HYDROLAB - LE SYSTEME EXPERT DE L'HYDRAULIQUE VILLAGEOISE

par M. DETAY (*) - P. POYET (*)

-=o=-

INTRODUCTION

Le problème de l'alimentation en eau des communautés villageoises et semi-urbaines reste un problème crucial en 1988. L'hydrogéologie africaine et la méthodologie d'implantation des points d'eau sont maintenant bien connues. Les nombreuses campagnes d'hydraulique villageoise ont permis d'acquérir un très grand nombre de données. L'analyse de ces données a abouti à une meilleure compréhension des mécanismes hydrogéologiques et à une optimisation de la méthodologie d'implantation des points d'eau. Depuis quelques années un effort a été accompli dans le sens de la sauvegarde des informations issues des diverses campagnes de forage. L'archivage de ces données, qui constituent le patrimoine scientifique et technique des pays, a été essentiellement autorisé grâce à l'utilisation de l'informatique. On peut se féliciter de cette démarche et de l'informatisation croissante des divers services de l'hydraulique dans les pays africains.

L'apport de l'informatique va au delà de ces simples traitements et de l'archivage. Chacun sait que les statistiques et l'analyse de données ont permis l'optimisation des campagnes de forages ainsi que la planification de la création des points d'eau. Des programmes de planification comme PROSPER, des logiciels de saisie et de valorisation des informations comme ACTIF, ISAPE, etc., sont en place dans divers pays africains.

L'informatique moderne, grâce à l'utilisation de l'intelligence artificielle, va bien au delà de ces objectifs et offre aux techniciens et aux cadres nationaux la possibilité de prendre en main leurs propres problèmes de développement. L'intelligence artificielle, mise à la disposition de l'intelligence naturelle, assure la sauvegarde et la transmission de la connaissance. Elle donne une nouvelle dimension à la formation et permet l'optimisation du patrimoine scientifique des pays par la mise à disposition de l'expertise à tout un chacun.

Nous résumons dans ce papier les principales étapes qui ont conduit à la modélisation de la connaissance dans le domaine de l'hydraulique villageoise. Nous introduisons les concepts de l'intelligence artificielle et les systèmes experts et enfin nous présentons HYDROLAB, le système expert de l'hydraulique villageoise.

(*) Géolab - Sophia Antipolis - B.P. 15 - 06561 Valbonne Cedex - France.

1 MODELISATION DE LA CONNAISSANCE EN HYDRAULIQUE VILLAGEOISE

Depuis plus de vingt ans les Etats Africains se sont attachés à améliorer l'approvisionnement en eau des populations rurales. Près du tiers des aides bilatérales aux pays du Sahel a été consacré aux programmes d'hydraulique villageoise et pastorale. Des sommes considérables ont été investies dans la construction de puits et dans la réalisation de forages, pourtant les évaluations des besoins estimés au milieu des années soixante, ne sont satisfaites qu'au tiers. En matière d'eau potable, compte tenu de la croissance démographique et de l'augmentation individuelle des besoins, liés à l'urbanisation et aux progrès de l'hygiène notamment, on reste très au dessous de cette estimation.

L'objectif des programmes d'hydraulique villageoise est de trouver de l'eau potable pour les populations rurales. Les débits recherchés sont relativement faibles, de l'ordre du mètre cube à l'heure, le principal facteur limitant étant le débit moyen d'exhaure des pompes à motricité humaine. Pour atteindre ces objectifs, le forage seul est susceptible de répondre, par sa rapidité de mise en oeuvre (quelques jours, contre 2 à 3 mois pour un puits) à l'urgence et à l'ampleur des besoins (Hassane A., 1983). En considérant des besoins de 25 litres par jour et par habitant, un forage va permettre d'alimenter une population de 350 à 500 personnes suivant le temps consacré journellement à l'exhaure.

1.1 Les conditions géologiques

Le mode de gisement des eaux souterraines est directement conditionné par la nature des formations géologiques qui les renferme. Celles-ci sont classiquement regroupées en trois grands ensembles (Figure 1) :

- **Le socle cristallin** précambrien, correspondant au complexe de base, métamorphique généralement granitisé. Il représente les formations les plus anciennes du "bouclier africain" (granites, gneiss, quartzites, schistes, etc.).

- **Les formations anciennes** tabulaires, infracambriennes et primaires. Elles sont solidaires du complexe sous-jacent, parfois plissées, peu ou pas métamorphisées.

- **Les formations sédimentaires** post-primaires et les dépôts récents.

1.2 Les grands systèmes aquifères

Le socle cristallin précambrien et les formations infracambriennes et primaires sont caractérisés par la présence d'un **aquifère discontinu**, lié à l'altération et à la fracturation. La recherche des eaux souterraines s'y pose en termes analogues, aussi ces deux unités sont-elles regroupées sous le terme de "socle" au sens large. Ce dernier occupe la majeure partie de la Côte d'Ivoire (97% de la superficie du pays), du Burkina Faso (95%), du Togo (94%), du Bénin (83%), du Cameroun (89%), du Gabon (80%), et correspond à des zones de fort peuplement.

Le socle cristallin s'oppose aux **formations sédimentaires** post-primaires et aux dépôts récents constitués de formations tendres et perméables renfermant généralement des **nappes continues**, le plus souvent de grande extension. Ces unités se rencontrent dans de grands "bassins sédimentaires" situés, pour la plupart, aux latitudes sahéliennes : bassin sénégalo-mauritanien, delta central du fleuve Niger, bassin de Taoudeni, bassin nigérien, bassin tchadien.

