

Collection Synthèse

n° 5

**OUTILS DE GESTION DES SYSTÈMES AQUIFÈRES
TRANSFRONTALIERS DE L'ESPACE OSS**
Approche méthodologique

Tunis, 2010

Collection Synthèse

- N° 1 Système aquifère du Sahara septentrional (Algérie, Tunisie, Libye) : gestion commune d'un bassin transfrontalier
- N° 2 Système aquifère d'Inlemeden (Mali, Niger, Nigeria) : gestion concertée des ressources en eau partagées d'un aquifère transfrontalier sahélien
- N° 3 La surveillance à long terme en réseau circum-saharien : l'expérience Roselt/OSS
- N° 4 Vers un système d'alerte précoce à la sécheresse au Maghreb
- N° 5 Outils de gestion des systèmes aquifères transfrontaliers de l'espace OSS : approche méthodologique

Copyright © Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS), 2010

Outils de gestion des systèmes aquifères transfrontaliers de l'espace OSS :
approche méthodologique \ OSS. _ Collection Synthèse n° 5. _ OSS : Tunis, 2010. _ 46 pp.

ISBN : 978-9973-856-40-1

●●● REMERCIEMENTS

Ce document est publié sous la direction de Youba Sokona, Secrétaire exécutif de l'Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS). Il a été réalisé par M. Mohamedou Baba Sy avec la contribution de MM. Abdelkader Dodo, Djamel Latrech, Ahmed Mamou, Rachid Khanfir et Mme Aissa Touré Sarr.

Les auteurs remercient le Professeur Mustapha Besbes et M. Belkacem Abdous, expert informaticien, pour leurs précieux commentaires et suggestions. Ils expriment aussi leur profonde gratitude à l'endroit des pays concernés par le SASS et le SAI pour leur collaboration dans le développement des outils de gestion des eaux souterraines.

Relecture et maquette : Mme Tharouet Elamri et Mme Olfa Othman.

● ● ● **SOMMAIRE**

| | |
|--|-----------|
| INTRODUCTION | 7 |
| CHAMP D'APPLICATION | 9 |
| 1- Domaine concerné..... | 9 |
| 2- Spécificité du domaine..... | 10 |
| APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE..... | 13 |
| 1- Les BD et SIG | 13 |
| 2- Les modèles | 24 |
| CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS | 37 |
| BIBLIOGRAPHIE | 43 |
| Liste des acronymes | 45 |

●●● INTRODUCTION

Depuis quelques décennies, plusieurs investigations et manifestations internationales ont porté sur l'utilisation et la gestion des eaux souterraines sans pour autant être suivies d'action concrète. Ce fut le cas notamment des eaux souterraines communes à plusieurs Etats, pour lesquelles un cadre cohérent faisait défaut.

Dans le cadre de son programme Eau, l'OSS cherche à promouvoir la conscience de bassin (OSS, 2005a), en incitant les pays partageant un bassin à se concerter pour gérer la ressource en eau souterraine à l'instar des eaux de surface de manière rationnelle. Dans ce programme, l'activité de modélisation occupe une place de premier plan, car elle s'impose lorsqu'on cherche à analyser, comprendre et prédire des phénomènes qui affectent les aquifères. Elle nécessite aussi la collecte préalable d'informations, regroupées ensuite dans des bases de données communes nécessaires à la modélisation.

L'objectif de cette réflexion n'est pas de répertorier tous les aspects d'une démarche qualité, mais plutôt, en se fondant sur certains concepts suggérés par une telle démarche, d'analyser ce qui est fait et ce qu'il est possible de faire dans le domaine de la gestion des ressources en eau souterraines des grands bassins aquifères de l'espace OSS. Elle s'appuiera sur les outils développés, à savoir les modèles et les bases de données réalisés dans le cadre des projets Système aquifère du Sahara septentrional (SASS) et Système aquifère d'Iullemeden (SAI).

●●● CHAMP D'APPLICATION

1- Domaine concerné

Le domaine d'intervention de l'OSS, la zone du Sahara et du Sahel, renferme de grands bassins sédimentaires (fig. 1) qui couvrent chacun une superficie de plusieurs centaines de milliers de km². Ces bassins sont des réservoirs d'eau douce considérables. Leurs réserves sont évaluées de 1 à 75 mille milliards de m³ selon les bassins (Margat, 1992). Leur existence dépend essentiellement de la structure géologique et non pas du climat qui ne permet, de nos jours, que des apports en eau de pluie et/ou de surface négligeables en comparaison avec l'importance du volume emmagasiné qui peut être des milliers de fois plus élevé.

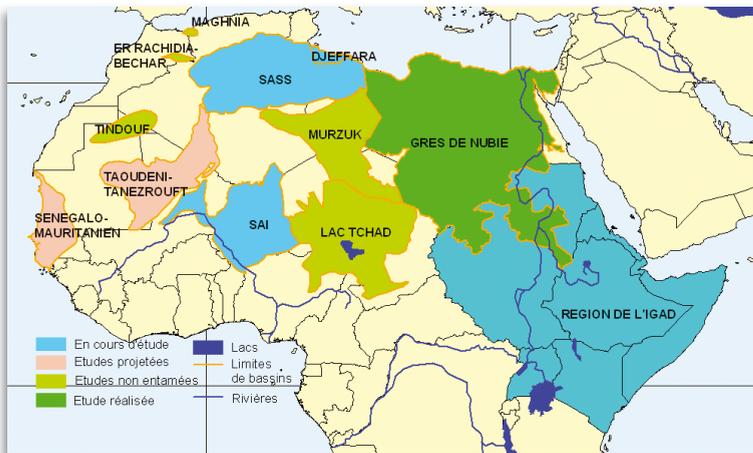


Figure 1 :
les grands bassins
de l'espace OSS.

2- Spécificité du domaine

Ces réserves qui participent à la dynamique des aquifères sont faiblement renouvelables. En effet, les eaux qui les constituent ont été emmagasinées depuis les périodes humides du quaternaire, il y a plus de 10 000 ans (Baba Sy, 2005). Elles sont caractérisées par des durées de renouvellement très grandes (des dizaines de milliers d'années) et des vitesses d'écoulement très lentes (moins d'un mètre par an). Cette dynamique, qui était plus forte lors des périodes humides et avait permis des apports importants aux nappes, a été freinée, par la suite, par l'aridification progressive du climat depuis environ 4 000 ans (Margat, 1992).

Ces bassins peuvent être regroupés dans deux ensembles dont l'état des connaissances et le degré d'exploitation sont à des niveaux très différents. Le premier, qui englobe les bassins situés principalement dans les pays au nord du Sahara (ex. : SASS), est soumis à une exploitation intensive qui, même si elle est d'intérêt socio-économique collectif important, peut entraîner des incidences négatives sur l'environnement et sur la ressource elle-même, telles que :

- la détérioration de la qualité de l'eau (intrusion saline, inversion de l'écoulement, contamination par « down » ou « up coming », etc.) ;
- l'abaissement excessif du niveau des nappes qui a pour conséquences :
 - la profondeur excessive des pompes ;
 - la disparition de l'artésianisme ;
 - le tarissement des sources et le dénoyage des foggaras ;
 - les affaissements de terrains (par subsidence) ;
- les effets d'interférence de l'exploitation dans un pays sur ses voisins qui peuvent aussi provoquer des baisses de niveaux.

