

Géotechnique et intelligence artificielle (fin): systèmes experts, réseaux de neurones artificiels, approches probabilistes, logique floue et leurs applications en géotechnique - gadgets ou nouvelles perspectives?

Autor(en): **Dudt, Jean-Paul**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Ingénieurs et architectes suisses**

Band (Jahr): **119 (1993)**

Heft 19

PDF erstellt am: **21.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-78072>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Géotechnique et intelligence artificielle (fin)¹

Par Jean-Paul Dudt,
ingénieur
des Mines de Paris
ISRF-LMR-GC-EPFL
1015 Lausanne

Systèmes experts, réseaux de neurones artificiels, approches probabilistes, logique floue et leurs applications en géotechnique – gadgets ou nouvelles perspectives?

Approches probabilistes

Contexte

Les calculs géotechniques classiques se font habituellement à l'aide de modèles mathématiques où le comportement des matériaux est décrit par un certain nombre de paramètres déterministes comme la déformabilité, la résistance, les charges, les conditions initiales, etc.

Or, on sait que ces modèles, censés représenter le comportement réel des phénomènes étudiés, sont souvent plus ou moins valides et complets, et parfois, il existe même plusieurs modèles différents pour rendre compte d'un même phénomène. Par ailleurs, les valeurs des paramètres géotechniques sont plus ou moins fiables, selon leur provenance (résultats d'essais, appréciations subjectives de spécialistes, ...), et contiennent souvent une certaine part d'aléatoire, car même si elles sont issues d'essais adéquats, elles sont variables dans l'espace et le temps, et les reconnaissances ne peuvent jamais être exhaustives.

La méthode classique pour tenter de pallier ces difficultés est de recourir à des études paramétriques en essayant de cerner au mieux le domaine de variation des différentes grandeurs aléatoires et en effectuant des calculs pour les valeurs extrêmes, ou en recoupant, le cas échéant, les résultats donnés par plusieurs modèles. Il a fallu attendre les années 1970 pour que les géotechniciens apprécient la pertinence des méthodes probabilistes pour traiter efficacement de telles incertitudes. Nous allons en présenter les principaux domaines d'application actuels en géotechnique, sans entrer dans le détail de la théorie des probabilités élémentaires qui est largement connue de nos jours.

Méthodes probabilistes en géotechnique

On distingue actuellement trois principaux domaines d'application:

- la description statistique des paramètres et le calcul de leur corrélation;

- le calcul de la *fiabilité*² d'ouvrages construits ou de risques naturels (glissements de terrain), c'est-à-dire la probabilité qu'ils ne se rompent pas;
- la simulation de la construction de grands ouvrages dans des conditions aléatoires (recherche opérationnelle).

Description statistique des paramètres géotechniques

Les différents paramètres géotechniques peuvent être décrits statistiquement de façon plus ou moins détaillée, selon l'information disponible. Généralement, on s'intéresse:

- aux bornes (valeur maximale et minimale);
- aux premiers moments statistiques comme la moyenne et la variance;
- à une approximation avec une distribution connue, comme la distribution uniforme, normale, exponentielle, log-normale (distributions continues) ou binomiale, de Poisson (distributions discrètes), caractérisées par un certain nombre de paramètres (généralement un ou deux pour les distributions classiques). Il faut noter que certains auteurs aiment bien utiliser les distributions bêta, malgré qu'elles nécessitent quatre paramètres, car elles permettent de décrire une grande gamme de formes de distributions continues.

Les calculs de régressions et de corrélations permettent de chiffrer l'influence d'un paramètre lorsque cela n'est pas possible avec un modèle fonctionnel (sans pour autant légitimer des relations de cause à effet).

Calculs de la fiabilité d'ouvrages

Les analyses de stabilité déterministes consistent à calculer les sollicitations et la capacité de l'ouvrage grâce à des modèles mathématiques et avec des valeurs des paramètres éventuelle-

ment déjà pondérées, et d'en déduire un facteur de sécurité. Un ouvrage est alors réputé conforme si ce facteur de sécurité est supérieur à un certain seuil, dépendant de l'utilisation de l'ouvrage. Cela mène généralement à un dimensionnement conservateur, donc cher, mais estimé sûr.

Dans une approche probabiliste, on utilise en principe les mêmes modèles mathématiques, mais on les applique à des paramètres aléatoires pour obtenir une distribution probable des sollicitations et de la capacité de l'ouvrage et pour en déduire la marge de sécurité (ou, inversement, la probabilité de rupture).

