvants, qui ont conduit notamment au béton à hautes performances (avec notamment les « projets nationaux » BHP, BEFIM, CALIBE, VNB). La masse cimentaire est alors devenue plus compacte, moins poreuse, la résistance mécanique du matériau s'est accrue, et la durabilité a augmenté.

Un béton de troisième génération a été conçu dix ans après le béton à hautes performances, grâce aux progrès dans le domaine de la rhéologie des pâtes. Ces bétons, très fluides, ont révolutionné la mise en œuvre. Cela a été tout particulièrement le cas avec les bétons autoplaçants (BAP) : ces bétons permettent de réaliser des parements plus lisses, ils diminuent la pénibilité, simplifient le travail et réduisent les nuisances puisque leur mise en œuvre est moins bruyante.

Ces progrès permettent au béton d'aborder le tournant du 21^{ème} siècle comme un matériau moderne dans le cadre d'une démarche de développement durable. Des recherches sont en cours et on parle d'ores et déjà de béton « cicatrisant », de béton « autonettoyant », de béton « absorbeur de CO₂ »... La modélisation ouvre des voies de perfectionnements nouveaux, notamment pour la maîtrise de la fissuration.

A mon sens, ces développements en rupture (notamment le BHP) n'auraient pu se faire sans la grande institution qu'est le LCPC. Ce laboratoire, qui prend appui sur 550 chercheurs, est à l'articulation de compétences diverses mais complémentaires (physiques, chimiques, mécaniques et de modélisation). Le LCPC a pris une part active dans la recherche internationale sur le béton, et a joué un rôle moteur dans la construction de la réglementation sur le béton armé et le béton précontraint.

LE PROJET MODALHOR

Le projet MODALHOR consiste dans la conception de wagons spécialisés permettant de transporter camions et remorques sur le train. Il répond à trois objectifs : rapidité, fiabilité et diversité des transbordements.

Le projet a été dénommé MODALHOR : MODA pour intermodalité, et LHOR pour la PMI qui a participé à ce projet (Lhor Industries). Cette PMI alsacienne, qui compte près de 1 250 personnes, est leader mondial des camions et wagons destinés au transport de voitures (80% du marché mondial). Comme beaucoup d'autres entreprises moyennes, Lhor Industries a fortement investi dans l'innovation : c'est pour eux une façon de survivre. Outre MODALHOR, il faut citer le projet TRANSLHOR, qui consiste en un tramway léger sur pneus guidés, en expérimentation à Clermont-Ferrand.

Le projet MODALHOR préfigure un changement dans le mode de transport combiné. Il est à la fois un wagon intelligent et une plate-forme intelligente, avec une grande capacité d'usage (contrairement au wagon). Ce projet est la concrétisation du concept de spécialisation des wagons.

Plusieurs enseignements peuvent être tirés de MODALHOR, qu'il s'agisse du rôle des PME-PMI en matière d'innovation, du soutien dont peut bénéficier un programme de recherche et de son inscription dans un agenda politique. Dans le cadre du PREDIT, par exemple, tout ce qui passe par l'entremise de l'Anvar connaît un succès considérable, qui s'explique essentiellement par la mise à disposition, dans le cadre d'un programme national de recherche, d'un milieu d'appui constitué d'experts. Plus généralement, le projet MODALHOR est une illustration des interactions des questions de société (en l'occurrence le développement du transport de marchandises dans le respect des principes du développement durable), d'une part, et des réponses technologiques qui peuvent être apportées, d'autre part.

III. Enjeux et défis pour la recherche

Plusieurs enjeux me paraissent importants pour la recherche de demain. S'agissant des *pistes scientifiques*, ces enjeux portent sur :

- l'introduction d'une « intelligence » dans les systèmes et les matériaux de base ;
- l'établissement de passerelles entre les différentes échelles, entre des approches hautement spécialisées, des expérimentations et le terrain ;
- l'articulation entre sciences « dures » et sciences « molles », dans le cadre de projets qui répondent aux attentes et aux préoccupations de la société.

Au plan de la *gestion de la recherche*, il me paraît fondamental :

- d'anticiper les politiques du futur, notamment en matière de développement durable, dans ses trois composantes structurantes que sont l'environnement, la sécurité et l'équité sociale ;
- de développer des compétences pour la co-construction des programmes et des projets ;
- d'introduire de l'intelligence stratégique à tous les niveaux des organismes ;
- de maintenir voire de renforcer la place de la recherche française aux échelles européenne et internationale, à la fois par ses apports et par le pilotage de cette recherche.

Plus que de longues phrases, une citation de Saint-Exupéry me paraît être une excellente conclusion : « *Le passé est irréparable, mais le présent vous est fourni comme des matériaux en vrac aux pieds du bâtisseur, et c'est à vous d'en forger l'avenir* ».

R & D, MODÉLISATION ET SIMULATION AU SERVICE DES CITOYENS : LA VARIÉTÉ DES APPORTS DE LA MODÉLISATION ET DE LA SIMULATION

Bernard LARROUTUROU, directeur général du CNRS

Je voudrais tout d'abord remercier les deux précédents orateurs pour les points de vue qui ont été développés : notamment, pour reprendre les derniers mots de François PERDRIZET, sur la nécessité d'introduire de l'intelligence stratégique à différents niveaux dans les organismes, et, pour faire référence au message de Bernard DECOMPS, sur la nécessité de promouvoir une recherche intégrative. Ces différents éclairages alimenteront directement les réflexions que je mène actuellement sur l'évolution du CNRS.

Je vais essayer de vous livrer un aperçu sur les évolutions du calcul scientifique. Je suis précisément à une étape où il est frustrant d'avoir été doctorant puis chercheur spécialisé et enfin manager, puisque telle a été ma trajectoire. Je vais évoquer un sujet très pointu, dont j'ai été naguère un spécialiste, mais je mesure plus que tout autre à quel point je serai superficiel dans mon propos, puisque je ne suis plus spécialiste du calcul scientifique.

I. Les évolutions du calcul scientifique

Les évolutions du calcul scientifique sont de plus en plus importantes, avec des liens de plus en plus forts avec :

- ***l'optimisation et l'automatique***

Là où, il y a encore quelques années, la puissance de calcul permettait simplement de procéder à une grosse simulation, autour de l'aérodynamique externe par exemple, il est désormais possible de faire ces calculs beaucoup plus rapidement, et de les intégrer dans une boucle d'optimisation de critères. Le calcul scientifique de pointe rentre ainsi dans une boucle d'optimisation, posant des questions nouvelles pour les algorithmes de calcul.

- ***les modèles non déterministes***

Cela recouvre les développements autour de simulations fondées sur des modèles stochastiques. Le domaine des mathématiques financières, par exemple, est fortement consommateur de ces calculs, qui prennent appui sur des modèles non déterministes très pointus, sans oublier les apports pour d'autres types de modélisations plus classiques basées sur des équations aux dérivées partielles déterministes.

- ***les observations et les données***

Cela est particulièrement vrai dans le domaine des simulations météorologiques. Ces investigations scientifiques répondent au besoin de coupler des modèles à des données.

- ***de nouveaux types de simulations***

Tel est le cas des simulations dites « discrètes » (où les populations d'acteurs peuvent être très nombreuses), ainsi que des modèles discrets et continus.

- ***la visualisation***

(simulations « temps réel » ou « interactives »)

De belles perspectives sont ouvertes avec les simulations en lien avec la réalité virtuelle, en temps réel ou interactives, qui ont vocation à prendre une place plus intégrée dans les processus de conception. L'ingénieur pourra véritablement « mettre les mains » dans ces simulations : il pourra entrer dans le calcul, améliorer le modèle dans une partie de la simulation, simuler un phénomène instationnaire dans une simulation où le résultat du calcul se passe à la même vitesse que le phénomène qu'on veut simuler, interagir avec lui, etc. A l'avenir, ce calcul scientifique pourra s'intégrer dans la CAO, et cette ambition est d'ores et déjà portée par certains industriels. Il s'agira d'introduire un rôle nouveau dans l'activité de conception, ce qu'on appelle le « prototypage virtuel » (simulation d'un objet sans l'avoir jamais fabriqué), dans une modélisation qui permet une interaction.

II. Quelques exemples

Les exemples que j'ai sélectionnés ne relèvent pas de la sphère de l'équipement.

Le premier exemple est celui d'une simulation pour turboréacteur, simulation en trois dimensions, avec des modèles très sophistiqués pour l'injection, la pulvérisation, l'évaporation, le suivi des gouttes, les mélanges, la combustion (avec des dizaines voire des centaines de réactions) etc. Il est possible de varier sur les modèles utilisés pour décrire l'écoulement et la turbulence.

Le deuxième exemple est celui d'un simulateur pour moteurs de voitures. La simulation a lieu sur un PC, pour un cycle moteur entier, ce en une fraction de seconde. La combustion et l'écoulement sont calés par un modèle très réduit, qui permet de procéder à des simulations mono-dimensionnelles qui ont été calées par rapport à une simulation 3D. Des simulations 3D sont par ailleurs possibles, avec des maillages variables sur la chimie complexe, sur la turbulence. Des simulations réduites permettent de simuler des milliers de temps de cycle, pour la calibration du moteur et non plus pour sa conception.

Si le modèle simple est suffisamment recalé par rapport à des phénomènes complexes, il permet d'appréhender des phénomènes sur lesquels des informations essentielles sont recherchées. On sait par exemple que la pollution émise par un moteur de voiture est liée à des événements dans la combustion, qui se produisent tous les mille cycles. Il est peu probable que nous parvenions, dans un futur proche, à faire des simulations sur des milliers de cycles, mais cela fait partie des défis posés au calcul scientifique.

Le troisième exemple est celui d'une simulation d'instrument de musique. Ici, un modèle a été conçu pour le maillet, pour la membrane, pour l'impact du maillet sur la membrane, pour la timbale avec un modèle de coque très sophistiqué, pour l'écoulement interne et externe (par un Navier Stokes 3D)... Il s'agit « d'écouter la timbale ». Ce système est plus perfectionné qu'un synthétiseur (où l'on a simplifié à quelques modes de Fourier par rapport à l'enregistrement d'une vraie timbale), il est aussi bien qu'une vraie timbale, avec des modèles très sophistiqués pour la simulation de l'instrument.

Les chercheurs qui sont à l'origine de la simulation d'instruments de musique sont également spécialistes des phénomènes de propagation d'ondes. C'est d'ailleurs vers

eux que nous avons orienté les industriels de la téléphonie mobile qui voulaient simuler des propagations d'ondes électromagnétiques dans une zone urbaine ou rurale. Ces industriels étaient aussi intéressés par des spécialistes de la synthèse d'images, capables de faire des simulations dégradées.

Autre exemple : la modélisation de la croissance des végétaux, qui est issue d'une collaboration entre des spécialistes de la synthèse d'image et des botanistes mathématiciens du CIRAD. Ces chercheurs travaillent aujourd'hui avec des architectes et des urbanistes. Les modèles tiennent compte de l'hydraulique de la plante, du bourgeonnement des feuilles et des fruits, de l'éclairage de la plante, avec des algorithmes dégradés permettant d'obtenir une ombre réaliste et, surtout, de simuler la photosynthèse.

D'autres simulations sont réalisées dans les domaines du génie civil (avec notamment un modèle qui permet de simuler l'instabilité d'un pont) et de la science du vivant. Dans ce dernier domaine, il convient de citer la simulation du système cardiovasculaire (qui est couplée avec des images à partir de données acquises par le traitement d'imageries médicales) et les simulateurs chirurgicaux : des simulateurs interactifs qui permettent de suivre les mouvements d'un organe sous l'effet d'une incision par exemple. La question du passage en environnement clinique reste toutefois ouverte.

LA MODÉLISATION MÉTÉOROLOGIQUE ET CLIMATIQUE

Philippe COURTIER, directeur de l'École nationale des ponts et chaussées

J'ai quitté Météo France il y a six mois pour rejoindre l'ENPC. La présentation que je vais faire est le fruit du travail que j'ai réalisé avec mes collègues de Météo France et du Centre européen pour la prévision météorologique, basé à Reading en Angleterre. Ce centre est l'équivalent, pour la météo, de ce que le CERN peut être pour la recherche nucléaire. J'ajoute, pour conclure ce préambule, que l'Europe a environ cinq années d'avance sur les Etats-Unis en matière de prévisions météorologiques.

I. Chronique des évolutions réalisées en matière de prévision météorologique

Je vais notamment commenter plusieurs courbes, qui illustrent les progrès réalisés depuis les années 80 en matière de prévisions météorologiques.

En 1979, une grande expérience a été conduite à l'échelle mondiale, qui a consisté à réaliser des mesures à partir de nombreux points d'observation de la planète, afin de démontrer la faisabilité de la prévision numérique du temps. Au delà de la recherche, cette expérience portait l'espoir de transférer ces recherches vers des applications opérationnelles.

L'année 1979 faisait suite, par ailleurs, à une première expérience qui avait eu lieu en 1957-1958, qu'on a appelée « l'année géophysique internationale ». A l'époque, des mesures avaient été prises pour comprendre l'atmosphère de l'hémisphère Nord.

Une première courbe montre la corrélation entre la prévision et les observations, pour différentes échéances. On voit que le moment où le niveau de corrélation descend en dessous de 60% est autour du jour « 5 et demi » en 1980, autour du jour « 7 et demi » en 2003. Le niveau de 60% est le niveau au dessus duquel les prévisionnistes ont été capables d'utiliser des prévisions numériques pour déduire des produits utiles.

Depuis cette expérience, on a gagné 1 jour de prévisibilité tous les dix ans. Ce gain est dû à trois courants de progrès : dans la science, dans les calculateurs, dans l'observation et la façon d'utiliser les observations. Au delà de cette tendance de fond, on peut distinguer trois phases :

- une première phase d'intégration des progrès globaux et des acquis des expérimentations réalisés jusqu'alors, qui va de 1980 à 1985 ;
- une deuxième phase, où les progrès se sont effectués par palier, notamment en ce qui concerne l'augmentation de la résolution des modèles ;
- une troisième phase, qui correspond à la mise en œuvre d'une véritable « boucle de contrôle » entre le système de prévision et les observations, afin que la prévision se rapproche le plus possible des observations. Ma thèse, que j'ai réalisée au Centre européen pour la prévision météorologique, a d'ailleurs porté sur ce dernier thème. Les observations satellitaires ont permis de réaliser de grandes avancées au cours de cette phase.

Par ailleurs, à la fin des années 90, on a réalisé des études sur la qualité de la prévision depuis 1958, l'année géophysique internationale. La courbe de corrélation qui a été réalisée à cet effet illustre clairement une amélioration de la qualité de la prévision entre 1973 et 1979, cette période correspondant aux premières observations satellitaires. Ces progrès se poursuivent jusqu'en 2001. Précisons que ces études sont conduites sur la base d'un système de prévision constant. Seul le système d'observation varie, sans oublier la variabilité interannuelle de la prévisibilité d'atmosphère.

Le système de prévision en 2001 marque des progrès très nets, qui sont liés à la modélisation. Le système opérationnel en 2002 et 2003 a permis de consolider ces progrès.

II. La prévision météorologique dans l'hémisphère Sud

Dans l'hémisphère Sud, avant le recours aux données satellitaires, l'exercice de prévision atmosphérique était une vraie gageure, pour des raisons liées essentiellement au mode d'observation. C'est au début des années 70, avec le recours à des techniques modernes d'observation, qu'il a été possible de mettre en évidence des progrès très substantiels dans la prévision, qui se sont poursuivis les années suivantes. Aujourd'hui, la qualité de la prévision dans l'hémisphère Sud n'a rien à envier à celle de l'hémisphère Nord. Cette tendance devrait se confirmer dans les années à venir, d'autant plus que l'utilisation des données satellitaires sur les continents est plus difficile que sur les océans, en raison de la plus grande hétérogénéité de la surface de l'atmosphère.

II. Modèles mathématiques et paramétrisation

Au plan pratique, il convient de faire des approximations physiques pour pouvoir en déduire un modèle mathématique. Pour ces approximations, les équations d'Euler de la mécanique des fluides sont appliquées à l'air, qui est un mélange de deux gaz parfaits, l'air sec (diatomique) et la vapeur d'eau (triatomique). Toujours au titre de ces approximations, on considère que le géoïde de la Terre est une sphère, on prend une hypothèse de « couche mince » pour l'épaisseur de l'atmosphère terrestre (très faible par rapport au rayon de la terre), et d'équilibre hydrostatique pour les modèles à grande échelle. Cette partie dynamique est complétée par une paramétrisation des phénomènes dits « physiques », à savoir le rayonnement, la dissipation turbulente, les nuages et les précipitations, les processus de surface, la traînée des ondes de gravité. Cette dernière a été découverte fin des années 70 début des années 80, lorsqu'on s'est aperçu que les modèles globaux d'atmosphère ne « bouclaient » pas le moment cinétique, autrement dit que le bilan de moment cinétique n'était pas équilibré. Un modèle météorologique est donc très complexe à mettre en œuvre, car il faut maîtriser l'ensemble des interactions.

Un mot sur les modèles numériques et la discrétisation spatiale horizontale. Pour les modèles globaux, on utilise généralement une discrétisation pseudo spectrale. Pour les modèles à domaine limité, on a recours à une discrétisation à la verticale en différences finies. La discrétisation temporelle, elle, est assez élaborée, avec des modèles semi-lagrangiens et semi-implicites, qui sont nécessaires pour obtenir des pas de temps suffisamment longs. S'agissant de la discrétisation du modèle Arpège

utilisé par Météo France, on procède à une transformation conforme de la sphère sur elle-même, et on y applique une discrétisation homogène, qui permet de travailler sur une maille variable, et qui offre une plus grande résolution sur la sphère.

IV. Un cadre collaboratif nécessaire

Aujourd'hui, de nombreux codes de prévision météorologiques ou de climat sont développés dans un cadre collaboratif, dans un cadre d'interaction à la fois nationale et européenne. Le code du modèle à domaine limité utilisé par Météo France est ainsi conjointement développé par quinze pays.

V. La prévision du 6 juin 1944

Un mot pour finir sur la prévision météorologique du 6 juin 1944. Nous avons refait cette prévision, pour apprécier la qualité de celle qui avait été faite à l'époque. Pour la journée du 5 juin, on prévoyait des nuages sur la Manche, ainsi qu'une zone de vents forts traversant l'ensemble de la Manche. Il s'agissait d'une prévision à deux jours. La prévision du 6 juin, elle, faisait état d'un temps couvert le matin, avec des vents faibles, mais dégagé l'après-midi. Les images d'Omaha Beach le 6 juin confirment cette prévision : la plage était effectivement couverte le matin, mais le ciel était dégagé l'après-midi.

VI. D'autres domaines de recherche active

Le temps qui m'est imparti ne me permet pas d'aborder un certain nombre de sujets, pour lesquels la recherche est extrêmement active aujourd'hui : la modélisation des processus physiques, la modélisation à mésoéchelle (*deep convection permitting*), la chimie atmosphérique, la prévision d'ensemble (y compris la prévision stochastique), l'assimilation des données, la modélisation océanique et la modélisation des atmosphères planétaires (qui est pleinement exploitée pour l'atmosphère de Mars par exemple).

► **QUESTIONS DE LA SALLE**

Jean-Pierre MAILLANT

Mon propos n'est pas lié aux exposés remarquables que nous avons eus depuis ce matin. Je voudrais simplement rappeler que nous sommes ici dans l'amphithéâtre de l'ancien Musée des travaux publics, réalisé en 1939 par Auguste PERRET, et qui a été fermé en 1955. Je voudrais par ailleurs signaler qu'il existe un musée virtuel, le site www.planete-tp.com.

Michel ROUSSELOT, *Ingénieur général honoraire, Conseil général des Ponts et Chaussées*

Je voudrais intervenir essentiellement sur les premiers exposés, qui ont très clairement mis en exergue l'importance des sciences humaines et sociales dans l'ensemble des préoccupations de recherche de notre ministère et plus généralement des pouvoirs publics. Les exemples qui ont été donnés, notamment ceux exposés par François PERDRIZET, étaient tout à fait parlants. D'ailleurs, nous avons eu à rendre compte récemment, tous les deux, des résultats d'une « action fédérative de recherche » sur les aides à la conduite et à la sécurité routière, dans laquelle il apparaissait clairement qu'il y avait un avancement inégal entre les recherches portant sur des dimensions techniques et celles portant sur les dimensions humaines et sociales d'un tel programme. Plus généralement, en m'appuyant sur mon expérience de président du Groupe II du PREDIT, qui est chargé des politiques de transport, je voudrais que l'on réponde à la question suivante : « Quelles sciences humaines et sociales ? » Je rappelle que dans les années 60, les stratégies de notre ministère ont été quelque peu bouleversées par l'irruption des sciences économiques, de l'économie, dans la définition de ses politiques, et plus généralement au niveau du commissariat général du Plan.

Aujourd'hui, la question des sciences humaines s'élargit considérablement : on peut citer, en vrac, le développement des réflexions prospectives, les travaux de recherche portant sur la socio-économie de l'innovation, qui mettent en cause notamment les problèmes de comportement (tant individuel que collectif), et qui invitent à étendre la réflexion au delà du simple champ du marketing pour aller au fond des sciences cognitives notamment. A cela s'ajoute le développement marqué du volet juridique.