Ces effets ont fait l'objet de plusieurs simulations dans le cadre du projet SASS (OSS, 2002b). Dans cet ensemble, les eaux sont traditionnellement exploitées depuis des siècles et ont fait l'objet de campagnes de prospection et d'exploitation intensives depuis le début du siècle dernier tant pour la mise en valeur des terres que pour le transfert d'eau douce vers les zones urbanisées¹.

¹ En Libye, par exemple, plus de la moitié des quantités d'eau utilisées (un total de 2,62 milliards de m³ en 1985, dont 2,1 d'eau souterraine) provenait des réserves. Cette proportion s'élèvera à 70 % avec la mise en service du Grand Fleuve artificiel amenant sur la côte méditerranéenne environ 0,7 milliard de m³/an supplémentaire puisé dans les réserves des aquifères sahariens.

Le deuxième ensemble, qui regroupe les bassins se trouvant principalement dans les pays au sud du Sahara, est caractérisé par une faible sollicitation des eaux profondes et un degré de connaissance inégal entre les bassins. Dans cet ensemble, il n'existe pratiquement pas de tradition dans l'exploitation des eaux profondes, du fait de la prédominance des ressources en eau de surface renouvelables importées par les fleuves transfrontaliers, sauf dans le nord du Nigeria (Margat, 1992). Comme pour les autres bassins du nord du Sahara ou des autres continents, c'est le développement des activités humaines qui créera le besoin d'une meilleure connaissance. Toutefois, avec l'évolution des sciences et des techniques, cette tendance est en train de s'inverser : une bonne connaissance des ressources (par des observations, modèles...) peut permettre de financer des projets de développement (Besbes, 2010).

● ● ● APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

1- Les BD et SIG

a) Définitions

Une base de données (BD) permet de stocker des données de façon structurée et avec le moins de redondance possible. Ces données doivent pouvoir être utilisées par des programmes et des utilisateurs différents. On parle généralement de système d'information pour désigner toute la structure regroupant les moyens mis en place pour le partage des données.

Un système d'information géographique (SIG) est un outil informatique permettant de représenter et d'analyser les objets ou phénomènes qui existent sur terre ainsi que tous les événements qui s'y produisent.

b) Démarche

La démarche adoptée pour la mise en place des BD (du SASS et du SAI) se base principalement sur :

- la séparation entre structure de données (élément stable) et traitements (aspects dynamiques). Ces deux actions doivent être menées en parallèle et de façon distincte (garantie de pérennité et d'ouverture) ;
- la description du système à trois niveaux : conceptuel, organisationnel et physique, permettant de progresser méthodiquement dans la compréhension du problème et de proposer les solutions adaptées au contexte.

La tâche la plus importante consiste à élaborer un modèle de données qui reflète au mieux la réalité. Pour cela, il est nécessaire de réaliser un inventaire exhaustif

des entités actuelles et futures intervenant dans la gestion des données hydrogéologiques. Ces entités représentent des objets tels un point d'eau, un aquifère, une unité administrative... Leurs relations sont également répertoriées et décortiquées selon les règles et les procédures en vigueur. Une fois le modèle validé, on procède à sa réalisation en fonction de la solution organisationnelle et technique adoptée.

La mise en place du système d'information nécessite donc les phases suivantes (OSS, 2002a) :

- phase de diagnostic de l'existant et des orientations de développement, durant laquelle sont cernés les besoins, les objectifs et les différentes options possibles. Une solution organisationnelle et technique est choisie selon divers critères (coûts, délais, tendances technologiques...) ;
- phase conceptuelle dont les résultats sont le Modèle conceptuel de données (MCD) et la solution organisationnelle et technique la mieux adaptée. Cette phase est indépendante des moyens informatiques ;
- phase de réalisation durant laquelle le MCD est traduit en modèle physique dépendant cette fois du Système de gestion de base de données (SGBD) choisi en fonction de la solution technique adoptée ;
- phase de mise en œuvre dans l'environnement organisationnel adopté après transfert des données disponibles.

La phase conceptuelle est la plus importante et conditionne la réussite des autres. Les efforts doivent être focalisés sur la compréhension parfaite du domaine et l'élaboration d'un modèle de données représentatif, et sur la définition de la meilleure solution possible de développement. Vu la nature des traitements exigés, le système doit être en mesure d'intégrer plusieurs catégories d'informations :

- données numériques descriptives ;
- informations de type spatial ;
- historique des mesures.

Lors de la conception, l'accent doit être mis sur la mise en place d'une structure ouverte pouvant être utilisée aussi bien par l'administrateur de la BD que par les équipes nationales dans les pays pour intégrer les extensions futures et adaptations à leurs besoins spécifiques.

Les fonctionnalités du système sont conçues de manière à faciliter l'utilisation du

logiciel de modélisation, à établir des liens dynamiques entre les informations numériques et spatiales, et à automatiser les opérations pré et post-modèle pour permettre à l'équipe chargée du modèle de multiplier les simulations.

Sur le plan organisationnel, un schéma adéquat d'exploitation conforme à l'organisation interne des administrations nationales doit être défini. Des procédures et règles d'exploitation et d'administration du système doivent être élaborées.

1.1- Analyse de l'existant au niveau des pays

Une analyse détaillée des données hydrogéologiques existantes dans les pays a été effectuée et a permis de :

- faire un inventaire exhaustif des informations existantes, relatives à la zone d'étude, au sein de chacune des administrations nationales chargées de la gestion des ressources en eau (ex. : GWA, DGRE et ANRH pour le SASS) et de les intégrer dans la BD commune relative au bassin en question ;
- prendre connaissance des codifications en usage dans chaque pays et en proposer une harmonisée qui réponde aux objectifs du projet en respectant le plus possible les codes existants ;
- définir les adaptations à effectuer sur les BD nationales aussi bien sur le plan de la conception (modèle de données normalisé) que sur le plan des contenus (regroupement d'informations disparates) ;
- répertorier et identifier les données à transférer dans la base commune, soit par programme, soit par saisie manuelle.

Ce diagnostic concerne aussi bien l'architecture des données que les contenus proprement dits. Sur ce dernier point, un inventaire détaillé de l'information disponible est effectué dans le but de cerner la codification utilisée dans les pays et de mettre en place les outils de transfert des données dans la base de données.

Les BD existantes dans les pays

Ce diagnostic a permis de mettre en évidence le souci commun aux pays de procéder à une amélioration de leur système d'information afin de regrouper des données disparates. Il en ressort ce qui suit :

Pour les pays du SASS :

- Algérie : l'Agence nationale des ressources hydrauliques (ANRH), qui dis-

posait d'une base Access développée en collaboration avec le BRGM, souhaitait disposer d'outils permettant d'élaborer des requêtes difficiles à réaliser avec les moyens existants (OSS, 2002a). Un projet de BD hydrogéologique sous SQL/SERVER a été lancé.