La formulation mathématique des modèles géotechniques conduit généralement à un ensemble d'équations différentielles à variables aléatoires dont la résolution n'est pas toujours aisée. Lorsqu'il existe une solution analytique simple et que les distributions des variables sont connues, on peut éventuellement déterminer directement la distribution résultante. Sinon, il faut utiliser des techniques spéciales qui s'adaptent plus ou moins bien selon les situations.

- La méthode de Rosenblueth s'applique lorsque le problème connaît une formulation analytique. Elle consiste à réduire les distributions des variables continues en des estimations ponctuelles (en général deux points situés à un écart type de part et d'autre de la moyenne) et à résoudre l'équation pour chaque estimation, ce qui donne des estimations ponctuelles pour la solution. La perte d'information due à la réduction de la distribution à quelques points est habituellement jugée admissible.

- Le développement en séries de Taylor est utilisé lorsque la solution des équations différentielles se présente sous la forme d'une fonction plusieurs fois dérivable par rapport aux paramètres et lorsqu'on connaît un certain nombre de moments de leurs distributions. On peut alors calculer directement les moments de la solution en utili-

¹/AS N° 12 du 26 mai 1993, pp. 204-209

²Les géotechniciens n'utilisent pas le terme de fiabilité dans son sens scientifique (probabilité de survie en fonction du temps), mais simplement comme synonyme d'*analyse probabiliste de la stabilité*.

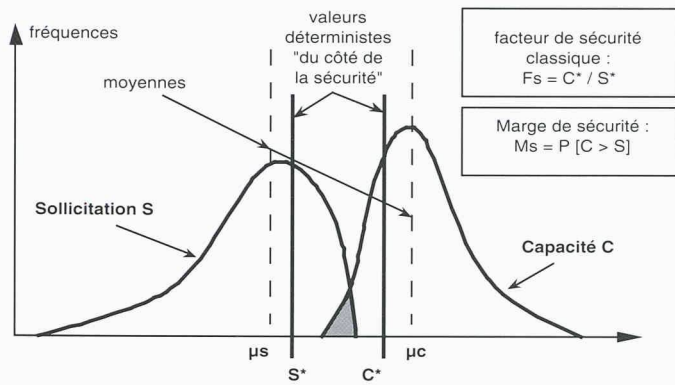


Fig. 7. — Schéma de distributions de la capacité et des sollicitations d'un ouvrage. La figure montre comment un facteur de sécurité bien supérieur à 1,00 n'exclut pas la possibilité de rupture, même s'il a été calculé avec une certaine marge, et on peut s'imaginer comment un même facteur de sécurité peut correspondre à des probabilités de ruine très différentes, suivant la forme des deux distributions. La probabilité de ruine, c'est-à-dire que les sollicitations dépassent la capacité, peut être approximée par la surface hachurée si celle-ci est petite et lorsque les deux distributions sont indépendantes.

sant les propriétés de l'espérance, de la variance et des moments d'ordre supérieurs appliqués à une fonction linéaire.

- La méthode de Monte-Carlo est beaucoup plus générale, car elle ne demande pas nécessairement une expression analytique de la solution, mais une formulation en terme de processus stochastique. Elle donne une distribution complète de la solution. Le principe repose sur des réalisations aléatoires des variables selon leur distribution, chaque jeu de paramètres menant à une valeur possible de la solution. L'inconvénient de la méthode est le nombre extrêmement grand de simulations nécessaires pour bien couvrir le domaine de variation de chaque paramètre, donc de la solution. Par ailleurs, elle nécessite un bon générateur de nombres aléatoires.

La figure 7 montre le résultat typique d'un calcul de la fiabilité d'un ouvrage dans le cas général où la capacité et la sollicitation ont des valeurs aléatoires.

Simulation de la construction de grands ouvrages

Parallèlement aux questions de faisabilité technique, la construction de grands ouvrages soulève souvent aussi des problèmes d'ordre économique et politique liés au coût, à la durée de construction, aux atteintes à l'environnement, etc. Des méthodes de simulation probabilistes permettent d'évaluer de telles grandeurs ainsi que leur distribution en fonction de l'incertitude sur les paramètres entrant en jeu, qui peuvent être d'ordre technique mais aussi économique, social ou politique.



Fig. 8. — Exemple de résultats de simulations de la construction d'un tunnel. Les points de même symbole correspondent à des constructions à travers le même profil géologique. Une disposition telle que celle-ci permet de conclure que l'incertitude de la géologie prime sur celle des données constructives.

