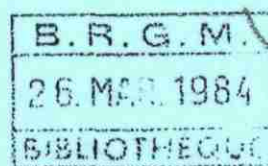


BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL



PROJETS DE CARTE HYDROGÉOLOGIQUE INTERNATIONALE DE L'AFRIQUE À PETITE ÉCHELLE

OBJECTIFS ET CONTENUS



Département EAU

Rapport du B.R.G.M.

83 SGN 776 EAU

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

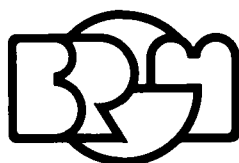
B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex (France) - Tél.: (38) 63.80.01

PROJETS DE CARTE HYDROGÉOLOGIQUE INTERNATIONALE DE L'AFRIQUE À PETITE ÉCHELLE

OBJECTIFS ET CONTENUS

par

J. MARGAT



Département EAU

B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex (France) - Tél.: (38) 63.80.01

Rapport du B.R.G.M.

83 SGN 776 EAU

Novembre 1983

RESUME

A la suggestion de l'Association africaine de cartographie (AAC), chargée par l'Organisation de l'unité africaine (OUA) d'élaborer et mettre en oeuvre le projet d'une *Carte hydrogéologique internationale de l'Afrique* à petite échelle, une note de réflexions et de propositions relatives à ce projet a été établie en contribution à la 2ème réunion d'experts convoquée par l'OUA et organisée par l'AAC à cette fin, à Dakar du 5 au 11 décembre 1983. Le présent document en dérive.

Deux voies et deux orientations s'offrent à la cartographie mise au service de l'inventaire et du développement des ressources en eau souterraine : finalités du projet de l'OUA. Distinctes et complémentaires par la nature et la forme des informations exprimées et par les utilisateurs visés -autorités responsables du développement socio-économique, de l'aménagement et de la gestion des ressources d'une part, professionnels spécialistes de la prospection et de l'exploitation des eaux souterraines d'autre part- deux genres de cartes à petite échelle sont concevables :

- une carte internationale des eaux souterraines de l'Afrique qui pourrait être rapidement dressée ;

- une carte hydrogéologique internationale de l'Afrique requérant un programme d'action à long terme.

On esquisse ici les objectifs propres et les contenus appropriés de l'une et de l'autre dont il paraît également utile d'entreprendre la réalisation.

SOMMAIRE

PREAMBULE

I - L'OBJECTIF

II - LE CONTENU

1. Carte des eaux souterraines
2. Carte hydrogéologique

III - SUGGESTIONS OPERATIONNELLES

BIBLIOGRAPHIE

PREAMBULE

01. La présente note se propose de contribuer aux débats de la réunion d'experts organisée par l'AAC sur le projet de l'OUA de *Carte hydrogéologique internationale de l'Afrique*, en abordant plus particulièrement la question primordiale de l'objectif de la carte projetée, en complément aux matériaux remarquablement préparés par l'AAC à ce sujet. Un consensus sur l'objectif d'une telle carte semble en effet le préalable à toute définition et sélection de son contenu -choix des informations à représenter-, lui-même interactif avec le choix de l'échelle (ou des échelles), puis à l'élaboration et à l'adoption d'une légende appropriée.

Ces réflexions seront largement inspirées par l'analyse des expériences antérieures en la matière, notamment par celles des cartes internationales relatives aux eaux souterraines déjà réalisées, dont on esquissera brièvement quelques enseignements.

I - L'OBJECTIF

02. Depuis plusieurs décennies la cartographie thématique consacrée aux eaux souterraines, concrétisée par de nombreuses réalisations nationales ou internationales, a tendu à diversifier ses objectifs et en conséquence ses contenus. Un peu schématiquement, on peut distinguer deux orientations dominantes :

(1) - Une orientation *scientifique*, celle des cartes hydrogéologiques au sens strict, visant surtout à conserver et communiquer des connaissances pour la communauté des spécialistes, à des niveaux tantôt plus analytiques, tantôt plus synthétiques, dans la lignée directe des cartes géologiques, plus ou moins croisée avec les cartographies climatologiques et hydrologiques.

C'est à ce courant que s'est consacré principalement l'effort international de standardisation des modes d'expression qui a aboutit notamment à la *Légende internationale des cartes hydrogéologiques* élaborée par

l'UNESCO avec le concours de l'AIH* et de l'AISH** (1970)*** et plus récemment à la "Légende ACSAD**** pour la carte des ressources en eau des pays arabes" (1982) consacrée surtout aux eaux souterraines et cohérente avec la précédente.

Il convient néanmoins de bien souligner que ces "légendes internationales" constituent des "alphabets" graphiques qui standardisent les symboles représentant divers faits et phénomènes hydrogéologiques (variables spatiales, essentiellement), dont l'emploi est recommandé, et non des normes dictant le contenu des cartes, les matières à cartographier, contenu qui reste ouvert à l'appréciation et aux options des rédacteurs : en somme le but essentiel de ces légendes est de proposer un langage commun aux scientifiques et aux techniciens pour faciliter leurs échanges et leur coopération mais elles laissent le libre choix de ce que l'on veut -et de ce que l'on peut- exprimer en fonction des conditions naturelles, de l'état des connaissances et des critères de sélection des données à représenter (notamment selon l'échelle*****).

- (2) - Une orientation *pratique* visant davantage à fournir à diverses catégories d'utilisateurs non spécialistes des informations élaborées, directement utiles, comme éléments d'évaluation et de décision adaptés à leur domaine de compétence -champ spatial et types ou finalités d'action-.

.../...

* AIH : Association Internationale des Hydrogéologues, affiliée à l'Union Internationale des Sciences Géologiques (UISG).

