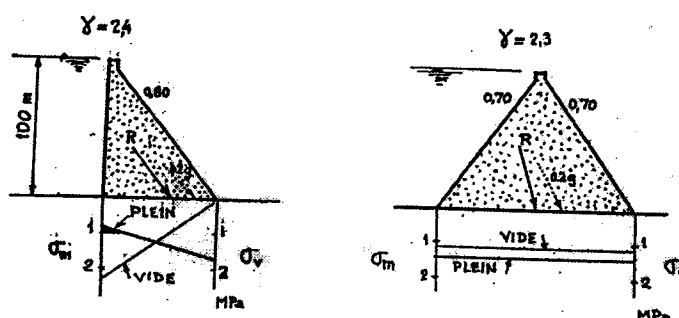


# La sécurité des grands ouvrages



## *Hommage à Pierre Londe*

19 octobre 2000

*sous le patronage du*

CADAS

Conseil pour les applications de l'Académie des sciences

*avec le parrainage de*

Association française des travaux en souterrain (AFTES)

Comité français de géologie de l'ingénieur et de l'environnement (CFGIE)

Comité français des grands barrages (CFGGB)

Comité français de mécanique des roches (CFMR)

Comité français de mécanique des sols et de géotechnique (CFMS)

*et le soutien de*

Électricité de France (EDF)

**Presses** de l'école nationale des  
**Ponts et chaussées**

# Science et règlement

JEAN SALENÇON

*Conseil général des ponts et chaussées*

*Laboratoire de mécanique des solides - Ecole polytechnique*

Le titre de cet exposé est une évocation de ma dernière conversation avec Pierre Londe. Nous étions dans la cour de l'Institut en début d'après-midi le 14 décembre, deuxième mardi du mois c'est-à-dire jour de la réunion du CADAS, à laquelle Pierre me disait qu'il n'assisterait pas car il avait un rendez-vous. Je lui ai alors dit qu'il m'arrivait souvent de réfléchir à sa formule « *Plus de science dans les règlements* » et il m'a répondu « *Mais cette phrase, elle est de toi !* » Nous nous sommes quittés en nous souhaitant mutuellement une bonne fin d'année...

C'est autour de cette phrase, quel qu'en soit l'auteur, que sera articulée cette brève contribution : placer le concept dans son contexte, en dégager, sans prétendre à l'exhaustivité, quelques éléments de signification puis des conséquences sur la formation en Génie civil.

## **1 « INTRODUIRE PLUS DE SCIENCE DANS LES REGLEMENTS »**

Pierre Londe fut en 1982 l'un des seize membres fondateurs du CADAS. Le CADAS avait alors pour mission d'étudier, pour l'Académie des sciences, « les questions décisives pour l'évolution des choix techniques, notamment en ce qui concerne les interactions entre la recherche fondamentale et le développement industriel » comme l'exprime la présentation du CADAS dans (CADAS, 1985). C'est ainsi que le génie civil fit rapidement l'objet du rapport (CADAS, 1985).

Pierre Londe fut l'animateur du Groupe de travail qui comprenait Mme Brachet, MM. Cabanius, Couprie, Lampérière, Vidal et auquel MM.

Causse, Fillet, Malinvaud et moi-même avons apporté un concours dans la mise au point finale.

Après avoir analysé les causes de la crise du génie civil français, le groupe de travail proposait dans ce rapport six mesures propres à favoriser une relance, parmi lesquelles :

- « une révision de la politique de formation des ingénieurs et des techniciens qui devra s'ouvrir davantage aux acquis scientifiques récents
- une remise en cause et une réforme des règlements et des normes pour les adapter aux conditions des grands marchés internationaux. »

La recommandation qui explicitait cette dernière mesure était la suivante :

*« Il est nécessaire d'harmoniser l'ensemble des normes et règlements qui ne font plus autorité face à ceux des grands pays étrangers. Il s'agit en premier lieu de mettre en cohérence règlements et normes, et d'introduire dans leurs procédures d'élaboration assez de souplesse pour qu'ils soient rapidement adaptables à l'évolution des techniques et au développement de nouveaux matériaux. Il convient aussi d'introduire plus de science dans les règlements<sup>1</sup> pour qu'ils ne constituent pas, comme c'est trop souvent le cas, un frein à l'innovation mais qu'ils en soient, au contraire un moteur. Il est notamment recommandé d'accroître, au sein des instances compétentes en place, la participation des professionnels, concepteurs et constructeurs, en raison de leur aptitude à apprécier objectivement les limites et la valeur réelle des innovations techniques. »*

Telle est l'origine de notre propos.