- Libye : la General Water Authority (GWA) a élaboré une nouvelle BD sous Access, bilingue (anglais-arabe), avec l'aide de l'ACSAD ;
- Tunisie : la Direction générale des ressources en eau (DGRE) a inscrit un projet de refonte totale de son système d'information hydrogéologique selon une approche client-serveur. Une étude conceptuelle a déjà été élaborée dans ce sens. Pour cet organisme, le projet SASS a aidé à homogénéiser les multiples BD existantes au sein d'une seule et même structure relationnelle ;

Pour les pays du SAI :

- Mali : la Direction nationale de l'hydraulique et de l'énergie (DNHE) a développé en 1985, dans le cadre du projet PNUD Mali 84/005, une BD nationale intitulée SIGMA. En 2001, un projet de développement de cette BD a permis de disposer de SIGMA 2 qui est son format actuel. Cette BD est en cours d'amélioration ;
- Niger : le service de l'Inventaire des ressources hydrauliques (IRH) gère, au sein de la Direction des ressources en eau (DGRE), la BD sur les ressources en eau nommée SIGNER. Elaborée dans des conditions similaires à celle du Mali et suivant le même schéma, celle-ci présente une architecture basée également sur les mêmes logiciels de traitement. Dès le milieu des années 1990, cette structure s'est avérée limitée, car elle est principalement orientée vers les usages de l'eau, l'alimentation en eau potable et l'assainissement. Elle a vite subi des modifications locales et a été annexée à un SIG pour servir de support au SIGNER.
- Nigeria : contrairement au Mali et au Niger, nous n'avons pas eu connaissance d'une BD nationale. Nous disposons de très peu de données sur la partie du bassin située dans ce pays. L'information recueillie provient des archives nationales (OSS, 2007a).

La réalisation des BD des bassins SASS et SAI coïncidait parfaitement avec les attentes des pays. Il fallait donc concevoir une structure de données tenant compte de leurs préoccupations et spécificités et dont on peut extraire les éléments communs nécessaires au projet.

1.2- Options fondamentales de développement

1.2.1- Choix organisationnels

Partant de la situation au sein de chaque pays, des objectifs assignés au projet (SASS ou SAI) et du contexte technologique du moment, une solution globale organisationnelle a été définie pour mettre en œuvre le nouveau système d'information.

Globalement, pour recueillir et gérer les informations, on retrouve trois niveaux de traitement :

- le niveau 1, région administrative : par exemple, antenne régionale pour l'ANRH, CRDA pour la DGRE et région pour la GWA ;
- le niveau 2, siège, administration nationale : service de gestion des BD nationales ;
- le niveau 3, équipe de projet (SASS ou SAI) où est gérée la BD commune à l'ensemble du bassin.

Chaque niveau comporte des informations propres, en plus des informations communes que l'on retrouve au niveau supérieur. Dans le cadre des deux projets SASS et SAI, l'intérêt a été porté sur les niveaux 2 et 3. Il appartient aux pays de délimiter les structures des BD au niveau des régions administratives et les mécanismes de mise à jour des BD nationales.

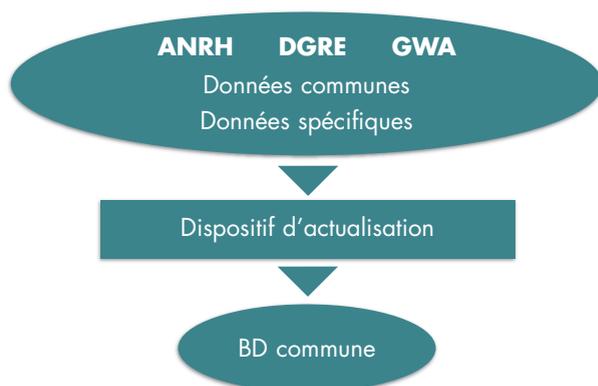
La solution technique souhaitée par l'ensemble des équipes consiste donc à adapter les structures des BD nationales (niveau 2) afin de les rendre réellement relationnelles, de corriger les incohérences constatées et d'améliorer les codifications en vigueur pour les adapter aux besoins des projets.

De ce fait, les projets en question s'intègrent parfaitement dans les activités des pays en matière de gestion des données. Le SASS représente, en quelque sorte, un projet pilote d'organisation et de traitement des informations hydrogéologiques.

Mais ce choix nécessite une participation active des équipes des pays et un renforcement des capacités pour que ces dernières soient en mesure de prendre elles-mêmes en charge les tâches de mise en place du système, de maintenance et d'adaptation aux besoins nationaux.

Pour répondre aux besoins immédiats de réalisation de la BD commune, la solution organisationnelle suivante a été retenue (fig. 2 : exemple du projet SASS) :

Figure 2 : solution organisationnelle retenue pour la base de données du SASS.



Ce schéma, qui symbolise la solution organisationnelle de la BD retenue d'un commun accord avec les équipes nationales, se traduit par une architecture globale identique pour les pays qui se partagent le bassin. Ces pays peuvent y incorporer leurs données spécifiques. Les tâches d'administration et de maintenance sont ainsi facilitées. Pour les projets SASS et SAI, des BD communes, dont la structure est issue du schéma organisationnel global, sont mises en place pour chaque bassin pour contenir seulement les données nécessaires au projet.

Ceci s'est traduit par la conception d'un MCD répondant à l'ensemble des préoccupations et des objectifs actuels et futurs des projets. Ce MCD, adapté aux besoins des pays, a fourni un noyau commun évolutif installé dans les pays et à l'OSS. La BD commune n'est réalisée qu'après la validation du modèle conceptuel global. L'objectif principal étant la préparation des données pour le modèle numérique.

Des procédures de mises à jour régulières sont définies en même temps que les droits d'accès et les privilèges des différents utilisateurs de la BD commune.

L'organisation choisie s'appuie sur :

- la mise en place d'une BD commune à l'OSS qui sera prise en charge par la structure de gestion concertée ;
- l'adaptation des BD nationales pour les rendre conformes aux règles de base relationnelles et pour harmoniser les données dans le but de faciliter les actualisations ;

- la définition de procédures claires de mise à jour ;
- la mise en place de mécanismes de sécurisation des données (autorisations d'accès, niveaux d'utilisation...).

Les pays ont bénéficié de ces améliorations au niveau conceptuel et sont en mesure de poursuivre les extensions souhaitées afin d'utiliser ce système comme outil de gestion des données à l'échelle régionale ou des pays (siège des administrations nationales).

1.2.2- *Choix techniques*

La solution technique adoptée tient compte des points suivants :

- les formats et mode d'introduction des données pour le modèle numérique ;
- les tendances technologiques du moment ;
- l'existant au sein des pays ;
- la simplicité de mise en œuvre et la maîtrise par les équipes nationales.

Le contexte technologique du moment se caractérise par la puissance accrue des SGBD « bureautiques » qui les rapprochent des véritables SGBD. Cette option ne devait donc pas être écartée, et plus particulièrement Access qui dispose, dans sa version récente, de fonctionnalités intéressantes.