Un tel simulateur, développé par H. H. Einstein au MIT et complété avec notre collaboration, a été appliqué au tunnel de base sous le Saint-Gothard pour comparer les incertitudes quant au coût et à la durée de construction selon plusieurs variantes. L'input, fourni par les géologues et les ingénieurs sous forme probabiliste, les incertitudes reflétant l'avancement du projet, consiste en:

- une estimation de la distribution des paramètres géologiques et géotechniques le long du tracé;
- la définition de classes de terrain à partir de la combinaison de ces paramètres;
- les données constructives par classe de terrain (pouvant aller d'une simple fourchette des avancements et coûts à une indication détaillée de toutes les activités élémentaires par cycle d'avancement pour chaque classe).

Chaque simulation se fait en deux temps: le programme établit d'abord un profil géologique possible en se basant sur les distributions probables des paramètres fournis par le géologue; ensuite il simule la construction cyclique des différents ouvrages (tunnels, galeries, puits, ...) à travers cette géologie. A un instant donné, le front de chaque tronçon se trouve dans une certaine classe de terrain et les valeurs correspondantes de la vitesse d'avancement et du coût au mètre linéaire sont réalisées selon la méthode de Monte-Carlo à l'intérieur de la fourchette de valeurs relative à cette classe. De cette manière, on peut simuler des variations de performances pour des cycles consécutifs, même si la géologie reste constante, conformément à ce qui se passe en

réalité. On couvre l'ensemble des situations qui peuvent se présenter en simulant plusieurs centaines de profils géologiques et en considérant plusieurs constructions à travers chacun de ces profils. Le résultat d'une telle série de simulations est un diagramme temps-coûts qui peut être utilisé pour des analyses de risques (fig. 8).

Apports et limites des méthodes probabilistes

Contrairement aux approches déterministes, les théories probabilistes permettent d'apprécier le risque par un traitement adéquat de l'aléatoire, sans perte ni altération de l'information par des pondérations arbitraires durant le traitement des données. Elles donnent une information supérieure à celle obtenue par les méthodes déterministes, qu'elles englobent, notamment pour apprécier la probabilité de ruine de façon plus nuancée qu'avec un simple facteur de sécurité. Elles permettent aussi une étude correcte d'ouvrages présentant plusieurs modes de rupture interdépendants, comme par exemple un mur de soutènement susceptible de céder par poinçonnement, par renversement ou par glissement, car elles tiennent compte de cette interdépendance.

Avec la définition du coût d'un ouvrage comme la somme du coût de construction et du risque, lui-même produit de la probabilité de ruine par le coût de la défaillance, on peut procéder à des optimisations entre une construction extrêmement légère (minimisant le premier terme et maximisant le second) et très lourde (maximisant le coût de la construction et minimisant le risque).

Si l'approche probabiliste représente

donc une avancée intellectuelle importante, elle rencontre encore des obstacles de taille du point de vue pratique. Le premier est d'ordre financier: les coûts d'une information suffisante pour permettre une description satisfaisante des paramètres sont généralement trop élevés et on ne dispose donc souvent que de peu de valeurs.

Une autre difficulté a été soulevée par Magnan, qui a montré sur une étude de cas d'ouvrages de génie civil, que l'écart entre observations et prévisions est avant tout dû à la méconnaissance des lois de comportement des terrains, aux imperfections des modèles de calcul et à des informations insuffisantes, l'incertitude statistique sur les valeurs des paramètres ne jouant qu'un rôle secondaire. On surestime d'ailleurs toujours en considérant les terrains comme des milieux homogènes dont les propriétés suivent la loi de distribution issue des essais. Il serait plus correct de voir ces distributions comme des lois de variation spatiale dans un terrain hétérogène, auquel cas un phénomène de compensation réduit de façon drastique la variabilité dès que les volumes de terrains impliqués deviennent conséquents. De tels phénomènes peuvent d'ailleurs être modélisés facilement avec la méthode par éléments finis par variation aléatoire des paramètres comportementaux d'un élément à l'autre.

Il est aussi nécessaire de porter l'effort sur l'amélioration des modèles explicatifs, ou du moins d'inclure l'incertitude induite par les modèles utilisés directement dans l'analyse de fiabilité, car le biais, c'est-à-dire l'erreur systématique induite par des modèles inadéquats, est généralement beaucoup plus important que l'influence de la variabilité des paramètres. Si de telles incertitudes sont souvent appréciées subjectivement, elles peuvent aussi être évaluées statistiquement, comme le montre Ronold, qui propose une méthode objective pour déterminer le biais sous forme de variable aléatoire par comparaison des prédictions du modèle avec les observations correspondantes.