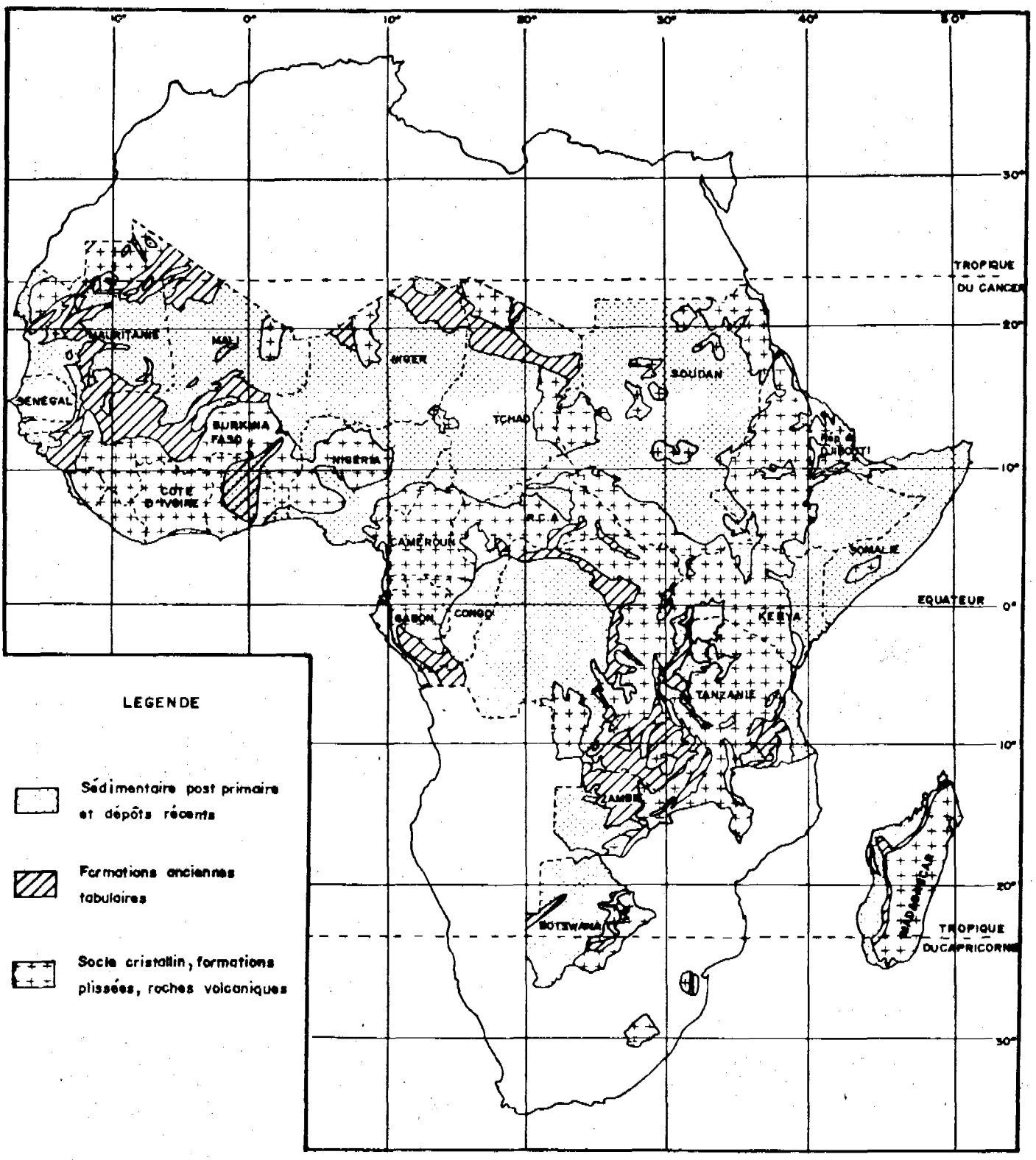

10°
0°
10°
20°
30°
40°
50°
30°
TROPIQUE DU CANCER
20°
10°
EQUATEUR
0°
10°
20°
TROPIQUE DU CAPRICORNE
30°
MAURITANIE
MALI
NIGER
SOUDAN
SENEGAL
BURKINA FASO
TCHAD
NIGERIA
COTE D'IVOIRE
R.C.A.
CAMEROUN
SOMALIE
GABON
CONGO
KENYA
TANZANIE
ZAMBIE
BOTSWANA
MADAGASCAR
LEGENDE
Sédimentaire post primaire et dépôts récents
Formations anciennes tabulaires
Socle cristallin, formations plissées, roches volcaniques

Fig. 1

Elles représentent 85% de la superficie du Sénégal, 65% de la Mauritanie, 75% du Niger, 64% du Mali, 65% du Congo, 52% du Tchad, et forment une bande côtière étroite, qui occupe une faible partie de la Côte d'Ivoire, du Togo, du Bénin, du Gabon, du Congo et du Cameroun.

Le problème de l'alimentation en eau se pose à l'échelle continentale et la recherche des eaux souterraines nécessite des outils flexibles sachant s'adapter à des conditions très variées.

1.3 La méthode de recherche d'eau en hydraulique villageoise

Nous rappelons brièvement, ci-après, les techniques et la démarche poursuivie par les experts afin de dégager les processus cognitifs utilisés dans la conception du système expert.

La méthode d'implantation d'ouvrages classiquement employée dans le cadre de programmes d'alimentation en eau potable des zones rurales se décompose schématiquement en quatre phases complémentaires :

- **Les études de base** conduisent à la localisation des villages sur les cartes, à l'étude des documents disponibles concernant la zone et à une première approche de l'environnement géologique, climatologique, hydrogéologique, géomorphologique, etc.

- **La photointerprétation** cherche à préciser des éléments d'ordre morphologique : plateaux, versants, bas fonds, allure du réseau hydrographique, etc., géologique, localisation des affleurements, structuraux, direction d'allongement, foliation, stratification, fracturation, etc.

- **Les études de terrain** permettent à l'hydrogéologue de faire le maximum d'observations possibles d'ordre géologique, géomorphologique, hydrographique, etc. Cette étape permet de réaliser l'inventaire des points d'eau, et un entretien consécutif avec les autorités villageoises l'autorise à prendre en considération les contraintes socio-économiques du village et les desiderata des villageois.

  Au terme de la visite de terrain, l'hydrogéologue, tenant compte des observations de l'environnement géologique (épaisseur de la frange altérée, niveau piézométrique, nature du soubassement, etc.), des contraintes socio-économiques, des moyens d'accès, de la géomorphologie, etc., pourra, soit réaliser une implantation si les données sont suffisantes, soit définir un périmètre dans lequel il sera nécessaire de réaliser des investigations complémentaires.

- Les **investigations complémentaires** font le plus souvent appel aux méthodes de prospection géophysique. Celles-ci, fréquemment employées pour confirmer ou infirmer les hypothèses de l'hydrogéologue, sont généralement utilisées dans des cas complexes ou lorsqu'on recherche de gros débits.

Ce récapitulatif, simplifié, de la démarche suivie par un hydrogéologue permet de rendre compte de la séquence d'opérations à effectuer afin de mettre en oeuvre, avec le maximum de chances de succès, les techniques impliquées dans la stratégie d'implantation.

1.4 Identification des paramètres hydrogéologiques déterminants

Attachés, depuis 1973, au développement des ressources en eau des pays en voie de développement, nous nous sommes interrogés sur les mécanismes régissant les caractéristiques hydrodynamiques des nappes, les moyens analytiques de les appréhender et les connexions qu'elles entretiennent avec les critères retenus au stade des études d'implantation. Les recherches que nous avons entreprises dans ce domaine couvrent une quinzaine de pays (Mouton J., 1971, Detay 1985 ; Detay et al. 1987, 1988 ; Bernardi et al. 1975, 1980, 1988 ; Poyet et al. 1988). Depuis 1985, nous avons modélisé cette démarche grâce à des outils informatiques basés sur la technologie des systèmes experts.