** AISH : Association Internationale des Sciences Hydrologiques, rattachée à l'Union Géophysique et Géodésique Internationale (UGGI).

*** Résultat de groupes de travail ad hoc ayant oeuvré depuis 1954, largement inspiré d'un modèle proposé par un pays africain ("Légende générale des cartes hydrogéologiques du Maroc", publ. n° 50 de l'AISH, 1960), diffusé en version provisoire en 1962 (Bull. AISH n°3) puis en 1963 (doc UNESCO NS/NR/20) et enfin révisée et adoptée par les associations et l'UNESCO en 1963 et publiée en 1970.

**** ACSAD : The Arab Center for the Studies of Arid Zones and Dry Lands (Damas).

***** La **Légende internationale** de l'UNESCO, par exemple, spécifie bien que certains figurés ou symboles sont appropriés pour des "cartes spéciales" ou des cartes à un ordre d'échelle donné (grande ou petite selon les cas).

Elle s'est concrétisée par des cartes très diverses où les soucis de bien adapter les informations aux besoins, en donnant donc priorité au critère d'utilité pour leur sélection, et de faciliter la perception l'ont emporté sur celui de normaliser les légendes -notamment au niveau international-.

Ces deux orientations ne forment pas deux "écoles" antagonistes : elles sont plus complémentaires qu'opposées, la seconde bénéficiant de l'infrastructure scientifique élaborée par la première. Il convient cependant de ne pas confondre les genres, ni mêler les objectifs au risque de n'en atteindre aucun.

03. Des cartes des deux types ont déjà été réalisées dans différents pays africains, soit de territoires nationaux, soit de régions (feuilles "régulières" ou coupures spéciales), soit encore de domaines pluri-nationaux. Sans dresser ici l'inventaire -cf. le répertoire mentionné dans le fascicule IV des documents préparés par l'AAC-, on citera à titre d'exemples :

- de l'orientation (1) : la carte hydrogéologique du Sénégal à 1/500 000 (1965), la carte hydrogéologique du Tchad à 1/1 500 000 (1969), diverses cartes hydrogéologiques régionales à grande échelle au Maroc (de 1960 à 1975)... ;

- de l'orientation (2) : les cartes "de planification des ressources en eau souterraine" des pays soudano-sahéliens d'Afrique de l'Ouest à 1/1 500 000, réalisée de 1975 à 1980 à l'initiative du CIEH* avec le concours du FAC français (opérateur : BRGM) ; les cartes des ressources en eau souterraine de la Tunisie à 1/200 000 (feuilles publiées de 1965 à 1971)...

04. Une carte de l'ensemble d'un continent, donc internationale, telle que celle projetée pour l'Afrique, peut répondre à deux objectifs principaux :

.../...

* CIEH : Centre Interafricain d'Etudes Hydrauliques (Ouagadougou), organisme éditeur et distributeur de ces cartes.

- a) - Offrir à diverses autorités et instances nationales, "régionales" et internationales compétentes en matière de développement économique et de planification, un ensemble homogène d'informations utiles pour analyser les situations et orienter les interventions : essentiellement sur les *potentialités* en eau souterraine et sur les *problèmes* que posent à la fois leur développement, leur conservation et leur protection.

Les informations à réunir sur les eaux souterraines ont alors deux fonctions à remplir :

- *renseigner* : apporter des réponses aux principales questions que posent les utilisateurs visés, pour autant que la carte est le mode d'expression adéquat ;
- *instruire* : communiquer les messages que les scientifiques et les ingénieurs estiment opportun de faire passer à ces utilisateurs, sous une forme appropriée à leur compréhension.

La carte est en somme alors un instrument "conversationnel" :

- son programme doit résulter d'une double analyse respectivement des "besoins de renseignements" (questions posées) et des "soucis d'instruire" ;
- sa facture devra être adaptée à ces deux fonctions.

Ce premier objectif s'apparente surtout à l'orientation (2) précédente.

- b) - Appuyer et stimuler l'inventaire des données de base, l'avancement des connaissances sur les eaux souterraines, l'élaboration de leur synthèse provisoire, notamment sous la forme de cartes hydrogéologiques détaillées dans les différents pays africains, en proposant plus particulièrement une base de méthodes à cette fin aux pays où ces investigations sont encore peu avancées.

Cet objectif vise surtout les professionnels, notamment les spécialistes nationaux, oeuvrant dans chaque pays et les responsables qui dirigent et

programment les activités d'étude et de recherche -notamment dans le cadre des organismes géologiques ou hydrologiques compétents- ; il s'apparente davantage à l'orientation (1) précédente.

Dans les deux optiques, on remarquera qu'une carte à petite échelle a essentiellement une fonction éducative, qui prend nécessairement le pas, notamment quant à l'objectif scientifique (b), sur une portée technique décisionnelle (fournir une base de données préalables à des études précises, permettant à leurs opérateurs de gagner du temps...) dévolue seulement à des cartes hydrogéologiques à grande échelle.

05. Un résultat induit par le projet, plutôt qu'un objectif, mais néanmoins d'intérêt appréciable, sera en outre de favoriser le dialogue et la coopération technique entre spécialistes des différents pays africains en les associant à une œuvre communautaire.

En son temps, le lancement de la "carte hydrogéologique internationale de l'Europe" à 1/1 500 000 (AIH/UNESCO) a eu une retombée favorable sur ce plan.

06. Les deux objectifs énoncés ne s'excluent pas, mais comme on l'a indiqué plus haut, ils ne paraissent pas aisément conjugables ni compatibles, comme but d'une seule et même carte, car ils ne requièrent pas les mêmes natures ni surtout les mêmes formes d'information (et échelles de support), comme on le montrera plus loin (II).

