

# Ingénierie en mécanique des roches : de nouveaux progrès en informatique comme moyen de traiter l'empirisme

Jack-Pierre Piguet

► **To cite this version:**

Jack-Pierre Piguet. Ingénierie en mécanique des roches : de nouveaux progrès en informatique comme moyen de traiter l'empirisme. 8. International Congress on Rock Mechanics (ICRM 1995), Sep 1995, Tokyo, Japon. pp.997-1003. ineris-00971944

**HAL Id: ineris-00971944**

**<https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-00971944>**

Submitted on 3 Apr 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Ingénierie en mécanique des roches: de nouveaux progrès en informatique comme moyen de traiter l'empirisme

Rock engineering: New progress in computer science as a way to deal with empiricism  
Gesteinstechologie: Neue Fortschritte in der Informatik die eine Möglichkeit bieten mit empirisch gewonnenen Daten umzugehen

J.P. PIGUET, Laboratoire de Mécanique des Terrains, Ecole des Mines de Nancy, INERIS, France

**ABSTRACT :** Engineers who have to face specific construction problems, in relation with soils and rock behaviour, have necessarily to deal with empiricism. The progress of computer science allowed them to modelize physical phenomena, with an exceptional accuracy and reliability. However, the comparison between models' results and actual behavior, bring them back to empiricism. It is why the artificial intelligence (expert-systems, neural networks..) can offer, to day, new and insufficiently developed ways of progress.

**RESUME :** Les ingénieurs confrontés aux problèmes de construction nécessitant la connaissance du comportement des matériaux naturels (sols, roches) doivent traiter avec l'empirisme. Les progrès de l'informatique ont permis de modéliser les problèmes physiques avec une précision et une fidélité inédites. Mais la confrontation des modèles avec le comportement réel des sites les ramène à l'empirisme. C'est pourquoi un autre domaine de l'Informatique, celui de l'intelligence artificielle (systèmes experts, réseaux neuronaux etc...) semble offrir des possibilités de progrès encore peu explorées et des possibilités prometteuses.

**ZUSAMMENFASSUNG :** Ingenieure, die spezielle, mit dem Gebirgsverhalten zusammenhängende Konstruktionsprobleme haben, müssen sich mit dem Empirismus befassen. Die Vortschritte der Informatik ermöglichen ein Modellieren der physikalischen Probleme mit einer noch nie dagewesenen Präzision und Genauigkeit. Die Konfrontation der Resultate dieser Modelle mit dem wirklichen Verhalten vor Ort führt sie jedoch zum Empirismus zurück. Deswegen bietet ein anderer Bereich der Informatik, die Künstliche Intelligenz (Expertensysteme, Neuronale Netze u.s.w.) vielversprechende und noch sehr unzureichend erkundete Möglichkeiten.

## I - INTRODUCTION

Le savoir-faire, et plus particulièrement le "savoir-construire" a bien souvent précédé la représentation formelle, conceptualisée et théorisée, des objets et ouvrages réalisés. Expériences réussies, ou, au contraire, échecs jalonnent le développement de la connaissance.

La Mécanique des Roches appliquée aux travaux des ingénieurs, est bien connue comme discipline "à données limitées", dans laquelle une large place est laissée à l'empirisme. Elle est en effet confrontée à des phénomènes gouvernés par des paramètres difficiles à identifier et à mesurer avec précision. La complexité du milieu rocheux en place, sa variabilité, sa faible accessibilité exposent les ingénieurs à la non représentativité des propriétés des échantillons analysés, ou encore aux risques d'artefacts lorsqu'ils mettent en oeuvre, in situ, des procédés de mesures indirects. En outre, les massifs rocheux ont une histoire qui détermine fondamentalement les conditions auxquelles ils sont soumis et dont la durée dépasse largement l'échelle de l'histoire humaine.

Sans minimiser les progrès considérables accomplis au cours des dernières décennies dans les moyens d'essais (en laboratoire comme in situ) et dans les approches conceptuelles (pour les roches fracturées ou poreuses par exemple, ou pour la prise en compte des phénomènes thermiques ou d'écoulements...), il n'en demeure pas moins que beaucoup de problèmes pratiques sont résolus par analogie avec des situations d'apparence similaire, déjà rencontrées auparavant. Ceci n'exclut pas nécessairement le recours aux calculs ou même le support d'une analyse théorique. Mais ces derniers seront utilisés parce qu'ils ont eux-mêmes fait la preuve, dans le passé, de leur pertinence pour résoudre des problèmes jugés analogues.

D'autre part, l'intégration des données qui alimentent les raisonnements des spécialistes, prend souvent la forme de règles principalement fondées sur l'expérience, sans référence à une analyse théorique.

L'exemple des classifications des massifs rocheux et de leur application au choix du soutènement en sont un exemple remarquable (Franklin 1993).

Cette empreinte profonde de l'empirisme en Mécanique des Roches, n'est pas, malheureusement, sans inconvénients :

- le savoir des experts reposant sur leur expérience personnelle est faiblement transmissible, dans la mesure où les raisonnements empiriques non formalisés sont difficiles à faire partager ou reproduire par d'autres. Se pose donc la question de la conservation de la connaissance,

- le domaine d'application des méthodes empiriques, même lorsqu'elles sont formalisées, est, en toute rigueur, limité aux conditions dans lesquelles l'expérience a été acquise. La transposition à d'autres champs est toujours problématique,

- même si l'efficacité des méthodes empiriques est avérée par un résultat visible, respectant un critère (la stabilité d'un ouvrage, par exemple), il est clair qu'on ne peut garantir que celui-ci est optimisé. La démonstration d'un "surdimensionnement" ne peut être faite que par une analyse théorique appropriée et/ou par une contre-expérience convaincante (qui, en bonne logique, devrait d'ailleurs conduire à modifier ultérieurement les règles empiriques). L'empirisme est mal adapté à l'optimisation, mono ou multicritère.