Enfin, pour faire écho à la présentation sur les modèles de calcul scientifique et la modélisation, je voudrais rappeler que dans le domaine des sciences humaines et sociales appliquées aux politiques de l'équipement, des recherches originales sont conduites sur des modèles faisant appel à la dynamique des systèmes, ou encore sur des modèles dits « multi-agents ». Ces modèles tentent de réintroduire une connaissance plus fine du jeu des acteurs concernés, en simulant des boucles d'action et de rétroaction dans le développement de politiques nouvelles et originales.

Bertrand FABRE

Nous allons passer maintenant à l'application des techniques de simulation/modélisation au domaine de la construction et de l'aménagement, avec Bertrand DELCAMBRE, qui dirige le CSTB. J'en profite pour saluer Alain MAUGARD, le président du CSTB, qui est présent parmi nous.

LA RÉALITÉ VIRTUELLE AU SERVICE DE LA CONSTRUCTION ET DE L'AMÉNAGEMENT

Bertrand DELCAMBRE, directeur du CSTB

Merci d'avoir donné la parole au monde du bâtiment. On a souvent le sentiment que pour certains, le monde du bâtiment n'a pas besoin d'investir dans la recherche. On construit des bâtiments depuis tellement longtemps qu'ils finissent, au bout du compte, par tenir tous seuls ! En réalité, quand on entre dans le vif du sujet, on s'aperçoit que cette idée reçue est loin d'être confortée. L'univers du bâtiment est un monde passionnant. Je rappelle que nous passons l'essentiel de notre temps dans les bâtiments. Notre santé et notre sécurité dépendent donc fortement de la tenue de ces bâtiments, de leur confort et de leur capacité à subir toutes sortes d'aléas.

I. De la maquette numérique...

Mon propos, aujourd'hui, ciblera sur la simulation et la réalité virtuelle appliquées au bâtiment. Un mot, pour commencer, sur la notion de maquette numérique. Pendant quinze ans, le monde du bâtiment a rêvé de modéliser de façon complète, fine et riche, l'ensemble des objets qui décrivent les bâtiments. Aujourd'hui, ce rêve est devenu réalité, et cette concrétisation est rendue possible par la maquette numérique. Des formats normalisés de données ont été mis au point, qui peuvent être utilisés par des logiciels : pratiquement tous les éditeurs de logiciels ont développé les interfaces idoines. Les objets à modéliser présentent à la fois des caractéristiques géométriques et techniques (il peut s'agir, par exemple, des caractéristiques physiques des matériaux qui les constituent). Il est ensuite possible de construire une base de données, qui peut être commune à l'ensemble des acteurs (architecte, ingénieur...) intervenant sur le projet. La maquette numérique peut s'enrichir progressivement, de l'esquisse à la conception détaillée. Elle est directement utilisable par les logiciels de calcul et de simulation, sans qu'il soit nécessaire de procéder à une nouvelle saisie des données d'entrée, ou encore de retraiter des données de sortie. On sait également produire automatiquement des documents d'exécution, là aussi sans rupture de chaîne dans l'information. Au-delà de la conception et de la réalisation du projet, on est capable, grâce à

cette maquette numérique, de fournir un dossier électronique complet au maître d'ouvrage au moment de la livraison du bâtiment. Ce dossier constitue la mémoire électronique de la construction réalisée, qui est utilisée par le gestionnaire du bâtiment pour piloter et programmer l'ensemble des tâches d'exploitation, de maintenance et de rénovation nécessaires tout au long de la vie du bâtiment, jusqu'à la déconstruction.

II. ... à la réalité virtuelle

La maquette numérique nous permet aussi de développer des applications dites de « réalité virtuelle ».

Dans le secteur du bâtiment, la réalité virtuelle permet, au delà de la simple visualisation, de restituer le plus complètement et le plus fidèlement possible, et de manière réaliste, des ambiances intérieures et extérieures, en prenant en compte les phénomènes physiques (acoustique, éclairage, thermique, sécurité des structures et des usagers).

La réalité virtuelle permet également de fonctionner en interactivité avec le projet. Il est ainsi possible d'inspecter un projet sous toutes ses coutures, d'en modifier les paramètres... En résumé, cette technologie permet de construire une représentation des projets, qui permet elle-même de relier en temps réel et de façon interactive les options constructives avec les incidences techniques et environnementales qui en découlent.

Bertrand Delcambre a commenté ensuite un exemple de simulation de la climatisation dans une salle de réunion.

III. La salle immersive Le Corbusier : un instrument d'avenir

La salle immersive Le Corbusier est un équipement de recherche unique dans le secteur de la construction et du cadre de vie pour l'aide aux projets. Localisé à Sophia Antipolis, sur le site du CSTB, cet équipement a bénéficié d'un soutien du ministère de la recherche de 1,5 million d'euros, pour un coût total légèrement supérieur à 2 millions d'euros. Cette salle permet au CSTB de travailler avec les meilleures équipes de recherche sur le sujet, en France (en particulier celles de l'INRIA bien sûr, nos voisins à Sophia Antipolis), mais également en Europe (aujourd'hui, une demi-douzaine de projets européens de R&D portent sur la problématique globale du bâtiment et de l'aménagement urbain).

La salle Le Corbusier a la forme d'une salle de cinéma. Elle est équipée d'un grand écran conique d'environ 8 mètres de large, de trois vidéoprojecteurs pilotés par un supercalculateur, ainsi que d'une installation acoustique qui permet de restituer un son numérisé en trois dimensions. Je vous convie, à l'occasion d'un séjour sur la Côte d'Azur, à faire un crochet par le CSTB de Sophia Antipolis. Nos équipes se feront un plaisir de vous faire une démonstration.

Sur l'ordinateur, nous intégrons l'ensemble de nos logiciels de simulation physique - j'en profite pour signaler que le CSTB prend appui sur une équipe d'experts de simulation physique, qui ont mis au point des outils très sophistiqués. Nous y intégrons également les outils de nos partenaires. Nous réalisons une synthèse, une intégration de l'ensemble de ces phénomènes.

IV. Quelques exemples d'applications pratiques

Depuis que nous avons conçu cet outil, et que nous le présentons à des partenaires et à des acteurs intéressés par ce type de recherche, nous avons pu constater qu'il n'était pas perçu comme étant simplement un équipement de recherche : c'est également un équipement qui invite à des applications pratiques. Nous l'avons exploité dans le cadre de la « mission tramway » de la ville de Nice, notamment pour l'aménagement de la place Garibaldi, qui est le lieu d'une très grande circulation routière et piétonne. La ville de Nice souhaite la transformer en un lieu confortable et agréable, en soignant notamment les espaces paysagers. Dans cette optique, nous avons utilisé le modèle de croissance végétale pour choisir la meilleure espèce d'arbres adaptée à cet environnement. La municipalité souhaite également améliorer cette place au plan acoustique. Pour cela, nous avons étudié l'installation des fontaines (fontaines sèches). Cet outil de recherche nous a permis d'accrocher l'attention des élus municipaux.

D'autres simulations plus classiques sont possibles :

- des simulations d'acoustique urbaine, à l'instar de ce qui a été fait pour une des places les plus animées de Nantes, qui doit accueillir prochainement un tramway ;
- des simulations environnementales : il est par exemple possible de prendre en compte des modèles de trafic et de pollution liée au trafic routier, et de les coupler à des modèles de vent ;
- des simulations en aménagement urbain, comme pour le projet d'installation d'une grande verrière en façade de la gare de Strasbourg, à la demande de l'AREP et de la Communauté urbaine de Strasbourg. En rassemblant

différents fichiers dans notre système, nous avons pu proposer, pour la première fois, une visualisation globale du projet, et détecter des erreurs qui n'étaient pas visibles sans cette simulation. Par ailleurs, dans le cadre de l'enquête publique réalisée par la Communauté urbaine de Strasbourg sur le projet, un système a été installé sur une borne multimédia dans la zone d'exposition, qui permet au public de prendre connaissance des tenants et aboutissants du projet, et surtout de se rassurer sur la pertinence des choix proposés.

- des simulations en aménagement du territoire, comme celles qui ont été conduites pour le viaduc de Millau. Sur Millau nous sommes intervenus *a posteriori*. Nous avons récupéré l'ensemble des données de site (et elles sont nombreuses et de natures diverses), que nous avons complétées avec le modèle d'ingénierie utilisé par Syntec pour préparer le chantier. Nous avons ainsi pu bâtir une simulation de l'ensemble du chantier : les ingénieurs peuvent inspecter le tablier, tester sa résistance au vent à l'aide des logiciels idoines... Nous sommes intervenus *a posteriori* sur un tel projet, mais nous pourrions tout à fait le faire aujourd'hui *a priori*.

V. Vers une maîtrise d'ouvrage partagée

Des solutions riches et nouvelles ont été développées au cours des dernières années, qui permettent d'appréhender l'ensemble des caractéristiques des projets, qu'elles soient techniques, esthétiques, ou d'usage. Cela intéresse tous les acteurs, des ingénieurs aux experts en passant par les architectes. J'y vois une approche d'une maîtrise d'ouvrage partagée, qui serait la maîtrise d'ouvrage des élus et des citoyens, des bureaux d'études, des experts, des architectes et des concepteurs. Ces nouvelles technologies sont promises à un bel avenir dans les domaines de la construction et de l'aménagement. Elles constituent un formidable outil d'expression et de valorisation des travaux des ingénieurs, dont les résultats des travaux peuvent ainsi être mis à portée des publics de toutes sortes. A mes yeux, elles sont destinées à réconcilier les architectes et les ingénieurs.

LA MODÉLISATION BIOMÉCANIQUE AU SERVICE DE LA SÉCURITÉ ROUTIÈRE : LES TRAUMATISMES VIRTUELS DE L'ABDOMEN

Christian BRUNET, *professeur de médecine,*
directeur du laboratoire de biomécanique appliquée de l'Inrets

J'opère des polytraumatisés de la route depuis plus de vingt-cinq ans. Il s'agit chaque fois de situations dramatiques, d'autant plus que ce sont des hommes et des femmes jeunes, avec une moyenne d'âge de 35 ans à l'heure actuelle. Dès le début de mes études, je me suis orienté vers l'étude des mécanismes lésionnels et accidentogènes. Cet intérêt ne s'est pas démenti avec les années, et s'est concrétisé avec le laboratoire de Biomécanique Appliquée de l'Inrets, que je dirige depuis quatre ans.

Notre démarche consiste à réaliser un homme virtuel pour le soumettre à des mécanismes accidentogènes. Le projet que je vais vous présenter a été initié en 1997. J'en profite pour remercier Madame DUPONT-KERLAN (NDLR : directrice générale de l'Inrets à ce moment-là), qui a été l'instigatrice de ce projet et qui l'a soutenu.

Concrètement, il s'agit de placer un homme virtuel dans une voiture virtuelle et, avant que cette voiture devienne un prototype, de la soumettre à des accidents de tous types, avec des hommes de taille variable et des mécanismes lésionnels que l'on peut appréhender. Dans ce vaste chantier, nous avons été amenés à étudier la géométrie 3D et la biofidélité des tissus constituant le corps humain, afin de caractériser les différentes composantes au plan de leurs comportements en accidentologie. Dans ce dessein, nous avons utilisé des modèles aux éléments finis pour réaliser des traumatismes virtuels, la validation de l'ensemble par les *crash tests* s'opérant à l'aide de corps humains donnés à la Science.

Le projet s'est déroulé en quatre phases, auxquelles ont participé aussi bien des médecins, des chirurgiens, des radiologues, des réanimateurs, des ingénieurs, des chercheurs de l'Inrets que des informaticiens. Ces travaux ont donc été conduits dans un cadre de transversalité structurante.

I. Le mode opératoire

Nous avons congelé un cadavre en position de conduite dans un véhicule courant. Ce sujet anatomique a été découpé en tranches de 25 millimètres, ce qui nous a permis de disposer, au final, de 268 coupes. Chaque coupe a été photographiée. Nous avons pu ainsi identifier et redessiner les différents organes au moyen de procédés numériques.

Un homme virtuel a été reconstruit en 3D, dont il est désormais possible de faire varier la taille (il peut atteindre, à souhait, une taille de 2 mètres ou une taille d'enfant).

Le cerveau, les composants du thorax et le foie sont particulièrement exposés dans les accidents routiers. Nous avons tout d'abord réalisé un modèle géométrique du foie humain, en tenant compte de la variabilité anthropométrique de cet organe. En effet, certains ont un foie étalé dit « dorso-pétal », d'autres, en revanche, ont un foie qui plonge plutôt dans l'abdomen, sans qu'il s'agisse, pourtant, d'un foie cirrhotique.

Par ailleurs, il a fallu caractériser le tissu hépatique car, vous l'imaginez aisément, le tissu osseux n'a pas la même résistance au choc qu'un foie, ni la même élasticité. Pour ce faire, nous avons soumis ce foie à des contraintes biomécaniques en traction et en compression. Nous avons utilisé un prototype d'élastographe, un appareil qui est utilisé pour les diagnostics du cancer de la prostate et du sein au Japon. Nous avons pu voir jusqu'à quel point on pouvait écraser le foie. Des biopsies hépatiques ont été réalisées à chaque étape de la compression.

Dans la troisième phase, celle de l'élaboration du modèle aux éléments finis, nous avons appliqué un système de maillage autour du foie. A ce maillage correspondent des nœuds. En l'occurrence, nous avons été jusqu'à 50 000 nœuds, mais la puissance des ordinateurs me laisse espérer un nombre très sensiblement supérieur dans un avenir proche. Sans être excessivement optimiste, je pense nous pourrions être en mesure bientôt de réaliser un homme virtuel de 200 millions de nœuds ! A l'intersection des mailles, donc aux nœuds, nous appliquons des lois mécaniques qui nous donnent une analyse prédictive des blessures et des lésions subies par le foie sous la compression.

II. De nombreux enseignements qui permettent de renforcer la sécurité routière

Grâce à la modélisation, les chirurgiens, dont je fais partie, ont tiré de nombreux enseignements sur les mécanismes lésionnels. En particulier, grâce au test du *whiplash*, nous avons appris que c'est la partie moyenne du rachis, sur la colonne vertébrale cervicale, qui se lèse au moment du choc arrière du cou, le fameux « coup du lapin ». On sait maintenant qu'il faut protéger, au niveau du rachis cervical, non pas les jonctions avec le crâne ou le rachis thoracique, mais la partie intermédiaire. Je précise que les résultats de cette expérimentation ont été publiés immédiatement et sans aucune hésitation par *Spine*, le plus grand journal américain spécialisé sur ce sujet.

De même, la modélisation nous a permis de mieux appréhender les mécanismes lésionnels du foie, dans un choc frontal ou un choc latéral, sur un sujet ceinturé et sur un sujet non ceinturé. Grâce aux ceintures virtuelles, on sait désormais qu'en appliquant une ceinture de sécurité beaucoup plus large et beaucoup plus haute, à certains niveaux du foie et du thorax, le foie est mieux protégé. (1 phrase supprimée)

Sur cette diapositive, qui illustre le choc subi par la veine cave inférieure en cas d'accident, on constate en particulier que lorsque cette veine s'arrache au moment d'une forte traction, elle saigne à blanc l'accidenté en l'espace de quelques minutes. Je rappelle que nous disposons de quatre minutes pour récupérer un tel polytraumatisé avant qu'il n'y ait 3 litres de sang dans son abdomen ! Nous avons compris ce mécanisme grâce à la modélisation.

Sur un cadavre, nous avons placé des capteurs de décélération au niveau des parties sensibles du foie, du rachis, de la veine cave inférieure, du cœur et de l'aorte. Cela nous a fourni des éclairages très précieux sur le mécanisme lésionnel du foie, qui s'articule autour de quatre phases, selon un mécanisme de rotation, comme si vous écrasiez un fruit dont vous vouliez expulser le noyau : la compression, l'étalement, la rotation, la relaxation.

Il est également possible de reconditionner des tableaux de bord de traumatismes virtuels et, à l'appui des résultats des *crash tests* virtuels, par exemple, de recommander à un ingénieur de modifier la boîte à gant du véhicule qu'il vient de

concevoir, susceptible de causer une lésion hépatique au passager en cas d'accident. Il est donc possible, avant même de procéder à la construction du prototype, de modifier un élément dangereux. Ces technologies sont promises à un bel avenir dans les domaines de la construction et de l'aménagement.

Nous avons également pu réaliser des électromyogrammes, qui nous ont permis d'intégrer à cet homme virtuel la tonicité musculaire en situation de freinage brutal.

III. Conclusion

Cette recherche bien concrète est à la fois collaborative et transversale. Grâce aux ingénieurs de l'Inrets, aux chercheurs, aux médecins et aux anthropologues du CNRS, il est possible de construire un homme virtuel et d'avancer plus rapidement dans la compréhension des mécanismes lésionnels. Ce pari de la transversalité, que je défends, apparaissait déjà, en avril 1968, comme une évidence au Général de Gaulle. A l'époque, il avait invité son ministre de la santé, Alain PEYREFITTE, à réunir des personnes de compétences diverses et d'horizons variés pour, selon lui, « aller beaucoup plus vite, beaucoup plus loin, et pour un coût sensiblement moindre ». Je pense que notre projet est une illustration de ce vœu.

► DÉBAT

Bertrand FABRE

La présentation de Monsieur Brunet nous offre une excellente transition avec la séquence qui va suivre, et qui portera sur les cultures croisées.

Georges DOBIAS

Je regrette que les diverses simulations qui étaient programmées n'aient pas pu fonctionner, car vous auriez pu alors prendre la pleine mesure de la force et de l'importance de la simulation, cela vaut mieux que tous les discours lorsqu'elle est en images. Ceux que cela intéresse pourront les voir autrement.

Tri-Thien NGUYEN, *ingénieur au service technique des bases aériennes*

L'exposé de Bertrand DELCAMBRE, du CSTB, m'a clairement mis l'eau à la bouche ! Quand un tel outil sera-t-il disponible pour le public extérieur au CSTB ? Pour ma part, j'ai l'intention de l'utiliser avant même la conception. En effet, la conception d'un bâtiment suppose de procéder, en amont, à un inventaire exhaustif des besoins à satisfaire, des exigences et contraintes à respecter, et des performances à atteindre. C'est une étape fondamentale pour le secteur du bâtiment. J'ajoute que contrairement aux ponts, nous ne connaissons pas la totalité des besoins. Aucune équipe de constructeurs ne peut prétendre connaître l'ensemble des besoins des utilisateurs d'un bâtiment et les anticiper. La raison est évidente : ils n'y vivent pas, tout simplement. Votre outil me paraît donc très précieux à cet égard.

Alain MAUGARD, *président du CSTB*

A l'heure actuelle, cet outil est au stade d'un instrument de recherche. Pour la suite, nous envisageons de conserver les moyens de simulation sur le site de Sophia Antipolis mais de prévoir les aménagements nécessaires pour en profiter à distance. J'entends par là que nous passerions par un système de mise en relation avec Sophia Antipolis. Cela devrait être possible pour le début de l'année 2005. La prochaine étape consistera en la miniaturisation de cet équipement, en plusieurs lieux (un ou deux en région parisienne, un dans chaque région). Cette étape sera liée aux capacités de l'ordinateur, certes, mais compte tenu du rythme d'évolution des capacités de calcul scientifique, je pense pouvoir affirmer que nous serons en mesure de miniaturiser cet outil d'ici un horizon de deux ans.

Au plan technique, il faudra tenir compte de la représentation visuelle (pour cela, il faudra recourir à de grands écrans présentant des caractéristiques spécifiques). En termes financiers, le coût du prototype, 1,5 million d'euros, devrait être divisé par cinq en deux ans.

Cet instrument a donc vocation, et c'est notre ambition, à intégrer l'environnement de travail quotidien des concepteurs et des ingénieurs. C'est un outil impressionnant ! Nous vous invitons à faire un tour par Sophia Antipolis pour vous forger votre propre appréciation. Vous verrez qu'il est possible de concevoir autrement, en tenant compte davantage des qualités d'usage qu'auparavant, en dialoguant avec les usagers futurs, les habitants, les associations... Ces parties prenantes auront enfin accès à des plans qui, jusqu'alors, étaient laissés au pouvoir des technocrates. C'est, à mon sens, une rupture majeure.

CULTURES CROISÉES

INTRODUCTION

Jean FREBAULT, *président de la section
« Aménagement et environnement » du CGPC*

Je voudrais saluer tous les professionnels ici présents. Cette assemblée est diverse : il y a des ingénieurs, des architectes, des paysagistes, des urbanistes, des administrateurs, des militants du développement durable... et j'ajouterais que c'est parfois les mêmes !

Il me semble que cette séquence sur le thème des cultures croisées tombe à point nommé. Elle a d'ailleurs été largement introduite par un certain nombre de témoignages ce matin.

Ce n'est pas à vous que j'apprendrai que la réalisation des ouvrages, des constructions ou des aménagements urbains doit faire appel non seulement à des savoir-faire techniques, mais également à d'autres dimensions que l'on appelle parfois les « disciplines sensibles » : paysagisme, architecture, aménagement du territoire, urbanisme, environnement. Les ingénieurs sont donc non seulement appelés à travailler avec d'autres disciplines, mais ils sont conviés à intégrer ces dimensions non exclusivement techniques dans leurs propres savoirs. Je signale au passage que la composition du CGPC illustre, à travers la section dont j'ai la responsabilité, mais également à travers les autres sections, cette nécessaire pluri-disciplinarité, je dirais même cette inter-disciplinarité car il ne s'agit pas simplement de juxtaposer des disciplines, mais de les faire dialoguer, dans une démarche intégratrice.

Quelques mots pour introduire le débat avec nos grands témoins.