Logique floue

Contexte

Comme son nom ne l'indique peut-être pas, la logique floue (ou plus exactement la théorie des sous-ensembles flous) est une théorie mathématique rigoureuse, adaptée pour traiter ce qui est subjectif et/ou incertain. Dans la palette des degrés d'incertitude, on distingue en effet plusieurs niveaux:

- l'incertitude totale ou combinatoire, lorsqu'on ne dispose absolument d'aucune information sur le système;
- l'incertain partiel (on dispose d'informations, mais elles sont insuffisantes pour des calculs de probabilités): c'est le domaine de la logique floue;
- l'aléatoire (le hasard), qui est du ressort des approches probabilistes;
- le «certain», traité avec la logique formelle.

Plusieurs de ces approches sont souvent associées dans un même raisonnement, comme le montre l'exemple d'illustration suivant. Supposons que sur le tracé d'un tunnel futur, une zone aux caractéristiques mécaniques extrêmement mauvaises ait été reconnue en surface et qu'on veuille apprécier le risque qu'elle présentera lors du percement. Parmi les paramètres importants pour une telle estimation figurent la hauteur de couverture, la résistance du terrain, la longueur sur laquelle la zone mauvaise sera traversée, etc. Ces paramètres peuvent avoir des caractères différents:

- la hauteur de couverture est incontestablement déterministe;
- si des essais de résistance ont été effectués, ce paramètre peut être considéré comme aléatoire;
- la longueur, étant évaluée subjectivement par le géologue d'après son expérience et selon son interprétation de la nature géologique de la formation en question, son appréciation du pendage des couches, etc., on parlera de grandeur incertaine.

Il faut bien voir que la longueur d'interception n'a aucun caractère aléatoire, car en réalité elle est unique, et il serait absurde de vouloir faire des

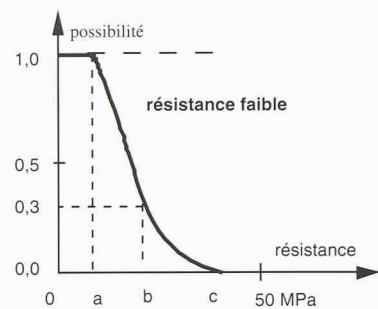


Fig. 9. - Exemple d'une fonction d'appartenance définissant un terrain de faible résistance. Cette fonction permet de décider si une roche de résistance r est à classer dans les terrains de faible résistance.:

- si $r < a$: la roche a une résistance faible;
- si $r > c$: la roche n'a pas une résistance faible;
- si $r = b$: la possibilité que la roche ait une résistance faible vaut 0,3.

calculs de moyenne et d'écart type sur elle. Sa valeur est tout simplement incertaine et est évaluée de façon subjective: on dit alors que la longueur d'interception est *floue*, et c'est la logique floue qui s'adapte le mieux à son traitement.

Contrairement aux probabilités, la théorie des sous-ensembles flous est une branche mathématique récente: ce n'est qu'au milieu des années 1960 qu'ont été publiés les premiers travaux sur les *fuzzy sets* par leur pionnier L. A. Zadeh. Depuis, un grand nombre de livres et d'articles ont paru sur le sujet, et il n'est pas possible de faire le tour de la question ici. Nous nous limiterons à situer la logique floue par rapport à la démarche probabiliste, en insistant sur le fait que les deux ne sont en principe pas concurrentes (la logique floue étant utilisée là où l'information à disposition est insuffisante pour un traitement probabiliste), puis nous présenterons un exemple d'application.

Quelques notions élémentaires de logique floue

L'idée centrale de la logique floue est la notion de *possibilité*, qui est le pendant des probabilités d'occurrence. Les possibilités sont des nombres compris entre 0 et 1, dont le maximum sur l'ensemble de définition vaut 1 (contrairement aux probabilités, où c'est la somme qui vaut 1). La possibilité conjointe d'événements indépendants est le minimum des possibilités individuelles, et la possibilité de l'union en est le maximum (principe dit du *min-max*).

Pour illustrer les opérations élémentaires sur les sous-ensembles flous, supposons qu'on veuille définir les propriétés «terrain à résistance élevée» et «terrain à faible résistance» au moyen de la résistance à la com-

pression simple. En logique floue, on utilisera les *fonctions d'appartenance* (fig. 9), auxquelles on peut non seulement appliquer des opérateurs classiques (l'union, la complémentation), mais aussi n'importe quel opérateur sémantique tels les superlatifs, les relatifs, etc. (fig. 10).

Les α -coupures dans des fonctions d'appartenance sont par définition des intervalles de valeurs à des niveaux de possibilité donnés (fig. 11). Un sous-ensemble flou peut être caractérisé par un ensemble de α -coupures aux niveaux 0,0; 0,1; 0,2; ...; 0,9 et 1,0 par exemple, au lieu d'être représenté par une courbe.