En effet, dans sa version 2000 (ou celles plus récentes), Access possède des caractéristiques qui permettent de gérer des BD assez volumineuses (jusqu'à 2 Go) dans un environnement réseau et même en Intranet. Il dispose d'utilitaires intéressants comme :

- la réplication qui permet la mise à jour d'une BD par des BD régionales : l'actualisation des données, après modification par les équipes nationales ou au niveau de la structure de gestion, est réalisée à l'aide d'un mécanisme qui synchronise le contenu de toutes les BD en maintenant la cohérence des données ;
- l'accès concurrent aux données dans un environnement multiutilisateur ;
- une sécurisation élaborée des données : possibilité de créer plusieurs groupes ayant chacun des autorisations et droits d'accès ;
- la possibilité de migration aisée vers des systèmes plus sophistiqués tels que SQL/SERVER par le biais d'un simple utilitaire livré avec le produit.

Considérant ces caractéristiques et le fait que la nature des traitements et le volume des données gérées par les projets (SASS ou SAI) ne nécessitent pas un SGBD très important, le choix s'est porté sur Access. Ce logiciel est largement répandu et les équipes des pays le maîtrisent suffisamment pour pouvoir l'utiliser dans l'exploitation et l'administration de la BD.

Les logiciels et équipements retenus pour la gestion de la BD et du SIG sont donc les suivants :

- SGBD : Access pour sa maîtrise dans les pays et la facilité d'interfaçage qu'il offre avec le SIG. La version 2000 permet en outre une migration aisée vers SQL/SERVER envisagée par certains pays (Tunisie, DGRE, et Algérie, ANRH) ;
- logiciel SIG : ArcView pour sa simplicité, sa puissance, sa compatibilité parfaite avec Access et son usage assez généralisé dans le domaine des ressources en eau. Doté d'un langage de développement puissant, il permet l'écriture d'utilitaires personnalisés nécessaires pour effectuer les liens SIG-Modèle numérique ;
- extension Spatial Analyst sous ArcView acquise pour réaliser les opérations d'interpolation et d'élaboration de cartes iso-valeurs ;
- extension Image Analysis sous ArcView pour le traitement des cartes scannées et leur numérisation.

Des configurations matérielles et logicielles sont définies au cas par cas, selon la règle du respect du minimum requis pour exploiter les logiciels et la BD pour les besoins des projets. Quelques acquisitions spécifiques ont été réalisées comme opérations de soutien aux pays. A l'aide de ces logiciels, un système de gestion et de traitement des données a été réalisé à partir d'un modèle de données, d'un inventaire exhaustif des procédures de traitement et du mode organisationnel retenu.

Le passage de l'état initial au nouveau système s'est fait à l'aide de procédures manuelles ou automatiques clairement définies qui prévoient entre autres des changements de codification, des contrôles de validité et des transformations de type.

Pour une parfaite maîtrise de ce système et de ses composants, des ateliers de formation destinés aux différentes équipes ont été organisés : initiation aux BD, maîtrise d'Access, formation sur les SIG en général et au logiciel ArcView.

1.3- Analyse, traitement et validation des données

1.3.1- Analyse des données

Une masse considérable d'informations est collectée sur les bassins aquifères. Mais ces informations sont en réalité très fragmentaires et donc non exploitables

sans mise en forme et traitement préalables. Cette situation est due à divers facteurs :

- les données réunies ne sont pas souvent mémorisées et se trouvent dispersées dans les rapports ;
- les BD n'ont pas été suffisamment bien conçues pour prendre en charge les traitements de modélisation ;
- les informations originales par point d'eau sont parfois difficiles à retrouver (cas du SASS) si les données sont exprimées par maille, et non par point d'eau.

a) Organisation de la collecte des données

Les données collectées proviennent de deux sources principales :

- fichiers existants au niveau des pays ;
- informations tirées des études antérieures et se trouvant sur des fichiers Excel ou sur support papier.

b) Procédure de validation

La procédure de validation adoptée est la suivante (fig. 3) :

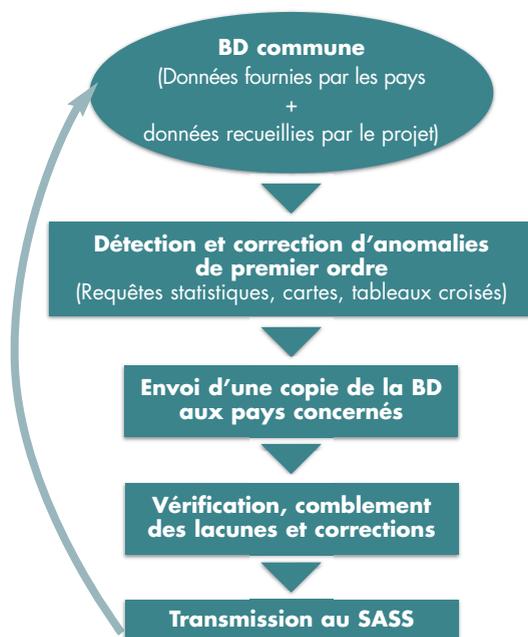


Fig. 3 : procédure de validation.

Cette procédure sert à faire les différentes mises à jour : correction, ajout de nouvelles données, reconstitution des lacunes... Les fichiers Excel sont de moins en moins utilisés et de nouvelles traditions se sont instaurées progressivement. Elles consistent à opérer directement sur la BD via un formulaire élaboré à cet effet et non sur des fichiers libres, pour éviter des erreurs de manipulation.

Ainsi, les actualisations seront moins lourdes, grâce notamment :

- à la réduction très significative des erreurs aberrantes ;
- à l'homogénéisation des formats, codes et procédures ;
- aux nouvelles fonctionnalités de mise à jour et de contrôle des données au moment de la saisie ;
- au mécanisme de réplication (garantie de cohérence entre les BD).

1.3.2- Traitement des données et leur validation

Trois grandes familles de requêtes numériques ont été mises au point pour l'interrogation, le contrôle et la mise à jour des données :

- les tableaux statistiques sur l'état et le volume de données recueillies ;
- les requêtes de synthèse et les tableaux croisés ;
- les requêtes statistiques de contrôle et d'analyse.

Ces requêtes sont complétées parfois par des représentations graphiques et cartographiques pour une meilleure interprétation.

a) Requêtes statistiques

Un ensemble de requêtes statistiques a été élaboré pour évaluer l'état des données recueillies dans la BD. Ces requêtes ont permis de mettre en évidence les lacunes et de déceler les anomalies que comportent les informations collectées.

Ceci représente un acquis important pour les actualisations futures des BD et constitue un apport certain pour la validation des données.

L'ensemble des outils ayant été mis à la disposition des pays, leur usage pour le traitement des informations dans d'autres régions est possible.

b) Le SIG et les requêtes spatiales

Les couches du SIG sont constituées du fonds topographique traité et homogénéisé, des couches hydrogéologiques digitalisées, de la couverture des points d'eau issus de la BD, des maillages relatifs aux couches du modèle hydrogéolo-

gique et de l'ensemble des cartes thématiques fabriquées à partir des requêtes Access ou ArcView.