Je dirais tout d'abord que ce concept n'est pas nouveau. Je rappelle que le premier ingénieur des Ponts-et-Chaussées, Gabriel, était aussi architecte du roi. Et n'a-t-on pas dit que les ingénieurs ont « dessiné » la France à travers les siècles ? Les routes royales avec leurs plantations d'alignement, les grands ouvrages d'art comme le Canal du Midi, les viaducs de chemin de fer qui, très souvent, magnifient nos territoires, sont des exemples très emblématiques de cette démarche intégratrice. On peut aussi dire que le développement des infrastructures a été un moteur de la croissance économique et du développement urbain au cours des siècles passés. La période saint-simonienne a fortement illustré cette réflexion transversale de la technique, de l'économie et de l'aménagement du territoire.

Pour autant, l'histoire nous montre que la transversalité est un art difficile. Je rappelle que la France est un pays où les professions sont beaucoup plus fragmentées qu'ailleurs : l'histoire de l'Ecole des Ponts-et-Chaussées et celle de l'Ecole des Beaux-arts sont totalement déconnectées ; l'organisation des tutelles professionnelles dépend de beaucoup de ministères différents ; le paysage des bureaux techniques et des agences d'architectes est très fragmenté... C'est une difficulté que nous vivons encore aujourd'hui. Il convient également de rappeler que, dans la deuxième moitié du 20^{ème} siècle, la démarche de transversalité a subi de nombreuses perturbations puisque, si la croissance économique et urbaine et la révolution technologique nous ont ouvert de nouveaux horizons de liberté et de créativité, notamment à travers l'explosion des matériaux et des techniques constructives, nous avons été parfois conduits à des dérives et à l'oubli de certaines exigences (en particulier l'inscription harmonieuse des projets dans l'espace). Ce qu'on a appelé, à l'époque, la « pensée fonctionnaliste » a contribué à fragmenter les savoirs.

Dans cette même période, on a aussi assisté à l'émergence de l'opinion publique, qui nous a parfois accusés de « bétonner » la France ! Ces conflits se sont traduits par la remise en cause des démarches professionnelles, qui sont aujourd'hui - je crois - à un tournant crucial.

Je voudrais aussi rappeler que le ministère de l'Équipement, créé en 1966, a été l'occasion pour beaucoup d'ingénieurs - et je fais partie de ceux-là - de vivre des aventures exceptionnelles. Rappelons-nous l'aventure des villes nouvelles, celle du quartier de la Défense, Delouvrier, l'expérience des OREAM, des GEP, des agences d'urbanisme... Cette nouvelle aventure des ingénieurs, dont beaucoup se sont engagés dans l'aménagement, les a clairement ouverts à d'autres disciplines, y compris d'ailleurs les sciences sociales. On a vu émerger des figures parfois prestigieuses d'ingénieurs-aménageurs dans notre ministère.

Dans la période plus récente, on a assisté à l'émergence de nouveaux enjeux dans le champ de l'environnement, du développement durable avec en particulier les démarches dites HQE (Haute Qualité Environnementale) qui s'étendent progressivement au-delà du secteur du bâtiment. Ces questions prennent une part croissante dans l'aménagement du territoire, avec les politiques développées autour des infrastructures, notamment le « 1% paysage » mis en place par la direction des routes... Nous avons devant nous un certain nombre de défis, qui sont loin d'être tous relevés, et qui appellent de notre part une démarche de croisement des cultures.

Nous préparons actuellement une publication sur ce sujet, qui devrait être disponible à la fin de l'année 2004. Pour témoigner sur cette question, nous avons invité trois intervenants :

- Jean-Marie DUTHILLEUL, *ingénieur des Pont-et-Chaussées et architecte*
- Bernard LASSUS, *paysagiste*
- et Dominique BIDOUE, *de la section « Aménagement et environnement » du CGPC.*

Jean-Marie DUTHILLEUL a participé à l'aventure des Villes Nouvelles et des grands projets de l'État. Il a surtout attaché son nom à la nouvelle génération des gares contemporaines qui ont marqué notamment les nouvelles liaisons TGV. Il a créé une filiale de la SNCF qui travaille à l'exportation de ce savoir-faire à l'étranger.

Bernard LASSUS, que vous connaissez tous également, est un des grands paysagistes français. Il a réalisé de nombreux aménagements en France, et obtenu le Grand Prix du Paysage. En outre, il est membre associé du CGPC – et je suis très fier qu'il soit parmi nous. Il est également très actif dans le domaine de la recherche, et a publié de nombreux ouvrages. Il a accompagné les directeurs successifs de la Direction des routes dès l'origine de la politique dite du « 1% paysage ».

Dominique BIDOUE est ingénieur et membre du CGPC. Claude MARTINAND et moi-même lui avons demandé de constituer un pôle « Aménagement et développement durable » au sein du CGPC. Il préside par ailleurs l'Association française pour la Haute Qualité Environnementale (HQE).

Ces trois intervenants sont donc tout à fait qualifiés pour illustrer ce thème des cultures croisées.

Après leurs exposés, nous inviterons trois témoins, trois ingénieurs aux parcours atypiques, qui nous feront part de leurs réactions :

- André BROTO, directeur à Cofiroute, nous parlera de la démarche d'une entreprise qui s'est beaucoup interrogée sur les aspects relatifs au paysage et l'environnement.
- Robert MAUD, directeur départemental de l'équipement de l'Indre, s'est penché sur les enjeux de développement durable ;
- François PROCHASSON, qui milite au sein d'une association de promotion du développement durable, l'association 4D.

L'ARCHITECTE ET L'INGÉNIEUR

Jean-Marie DUTHILLEUL, ingénieur et architecte, SNCF

La distinction entre ce qui apparaît aujourd'hui comme deux acteurs distincts de la construction est toute récente, puisqu'elle a à peine deux siècles. Elle n'a d'ailleurs, au démarrage, pas paru évidente à tout le monde. Ainsi en 1791, un archéologue révolutionnaire, M. Quatremère de Quincy, écrivait (parlant de l'École des Beaux-Arts et de l'École des Ponts-et-Chaussées) « *Qui croirait qu'il existe dans Paris deux écoles d'architecture distinctes par les locaux, le choix des maîtres, la nature des leçons ; que l'on montre dans l'une l'architecture comme un art du goût, et dans l'autre l'architecture comme un art du besoin ; et qu'il y a une école pour apprendre à faire un temple et une école pour apprendre à faire un pont ?* » Monsieur de Quincy était visionnaire, mais il n'a pas été suivi puisque les professions se sont clairement différenciées. Cette distinction en deux professions, ingénieur et architecte, du métier de constructeur était sans doute nécessaire aux progrès de l'humanité qui exigeaient des pénétrations en pointe dans des secteurs très spécialisés. Ainsi on n'aurait sans doute pas inventé les premiers TGV si on s'était soucié exclusivement du paysage, on n'aurait pas fait des progrès dans l'habitat des gens si on n'avait pas réalisé des architectures utopiques. Cette spécialisation était donc sans doute nécessaire.

I. Une nécessaire interaction...

Cependant, aujourd'hui, le problème de l'invention du réel-futur a changé de contexte, évoluant désormais dans un champ de contraintes d'une complexité sans précédent, à la fois avec la multiplication des variables et de leurs interactions (on a dit tout à l'heure que la tâche principale avant de faire le projet d'un bâtiment était de rassembler l'ensemble des contraintes pesant sur la structure, des variables techniques aux variables environnementales en passant par les données fonctionnelles et économiques), et la multiplication des intervenants et de leurs interfaces. La notion de « maître d'ouvrage », qui a structuré le monde de la construction dans les années 70, mériterait à cet égard d'être revisitée pour rendre compte de la multiplicité des interventions et des acteurs (décideurs, gestionnaires, exploitants, utilisateurs, financeurs...), qui fonctionnent d'ailleurs souvent entre eux de façon itérative.

La formulation par le discours d'une problématique d'aménagement de l'espace (ce que certains appellent « le programme d'un projet ») est devenue contradictoire : on veut plus de confort mais moins d'énergie ; on veut plus de surface mais on veut que cela coûte moins cher ; on veut que la structure soit plus solide, mais dans le même temps qu'elle incorpore moins de matière ; on veut construire plus vite, mais le bâtiment doit être plus durable... Le programme s'exprime de façon contradictoire, sans qu'il existe des solutions relevant du simple raisonnement déductif. Cela ne signifie pas pour autant que la solution finale ne puisse pas être démontrée rationnellement. Cela signifie que, pour résoudre le problème, il faut passer par une autre démarche que celle de la déduction : une démarche *d'invention*, c'est-à-dire de proposition d'un réel qui n'existait pas, et qui traduise ces différentes contradictions.

On remarquera d'ailleurs que ce constat rejoint celui de la science moderne puisque, depuis la théorie de la relativité (qui n'a fait son entrée dans l'enseignement des ingénieurs que dans les années 60), depuis Bohr, Heisenberg et de Broglie, on sait que la description complète d'une réalité passe par l'affirmation simultanée de vérités contradictoires, mais en même temps toutes nécessaires pour rendre compte de la totalité des phénomènes. Dans la mesure où des scientifiques adoptent cette méthode de description du réel existant, il n'est guère étonnant qu'on l'utilise pour parler d'un réel-futur.

II. ...pour une démarche de projet fondée sur le dépassement des contradictions

Il faut donc accepter que toute démarche de projet soit fondée sur une programmation contradictoire, et se rappeler que la contradiction n'autorise pas le choix, puisque le choix est l'ennemi du progrès : en effet, le choix limite le champ d'action à ce qui existe déjà, alors que le progrès consiste, justement, à faire exister ce qui n'existe pas encore.

Nous sommes donc condamnés à inventer. Mais rassurons-nous : notre société a besoin d'inventeurs pour créer son futur, qu'ils soient architectes ou ingénieurs. Ce constat est d'ailleurs relevé de plus en plus dans les revues spécialisées des deux corporations. Dans la revue *Ingénierie* de septembre dernier, Robert GERMINET notait que le rôle de l'ingénieur, aujourd'hui, est de répondre à une question qui ne lui a pas encore été posée, et qu'il doit être réactif et créatif. L'invention n'est donc pas le monopole des architectes, comme certaines caricatures le laisseraient

penser, de même que la rigueur n'est pas le monopole des ingénieurs, comme d'autres caricatures pourraient aussi le faire penser.

Pourtant, dans ce travail d'invention, il nous faut profiter de la distinction des deux professions. Schématiquement, on peut dire que la société actuelle charge les ingénieurs de concevoir et de mettre en place des procédés ou des systèmes de transformation, de communication, de distribution de fluides, de force ou d'énergie, ce que les Anglo-saxons appellent des « *process* ». Quant aux architectes, la société leur demande de composer autour de l'homme les espaces où il va vivre, avec son intellect et ses cinq sens. Des recouvrements existent donc entre les deux mondes, qui partagent par ailleurs le souci d'organiser la matière dans l'espace : les uns pour obtenir la réalisation d'un procédé ou d'un système – l'outil d'expression de l'ingénieur étant le schéma –, les autres pour accompagner l'activité humaine - l'outil d'expression étant alors l'esquisse. Les deux outils se sont forgés au cours du temps. Ces rôles que la société a confiés aux deux professions doivent être mis en regard d'une réflexion sur la façon dont ils peuvent travailler ensemble, afin d'éviter qu'ils se réfugient dans leurs caricatures, les uns chargés de la fonctionnalité et de la solidité, les autres de l'agrément et de la décoration.

Ces champs se recouvrent même lorsqu'on les applique aux domaines traditionnellement séparés de l'infrastructure (pour les ingénieurs) et des bâtiments (pour les architectes). L'infrastructure nécessaire pour accomplir le *process* de déplacement, par exemple, est aussi un espace habité. Nous le verrons sans doute tout à l'heure quand nous entendrons parler de la vie sur les autoroutes. Le bâtiment, qui est conçu comme le cadre de l'activité humaine, est aussi un ensemble de réseaux aménagés pour innover la matière et permettre d'accomplir les fonctions des personnes qui y vivent.

III. La gare, illustration de la complémentarité des deux univers

La gare est une parfaite illustration de ce propos. C'est une sorte de carrefour d'infrastructures habitées, ou plutôt un bâtiment traversé d'infrastructures. Cette réalité « gare » n'échappe donc pas à une définition contradictoire.

Pour nous, la gare a été le lieu par excellence de démonstration que la simple juxtaposition des interventions conduit à l'échec. Nous avons eu l'occasion de réparer des espaces qui étaient des enchevêtrements de tuyaux appelés « couloirs »

consentis amener les gens d'un transport à l'autre, mais qui étaient devenus de véritables dédales, dans lesquels même Ariane n'arriverait pas à retrouver son bien-aimé. Je pense notamment à la Gare du Nord : la SNCF a pris conscience de la nécessité d'intervenir sur ce pôle d'échange le jour où elle s'est aperçue que les gens n'arrivaient même plus à prendre leur train ! A l'inverse, nous sommes intervenus sur des espaces qui avaient été conçus purement par des architectes. - je pense notamment à la gare Montparnasse - à un moment où plus personne ne croyait au train : les fresques des plus grands artistes n'arrivaient pas à masquer les dysfonctionnements de cette gare. Des corrections étaient donc nécessaires. Finalement, la société n'a pas besoin de cerveaux ne fonctionnant qu'à moitié. On voudrait nous faire croire qu'il faut des hommes pour s'occuper du raisonnement, et d'autres pour s'occuper du sentiment. Mais les deux sont des hommes comme tout un chacun et doivent, comme tout le monde, travailler dans une démarche d'interdisciplinarité. Cette démarche, pour être durable, doit être intégrée. Pour revenir à notre débat, le fonctionnement doit être inscrit dans la composition spatiale. Cela est vrai en matière de structures, comme en matière énergétique : les apports solaires, les inerties thermiques, la ventilation sont intégrés dans la conception spatiale du bâtiment, pour économiser l'énergie... Une bonne construction vaut mieux que la somme des parties. Autrement dit, une bonne construction est une construction intégrant l'action des différents spécialistes.

IV. Deux axes de progrès pour l'avenir

En conclusion, on peut identifier deux axes majeurs de progrès pour l'avenir.

- **un progrès dans la démarche de projet**

Seul le projet peut constituer une sorte de champ magnétique permettant aux diverses interventions et à la multitude d'acteurs d'œuvrer dans un sens commun et par intégration. Nous avons considérablement avancé sur le management de projet au cours des trente dernières années, mais nous devons accentuer ces efforts. Dans le numéro de septembre de la revue *Ingénierie*, Jean Félix souligne en effet que « les acteurs de la construction doivent passer de l'ouvrage imaginé par un client à son véritable projet ». Le client a une commande contradictoire, qu'il faut transformer en projet. Il ajoute que « c'est un changement en profondeur, qui implique une réorganisation assez complète de la maîtrise d'œuvre ».

- **une avancée dans la démarche de reconstitution d'une culture commune aux bâtisseurs et aux concepteurs**

Il est temps maintenant de se retrouver dans une démarche que j'appellerais de mes vœux comme quasiment « fusionnelle » : que l'on refonde une culture à deux, une culture du même rapport au réel – notamment à partir des enseignements de la science moderne -, une culture de la gestion de la complexité, de l'incertain et du flou, une culture du projet bien sûr, mais aussi de l'humain et du fonctionnement de la société. Mais c'est un autre débat, qui nécessite plus que les quinze minutes qui m'ont été imparties.

Jean FREBAULT

Merci de nous avoir proposé cette vision que je qualifierais de « prospective », cet appel à la culture commune qui va plus loin que la culture croisée, même si on voit bien que le croisement de ces deux champs professionnels repose sur des visions distinctes.

PAYSAGE ET INFRASTRUCTURES

Bernard LASSUS, *architecte-paysagiste et plasticien*

Nous venons d'entendre un exposé que j'ai beaucoup apprécié, et dans lequel un certain nombre des termes utilisés me paraissent centraux. Je pense en particulier à la question de la rigueur, qui semble diviser les deux professions.

En quoi les deux professions travaillent-elles avec une rigueur différente ? Ces rigueurs ne sont pas semblables parce que dans le domaine du sensible, nous nourrissons l'inconscient alors que l'ingénieur fonde sa réflexion sur le conscient. Le domaine « artistique » - et je m'excuse d'utiliser ce terme - nourrit l'inconscient, avec pour ambition que cet inconscient fournisse une solution. Dans ce domaine, la rigueur est antérieure au projet, et cela est à l'origine d'une grande incompréhension car elle ne se révèle pas dans le même temps que le temps de l'ingénieur. Je ne développerai pas plus avant cette question mais il était fondamental de faire cette observation. Dans la démarche artistique, l'inconscient aborde directement les résultats. Il produit une solution qui a l'air non réfléchi.

Quant à la problématique de l'inter-disciplinarité, je partage entièrement l'analyse de Jean-Marie DUTHILLEUL. Je pense en effet que l'interdisciplinarité est consubstantielle à nos deux professions. Le viaduc de Millau, projet auquel j'ai participé, au même titre que certains d'entre vous ici présents - en particulier Jean-François COSTE - en est une parfaite illustration. Ce projet au long cours (une quinzaine d'années) n'a pu voir le jour que grâce à ces interactions entre différentes disciplines, depuis la conception jusqu'à la réalisation. Je dois dire que tout ceci s'est inscrit dans un cadre de collaboration passionnante, nourri de surcroît par les apports d'expertises étrangères.

Qu'est-ce qu'un paysage ? Ce terme, qui est aujourd'hui vulgarisé, banalisé, désigne un regard élargi sur ce qui nous entoure. Beaucoup pensent que le paysage est une identification d'un ensemble d'objets. En réalité, le paysage c'est un regard sur un ensemble d'objets : le petit Chaperon rouge ne pose pas le même regard que le menuisier sur la forêt, le menuisier voit des tables, le Chaperon rouge, lui, voit le loup. C'est ainsi que notre culture conditionne notre regard. Le paysage est un choix que nous donne notre culture. Autrement dit, notre culture nous donne une grille de lecture du réel, ou d'un certain réel.

Il s'agit donc de répondre à un problème multiculturel. Le viaduc de Millau a su réaliser cette combinaison, en apportant une autre dimension à l'aménagement autoroutier, conformément à la demande du ministère de l'Équipement. Cette ambition a été engagée par Jean BERTHIER, par Christian LEYRIT, qui y a apporté une volonté tout à fait particulière, ainsi que par Patrick GANDIL et Patrice PARISE actuellement.

Je vais projeter quelques images de réalisations, qui diront plus que des mots. *Bernard LASSUS commente une série de diapositives illustrant la manière dont des réalisations peuvent suggérer de nouveaux paysages, tout en respectant les exigences de solidité et de durabilité des infrastructures, mais également des impératifs de fonctionnalité pour répondre aux attentes des usagers.*

L'aire de Crazannes, située sur l'A837, à 9 kilomètres de Saintes, a été située à proximité d'anciennes carrières pour permettre aux usagers de s'arrêter - ce qui est certes la fonction initiale de l'aire - mais aussi pour qu'ils puissent les visiter. Le président des Autoroutes du Sud de la France avait accepté qu'on creuse dans les talus, avant et après l'aire, sur 2,5 km, ce qui a permis de mettre à jour des rochers. Je précise, à cet égard, qu'il s'instaure un véritable troc entre les différentes parties. Au lieu d'avoir une route enfermée entre deux talus, en fonction d'un relief qui aurait été découpé par des plans précis et automatiques, nous avons découvert une partie des anciennes carrières, qui avaient été ensevelies et qui dataient pour certaines de l'époque romaine. C'est ainsi que m'est venue l'idée de créer des poches de visibilité latérale pour donner toute sa place au paysage extérieur et établir une discontinuité sur les bords de la voie.

Je rappelle que sur les autoroutes, nous sommes dans un système cinétique : il est donc nécessaire d'introduire une lisibilité de l'extérieur en fonction de la vitesse du véhicule. On oublie trop souvent que le passager est au premier rang pour admirer le paysage. D'où la nécessité de l'étudier en fonction d'une perception cinétique, et non pas d'une perception classique.

Le résultat final de ce terrassement donne des poches visuelles succédant à des rochers, ceci dans un rythme qui permet à la « visualité » de s'exercer. Contrairement aux idées reçues, l'œil fonctionne par fraction, et non pas de manière continue. Par conséquent, nous pouvons isoler des présences beaucoup plus petites qu'on ne le pense, même en roulant à vive allure.

Cette réalisation de Crazannes, qui a reçu un « Ruban d'or » de la direction des Routes, nous a permis de montrer aux entreprises de travaux publics qu'il était possible d'obtenir des résultats très satisfaisants à des coûts raisonnables. Nous avons même pu les interpellier sur le problème des terrassements en explorant le rapport déblais/remblais. Au plan pratique, nous avons tenté de passer du talus classique à la courbe de niveau : nous avons repris les courbes de niveau du terrain naturel pour atténuer les talus. On a donc l'impression que la route passe dans un endroit tel qu'il a toujours été. D'ailleurs, pour la petite histoire, nombreux sont ceux qui pensent que nous avons tracé la route, à cet endroit, parce qu'il y avait déjà un vallon, sans penser que nous avons dû faire une blessure. Je pense que l'autoroute doit « passer » et non « traverser ».

La diapositive suivante vous permet de voir les différents types de terrassements que nous étudions pour chaque projet. Nous réalisons des maquettes courbe par courbe lorsque c'est nécessaire.

Dans l'exemple suivant, nous avons pris des emprises supplémentaires pour que le talus ait une pente plus douce, ce qui nous a permis de faire un lien avec la forêt latérale. Dans un premier temps, nous avons planté des arbres, mais de façon non symétrique à la voie, pour atténuer l'effet de blessure. Les lisières, aujourd'hui, sont intégrées dans l'emprise mais ne sont pas parallèles à la voie.