L'identification analytique et probabiliste des paramètres numériques et non-numériques que nous avons effectuée a permis de définir une méthodologie de recherche des critères déterminants en hydrogéologie sub-sahélienne. Les résultats de cette étude ont permis de mettre en évidence des relations parfois pressenties de manière intuitive par les hydrogéologues, mais jusqu'ici jamais quantifiées. Il découle de ces recherches une meilleure compréhension des mécanismes hydrogéologiques notamment en zone de socle. Enfin ces recherches ont servi de base à l'étude cognitive du système expert HYDROLAB.

1.4.1 Méthodologie

Nous avons conçu un programme d'étude hydrogéologique à travers plusieurs approches complémentaires :

- **analytique**, qui fait appel à des processus cognitifs afin de traiter des données, géologiques et hydrogéologiques générales, essentiellement non-numériques. Cette phase vise à une compréhension globale de chaque unité hydrogéologique.

- **probabiliste**, qui fait appel aux méthodes modernes de traitement de données numériques (Poyet, 1986 ; Detay, 1987). Elle s'intéresse aux paramètres relevés dans les diverses campagnes de forage et s'organise de manière différente selon que l'on s'intéresse à une zone sédimentaire, à une zone mixte ou à une zone de socle.

  Elle fait appel à plusieurs niveaux d'analyse :

  . **analyse élémentaire** où nous étudions de manière individuelle le comportement de chacun des paramètres relevés dans les campagnes d'hydraulique villageoise. Ces paramètres sont d'ordre : hydrauliques (débit, débit spécifique, position du niveau piézométrique), structuraux, géologiques, géomorphologiques, hydrographiques, climatologiques, géophysiques, socio-économiques, etc.

  . **analyse multicritères**, qui s'intéresse à la recherche de connexions multicritères significatives entre l'ensemble des paramètres numériques, pour identifier les relations qu'ils peuvent entretenir.

- **synthétique**, permettant de faire une synthèse globale de tous les aspects analysés tant sur le plan analytique que numérique et probabiliste. Nous cherchons à ce stade à mettre en évidence des relations entre les paramètres non-numériques étudiés dans la première phase et les grandeurs numériques étudiées en phase probabiliste.

Notre approche ne touche malheureusement ni l'ensemble des critères qui ont abouti à la décision de réaliser une implantation, ni à la totalité de ceux qui auraient pu être retirés lors de la réalisation des forages. Cependant elle utilise des données de base qui n'ont pratiquement jamais été traitées de manière globale et qui, de par leur nombre, prennent une signification probabiliste généralisable, contribuant ainsi à une meilleure connaissance des aquifères et du comportement hydrodynamique des nappes.

1.4.2 Aspect cognitif

Nous citons ici ce que pourraient être les têtes de chapitre des grands critères hydrogéologiques déterminants. Des études très complétes ont été réalisées pour quantifier l'importance de chacun de ces critères. Nous ne faisons ici que les citer pour permettre au lecteur de se faire une idée des critères implémentés dans le système expert. Ceux-ci font appel :

- **à la nature du lithotype,** de la nature pétrographiques des roches dépendent non seulement les caractéristiques hydrauliques mais aussi des éléments hydrogéologiques déterminants : caractéristiques du réservoir, paramètres hydrodynamiques, entre autres.

- **à position géomorphologique** du village : en crête, sur un versant, sur une butte, dans un bas-fond, etc.

- **à l'allure du réseau hydrographique,** sa proximité, la taille du chenal, sa pente, l'allure du profil d'équilibre, la forme du lit, etc., sont autant d'éléments qui permettent d'estimer la possibilité d'existence et la limite d'influence probable de l'alimentation à partir des nappes de sous écoulement.

  Il existe également, une correspondance entre l'allure du réseau hydrographique, la profondeur moyenne du socle et le pourcentage d'échec (BURGEAP - RENARDET Engineering 1979 ; Bourguet et al. 1980).

- **à la position du niveau piézométrique** qui est un élément déterminant. Le niveau piézométrique peut se situer en zone de socle soit dans le milieu poreux (altérations ou recouvrement sédimentaire), soit dans la zone fissurée ss., ou encore dans le milieu fracturé. De sa position dans l'un ou l'autre des réservoirs découle des lois probabilistes caractéristiques des propriétés hydrodynamiques statistiques des forages.

- **à l'état de la fracturation,** qui peut être étudié grâce à la photointerprétation. Il est souvent corrélable avec l'allure du réseau hydrographique ce qui permet d'avoir une indication ou une confirmation de l'alimentation potentielle des fractures.

  Schématiquement il convient en zone de socle, de rechercher, au sein d'un bassin versant d'intérêt, des fractures majeures multikilométriques recoupant un maximum de fractures secondaires, l'ensemble drainant le plus grand volume de réservoir capacitif possible.

- **à l'épaisseur du réservoir capacitif** : l'importance du développement du réservoir capacitif d'altérites et les relations qu'il entretient avec les caractéristiques hydrodynamiques des nappes ont été récemment mises en évidence et quantifiées par Detay (1987). Des lois probabilistes ont pu en être déduites et montrent une correspondance entre l'épaisseur des altérites, les caractéristiques hydrodynamiques des nappes (débit et débit spécifique) et le pourcentage de chances d'obtenir un forage positif.

- **à la profondeur des forages** : quelle est la profondeur optimale de forage ?

- **aux données climatiques** : le domaine de pluviométrie, la température moyenne annuelle, l'évapotranspiration, etc.

  Le domaine de pluviométrie, couplé aux données géographiques, géomorphologiques et climatologiques permet d'en déduire l'infiltration efficace et d'estimer la recharge. Celle-ci est calculée en fonction de la taille du bassin versant, du développement relatif des réservoirs, de la position morphologique, etc.

- **aux données de terrain** : l'inventaire des points d'eau apporte des éléments d'appréciation fondamentaux dans l'étude hydrogéologique d'un village.

- **à des données complémentaires** : la prospection géophysique permet d'appréhender la nature du sous-sol, la profondeur du substratum, l'existence de zone fracturées, etc. Des modèles interprétatifs, inclus dans le système expert, permettent d'implanter un forage dans les meilleurs conditions possibles.

- **aux données socio-économiques** : structure de l'habitat, distribution des points d'eau, traditions culturelles, problèmes ethniques, etc..

  C'est la leçon du passé : trop nombreux sont les programmes d'hydraulique villageoise dont les ouvrages n'ont jamais été utilisés parce que cet aspect n'avait pas été pris suffisamment en compte. Il est évident qu'une politique de recherche en eau se doit de passer par une intégration des réalisations en fonction des traditions culturelles, de la distribution actuelle des points d'eau, de la volonté villageoise, etc.