La finalité commune de *"permettre une meilleure mise en oeuvre et une meilleure harmonisation des politiques nationales de développement des projets d'inventaire et de mise en valeur des ressources en eau souterraine"* explicitement énoncée par l'OUA [résolution CM/Res. 702 (XXXII) du Conseil des Ministres, le 4 mars 1979] met bien en évidence la dichotomie entre les objectifs de connaissance ("inventaire") et de développement ("mise en valeur"), le premier étant toutefois moins un but en soi qu'un moyen au service du second. Il paraît donc nécessaire de bien différencier les utilisateurs, en tant que "cible visée", et de décider, le cas échéant, lesquels on souhaite servir en priorité.

II - LE CONTENU

07. Le contenu d'information d'une carte doit d'abord découler logiquement de l'*objectif* prioritaire fixé.

Toutefois, il n'est pas indépendant des contraintes inhérentes au mode d'expression cartographique à une échelle donnée. Les informations voulues en théorie ne sont pas toutes significatives à la même échelle ; à une échelle donnée, le nombre d'informations de natures différentes dont les représentations sont compatibles, sur une même carte, sans nuire à la clarté de l'ensemble, est nécessairement limité (ce qui pose incidemment la question de l'éventualité de cartes multiples, formant un atlas... -cf. l'exemple cité des cartes des pays du Sahel d'Afrique de l'Ouest-).

Sans aborder ici cette question de la répartition des informations sur un ou plusieurs supports cartographiques (carte unique, carte principale plus annexes, carte "démultipliée"), on esquissera, comme base de discussion, pour chacun des deux objectifs majeurs énoncés, une liste d'informations appropriées. L'accent sera mis toutefois surtout sur l'objectif (a), le programme des cartes hydrogéologiques classiques, bien connu, s'adaptant davantage à l'objectif (b).

08. Pour plus de clarté on propose de dénommer "*carte des eaux souterraines*" -ou, si l'on veut, "*carte de ressources en eau souterraine*"- les cartes visant le premier objectif (a), et "*carte hydrogéologique*" celle visant le second (b). On appliquera ci-après cette terminologie.

1. Carte des eaux souterraines

09. Si l'on se réfère à l'objectif prioritaire assigné à cette carte, les informations qu'elle devrait contenir et offrir se proposeraient de :

- Faire comprendre la nature et la variété des rôles réels et potentiels des eaux souterraines dans l'économie de l'eau régionale, ainsi que les différents

.../...

degrés d'autonomie des eaux souterraines par rapport aux eaux superficielles et les formes de leur liaison ou d'interdépendance : en un mot, faire comprendre la nature des *ressources en eau souterraine* et la variété de leurs genres.

- Faire connaître les *potentialités* en eau souterraine et leur limites : ordre de grandeur des ressources en quantité (flux et stock), conditions d'accès et d'exploitation, qualité ; sensibilité à des risques de dégradation de quantité ou de détérioration de qualité.

- Faire voir les extensions géographiques respectives des domaines où règne chaque type principal de condition d'occurrence et de régime des eaux souterraines, autrement dit de genre de ressource auquel des *problèmes* spécifiques de développement et de gestion sont associés.

- Faire repérer où se trouvent des localités où des champs délimités soit de phénomènes naturels (sources, pertes d'eau de surface, aires d'évaporation...), soit d'action humaine (captage, aire d'exploitation...) les plus notables et significatifs dans chaque région.

Potentialités et *problèmes* sont les deux mots-clés de ce "programme" : on y reviendra ci-après.

10. On retrouve bien dans cette gamme d'objets d'information les deux *fonctions techniques* courantes de toute carte thématique, censée répondre "à vue" à deux sortes de questions :

- (1) - En un lieu ou en un secteur donné(s), quelles sont les conditions ?
Quels caractères ?

- (2) - Où se trouvent telle condition, tel caractère ou fait ? Quelle est la distribution spatiale d'un caractère d'une variable relative aux eaux souterraines ?

.../...

Selon l'expression de J. BERTIN* la carte est à la fois "à lire" (réponse à la première question) et "à voir" (réponse à la seconde). Une carte thématique qui serait seulement "à lire" n'atteindrait pas complètement son but : on rejoint la contrainte de facilité de perception et de compréhension.

11. Faut-il rappeler ici l'extrême diversité des conditions régnantes sur l'ensemble du continent africain ? La diversité des climats et des structures géologiques, des structures et des régimes d'écoulement des eaux, entraînent une grande variété de conditions et de potentialités relatives aux eaux souterraines. Jointe aux différences de structures et de niveaux de développement socio-économiques, cette diversité engendre une pluralité de problèmes et de demandes d'information.

En conséquence, le programme d'une légende générale (internationale) valable pour toute l'Afrique doit prendre en compte la gamme complète de cette variété, même si une partie seulement s'avère utile à l'échelle de tel ou tel pays particulier (ce sera le cas pour la plupart). Cette considération doit d'ailleurs faciliter la clarté des expressions cartographiques, puisque beaucoup de figurés proposés ne se superposent pas dans une même zone. Néanmoins, en contraste avec la grande différenciation à l'échelle du continent, une certaine uniformité à l'échelle de quelques pays -surtout les moins étendus- pourra paraître insuffisamment expressive : mais cela est inhérent à toute carte internationale qui doit donner priorité à l'homogénéité et l'adaptation à l'ensemble du territoire représenté.

12. L'information de premier ordre devra alors consister en un *zonage* adapté à la variété du continent et aux questions essentielles relatives aux ressources en eau souterraine. Plutôt qu'une classification basée directement sur des critères géologiques (lithologiques, structuraux) faisant de la partie la plus "visible" de la carte un simple "décalque" des cartes géologiques -cette approche convient mieux aux cartes hydrogéologiques classiques, cf. infra § 21-, il convient ici d'élaborer et d'appliquer une typologie appropriée, qui

.../...