Sur un autre chantier, nous avons appliqué des solutions nouvelles de terrassement pour assurer la jonction de deux voies (une gare de péage et un échangeur). Cela portait sur des centaines de milliers de mètres cubes. Il s'est agi, là aussi, de restituer un lieu au relief le plus naturel possible.

Vous me direz que ce souci est contradictoire avec l'intérêt du paysagiste. En effet, plus le lieu est restitué en son isotropie naturelle, plus on peut avoir l'impression que nous n'y avons pas travaillé ! Cela pose d'ailleurs problème pour nos honoraires !

Sur ce chantier situé à l'entrée du Mans, sur l'A28, nous avons obtenu qu'on puisse avoir une vue large sur la silhouette de la ville du Mans. Cependant, les entreprises voulaient disposer d'un dépôt de 60 000 mètres cubes à cet endroit précis. Puisqu'il était trop onéreux de déplacer ensuite cette masse de matériaux, nous avons choisi d'élever une pyramide légèrement désaxée offrant successivement une vue de la

cathédrale du Mans, éloignée de 6 kilomètres du site, puis son effacement et sa réapparition derrière la pyramide en ponctuation de la silhouette de la ville. Nous avons ainsi résolu le problème du dépôt en créant une entrée de ville paysagée. Par ailleurs, à ma demande, une vue a été ouverte à un autre endroit de l'A28, révélant ainsi un des plus beaux villages de la région. Nous avons enlevé 50 000 mètres cubes de façon à révéler cette vue.

L'aménagement paysager participe aussi de la sécurité d'un parcours, notamment en créant un rythme de « bruits » visuels de manière à éviter l'endormissement. Nous venons d'en voir un exemple à Crazannes. Cette démarche a fait l'objet d'un projet spécifique que j'ai proposé à Patrick GANDIL, qui l'a accepté pour une expérimentation dans le département de Charente-Maritime.

Sur un autre chantier, celui de l'aire de Nîmes-Caissargues, nous avons expérimenté le rôle de l'aire comme introduction de l'autoroute au pays. Le Maire de Nîmes, Monsieur Bousquet, nous avait gracieusement offert un monument historique, les colonnes du vieux théâtre de la ville, et nous avons par ailleurs installé deux belvédères - dont la silhouette évoque la Tour Magne - d'où l'on peut découvrir la ville de Nîmes. Il a d'ailleurs été nécessaire de réaliser l'aire en entier avant de reconstituer le monument historique (nous n'aurions pas pu le faire après cette reconstitution, puisque toute l'aire est à moins de 500 mètres). Les aires ne sont plus liées à la voie mais deviennent des lieux intermédiaires entre la route et le pays. Dans cet esprit, j'ai installé une petite maquette en pierre taillée de la tour Magne dans les belvédères, de façon à inviter les visiteurs à se rendre dans le pays et le découvrir. Comme je l'ai déjà évoqué, il convient d'inciter les conducteurs à s'arrêter sur les aires et, à partir de ce qu'ils y découvrent, à aller découvrir les pays riverains.

Il est primordial d'aménager les aires d'arrêt sur les autoroutes tant au plan de la sécurité que dans le but d'aider à comprendre le pays et à découvrir la France. Nous avons beaucoup parlé de la qualité des ouvrages d'art ce matin. Je regrette que cette dénomination ne s'applique pas à la route tout entière !

Jean FREBAULT

Je vous remercie de ce message de pédagogie, que véhiculaient très fortement les images de chantiers que vous avez commentées. Ainsi que vous l'avez montré, l'art du paysage est une composante structurelle de la conception des infrastructures et de leur lien avec le territoire. Il fait partie intégrante de l'art de l'ingénieur, tel que l'a défini ce matin Jean-Pierre GIBLIN.

L'INGÉNIEUR AU SERVICE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

Dominique BIDOU, ingénieur, membre de la section
« Aménagement et environnement » du CGCP,
président de l'Association pour la Haute Qualité Environnementale (HQE)

De prime abord, on est tenté de penser qu'il est aisé de croiser les cultures en intégrant les trois dimensions du développement durable. Mais ne cédon pas à une telle facilité, d'autant plus que ces trois dimensions doivent être mises en application simultanément au sein d'un même projet.

I. La terre dans une optique de développement durable : un système intégré aux effets collatéraux

Parlant du développement durable, Bertrand de JOUVENEL, un des précurseurs de la pensée en ce domaine, disait ceci : « *Nous n'habitons plus la même terre que celle de nos aïeux : la leur était immense, la nôtre est petite* ». Cette phrase très simple résume à elle seule l'évolution que nous devons prendre en charge aujourd'hui. Jusqu'à une certaine époque, nous considérions que le monde était infini, avec des ressources stockées, qu'il fallait extraire chez soi ou sur d'autres territoires. Par conséquent, le monde était vu comme une aire de facilité, sans se soucier de ce qu'on appelle aujourd'hui les « effets collatéraux ». Aujourd'hui, on a pris conscience que les ressources sont limitées – avec des rythmes d'épuisement variables –, que le monde est fini. D'où la nécessité d'exploiter de manière efficace les ressources dont nous disposons. Le développement durable, en ce sens, est la recherche de la performance, non pas dans son acception « technique » (augmenter les rendements, sans avoir une vision claire des besoins à satisfaire), mais dans une vision d'efficacité (augmenter les rendements en fonction du service rendu). D'ailleurs, je note une évolution dans le vocabulaire usité pour les routes : on parle désormais de « services routiers », ce terme reflétant une évolution de fond tout à fait significative.

Le développement durable suppose également d'être performant avec l'espace, qui est devenu une denrée rare (la notion de « couloir rhodanien », par exemple,

en témoigne). Désormais, il faut gérer l'espace avec parcimonie. Par ailleurs, dans la démarche du développement durable, le terme « intégration » est tout à fait central. Dorénavant, il faut jouer sur la complémentarité entre les effets. Jusqu'à une certaine période, on déclarait une route d'utilité publique si elle était une bonne route, sans se soucier des effets secondaires. Puis on s'est aperçu, grâce à un arrêt du Conseil d'Etat en 1971, qu'un projet routier pouvait détruire le parc d'un hôpital psychiatrique, faisant ainsi émerger la notion d'effet secondaire négatif. On a alors commencé à analyser un « système » dans ses différentes dimensions, que jusqu'alors on gérait indépendamment l'une de l'autre. Cette approche méthodologique par les composantes était d'ailleurs génératrice de contradictions. Par exemple, et nous l'avons vu avec le propos de Bernard Lassus, on est amené à gérer des oppositions entre l'élargissement des vues, d'une part, et la perméabilité aux décibels, d'autre part. Cette évolution est donc fondamentale.

II. Le développement durable, ou l'art de sortir des contradictions par le haut

Le développement durable, en ce sens, consiste à sortir des contradictions par le haut, à les dépasser. Pour un ingénieur, c'est un formidable défi, qui vaut la peine de se transcender !

Je voudrais illustrer mon propos par deux exemples, pour montrer comment l'ingénieur a été amené à élargir ses domaines de compétence et sa manière de travailler.

Le premier exemple est celui de l'ingénieur en charge de la gestion des déchets ménagers dans les villes. Il y a encore peu de temps, cette gestion se résumait à la logistique, aux circuits des camions. Aujourd'hui, on pénètre dans la vie des usagers, on s'intéresse à la manière dont les déchets sont constitués, à l'aménagement des cuisines et des locaux dans les immeubles, on s'interroge sur les évolutions de notre société de consommation... En remontant une filière dans son intégralité, on prend conscience que les déchets représentent, au final, une maille d'un cycle. On prend conscience de la nécessité d'étudier le cycle dans son ensemble, d'intégrer des dimensions sociologiques, économiques, industrielles, environnementales, etc. L'ingénieur des déchets, aujourd'hui, doit apprendre à gérer des systèmes complexes, à intégrer ces différentes dimensions dans son projet, y compris celles qui échappent à sa maîtrise. Nous sommes là au cœur de la notion de « management » ou de

« conduite de projet ». En outre, l'ingénieur d'aujourd'hui doit apprendre à gérer les hommes différemment, à les fédérer sur un projet commun et partagé, alors qu'ils viennent d'horizons et de cultures différentes.

Le deuxième exemple met en scène les routes. Souvenez-vous du programme « Voies et villes », qui date d'il y a quinze ans. Au lieu de gérer un projet routier de contournement d'une route, on gérait simultanément l'aménagement du centre-ville et la déviation, de façon à ne pas perdre une occasion unique de travailler aussi sur le centre. Ce programme a bien marché, et j'espère que cette façon de faire est entrée dans les mœurs aujourd'hui. Mais il faut savoir que conduire des projets ainsi n'est guère aisé : les budgets sont distincts, les autorités sont différentes, de même que les rythmes des décisions politiques, il faut également tenir compte des échéances électorales, etc.

Le développement durable, c'est la reconnaissance de la complexité de la vie. Il faut inverser la tendance traditionnelle à la simplification, et par suite à la réduction, et adopter une nouvelle attitude : savoir naviguer dans la complexité, et en exploiter les richesses. Un bon défi pour l'ingénieur !

Je conclurai mon propos par une citation de Paul Valéry, qui avait tendance à réagir vivement lorsqu'on opposait sensibilité et intelligence. Pour lui, *la sensibilité est le moteur de l'intelligence*. Cette citation illustre parfaitement, à mon sens, ce thème des cultures croisées.

Jean FREBAULT

Merci, Dominique BIDOU, d'avoir ouvert le débat sur le développement durable et d'avoir utilisé un langage qui, je crois, nous parle à tous et qui appellerait sans doute de nombreuses interrogations. Nous allons maintenant avoir une table ronde sur ces problématiques des cultures croisées.

TABLE RONDE

Participaient à cette table ronde, animée par **Jean FREBAULT** :

André BROTO, *directeur de la construction, Cofiroute*

Robert MAUD, *directeur départemental de l'Équipement de l'Indre*

François PROCHASSON, *membre de l'association 4D*

Bertrand FABRE

Une façon de lancer le débat est de réagir à quelques points des exposés et des témoignages que nous venons d'entendre. Je crois que c'est Bernard LASSUS qui, à un moment donné, a dit que le paysage est un regard, mais que c'est aussi un troc. Comment se passe concrètement ce « troc » ?

Par ailleurs, Bernard LASSUS s'est plus ou moins excusé d'utiliser le qualificatif « artistique » pour parler de l'architecture. Le terme « artistique » est-il un gros mot, Bernard LASSUS ?

Jean-Marie DUTHILLEUL a considéré que le progrès devait s'opérer en l'absence de choix, car le choix bloque le *process*. Je me rappelle que lorsque j'étais enfant, je pressais mon père d'acheter un poste de télévision. Il nous répliquait toujours qu'il en achèterait une lorsqu'il y aurait deux chaînes (à l'époque, il n'y avait qu'une chaîne, en noir et blanc). Cinq ans plus tard, la télévision proposa deux chaînes. Mon père nous a alors répondu qu'il achèterait un poste quand la télévision serait en couleur. Cinq ans plus tard, la télévision en couleur envahissait les foyers. Mais là encore, mon père nous a répondu qu'il n'en ferait l'acquisition que lorsqu'on lui proposerait 18 chaînes, des chaînes numériques, des chaînes câblées payantes... Aujourd'hui, je gagne ma vie et je me suis acheté un poste de télévision. En revanche, je ne peux pas échanger avec mes camarades d'enfance des blagues codées sur les Shadocks ou autres icônes du petit écran d'antan. On n'en meurt pas, mais en l'occurrence, le progrès a été de ne pas choisir, et je n'ai pas eu le sentiment d'avoir vécu un grand progrès là-dessus ; par contre, de progresser quand j'ai pu enfin m'acheter une petite télévision...

Avant-dernière chose : je crois que c'est Bernard LASSUS qui a dit, à un moment donné, que « l'autoroute, c'est la France, et la France, c'est l'autoroute ». Ces propos sont récurrents dans l'enceinte de certains clubs, mais il faut savoir qu'il existe par ailleurs des voies ferrées, des avions, des bicyclettes...

Dominique BIDOU a développé le concept de développement durable. Si j'ai bien compris, le développement durable est le développement qui s'opère sans compromettre le développement des générations futures, avec ses trois volets économique, social et citoyen, et enfin écologique. Le développement durable est-il encore possible en France ? Ou au contraire, n'avons-nous pas raté ce rendez-vous, notamment lorsqu'on sait que l'endettement public de l'Hexagone a franchi, il y a trois mois, la barre des 1000 milliards d'euros ? Cela signifie que nos enfants devront travailler quelques semaines pour payer les impôts, mais également quelques semaines pour rembourser les intérêts de la dette, plus quelques mois pour rembourser le principal... Ce n'est qu'alors que nous pourrions envisager de construire ou de nous développer sans provoquer ces « dommages collatéraux » dont parlait Dominique BIDOU.

Voilà, en substance, mes réactions (peut-être provocatrices) aux différents propos qui ont été tenus.

Jean FREBAULT

Je propose que nous cédions la parole à André Broto, qui nous livrera brièvement lui aussi ses réactions à ce qu'il a pu entendre jusque-là, qu'elles soient en convergence ou en désaccord avec les positions des intervenants. André BROTO est directeur de la construction à Cofiroute.

Je présume, André BROTO, que vous êtes tout particulièrement concerné par ce que nous avons entendu. Comment réagissez-vous ?

André BROTO, *directeur de la construction, Cofiroute*

Modestement, Monsieur le Président, au niveau du terrain. Après une dizaine d'années de maîtrise d'ouvrage, j'ai pu acquérir une ou deux certitudes, mais de nombreuses interrogations demeurent dans mon esprit.

Ma première certitude est que pour être à l'écoute des nouvelles problématiques, il faut travailler par petites équipes de projet, de quatre à cinq personnes. Dès qu'un sujet s'inscrit dans un cadre réglementaire rodé et un corpus technique, nous le sous-traitons, afin d'être à l'écoute des nouvelles problématiques.

Ma deuxième certitude est que la clé d'entrée, aujourd'hui, se fait par les risques. Dans les années 80, on a vu émerger les problématiques de l'eau, et depuis on a une « boîte à outils », un cadre réglementaire rodé. Dans les années 90, on a vu émerger une nouvelle attente sociale ou culturelle, le paysage. Nous avons mis au point, d'ailleurs avec Bernard Lassus, une véritable trousse à outils. Plus récemment,

les thèmes de la biodiversité et de la sécurité dans les tunnels ont émergé comme des enjeux majeurs.

Comme je l'ai indiqué en introduction de mon propos, je me pose encore un certain nombre d'interrogations. Tout d'abord, et je rejoins en cela l'analyse de Bertrand FABRE, quels sont les processus de régulation ? Actuellement, nous construisons deux viaducs. Au titre de la loi sur l'eau, et compte tenu de l'ouverture hydraulique demandée à la suite d'études de remous pour la crue centennale, ces viaducs ont finalement une longueur quatre fois supérieure aux viaducs des routes ou voies ferrées situées à l'amont et à l'aval. Comme tout ça c'est un problème de baignoire et de bonde, on peut s'interroger sur les raisons pour lesquelles il faut là quatre fois plus de largeur de bonde qu'à l'amont ou à l'aval. Est-ce une allocation optimale des ressources ?

Deuxième interrogation sur les processus de régulation, le scarabée. Nous avons construit 70 kilomètres d'autoroute, que nous avons mis en service. L'autoroute s'arrêtait dans un petit lieu-dit en plein milieu de la Sarthe. Pendant sept ans, on a été confrontés à une problématique nouvelle, la biodiversité, pour laquelle, pour tenir compte d'une espèce de scarabées ayant élu domicile dans cette région, nous avons eu à travailler avec une nouvelle famille d'acteurs : les entomologistes et le Muséum national d'Histoire naturelle. Les études réalisées pendant cette période ont représenté un coût direct (pour Cofiroute) de près de 1,6 million d'euros. Par ailleurs, il faut savoir que sur la RN 138, il y a tous les ans entre 5 et 10 morts, en raison de l'insécurité routière dans les traversées d'agglomérations. Nous avons d'un côté un projet déclaré d'utilité publique et, de l'autre, un problème de biodiversité - et nous ne regrettons pas du tout ce que nous avons fait en matière d'études et de mesures pour améliorer la biodiversité de ce sympathique coléoptère. Ce qui est quand même étonnant, c'est que l'arsenal juridique n'ait pas permis de concilier l'utilité publique et la préservation de la biodiversité dans des délais plus courts.

Je voudrais à présent interpeller le CGPC sur le paysage. Pourquoi parlons-nous « du territoire » d'une autoroute, d'aménagement « du territoire » et non pas « des territoires » ? A Cofiroute, nous considérons qu'il y a autant de territoires qu'il y a de lieux de vie, donc de villages. L'A28 traverse 54 communes dans la Sarthe, soit 54 lieux de vie. Que ce soit dans le cadre de la politique « paysage » que nous menons avec Bernard Lassus dans les emprises, ou à l'extérieur au titre du 1 % paysage, chaque fois que nous avons à choisir entre un geste monumental fort tous les 50 kilomètres ou des actions plus modestes au niveau de chaque

commune, nous retenons sans hésitation la deuxième option, au risque de voir arriver des critiques du type « saupoudrage ».

Donc deux questions : où se situent les processus de régulation, à propos de l'endettement des sociétés - ou de la société ? et pourquoi « du territoire » et pas « des territoires » ?

Jean FREBAULT

Je pense qu'il faudra qu'on invite André BROTO aux débats du « pôle paysage » du CGPC !...

Robert MAUD fait partie de ce petit groupe de DDE qui semblent en avance dans le combat pour le développement durable. J'ai le sentiment actuellement que cet engagement est contagieux puisque de plus en plus de DDE s'approprient cette question. C'est d'autant plus intéressant que Robert Maud est dans un département rural, l'Indre et qu'il y a organisé récemment un colloque international sur le développement durable, qui a pour le moins marqué les esprits ! Il est donc intéressant de savoir comment il se situe dans le mouvement dont on vient de parler.

Robert MAUD, directeur départemental de l'Équipement de l'Indre

L'Indre est en effet un département rural, bien que nous soyons, à Châteauroux, la deuxième ville de France à avoir signé un programme national de rénovation urbaine. Je suis DDE donc je ne suis plus ingénieur, je ne fais plus ce métier-là. Cela va me permettre de vous interpeller un peu tous sur ce que j'entends depuis ce matin. Ce que j'entends, au fond, c'est que nous savons faire le bilan, nous techniciens, sur ce que nous avons fait jusqu'au seuil du 21^{ème} siècle. Mais pour moi DDE - donc non ingénieur - il manque dans la discussion un partenaire important, les maîtres d'ouvrage, et ça me pose problème aujourd'hui.

En effet, quand on regarde l'histoire on voit que jusqu'à une certaine période, nous avons pour habitude de travailler dans le cadre d'une production sectorielle, parce que les commandes étaient de nature sectorielle. Pour cela, nous avons un accord objectif avec les maîtres d'ouvrages sur ce qui devait être réalisé. Et puis, dans les années 60, ont émergé les notions de planification et de coordination, les villes nouvelles, etc. Cela n'a pas fait débat non plus car on pouvait continuer de maîtriser à peu près l'ensemble du processus : on définissait les fonctionnalités, on construisait ensuite l'objet.

Mais aujourd'hui, en tant que DDE, je suis confronté à des problèmes d'une autre

nature : les maîtres d'ouvrage se sont multipliés, et ce faisant, nos rapports avec eux peuvent devenir un peu plus conflictuels. On entend parler, par exemple, de lutte contre l'étalement urbain. C'est un vocabulaire fort, on commence à avoir une espèce de discours de guerre, parce que naturellement les maîtres d'ouvrage concernés, y compris la société, sont pour l'étalement urbain. Et je pourrais citer d'autres exemples de cette nature.

Nous avons donc à gérer un certain nombre de contradictions, celles qui sont liées aux divers intervenants, ingénieurs, architectes, sociologues, économistes, ... et puis maintenant il y a des volontés, celles des maîtrises d'ouvrage, qui vont souvent à l'encontre de ce qui est raisonnable. Nous devons gérer ces contradictions au quotidien, et ce n'est pas aisé.

Vis à vis des maîtres d'ouvrage, il nous faut sans doute trouver un système de valeurs refondé. C'est la raison pour laquelle j'ai milité, au sein de mon département, pour qu'on appréhende le développement durable comme un système fondateur de valeurs dans nos discussions avec les maîtres d'ouvrage et les techniciens. J'ajoute que le développement durable, dans ses trois dimensions, permet aussi un dialogue interne, social, de tout premier ordre puisqu'il n'y a plus de différences entre les « cols bleus », les « cols blancs », entre un administratif et un technicien.

Par contre, ce dialogue sur le développement durable, avec ses trois dimensions, nous pose un énorme problème, à nous DDE : dans ces trois dimensions c'est sur le développement économique, ce qui intéresse le plus les maîtres d'ouvrage, que nous sommes le moins compétents. Aujourd'hui nous manquons dramatiquement de compétences et même d'appréhension un peu scientifique de ce qu'est le développement économique, puisque pendant des années on a vendu le fait qu'il suffisait de faire des zones industrielles – on ne nous le demande jamais plus – et des routes, pour que le territoire se développe... Discours démenti par la réalité et on se retrouve aujourd'hui devant un système, avec des nouveaux emplois et des phénomènes économiques, très compliqué. Et en fait le problème c'est qu'on doit se muscler – et faire là aussi pas mal de transversalité – sur ce discours-là pour aborder d'autres sujets, par exemple l'environnement, le paysage, la cohésion sociale.