Le SIG joue un rôle important dans le système mis en place dans la mesure où il est utilisé à chaque étape durant le processus de traitement des données :

- correction ou reconstitution de certains paramètres ;
- requêtes spatiales de détection d'anomalies ;
- génération du maillage à l'aide du langage incorporé dans le logiciel SIG ;
- liaison avec le modèle numérique.

Les requêtes spatiales de contrôle des données s'inscrivent dans une procédure permettant de déceler les anomalies de positionnement des points d'eau (coordonnées, appartenance à une entité spatiale). Le résultat de la requête est repris sous ArcView pour l'élaboration de cartes thématiques.

1.3.3- Liens BD-SIG-Modèle

Une des innovations du projet SASS est de ne pas considérer la maille² comme l'entité élémentaire d'entrée des données pour le modèle numérique. C'est au point d'eau que sont rattachées les informations quantitatives de prélèvement, de piézométrie... et c'est à ce niveau que l'utilisateur effectue les modifications. Les regroupements de données et les totaux par maille sont, quant à eux, réalisés au moyen de requêtes exécutées automatiquement lors de la préparation des données pour le modèle.

Ainsi, les changements au niveau des paramètres du maillage ne constituent plus une contrainte. Cette vision permet une meilleure souplesse mais exige qu'une connexion permanente soit établie entre la BD et le SIG pour que toute modification sur les points d'eau se répercute immédiatement et de façon transparente au niveau des données par maille.

Un formulaire a été élaboré pour réaliser ces opérations de connexion et pour assurer la synchronisation BD-SIG-modèle (fig. 4). A partir de ce formulaire, trois tâches fondamentales peuvent être lancées par l'utilisateur :

- la génération d'un maillage pour le modèle ;

² Cellule élémentaire du domaine d'étude de dimensions finies.

- l'affectation automatique d'un numéro de maille à tous les points d'eau géo-référencés ;
- la synchronisation permanente BD-SIG afin de garder la cohérence entre la table « points » et la couche SIG correspondante (OSS, 2002a).

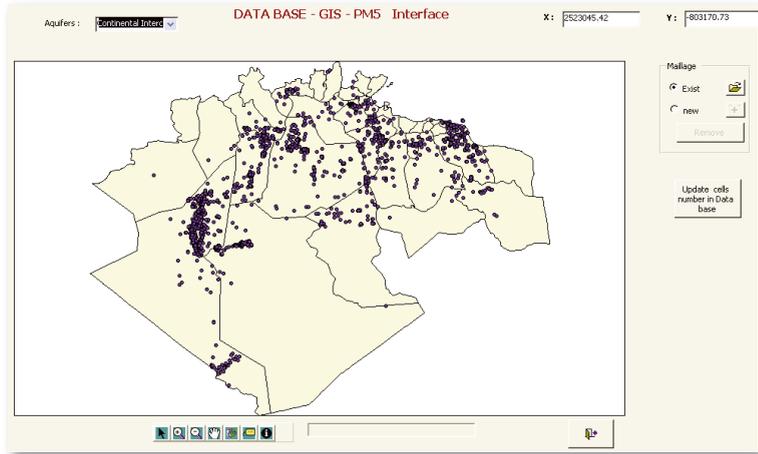


Figure 4 : interface BD-SIG-Modèle.

2- Les modèles

Plusieurs sens peuvent être donnés au terme « modèle ». Les modèles considérés en géologie et en hydrogéologie permettent de représenter la géométrie et les phénomènes mécaniques et hydrauliques qui gouvernent le comportement des terrains et des systèmes aquifères. On peut les subdiviser en modèles géométriques, mécaniques et statistiques selon les approches utilisées.

Les modèles hydrogéologiques se classent dans la famille des modèles mécaniques et numériques appliqués en milieu continu. Dans ces modèles, les équations décrivant le milieu sont résolues numériquement.

Ces modèles cherchent, dans les problèmes directs, à calculer la réponse (sous la forme de variables de sortie) d'un système soumis à des sollicitations (variables d'entrée). La réponse du système dépend de paramètres qui sont introduits dans le modèle et qui peuvent être eux-mêmes variables dans le temps et dans l'espace (ils sont parfois dénommés « variables de contrôle ») (Merrien-Soukatchoff, 2002).

Nous distinguons trois étapes dans le processus de modélisation, lesquelles ont été suivies dans les études des SASS et SAI :

- l'étape conceptuelle qui consiste à décrire et préciser les phénomènes qui seront pris en compte dans la modélisation. Le modèle conceptuel est la transcription et souvent la simplification en terme élémentaire de l'observation et de la mesure (concepts). C'est l'idéalisation, l'explication et la simplification de la réalité. Par exemple : le débit d'écoulement dans un aquifère est fonction du gradient de charge hydraulique, de la perméabilité et de l'épaisseur de la couche traversée ;
- l'étape mathématique correspond à la transcription sous la forme d'équation du phénomène décrit dans la phase conceptuelle. Dans le cas des écoulements, le modèle mathématique sera l'équation du mouvement ou de la diffusivité (qui intègre loi de Darcy et principe de conservation de masse). Le modèle mathématique correspond à la quantification de certaines observations sous forme de variables ;
- l'étape numérique correspond à la résolution numérique dans un code de calcul des équations établies à l'étape mathématique (souvent des équations différentielles). Ces méthodes numériques permettent de résoudre les équations différentielles reliant les variables d'entrée et les variables de sortie.

La modélisation peut se limiter au modèle mathématique si deux facteurs sont réunis : i) terrain homogène et isotrope et ii) conditions aux limites simples. Les modèles conceptuels sont pour nous descriptifs et qualitatifs ; les modèles mathématiques et numériques quantitatifs, mais sous-entendent toujours un modèle conceptuel. Le comportement des terrains étant complexe, aucun modèle mathématique ne peut complètement le décrire. Le modèle conceptuel doit donc clairement préciser les caractéristiques et phénomènes considérés comme essentiels qu'il cherche à reproduire.

2.1- Etat des connaissances : modèles existants dans l'espace OSS

Les aquifères les plus représentatifs des bassins de la zone saharo-sahélienne ont fait l'objet, pour la plupart, d'une évaluation statique de leur réserves, comme première approche, avant de faire l'objet de plusieurs modèles hydrodynamiques essentiellement conçus comme simulateurs du comportement des nappes pendant leur exploitation suivant différents scénarios décidés sur la base de critères physiques simples comme pour le SASS (OSS, 2002b), ou de critères subjectifs d'acceptabilité des effets de programmes prédéterminés (Pallas, 1992).