* "Voir ou lire", in "Cartes et figures de la terre" (p.2-8), publ. CCI/Centre Georges Pompidou, 1980, Paris.

explicite et fasse comprendre le genre de ressource en eau souterraine offerte, et ses principaux caractères régionaux -quantitatifs et qualitatifs- (cf. supra § 09).

Cette typologie doit *traduire* les conditions hydrogéologiques observées et analysées par les hydrogéologues en renseignements et informations sur les ressources dans les formes où ils sont demandés. Elle doit encore être *simple*, au risque parfois de simplifier*...

13. La typologie proposée comporte six classes principales, définies comme suit :

• Classe 1

Nappes phréatiques de plaine (aquifères surtout sédimentaires) assez continues et peu profondes, accessibles par puits ou forages peu profond (< 100 m en général) et à la portée de nombreux agents exploitants, alimentés principalement par les précipitations, à réserve le plus souvent assez grande pour les doter d'une capacité d'autorégulation appréciable (résistance aux aléas climatiques d'apports), et drainées principalement par des cours d'eau de surface dont elles entretiennent le débit d'étiage. Productivités des ouvrages d'exploitation très diverses selon les types de roche aquifère et l'épaisseur des aquifères.

Ce sont des sous-systèmes de ressource en général *en amont* des eaux de surface -sauf dans le cas de nappes littorales affluant directement à la mer ou, en zone aride, de nappes sujettes à l'évaporation, notamment dans des dépressions fermées-, donc non indépendants des ressources en eau de surface, du fait des influences que celles-ci peuvent subir de l'exploitation de l'eau souterraine.

• Classe 2

Nappes phréatiques de plaine alluviale (principalement) en zone aride ou semi-aride, offrant les mêmes conditions d'exploitation directe, alimentées

.../...

* "Ce qui est simple est toujours faux. Ce qui ne l'est pas est inutilisable" comme l'a dit Paul VALÉRY ("Mauvaises pensées et autres", 1942).

surtout par les crues de cours d'eau -ou "sous-produit" d'irrigation par eau de surface amenée-, à réserve médiocre (moindre résistance aux aléas des apports), déchargées le plus souvent par évaporation -notamment dans des aires où l'eau se concentre en sels-.

Ce sont des sous-systèmes de ressource plutôt *en aval* des eaux de surface, donc également dépendant de celles-ci : les échanges sont modifiables surtout par l'effet des aménagements hydrauliques de surface. Leur exploitation peut, dans certaines conditions, diminuer les "pertes" par évaporation à l'aval.

• Classe 3

Nappes phréatiques d'accompagnement des cours d'eau dans les aquifères alluviaux des grandes vallées (cours d'eau permanents ou semi-permanents), faciles à exploiter directement -productivité souvent élevée-, à faible alimentation autonome et réserve réduite, mais liées -subordonnées- au cours d'eau de surface (ou à des lacs d'eau douce) qui les réalimentent lorsqu'elles sont exploitées.

Ce sont encore des sous-systèmes de ressource très dépendants des eaux de surface, mais les échanges, parfois alternés, sont cette fois modifiables surtout par l'effet de l'exploitation de l'eau souterraine.

• Classe 4

Eaux souterraines non continues dans les "roches dures" fracturées de socle cristallin, métamorphique ou sédimentaire ancien (peu perméables par porosité), accessibles surtout par forage peu profond (quelques dizaines de m à 100 m) dont la localisation nécessite des études, et de faible productivité en général (1 à quelques m³/h), alimentées principalement par précipitations (comme la classe 1) -donc très inégalement selon les zones climatiques-, à réserve faible (et difficile à estimer), drainées par des sources mineures ou des cours d'eau (ou de petites dépressions soumises à l'évaporation en zone aride...).

Elles forment de nombreux "micro-systèmes" de ressource mal délimitables, en amont des eaux de surface permanentes en zone humide, mais en partie indépendants en zone semi-aride ou aride.

• Classe 5

Eaux souterraines de terrains aquifères en reliefs (montagnes, hauts-plateaux) relativement arrosés -roches surtout carbonatées ou éruptives (volcaniques...) fracturées, notamment karstiques- mal ou non accessibles directement, alimentées exclusivement par les précipitations (ou exceptionnellement par des pertes de cours d'eau : karst) et à "réponse" souvent rapide (réserves variables), essentiellement nourricières de sources.

Ce ne sont pas des systèmes de ressource en eau souterraine en tant que telle -sauf cas particulier-, mais surtout des "châteaux d'eau" amont, plus ou moins régulateurs des eaux de surface, dont ils ne sont donc pas indépendants.

• Classe 6

Nappes profondes d'eau douce gisant dans des couches perméables de bassins sédimentaires souvent puissantes (plusieurs centaines de m, parfois plus de 1 000 m), accessibles seulement par forages (souvent plus de 100 à 200 m, jusqu'à 1 000 ou plus), à eau captive ("sous-pression") parfois jaillissante initialement, à alimentation faible et indirecte (par des nappes de classe 1 ou parfois 5), voire quasi nulle actuellement en zone aride, à réserve parfois considérable (chiffable en dizaines ou centaines de milliards de m³ d'eau) mais en partie seulement mobilisable. L'eau et la "mise en pression" de ces nappes est souvent héritée de situation climatique d'un autre âge géologique et elles offrent des ressources en grande partie non renouvelables, à gérer comme des stocks. Ce sont en tous cas des ressources indépendantes des eaux de surface, sauf parfois à long terme.

14. Un zonage du continent africain suivant ces six classes semble devoir être assez facilement réalisable sur la base des connaissances géologiques et climatologiques disponibles à peu près partout à petite échelle en Afrique, même dans les zones où la prospection hydrogéologique est peu avancée. Seule l'échelle adoptée imposerait comme contrainte un aire minimale de zone homogène représentable.