Les *nombre flous* sont des nombres qui ne sont pas connus avec précision. L'ensemble des nombres flous est muni d'opérations comme l'addition, la soustraction, la multiplication et la division qui sont définies sur la base des α -coupures. La figure 12 montre un nombre flou représentant une longueur.

Contrairement aux fonctions classiques, les *relations floues* permettent de faire correspondre à chaque élément d'un ensemble de départ plusieurs éléments de l'ensemble d'arrivée, chaque relation ayant un certain niveau de certitude.

Il existe également des *opérateurs flous*, dont les plus connus sont la somme et le produit algébrique

$$x \oplus y = x + y - xy$$

$$x \otimes y = xy$$

souvent utilisés pour combiner des coefficients de vraisemblance de plusieurs règles dans les systèmes experts.

Les théories de logique floue peuvent également rendre service lors de

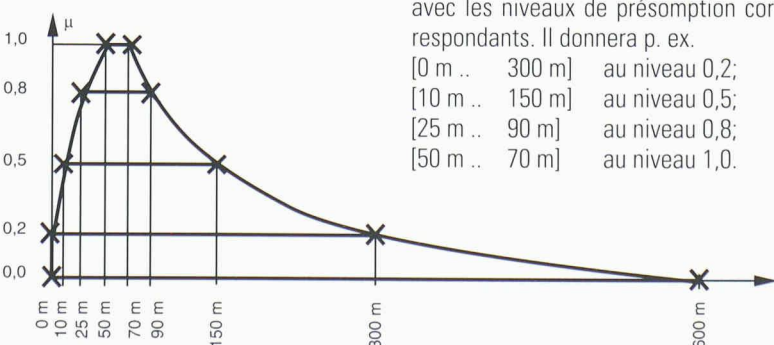


Fig. 12. — Nombre flou «longueur d'une zone géologique» tel qu'il peut résulter d'une interview de géologue.

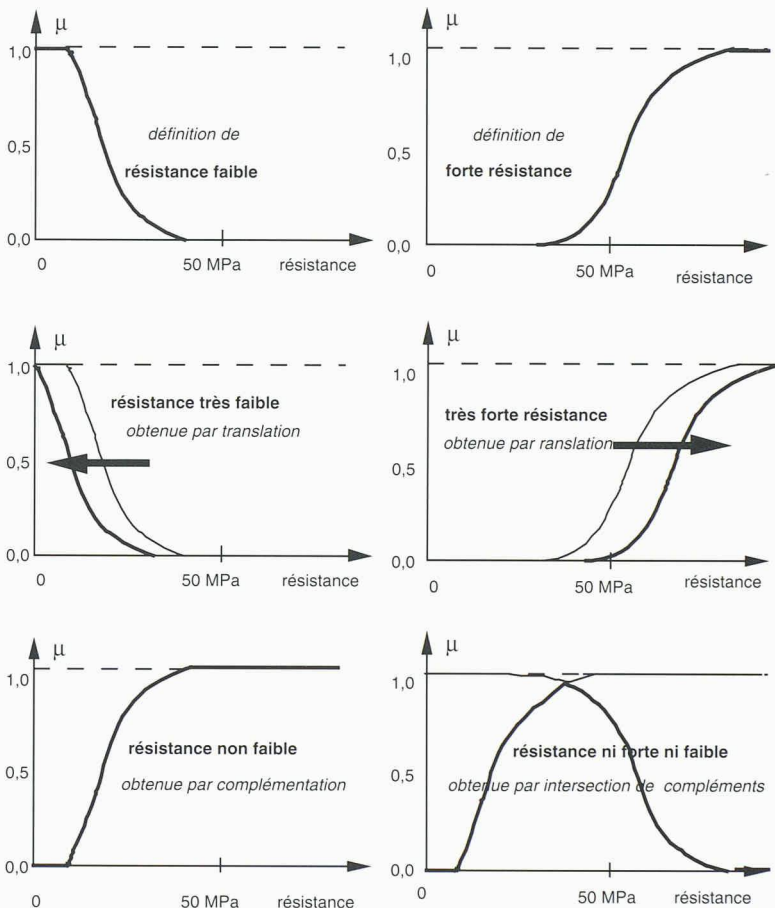


Fig. 10. — Illustration de quelques opérations possibles sur des fonctions d'appartenance.

prises de décisions dans l'incertain, quand on ne peut pas utiliser les modèles formels ou aléatoires. Lorsqu'un géologue doit évaluer la distance sur laquelle une certaine zone sera traversée par un tunnel à grande profondeur, comme dans notre premier exemple, on lui demandera d'abord de donner subjectivement une estimation des bornes supérieure et inférieure. Il répondra p. ex. 0 m et 600 m. Puis on lui demandera progressivement des fourchettes de plus en plus précises avec les niveaux de présomption correspondants. Il donnera p. ex.