Face à ces questions, les récents et spectaculaires développements de l'informatique ont inspiré deux types de réponses : la sophistication de la modélisation numérique d'une part et, d'autre part, l'appel aux techniques de simulation informatique de l'intelligence humaine (un aspect de ce qui constitue les "sciences cognitives").

## II - MODELISATION NUMERIQUE DES OUVRAGES

Les modèles numériques en Mécanique des Roches, au sens où nous l'entendons dans ce texte, sont des représentations du domaine étudié incluant les ouvrages, qui respectent les dimensions et les conditions aux limites, et au sein desquelles sont résolues en tout point les équations différentielles (ou aux dérivées partielles) régissant les phénomènes physiques dont ils sont le siège. Cette résolution est effectuée numériquement, au moyen de diverses méthodes d'approximation, associées principalement à une discrétisation appropriée du milieu, à une discrétisation de certaines des fonctions calculées, et à des interpolations polynomiales dans des sous-domaines.

A priori, il s'agit d'une approche qui peut ambitionner de dépasser l'empirisme car elle s'appuie sur l'analyse et la formalisation de la réalité physique des phénomènes. Elle parvient à intégrer à l'heure actuelle, jusqu'à un certain point, les aspects les plus compliqués de ces phénomènes, ainsi que leurs couplages, et vise à donner, au moins pour partie, une représentation exacte et fidèle du système physique. En ce sens, elle s'apparente à l'approche "bottom-up" évoquée par (Hudson 1993).

On sait aujourd'hui étudier par exemple, à l'aide des codes de calculs par éléments finis, les comportements mécaniques élastiques, plastiques, visqueux, les écoulements, les effets thermiques ou tenir compte des hétérogénéités et de l'anisotropie.

La puissance des ordinateurs permet de traiter couramment des problèmes de plusieurs milliers de degrés de liberté, bi ou tridimensionnels.

La question du traitement des interfaces reste toujours délicate, mais la prise en compte des discontinuités, qui a longtemps été un aspect limitatif des méthodes numériques du type éléments finis, ou éléments frontières, est maintenant traitée par les méthodes du type éléments discrets (Cundall 1989). La figure 1 montre le cas d'un site où on s'est efforcé de modéliser le massif rocheux et la quasi intégralité de la fracturation qui le traverse.

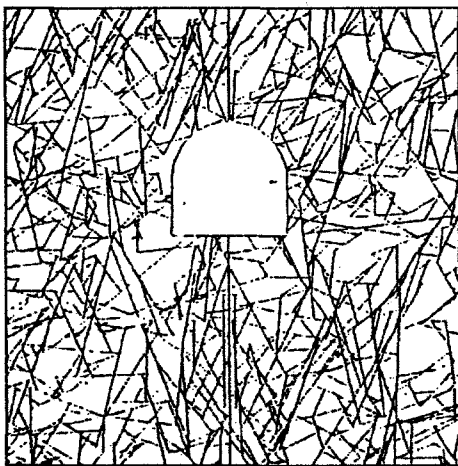


Fig. 1 : Modélisation par éléments distincts d'un ouvrage dans un massif très fracturé (Vuillod 1995).

Toutefois, il est certain qu'on ne peut éviter, à un moment ou un autre, de positionner ces modèles et leurs résultats par rapport à la réalité vécue par les ingénieurs. On parle alors de validation, de confirmation, de vérification, de calage (ou calibration). Ces notions appellent quelques commentaires.

\* En toute rigueur, la validation consiste à légitimer un modèle, c'est à dire à s'assurer qu'il est "conforme aux lois" scientifiques et logiques, qu'il y a cohérence dans la façon dont le système est représenté.

\* L'opération qui consiste à comparer des résultats quantitatifs (ou qualitatifs) observés avec les résultats calculés à partir d'une loi, relève de la confirmation : la loi est confirmée par l'observation répétée que ses conséquences sont vraies (en considérant la science comme une activité hypothético déductive).

Vue ainsi, la concordance des résultats d'un modèle numérique avec des observations pourrait donc être considérée comme une confirmation des lois physiques qui ont été introduites dans le système modélisé, et la preuve qu'il y a cohérence au sein de celui-ci.

Peut-on admettre, pour autant, que ce modèle reflète la réalité ? (Oreskes et al 1994) répondent par la négative, en soulignant qu'il n'est théoriquement possible de démontrer la vérité d'une proposition que dans un système fermé. Or, dans les Sciences de la Terre, les systèmes sont ouverts.