.../...

15. Pour la plupart, ces classes pourraient être plus ou moins subdivisées, d'après un critère simple ou composé jugé prédominant, ce qui offre une certaine flexibilité d'adaptation aux particularités régionales sans contrarier la cohérence de l'ensemble.

Un critère majeur pourrait être l'ordre de grandeur des apports régionaux, déduit d'un index hydroclimatique significatif à petite échelle telle que la hauteur moyenne annuelle de l'écoulement potentiel (équivalente au solde de la soustraction : précipitations - évaporation réelle)* qui fixe en principe la borne supérieure des apports possibles aux aquifères à partir des précipitations. Cette subdivision s'accorderait assez bien avec la classification climatique classique (zone hyper-aride, aride, semi-aride, tropicale...).

Ce critère paraît préférable à celui des "productivités probables unitaires" des ouvrages d'exploitation qui se prête moins à une zonalité significative à petite échelle.

16. L'application de la typologie proposée -avec ses subdivisions éventuelles- paraît ainsi le moyen le plus direct de représenter de manière synthétique les *potentialités* en eau souterraine et leurs caractères dominants dans chaque région.

17. La typologie esquissée correspond en outre assez aux principaux *problèmes* relatifs au développement et à la gestion des eaux souterraines, dont la zonalité est donc entraînée par la cartographie envisagée sur cette base.

Sans dresser ici un répertoire exhaustif de ces types de problème, on énumèrera les principaux :

- Dans une zone donnée, situer et estimer les disponibilités sur lesquelles on peut compter pour satisfaire des demandes projetées -notamment pour garantir

.../...

* Cf. par exemple la carte de l'écoulement potentiel moyen annuel de l'Afrique à 1/20 000 000 établie par le Comité de l'URSS de la Décennie hydrologique internationale (publ. en 1974 à Léninegrad), éditée dans l'"Atlas of World Water Balance" (pl. 27) annexé à l'ouvrage "World Water Balance and Water Resources of the Earth", traduit du russe, publié par l'UNESCO en 1978, Paris.

la permanence de production d'équipements déjà construits ou en cours dans des domaines à ressource limitée-, ou encore pour prévenir des surexploitations et des suréquipements corollaires : en somme évaluer la ressource renouvelable exploitable suivant des critères définis.

- Réciproquement, situer les secteurs dépourvus de ressource en eau souterraine -du moins de ressource capable de satisfaire des demandes en eau locale d'un ordre minimal donné- donc les secteurs où la mobilisation d'eau superficielle locale ou des aménées d'eau s'imposent particulièrement (ou, au contraire, où l'installation de certaines activités désirant s'auto-alimenter en eau à faible coût est à dissuader).
- Identifier les catégories d'agent économique les mieux aptes, selon les cas, à exploiter l'eau souterraine, soit pour assister et stimuler, soit pour contrôler leurs actes.
- Allouer les ressources limitées, en certaines zones, à des secteurs d'utilisation jugés prioritaires.
- Accroître la ressource en récupérant des "pertes" par évaporation ou afflux à la mer.
- Protéger la qualité sanitaire des eaux captées pour fournir de l'eau potable.
- Conjuguer les exploitations d'eau souterraine et d'eau de surface lorsqu'elles sont interdépendantes.
- Choisir une stratégie de "gestion de stock" pour l'exploitation à moyen et long terme des grands réservoirs aquifères profonds.
- Présumer les incidences possibles de la création ou de l'extension de périmètres irrigués sur les eaux souterraines -et les réactions sur les sols : cas d'élévation de nappe- ; apprécier la nécessité d'études et de travaux de drainage.

.../...

- Prévoir les difficultés engendrées par l'eau souterraine à certains travaux souterrains projetés (mines...) et les efforts à entreprendre en conséquence...; estimer réciproquement l'ampleur des incidences possibles de tels travaux sur le régime des eaux souterraines environnantes et apprécier la nécessité d'études à ce sujet.

18. En résumé, les informations utiles eu égard à l'objectif visé peuvent, dans l'idéal (c'est-à-dire sans limitation par les contraintes d'échelle ou d'état des connaissances...), se répertorier comme suit :

- (a) - Zonage du territoire suivant la typologie préconisée (§ 13).
- (b) - Ordres de grandeur des flux (moyens) d'*apport* naturels aux aquifères, surtout ceux à nappe libre -subdivision possible du zonage (a)-.
- (c) - Types de *fonction des cours d'eau* vis-à-vis des eaux souterraines (drainants, alimentaires, échanges réversibles,...).
- (d) - Ordre de grandeur des *profondeurs* de niveau et/ou de toit des réservoirs (nappes profondes), en tant que facteur essentiel d'accessibilité -et parfois de vulnérabilité-.
- (e) - Ordre de grandeur des *productivités* probables des ouvrages d'exploitation.
- (f) - Direction et sens d'écoulement dominants dans les divers secteurs des nappes assez étendues (facteur de propagation d'éventuelle pollution ou de déplacement d'eau de qualité différente).
- (g) - Classe de *qualité* (en référence à une classification normative à adopter) prédominante des eaux souterraines d'une nappe donnée -il ne s'agit pas ici de données hydrochimiques brutes, mais de leur traduction en fonction de normes-.
- (h) - Localisation et situation de divers points singuliers ou de champs soit de phénomènes naturels significatifs, soit d'actions humaines exploitant ou influençant l'eau souterraine.