La plupart des modèles utilisés dans l'espace OSS sont bidimensionnels (tableau 1). Ils ne simulent que des aquifères monocouches. Le maillage est soit carré et régulier

et utilise pour la simulation numérique de l'écoulement la méthode des différences finies, soit triangulaire et irrégulier, et utilise, dans ce cas, la méthode des éléments finis. Certains modèles sont tridimensionnels à éléments ou à différences finies et permettent la simulation des systèmes aquifères multicouches en faisant apparaître les échanges inter-nappes à la faveur d'accidents tectoniques ou de transgressions.

| Bassin | Auteur | Date | Méthode | Dimensions |
|--|---------------|-------------|--------------------|-------------------|
| Sahara septentrional | UNESCO | 1969-1971 | Différences finies | 2D |
| Sahara septentrional (Modèles du SASS et sous-modèles de Biskra, Bassin occidental et Djelfa) | OSS | 1999-2006 | Différences finies | 2D |
| Algérie, Tunisie, Libye | OPS | 1981-1983 | Différences finies | 2D |
| Libye | ENIT | 1990 | Différences finies | 2D |
| Bassin de Murzuk | AQUATER | 1984 | Éléments finis | 3D |
| Bassin oriental de la Libye | AHMAD | 1980 | Différences finies | 2D |
| Grès de Nubie | AMER | 1981 | Éléments finis | 3D |
| Grès de Nubie | CEDARE | 2001 | Éléments finis | 3D |
| Sénégal-mauritanien (Maestrichtien) | DIENG | 1986 | Différences finies | 2D |
| Niger | PNUD/NER | 1985 | Différences finies | 2D |
| Iullemeden | OSS | 2008 | Différences finies | 2D |
| Bassin du lac Tchad | BRGM | 1992 | Différences finies | 3D |

Tableau 1 : différents types de modèles utilisés au Sahara et au Sahel

D'autres modèles, sur des superficies beaucoup moins importantes, ont été réalisés, aussi bien dans les pays d'Afrique du Nord (Algérie, Libye, Tunisie, Egypte) que dans ceux du Sahel (Niger, Sénégal).

L'appréciation de la troisième dimension est fonction non seulement de l'information disponible mais aussi de l'effet d'échelle – plus celle-ci est grande, plus grand sera le degré de précision du modèle – et de la complexité hydrogéologique du système aquifère étudié.

Vu le nombre important des systèmes d'évaluation des réserves et surtout leurs

lacunes, les actions suivantes ont été menées conformément aux suggestions de l'atelier du Caire³ (OSS, 1993):

- les bassins du SASS et du SAI ont été étudiés dans leur globalité. Les modèles qui avaient été développés dans ces régions ont été reconsidérés et inscrits dans leurs limites naturelles géologiques et non pas tronqués par des limites arbitraires, administratives ou politiques ;
- les systèmes d'évaluation des ressources ont évolué avec l'amélioration des connaissances et des techniques d'évaluation en introduisant, par exemple, lorsque cela est possible, la troisième dimension qui tient mieux compte de la géométrie des systèmes aquifères et des échanges qualitatifs et quantitatifs inter-nappes.

Une approche plus fine intra-modèle pour des zones particulières du SASS (sous-modèles) a permis une meilleure compréhension du comportement de la nappe à une échelle locale (OSS, 2005b et c). Des réflexions sur les thèmes suivants ont été développées :

- existence de solutions alternatives : il s'agira de prévoir toutes les solutions possibles à mettre en place dès que l'exploitation de l'eau devient difficile (coût trop élevé, mauvaise qualité, etc.) ;
- risque de détérioration des eaux soit par inversion de l'écoulement suite à un abaissement du niveau des nappes, soit par contamination « up » ou « down-coming », soit encore par intrusion saline ;
- impact sur l'environnement : il est multiple et englobe des domaines variés, tels que l'altération du couvert végétal, la salinisation des sols irrigués, les phénomènes d'affaissement de terrains par subsidence, etc.

Les scénarios réalisés sur la base de ces facteurs devront proposer plusieurs variantes en jouant sur le couple durée de l'exploitation/volumes annuels d'eau extractible.

2.2- But de la modélisation

D'une manière générale, la modélisation peut servir à des fins multiples. Le modèle facilite la compréhension du système étudié et permet de faire des prévisions. De manière plus précise, l'objectif global des modélisations effectuées dans le

³ Atelier de Caire, 22-25 novembre 1992.

cadre des projets de l'OSS est l'actualisation des connaissances. Ces modélisations ont permis :

- de connaître et comprendre le fonctionnement hydrodynamique des systèmes étudiés. Ce qui inclut :
 - l'identification des paramètres ou des phénomènes (problèmes, méconnaissances, incertitudes) ;
 - la quantification de certains paramètres ;
 - l'analyse du phénomène ;
- de tester des hypothèses, ce qui conduit à leur validation ou leur réfutation ;
- de dimensionner, prévoir (une hauteur piézométrique) ou vérifier une hypothèse ;
- de qualifier un modèle (conceptuel et/ou numérique).

Chacun des modèles développés peut inclure plusieurs de ces aspects. La réalisation des modèles de bonne qualité du SASS et du SAI a été rendue possible par la bonne spécification des objectifs. En effet, il est important que ceux-ci soient explicités et traduits dans un langage compris par tous ceux qui sont susceptibles d'être intéressés par cette modélisation.

2.2.1- Connaître et comprendre

La modélisation améliore la connaissance des processus et de leur enchaînement dans le temps et dans l'espace. Ceci est particulièrement bien souligné dans le projet SASS dont l'objectif est l'actualisation des connaissances hydrauliques. Il a abouti à une meilleure représentation du modèle conceptuel du système et à une modélisation des phénomènes actuels et de l'évolution temporelle plausible.

a. Comprendre les mécanismes

Des études géologiques sont toujours menées en amont pour connaître la géométrie des aquifères pour mieux élaborer les modèles conceptuels. Les modèles numériques permettent de faire progresser la compréhension du fonctionnement hydrodynamique des systèmes. Une bonne conceptualisation des modèles permet une meilleure identification des phénomènes et la compréhension des mécanismes. Dans l'analyse, il est difficile de dissocier le modèle conceptuel du modèle numérique. Cependant, la banalisation de l'utilisation des modèles fait oublier, assez souvent, la question du modèle conceptuel sur lequel repose le modèle numérique (Merrien-Soukatchoff, 2002).

Pour les modèles du SASS et de la Djéffara, plusieurs ajustements ont été réalisés avant d'aboutir aux versions actuelles. Dans le projet SASS, il était impossible de reproduire le débit de l'exutoire tunisien par le modèle numérique sans la révision du modèle conceptuel. Par ailleurs, les simulations réalisées dans le cadre de l'étude de la Djéffara tuniso-libyenne (modèle Djéffara) font ressortir la nécessité d'une révision de l'extension de l'exutoire tunisien dans le modèle du SASS et de la réalisation d'un modèle global "SASS-Djéffara" afin de mieux cerner le débit de l'exutoire tunisien du SASS vers la Djéffara. Cette démarche est plus judicieuse que celle consistant à réaliser deux modèles séparés. Le modèle du SAI a permis de mettre en évidence et de quantifier les échanges entre les aquifères et le fleuve Niger (OSS, 2007b).

b. Identifier

La modélisation peut être un moyen d'identification :

- des facteurs, i.e. des variables d'entrée et des paramètres jouant un rôle déterminant sur les sorties du modèle ;
- des phénomènes ou de l'origine de certains phénomènes (salinisation) ;
- des paramètres (par rétro-analyse), ce qui suppose que les facteurs à prendre en compte sont connus. Préalablement à l'identification des paramètres, il peut y avoir une phase de calage, où l'on fait varier les paramètres d'un modèle par tâtonnements. Le calage considéré comme optimal conduit à « l'identification des paramètres ».