Autrement dit, il n'y a pas unicité des causes possibles pour conduire à une conséquence donnée, ou, si l'on veut, il n'y a pas unicité du modèle capable de fournir un même résultat. Un seul exemple peut être avancé : c'est celui du paradoxe bien connu de l'initialisation de la rupture en paroi de tunnels. Celle-ci n'est souvent pas conforme avec la localisation que laisserait prévoir la théorie d'un comportement élastique ou élastoplastique. Parfois même, la rupture prédite par ces théories ne se produit pas. Plusieurs explications différentes (comportement hypoélastique, endommagement d'un massif fragile, théorie de la bifurcation...) peuvent expliquer que la contrainte tangentielle maximale est appliquée un peu à l'intérieur du massif, ou que la propagation de la fissuration ne se fait pas à partir de la paroi (Santarelli 1989 ; Vardoulakis 1993 ; Pellegrino 1994).

\* La vérification, consiste, stricto sensu, à s'assurer que les algorithmes et les formulations utilisées dans les codes, ou la mise en oeuvre du modèle, sont mathématiquement et méthodologiquement corrects (sans erreur). Pour l'ingénieur, c'est une précaution élémentaire. La comparaison de solutions analytiques établies avec des résultats numériques, entre dans ce cadre.

\* Le calage, enfin, est une opération dont l'objectif est différent. Elle consiste à ajuster au mieux les valeurs des paramètres introduits comme données dans les modèles (et pour lesquelles règnent une imprécision ou une incertitude, voire une ignorance complète) en faisant en sorte que les résultats des modèles issus des calculs, soient en conformité avec les aspects, jugés essentiels, du comportement réel observé (et mesuré). Le calage peut aussi être étendu à la pertinence du choix des variables ou des critères retenus pour l'interprétation des résultats. Il s'apparente donc à un problème inverse.

Il est clair que cette utilisation de la modélisation, très souvent indispensable, n'échappe pas à l'empirisme. On peut dire que le calage est l'adéquation empirique d'un modèle.

Comme dans la démarche empirique, les ingénieurs sont obligés de s'autoriser à interroger les modèles calés, pour des problèmes et des conditions différentes de ceux à l'aide desquels leur adéquation a été établie.

Un exemple assez typique peut être rappelé : à l'époque où plusieurs pays européens s'intéressaient aux possibilités offertes par

la gazéification souterraine du charbon à grande profondeur. Une des questions posées concernait les dimensions maximales que pouvait atteindre le futur gazogène avant que le foudroyage du toit n'en modifie le comportement thermique. En l'absence de toute voie expérimentale possible, la modélisation numérique a été sollicitée. Cette situation présente beaucoup de similitudes avec le problème d'actualité posé par l'ingénierie des futurs stockages souterrains profonds de déchets radioactifs, étudiés bien évidemment avant qu'ils ne soient construits et, dont les difficultés futures liées à leur fonctionnement doivent être anticipées, par référence à des cas de figure proches et à des simulations numériques.

Un modèle aux éléments finis a été calé au moyen d'une expérimentation complète destinée à définir avec précision les conditions de foudroyage du toit, dans un chantier de longue taille classique des Charbonnages français, lourdement instrumenté. Le calcul était réalisé en déformations planes, sans effet thermique. L'étape suivante a consisté à effectuer les calculs pour des cavités cylindriques de diamètres croissants, simulant le gazogène (en symétrie de révolution). On prend en compte les contraintes d'origine thermique liées à la distribution présumée de température autour de cet ouvrage virtuel. Le calage des paramètres du modèle a permis de fournir une réponse à la question posée, sous réserve (entre autres), que les conditions naturelles (lithologie, propriétés des roches, contraintes initiales etc...) soient similaires sur le site de l'essai de gazéification et sur le site ayant permis le calage.

Le contournement de l'empirisme, au moyen de la modélisation numérique des ouvrages se révèle donc, pour partie, illusoire (ce qui ne signifie pas, bien entendu, qu'il faille la rejeter, en particulier pour ses vertus explicatives, et son aptitude à permettre des études paramétriques et la mise en évidence des processus importants). Pour toutes ces raisons, une autre approche, fortement reliée au domaine scientifique des sciences cognitives, a été explorée.

### III - LES SCIENCES COGNITIVES ET L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE EN MECANIQUE DES ROCHES

Les méthodes informatiques associées à ce qu'on appelle globalement l'Intelligence Artificielle, ont connu un développement important au cours des 15 dernières années.

Parmi elles, les "systèmes experts" et les "réseaux neuronaux" ou "neuromimétiques" ont pour objectif la recherche d'une simulation informatique du comportement humain basé sur l'expérience. C'est donc tout naturellement que certains mécaniciens des roches se sont intéressés à ces méthodes dont on pouvait penser qu'elles permettraient de dépasser les inconvénients de l'empirisme propre à la discipline en l'assumant, plutôt qu'en le contournant.

D'autre part, la nécessité, pour les ingénieurs, de prendre des décisions à partir de données imprécises et incertaines les a conduits à recourir à des méthodes mathématiques particulières en marge des mathématiques traditionnelles, comme par exemple les méthodes probabilistes et la logique floue («fuzzy mathematics»).

#### 1) Les systèmes experts

Les systèmes experts, qu'on appelle plus volontiers aujourd'hui Système à Base de Connaissances sont constitués (figure 2) :

- d'une base de faits, qui décrit la situation sur laquelle le système est appelé à opérer. C'est aussi l'endroit où sont mémorisées les propositions logiques produites par le système,

- d'une base de règles, reflétant les connaissances des spécialistes. Ses éléments sont introduits de manière déclarative, sans ordre prédéfini, contrairement aux programmations procédurales classiques, dans lesquelles on risque d'avoir à modifier l'ensemble du programme dès qu'on doit ôter, ajouter, modifier un élément,

- d'un moteur d'inférence qui est un outil logiciel capable de mettre en relation la base de faits et la base de connaissances, reproduisant ainsi le raisonnement de l'expert humain. Il alimente la base de faits.