Tous ces critères sont traités par le système expert qui suit la même démarche que celle que suivrait un expert à qui on aurait confié la même mission. Des modèles interprétatifs sont associés à chaque critère, l'analyse multivariable des critères et les corrélations statistiques qu'ils entretiennent permettent une formulation pertinente de la localisation la plus favorable pour une implantation.

II INTELLIGENCE ARTIFICIELLE : notion de système expert

Les systèmes experts sont issus de la recherche appliquée en intelligence artificielle ; ce sont des logiciels d'aide à la décision, permettant de résoudre des problèmes complexes en s'efforçant d'imiter le raisonnement humain. A la différence des modèles mathématiques ou stochastiques qui opèrent sur des données numériques précises, les systèmes experts utilisent une représentation symbolique du problème, appelée base de connaissance, et de la chaîne de raisonnement associée, nommée stratégie d'inférence. La base de connaissance se compose en général d'éléments factuels stables sur lesquels opèrent des règles d'inférence : les premiers décrivent statiquement les données du problème, les secondes représentent la modélisation des processus décisionnels de l'expert.

Après une phase expérimentale (1970-1980), les systèmes experts sont aujourd'hui une réalité industrielle et commerciale à très fort potentiel. On peut citer, par exemple, dans le domaine géologique, DIPMETER ADVISOR (2) qui permet l'évaluation de gisements de pétrole et de gaz naturel, LITHO (2), système expert de géologie souterraine ou encore PROSPECTOR (voir Campbell et al.), qui exploite une importante base de données pour la détermination de gisements de minerai. Ce dernier a permis, aux U.S.A., la découverte d'un gisement de molybdène d'une valeur estimée à 100 millions de dollars.

En résumé, un système expert résulte de l'implémentation sur ordinateur d'une base de connaissance experte de telle sorte que la machine puisse donner des avis intelligents ou prendre une décision intelligente à propos d'une fonction de traitement. Historiquement, la notion de système expert est apparue à l'occasion de l'informatisation de tâches intellectuelles normalement assurées par des "experts" au sens social du terme tels que médecins, géologues, ingénieurs, etc.

Les composants de base d'un système expert sont :

- un **LANGAGE** d'expression des connaissances fournies par les experts,
- une **BASE DE CONNAISSANCE** pour accueillir la connaissance spécifique d'un domaine d'application. On y distingue des connaissances assertionnelles ou "faits" décrivant des situations et des connaissances opératoires ou règles.
- un **MOTEUR D'INFERENCE**, programme qui exploite les connaissances de la base précédente en les considérant comme des données.

III HYDROLAB : le système expert de l'hydraulique villageoise.

Comme nous l'avons vu les techniques d'implantation et les paramètres déterminants en hydrogéologie africaine sont maintenant bien connus. La présence d'une expertise conséquente et l'importance primordiale de l'alimentation en eau et la formation continue des cadres nationaux justifient la conception d'une structure d'aide à la décision. Ceci nous a conduit à modéliser la démarche de l'hydrogéologue et à réaliser un consultant hydrogéologue informatique.

3.1 Objectifs

Le but du système expert HYDROLAB est de reproduire la démarche de l'hydrogéologue en prenant en compte les très nombreux paramètres impliqués dans le cadre de programmes d'hydraulique villageoise, tant sur le plan technique que socio-économique. Il satisfait aux conditions suivantes :

- être un **outil pratique**, en rendant transparente la complexité de la recherche en eau souterraine, et en permettant de réaliser des implantations dans le meilleur contexte hydrogéologique possible, avec un taux de succès prévisible ;

- proposer aux techniciens et aux cadres un **outil de formation**, grâce à ses fonctions didactiques, le système pouvant, à chaque étape, expliciter sa démarche ;

- être un **appareil de terrain**, implanté sur un micro-ordinateur portable.

3.2 Description et mise en oeuvre

Le système comporte plusieurs niveaux hiérarchisés de collecte d'informations. Celles-ci sont analysées et corrélées à chaque étape et engendrent des hypothèses intermédiaires de plus en plus précises, et ce jusqu'à obtention d'une estimation pertinente des ressources hydrogéologiques locales.

Sur le plan pratique, la mise en oeuvre du système est extrêmement simple, les utilisateurs sont amenés à dialoguer, en langage naturel, afin de fournir divers paramètres correspondant à l'acquisition de données relatives au domaine d'étude. Ces dernières ont été implémentées, dans le système HYDROLAB, conformément à la démarche de l'hydrogéologue précédemment décrite :

- données de base : géographiques, géologiques, climatologiques, hydrologiques, hydrographiques, géomorphologiques, etc.,

- données identifiables à partir de l'étude des documents aériens,

- données de terrain : inventaire des points d'eau, structure de l'habitat, facteurs démographiques, socio-économiques, etc.,

- données acquises par investigations complémentaires (interprétation des données géophysiques).

Compte tenu de ces résultats, le système évalue la nature du risque et propose diverses solutions. Selon l'importance du risque, il peut être amené à replanifier sa démarche et à demander des indications complémentaires sur tel ou tel point qu'il aura jugé déterminant.

Il est possible, à chaque instant, de suivre, grâce à un tableau de bord fFigure 2), le but poursuivi par le système, et de l'interroger sur les tenants et les aboutissants des questions qu'il pose à l'utilisateur, ceci confèrant à HYDROLAB des fonctions d'enseignement assisté par ordinateur (E.A.O.).

Enfin, le système rend compte des inférences qu'il a réalisées et identifie le contexte hydrogéologique en fonction de l'environnement qui lui a été décrit et de ce qu'il en a déduit. HYDROLAB s'oriente vers deux types de solutions : la première **analogique**, relative à son espace de solution type (spécifique à la connaissance hydrogéologique locale), la seconde correspondant à une solution **générique** du problème posé. Des modèles interprétatifs, basés sur les relations précédemment exposées, permettent également d'estimer le risque à la foration (pourcentage de chances d'obtenir un forage positif), le débit et le débit spécifique statistique escomptable dans le contexte décrit.

L'écran d'HYDROLAB est décomposé en trois parties. La première est une fenêtre d'interaction dévolue au dialogue avec l'utilisateur, la seconde est utilisée en alternance par deux types de fenêtres, l'une dédiée à l'impression de l'aide en ligne et l'autre à la visualisation du raisonnement en cours entrepris par le système, enfin la troisième correspond au tableau de bord. L'appel de la documentation en ligne (Help) se fait à l'aide d'un éditeur pleine page qui est affiché en surimpression de l'écran courant.