Deuxième chose : il faut qu'on ait une méthode. On ne peut pas parler des territoires comme ça, il faut qu'on les clarifie, il faut qu'on sache quand on peut parler de « territoire à enjeux », à quel niveau (pour l'Etat, ou la région, le département), comment il fonctionne, s'il est systémique ou pas, et ce qu'on peut faire avec, ce

qu'on peut lui faire dire.... Et pour cela il est intéressant de mettre autour de la table (déjà à Toulouse, lorsque j'étais l'adjoint de Bertrand LEVY, j'avais opté pour une telle démarche) quantité de cultures diverses, y compris des chercheurs et des universitaires, qui nous apportent beaucoup.

Si nous faisons cela, il faut que nous ayons une méthode d'appréhension des territoires; il faut aussi que nous soyons capables de faire de la transversalité en interne, au sein de l'Etat. C'est tout le problème de l'organisation des PASED, ces programmes d'action stratégique menés dans le cadre départemental. En effet si dans une réunion nous sommes plus nombreux que les élus, ça pose problème, surtout si on rajoute d'autres cultures, d'autres corps de métier ! Il faut donc une organisation en interne, ça bouleverse beaucoup d'habitudes, il faut qu'il y ait des gens qui se déclarent incompétents, il faut qu'ils puissent faire appel à des compétences, il faut qu'on puisse effectivement « faire sens ». Par exemple à Châteauroux, agglomération de 75 000 habitants avec 600 étudiants, on va peut-être créer, avec des universitaires de Paris, d'Orléans, etc. un petit groupe d'échanges pour aborder des problèmes comme la manière de prévenir la multiplication des étangs dans le Parc régional de la Brenne, qui est un écosystème remarquable. Naturellement la réaction de l'administration avait été de dire « on va régler cela par des mesures réglementaires ». Mais bien sûr ce n'est pas le bon moyen : il va falloir passer par de la pédagogie, et mettre beaucoup de compétence autour de cela...

Pour terminer, je voudrais dire que la question qui se trouve posée dans le cadre de notre action, c'est « comment est défini l'intérêt général ? » Avant, c'était simple, l'intérêt général était défini par l'Etat, qui en était garant ; si l'Etat avait décidé que telle infrastructure faisait partie de l'intérêt général, il la construisait ! Aujourd'hui l'intérêt général se construit en collaboration avec les porteurs d'intérêt public. Et ce qu'on n'a pas réussi à faire jusqu'à présent, mais qu'on est en train d'essayer de faire - c'est très compliqué – c'est comment mettre en place des instances de gouvernance qui permettent aux porteurs d'intérêt public de se rencontrer sans enjeux de pouvoir, comment faire émerger des projets « supra-pays », « supra-territoires », qui fassent sens et qui soient portés par l'ensemble des acteurs publics ? La solution de ce délicat problème me semble être la clé de notre évolution, et sans doute aussi de notre « transversalité ».

En conclusion, je dirais que l'art de l'ingénieur au 21^{ème} siècle, les transversalités, ce n'est plus nous qui les maîtrisons : **on nous les demande**. C'est le pouvoir politique qui nous les demande, qu'il soit local ou national.

Jean FREBAULT

Je vous remercie d'avoir tracé quelques repères, à mon avis structurants, sur l'avenir des services de l'Etat. Je donne à présent la parole à François PROCHASSON, qui est également ingénieur mais dont le parcours est structuré à la fois par une activité au sein d'une collectivité locale et par un militantisme au sein d'une association de promotion du développement durable. Présidée par Michel MOUSEL, l'Association 4D a été créée dans la foulée du Sommet de la terre de Rio. Comment ce débat entre ingénieurs, architectes, paysagistes et autres acteurs sur l'enjeu du développement durable est-il perçu par le milieu associatif ?

François PROCHASSON, *membre de l'association 4D*

Cela nous apparaît sans doute moins idyllique qu'il ne paraît à vous écouter. Je n'étais pas là ce matin, mais j'ai entendu cet après-midi des projets passionnants et des opérations réussies, qui matérialisent l'espoir que cette culture croisée est en train de se construire. Je rebondis sur la question « avons-nous raté le coche du développement durable ? » Nous, militants, sommes évidemment très inquiets de l'avenir. Mais si nous militons, c'est parce que nous sommes confiants quant à l'aboutissement de notre action.

Dans une certaine mesure, nous avons peut-être manqué le rendez-vous du développement durable. Si on dépasse le cadre micro, celui de la réussite par exemple d'une intégration paysagère, si on regarde la réalité du cloisonnement des structures institutionnelles (tant à l'échelle des structures centralisées comme le ministère de l'équipement qu'au niveau des collectivités territoriales), je crois que personne ne peut se poser en faiseur de morale. Les institutions européennes ne sont pas épargnées par ce phénomène de cloisonnement que nous déplorons. Comment peut-on faire du développement durable dans un cadre aussi cloisonné ? Evidemment, il faut faire des choix, trancher. Les associations, en la matière, n'hésitent pas à dénoncer les mauvais choix. Mais je crois qu'il est temps de renverser la tendance et de débattre. C'est l'une des ambitions de notre association, dont la dénomination (4D) signifie « Dossiers et Débats pour le Développement Durable ».

Je voudrais par ailleurs rebondir sur certains points évoqués par nos intervenants. Je ne vais pas vous exposer la théorie du développement durable, car je crois que Dominique BIDOÛ, en quelques mots, vous en a donné la substance. Nous avons entendu parler de « systèmes » et de « complexité ». Ces deux éléments complexifient le cadre de la prise de décision, rendent difficile l'arbitrage, le choix.

Nous, les ingénieurs, nous vivons cependant dans une rationalité qui fait l'essence de notre travail, alors même que les choix ne sont pas des processus rationnels. D'où la nécessité de construire des cultures croisées à même de nous donner les clés d'une « sortie par le haut ».

Il faut sortir de cette complexité pour faire de la pédagogie. Le nom de notre association résume cette ambition. Nous voulons montrer qu'il est possible de conduire de « bons » projets, en respectant les dimensions sociales et économiques dont, il est vrai, les ingénieurs ne sont pas familiers. Je crois qu'il est possible de trouver des entrées dans la complexité qui aident à partager cette culture. J'ai également entendu parler d'interdisciplinarité et de multiculturalisme. Je préfère, pour ma part, utiliser le terme « interculturel », car c'est bien de l'interculturel que nous construisons, au même sens que la confrontation des sociétés qui, au fil de l'histoire, a construit la planète telle qu'elle est aujourd'hui, une planète d'échange et d'enrichissement. L'interculturalisme est, de ce point de vue, « la » réponse à cette culture croisée.

J'ai par ailleurs entendu parler de contradiction. C'est le cœur du débat.

Au sein de 4D, nous croyons à la nécessité de travailler plus que le paysage pour façonner le territoire. Le territoire, selon les géographes, est un lieu habité, ce que ne contient pas forcément le terme « paysage ». Pour nous, le territoire est un lieu commun et partagé. Un projet est conçu à l'échelle d'un territoire, avec des interactions à d'autres échelles. Le territoire est le premier sujet que les ingénieurs, les architectes, les sociologues et les économistes peuvent partager. Rassemblez ces cultures différentes autour d'une même table, faites-les s'exprimer sur le territoire où se construit leur projet : cet exercice est extrêmement riche puisqu'il est la preuve qu'il est possible de faire de la pédagogie dans un système complexe, d'aboutir à une lecture partagée d'un territoire. C'est la démarche que nous défendons au sein de 4D.

Un mot, pour finir, sur la question sociale et, derrière cette problématique, celle de l'aménagement pour l'utilisateur. J'ai suivi avec intérêt la construction des schémas de services. Cette vision sous l'angle de l'utilisateur est probablement la deuxième clé de sortie de la complexité. L'utilisateur (qui est évidemment divers) est bien celui qu'il faut mettre au cœur du projet que l'on construit. Cette approche permet de mettre en exergue les enjeux de la gouvernance (les bons choix aux bons niveaux) et de la démocratie participative (malgré ses écueils).

En résumé, le territoire et l'utilisateur sont probablement les raisons de notre optimisme quant aux progrès possibles dans la voie du développement durable.

Jean FREBAULT

Cette ouverture sur les territoires n'est pas pour me déplaire, et le couplet sur la démocratie participative m'offre une bonne transition avec la séquence suivante, qui sera animée par Georges MERCADAL. Nous avons néanmoins quelques minutes pour le débat.

Pierre DUFFAUT (Association Espace Souterrain)

Les intervenants ont souligné la nécessité de s'échapper des contradictions par le haut. Pourrions-nous nous en échapper par le bas, au sens premier du terme ? J'entends par là que les infrastructures souterraines porteraient sans doute moins atteinte au paysage et au territoire.

Bertrand FABRE

Cette proposition avait été avancée dans le cas des éoliennes, mais vous vous doutez bien que cela n'était pas possible ! Au-delà de la boutade, je pense qu'une telle option n'est pas toujours applicable.

Concernant la question de la définition de l'intérêt général et de l'utilité publique, l'exemple de Cofiroute montre que l'on peut être confronté au choc de deux intérêts généraux : l'infrastructure de transport d'une part, la préservation de la biodiversité au travers de cette espèce particulière de scarabées (que l'on appelle communément les « pique-prunes »), d'autre part.

Dans mon journal, d'ailleurs, nous avons rédigé un petit feuilleton inspiré de ce projet, que nous avons appelé « Le bestiaire des travaux publics ». Dans le premier épisode, nous relations l'épopée de ces pique-prunes qui avaient retardé de sept ans la construction d'une section d'autoroute dans la Sarthe. Le second épisode (il y en a eu dix) posait le problème du développement durable dans la conception d'infrastructures, avec l'exemple du puffin de Baillon. Ce petit cormoran, qui vit dans l'île de la Réunion, était menacé d'extinction. Un pont avait été projeté sur la Grande Ravine, avec un tablier peint en blanc pour faciliter la mise en lumière de la structure la nuit. Et puis ce projet a dû être modifié car on s'est aperçu à temps que si on le laissait ainsi on risquait de retrouver tous les matins au fond du ravin trois à quatre puffins de Baillon, qui auraient été attirés par la couleur blanche et les forces arrondies, et auraient confondu le tablier avec un calmar. Plus sérieusement, cet exemple illustre le problème de sécurisation juridique des projets de construction, qu'ils soient publics ou privés. Avec les abus de procédure – et certains poussent au crime –, on aboutit à des remises en cause, dont le pique-prunes a été une illustration paroxystique. Le ministre de l'équipement, qui

préside de droit le CGPC, lui a demandé un rapport sur la sécurisation juridique des autorisations de construire (au moins en matière de bâtiments). Ce rapport devrait être rendu début 2005.

Antoine GIVAUDAN

J'ai le sentiment, depuis ce matin, qu'on innove beaucoup dans le vocabulaire de l'ingénieur : on revisite, on refonde, on recompose, on donne du sens... Mais ce que je n'ai pas senti dans les propos qui ont été tenus, et malgré leur intérêt et leur contenu, c'est la dimension du temps nécessaire à la maturation d'une idée, d'une invention, d'un procédé. Or ce temps est nécessaire pour permettre à quelque chose de nouveau de s'incarner et de prospérer. Une graine n'est pas un arbre tout de suite. Or j'ai l'impression qu'on abandonne souvent ce qu'on a commencé et qui marche pas trop mal. J'y pense à propos de cette remarquable idée - citée tout à l'heure par quelqu'un - des programmes « Des routes plus sûres en milieu urbain », ou « Aménager la ville » : ils marchaient bien mais ont été abandonnés, peut-être simplement parce que ça faisait ringard... Je reste convaincu que la notion de temps, dans l'introduction des nouvelles façons d'agir est essentielle, et je pense que cette notion n'a pas suffisamment été mise en exergue.

Jean-Michel DOSSIER, *ministère de l'Industrie*

Je voudrais saluer le travail que Jean FREBAULT a réalisé sur la formation interprofessionnelle croisée, avec les Ateliers de l'Isle d'Abeau. Ce travail est précurseur. Le ministère de l'Industrie, en partenariat avec le ministère de l'Équipement et le Puca, soutient une démarche de collaboration entre les écoles d'ingénieurs, d'architectes, de commerce et de droit. Je voudrais également remercier François GODLEWSKI, André COLSON, la Drast ainsi que de nombreux ingénieurs ici présents, de leur aide dans la mise en place de cette collaboration interdisciplinaire.

La compréhension des logiques d'action des autres acteurs impliqués dans un projet, l'abandon des certitudes individuelles, la capacité à travailler ensemble sur des projets réels, ceux qui vont créer le patrimoine de nos enfants (et non pas sur les fumeuses identités territoriales !), sont primordiaux parce qu'il ne fait pas l'ombre d'un doute, aujourd'hui, que l'un des principaux défis pour le 21^{ème} siècle réside dans la promotion d'un cadre de travail collaboratif. Je voudrais l'affirmer haut et fort car ce mouvement devrait transformer profondément la culture de l'ingénieur et celle des autres formations professionnelles. Apprenons à travailler ensemble sur les projets et pas simplement sur les idées.

Michel ROUSSELOT

Dans la recherche du compromis et de la convergence des différentes approches, quelle sera la place, dans l'avenir, du calcul économique ? Cet outil, qui a servi à l'évaluation rationnelle avant et après la réalisation des projets, révèle certes des insuffisances et des faiblesses au regard des exigences du développement durable. Est-ce que la solution qui consiste à l'enrichir et ensuite à l'utiliser à bon escient est la bonne voie, ou est-ce qu'il faut le mettre à la poubelle ?

Jean-Pierre GIBLIN

L'intervention précédant celle de Michel ROUSSELOT rejoint la question que je voudrais poser sur la formation. Est-ce que tout ce qu'on a entendu cet après-midi renvoie ou non à un problème de formation des différents professionnels ? M'adressant aux intervenants, je voudrais leur demander s'ils ont le sentiment qu'il leur a manqué quelque chose pour pouvoir aller vers cette forme de culture croisée que nous souhaitons tous. Et, troisième sous-question : comment y aller ? Formation initiale, ou bien expérience sur le terrain, ou encore des initiatives comme celles des Ateliers de l'Isle d'Abeau ?

Charles LAVIGNE, *architecte spécialisé dans les ouvrages d'art*

Dans mon agence, qui compte quatre architectes, trois ont la double formation architecte et ingénieur. J'ai l'impression que de plus en plus de jeunes (dans notre agence, les trois ont autour de la trentaine) suivent ce double cursus, mais il faut savoir qu'un tel parcours est très difficile : en général, ils préparent le diplôme d'ingénieur puis s'orientent, par choix, vers une compétence d'architecte. Il faudrait peut-être promouvoir le double cursus intégré. D'ailleurs, toujours au sein de mon agence, il y a une architecte d'origine espagnole qui, elle, a suivi un cursus où elle a commencé par des études d'ingénieur au sein d'une école d'architecture, pour devenir architecte à la fin. De telles approches mériteraient sans doute d'être mises en œuvre en France, où la formation des architectes en matière de technique et de technologie est quand même un petit peu juste à l'heure actuelle.

Tri-Thien NGUYEN

Depuis ce matin, certains ont proposé de résoudre les contradictions par le haut, d'autres par le bas. L'art de l'ingénieur a profondément évolué au cours des dernières années, et a été marqué par des progrès très sensibles, en particulier dans les bâtiments des bases aériennes. En ce domaine, des normes ISO ont été édictées qui visent à garantir la qualité des bâtiments, la qualité d'un équipement étant définie

comme son aptitude à satisfaire les besoins des utilisateurs. Or pour pouvoir satisfaire les besoins, encore faut-il les connaître. Cet exercice est relativement aisé pour les ponts, mais la tâche est plus difficile lorsqu'il s'agit de bâtiments et d'aménagements urbains, car cela suppose de réaliser un inventaire exhaustif des besoins à satisfaire, des exigences et contraintes à respecter et des performances à atteindre. Peu d'équipes de concepteurs peuvent prétendre être en mesure de respecter ces critères et d'anticiper l'évolution de ces besoins. A cela s'ajoutent les divergences culturelles résultant de la spécificité de chaque profession.

Bertrand FABRE

Si j'ai bien compris, votre question porte sur les difficultés de la programmation...

Tri-Thien NGUYEN

Pas uniquement. Après l'inventaire des besoins, il faut apprendre à concilier les contraires par optimisation. A cela s'ajoute une démarche d'anticipation raisonnée des besoins dans un avenir proche.

Jean CARLOTTI, *président de la section « Equipement et ingénierie » du conseil général du Génie Rural et des Eaux et Forêts*

Sur ce thème des cultures croisées, je dirais que bien sûr nous avons, en tant qu'ingénieur, une culture qui nous est propre, et que confrontons, que nous enrichissons des apports des autres cultures. Mais je crois que nous avons aussi la prétention d'être capables d'agir à l'articulation de différentes cultures. La question qui se pose alors, notamment pour l'ingénieur de l'Etat et des services déconcentrés, est de faire la distinction entre les cas pour lesquels il intervient au titre du règlement ou de la maîtrise d'ouvrage d'Etat, ou pour le compte des collectivités locales en matière d'ingénierie publique, et les cas – finalement assez nombreux mais mal identifiés – dans lesquels il intervient par une espèce de mission - de devoir, de droit - d'initiative et de conseil, d'initialisation d'un certain nombre de projets. Et je crois que là, c'est une situation dans laquelle nous sommes peut-être assez bien placés pour non seulement avoir une idée (mais pas forcément la légitimité pour l'affirmer au titre de l'intérêt général), mais aussi avoir une capacité à comprendre les différents arguments et les différents spécialistes qui se présentent, et à partir de là, à condition de bien savoir se placer, pour ensuite faire prendre les décisions par ceux qui doivent les prendre, qui sont bien souvent les collectivités locales.

Pierre COMPTE, *adjoint du directeur du LRPC de Clermont-Ferrand*

Je suis au laboratoire régional des ponts et chaussées de Clermont-Ferrand, et j'ai été pendant sept ans directeur des études dans une école d'architecture. Je suis par ailleurs membre de la Commission des titres d'ingénieur. La notion de culture croisée me semble bien préférable à celle d'intégration dont on a parlé. Les doubles cursus existent, mais ils restent exceptionnels. Nous devons jouer sur la complémentarité, en comprenant la problématique de chaque acteur. La conception, dans l'esprit de l'ingénieur, est de nature industrielle : c'est un processus qui répond à des exigences, et duquel doivent sortir des spécifications. À l'inverse, dans l'esprit de l'architecte et du paysagiste, la conception est un processus qui va permettre de passer de la fonction au signifiant, au sens. Les deux approches sont donc différentes. Il faut les comprendre et les inscrire dans un cadre pluridisciplinaire, comme l'a souligné Dominique BIDOÛ. Il y a quarante ans, notre ministère avait une longueur d'avance dans ce domaine. Je pense qu'il est capable, aujourd'hui encore, de promouvoir ce type d'expérience, d'autant que la culture du projet se développe, que les ingénieurs apprennent à travailler avec des méthodes plus inductives, et que les méthodes de travail deviennent plus communes.

Bertrand FABRE

À mon avis, quatre thématiques structurantes se dégagent de ce débat :

- la dimension temporelle, qui n'a pas été suffisamment mise en exergue (Bernard Lassus l'a cependant évoquée lorsqu'il a rappelé que le projet du viaduc de Millau avait nécessité quinze années de maturation) ;
- la place du calcul économique ;
- l'enjeu de la formation professionnelle (avec la question des doubles cursus, des formations initiales et des formations sur le terrain) ;
- le problème de la programmation et de la prise en compte des besoins, et on rejoint le problème du temps puisque les besoins évoluent.

Dominique BIDOÛ

Sur la formation, prenons garde surtout à ne pas brader les compétences spécialisées dans cette démarche de convergence ou de croisement des cultures. Il faut rester au top dans sa spécialité. L'interdisciplinarité s'enrichit, précisément, des spécialités. À mon sens, il faut savoir dépasser les cloisonnements et les divisions, qui sont parfois nécessaires, tout en conservant une expertise technique. L'ingénieur doit s'ouvrir aux autres mais sans perdre sa spécificité. Par exemple, on l'a vu ce matin, les modèles peuvent servir de moyen pour communiquer.

Au sujet du calcul économique, je crois que Marcel BOITEUX répond très bien à cette question dans l'un de ses rapports. C'est un outil extrêmement puissant, mais il ne faut pas tout attendre de lui. Il faut bien sûr continuer d'améliorer ces techniques du calcul économique, mais cela n'empêche pas de relativiser. Marcel BOITEUX le dit très bien : il faut d'abord savoir quels objectifs on poursuit, et le calcul économique va permettre d'éclairer le débat.

André BROTO

« Que peut-on améliorer ? » demandait ce matin Jean-Pierre GIBLIN. Nous avons parfois des cadres réglementaires vertueux. Par exemple, le Code rural permet de répondre à une attente sociale forte du monde agricole : le remembrement (encore faut-il qu'il soit respectueux de l'environnement) permet de répondre à l'attente des agriculteurs pour une modernisation de leur outil de travail, notamment lorsque cet outil se trouve coupé en deux par un projet de construction de route ou de TGV. En milieu urbain, en revanche, il n'existe pas d'outils permettant de « cicatrifier » le tissu urbain coupé par une infrastructure. Ce pourrait être une voie d'amélioration.