Le mode de fonctionnement fondamental d'un Système à base de Connaissances est basé sur la reproduction de procédures du type :

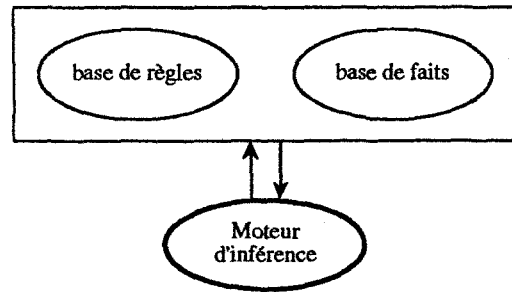


Fig. 2 : Architecture d'un système expert

SI conditions (ou prémisses) ALORS actions et/ou conclusions. Par exemple :

SI nombre de familles de discontinuités  $\geq 3$   
 ET largeur de galerie  $\leq 15$  m  
 ET intervalle moyen entre discontinuités = Id  
 ALORS longueur des boulons minimale =  $6 \times Id$   
 longueur des boulons maximale =  $8 \times Id$

Ces conclusions sont alors injectées dans la base de faits, puis utilisées pour la poursuite du raisonnement.

Des exemples assez nombreux de développements de systèmes appliqués au domaine de la Mécanique des Roches peuvent être recensés dans la littérature. Nous avons relevé, depuis 1989, plus d'une trentaine d'articles de revues ou congrès en relation avec la géomécanique.<sup>1</sup>

Les applications de loin les plus fréquentes touchent au domaine minier (choix du soutènement, méthodes d'abattage et de foration des roches, prévision des venues de gaz, sélection des méthodes d'exploitation en relation avec le type de terrains, stabilité des talus en mines à ciel ouvert).

On trouve ensuite des applications à des problèmes de géotechnique (fondations, comportement particulier des sols, choix des géotextiles...). On relève également des exemples pour l'étude des problèmes de sismicité. Enfin quelques systèmes d'aide à la décision sont développés pour l'évaluation des propriétés des roches et des discontinuités et pour les introduire dans des classifications.

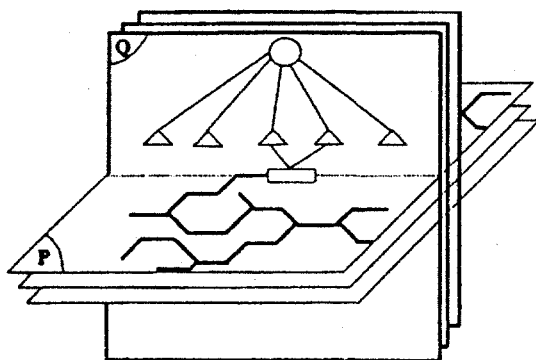
On a pu constater une évolution très sensible depuis les premiers systèmes-experts apparus, pour notre domaine, au début des années 80. Les méthodes d'acquisition des connaissances, les niveaux de connaissance, les principes de déroulement des règles sont beaucoup plus liés à un domaine d'application spécifique, qu'à une expertise particulière. On recueille plus volontiers la connaissance auprès d'un spécialiste (dont le savoir est public,

<sup>1</sup> Sources principales : Geomechanics Abstracts et congrès spécialisés

attesté par des écrits), qu'auprès d'un expert (dont le savoir est privé, fondé sur son expérience, avec une façon très personnelle de mettre en relation des faits et des observations actuels avec des situations passées, connues et mémorisées par lui). Autrement dit, l'idée première de créer des «experts artificiels» s'est effacée, au profit d'un objectif d'élaboration de «systèmes d'aide à la décision», destinés à assister dans leurs tâches, des ingénieurs déjà expérimentés dans leur domaine.

En même temps, les techniques informatiques ont permis de faire progresser la convivialité de ces systèmes, de leur permettre de communiquer aisément avec des bases de données, avec des logiciels permettant d'effectuer des calculs dont les résultats enrichissent la connaissance, de traiter les cas d'expertise hétérogène (systèmes multi-experts) etc...

La figure 3 illustre le cas d'un système-expert développé pour aider à la définition d'un programme de reconnaissance des terrains dans les projets de tunnels.



P : plans horizontaux contenant les schémas de raisonnement  
Q : plans verticaux contenant la connaissance relative aux familles de roches

Fig. 3 : Représentation symbolique d'un schéma de raisonnement (Laouini, 1993).

Les plans horizontaux schématisent les étapes de raisonnement tenus par les experts, selon le type de problèmes d'instabilité susceptible d'être rencontré. Ces problèmes sont divisés en quatre groupes :

- trop faible résistance de la roche par rapport à l'état de la contrainte,
- fracturation défavorable à la stabilité,
- conditions hydrogéologiques défavorables,
- évolution avec le temps défavorable (altérabilité, fluage..).

L'occurrence de chacune de ces possibilités sera démontrée par un raisonnement s'appuyant sur une succession de règles, elles-mêmes alimentées par des informations sur la roche et le contexte de l'ouvrage (principe dit «du chaînage arrière»). Les plans verticaux de la figure, venant se greffer à des niveaux précis de connaissance, symbolisent cet apport d'information.