2. Carte hydrogéologique

19. L'état d'avancement des connaissances hydrogéologiques en Afrique est assez inégal selon les pays et les régions. En particulier des *cartes hydrogéologiques* détaillées à grande échelle (1/50 000, 1/100 000) ou à échelle moyenne (1/200 000, 1/500 000) ont déjà été dressées et publiées dans plusieurs pays ; des cartes de synthèse du territoire national à petite échelle (1/1 000 000, 1/1 500 000...) ont été élaborées en quelques autres ; des inventaires et des études régionales -dont les résultats comportent des documents cartographiques- ont été réalisées en différents pays sans donner lieu au lever méthodique de cartes ; enfin en certains pays la connaissance des eaux souterraines est encore clairsemée et se limite à des catalogues de points d'eau.

20. Compte tenu de cette diversité des situations, qui s'ajoute à la variété des conditions naturelles évoquées plus haut (§ 11), une carte hydrogéologique internationale comme celle projetée, visant l'objectif scientifique énoncé (b) -cf. § 04- et se proposant de fournir une description homogène et concordante des conditions hydrogéologiques de l'Afrique, aura deux fonctions essentielles :

- Inciter à convertir les cartes hydrogéologiques existantes (surtout celles à petite échelle) suivant un canon uniforme, pour permettre des comparaisons et faciliter la continuité des descriptions de part et d'autre des frontières.
- Offrir un "modèle" à suivre, motivant les levers et guidant la réalisation de cartes hydrogéologiques nouvelles, nationales ou régionales.

Pour ce faire, une telle carte devra non seulement se conformer à une légende normalisée, mais aussi, autant que possible, appliquer un "programme commun" de données à représenter, de manière à ce que la variété des faits cartographiés reflète bien uniquement celle du milieu naturel et non des différences de conception dans la sélection des données. La contrainte d'échelle sera, de ce point de vue, uniforme ; par contre, les effets de différences d'intensité et de précision des connaissances ne pourront être évités.

.../...

21. Le programme théorique d'une carte hydrogéologique, exposé par maints auteurs (cf. notamment la Bibliographie) et traduit par les Légendes générales déjà mentionnées (UNESCO, ACSAD...), a été opportunément rappelé dans le fascicule III des matériaux préparés par l'AAC, aussi suffit-il d'en résumer ici les composantes essentielles qui peuvent se grouper en cinq sections :

- (1) - Données sur les caractéristiques "péto-physiques" des roches qui déterminent leur comportement vis-à-vis de l'eau (paramètres hydraulique" de conductivité et emmagasinement), souvent exprimées implicitement par une classification hydrogéologique des roches en affleurement.
- (2) - Données sur la structure et la géométrie des aquifères (et des corps semi-perméables).
- (3) - Données sur les conditions aux limites des principaux aquifères individualisables (à l'échelle donnée) : limites liées à la structure géologique ou aux relations avec les eaux superficielles ou avec la surface du sol.

Aux données traduites explicitement en termes hydrodynamiques (conditions de flux ou conditions de potentiel) et quantifiées, peuvent être jointes des données descriptives de facteurs physiographiques des relations entre l'eau souterraine et la surface (infiltration, émergence et/ou évaporation) : facteurs topographiques et morphologiques, pédologiques ou "épigéologiques" (formations superficielles).

- (4) - Données sur les variables spatiales descriptives d'état des eaux souterraines : variables dynamiques (potentiels, forme des écoulements), variables physico-chimiques.
- (5) - Données sur les ouvrages et les structures d'action sur les eaux souterraines, éventuellement sur des facteurs d'influence sur leur régime ou leur qualité, ou sur des contraintes pouvant limiter leur développement.

22. Par rapport aux programmes des cartes hydrogéologiques classiques des décennies 1960 et 1970 -reflétées par les Légendes générales déjà mentionnées- la tendance moderne se caractérise surtout par :

.../...

- une conception plus "hydro-géodynamique" et moins exclusivement "hydrolithologique" de l'analyse et de la représentation des conditions hydrogéologiques, dans l'optique d'une "analyse des systèmes" aquifères ;
- une quantification plus explicite des caractéristiques des roches ;
- une description des fonctions hydrogéologiques des cours d'eau -c'est-à-dire de leurs relations avec les eaux souterraines- plutôt qu'une simple juxtaposition de données hydrographiques ou hydrologiques et de données hydrogéologiques conçues séparément.

Les cartes dressées suivant cette orientation se démarquent mieux des cartes géologiques que les cartes hydrogéologiques classiques, souvent considérées comme une simple conversion de ces dernières et dont la justification en tant que carte autonome a pu être parfois discutée.

NB. : Ces tendances s'appliquent le mieux à des cartes à petite échelle.

On peut citer, comme exemple de carte de conception moderne à petite échelle réalisée dans un pays africain, la *carte des systèmes aquifères du Maroc* à 1/1 000 000, élaborée et publiée par le Ministère des Travaux Publics de ce pays en 1976*.

23. Quelle que soit l'échelle adoptée, rappelons que la cartographie hydrogéologique -comme toute cartographie thématique- se heurte à une double limitation :

- difficulté de représenter -du moins sur une seule carte- la "3ème dimension", les caractéristiques des roches non affleurantes ou des nappes superposées (défaut commun aux diverses cartes géologiques spécialisées) ;
- primauté des variables spatiales sur les temporelles, réduites à des représentations en état "moyen" ou figé à une date donnée (défaut commun aux diverses cartes hydrologiques).

.../...

* Direction de l'Hydraulique, Division des ressources en eau - Rabat.

Une carte hydrogéologique doit donc être complétée le plus souvent par des représentations structurales (planches de coupes, cartes supplémentaires) et par des chroniques (tables, graphiques).