Le CADAS a continué de manifester son intérêt pour le génie civil. La représentation du secteur s'y est trouvée renforcée et diversifiée par l'élection de membres et d'associés représentant plusieurs générations. En 1995, parut un nouveau rapport (CADAS, 1995). Pierre Londe et Marc Panet étaient les animateurs du groupe de travail qui était constitué de MM. Biarez, Causse, David, Fillet, Frybourg, Parriaud, Pecker, Tardieu, Virlogeux et moi-même, et auquel Mme Brachet, MM. Dautray, Funck-Brentano et Perrier ont apporté leur concours pour la mise au point finale. On peut remarquer que, si le souci manifesté dix ans plus tôt de disposer de règlements évolutifs et ouverts est à nouveau exprimé à propos d'une codification technique bien conçue, aucune référence à la « science » n'apparaît plus. C'est la crainte d'une normalisation « à caractère académique » qui est explicitement exprimée, en particulier à propos de l'élaboration de la réglementation européenne dans le domaine parasismique, à laquelle s'ajoute le danger d'une « normalisation à dominante étrangère ».

*« Par ailleurs, au niveau européen, les groupes de travail (Project Teams) chargés de la rédaction des futures normes sont presque exclusi-*

<sup>1</sup> Les caractères gras ont été ajoutés ici.

*vement constitués d'universitaires. Même si beaucoup d'universitaires étrangers sont plus proches de la profession que leurs collègues français, les ingénieurs praticiens participants aux groupes de travail sont essentiellement des français ; ceci est tout particulièrement vrai dans le cadre de la réglementation parasismique. Le danger est donc grand de voir s'imposer dans les années futures, une codification technique conçue et faite par des universitaires et de mise en œuvre pratique délicate... »*

*Enfin, ..., l'élaboration, la mise en œuvre et l'utilisation d'une bonne codification technique passent nécessairement par un souci accru de formation, de recherche et de développement. Ce ne sont pas les règlements, même bons, qui font les bons projets ; rien ne remplace l'imagination, l'expérience et la compétence des ingénieurs de haut niveau. »*

Seul un rapprochement superficiel des citations qui précèdent pourrait faire croire à un changement de doctrine. Ce serait admettre que la « science » est synonyme d'académisme et est l'apanage des universitaires, eux-mêmes nécessairement inconscients des réalités de la pratique. Dans leur rapport de 1985 Pierre Londe et son groupe avaient tenu à expliquer la signification de leur recommandation :

*« Il faudrait préciser clairement dans les textes, les hypothèses faites pour chaque formulation, les domaines d'application, les possibilités et conditions d'écart. C'est bien cela que nous voulons dire par « introduire plus de science ». .... Plus de science ne veut pas dire plus de complication mais plus de réflexion. »*

C'est d'un appel à la compréhension, à l'intelligence des phénomènes et des théories qu'il s'agit.

Dans un ouvrage antérieur (Salençon, 1983), nous avons tenté, dans un schéma sans doute simpliste, d'illustrer quelques réflexions sur le concept de coefficient de sécurité. L'évolution de la réglementation, notamment par la référence aux états limites avec l'implantation des coefficients de sécurité partiels, conduit évidemment à modifier un tel schéma sans en abandonner l'esprit (figure 1).