Les données sont acquises au moyen d'un module de saisie séparé, dont la spécificité est d'être relié à une base de données, DATAROC, qui rassemble les particularités et propriétés mesurées d'environ 300 roches, caractérisées au moyen de 45 paramètres (Durville, 1991).

## 2) La logique floue

La question des règles et des faits incertains est tout à fait typique du domaine de la Mécanique des Roches. Elle résulte à la fois de la méconnaissance des données et de la diversité du champ d'expérience des experts. Elle suscite un vif intérêt pour les «mathématiques floues», ou la «logique floue» qui, dans ce contexte, conduit, par exemple, à ajouter à tout élément d'information caractérisé par sa définition (ex. : qualité de la roche) son attribut (résistance à la compression simple), sa valeur (100 MPa), un niveau de confiance reflétant la possibilité que cette valeur corresponde à la réalité.

Plus généralement, le concept d'ensemble flou (Zadeh, 1965) a été introduit pour rendre compte de l'incertitude et de l'imprécision fréquentes, voire de l'ignorance, en Mécanique des Roches, quant à l'appartenance d'une propriété à une classe.

Par exemple, si l'appartenance d'un massif rocheux à la catégorie «altérée» peut être mise en correspondance avec la suite des valeurs 0.5 ; 0.6 ; 0.7 ; 0.8 ; 0.9 ; 1 avec une «moyenne» de 0.9 et si on peut associer, à chacune de ces valeurs, un «degré d'appartenance» défini par la suite de valeurs 0. ; 0.25 ; 0.5 ; 0.75 ; 1 ; 0 ; l'ensemble flou pour cette roche est défini par l'association de ces deux séries de valeurs, à savoir 0.5/0.0 ; 0.6/0.25 ; 0.7/0.5 ; 0.8/0.75 ; 0.9/1 ; 1/0. (voir figure 4).

Une autre roche, également très altérée mais dans une moindre mesure, pourra être caractérisée par l'ensemble flou : 0.6/0.0 ; 0.7/0.5 ; 0.8/1. ; 0.9/0. Ces ensembles sont comparables. Des opérations peuvent être effectuées sur ces ensembles flous, et des croisements entre variables peuvent être pris en considération.

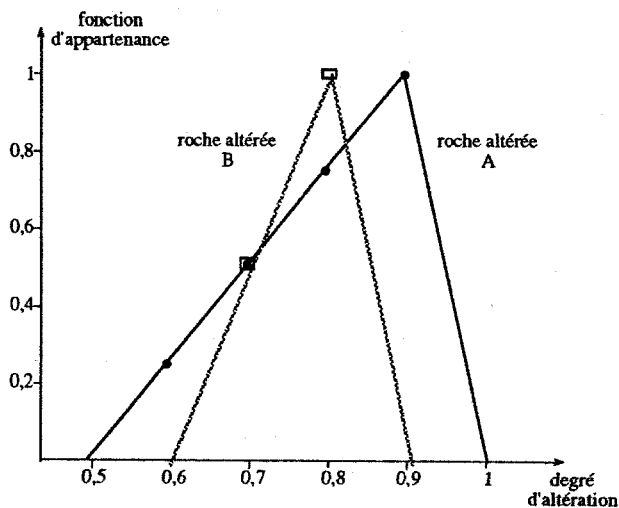


Fig. 4 : Représentation par ensembles flous de deux roches altérées

## 3) Les réseaux neuronaux

La théorie des réseaux neuronaux ou neuromimétiques (ou connexionnisme) permet, dans ses applications informatiques, de traiter des informations d'une façon analogue à celle qui est mise en oeuvre par les neurones du cerveau humain. Le «neurone formel» est composé d'une «unité centrale» (analogie avec le corps cellulaire des neurones) connectée à un certain nombre d'entrées (analogie avec les dendrites des neurones) et à une sortie (analogie avec l'axone). (Figure 5).

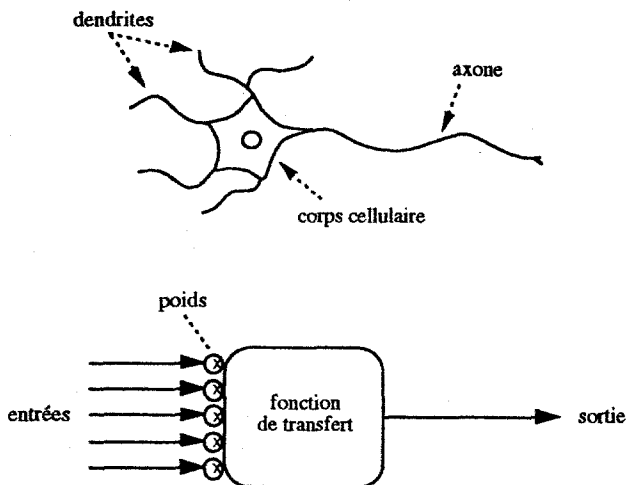


Fig. 5 : Représentations d'un neurone biologique et d'un neurone formel (Bigarré, 1995)

Cette unité est une sorte d'automate élémentaire pouvant prendre un nombre fini d'états, et reliant les valeurs d'entrée et de sortie par une fonction de transfert. Les valeurs d'entrée sont associées à des pondérations (ou « poids synaptiques » par analogie avec les synapses des neurones biologiques).