24. En pratique, le programme de cartographie réalisable dépend de l'échelle -facteur de "tri" des données significatives- et du nombre d'espèces de données disponibles, notamment de celles qui correspondent à des variables régionales extensives -sinon continues (exprimables par des plages de figurés ou par des réseaux de lignes d'"isovaleur"). Des limites de compréhensibilité et de clarté sont vite atteintes lorsque l'on cherche à faire coexister différentes représentations sur une même carte... et pourtant c'est bien cette "con-figuration" de données qui valorise leurs significations en mettant en lumière leurs relations réciproques.

On est ainsi souvent conduit à sélectionner les données à porter sur une carte hydrogéologique principale, ou "régulière", et à en reporter d'autres sur des cartes annexes (parfois à échelle plus petite) : soit des données complémentaires sur l'aquifère unique ou principal, soit des données sur d'autres aquifères -nappes profondes notamment-.

25. Une carte hydrogéologique à petite échelle (1/1 000 000 à 1/2 000 000), comme celle envisagée, est vouée surtout à la représentation des faits significatifs à cette échelle et à des informations synthétiques plutôt qu'à des données analytiques :

- structures hydrogéologiques majeures (grands bassins sédimentaires, souvent pluri-nationaux) ;
- types hydrodynamiques des principaux aquifères ;
- flux d'apport (ou de soustraction potentielle par évaporation) subordonnés aux conditions climatiques régionales (données précisément plus significatives ici qu'à grande échelle) ;
- distribution des potentiels et éventuellement de caractéristiques de qualité des eaux des nappes très étendues ;

- dans les domaines hétérogènes, indication sur les "fourchettes" les plus probables d'ordres de grandeur de certaines caractéristiques, facteurs de productivité, de capacité régulatrice ou de stockage.

Le programme pratique et, par conséquent, la légende générale de la carte internationale de l'Afrique en projet pourraient donc s'inspirer de ces principes.

III - SUGGESTIONS OPERATIONNELLES

26. Pour atteindre le but fixé par l'OUA, aucune des deux orientations cartographiques dont on a dépeint les objectifs et analysé les contenus n'est exclusive. Elles paraissent plutôt complémentaires :

- elles se complètent d'abord par les types de service que les cartes respectives peuvent rendre, et par leurs utilisateurs ;
- elles se complètent aussi parce que les réalisations qu'elles commandent nécessitent des moyens et des délais que l'on peut estimer assez différents, donc qui ne se concurrencent pas.

Il semble donc tout à fait défendable d'envisager d'entreprendre l'ensemble, en distinguant :

- une "voie rapide" pour aboutir à une carte internationale des eaux souterraines ;
- une action à plus long terme, pour réaliser une carte hydrogéologique internationale.

Il sortirait de notre propos -et anticiperait sur les conclusions d'un éventuel débat- d'esquisser des plans d'opération possible pour mettre en oeuvre ces projets. Aussi, on se bornera à commenter ici brièvement les deux idées.

.../...

27. Carte internationale des eaux souterraines de l'Afrique

Adaptée à l'objectif (a) -cf. § 04- et exprimant les informations décrites en II.1 (§ 18), une telle carte pourrait semble-t-il être réalisée à très petite échelle (au moins en première version) : le 1/5 000 000 aurait pour avantage d'être compatible avec la carte géologique internationale de l'Afrique (ASGA*/UNESCO) dont une 3ème édition est en cours**.

Cette carte pourrait être dressée essentiellement par compilation et interprétation de documents disponibles, publiés pour la plupart -nationaux ou internationaux- : cartes géologiques et hydrogéologiques, cartes climatiques et hydrologiques, monographies et rapport d'études.

Elle paraît réalisable à court terme -en deux années environ- si on charge de l'opération un maître d'oeuvre unique agissant sous le contrôle d'un Comité de direction international ad hoc (sous l'autorité de l'AAC), dont les rôles seraient essentiellement :

- au préalable d'établir et adopter la légende ;
- de suivre l'avancement du travail ;
- d'approuver l'oeuvre achevée et d'accorder l'imprimatur.

L'unité de conception et l'homogénéité de facture de la carte seraient ainsi assurées. Toutes les feuilles pourraient être rédigées et publiées simultanément.

NB. : Une telle carte pourrait en outre servir de modèle pour l'élaboration de cartes de ressource en eau souterraine *nationales* dans la même optique mais plus détaillées, à moins petite échelle (1/1 à 2 000 000), par les pays qui en verraient l'utilité, à usage interne.

.../...

* ASGA : Association des Services Géologiques Africains.

** 1ère édition en 1964, 2ème édition en 1976 (9 feuilles). La nouvelle édition, très refondue, sera en 6 feuilles.

Enfin, il va de soi que des rééditions de la carte -par exemple tous les dix ans environ- seraient envisageables pour tirer parti des progrès de la cartographie hydrogéologique -internationale ou nationale- considérée ci-après.

28. Carte hydrogéologique internationale de l'Afrique

Cette carte, qui viserait l'objectif (b) -cf. § 04- et exprimerait principalement les informations décrites en II.2 -§ 21, 25-, correspond plus au projet conçu initialement par l'OUA et il s'agit d'une oeuvre de longue haleine.

Il n'est pas déraisonnable de présumer que sa réalisation nécessiterait une à deux décennies* -ce qui accroît l'intérêt d'entreprendre la "carte des eaux souterraines" envisagée ci-dessus : ce serait pendant longtemps la seule carte d'ensemble du continent africain...-.

La petite échelle à adopter -entre 1/1 000 000 et 1/2 000 000- reste à débattre : les critères pratiques (fonds topographiques disponibles, nombre de feuilles et coût d'édition afférent...) importent sans doute ici autant que les critères de complexité des territoires à cartographier. Peut-on simplement suggérer que l'adoption de 2 échelles, moyennant un assemblage compatible, ne serait sans doute pas irrationnel pour mieux s'adapter aux différences de complexité du milieu ? (par exemple une échelle un peu plus grande pour le Maghreb...).