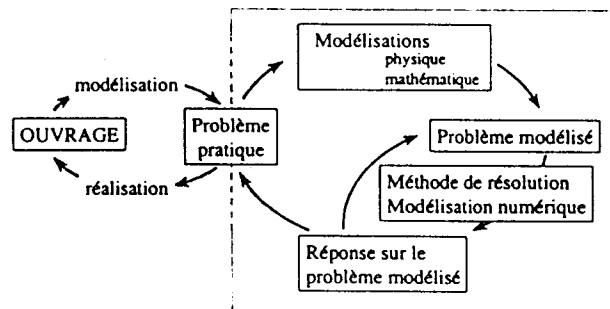


Figure 1. Démarche schématique

L'idée est de faire apparaître toutes les étapes de modélisation qui permettent de passer d'abord de l'ouvrage en projet à un problème « pratique », par exemple de géotechnique, puis de ce problème pratique à un problème modélisé. Cette deuxième étape inclut d'abord une modélisation physique qui dégage les phénomènes à prendre en considération et est, en quelque sorte, à caractère qualitatif, elle-même suivie de la modélisation mathématique. (C'est là notamment que l'on introduira, si nécessaire, les approches probabilistes comme modélisations du caractère aléatoire des sollicitations ou de la variabilité des caractéristiques mécaniques). Sur le problème modélisé peuvent être mises en œuvre diverses méthodes de résolution, en règle générale approchées, tantôt heuristiques, tantôt fondées sur des résultats théoriques établis. Le plus souvent à travers une ultime modélisation, à caractère numérique cette fois, on aboutit à une réponse pour le problème modélisé.

Le schéma indique alors un premier « bouclage » nécessaire : il s'agit de la validation de cette réponse du point de vue du problème modélisé, suivant la méthode utilisée et la façon de la mettre en œuvre (cf. par exemple (Salençon, 1994)).

Le deuxième bouclage doit être envisagé du point de vue du problème pratique. Il s'agit cette fois de vérifier a posteriori la pertinence de la modélisation qui a conduit au problème modélisé et d'évaluer l'adéquation de la réponse obtenue.

Un dernier bouclage est représenté, qui vise à rappeler que l'aboutissement du processus est la réalisation de l'ouvrage et que celle-ci dépend de l'état de la pratique, à côté de l'état de l'art représenté par les étapes précédentes.

Le règlement vise à dispenser le projeteur de s'interroger sur tout ou partie de ces étapes, à travers l'application d'une codification précise, mais on voit sur ce schéma combien l'interprétation « académique » du mot science dans le titre de ce chapitre serait restrictive. Certes il convient, dès que cela est possible, de faire bénéficier le schéma précédent du progrès des connaissances scientifiques, mais cela concerne essentiellement la première boucle et les étapes de modélisation qui permettent de passer du problème pratique au problème modélisé. A ce stade il est important de rappeler que la mathématisation ne constitue en soi nullement un critère de rigueur, pas plus que le raffinement d'une modélisation ou d'un schéma numérique n'est une garantie de pertinence.

« Plus de science » traduit en fait le souhait de faire apparaître une démarche plus scientifique, consciente d'abord des hypothèses impliquées par les modélisations sous-jacentes et, dès lors, de leurs limites de pertinence, consciente aussi de ce que des méthodes de calcul et de dimensionnement historiquement validées peuvent et doivent être remises en cause par l'apparition de matériaux nouveaux, pratiques nouvelles de mise en œuvre, approches théoriques nouvelles, etc. La souplesse revendiquée ne doit pas être caricaturée comme un « laisser-faire » mais comme la possibilité ouverte

« ... à l'ingénieur de déroger à la réglementation, charge à lui d'apporter toutes les justifications nécessaires » (CADAS, 1995)

reprenant ainsi à son compte les diverses validations apparentes sur le schéma de la figure 1.

## 2 QUELLE SCIENCE DANS LA FORMATION ?

Cette approche souhaitée pour la réglementation suppose évidemment que l'ingénieur soit en mesure, par la formation qu'il a reçue initialement, et qu'il continue de recevoir, de dégager l'essentiel du conjoncturel, voire de l'anecdotique même historique, et de faire des choix éclairés, en pleine conscience des diverses étapes dont il a été question plus haut et des domaines de pertinence des modélisations impliquées. Ceci amène à une réflexion sur la formation en génie civil (peut-être de portée plus générale ?) qui semble être à l'ordre du jour dans de nombreux pays comme en témoignent les congrès et conférences consacrés à ce thème : à titre d'exemples la session spéciale Education in civil engineering de la 11<sup>ème</sup> Conférence Panaméricaine de mécanique des sols et de géotechnique (Mitchell, 2000 ; Sayão & Graham, 2000) ou la First PanAmerican Conference on the Teaching Learning Process of Geotechnical Engineering, Oaxaca, Mexique, novembre 2000.