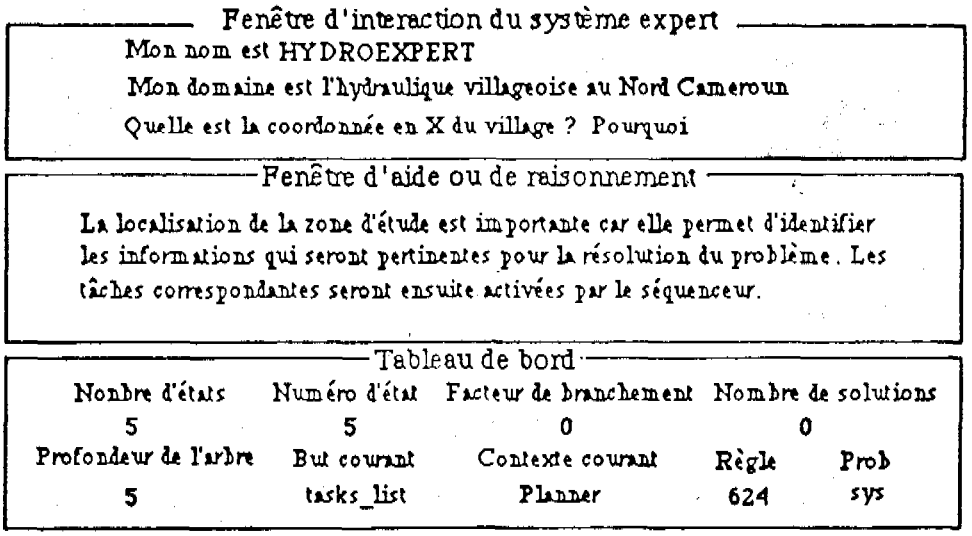


Figure 2 : l'écran d'HYDROLAB.

3.3 Un système interactif avancé

Pour les utilisateurs, les attraits d'une session de travail avec HYDROLAB proviennent, en plus de la finalité du système, de sa capacité à expliquer ses propres raisonnements, de son aptitude à comprendre des questions exprimées en langage naturel, de sa possibilité d'expliciter sa démarche à tout moment et de sa capacité à supporter des modifications et à acquérir de nouvelles connaissances.

Par ailleurs son espace de solution "analogique" est constitué par un fichier qu'il est possible de mettre à jour, avec un simple éditeur de texte, au fur et à mesure de l'avancement des travaux de forage. Par ce biais, le système peut acquérir une connaissance "analogique" très importante. Les diagnostics qu'il fera seront évidemment d'autant plus pertinents et plus précis que son espace de solutions analogiques sera vaste.

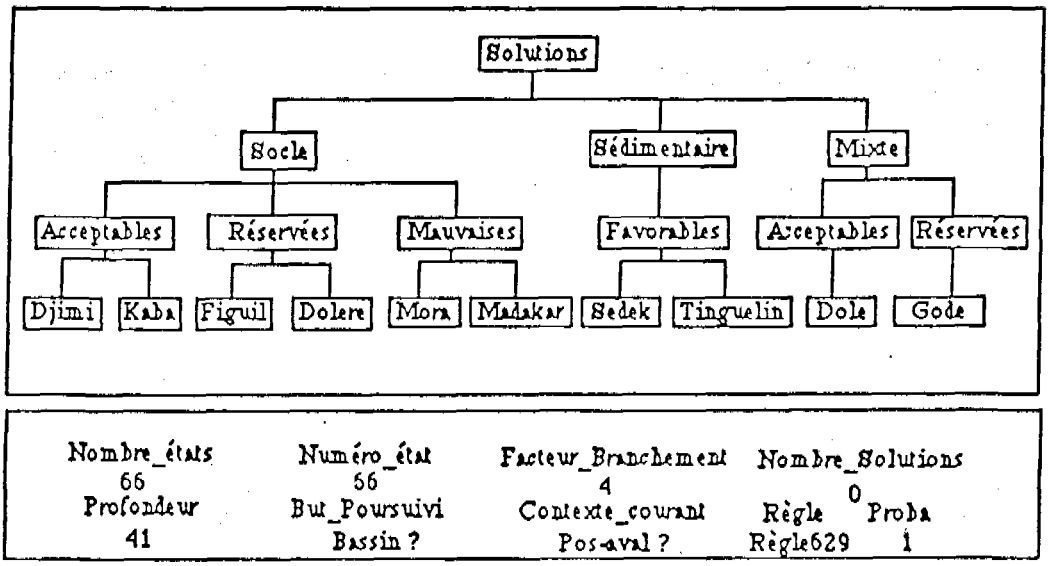


Figure 3 : l'écran d'HYDROLAB au cours du raisonnement lors du parcours de l'arbre des solutions analogiques.

3.4 Domaine d'expérimentation

Nous travaillons depuis 1984 à la réalisation d'une maquette caractéristique d'un domaine restreint d'application : le Nord Cameroun.

Sur le plan hydrogéologique, ce secteur (102 000 km^2) a l'intérêt d'être représentatif des zones de socle lato sensu, de posséder des bassins sédimentaires et une limite de "grand bassin" (bassin du Lac Tchad). Cette zone d'étude rassemble ainsi la totalité des configurations générales caractéristiques du continent africain. Par ailleurs, sur le plan technique, dans le cadre des activités des Sociétés Arlab et Géolab, nous avons effectué dans ce secteur des études d'implantations qui ont conduit à la réalisation d'environ 1 000 forages avec un taux de succès supérieur à 80%. C'est l'identification analytique et probabiliste des paramètres numériques et non-numériques relative à ces études qui constitue la base de connaissance mise en oeuvre par le système expert.

3.5 Représentation de la connaissance - arborescence des contextes

La connaissance provient de l'identification analytique et probabiliste des paramètres numériques et non-numériques en hydrogéologie sub-sahélienne (Detay, 1987). HYDROLAB, dans sa version démonstrateur actuelle, comporte environ 300 règles codées en Turbo-Prolog (3).

Le "facteur de succès" (appelé aussi "coefficient d'atténuation") est très généralement associé à la règle, c'est à dire à l'inférence représentée. Néanmoins une soixantaine de règles auxiliaires, par exemple des règles éditant des messages, n'ont pas de tels coefficients.

Les modules de représentation de la connaissance sont divisés classiquement en connaissance statique stockée sous la forme de structures PROLOG qui représentent des objets et des connaissances inférencielles articulées autour de la notion de tâches. Les mécanismes de reconnaissance des solutions par mise en correspondance ou par élaboration d'entités génériques à l'aide de concepts de haut niveau symbolique construits au cours du raisonnement constituent la partie déductive terminale d'HYDROLAB. L'interaction avec l'utilisateur est assurée par un module de traitement du langage naturel et par le tableau de bord qui visualise l'activité du moteur. Enfin l'impression des résultats fait l'objet d'un traitement particulier.