Ainsi,  $F$  étant la fonction de transfert,  $e_i$  les valeurs d'entrée,  $p_i$  les pondérations pour  $n$  entrées, on a une valeur de sortie

$$S = F\left(\sum_{i=1}^n p_i x_{e_i}\right)$$

Un point très important à souligner est que  $F$  est non linéaire. Pour modéliser un système global complexe, ces neurones formels sont organisés en couches. Les connexions sont faites entre les neurones d'une couche et certains neurones des couches précédentes et suivantes (figure 6). Le signe des pondérations synaptiques déterminent les conséquences d'une information fournie en entrée (action si signe positif ; inhibition si signe négatif ; pas de connexion si valeur nulle).

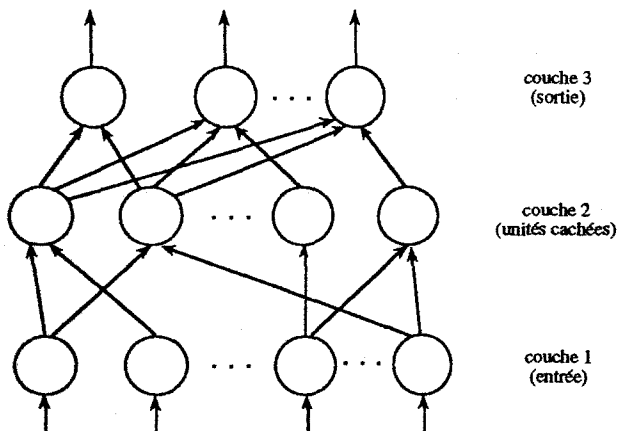


Fig. 6 : Structure d'un réseau neuronal multicouche

Une propriété, essentielle pour notre propos, de ce type de réseaux est son aptitude à l'apprentissage. Dans le cas le plus fréquent aujourd'hui, celui de l'apprentissage "supervisé", celui-ci s'effectue schématiquement de la façon suivante : un jeu de valeurs d'entrées et de pondérations ainsi qu'un jeu de valeurs de sorties (cibles) sont donnés au réseau, muni en outre, d'une configuration initiale. Il corrige de lui-même successivement les valeurs des pondérations de façon à retrouver des sorties proches des valeurs

cibles. En fait, l'apprentissage est considéré comme optimal, et donc achevé, lorsque les valeurs des coefficients de pondération restent stationnaires, quand on ajoute de nouvelles informations en entrée. Le système, pour obtenir ce résultat, peut même être amené à modifier sa topologie.

Cette opération d'apprentissage, qui obéit à une logique inductive, s'apparente au « calage » qui a été décrit dans le chapitre précédent. Ainsi « éduqué », le réseau pourra être interrogé avec d'autres données d'entrée.

Les mécaniciens des roches ne semblent s'être tournés que récemment vers ces méthodes (une dizaine de publications recensées à partir de 1991), principalement en vue d'une exploitation plus efficace de bases de données (raisonnement à partir de cas). Celles-ci rassemblent en particulier des propriétés des roches mais aussi des résultats de mesures ou d'observations collectées sur divers sites (ou encore des observations enregistrées pendant une longue période de temps, sur un même site).

Un des premiers exemples d'utilisation de telles méthodes est celui de la détermination des propriétés physiques et mécaniques des roches, à partir de leurs caractéristiques minéralogiques (nature, taille, forme des grains...) comme cela a été fait pour des échantillons de grès (Qing Zhang et al 1991).

Un autre exemple, récemment développé (Lee and Sterling 1992) est celui de la mise au point d'un système utilisant un réseau neuronal, pour rapprocher les modes de rupture possibles dans un ouvrage souterrain avec les conditions géométriques et géologiques (profondeur, portée de l'ouvrage, résistance de la roche, caractéristiques des discontinuités etc..).

L'apprentissage a été effectué au moyen d'une base de cas réels comprenant 95 cas décrits par de 86 paramètres (au maximum). L'utilisateur, introduisant ses propres données, associées à un coefficient de vraisemblance, peut obtenir des informations sur les modalités les plus probables des données manquantes et sur les types de ruptures possibles. Il peut aussi rechercher, dans la base de données, les cas réels les plus ressemblants à celui qu'il veut traiter.

Différents tests peuvent être effectués pour évaluer les performances de ces réseaux :

- Contrôle de l'apprentissage, effectué en interrogeant le réseau sur un jeu de données, pour lesquelles les résultats sont connus, séparé du jeu de données sur lesquelles s'est basé l'apprentissage. Les écarts sont estimés en % pour les résultats quantitatifs.

- Réponses du réseau lorsqu'on introduit quelques données erronées (test de sa robustesse) ou incomplètes.

- Recherche des données manquantes les plus plausibles, connaissant certaines données d'entrées ainsi que le résultat (test s'apparentant à une rétro-analyse).

Cette méthode de traitement de l'approche empirique, présente quelques avantages par rapport aux systèmes experts. Ainsi, l'amélioration de l'apprentissage, au moyen de nouvelles connaissances ne modifie-t-elle pas nécessairement le nombre de pondérations, donc la place occupée en mémoire par le système, ce qui n'est pas le cas de l'addition de nouvelles règles dans un système expert. D'autre part, en s'appuyant sur des cas décrits quantitativement et/ou documentés (même imparfaitement), la construction d'un réseau neuronal évite la phase d'élaboration et d'interprétation de la connaissance collectée auprès des experts humains, pour la transformer en règles, ce qui représente toujours une tâche lourde et délicate (pour laquelle la bonne volonté des experts est essentielle).