- [0 m .. 300 m] au niveau 0,2;
- [10 m .. 150 m] au niveau 0,5;
- [25 m .. 90 m] au niveau 0,8;
- [50 m .. 70 m] au niveau 1,0.

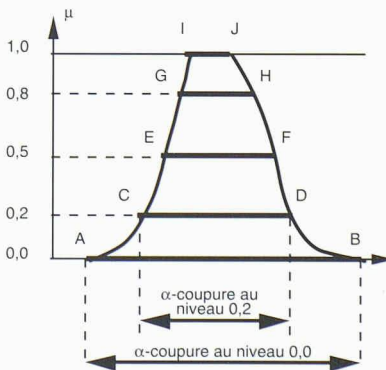


Fig. 11. — Illustration des α -coupures. AB, CD, EF, GH et IJ représentent des α -coupures d'une fonction d'appartenance aux niveaux 0,0; 0,2; 0,5; 0,8 et 1,0.

Notre géologue aura alors, sans le savoir, construit le nombre flou «longueur de la zone» représenté à la figure 12 et qui pourra p. ex. être utilisé dans un simulateur comme celui décrit plus haut.

Exemple d'application

Les notions élémentaires présentées aux paragraphes précédents ont déjà été illustrées par les exemples d'une longueur floue et d'une résistance de roche incertaine. Le troisième exemple dont il sera question ici est une application de la logique floue à un système expert, qui en représente une des utilisations classiques.

Prenons l'exemple d'un système expert (SE) pour prédire l'adéquation des différents modes de soutènement classiques d'un tunnel en fonction des conditions rencontrées, le degré d'adéquation pouvant aller de *particulièrement recommandé* à *impossible* en passant par *possible* et *inadapté* (selon la classification proposée par l'A.F.T.E.S.³). Pour construire ce SE, il faut trouver un certain nombre de règles permettant de conclure qu'un soutènement est inadéquat, recommandé, etc. Or un tel ensemble de règles n'est jamais homogène, soit que certaines règles sont issues de la littérature et d'autres proviennent d'experts plus ou moins fiables, soit que l'expert lui-même dise que telle conclusion est plus sûre que telle autre. Une technique classique pour différencier la validité des règles consiste à leur attribuer des coefficients de vraisemblance, sur lesquels sont applicables toutes les opérations de logique floue définies sur les possibilités.

Comme illustration, supposons qu'on ait trouvé deux règles R_1 et R_2 concluant à l'inadéquation d'un soutè-

nement par ancrages à scellement ponctuel, la première provenant de la littérature, la seconde ayant été obtenue lors de l'interview d'un expert.

R_1 : Si la résistance du terrain est faible, alors les ancrages à scellement ponctuel sont inadéquats.

R_2 : Si le terrain est soluble, alors les ancrages à scellement ponctuel sont inadéquats.

On attribuera subjectivement un coefficient de vraisemblance $CV_1 = 0,8$ à R_1 et $CV_2 = 0,9$ à R_2 (l'avis d'un expert est plus fiable...).

Une fois qu'on a formalisé un ensemble de telles règles et qu'on leur a attribué des coefficients de vraisemblance, la construction du SE s'achève par la définition des *fonctions d'appartenance* relatives à toutes les notions floues comme «la résistance du terrain est faible», «le terrain est soluble», etc. Une telle fonction est représentée à la figure 13.

Lors de l'exécution, le SE commence par «fuzzifier» tous les paramètres, c'est-à-dire à construire des nombres flous représentant les conditions actuelles, telles la résistance de la roche, sa solubilité, etc. Puis il passe en revue les différentes règles. Pour évaluer la règle R_1 , il estimera d'abord le degré de présomption de la proposition *la résistance de la roche est faible* par une opération de «min-max» entre la définition de la résistance faible et la résistance actuelle (figure 13). Supposons qu'on obtienne la valeur 0,60 comme niveau de certitude de cette proposition. La valeur de la conclusion *les ancrages à scellement ponctuel sont inadéquats* sera alors une combinaison entre la valeur des hypothèses et le coefficient de vrai-

semblance de la règle; on peut par exemple prendre le produit, ce qui donne $CV_1 = 0,6 \cdot 0,8 = 0,48$.