3.6 Un modèle de contrôle à deux passes

La principale partie d'HYDROLAB, en ce sens qu'elle est responsable du comportement apparent du système, est un planificateur qui active les tâches (Figure 4). Chaque tâche enregistre les résultats partiels qu'elle engendre dans la base de faits PROLOG de manière indépendante des autres, selon un fonctionnement semblable à celui d'un tableau noir (Hayes-Roth 1984 ; Nii 1986). Un ensemble de questions très discriminantes est posé à l'utilisateur en phase d'initialisation, afin de pouvoir agencer un premier plan qui est utilisé par le système comme un ensemble de buts plausibles. En particulier, les réponses faites par l'utilisateur au sujet du contexte général reconstitué, à la base, à partir des cartes et des images aériennes, conduisent HYDROLAB à faire un certain nombre de suppositions. Celles-ci permettent au système d'élaborer un premier plan et mettent l'accent sur les points considérés comme déterminants en fonction du contexte pré-supposé et peuvent, à titre d'exemple, privilégier l'acquisition d'informations sur l'alimentation plutôt que sur le réservoir.

La liste de tâches à entreprendre est donc construite de manière dynamique. Son activation est à la charge d'un "scheduler" récursif qui conserve la liste des choix. Quand le plan initial parvient à son terme, le système active le module d'inférence et cherche à reconnaître, à l'aide d'une mise en correspondance floue, la situation utilisateur parmi celles décrites et enregistrées au sein de la base de "référence analogique". Si cette étape de mise en correspondance échoue, pour l'ensemble des situations réelles et caractéristiques connues, le système bascule de nouveau dans un cycle de contrôle. HYDROLAB identifie alors les données manquantes qui étaient susceptibles de le guider vers une solution "réelle" et celles qui seraient utiles à l'élaboration d'une solution générique. Les tâches mises en cause sont alors agencées, sous la forme d'une liste de tâches, par le planificateur, qui les transfère au "scheduler".

A la fin de ce cycle, le système considère qu'il dispose de l'ensemble des informations pertinentes vis-à-vis du problème considéré et que l'utilisateur n'est plus en mesure de contribuer à l'élaboration d'une solution. Le contrôle est donc définitivement transféré au module chargé des inférences. L'obtention d'une solution peut alors être le fait d'une mise en correspondance entre le tableau d'objets courants et une situation de référence analogique. Elle peut aussi être construite de toutes pièces par HYDROLAB à partir de la genèse des concepts de haut niveau symbolique à l'aide des informations élémentaires fournies par l'utilisateur.

Peu de systèmes ont développé cette capacité de réaction et de réflexion sur l'échec au point de la rendre naturelle et de la systématiser dans sa mise en oeuvre. C'est la démarche que nous avons poursuivie dans la conception de la structure de contrôle d'HYDROLAB. Nous avons appelé ce mécanisme de contrôle "un modèle à deux passes".

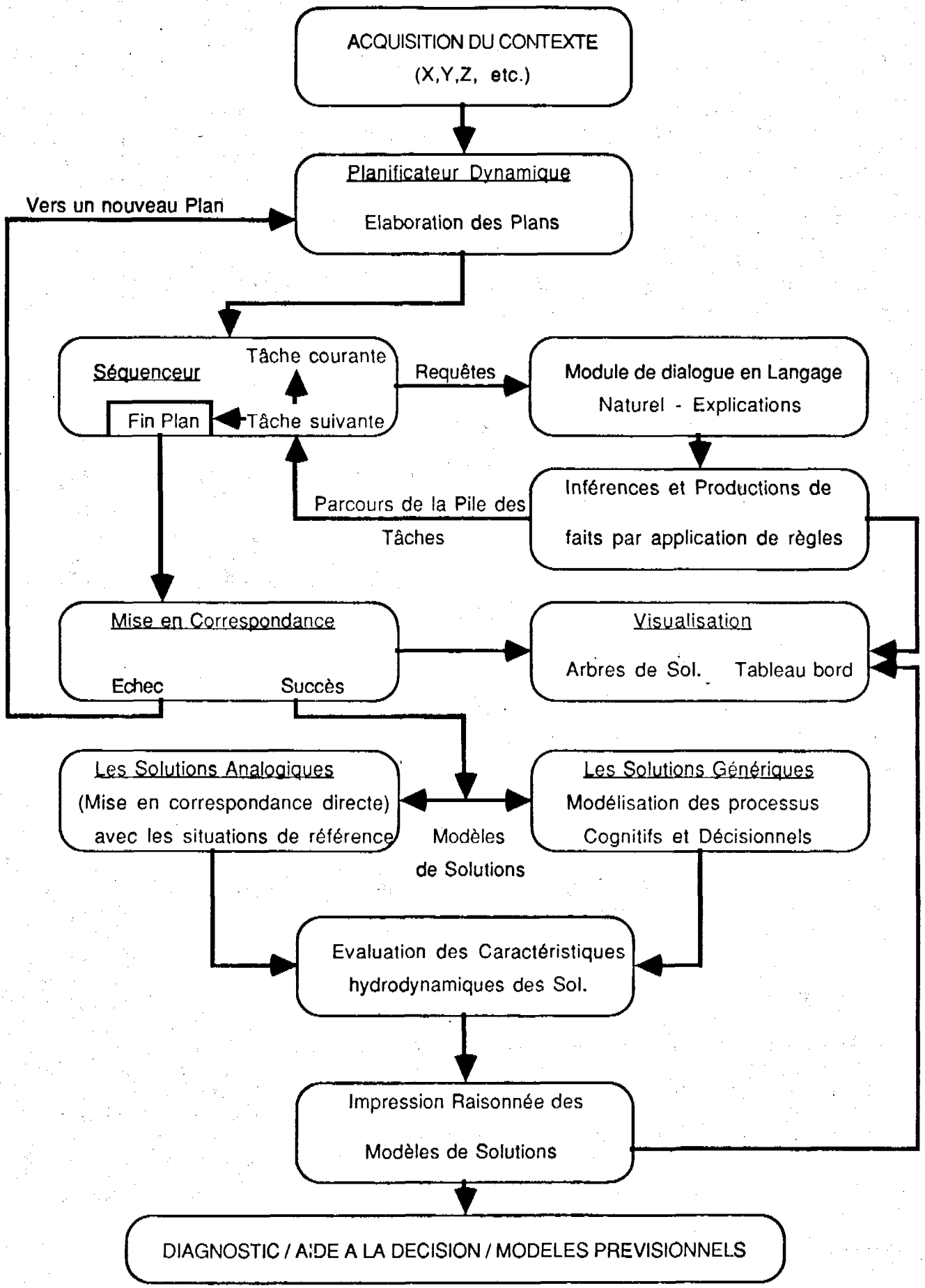

ACQUISITION DU CONTEXTE
(X,Y,Z, etc.)
Planificateur Dynamique
Elaboration des Plans
Vers un nouveau Plan
Séquenceur
Tâche courante
Fin Plan
Tâche suivante
Requêtes
Module de dialogue en Langage Naturel - Explications
Parcours de la Pile des Tâches
Inférences et Productions de faits par application de règles
Mise en Correspondance
Echec
Succès
Visualisation
Arbres de Sol.
Tableau bord
Les Solutions Analogiques
(Mise en correspondance directe) avec les situations de référence
Modèles de Solutions
Les Solutions Génériques
Modélisation des processus Cognitifs et Décisionnels
Evaluation des Caractéristiques hydrodynamiques des Sol.
Impression Raisonnée des Modèles de Solutions
DIAGNOSTIC / AIDE A LA DECISION / MODELES PREVISIONNELS