*"I no longer teach the Swedish Method of Slices". The first author was discussing the teaching of undergraduate soil mechanics at a meeting of educators at an annual Canadian Geotechnical Conference in Saskatoon. The audience consisted of university professors and senior representatives of industry who are, of course, also educators and engineers. The Swedish Method is based on faulty assumptions and is no longer used. It can reasonably be omitted and replaced with something more valuable. The reaction at the meeting was interesting. The university people were upset that this old standard solution had been left out; the engineers from industry were generally supportive.*

*While this is an isolated example, it may represent an unfortunate understanding about what constitutes the "basic" knowledge of geotechnical engineering that is needed as young engineers complete their university studies and enter general civil engineering practice. The "basics" should not simply mean material that the academics learned when they were students.*

*Teaching in civil engineering has often been based on fairly traditional presentations of long-established solutions and ideas. In recent years, there also appears to be trend towards "training" of technological facts at the expense of fundamentals. When new "flavours of the month" arrive, narrowly defined factual knowledge is added; no topics are deleted.*

*In our opinion, insufficient attention has been directed to the fundamentals of these new topics, or to better ways of learning long established but still important topics."*

C'est Jim Graham qui s'exprime ainsi dans un texte récent consacré à la formation en géotechnique (Graham & Sivakumar, 2000). Il n'est pas de notre propos de discuter ici du bien-fondé de l'exemple choisi (la méthode des tranches) et des critiques qui lui sont faites, mais de tenter de dégager quelques idées fortes de portée générale, abstraction faite de son contexte spécifique lié à la formation anglo-saxonne.

L'idée principale développée par Jim Graham est la nécessité, du point de vue de la durabilité et de l'efficacité à long terme de la formation donnée aux ingénieurs, d'un solide fondement théorique général permettant d'organiser les connaissances et susceptible de favoriser l'invention. *"As educators in civil engineering, we should educate our graduates for practice in the future, not train them for present (or past) practice."*

*"If knowledge of fundamentals is important because it is needed for future learning and professional development, then we must go "Forward to the basics". A reactionary emphasis on "Back to basics" is not acceptable."*

Cet « **Aller au fondamental** » semble provocateur. Il signifie que, dans l'esprit de l'auteur, il ne s'agit évidemment pas d'un recul mais d'une avancée. Il est un préalable à l'étude et la pratique des méthodes, pour en éviter l'absorption passive et, par la suite, l'application sans discernement.

*"There is a sense that our graduates may be over-trained and under-educated (Fontane, 1986). ...*

*So the question arises, should we be teaching more fundamentals, more detailed skills, more codebook design? ... Put simply, should we emphasise "teaching" or "learning"?*

*"It is strange that we expect students to learn, yet seldom teach them anything about learning" (Norman, 1980). ...*

*As educators, we often concentrate on providing students with our perception of what they need to know. We appear to believe that students cannot learn unless they are taught.*

*"The mind is not a receptacle; information is not education" (Tadmor et al., 1987).*

*Burland (1987) reminded us of the same idea used by Inglis in 1941 in an address to the Institution of Civil Engineers in London:*

*"The soul and spirit of education is that habit of mind which remains when a student has completely forgotten everything he has ever been taught" (sic).*

Cette dernière citation n'est pas sans rappeler une phrase célèbre attribuée à Édouard Herriot à propos de la culture. La formation est ici clairement posée comme l'objectif. L'enseignement est un moyen. Il doit aider l'étudiant à apprendre, comprendre, s'approprier. C'est dans le but de mieux soutenir cette démarche en favorisant la synthèse et l'articulation des connaissances que l'auteur souhaite une meilleure présence de l'enseignement des concepts fondamentaux.