En matière de formation, en dehors des organisations et des approches « projet », des approches par les risques, je ne vois pas de leviers d'amélioration significatifs. L'ouverture, l'écoute et la curiosité ne se décrètent pas !

En termes de culture croisée, je voudrais vous dire qu'on apprend beaucoup quand on demande à un psychiatre quelle est sa lecture d'une bande d'arrêt d'urgence en tunnel, ou bien quand on demande à un sapeur-pompier de la brigade des Sapeurs-pompiers de Paris ce qu'est la sécurité, et au delà ce que sont les notions d'action et de risque, de prise de risque pensée et mesurée. Notre société a désappris le risque. Des gens dont c'est le métier quotidien peuvent nous apprendre beaucoup de choses !

Jean FREBAULT

Pour ma part, je voudrais dire que je partage la synthèse de Bertrand FABRE, et j'insisterai en quelques mots simplement sur la dimension des formations, qui a été fortement développée par une série d'interventions successives. J'ai été sensible aux propos de Monsieur Dossier sur l'expérience de l'île d'Abeau, qui n'est peut-être pas très connue : c'est le projet, modeste par ses moyens mais ambitieux culturellement, de réunir sur la question des cultures constructives, pour l'instant trois écoles d'ingénieurs, six écoles d'architecture et trois écoles d'art. Pour l'avoir porté avec le ministère de l'équipement et celui de la culture, je peux

vous dire que c'est formidable mais difficile, tellement il y a de décalages entre les cultures. J'ai entendu parler d'une initiative similaire à Nancy, qui s'appelle ARTEM, une collaboration entre les trois Ecoles « locales » des Mines, des Beaux-arts et de Commerce.

A mon avis, ces projets préfigurent les nouvelles voies que vous venez d'évoquer. Il y a déjà actuellement des collaborations entre l'Ecole des ponts, l'Institut d'urbanisme et l'Ecole d'architecture de Paris, j'en dirai autant de l'Ecole des travaux publics de l'Etat à Lyon bien entendu... Ce qui a été très fortement dit aujourd'hui, c'est que l'inter-disciplinarité n'est pas une culture polyvalente qui gommerait la maîtrise de solides spécialités. Les réponses sont variées, mais il est clair que sur la culture de base - pour ma part, je m'assume entièrement comme ingénieur, même si j'ai essentiellement une pratique d'urbaniste et d'aménageur -doivent se greffer ce que l'on peut appeler des cultures métissées, des cultures hybrides. Et je crois que tous les établissements d'enseignement supérieur - en plus avec les réformes en cours - se posent ce genre de questions. Et ce pourrait être un challenge commun des ingénieurs et des autres professionnels dont nous avons parlé aujourd'hui, les architectes, les paysagistes, parce qu'on va peut-être vers de nouveaux profils professionnels qui gommeront un peu cette description excessivement fragmentée des professions en France. Si on regarde par exemple la situation en Allemagne, en Suisse et en Italie, on voit qu'il existe des « Polytechnicum », dans lesquels on forme à la fois des ingénieurs et des architectes, et qui se parlent beaucoup, du moins dans la phase de formation initiale. Il y aurait aussi beaucoup à dire sur la formation continue, mais ce débat était l'occasion, je crois, d'ouvrir des pistes, et surtout pas de conclure.

Nous avons un peu la crainte que cette séquence sur les cultures croisées soit décalée par rapport au reste de la journée. Je vois que ce n'est nullement le cas, et je m'en réjouis, et je voudrais remercier Jean-Pierre GIBLIN et Jacques LARAVOIRE de nous avoir pleinement permis d'exprimer ces messages.

L'INGÉNIEUR ET LA SOCIÉTÉ

**GEORGES MERCADAL, vice-président
de la Commission nationale du débat public**

Vous allez entendre trois points de vue sur l'ingénieur et la société, portés par des acteurs d'origines différentes, mais très vraisemblablement dans la continuité de ce qui vient d'être dit. Nous essayerons de ne pas superposer ces trois points de vue, même si le risque est faible vu les points dont nous partons.

Je ne pense pas qu'il soit nécessaire de beaucoup présenter Pierre VELTZ en cette assemblée. Ce soir, c'est plutôt en tant que chercheur et penseur qu'il va intervenir. Il essaiera d'insister sur l'historique de quelque chose que nous percevons tous les trois comme un certain malaise dans le rapport entre la société et l'ingénieur, ce qui en quelque sorte sera un peu un contrepoint dans l'ode à l'ingénieur qui a été composée pendant toute la journée, il éclairera ce malaise d'un point de vue historique, et il nous dira, à partir de ce point de vue, comment il voit se développer les choses dans l'avenir.

Laurent VULLIET est doyen d'une faculté de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne où se réalisent ce dont on vient de parler longuement, le croisement, la fusion des cultures des architectes et des ingénieurs. Il insistera sur ce qu'il pense être les composantes de ce malaise, son diagnostic, comment il se constitue à l'heure actuelle.

Pour ma part, à partir du débat public, j'essayerai de vous proposer quelques pistes de réflexion sur des changements dans les comportements et les représentations de l'ingénieur, qui pourraient peut-être à la longue corriger ce malaise, le résoudre, ou en tout cas permettre de réfléchir à des solutions.

PIERRE VELTZ, ancien directeur de l'ENPC

Il y a des éléments de malaise, c'est vrai, mais aussi des éléments d'ouverture. Je pense surtout qu'on est dans une situation de transition très forte, pas la première, mais certainement importante dans l'histoire des ingénieurs en général. Nous vivons une révolution technologique qui n'a pas encore véritablement trouvé sa forme organisationnelle dans nos sociétés. Ces éléments de changements sont visibles aussi dans d'autres professions et renvoient à des changements très généraux et de nature multidimensionnelle dans la société.

Je ne suis pas historien, mais j'ai lu quelques ouvrages fort intéressants qui retracent en particulier l'histoire des ingénieurs des ponts et chaussées. Je vous recommande la lecture du livre qui a été édité à l'occasion des 250 ans de l'Ecole des Ponts et Chaussées, et qui dresse une série de portraits de grands ingénieurs de notre institution. Je vous renvoie également au dernier numéro des *Annales* qui vient de sortir, qui est tout à fait passionnant.

Sur une longue période, l'histoire des relations entre l'ingénieur des Ponts et la société est certes marquée par des changements majeurs, mais on peut aussi relever des constantes très fortes. La première d'entre elles est que, au fond, tous ces ingénieurs ont exercé le même métier : l'aménagement du ou des territoires, dans un sens très large. Ils n'étaient pas fondamentalement des spécialistes des ponts, des chaussées, du génie civil. Ils avaient la profonde conviction que leur métier était d'aménager les territoires, et dans toutes leurs composantes. Et la deuxième chose qui frappe chez ces grands ingénieurs, c'est qu'ils ont pratiqué ce métier avec une très grande diversité d'approches, y compris pour une même personne. Jules DUPUIT par exemple est considéré à l'échelle mondiale comme le fondateur de l'économie publique (et la bibliothèque de l'Ecole des Ponts accueille en permanence des chercheurs, notamment anglo-saxons, qui viennent travailler sur les papiers de DUPUIT) ; mais il a aussi construit des routes, il s'est intéressé à l'urbanisme d'Angers, il s'est passionné pour l'hydrologie. Considère était un grand spécialiste de l'acier – il avait étudié en particulier l'écroûissage - ; mais en même temps il n'hésitait pas à polémiquer avec Clément COLSON, autre ingénieur des ponts, qui était à l'époque président du Conseil d'Etat (chose difficile à imaginer aujourd'hui !), sur la tarification du chemin de fer du Centre Bretagne...

Par ailleurs, et je dois cette remarque générale à Antoine PICON, je voudrais souligner que ce n'est pas la technologie qui a été le principal fil conducteur de l'histoire des ingénieurs de l'Ecole des Ponts (même s'ils n'ont cessé d'y faire des apports majeurs), c'est leur sens de la responsabilité sociale. Quand Antoine PICON écrit que « *l'histoire des ingénieurs a plus à voir avec celle de leurs idéaux sociaux et de leurs stratégies sociales qu'avec l'histoire de la technologie* », son affirmation peut paraître excessive, mais je pense qu'il a raison.

Au 18^{ème} siècle, il y a une très grande proximité de la pensée des ingénieurs avec celle des Lumières, même s'ils sont par ailleurs très compromis avec le système royal, notamment avec la corvée. Ceux qui vont mettre en place le système routier français le font avec des objectifs qui ne sont pas purement techniques, mais qui renvoient à une vision globale de la société. Ils parlent ainsi par exemple de la nécessité d'abattre des obstacles dans le relief de même qu'on doit abattre les préjugés entre les hommes, et rendre la société plus transparente.

La Révolution marque naturellement un tournant majeur dans l'histoire des ingénieurs. L'Ecole des Ponts, qui était encore une école très empiriste, dans la tradition de la formation des architectes, va reprendre l'héritage de la formation très scientifique qui avait été développée à l'Ecole de Mézières, école d'artillerie, école d'aristocrates, dans laquelle les mathématiques avaient pris une part importante. Cet héritage de Mézières va être transféré à l'Ecole Polytechnique et à l'Ecole des Ponts. Et là va se mettre en place, de façon absolument novatrice en France, et je dirais même dans le monde entier, une formation d'ingénieur axée sur les sciences, avec un postulat central qui est le suivant : le développement des sciences et le développement de la technologie doivent converger, ce ne sont que deux facettes d'un même processus de maîtrise rationnelle du monde. La tradition anglaise, qui a été citée ce matin, ne partage pas ce postulat.

La formation se développe donc autour des mathématiques, et Antoine PICON insiste beaucoup sur ce rôle des mathématiques. La mécanique est la forme « mathématisée » de la physique. Les mathématiques ne sont pas simplement, comme aujourd'hui, un outil de la physique ou un outil de description du monde naturel. A l'époque, les mathématiques - c'est-à-dire au fond le raisonnement rationnel formalisé - sont considérées comme « le flambeau qui doit projeter la lumière dans la confusion du monde », aussi bien le monde social et le monde économique que le monde naturel. L'idée de base c'est que l'ingénieur a des outils de rationalité – autour

des mathématiques – pour mettre de l'ordre dans le monde : il est vu comme un arbitre, un juge, qui a comme code les mathématiques. Et Antoine PICON compare la formation des ingénieurs à celle des juristes : on y apprend les fondamentaux, non pas du droit, mais de la rationalité de l'action, autour des mathématiques. C'est pourquoi des ingénieurs comme DUPUIT ou bien d'autres, lorsqu'ils font de l'économie, de la sociologie ou de la statistique, ne considèrent pas du tout qu'ils font une excursion en dehors de leur métier de base. Ils considèrent qu'ils appliquent leur outil de base, la rationalité, au monde auquel ils ont affaire.

Il est naturel, à partir de là, qu'il y ait eu une très forte liaison entre cette histoire des ingénieurs, cette pensée des ingénieurs et les utopies sociales. D'ailleurs, les ingénieurs des Ponts sont en première ligne du Saint-simonisme, de mouvements qui vont fleurir au cours du 20^{ème} siècle (comme X-Crise), de cette étrange continuité-discontinuité entre le régime de Vichy et l'après-guerre, (avec les ambiguïtés de certains engagements ; même si les ingénieurs des Ponts n'ont pas été aussi loin que ceux d'autres corps dans leur engagement au service de Vichy). L'idée centrale (l'idéal moteur) est celle d'un univers rationnel débarrassé des passions à la fois économiques et partisans.

Tout ceci porte un nom, qui est passablement décrié aujourd'hui, mais dont il faut voir le côté positif : la technocratie. Il ne s'agit pas pour les techniciens de décider à la place des élus, ils en sont d'ailleurs très respectueux ; ils pensent néanmoins qu'on peut mettre le monde en ordre, mettre de l'ordre dans le monde, en particulier par la planification. L'idée de planification est centrale : le monde marcherait mieux s'il était entre les mains de décideurs rationnels et prévoyants plutôt que de financiers versatiles ou d'hommes politiques soumis aux pressions électorales.

Il y a aujourd'hui crise parce qu'on a changé d'univers. Notre génération a vécu le basculement. Nous avons effectivement commencé à travailler à une époque où le mot d'ordre était planification. Aujourd'hui, cette idée est dévalorisée. Nous avons perdu la foi dans la planification, progressivement, doucement, au profit d'un monde qui est beaucoup plus « darwinien » (n'employons pas « libéral », qui a une connotation trop politique), un monde où seul le plus fort survit, et où l'on fonctionne par essai-erreur. Un monde qui se sent de moins en moins capable de se projeter dans l'avenir, qui est piloté par la réduction du risque (en négatif) et non plus par l'anticipation et la planification (en positif). Un monde qui, pour reprendre une métaphore chère à certains sociologues, tend à devenir

de plus en plus « liquide », comme en témoigne, par exemple, le financement des entreprises par les marchés – plutôt que par les banques. Et ce monde plus liquide est évidemment inconfortable pour nous ingénieurs, qui « faisons du béton » et dont le métier engage le long terme...

Maintenant, quelques spéculations. Quel avenir pour les ingénieurs ? Comme je l'ai dit, la perte de foi dans la planification est un facteur majeur de changement. Mon propos n'est pas nostalgique, c'est un constat. La planification n'est pas pour autant éradiquée de notre monde, mais notre société n'y croit plus. Un retour de balancier est peut-être encore possible...

Mais il y a d'autres facteurs de déstabilisation. Le premier c'est l'internationalisation - et je m'étonne que très peu de gens l'aient évoquée ici -. L'univers dont nous sommes les héritiers est complètement national. Il est d'ailleurs frappant de voir à quel point les ingénieurs – beaucoup plus que les scientifiques -, et notamment les ingénieurs d'infrastructures, sont liés à des modèles nationaux (ne dit-on pas qu'une infrastructure est la manifestation du *nation building* ?). Et c'est vrai que pour construire des nations – cela a été le cas de la France, et c'est le cas aujourd'hui des pays neufs –, les infrastructures, les réseaux, la dialectique des territoires et des réseaux – pour faire plaisir à Claude MARTINAND – c'est central. Mais en ce qui nous concerne, nous sommes sortis de cette époque là ! Aujourd'hui, la vie des ingénieurs est devenue internationale, les règles sont internationales, les parcours de carrière sont internationaux, les références sont internationales, et les différentes cultures nationales sont en train de se confronter les unes aux autres. Si on regarde ce qui se passe dans le secteur des télécoms, il y eu la phase du téléphone fixe, pendant laquelle les ingénieurs des télécoms nationaux ont été les artisans de la création des gros réseaux nationaux ; aujourd'hui, avec la téléphonie mobile, on ne sait même plus où sont les ingénieurs, on voit des vendeurs, et des réseaux de plus en plus internationalisés, invisibles, abstraits.

Autre facteur de basculement, magnifiquement illustré ce matin par Bernard LARROUTUROU et d'autres : le fait que l'univers des techniques et des sciences connaisse une mutation profonde par la transversalisation, même s'il subsiste des spécialités. L'informatique est un facteur puissant de cette transversalisation, la modélisation aussi, qui offre une espèce de plan d'équivalence dans tous les champs, l'important étant finalement de savoir si on a la même équation différentielle ou aux dérivées partielles, parce qu'on sait que les mêmes équations peuvent régir des phénomènes extrêmement différents. Bernard LARROUTUROU vous en a

présenté quelques exemples fascinants. La transversalisation s'explique également par le phénomène dit de « remontée vers l'amont » : les matériaux, par exemple, ne sont plus étudiés seulement à travers leurs effets, mais aussi à travers leur structure, leur physico-chimie, etc. Et là aussi on peut transversaliser très utilement les domaines.

Tout cela fait qu'il est devenu difficile aujourd'hui de décrire l'univers des techniques et des sciences. Oublions Auguste COMTE, et même les fameux « systèmes techniques » à la Bertrand GILLES ! Et si je puis emprunter encore une métaphore à Antoine PICON, on pourrait dire que les sciences et les techniques sont maintenant comme des paysages : ce n'est pas le désordre, mais ce n'est pas structuré et organisé comme une machine. Il y a des bosquets, ça bouge, on peut s'y perdre... C'est d'ailleurs déstabilisant, en particulier pour un directeur d'école d'ingénieurs, quand il lui faut définir des programmes d'enseignement et de recherche, car les disciplines sont de plus en plus imbriquées et transversales les unes par rapport aux autres. Mais en même temps on peut s'y promener de manière plus libre, et c'est l'aspect positif.

De plus en plus, les jeunes ingénieurs du 21^{ème} siècle pourront s'engager dans des parcours de carrières « scientifico-technico-managériales » beaucoup plus variés que nous. Je pense aussi (et j'espère) que la distinction entre ingénieur et architecte va s'estomper. Enfin, les ingénieurs auront certainement à investir des domaines nouveaux, et tout particulièrement ceux de la culture et de la santé. J'étais récemment au MIT, et j'ai été frappé de voir à quel point les domaines culturels, la musique, le cinéma, sont entrés dans le monde de l'ingénieur. L'interface ingénieur-artiste ne sera plus du tout marginal dans l'économie de demain. Quant à la santé - nous l'avons vu avec l'exposé sur la biomécanique -, il y a un très grand avenir à l'intégration de l'ingénierie et des sciences du vivant. Nous n'en sommes encore qu'aux balbutiements !

Mais il faut que tous ces bouleversements soient pilotés par des structures. L'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne – et cela me permet de faire la transition avec mon successeur à la tribune – a d'ores et déjà fait le pari de la bio-ingénierie. Si cet établissement a pu prendre ce tournant c'est grâce à sa taille, ce qui n'est pas possible en France pour l'instant, où notre système de Grandes Ecoles reste très éclaté. Pour relever un tel défi, il faut des institutions larges, amples, diversifiées, avec de la biodiversité, et qui respirent...!

**LAURENT VULLIET, doyen de l'École d'architecture
et du génie civil et environnement à l'École
polytechnique fédérale de Lausanne**

Je voudrais remercier les organisateurs d'avoir conféré un caractère international à cette réunion en faisant venir de très loin un intervenant non européen puisque citoyen suisse ! Plus sérieusement, j'aimerais insister sur les relations très intenses qui nous lient à la France en matière d'ingénierie, puisque l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) s'est très largement inspirée du modèle de l'École nationale des ponts et chaussées.

Une petite remarque sur l'international : à l'EPFL, plus de la moitié des professeurs sont d'origine étrangère. Je sais que c'est loin d'être le cas en France, pour avoir fait, avec Pierre VELTZ, un audit international de l'INP de Grenoble. Si vous me permettez cette image, il faudrait peut-être amener du sang frais pour créer des idées neuves !

Mon propos s'articulera autour de deux thèmes : d'une part l'interdisciplinarité, d'autre part la relation entre les sciences et techniques et la société.

Je voudrais traiter la question de l'interdisciplinarité sous l'angle du changement. A l'EPFL, nous avons fait le pari d'un changement de structure et de philosophie. Il y a quatre ans, pour la première fois de l'histoire de l'École, le nouveau président de l'établissement n'était pas un ingénieur ou un architecte formé dans nos rangs. Comble de l'irrévérence, nous avons même nommé un médecin ! Depuis quatre ans, c'est donc un médecin qui préside avec succès l'École polytechnique fédérale de Lausanne (avec des pouvoirs très étendus). Ce nouveau président a amené avec les sciences de la vie dans notre institution, et a réussi à démarrer en l'espace de deux ans un cursus d'études en sciences de la vie. Certains détracteurs ont vu à tort une menace pour les disciplines existantes. Mais les sciences de la vie sont un formidable marché d'avenir pour les ingénieurs ; la plupart des progrès accomplis dans les sciences de la vie l'ont été grâce aux ingénieurs, en informatique, imagerie, etc. Le nouveau président nous a proposé de lutter contre le cloisonnement des disciplines, qui étaient jusqu'alors très étanches. J'ai bien compris, à vous entendre aujourd'hui, que tel était le cas en France, mais songez qu'à Lausanne, où l'EPFL a été créée il y a cent-cinquante ans par des architectes et par des ingénieurs, pendant ce siècle et demi il n'y a jamais eu de contacts entre les étudiants ni entre

les enseignants d'architecture et de génie civil (le génie civil étant pris avec son sens premier, plus large que celui qu'il a en France) ! Imaginez une telle situation : les étudiants en architecture, les étudiants en génie civil suivent cinq années de formation, en parallèle, sans jamais se rencontrer ! Et on voudrait que par une sorte de miracle une fois leur mastère en poche ils s'entendent comme larrons en foire pour bâtir les meilleurs projets de société ? Donc c'est une situation que l'on a modifiée.

On avait aussi constaté que l'environnement était une dimension relativement absente des préoccupations des constructeurs. Par exemple, dans les notes de présentation des professions remises aux « gymnasiens » (l'équivalent de vos lycéens), certains professionnels de la construction indiquaient qu'il étaient de plus en plus difficile de construire avec les exigences des environnementalistes, et se montraient fiers de montrer qu'ils pouvaient trouver les moyens de contourner les exigences de ces trouble-fête ! Tel était l'état d'esprit qui régnait dans notre profession il y a encore quelques années !

A l'EPFL, nous avons donc décidé de regrouper les trois départements d'architecture, de génie civil et de génie rural (ce dernier s'était orienté progressivement vers l'environnement). Nous avons ainsi réuni, il y a un peu plus de trois ans, une famille de 650 chercheurs et 1 500 étudiants, dans une seule faculté dont j'ai la lourde charge, aujourd'hui, de présider à la destinée.