L'exploitation de matériaux déjà élaborés, notamment de cartes hydrogéologiques de territoires nationaux publiées en plusieurs pays et parfois de banques de données sur les eaux souterraines, pourrait faciliter et écourter l'établissement de quelques feuilles -en limitant le travail nécessaire à l'actualisation de certaines données et à la conversion des représentation- : bien que l'utilité de ces feuilles puisse paraître moins urgente du fait de l'exis-

.../...

* Faut-il rappeler que la "Carte hydrogéologique internationale de l'Europe" à 1/1 500 000, dont le principe a été décidé en 1960 et dont la réalisation, sous l'égide de l'Association Internationale des Hydrogéologues -après une phase d'essais et de mise au point d'une légende-, a débuté en 1964 (1ère feuille éditée -Berne- en 1970), est encore loin d'être achevée, plus de vingt ans après son initiative... ? Actuellement (mi 1983), 9 feuilles sont éditées sur 30 au programme.

tence de cartes antérieures, du point de vue des pays concernés, leur réalisation pourrait être jugée néanmoins prioritaire, car elle permettrait, en un délai relativement court, de disposer de modèles plus convaincants et stimulants qu'une "légende générale internationale" pour entraîner les autres pays et de montrer des résultats concrets du projet aux différents bailleurs de fonds (internationaux ou bilatéraux) dont le concours sera sollicité.

Par contre, pour beaucoup de d'autres feuilles, l'élaboration de la carte nécessitera des travaux de lever hydrogéologique -au moins extensifs- en plus de l'exploitation de données d'études locales ou régionales, plus ou moins éparses : ce qui appellera la participation active des organismes publics compétents -géologiques et/ou hydrologiques- des pays concernés, et l'inscription de ces travaux dans les programmes pluriannuels d'action de ces organismes. Réciproquement, l'ambition de contribuer à la réalisation de la carte internationale pourra renforcer les motifs d'entreprendre ces travaux, ce qui est bien une finalité du projet de l'OUA.

BIBLIOGRAPHIE

- ALBINET M., CASTANY G. (1972)** - Evaluation rapide et cartographie des ressources en eau souterraine d'une grande région (application au Vénézuéla - carte à 1/2 000 000). (Bull. BRGM, III, 2 - p. 3-26, Orléans).
- ALBINET M., MARGAT J. (1972)** - Evolution du programme des cartes hydrogéologiques. Projet de nouvelle légende. (AIH, réun. Tokio, Mém., T. IX).
- BISCALDI R., CASTANY G., MARGAT J., UNGEMACH P. (1977)** - Planification de l'exploitation des eaux souterraines de l'Afrique Sahélienne (Afrique de l'Ouest au Sud du Sahara). (Conf. Nat. Un. sur l'Eau - Mar-del-Plata - Argentine - Mars 1977 - Doc conf. 70/TP 1976-14 p.).
- MARGAT J. (1960)** - Sur la terminologie des cartes des eaux souterraines - Essais de définition. (Bull. Assoc. Intern. Hydrol. Scient. n° 18, juin, P. 53-55, Gentbrugge, Belgique).
- MARGAT J. (1961)** - L'établissement de cartes des eaux souterraines à petite échelle dans les pays de la zone aride. (Mem. Assoc. Intern. Hydrogéol., IV, Réunion générale de Rome - Naples).
- MARGAT J. (1966)** - La cartographie hydrogéologique. (Chronique d'hydrogéologie, BRGM, n° 9, p. 7-32, Paris).
- MARGAT J. (1976)** - Nature et importance relative des ressources en eau souterraine en Afrique. Essai de zonalité à petite échelle pouvant servir à orienter les politiques de l'eau. (Not. tec. BRGM /Serv. géol. nat., AGE, 13.12.1976, Orléans).
- MARGAT J. (1978)** - Nouvelle légende de carte hydrogéologique. (BRGM doc. 78 SGN 473 HYD, 30 p, 2 annexes, Orléans).
- MARGAT J. (1979)** - La cartographie des aptitudes et des contraintes d'exploitation des eaux souterraines, une contribution à l'évaluation des ressources exploitables. (Assoc. Intern. Hydrogéol. Sympos. Vilnius, URSS. Mém. AIH, T XV 1, p. 262-265, Moscou).

- MARGAT J. (1979)** - La cartographie des ressources en eau souterraine. (Doc. BRGM 79 SGN 783 HYD, 15 p., Orléans).
- MARGAT J., ROGOVSKAYA N. V. (1979)** - Cartographie des ressources en eau souterraine. (Assoc. Intern. Hydrogéol., Sympos. intern. Vilnius URSS, juil. 1979, Rapport général thème VIII, Mém. AIH, T XV 2, publ 1981, Moscou).
- MEYBOOM P. (1961)** - A semantic review of the terminology of groundwaters maps. (Bull. Assoc. Intern. hydrol. scient. n° 1, mars, p. 29-38, Gentbrugge, Belgique).
- ROGOVSKAYA N. V. (1979)** - Hydrogeological mapping for ground-water resources evaluation and development purpose (en russe). (Assoc. Intern. Hydrogéol., Sympos. intern. Vilnius, URSS, juil. 1979 - Mém. AIH, T XV 1, p. 249-251, Moscou).
- ZEBIDI H. (1978)** - Les cartes hydrogéologiques : objectif et réalisation (en arabe). (ACSAD, 1st Arab Symposium on water resources, Damas, Publ. 1980, Damas).
- COLLECTIF (1977)** - Hydrological maps (chap. 6 - Préparation of groundwater maps). (UNESCO - WMO, Stud. and reports in hydrology n° 20, Genève, Paris).