Traditionnellement, la formation dispensée dans les écoles d'ingénieurs françaises n'était pas réputée manquer de bases fondamentales. Les mathématiques y étaient largement présentes mais leur utilisation comme instrument de sélection ne favorisait pas nécessairement le plaisir à les utiliser ensuite et à compléter les connaissances. Les grandes disciplines de base telles que la Physique, la Mécanique, étaient enseignées préalablement aux disciplines plus appliquées de l'ingénieur et toutes suivaient une démarche « du général au particulier » propre, en apparence, à satisfaire les souhaits exprimés par Jim Graham<sup>2</sup>. L'adaptabilité des bons ingénieurs ainsi formés est reconnue, notamment par nos collègues des universités étrangères (américaines en particulier).

Nous savons toutefois qu'une telle formation n'est pas non plus sans présenter des lacunes lorsqu'elle n'est pas complétée par une immersion dans un milieu plus pragmatique : confiance absolue dans les modélisations apprises, dans les méthodes interprétées comme des dogmes, souvent par manque d'esprit critique, engendrés par une trop grande habitude des « figures imposées », des problèmes bien posés qui permettent l'évaluation linéaire des étudiants sur une base réputée impartiale ! Paradoxalement aussi, on peut craindre qu'une part trop importante dévolue à l'enseignement encadré ne favorise une certaine passivité vis à vis de la démarche de recherche personnelle, notamment en ce qui concerne la documentation.

On serait tenté, par analogie avec le premier chapitre, de résumer le plaidoyer de Jim Graham par « Introduire plus de science dans la formation ». Dans notre contexte, c'est plus, sinon surtout, d'une redéfinition de la science dans la formation et de la façon de l'enseigner pour qu'elle soit utile qu'il s'agit. La citation initiale comporte, de ce point de vue, une remarque essentielle quant à la définition des connaissances fondamentales qui insiste sur l'examen critique que doivent en faire, en continu, les formateurs : l'antériorité ou l'habitude que l'on a de tel concept ou de telle méthode ne suffisent pas à justifier son maintien au rang de fondamental. Par ailleurs, revenant à titre d'exemple sur la méthode des tranches, nous souhaiterions tempérer le propos de Jim Graham. Si les arguments avancés justifient qu'elle ne soit plus enseignée, il est en revanche important de la choisir comme cas d'étude pour exercer l'esprit critique des étudiants et aussi pour leur faire percevoir que la pluralité des méthodes d'analyse de qualité variée est le reflet de la complexité des phénomènes auxquels l'ingénieur est confronté et de son agilité pour tenter de les modéliser compte tenu des moyens (analytiques, numériques,...) dont il dispose à un instant donné. Plus encore, s'agissant de géotechnique et, plus généralement, de mécanique, science physique quotidienne, il est essentiel qu'une telle méthode fondée sur l'intuition fasse l'objet d'une analyse malgré, ou peut-être même à cause de, ses « incohérences » théoriques.

---

<sup>2</sup> « *There are educational advantages when a student's understanding of soil behaviour is developed as an extension of the linear elasticity that was presented in an earlier Materials course.* »



### 3 CONCLUSION

*“One of our colleagues has expressed it like this. If a visitor asks how to get from Queen's University to downtown Belfast, then we can do two things. We can tell her to turn right on University Road; then, at Shaftesbury Square, take Great Victoria Street, etc. That is, we can teach a path to follow. Alternatively, we can use a map to show where the university is located relative to downtown, and let her find her own way. The teaching of paths is efficient, though not effective if a mistake is made. Maps convey relationships. Mistakes can be made, but it is still possible to reach the desired outcome.*

*We suggest our programs may place too much emphasis on teaching paths and not enough emphasis on getting to know the map. Traditional teaching tends to produce students whose minds are full of paths, but who are unsure about relationships. They rely on their memories instead of their brains. The fault does not lie with the students but rather, with an instructional system that trains rather than educates (Matthews and Hughes, 1993).”*