Le même raisonnement appliqué avec R_2 donne p. ex. la valeur $CV_2 = 0,70$. Les ancrages à scellement ponctuel seront alors inadéquats à la fois parce que la résistance du terrain est trop faible ($CV_1 = 0,48$) et parce que la roche est soluble ($CV_2 = 0,70$). La nouvelle valeur de vérité de la proposition est alors obtenue par somme algébrique:

$$CV = CV_1 \oplus CV_2 = 0,48 \oplus 0,70 = 0,48 + 0,70 - 0,48 \cdot 0,70 = 0,84$$

Si d'autres règles conduisent à la même conclusion, le raisonnement est identique, et la vraisemblance de la conclusion sera à chaque fois actualisée. Grâce à l'associativité de la somme algébrique, le résultat est indépendant de l'ordre d'application des règles.

Le résultat final fourni par le SE est un niveau de certitude pour l'adéquation de chaque mode de soutènement; ceux-ci pourront ensuite être reconvertis en réponses déterministes par des techniques de «défuzzification».

Perspectives de la logique floue

Cet aperçu sommaire de la logique floue en montre quelques possibilités et domaines d'application spécifiques. Les tenants de cette approche, qui est originale par rapport à la théorie probabiliste, soutiennent que les probabilités ne devraient être utilisées que pour les cas où il est possible de déterminer des fréquences. A l'inverse de ces «fréquentistes», d'autres auteurs pensent que les probabilités subjectives peuvent très bien être traitées par les théories probabilistes, et que la logique floue n'est qu'une mode qui n'a aucun avenir. Actuellement, le débat n'est pas clos, mais même si la logique floue devait retomber dans l'oubli, elle aura quand même permis d'ouvrir de nouvelles perspectives dans le traitement du subjectif. Le lecteur intéressé pourra consulter les ouvrages cités à la fin de l'article pour de plus amples détails.

Conclusion

Parmi les quatre aspects présentés, les deux premiers, c'est-à-dire les sys-

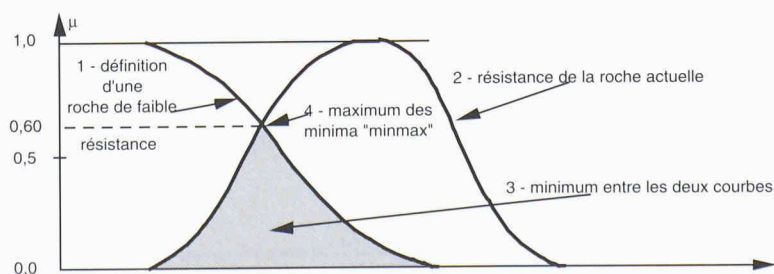


Fig. 13. - Evaluation de la valeur de vérité de la proposition la résistance de la roche est faible par la méthode «min-max». On détermine d'abord le minimum entre la fonction qui définit une roche de faible résistance et celle qui caractérise la résistance de la roche actuelle, puis on prend son maximum, ce qui donne la valeur 0,60 dans notre cas.

³Tunnels et ouvrages souterrains: «Texte des recommandations relatives au choix d'un type de soutènement en galerie», numéro spécial, avril 1981, pp. 32-43

tèmes experts et les réseaux de neurones artificiels, offrent de nouvelles perspectives dans la modélisation du raisonnement non formel tandis que les deux derniers, les probabilités et la logique floue, permettent une représentation opérationnelle des faits non déterministes. Ces nouvelles approches sont à priori séduisantes pour les géotechniciens qui côtoient quotidiennement des situations souvent difficilement modélisables et des matériaux dont la plupart des paramètres sont aléatoires, incertains, voire inconnus. Il est vrai que toute situation doit être traitée par les méthodes les plus objectives possibles, mais si un système est aléatoire ou incertain par nature, il vaut peut-être mieux utiliser des instruments adaptés à ces caractéristiques plutôt que de vouloir absolument le (mal)traiter avec des moyens «objectifs».

Dans le domaine de la géotechnique, l'ingénieur praticien se fie en général plus à son expérience personnelle qu'à la «science» et les résultats des calculs se situent encore trop souvent loin du comportement observé. Ces nouvelles approches permettront peut-être de réconcilier le praticien avec la «science» en intégrant l'expérience dans ses démarches et en offrant des perspectives de traitement adéquates de l'incertain et de l'aléatoire.