Bien sûr, les débats ont fait rage, en particulier sur la formation. En la matière, nous avons pris un pari extrêmement clair : les disciplines doivent rester fortes et clairement identifiables. Nous avons vu aussi qu'il fallait par contre créer des passerelles : elles jouent bien sûr un grand rôle dans la façon de travailler ensemble, et c'est pourquoi on a créé le mot d'ordre « Projeter ensemble ». Ce slogan est en train de prendre corps, et d'entraîner l'ensemble de nos modifications.

Bien entendu, ces choix ont eu des incidences sur les plans d'étude. Concrètement, nous avons créé des cours en commun. En première année, tous les étudiants des trois sections suivent un vaste cours magistral sur la pensée territoriale. Ils ont des projets en commun, ils passent des semaines d'étude de cas ensemble, il y a beaucoup de choses en commun dans l'enseignement, jusqu'aux diplômes qui peuvent être communs entre les architectes et les ingénieurs.

Beaucoup de nos étudiants trouvent ces occasions de dialoguer formidable. Mais j'ai aussi constaté depuis deux ans – c'est une déception – que pour d'autres cette démarche, paradoxalement, n'est pas comprise. Lorsqu'ils intègrent notre établissement, leur structure mentale est déjà orientée vers une discipline bien définie. Par exemple, certains étudiants en architecture ne comprennent pas pourquoi, dans le cadre du cours sur la pensée territoriale, c'est un ingénieur des transports (et non un architecte) qui vient traiter de l'incidence des voies de circulation sur la structuration du territoire. C'est fort regrettable, et à bien y réfléchir, je me demande si cette attitude n'a pas son origine dès l'école primaire, par l'éducation des parents, par la presse et par ce qu'on dit de ces professions... C'est une réflexion qui mériterait d'être poursuivie.

Pour mettre en œuvre « Projeter ensemble », nous avons aussi restructuré les organes de fonctionnement des trois départements. Nous avons en particulier fondé des instituts : par exemple, au sein de l'institut du développement territorial, nous avons regroupé des compétences très variées, des gens venant de l'environnement, des systèmes d'information géographique, des transports, de la sociologie urbaine, de l'économie, des architectes, des urbanistes... Cela donne des échanges de cultures très riches, entre des personnes qui n'avaient jamais échangé auparavant. C'est en petit ce qu'on devrait pouvoir réussir dans la société en général, sur le modèle de ce « Projeter ensemble ».

Une autre conséquence a été que l'EPFL, dans son ensemble, a été amenée à réfléchir au rôle des sciences humaines et sociales. Là aussi, le président a imposé un objectif de formation en sciences humaines et sociales - 10% de la formation dispensée -, en partenariat avec les universités de Lausanne et de Genève. Et pas en saupoudrant l'enseignement d'un peu de sciences humaines et sociales : l'étudiant doit choisir et approfondir un domaine des sciences humaines et sociales sur l'ensemble de la durée de ses études.

Voilà donc pour le premier thème de mon intervention, l'interdisciplinarité : je la vois comme une clé du succès de l'avenir, en tant qu'augmentation de la capacité des professionnels des diverses disciplines à parler entre eux.

Deuxième thème de ma présentation, l'actuel malaise entre sciences, techniques et société. Ce malaise a plusieurs origines.

- Tout d'abord, la science n'a plus comme seul objet la recherche de la vérité. Elle est de plus en plus au service de la technique : les recherches mathématiques s'orientent fréquemment vers des applications industrielles

ou vers la banque et l'économie. La science devient de plus en plus appliquée. Il y a donc un changement dans la perception de la science.

- En outre, la société a été bercée par l'illusion technique, qui s'est développée à la faveur de l'industrialisation. On a cru alors que le *progrès de la technique* serait égal au *progrès par la technique*. La société s'aperçoit aujourd'hui qu'elle a été... bernée : il ne suffit pas d'augmenter les capacités technologiques pour augmenter le bien-être et la paix sur la terre !
- Par ailleurs, les sciences techniques ont bouleversé les rapports sociaux, l'organisation du travail, la mobilité, la santé... Il y a aussi des préoccupations nouvelles de la société en relation avec les sciences et les techniques : les risques industriels, une vision différente des relations mondiales, le dialogue Nord-Sud, à travers le problème de la mondialisation, qui est lié à la façon dont les développements technologiques et industriels sont gérés à l'échelle planétaire. Le débat devient difficile dès que les problèmes technologiques ont une composante socioculturelle ! On pense bien sûr au nucléaire, mais il y a aussi les OGM, les rayons ionisants, les cellules souches...

Dans ce contexte, on voit bien que l'ingénieur et le scientifique ne peuvent plus proposer des réponses simples et faciles, qui pourraient convaincre comme une démonstration mathématique. Pour être tout à fait honnête, je ne suis même pas sûr que l'ingénieur ou le scientifique en question ait la réponse ! Au fond, il ne s'agit peut-être pas de convaincre les autres, mais tout simplement de montrer que la complexité ne permet pas une réponse simple.

Il y a aussi comme conséquence une difficulté à mettre en œuvre des politiques et des projets. La plupart des projets de développement territorial se heurtent à des débats publics, qui sont pourtant nécessaires. Je pense que cela contribue à ternir l'image de l'ingénieur en général, qui peut aller vers une dégradation de son statut social et tout simplement de son salaire (si on compare les ingénieurs à d'autres formations dans les domaines de l'économie et du droit).

Pour conclure, je voudrais reprendre une citation de Jacques LEVY, que vous connaissez certainement, et qui vient de rejoindre l'EPFL : « *il faut passer de l'ingénierie comme science appliquée à une ingénierie comme science impliquée* ». Pour ma part, j'y vois une belle image pour l'avenir de nos professions.

GEORGES MERCADAL, *vice-président* de la Commission nationale du débat public

Le débat public est peut-être une des voies de ce passage à une ingénierie impliquée, tout au moins par les effets qu'il peut avoir sur le comportement de l'ingénieur. Mon propos portera sur trois de ces effets, de ces changements possibles. Vous entendrez vraisemblablement des échos aux deux exposés précédents. Au préalable, bien que vous sachiez tous ce dont il s'agit, je rappelle rapidement ce qu'est le débat public dont je parle, ou plus exactement d'où je parle. Le « débat public » a été mis en place par la loi de 2002 sur la démocratie de proximité, qui institue une commission dite « Commission nationale du débat public » en autorité indépendante, comme la COB.

Cette Commission nationale a pour mission d'organiser des débats publics qui ont chacun pour caractéristique de se dérouler sur un temps limité (quatre mois au plus) et sur un projet d'une certaine importance. Ce débat n'est pas conclusif (c'est une grande originalité de cette construction), il est seulement sanctionné par un compte rendu établi par la Commission. Trois mois après ce compte rendu, le responsable de l'ouvrage ou du projet doit dire au public ce qu'il en a retiré. Enfin, le débat est organisé et animé par la Commission nationale, c'est-à-dire par un tiers indépendant, qui doit garantir la bonne information et la possibilité d'expression de tout un chacun.

J'ajoute tout de suite que la pratique a montré qu'un tel débat ne peut se dérouler convenablement (dans des salles adaptées, avec une organisation rigoureuse...) que s'il a été fortement préparé, et ce en concertation avec les principaux acteurs : les collectivités territoriales, les associations, notamment celles qui représentent l'environnement, les organisations socioprofessionnelles, etc. Il faut donc un préalable. L'expérience a montré aussi qu'il fallait un « postalable », à savoir une concertation de suivi, qui doit être menée selon nous par le maître d'ouvrage.

Tout ceci montre que le débat public a entraîné la matérialisation d'une intuition que beaucoup ont depuis longtemps : la décision n'est pas quelque chose d'instantané, qui consiste pas à peser le pour et le contre à un instant donné. La décision est un processus, qui s'apparente à une maturation, et qui s'étale dans le temps. Tout à l'heure, l'un des intervenants à la table ronde a dit que le choix n'est pas un processus rationnel. C'est vrai que le débat public aurait tendance à laisser penser que la décision, telle que je la présente, n'est pas nécessairement un processus

rationnel, du moins au sens où PierreVELTZ l'a employé en parlant de la rationalité chez nos grands prédécesseurs.

Voilà l'objet. L'expérience montre-t-elle qu'il apporte quelque chose, par rapport aux changements, par rapport au malaise entre la société et l'ingénieur ? Nous avons l'impression qu'oui, et que ce que le débat public apporte est de l'ordre de ce que parfois les économistes ont appelé l'« acceptabilité sociale », en l'occurrence du projet ou d'une manière plus générale de la décision envisagée. Je vais souligner trois dimensions de cette acceptabilité sociale, qui sont apportées par les débats, et qui poussent l'ingénieur à quelques changements dont je dirais le sens.

Première dimension, première leçon : **tout ce qui est prouvé n'est pas nécessairement certain aux yeux du public** – vous voyez comment je joue, ici, sur le langage mathématique et le fonctionnement de la société. Le projet de lignes à très haute tension à travers les Pyrénées orientales en est une parfaite illustration : dans le débat public organisé sur ce projet, il n'a pas été possible de conclure sur l'effet des champs électromagnétiques sur la santé. Les électriciens, au plan international, avaient pourtant décidé il y a vingt-cinq ans de lancer un programme de recherches coordonnées sur l'effet des champs électromagnétiques sur la santé, et pris ensuite toutes les précautions pour que toutes ces recherches soient publiées et diffusées sur Internet. Ce qu'il en est résulté pour le public des Pyrénées orientales, qui a « pioché » Internet de fond en comble, c'est une impression de grande confusion, et que désormais on pouvait tout dire sur l'effet des champs électromagnétiques sur la santé ; il ne s'en est pas privé... De sorte que les personnalités éminentes - qui avaient participé aux commissions de l'OMS sur le sujet – amenées par le maître d'ouvrage pour dire si les champs électromagnétiques avaient des effets ou pas, se sont trouvées conspuées et contredites. Bref, il y a une suspicion fondamentale sur toutes les procédures que j'appellerais « scientifico-administratives » et qui sont destinées à dire la norme en matière de risques. J'ai pris un exemple sur la santé, mais on pourrait vraisemblablement les multiplier.

Alors quelles conséquences sur le comportement de l'ingénieur ? Je dirais que l'expérience me prouve que plus l'ingénieur est scientifique, plus il répond à ce que le public attend de lui. Dans l'exemple du débat public sur l'élargissement d'un terminal de conteneurs à Fos-sur-Mer, le projet ne pose pas de gros problèmes en lui-même. Mais comme vous le savez, à Fos il y a une zone industrielle avec une usine sidérurgique, une fabrique de chlore, des raffineries, entre autres. Et le public pousse

le maître d'ouvrage à accepter une campagne de mesure sur la qualité de l'air. Pour moi, le mot important c'est « mesure » : la mesure me paraît en effet l'un des éléments par lequel le débat, le rapport entre la société et l'ingénieur peut être transformé. Il ne s'agit pas, bien entendu, de n'importe quelle mesure. Il faut une mesure contradictoire, qui se prête à la conviction du public, et par conséquent le périmètre et les paramètres de cette mesure vont être âprement discutés. Dans le bassin de Fos, il existe bien un instrument de mesure de la qualité de l'air, mais il ne mesure que l'ozone ; or ce qui intéresse le public, c'est les dioxines, et quand on dit qu'on sait mesurer l'ozone mais qu'on ne sait pas actuellement mesurer les dioxines, c'est une réponse que le public ne peut pas accepter. Il faut donc aller plus loin dans la réponse.

Le débat ne demande pas seulement un changement individuel de la part de l'ingénieur, il demande aussi un changement collectif : que nous reconnaissons qu'il y a des sujets qui sont soumis à controverse, et que les controverses il faut les reconnaître, ne pas chercher à les masquer. Les controverses ça peut évoluer, occupons-nous de les faire évoluer en y mettant de l'intelligence là où il en faut, là où le public en demande, et surtout ne les masquons pas. Je pense en particulier à la controverse sur les prévisions de trafic ou, plus généralement, sur la mobilité. Le public considère qu'on est arrivé à un point où on ne peut plus laisser les choses aller d'elles-mêmes, il faut les maîtriser. La demande de la maîtrise de la mobilité est extrêmement forte.

Deuxième leçon, deuxième constat : **dans ces débats publics, ce qui est juste, ou considéré comme juste par un public, par une société locale, est très relatif et contingent.** D'autres l'ont dit bien avant nous, et certes dans le débat sur les Pyrénées, il était naturel qu'on s'en souvienne. Mais il n'y a pas que là. Je ne m'attarderai pas sur ce point car vous êtes vraisemblablement familiers du rapport du Conseil d'Etat qui a engendré cette loi sur la démocratie de proximité, le rapport Questiaux. Ce rapport a mis en exergue la notion d'intérêts généraux particuliers : il n'y a pas un intérêt général, qui découlerait d'une représentation mathématique quelle qu'elle soit, ou qui serait l'incarnation de l'unité dont les révolutionnaires de 1789 ont rêvé ; il y a « des » intérêts généraux, parce qu'il y a « des » particularités. La conciliation du général et du particulier apparaît comme l'une des difficultés que révèle le débat public.

Si ce qui est juste est contingent, on peut néanmoins évoquer un ou deux aspects qui gouvernent cette contingence :

- d'abord, il faut savoir introduire, dans l'arbitrage à trouver entre les divers intérêts généraux particuliers en présence, un savant équilibre entre les avantages et les inconvénients. « Intérêt général particulier » ne signifie pas « intérêt individuel », dans le débat public on n'est pas dans le NIMBY : dans le débat sur un projet d'incinérateur par exemple, on parlera de l'intérêt de brûler des ordures ou au contraire de ne pas les brûler, non seulement pour les populations immédiatement environnantes mais aussi pour celles qui sont plus éloignées.
- Un deuxième type de justice est fortement présent dans l'esprit du public : ce qu'on appelle parfois la « justice procédurale ». Si le processus qui fait mûrir la décision est jugé injuste, la décision s'en trouve bloquée définitivement et sans appel. C'est par exemple ce qui est arrivé à un projet de retraitement d'un terril, dans le nord de la France : tout le monde en a reconnu la nécessité, mais le projet a été rejeté parce que la manière dont le processus a été mené a été jugée inacceptable.

Quelles conséquences sur l'attitude de l'ingénieur ? Prenons la notion de modèle, dont on a beaucoup parlé aujourd'hui : parler en débat public d'un modèle de prévision dans lequel le public n'est pas capable d'entrer est une contre-performance totale ! Parler au contraire d'un modèle explicatif et pédagogique, même si son pouvoir prédictif est faible, est positif. Car ce que le public attend de l'ingénieur, c'est de l'aider à faire ressortir de tous ces groupes, de toutes ces procédures, un intérêt général compatible avec les intérêts généraux particuliers. Quelqu'un se demandait tout à l'heure « où est donc l'intérêt général aujourd'hui ? » Je dirais qu'il est peut-être : tel que le débat public le fait ressortir.

Dernier point : **le public n'est pas prêt à considérer tout ce qui est utile comme désirable.** Cette constatation met à mal l'intérêt général, puisque le mot même est mis en cause. Et un thème qui revient en permanence dans les débats est la recherche d'identité. Il y a manifestement partout une volonté de s'identifier à un lieu, et à travers ce lieu de mieux s'identifier collectivement. Le public exprime, parfois d'une manière très conceptualisée, ce besoin d'identité. Et ceci nous rattache fortement à la séquence précédente, car le sensible – et à l'intérieur du sensible, le visible – est manifestement quelque chose de très fort dans cette recherche d'identité.

En définitive, ce que le public attend de l'ingénieur, c'est qu'il soit *ingénieur*. Il ne lui demande pas d'être arbitre, ni juge, mais de l'aider à trouver des solutions, pour sortir par le haut de la contradiction entre développement et protection de l'environnement.

Mais le débat public ne porte pas seulement sur la contradiction entre développement et environnement : il porte également sur la contradiction entre rationalité et identité, entre général et particulier. En France, nous avons une culture du général : l'analyse de la littérature montre que les corps, notamment les corps techniques, ont été au début du 19^{ème} siècle ce à quoi les gens se sont raccrochés pour être la continuité de l'esprit de 1789, la Généralité et l'Unité. Cette étiquette est encore profondément attachée à l'ingénieur, et particulièrement à l'ingénieur de Polytechnique et des Ponts. Dans le débat public, manifestement, il lui faut s'en dépouiller pour être quelqu'un d'autre.

► DÉBAT

René URIEN

Avant d'être au Cemagref, j'ai évolué dans le réseau scientifique et technique du ministère de l'équipement pendant une quinzaine d'années. J'ai quelques états d'âme par rapport à l'exposé de Pierre VELTZ. Mais je ne cherche pas à défendre un « pré carré », je voudrais réagir plutôt en citoyen. Je trouve qu'une partie du diagnostic de Pierre VELTZ est quelque peu pessimiste, même s'il est vrai que l'ingénieur des grands corps de l'Etat n'évolue plus dans un monde convaincu par la planification. Dans le cadre de mes modules d'enseignement, je constate qu'il y a des jeunes, très bien formés, qui sont intéressés par la démarche prospective. Et je signale un rapport du Conseil économique et social de 1997, intitulé *Prospective, débat et décision publique*, et qui a été dans le courant d'idées qui est à l'origine de l'instance que Georges MERCADAL préside.

Par ailleurs, je trouve un peu statique le titre du colloque « L'ingénieur face au 21^{ème} siècle », pas assez prospectif. Ce matin, nous avons entendu une interpellation de Bernard DECOMPS (c'est, au sens de Bertrand de JOUVENEL, une *conjecture*) : il faudrait que les ingénieurs soient des docteurs, il faudrait organiser des PhD en alternance dans la formation des ingénieurs. C'est à mon avis un point fort de cette réunion, même si le temps n'a pas permis d'en discuter plus avant. Pour ma part - et pour notre part au GREF - j'ai pris bonne note de ce message !

Nicolas BOULEAU

Il me semble qu'il manque dans ce qui a été dit aujourd'hui un élément d'analyse sur le rôle de l'ingénieur. Dans le monde scientifique la pensée critique est très développée : les savoirs s'élaborent en modifiant, en recalant les autres savoirs. Dans le monde de l'ingénieur, on propose, mais on s'engage rarement dans la critique. Or, si nous nous projetons dans l'avenir, dans trente ans par exemple, nous nous trouverons dans une période qu'on pourra qualifier de « post-positiviste », alors que dans la période actuelle partout le positivisme monte de façon impressionnante : la Chine est en train de devenir un pays qui non seulement capte une grande partie de l'industrie secondaire d'Europe et des Etats-Unis, mais qui traite les problèmes techniques avec un positivisme sans vergogne ! Les problèmes informatiques sont traités en Inde d'une façon probablement similaire.

A mon sens, l'ingénieur doit prendre à deux mains le problème de la critique. Il doit mettre à profit le fait que nos procédures soient un peu plus évoluées, un peu plus subtiles dans la prise en compte de paramètres de civilisation, pour s'engager

dans la critique de l'innovation technique. C'est très important pour l'avenir de la société: on ne peut plus laisser les choses aller n'importe comment, et il faut que les ingénieurs, qui sont précisément entre la science et la société, s'engagent et prennent le risque d'une pensée critique vis-à-vis de l'innovation technique.

François PERDRIZET

Je m'adresse d'abord à Laurent VULLIET. Je suis très admiratif de ce que vous faites à l'EPFL, mais j'éprouve tout de même un certain malaise, sans doute dû à une mauvaise lecture des écrits de Michel SERRES. A vous entendre, on a l'impression qu'à l'EPFL, on apprend à être des ingénieurs, c'est-à-dire des gens qui font de l'utile, qui « bricolent », que ce soit dans les sciences dures ou dans les sciences humaines et sociales.

Michel SERRES dit qu'à côté du ce pôle des sciences, il faut qu'il y ait aussi un pôle du « malheur humain ». Il propose d'ailleurs un enseignement des grands textes dramatiques qui font ressortir ce malheur humain.

J'ai donc l'impression qu'il manque quelque chose et que vous n'allez pas assez loin, mais je me trompe peut-être car je ne connais pas l'ensemble du contenu des enseignements de l'EPFL. Pour moi, un ingénieur n'est pas uniquement un adepte des sciences humaines, des sciences du vivant ou des mathématiques. Il faut introduire une autre dimension, et en ce sens, je rejoins les propositions de Michel SERRES. A Pierre VELTZ, je dirai que la perte de foi dont il fait état est aussi la perte de la conscience de ce qu'est le malheur, et donc de ce qui peut porter nos pratiques. Le besoin d'identité est peut-être une autre conséquence de cette perte de notion du malheur. Il y a peut-être là une piste à creuser.

Enfin, toujours inspiré par mes lectures de Michel SERRES, je dirai du problème de la maîtrise qu'il vient aussi du fait que notre action locale a une portée générale. Nous devons être sensibles à ce rapport entre le local et le général dans la pratique de nos métiers.

Intervenant de la salle

Je rejoins entièrement ce dernier témoignage. En tant que jeune je reviens au vieil adage : *science sans conscience n'est que ruine de l'âme*. Et je pose la question : quelle devrait être la conscience de l'ingénieur au 21^{ème} siècle ?

Michel ROUSSELOT

Je voudrais réagir au sujet de la planification dans notre société. Actuellement, en France, de nombreuses collectivités territoriales travaillent sur des plans

quinquennaux ou décennaux, qu'il s'agisse des SCOT ou des PDU. Ce travail est réalisé sérieusement, avec des gens qui utilisent des conseils techniques, des ingénieurs etc. Je ne crois donc pas que la planification soit complètement morte !