#### 4) Autres approches complémentaires

A côté de ces approches, d'autres tentatives, plus spécifiques ont été menées comme par exemple la «matrice d'interaction à flux d'énergie» (Hudson 1991 ; Hudson and Hudson, 1993).

L'idée de base est matérialisée par une présentation matricielle, dans laquelle les variables ou les paramètres caractérisant l'état du massif rocheux et de l'ouvrage sont placés sur des cases diagonales, et les interactions entre ces paramètres, pris deux à deux, explicitées dans les cases non diagonales (figure 7).

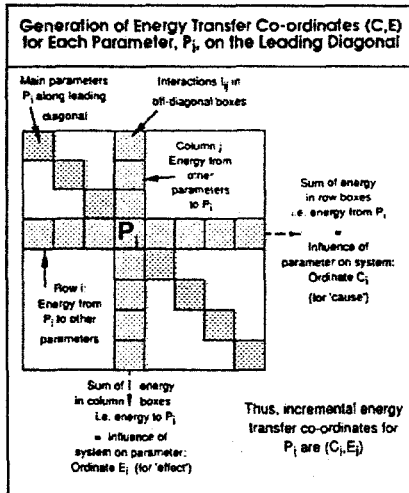


Fig. 7 : Matrice d'interaction à flux d'énergie. Influence réciproque des paramètres et du système (Hudson, 1993).

A l'intersection de la ligne  $i$  et de la colonne  $j$ , se trouvent exprimées les conséquences pour l'état du paramètre  $j$ , de l'état du paramètre  $i$ . A chaque terme diagonal ainsi posé (par exemple l'état de contrainte, la qualité de la roche, la méthode d'excavation, les caractéristiques des discontinuités etc..) est associé un «pseudo-potential énergétique». Les interactions peuvent être formalisées par l'expression d'un transfert de potentiel proportionnel à la différence de potentiel entre deux cases, les coefficients de proportionnalité étant à fixer selon l'importance que l'on prête à cette interaction (par exemple : «des contraintes élevées agissent sur les flux hydrauliques en diminuant la perméabilité», ou encore, «les pression d'eau réduisent les contraintes effectives normales»).

L'état d'une case diagonale est calculé de façon interactive, puisque le potentiel de chaque case diagonale est modifié après chaque transfert, et que sa nouvelle valeur détermine l'intensité du transfert suivant. Cette simulation ainsi que la représentation de l'état du système, d'étape en étape, sont effectuées par un logiciel approprié. Le codage initial et les valeurs des coefficients de transfert expriment les choix de l'expert qui étudie le système. Ils peuvent lui permettre de tester la sensibilité de certains facteurs et d'examiner les incidences, en termes d'ingénierie, des modalités prises par tel ou tel paramètre.

De manière générale, soulignons que les différentes approches ou méthodes exposées ici, doivent souvent beaucoup à la possibilité offerte par l'informatique moderne, de fixer la connaissance dans des bases de données très aisées à étendre, à modifier, à exploiter.

#### IV - CONCLUSION

Il est admis, depuis toujours, que les ingénieurs qui réalisent des projets dans lesquels le comportement et les propriétés des matériaux naturels (sols, roches) jouent un rôle primordial, doivent se référer à des savoirs empiriques. Tandis que les démarches scientifiques rigoureuses conduisent aujourd'hui, dans d'autres branches, à des progrès dans la connaissance et à des réalisations spectaculaires, cet assujettissement à l'empirisme en Mécanique des Roches constitue en lui-même, un objet de réflexion et de recherche.

L'émergence puis la généralisation de l'emploi des méthodes de modélisation numérique ont pu laisser penser que la conception et l'optimisation des ouvrages pourraient reposer sur des méthodes de calculs reflétant fidèlement la réalité des conditions naturelles rencontrées, et leur complexité.

Des progrès considérables ont ainsi indéniablement été réalisés au cours des trois dernières décennies, allant dans le sens d'une nette amélioration des possibilités d'analyse et de compréhension des phénomènes physiques qui se manifestent autour des ouvrages de génie civil et minier, et aussi de leur prévision. Ces progrès nécessaires ont été permis, c'est une évidence, par le développement des moyens informatiques. Toutefois, les limites imposées par la difficulté fondamentale de connaître les données essentielles réclamées par les modèles, de s'assurer de leur validité, de les confirmer, de les calibrer, ont obligé les ingénieurs à continuer de côtoyer l'empirisme jusque dans la mise en oeuvre des modèles numériques.

Il est significatif, à cet égard, de noter que des systèmes-experts ont été élaborés pour aider au choix des modèles numériques les plus appropriés à la résolution d'un problème donné (Johnson 1988 ; Coulthard 1991).

Depuis peu d'années, la question de la «prise en compte de l'empirisme» peut être abordée, grâce aux performances d'outils informatiques nouveaux : systèmes-experts, systèmes d'aide à la décision, système à base de connaissances, logique floue, réseaux neuronaux etc...

L'enjeu n'est pas tant de faire entrer la réalité complexe dans un cadre scientifique classique, positiviste, rigoureux. Il s'agit plutôt de permettre une formalisation de la connaissance vivante, de la fixer (ou de la «domestiquer»), pour lui appliquer des procédés se rapprochant, dans une certaine mesure, de ceux qui sont mis en oeuvre spontanément, dans la réflexion et les raisonnements humains.