Le modèle de la Djéffara (OSS, 2005b) illustre le rôle d'identification de la modélisation à travers la modélisation des écoulements et du transport des sels. Ce modèle est l'un des rares, sinon le seul, à dimension internationale, à coupler le modèle hydrodynamique au modèle de transport des sels.

Dans le cadre de l'étude de la recharge du SASS (Babasy, 2005), les modèles hydrologiques ont permis d'identifier l'ordre de grandeur de la recharge (variable d'entrée) à prendre en compte pour restituer les niveaux piézométriques des nappes. Cette analyse a également montré l'existence de paramètres non identifiés, car non mesurés, qui interviennent dans les variations piézométriques, et qui ont un caractère saisonnier. Les paramètres tels que la température et l'évapotranspiration pourraient donc être potentiellement intéressants à prendre en compte.

2.2.2- Simuler

Les modèles peuvent servir à simuler des hypothèses et des alternatives. Le but ultime de la modélisation est le plus souvent la prévision par la simulation (Besbes, 2010).

En Algérie, en Libye et en Tunisie, le modèle du SASS a servi à simuler des alternatives de développement agricole. Cette approche « minière » de la ressource des nappes réputées « fossiles » a dû être actualisée. Les simulations exploratoires effectuées sur le modèle SASS ont en effet mis en exergue un certain nombre de nuisances et de « risques » auxquels est exposée la ressource en eau du simple fait de son développement. Vouloir continuer à exploiter encore plus les nappes nécessitera désormais de savoir, en connaissance de cause, minimiser et gérer ces risques (OSS, 2002b). Le modèle du SAI a abouti à des résultats similaires pour le Mali, le Niger et le Nigéria (OSS, 2007b).

2.3- Qualité, non-qualité d'une modélisation

Il s'agit ici d'un certain nombre d'éléments pouvant être perçus comme de qualité ou de non-qualité en matière de modélisation.

2.3.1- Caractérisation de la qualité des modélisations et indicateurs de qualité

Un ensemble d'éléments caractérise la qualité de conformité en matière de modélisation, parmi lesquels :

- a) la bonne réponse de la modélisation au problème posé, ce qui présuppose que le problème a été (bien) posé ;
- b) la présentation claire des limites de la modélisation et adéquation du modèle conceptuel au problème ;
- c) l'aptitude à restituer (ou à prévoir) des mesures ou des phénomènes ;
- d) la fiabilité du calcul ;
- e) la robustesse du modèle ;
- f) la reproductibilité de la méthode ;
- g) la facilité de compréhension et d'identification des entrées/sorties et des étapes qui ont conduit aux résultats. Par exemple :
 - les paramètres d'entrée sont listés, clairement définis et justifiés ;
 - les conditions aux limites sont clairement définies et le choix est explicite ;
- h) la qualité de tous les éléments intervenant dans la modélisation :
 - des contrôles ont permis de vérifier les entrées et les sorties ;
 - les étapes effectuées sont bien définies et tracées ;

- i) la justification des entrées et des étapes effectuées ;
- j) la précision du vocabulaire utilisé et le sens clairement accepté par les protagonistes du projet dans lequel la modélisation est incluse ;
- k) l'existence d'une documentation présentant clairement les objectifs, les paramètres (entrées, conditions aux limites, maillage), les hypothèses et les limites d'utilisation. Ces informations doivent être répertoriées, classées, archivées ;
- l) la formation suffisante du modélisateur aux spécificités de la modélisation.

Les modélisateurs et les utilisateurs peuvent préciser, dans une telle liste, les points qui leur semblent plus importants. Nous avons choisi de les regrouper comme suit :

- le but de la modélisation : répond-elle bien au problème posé ?
- la terminologie : le vocabulaire utilisé doit être précis et la compréhension du sens partagé par tous les interlocuteurs de la modélisation ;
- l'analyse du processus, pour apporter des garanties sur la facilité de compréhension et d'identification des entrées et sorties et des étapes qui ont conduit aux résultats ;
- la documentation ;
- la formation des modélisateurs ;
- l'impact de la qualité.

2.3.2- Perception de non-qualité

Parmi les causes de non-qualité de la modélisation, figurent :

- l'absence d'information et de justification sur :
 - les paramètres d'entrée du modèle ;
 - les conditions initiales et les étapes de construction ;
 - les conditions aux limites ;
 - le choix de maillage ;
- l'absence de justification, voire d'explication sur les hypothèses sous-entendues par la modélisation, en particulier le modèle conceptuel impliqué par la modélisation ;

- la non-prise en compte d'éléments essentiels (phénomène transitoire, influence du temps sur les caractéristiques...);
- les prévisions déficientes ;
- la non-comparaison entre modèle et mesures.

2.3.3- Impact de la qualité

Une mauvaise qualité de la modélisation pourrait avoir les impacts suivants :

- augmentation du temps passé à la recherche d'informations ;
- détérioration de l'image de marque de l'organisme modélisateur ;
- décrédibilisation de la modélisation en tant que démarche scientifique.

A l'inverse, la bonne qualité de la modélisation pourrait réduire le temps consacré à la recherche d'informations et servir d'outil d'aide à la décision. Le modèle du SASS, considéré comme de qualité, a été approprié par les pays (Algérie, Tunisie, Libye). Il est utilisé pour réaliser des simulations prévisionnelles dont les résultats sont considérés dans les programmes nationaux de planification.

2.4- Terminologie

Parmi les termes utilisés dans la modélisation, nous évoquerons ici les deux plus importants : vérification et validation.

2.4.1- Vérification

La vérification est un contrôle. Les tests de vérification peuvent prendre plusieurs formes. Il peut s'agir, par exemple, pour la piézométrie ou la transmissivité, de confronter sa valeur à des valeurs issues de la littérature. La vérification consiste alors à comparer cette valeur à la valeur moyenne. Toute donnée utilisée dans nos modèles (dans le cadre d'un projet) doit être inscrite au préalable dans la BD de ce projet.

2.4.2- Validation

La validation est une opération lourde de conséquence, car elle constitue une prise de décision. La difficulté de la validation réside dans l'explication suffisamment claire de cette prise de décision. Il est nécessaire de préciser le ou les critères ayant permis de valider ou non une entrée, un paramètre, une sortie, un modèle. Par exemple, une valeur d'entrée ou de sortie peut être validée parce qu'elle est

dans une fourchette de un ou de deux écarts-types par rapport à la valeur moyenne. Les modèles réalisés dans le cadre du projet SASS reproduisent assez fidèlement les comportements hydrauliques des systèmes étudiés et sont validés sur des séries exhaustives de données.

2.5- Analyse du processus de modélisation

La modélisation d'un système est la combinaison de multiples aspects, un assemblage complexe de différentes notions et compétences dont les modélisateurs et les utilisateurs de modèles ne discernent pas toujours tous les aspects. L'exactitude d'une prévision dépend de la qualité de la méthode, ainsi que des données utilisées, mais aussi du modélisateur.

L'analyse du processus consiste à décomposer le travail effectué en des entrées et une suite d'activités qui conduit au produit final : les sorties (fig. 5).