Fig. 4

3.7 Elément d'analyse : la reconnaissance des solutions

Quand la première phase de planification arrive à son terme, tous les faits supposés nécessaires au raisonnement sont présents, dans la base de données dynamiques, sous la forme de structures PROLOG . Le module d'inférences procède alors à une mise en correspondance floue entre chacune des situations de référence décrites, dans les bases de données, et les faits opérateurs. Pour chaque référence, et pour chaque paramètre significatif, le système va élaborer une distance entre les données utilisateur et la base de référence analogique. Ceci est réalisé à l'aide de prédicats dédiés, qui prennent en compte la métrique utilisée pour la mesure du paramètre ainsi que sa dispersion, et retourne une valeur pondérée en conséquence. Quand ce traitement est effectué pour tous les attributs de la référence, le système en déduit une valeur globale de mise en correspondance.

L'expression suivante permet de se faire une idée du mode de calcul d'un pourcentage de similarité global entre les données utilisateur et la base de référence analogique :

$$\text{distance(user_data, model)} = \min\left(100., \sum_{i=1}^{n} \frac{100 \,.\, |\, \text{slot}_{1i} - \text{slot}_{2i} \,|}{n \,.\, \text{slot}_{1i}}\right)$$

où slot 1i désigne le i ème champ de l'objet 1 (structure composée qui contient les données utilisateur) et slot 2i est le i ème champ de l'objet 2 (structure composée prise pour modèle). En fait, un travail similaire est accompli, champ après champ, en respectant les métriques et les dispersions, avant qu'une somme globale ne puisse être faite. Les prédicats spécialisés qui calculent, attribut par attribut, les distances, sont dépendants du contexte et doivent être invoqués avec des intervalles flous, de manière à prendre en compte la diversité des métriques rencontrées.

IV APPORT DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE EN HYDROGEOLOGIE

L'apport de l'informatique dépasse l'objectif scientifique et industriel et confère à HYDROLAB la propriété d'être également un outil "pédagogique global" en rendant possible la simulation et l'explication d'une gamme de scénarii qu'il est capable de produire (variations de conditions géologiques, climatologiques, structurales, hydrologiques, démographiques, etc.).

Afin de juger des fonctions pédagogiques de cet outil, il a été utilisé au cours de nombreuses sessions internationales de formation au Centre de Formation International à la Gestion des Ressources en Eau (CEFIGRE) dans le cadre du perfectionnement de cadres africains aux techniques d'implantations. Les utilisateurs ont eu à traiter des cas réels à partir des cartes topographiques et géologiques, de fiches d'inventaires des points d'eau, de résultats de la photointerprétation, de données géophysiques et des études de terrain déjà effectuées, puis à comparer les conclusions d'HYDROLAB aux résultats des forages réalisés dans ces mêmes localités.

Après une phase d'expérimentation avec des logiciels utiles très encombrants sur de gros ordinateurs, HYDROLAB est un exemple d'architecture logicielle très compacte dédiée à des micro-ordinateurs portables, type IBM PC. ou compatible. Cette architecture intègre la majeure partie des fonctionnalités usuellement disponibles au sein d'applications construites à l'aide de générateurs de systèmes experts sur de gros calculateurs.

CONCLUSIONS

La quantité d'expertises actuellement disponibles, le savoir faire en intelligence artificielle et les performances actuelles des micro-ordinateurs à de faibles coûts permettent dès à présent le développement de systèmes experts extrêmement performants qui étaient à peine envisageables il y a quelques années sur de gros ordinateurs.

Nous pensons que la diffusion de cette technologie rendra possible, dans un proche avenir, une réduction sensible du coût des études grâce à la formation et à l'accroissement de la participation de cadres nationaux au développement des ressources en eau de leurs pays. L'intelligence artificielle devrait ainsi permettre d'apporter une contribution à la résolution du problème de l'eau en Afrique, en particulier dans le cadre des programmes d'hydraulique villageoise.

HYDROLAB permet non seulement de sauvegarder l'expertise et la connaissance mais également de former les jeunes ingénieurs mis à la disposition des projets. Cette formation est continue, car l'expérience montre que dès qu'un ingénieur est opérationnel il est nommé à un poste de responsabilité. De la sorte, HYDROLAB permet de diffuser largement l'expérience à une équipe très étoffée.

La pertinence du projet et la viabilité du produit ont été démontrées dans un domaine d'application restreint : le Nord Cameroun. Comme nous l'avons vu ce domaine présente l'avantage de regrouper l'ensemble des configurations hydrogéologiques caractéristiques du continent africain. L'architecture du système, faisant appel à des bases de données analogiques et génériques permet dès à présent d'envisager son utilisation dans divers pays africains. En effet, la démarche de l'hydrogéologue est la même quel que soit le domaine géographique d'application, et elle est codée, au coeur du système, dans la base générique. La base analogique sera d'autant plus pertinente que l'on aura d'informations sur des campagnes antérieures dans le secteur considéré, elle peut être saisie avant le démarrage des travaux (synthèse des travaux réalisés) et au fur et à mesure de l'avancement d'une campagne de forage. Enfin la base analogique n'est pas limitative et il est évident que dés qu'elle atteint plusieurs centaines de forages d'étalonnage elle représente une connaissance bien supérieure à celle de la mémoire de n'importe quel expert.

HYDROLAB présente l'avantage d'être à la fois un consultant informatique expert hydrogéologue et un outil didactique. Il assure la sauvegarde et l'optimisation de l'information ainsi que la mise à disposition de la connaissance à tous.

Il est actuellement utilisé par la société Géolab, dans le cadre de programmes d'hydraulique semi-urbaine et villageoise, au Cameroun et en République Centrafricaine grâce à des micro-ordinateurs portables de terrain du type 286.