Laurent VULLIET

Au sujet du sens critique : une piste qu'il conviendrait peut-être d'explorer est l'influence de la normalisation dans l'ingénierie, en particulier dans l'ingénierie civile ou celle du bâtiment. Des pays comme les Etats-Unis, qui sont en avance en matière de technologie, ont dans des domaines comme le nôtre un retard considérable sur l'innovation, retard lié en particulier à l'importance de la normalisation et de la législation, et donc des avocats qui entourent le système. Nous devrions peut-être suivre cette piste au siècle prochain, pour libérer la créativité et la critique.

Je ne suis pas sûr d'avoir complètement compris la remarque de François PERDRIZET sur le fait que l'EPFL n'est pas allée assez loin. En tout cas notre intention n'est pas de faire des ingénieurs bricoleurs ! Mais ingénieux et faisant de l'utile, oui !

En matière de développement territorial, on distingue bien en allemand entre *Raumplanung* et *Raumdenkung*. J'aimerais, pour ma part, que l'ingénieur se rapproche de cette réflexion sur la pensée territoriale, le *Raumdenkung*. C'est un projet ambitieux, qui est même un projet de société. Notre intention est que les ingénieurs et les architectes formés dans notre école puissent être des partenaires pour formuler des propositions et répondre aux attentes de cette pensée territoriale. Concernant la question sur la conscience de l'ingénieur du 21^{ème} siècle, je laisse le soin d'y répondre à notre modérateur !

Pierre VELTZ

C'est vrai que le scientifique est tout le temps en train de se critiquer - c'est la base même de son métier - ou de se faire critiquer par la communauté, c'est ainsi qu'avance la science. Les ingénieurs aussi se font critiquer - quand Michel VIRLOGEUX parle des ponts des autres, il ne se prive pas, quelquefois, d'être un peu critique, et la réciproque est vraie ! Mais pour l'ingénieur, le critère principal - bien plus que les outils, la culture professionnelle ou la formation - c'est l'action, qui permet de résoudre les problèmes. Alors que pour le scientifique, le critère est la vérité.

Sur l'enseignement du malheur, je ne suis pas sûr d'avoir bien compris l'intervention de François PERDRIZET. En fait je crois que ce qui caractérise aussi l'ingénieur, c'est une capacité d'optimisme. Et c'est cet optimisme qui l'aide dans l'action, même lorsqu'il s'agit de s'attaquer à tous les malheurs du monde et de transformer cette fichue planète !

Un mot sur la planification : elle n'est peut-être pas morte, mais convenez qu'elle est bien malade ! Cela étant dit, je ne suis pas sûr qu'il y ait des raisons objectives à cela. Certains disent que c'est dû à la complexité du monde d'aujourd'hui : mais le monde était déjà complexe du temps des Grecs et des Romains, les lois de la nature étaient les mêmes.... Je crois plutôt que nous sommes prisonniers de l'air du temps, qui de manière insidieuse a dissipé progressivement cette idée de planification, nous avons un peu perdu la foi en elle. Mais le mouvement n'est peut-être pas irréversible. Après tout, l'avenir n'est peut-être pas si indécidable, il dépend beaucoup de nous, et pas seulement du *fatum* ou de la destinée. Donc ce serait bien de continuer à faire de la prospective.

Une dernière réflexion : je crois que les ingénieurs deviennent de plus en plus invisibles dans cette société ; leur rôle est très important mais ils sont de plus en plus dans les *back office*. Reprenons l'exemple du téléphone : si l'essor du téléphone traditionnel a été visiblement le fait des ingénieurs, aujourd'hui les ingénieurs qui travaillent pour Nokia par exemple ne sont pas visibles ; on voit par contre les vendeurs et les responsables de marketing. Aujourd'hui, dans les entreprises et dans la société en général, on a une très forte promotion des métiers de *front office*, ceux qui sont en première ligne avec le client ; les ingénieurs sont de plus en plus discrets, invisibles, ils sont dans les *back-office* - lesquels peuvent être énormes -, avec des métiers d'ailleurs très variés.

Certes l'ingénieur des Ponts, et plus généralement l'ingénieur de notre corporation au sens large, celui qui travaille dans l'aménagement, doit aller quelquefois en première ligne : on peut difficilement installer des lignes à haute tension en *back office* !

Dans une certaine mesure, cette évolution du mode d'exercice du métier d'ingénieur (avec cette position à l'arrière-plan) dévalue la profession, puisque ce sont les financiers et les gourous du marketing qui prennent le premier rang, y compris dans les entreprises techniques. Et d'une certaine façon, c'est justifié,

puisque la stratégie de vente est centrale. Mais il y a un risque que les problèmes de démocratie technique qu'évoquait si bien Georges MERCADAL finissent par être plus ou moins camouflés. Et c'est vrai que, comme le disait Nicolas Bouleau, on risque d'avoir une grande opposition entre nos pays, où les questions de débat public et d'acceptabilité sociale sont devenues absolument centrales, et des pays comme la Chine ou l'Inde, et les pays émergents d'une manière générale, où, croyez-moi, les ingénieurs y vont franchement !

Georges MERCADAL

Sur la planification, mon expérience à partir du débat public est la suivante : quand il n'y a pas de plan, tout le monde en réclame, quand il y en a un, personne n'y croit ! Certes il faut des plans, mais croire que tout le monde va être d'accord si on dit « c'est inscrit dans le plan, donc il faut le faire » est une illusion. Aller vers la société oblige à découvrir à chaque pas cette ambiguïté, cette contradiction du plan.

S'appliquer la critique à soi-même ? Il me semble que mon propos sur l'acceptation des controverses va bien dans ce sens. A la base des controverses qui sont issues du public, il y généralement cette idée que le progrès technique n'est pas nécessairement bon, et qu'il faut donc le passer au crible.

La conscience de l'ingénieur ? L'adage est certes toujours d'actualité, mais la question posée est « qu'est-ce que la conscience d'aujourd'hui ? » ou tout au moins « où faut-il la chercher ? » : au fond de soi ? Je ne le pense pas.

Dans une interaction dialectique avec la société ? oui ! Encore faut-il savoir initier cette interaction. Et c'est tout ce que j'ai entendu sur l'ingénieur cet après-midi – l'ingénieur qui conçoit, qui propose, qui est ingénieux, inventif – me paraît fondamental : la société ne réagit que si on lui lance une balle, et c'est alors que l'interaction se produit.

La société a d'ailleurs parfois elle-même des intuitions, notamment dans nos domaines, parce que tout le monde conduit, utilise de l'eau, etc. Il faut donc non seulement proposer des choses, mais il faut également être réceptif à ce qu'elle exprime, à ce qui émane d'elle. Comme le disait Bernard LASSUS, il faut se laisser guider par l'intuition, par le ressenti, par les mouvements de l'âme, le cas échéant la colère, pour exciter son imagination, la faire aller dans le sens du public et amorcer l'interaction.

Un mot, pour finir, sur l'invisibilité de l'ingénieur, évoquée par Pierre VELTZ. Dans les débats publics, le public demande que l'ingénieur se sorte de ces grandes institutions dans lesquelles il s'abrite, où il s'encoconne. Il veut voir quelqu'un, et non un individu sans nom qui lui parle de telle circulaire, de telle constante, de tel plan... Il veut voir quelqu'un qui lui parle vrai.

Et je pense que si l'ingénieur décide de jouer sincèrement le débat public et l'interaction avec la société, – ce n'est pas toujours confortable pour lui –, il peut s'en trouver stimulé, ce qui va l'aider à évoluer, à se montrer. Il n'est pas exclu que ça lui pose des problèmes, et que ces problèmes doivent être résolus sans doute au niveau de la déontologie. On le sent nettement dans les débats publics : on sent que l'ingénieur, derrière son micro, se dit « *si je dis ça, demain que va dire mon patron ? mais si je ne le dis pas, alors les gens qui sont en face vont me prendre pour rien du tout...* ». C'est dur, mais c'est à mes yeux manifestement un élément de progression.

Merci.

Bertrand FABRE

Je voudrais remercier l'ensemble des conférenciers de la journée, qui ont tous été passionnants. Merci également aux présidents de séquence. Un grand merci, enfin, à vous tous, qui avez posé plus de questions que prévu. Avant de donner la parole à Claude MARTINAND pour la clôture de cette journée, je voudrais souhaiter un excellent anniversaire au Conseil général des Ponts et Chaussées, et le remercier d'avoir organisé ce colloque, où nous avons beaucoup appris mais aussi et surtout où nous avons tout au long de la journée et jusqu'à la dernière seconde été incités à réfléchir davantage et à approfondir nos réflexions sur des questions-clés. Je remercie les organisateurs de nous avoir offert un tel moment, et nous espérons que des actes permettront d'en garder la mémoire.

ALLOCUTION DE CLÔTURE

Claude MARTINAND, vice-président
du Conseil général des Ponts et Chaussées

Clore un tel colloque est d'autant plus difficile qu'il s'agit, en réalité, d'ouvrir des perspectives de réflexion et d'action, avec les éclairages (non exhaustifs bien sûr) que j'ai pu tirer de l'écoute de cette journée. Le faire dans l'enceinte du Conseil économique et social, où j'ai eu l'honneur de siéger pendant les cinq dernières années, invite à profiter de la qualité de l'architecture des frères Perret, bien sûr, et de la diversité des débats pluralistes qui s'y déroulent, tous les quinze jours, le mardi et le mercredi après-midi.

Jean-Pierre GIBLIN a supposé que le terme « ingénieur » avait une origine bien connue. Est-ce si sûr ? Sait-on, en tout cas, que c'est le résultat d'une convergence entre *ingenium*, l'engin des sièges cher à Archimède ou à Vauban, et *genius*, d'où découle le terme de « génie », bon ou mauvais naturellement, le génie militaire à l'origine, puis le génie civil au sens large, comme le disait notre ami de Lausanne, et puis le génie rural, le génie urbain – que je me suis efforcé de préciser, et tous les génies qui ont fleuri depuis ? L'ingénieur ne reste-t-il pas une sorte de demiurge qui fait du rêve une réalité et passe avec aisance du virtuel au réel ? Nous en avons eu des exemples ce matin.

Un clin d'œil à l'histoire, puisque nous fêtons un bicentenaire. Le corps des Ponts voit le jour en 1716. Jacques GABRIEL a été le Premier Ingénieur du Roi, puis est devenu le Premier Architecte du Roi, cette dernière fonction étant, à l'époque, plus prestigieuse que la première. L'École nationale des Ponts et Chaussées a été créée en 1747. Le CGPC, pratiquement tel qu'il est aujourd'hui, a été institué par décret impérial du 25 août 1804, même si déjà à partir de 1754 Daniel TRUDAINE réunissait régulièrement l'assemblée des inspecteurs généraux dans sa propriété le dimanche matin pour examiner les projets, échanger sur le fonctionnement des services, les législations, les réglementations, et faire progresser l'expertise collective de cet ensemble d'ingénieurs.

L'évolution du rôle d'ingénieur, depuis plus de deux siècles, est riche d'enseignements et met en évidence une capacité d'adaptation remarquable. Je regrette qu'Antoine PICON dans son ouvrage « l'art de l'ingénieur » se soit arrêté à 1850, car on ne sait pas avec autant de précision ce qui s'est passé depuis. En tout cas, dès l'origine, les ingénieurs sont des ingénieurs formés sur le tas (et donc aussi des architectes) sur la base de projets concrets d'une part, et par compagnonnage et par enseignement mutuel, d'autre part. Depuis, les professions n'ont cessé de se différencier et de se distinguer, et de se « bagarrer » à l'occasion. Les ingénieurs, comme les architectes d'ailleurs, veulent être des ensembliers, des intégrateurs (comme l'a rappelé Bernard DECOMPS), dans la construction de bâtiments et d'ouvrages, dans l'aménagement ou l'embellissement des villes. Mais cette revendication est-elle totalement légitime ? On peut en douter au regard des interventions de cette journée.

Le croisement des cultures, ou la coopération des cultures auxquelles nous a invités Jean FREBAULT est une étape de ce rapprochement nécessaire, incontournable, et de cette coopération nouvelle qu'il faut essayer de construire entre des professionnels, qui doivent chacun disposer de compétences particulières assez poussées. Il n'y a pas de spécialistes de la généralité : chacun doit avoir approfondi, au cours de sa carrière, un certain nombre de domaines avec suffisamment de sérieux.

Le vocabulaire a évolué depuis deux siècles :

- Au début, on disait « ponts et chaussées », terme qui est tellement désuet que finalement on ne peut plus l'abandonner. J'ai tenté de changer le nom du Conseil général des Ponts et Chaussées, mais un concours d'idées n'a rien donné de probant.
- ensuite on a eu le terme de « travaux publics », au 19^{ème} siècle, qui d'ailleurs avait un sens beaucoup plus large que la Fédération des travaux publics d'aujourd'hui. Le ministère s'appelait ministère des travaux publics, il avait été créé vers 1835 par détachement du ministère de l'intérieur.
- Aujourd'hui, depuis 1966, on parle d'« équipement », avec les directions départementales de l'Équipement, qui sont symbolisées par les petites voitures orange. Mais ce terme est-il encore totalement pertinent ? En 1966, nous étions quasiment au terme des Trente Glorieuses et à l'aube de la première crise pétrolière. Cette notion productiviste (l'équipement) était peut-être, dès cette période, inadéquate.

Quoi qu'il en soit, notre maison mère est à l'aube d'une « nouvelle refondation » – c'est un terme que le Ministre de tutelle a lui-même utilisé – rendue nécessaire tout à la fois par une deuxième étape de la décentralisation, par la réforme de l'Etat (notamment la réforme budgétaire), la construction européenne, l'internationalisation à laquelle a fait allusion Pierre VELTZ, et l'intrusion de la société civile et des nouvelles technologies de l'information dans nos domaines. Il se trouve qu'hier, d'ailleurs, le Ministre a précisé à ses directeurs les grandes orientations qui doivent devenir les nôtres sur le terrain, au niveau départemental et régional comme au niveau central, car l'administration centrale est appelée à évoluer également. Une nouvelle fois, notre maison devra démontrer son aptitude à se remettre en cause, à se redéfinir, à se replacer au milieu d'un contexte en forte évolution, de manière à mieux répondre aux attentes de la société et aux défis que l'avenir nous promet.

Finalement, de quoi sommes-nous chargés, nous les ingénieurs des corps techniques d'Etat ? Je parle bien sûr des ingénieurs relevant du ministère de l'équipement, de ceux formés par l'Ecole nationale des ponts et chaussées, par l'Ecole nationale des travaux publics de l'Etat, et par d'autres écoles qui nous ont rejoint maintenant, celles de l'aviation civile, de la météorologie et des sciences géographiques.

Le terme d'équipement me paraît aujourd'hui inadéquat. Je préfère, pour ma part, le terme d'aménagement, qui prendra probablement une place prédominante à l'avenir, notamment pour le nom de nos directions générales en région. Je souhaite aussi, comme certains l'ont dit, que la notion de service (le service du public) soit placée au centre de nos préoccupations, en tout cas plus que par le passé. Plus précisément (et c'est un de mes dadas, pas toujours partagé), nous nous occupons de réseaux, de territoires et de leurs interactions intimes, et ce à différentes échelles, du niveau local au niveau européen (j'ai fait partie du groupe de réflexion créé par Bruxelles sur les réseaux trans-européens) voire international, et à différents horizons temporels. Ces réseaux sont à la fois des réseaux d'infrastructure, des réseaux d'infostructure et des réseaux de services.

Pour nous, il ne s'agit pas seulement de maîtriser des techniques, mais de s'inscrire dans des démarches de développement durable, que nous nous efforçons de faire notre, avec ses trois piliers dont aucun ne doit prévaloir sur les autres. A cet égard, je crois qu'on réduit souvent, à tort, le développement durable à l'environnement, c'est un obstacle majeur à l'appropriation de cet enjeu par nous autres ingénieurs.

Il ne faut pas oublier les deux autres piliers, le développement économique et le progrès de la société, et même j'ai tendance à penser que ce sont eux qu'il faut d'abord mettre en avant, pour revenir bien sûr ensuite à la protection de l'environnement.

On n'a pas toujours parlé d'économie dans la journée, et pourtant l'économie est centrale dans nos missions. Nous avons toujours été des ingénieurs économistes – on peut le vérifier dans l'histoire – et Jules DUPUIT a formalisé ce qui était déjà dans les esprits : la notion d'utilité publique ou du bien commun, et quelles sont les réalisations qu'il faut choisir ou préconiser pour faire avancer la société.

J'ajoute que nous avons fait – et nous faisons toujours – beaucoup de droit, dans ce domaine aussi il y a des progrès, des innovations à opérer. Par exemple le nouveau contrat de partenariat à fait, que j'ai un peu porté sur les fonds baptismaux, en est une illustration récente. Et sa gestation contestée va, j'en suis sûr, lui donner une vitalité nouvelle pour réaliser de nouveaux services ou de nouvelles infrastructures. Monter un contrat, le négocier, définir un cahier des charges, contrôler sa réalisation, le solder... sont autant de tâches pour l'ingénieur, qui doit pour cela allier des connaissances techniques, la comptabilité, l'économie, la finance et le droit. Jean-Paul TEYSSANDIER a peu parlé de sa concession de Rion-Antirion, mais il faut savoir que c'est la concession qui a rendu possible le financement de cet ouvrage.

J'ai tendance à dire que le péché mignon des ingénieurs c'est le perfectionnisme technique. C'est vrai que ce perfectionnisme, s'il n'est pas soumis à des forces de rappel (qui sont liées à l'économie ou à la finance), est dangereux. Dans le même temps, je dois reconnaître que ce péché mignon est le moteur des progrès majeurs que l'on fait, comme vous avez pu le faire dans le cas de Rion-Antirion.

J'en viens maintenant à la question de la maîtrise sociale des systèmes techniques. Jacques ELLUL nous a expliqué que les ingénieurs étaient les maîtres du monde et que personne ne pouvait empêcher le développement des technologies, que la société ne pouvait pas les maîtriser. Je pense que c'est profondément inexact, même s'il est vrai que la maîtrise sociale des technologies n'a fait jusqu'à présent que des progrès limités. Peut-être notre attitude, qui n'est pas toujours faite de modestie et d'écoute, et notre capacité de dialogue doivent-elles faire des progrès sensibles à cet égard. J'ai tendance à dire qu'il faut des ingénieurs responsables et cultivés. Ils l'étaient dès le 18^{ème} siècle : il suffit de lire les copies qu'on leur faisait rédiger

sur l'utilité publique des projets ou la manière dont ils voyaient leur rôle dans la société. J'aime bien le terme d'« impliqué », effectivement : les ingénieurs seront d'autant plus responsables et cultivés qu'ils adhéreront pleinement au paradigme du développement durable, que moi-même j'essaie d'illustrer, par un avis que j'ai fait adopter dans cette instance, à l'unanimité ce qui n'allait pas de soi, y compris le principe de précaution.

Quant à l'intérêt général, je crois qu'il faut le déconstruire. Et Georges MERCADAL nous a parfaitement expliqué comment on peut reconstruire un « intérêt général procédural » - comme disent les Américains - par le débat public entre les différentes valeurs portées par les différents acteurs de la société en présence. Qu'il nous faille des ingénieurs toujours généralistes et managers, mais qui aient reçu une formation scientifique et technique de haut niveau, qui les mette en relation directe avec la recherche et l'innovation, peut-être davantage que par le passé, c'est ce que la matinée nous a permis d'analyser et de comprendre. Encore convient-il de noter que l'Université, en privilégiant les sciences d'analyse plutôt que les sciences de l'action et de la conception - pour reprendre les concepts que développe souvent Pierre VELTZ -, ne nous facilite pas la tâche, pour essayer d'avoir une forme de recherche et une forme d'innovation qui collent à nos missions sociales et techniques.

Le défi que nous a lancé précisément Bernard DECOMPS ce matin, d'essayer de construire un PhD technologique, un PhD par alternance, à spectre large, fondé à la fois sur une démarche scientifique exigeante mais aussi sur une pratique concrète permettant de se confronter à la réalité de la matière et de la société, me paraît effectivement la question la plus importante qui ait été posée aujourd'hui.

Aujourd'hui, nous avons oscillé entre le rêve et la réalité, entre le virtuel et le réel. Je forme le vœu que nous relevions ce défi lancé par Bernard DECOMPS, et plus généralement d'ailleurs sur ce que seront les ingénieurs de demain. Nos sociétés auront sans doute encore besoin d'ingénieurs dans le futur, peut-être moins d'ingénieurs des corps d'Etat, notamment dans le cadre européen. En tout cas, que cette journée nous permette d'avancer en ce sens, et que l'art de l'ingénieur dans les prochaines décennies, face au 21^{ème} siècle, qui sera forcément européen et internationalisé, devienne réalité. En la matière, nous avons beaucoup à apprendre des pays voisins ou des Etats-Unis. Pierre VELTZ a beaucoup œuvré en ce sens et je pense qu'il va continuer à nous aider sur cette voie.

Un mot, pour finir, pour Georges MERCADAL. Pour ma part, j'ai participé à trois débats publics. Je pense que c'est une épreuve considérable pour des ingénieurs, et qu'ils en sortent enrichis ou détruits. Mais peut-être l'ascèse maximale à laquelle nous pourrions accéder c'est d'être en mesure de renoncer à un projet à l'issue d'un débat : là je crois qu'on aura compris vraiment ce qu'est un débat public et son utilité.

Merci.

Contact

Conseil général des Ponts et Chaussées : elisabeth.libraire-biausser@equipement.gouv.fr

Site internet

<http://rp.equipement.gouv.fr/bicentenaire-cgpc/home.htm>