Cette voie, pour la Mécanique des Roches, reste encore marginale, mais on peut lui souhaiter un fort développement, jusqu'à ce qu'elle identifie, à son tour, ses limites.

#### Remerciements

L'auteur tient à remercier pour leur aide et conseils les «cognitivistes» du Laboratoire de Mécanique des Terrains à l'Ecole des Mines de Nancy, en particulier MM. Y. GUENIFFEY et S.KOUNIALI.

## REFERENCES

- Hudson J.A. & Hudson J.L., 1993 «Establishing potential behavioural modes of rock engineering systems by computer simulation of interaction matrix energy flux», in *Int. Journal of Rock Mech. and Mining Sciences and Geomech. Abstracts*, Vol 30 N 4, August 1993.
- Hudson J.A., 1991 «Atlas of rock engineering Mechanisms underground excavations», in *Int. Journal of Rock Mech. and Mining Sciences* Vol 28 N 6, Nov. 1991.
- Cundall P.A., Hart R.
- Laouini H., 1993 «Développement d'un système-expert d'aide à la définition d'un programme de reconnaissance pour les tunnels», thèse doct. Inst. Nat. Polytech. de Lorraine, juillet 1993 et *Tunnels et Ouvrages Souterrains* n° 120 nov./déc. 1993 pp 321-330.
- Baroudi H., 1988 «Choisir le soutènement des galeries : réalisation d'un système-expert», thèse doct. Inst. Nat. Polytech. de Lorraine, décembre 1988.
- Guéniffey Y. ; Baroudi H. ; Pignet J.P., 1992 «Géotechnique et systèmes experts : bilan de l'expérience SOUT et orientations futures. «coll int. «Géotechnique et Informatique» Paris, Sept/oct. 1992, pp 539-546.
- Nguyen V.U., 1985 «Some fuzzy set applications in mining geomechanics» in *Int. Journal of Rock Mech. and Mining Science* Vol 22 N 6, 1985.
- Durville J.L. et al, 1991 «DATAROC : une base de données physico-mécaniques sur les roches» in *Bull. liaison Laboratoire des Ponts et Chaussées* n° 173, Mai-Juin 1991.
- Franklin J.A., 1993 «Empirical design and rock mass characterization» in *comprehensive Rock engineering* Vol 2 p 795-806 ed. J.A. HUDSON, Pergamon 1993.
- Bigarré P. ; Lablée S. ; Dodo Amadou A. ; Pignet J.P. ; Josien J.P., 1995 «utilisation de réseaux neuromimétiques pour la localisation automatique d'événements microsismiques» in *proc. 8th Int. Congr. of Rock Mechanics*, Tokyo, sept. 1995, Balkema Ed.
- Santarelli F.J., Brown E.T., 1989 «Failure of three sedimentary rocks in triaxial and hollow cylinder compression tests» in *Int. J. Rock Mechanics & Min. Sciences* Vol 26 N 5 pp 401-413 (1989).
- Pellegrino A., Sulem J., Barla G., 1994 «Non linear effects in the study of borehole stability» in *Proc. Eurock 94. Rock Mech. in petroleum Engineering*, Delft Balkema pp 231-238 (1994).
- Vardoulakis I., Sulem J., 1993 «Application of bifurcation theory to Rock Mechanics problems» in *Comprehensive Rock Engineering*. Ed J.A. HUDSON chap. 23 Vol 1 (1993).
- Lee & Sterling R., 1992 «Identifying probable failure Modes for underground openings using a neural network» in *Int. Jour. Rock Mech. and Min. Sciences* Vol 29, N 1 pp 49-67, 1992.
- Oreskes N. ; Shrader-Frechette K. ; Belitz K., 1994 «Vérification, validation and confirmation of numerical models in the Earth Sciences» in *Science* Vol 263 feb. 1994.
- Qing-Zhang, 1990 «Fuzzy set theoretic interpretation of strenght of rock joints» in *Proc. int. Symp. on rock joints*, Loen, june 1990 p 787-790. Pub. BALKEMA 1990.
- Qing-Zhang ; Jiarond-Song ; Xiaoyan Nie, 1991 «Application of neural network models to rock mechanics and rock engineering» in *Int. Journal of Rock Mech. and Min. Sciences* Vol 28, N 6 pp 535-540 Nov. 1991
- Johnson R.A., 1988 «micro computer based expert system as an aid in the use of numerical modelling programs for rocks Mechanics applications» in *Proc 1st Region. conf. for Africa Rock Mech. in Africa, Swaziland* pp 333-338. Pub. Markalltown SANGORM nov. 88.
- Coultard M.A. & Ciesielski V., 1991 «An expert system to choose a stress analysis program for rock excavation design» in *proc. 7th conf. computer Methods and Advances in geomechanics* V1 ; p 51-57 ed. De Beer, Booker, Carter ; pub. Balkema ; 1991.
- Vuillod E., 1995 «Modélisation thermo-hydro-mécanique de massifs rocheux fracturés - Application au stockage de déchets radioactifs». Thèse doct. Inst. Nat. Polytech. de Lorraine INPL, (Juin 1995).
- Zadeh L.A., 1965 «Fuzzy sets», *inf. Control* Vol 8.