BIBLIOGRAPHIE

* Bernardi, A. et Detay, M. 1988. Corrélations entre les paramètres géoélectriques et les caractéristiques hydrodynamiques des forages en zone de socle - sous presse, Revue du B.R.G.M., 15 p..

* Bernardi, A., Detay, M. et Gaujous, D., 1987. Primi risulti di studi e perforazioni eseguita nel Camerun settentrionale. XX° International Congress A.I.H., Roma, 14 p.

* Bernardi A., Didero M., et Mouton J., 1987. Metodologia per la ricerca di acque sotterranee in zone aride dello zoccolo cristallino africano. XX Congresso A.I.H., Roma.

* Bernardi, A., Detay, M. et Gaujous, D. 1985. Carte de planification des ressources en eau de Nord Cameroun à 1/500 000 (102 000 km^2) - Ministère de l'Agriculture, FONADER.

* Bernardi A. et Mouton J., 1980. Les recherches d'eau dans le socle africain - Apport de la géophysique. Bull. B.R.G.M. Section III n° 4, pp. 293-309, 16 fig.

* Bernardi A. et Mouton J., 1975. Recherche d'eau dans les formations cristallines et métamorphiques du socle africain. International Congress of Hydrogeology, Porto Alègre (Brazil), pp. 38.

* BURGEAP et RENARDER Engineering, 1979. Projet de développement des régions cotonnières - République de Côte d'Ivoire, Direction centrale de l'Hydraulique. Rapport final.

* Campbell A.N., Hollister V.F., Duda R.O., et Hart P.E., 1982. Recognition of a hidden mineral deposit by an artificial intelligence program. Sciences, Vol. 217, pp. 927-929.

* C.I.E.H., 1978, 1979. Méthode d'étude et de recherche de l'eau souterraine des roches cristallines de l'afrique de l'ouest. 3 tomes.

* Detay M. et Poyet P., 1988. State of the art et place of artificial intelligence in field hydrogeology. Journal of Hydrology, 20 p., sous presse.

* Detay M. et Poyet P., 1988. Hydroexpert - un système expert en hydrogéologie de terrain. Actes des communications scientifiques du salon Hydroplan 1988. pp. 191-195.

* Detay, M. et Poyet, P., 1988. Application de l'intelligence artificielle en hydrogéologie. "Géologues" (revue officielle de l'Union Française des Géologues), sous presse, 10 p.

* Detay, M., 1987. Identification analytique et probabiliste des paramètres numériques et non-numériques et modélisation de la connaissance en hydrogéologie sub-sahélienne - application au Nord Cameroun - Thèse de Doctorat ès Sciences, Université de Nice, 456 p.

* Detay M., Goulnik Y., Casanova R., Ballestracci R. et Emsellem Y., 1986. Hydrolab, an expert system for groundwater exploration in Africa. Proceedings of the International Conference on Water Resources Needs and Planning in Drought Prone Areas. Khartoum (Soudan), pp. 1231-1236.

* Detay M. et Goulnik Y., 1986. HYDROLAB, un système expert de recherche des eaux souterraines en Afrique Occidentale. 13ème Conseil des Ministres du Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques, Brazzaville (Congo), 8 p..

* Detay M., Goulnik Y., Casanova R. et Ballestracci R., 1986. HYDROLAB Un système expert pour la recherche des eaux souterraines en Afrique. Actes du 2ème colloque international : Eau Gestion des Données et Aide à la Décision, Montpellier, pp. 94-99.

* Detay M., 1985. Analyse statistique des paramètres hydrogéologiques de la première campagne de forages dans le Sud-Ouest Gabonais. Bull. du C.I.E.H. n° 60, pp. 1-22.

* GEOLAB - ARLAB, 1985, 1986, 1987. Programme d'Urgence dans les provinces du Nord et de l'Extrême Nord au Cameroun. Rapport final phase I, II et III, Ministère de l'Agriculture.

* GEOLAB - ARLAB, 1985. Mission d'Etude et d'Aménagement pour la Vallée Supérieure de la Bénoué, étude d'implantation et supervision de forages. Rapport final FED.

* GEOLAB - ARLAB, 1985, 1986. Programme d'Hydraulique Villageoise dans les provinces du Nord de l'Extrême Nord et de l'Adamaoua. Rapport final. Ministère des Mines.

* Hassane A., 1983. Préface de l'ouvrage Le Forage d'eau. C.I.E.H. - Burgeap. Ministère des Relations Extérieures.

* Hayes-Roth, 1985. An architecture for blackboard systems that control, explain and learn about their own behavior. HPP Report n° HPP-84-16, 22p.

* Nii P., 1986. Blackboard systems : the blackboard model of problem solving and the evolution of blackboard architectures. AI magazine, summer 1986, pp. 38-53.

* Poyet P. et Detay M., 1988. HYDROLAB an example of a new generation of compact expert systems. Computers & Geosciences (sous presse) - 15 p.

* Poyet P., 1988. Cours de modélisation assisté par ordinateur : les problèmes, les langages, les machines, les techniques de l'Intelligence Artificielle. Laboratoire de Géologie-Géochimie, Parc Valrose, 06034 Nice cedex, 80 p.

* Poyet P. et Detay M., 1988. Hydroexpert - Un système expert d'aide à l'implantation de forages en hydraulique villageoise. Manuel d'introduction et de référence. 42 p.

* Poyet P. et Detay M., 1988. HYDROEXPERT : Aide à l'implantation d'ouvrages d'hydraulique villageoise. Huitième Journées Internationnales Les systèmes experts et leurs applications, Avignon, pp. 397-410.

* Poyet P. et De La Cruz P., 1987. Simulation navale et environnement hostile. Actes de l'Ecole d'Automne sur l'Intelligence Artificielle, Congrès Thomson et ENS Ulm, Jouy en Josas, 9 p..

* Poyet P., Haren P. et De La Cruz P., 1987. Un système expert de simulation navale. 6ème Congrès AFCET Reconnaissance des formes et Intelligence Artificielle, pp. 587-592.

* Poyet P., 1987. La structure de contrôle dans les systèmes experts de simulation. 6ème Congrès AFCET Reconnaissance des formes et Intelligence Artificielle, pp. 723-738.

* Poyet P., 1986. Modélisation d'anomalies uranifères et aide à la décision Méthode de discrimination des anomalies géochimiques multiélémentaires significatives. Thèse de Doctorat ès Sciences, Université de Nice, 436 p.

---

(1) HYDROLAB est une marque déposée par M. Detay et P. Poyet
HYDROEXPERT est une marque déposée par M. Detay et P. Poyet
(2) DIPMETER ADVISOR et LITHO sont des marques déposées de Schlumberger
(3) Turbo-Prolog est une marque déposée de Borland International