Cette dernière citation (Graham & Sivakumar, 2000), rappelle la différence entre information et formation (Tadmor et al., 1987) et met l'accent sur l'importance de la structuration des connaissances. Il s'agit d'un point de réflexion crucial au moment où des formations sont proposées sur la Toile par des universités sans murs (Académie des sciences, 2000). Cette offre nouvelle devrait permettre de répondre au besoin de diversité en matière de formation. Il est essentiel de reconnaître que chaque individu possède ses goûts et cheminements intellectuels privilégiés qui, en l'état actuel de l'offre de formation, ne se trouvent qu'imparfaitement satisfaits. On peut souhaiter que la possibilité soit désormais offerte à un étudiant, voire encouragée du point de vue de la diversité culturelle, de choisir certains éléments de sa formation dans l'offre faite par une institution différente de celle dont il dépend principalement, sous réserve d'en assurer la cohérence d'ensemble. Cette suggestion vaut tout autant pour la formation initiale que pour la formation continuée.

Nous terminerons par une dernière citation extraite de (CADAS, 1985) :

*« ... pour le génie civil, plus que pour tout autre domaine, le témoignage personnel du professeur, son « aura » même, est de la plus haute importance. Les meilleurs ingénieurs savent ce qu'ils doivent à quelques grands maîtres... »*

Pierre Londe était de ceux-là.

### 4 BIBLIOGRAPHIE

Académie des sciences, 2000. Accès de tous à la connaissance, Préservation du cadre de vie, Amélioration de la santé. *Rapport à Monsieur le Président de la République. TEC & DOC, Lavoisier, Paris.*

- CADAS, 1985. Le Génie civil. Rapport du Comité académique des applications de la science. *Gauthier-Villars, Paris*.
- CADAS, 1995. Les grands ouvrages du génie civil. *CADAS, Rapport n° 15, TEC & DOC, Lavoisier, Paris, 1995*.
- Burland, J.B. 1987. The teaching of soil mechanics – a personal view. The Nash Lecture. Proc. 9<sup>th</sup> European Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, *Dublin, Ireland, 3*, pp. 1427-1441.
- Fontane, D. 1986. Report by Education Committee of ASCE technical Council on Computer Practices. *Report by K. A. Godfrey, Civil Engineering, ASCE 57(6m), 74-75*.
- Graham, J. 1993. Innovate and enjoy. *Proc. Conf. on Innovation and Change in Civil Engineering Education. Belfast, April 1993. F.R. Montgomery (ed), The Queen's University of Belfast, pp. 257-266*.
- Graham, J. & Sivakumar, V. 2000. Forward to the Basics – Modernising Education for Geotechnical Engineering. *Southampton, 2000*.
- Matthews, R.G.S. & Hughes, D.C. 1993. Civil engineering education – time for a rethink? *Proc. Conf. on Innovation and Change in Civil Engineering Education. Belfast, April 1993. F.R. Montgomery (ed), The Queen's University of Belfast, pp. 9-18*.
- Mitchell, J.K. 1999. Education in geotechnical engineering – its evolution, current status, and challenges for the 21<sup>st</sup> century. Keynote address, *Proc. 11<sup>th</sup> PanAmerican Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Fos do Iguaçu, Brazil, 3*.
- Norman, D.A. 1980. Cognitive engineering and education. *In Problem solving and education: issues in teaching and research. D.T. Kuma & F. Reif (eds), Erlbaum, 1980, pp. 689-691*.
- Salençon, J. 1983. Calcul à la rupture et analyse limite. *Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris*.
- Salençon, J. 1994. Approche théorique du calcul aux états limites ultimes. *In Les grands systèmes de la science et de la technologie. J. Horowitz & J.L. Lions (eds), Masson, Paris, 1994, pp. 701-722*.
- Sayão, A. & Graham, J. 1999. Report on Specialty Session 3: Education in civil engineering. *Proc. 11<sup>th</sup> PanAmerican Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Fos do Iguaçu, Brazil, 3, August*.
- Tadmor, Z. et al. 1987. Basic versus specialized education – the “Science Revolution”. *Report to Technion, Israel, summarised in Engineering Education 78(2), 105-110*.

Jean SALENÇON  
Conseil général des ponts et chaussées  
Laboratoire de mécanique des solides  
Ecole polytechnique  
91128 Palaiseau cedex