Bibliographie

Systemes experts

- [1] BAROUDI H.: «Choisir le soutènement des galeries: réalisation d'un système expert». Thèse INPL, Labor. de mécanique des terrains, Ecole des Mines, Nancy, déc. 1988
- [2] BONNET A., HATON J.-P., TRUONG-NGOC J.-M.: «Systemes Experts. Vers la maî-

trise technique». Inter Editions, Paris, 1986

- [3] CHARNIAK E., McDERMOTT D.: «Artificial intelligence». Addison-Wesley, 1985
- [4] DUDT J.-P.: «Système expert pour le choix du soutènement selon la méthode de l'AFTES dans le cas non déterministe». Proc. Journ. Etudes Int. AFTES (pp. 235-239), Lille, oct. 1990
- [5] FARRENY H.: «Les systèmes experts, principes et exemples». Cepadues-Editions, Toulouse, 1985
- [6] KOSTEM C., MAHER M.-L. (Ed.): «Expert systems in civil engineering». Proc. ASCE Symposium, Seattle, avril 8-9, 1986
- [7] SCHNUPP P., LEIBRANDT U.: «Expertensysteme nicht nur für Informatiker». Springer Compass, Springer Verlag, Berlin, 1986
- [8] TURING A.M.: «Computing machinery and intelligence». Computers and thought (pp. 1-35), ed. E. Feigenbaum and J. Feldman, McGraw-Hill, New-York, 1963
- [9] WALTERS J., NIELSEN N.R.: «Crafting knowledge based systems». John Wiley & Sons, 1988
- [10] WATERMAN D.A., «A guide to expert systems». Addison-Wesley, 1986

Reseaux de neurones artificiels

- [11] BLAYO F.: «Introduction aux réseaux de neurones». EPFL-DI, 1991
- [12] BLAYO F.: «Réseaux de neurones, apprentissage non-supervisé». Cours postgrade Réseaux de neurones biologiques et artificiels EPFL-DI, 1992
- [13] PLATT J.: «A resource-allocation network for function interpolation». *Neural Comp.* 3 (pp. 213-225), 1991
- [14] RUMELHART D.E., HINTON G.E., WILLIAMS R.J.: «Learning internal representations by error propagation». In Parallel distributed processing: explorations in the microstructures of cognition, Vol. 1, Rumelhard and McClelland (ed.), MIT Press (pp. 675-681), 1986
- [15] WEIGEND A.S., BERNARDO A.H., RUMELHART D.E.: «Predicting the future: a connectionist approach». *Int. Journal of Neural Systems* 1 (3) (pp. 193-209), 1990

Approches probabilistes

- [16] BOLLE A.: «Approche probabiliste en mécanique des sols avec prise en compte de la variabilité spatiale». Thèse de doctorat, ISRF, EPFL, Lausanne, 1988

- [17] BOURDEAU P.: «Analyse probabiliste des tassements d'un massif de sols granulaires». Thèse de doctorat, ISRF, EPFL, Lausanne, 1986
- [18] BOURDEAU P., GUTIERREZ A.: «Influence de la corrélation entre modes de défaillance sur le dimensionnement des soutènements massifs». Symp. on reliability-based design in civ. eng. (pp. 343-350), éd. P. Bourdeau, EPFL, Lausanne, juillet 1988
- [19] EINSTEIN H.H., DUDT J.-P., HALABE V.B., DESCEUDRES F.: «Decision Aids in Tunneling. Principle and Practical Application». Monograph. Swiss Federal Office of Transportation, Project Alp-Transit, Nov. 1992
- [20] HAAR M.E.: «Mécanique des milieux formés de particules». Traduit de l'américain par E. Recordon. Presses polytechniques romandes, Lausanne, 1981
- [21] HAAR M.E.: «Information: an engineering material». Symp. on reliability-based design in civ. eng. (pp. 1-11), ed. P. Bourdeau, EPFL, Lausanne, juillet 1988
- [22] MAGNAN J.-P.: «Place des analyses probabilistes dans la pratique des projets de géotechnique». Symp. on reliability-based design in civ. eng. (pp. 303-310), ed. P. Bourdeau, EPFL, Lausanne, juillet 1988
- [23] RONOLD K.O., BJERAGER P.: «Model uncertainty representation in geotechnical reliability analyses». *J. Geotech. Eng., ASCE*, 118 (3), (pp. 363-376), 1992
- [24] STOJANOVIC M.: «Probabilistic analysis of earth slopes». Thèse de doctorat, ISRF, EPFL, Lausanne, 1992

Logique floue

- [25] JUANG C.H., LEE D.H., SHEU C.: «Mapping slope failure potential using fuzzy sets». *J. Geotech. Eng., ASCE*, 118 (3), (pp. 475-494), 1992
- [26] KAUFMANN A.: «Initiation élémentaire aux sous-ensembles flous à l'usage des débutants». Tomes I-II-III. Cours postgrade Réseaux de neurones biologiques et artificiels EPFL-DI, Lausanne, 1992
- [27] KAUFMANN A.: «Introduction à la théorie des sous-ensembles flous». Tomes I-II-III-IV. Ed. Masson, 1973-1978
- [28] ZADEH L.A., FU K., TANAKA K.S., SHIMURA M.: «Fuzzy sets and their applications to cognitive and decision processes». Publ. Academic Press, 1974