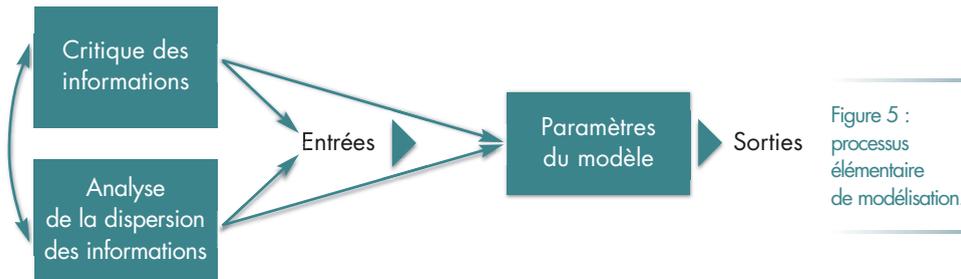


Figure 5 : processus élémentaire de modélisation.

Préalablement à la modélisation proprement dite, les informations sur lesquelles vont s'appuyer les entrées et les paramètres du modèle doivent être critiquées et leur dispersion caractérisée.

L'acquisition des informations s'effectue par des mesures qui sont archivées sous forme papier ou informatique. A chacune de ces étapes, il peut y avoir un dysfonctionnement qui nécessite une critique des données d'entrée du modèle avant leur utilisation.

L'analyse des sorties du modèle est la dernière étape de la décomposition en processus. Lorsque toutes les étapes de la modélisation ont été validées et que la comparaison des sorties du modèle ont conduit à considérer les phénomènes et les mesures jugées essentielles comme reproduits, le modèle sera « qualifié ». Il pourra alors être utilisé pour la prévision. L'aptitude du modèle à restituer ou prévoir des mesures est généralement considérée comme un gage de qualité du modèle.

2.6- Contrôles, justifications et documentation

Pour assurer une modélisation de qualité, deux aspects doivent être examinés :

- *le contrôle du processus* qui va consister à apporter des assurances que chacune des étapes décrites au paragraphe précédent a bien été effectuée et qu'à chaque étape des vérifications ont été réalisées ;
- *le contrôle du produit* qui va consister à examiner si la modélisation répond aux spécifications fixées par avance : but fixé (reproduire une mesure), documentation, archivage.

Parmi les vérifications possibles, on peut répertorier les erreurs de données, de modèle conceptuel, de discrétisation, de convergence, d'interprétation des résultats. L'erreur de calcul sera la somme de l'ensemble de ces erreurs.

Les vérifications, si elles conduisent à une validation, n'apportent certainement pas la preuve que « c'est juste » mais « ce n'est pas faux » (Merrien-Soukatchoff, 2002), des connaissances nouvelles pouvant toujours remettre en cause un modèle. Le modèle de l'ERESS (Unesco, 1972) qui avait été considéré « bon » pendant près de 30 ans, a été refait dans le SASS (OSS, 2002b) avec une nouvelle conception (multicouche, historiques de validation plus longs, etc.).

Pour la qualité d'une modélisation, il est important de justifier au maximum les choix initiaux (conditions aux limites...) introduits dans le modèle. Justifier ne signifie pas avoir fait le choix conduisant au modèle le plus précis, mais celui qui semble être le meilleur compromis, compte tenu des informations disponibles, des moyens de calcul mis en œuvre et du temps disponible.

Souvent les paramètres des modèles sont déterminés par calage, mais la « stratégie » de calage est rarement explicitée ou même analysée. « Le calage 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) » (Piguet, 1995). Le calage se base donc sur les mesures existantes et est conditionné par leur nombre, leur position, leur précision... Il est donc important de connaître ces éléments pour justifier les paramètres utilisés.

Dans le cas du SASS, le calage a permis de fixer les ordres de grandeur des transmissivités de passage dans les ergs occidental et oriental où les mesures étaient quasi inexistantes. La recharge appliquée aux zones d'alimentation du modèle a fait l'objet de calcul et a été vérifiée dans le cadre d'une thèse (Baba Sy, 2005) utilisant les modèles hydrologiques.

L'existence d'une documentation, d'informations répertoriées, classées et archivées constitue une certaine assurance de qualité du modèle. Les informations suivantes sont intéressantes à préciser dans la documentation relative à une modélisation :

- la liste des entrées nécessaires au modèle numérique ;
- la justification des données ;
- les hypothèses formulées.

En outre, l'existence d'une documentation facilite les contrôles.

2.7- Formation des modélisateurs

Nous avons vu que les aspects « qualité » des modélisations sont liés aux produits et aux processus. La qualité des modélisations dépend cependant en grande partie des modélisateurs eux-mêmes. Il est donc nécessaire de bien les former.

Dans la réalisation des activités des projets SASS et SAI, l'OSS a acquis une grande expérience dans le domaine de la modélisation. Cette activité est réalisée en étroite collaboration avec les techniciens des pays, qui sont, pour la plupart, des hommes de terrain. L'OSS les fait bénéficier d'un programme de formation en modélisation.

La formation dans le domaine de la modélisation peut être envisagée selon deux approches : l'une tournée vers les techniques mathématiques et l'autre vers la pratique. Les deux aspects sont bien entendu nécessaires, mais conduisent à des perceptions différentes de la modélisation. Les sessions de formation dispensées par l'OSS sont des formations-actions, plus tournées vers la pratique.

2.8- Apports des modèles dans la gestion des ressources en eau souterraines

Les modèles permettent de comprendre le fonctionnement hydraulique des systèmes étudiés et servent d'outils d'aide à la décision pour la gestion rationnelle des ressources en eau. Malgré leurs apports, la grande part des grands bassins de l'espace OSS n'ont pas fait l'objet de modèle global de gestion. La modélisation, en tant que démarche scientifique, est encore peu utilisée pour ces bassins où, pourtant, elle pourrait contribuer grandement à la gestion rationnelle et concertée des ressources en eau souterraines partagées.

Parmi les grands bassins aquifères de l'espace OSS, seuls trois (Grès de Nubie, SASS et SAI) ont fait l'objet d'un modèle global de gestion de la ressource.

L'expérience de l'OSS dans ce domaine, acquis dans le cadre des projets SASS (OSS, 2002a) et SAI (OSS, 2007b), a permis de dynamiser l'utilisation de l'outil de modélisation pour la gestion des ressources en eau souterraines et d'envisager la mise en œuvre d'un programme de formation-action pour le renforcement des capacités des pays.

Les scénarios d'exploitation définis par les pays et explorés dans le modèle du SASS ont permis d'identifier les zones à risques et de s'accorder sur un réseau permanent de suivi piézométrique. Les données d'observations introduites régulièrement dans les BD permettent aussi de faire « tourner » périodiquement les modèles de simulation afin de les confronter à l'évolution naturelle des aquifères modélisés pour, d'une part, réajuster l'évaluation des réserves et, d'autre part, corriger les scénarios d'exploitation. Le même exercice est à prévoir également dans le cas de changement important des données économiques. C'est la « gestion contrôlée » (Mamou et Ben Marzouk, 1992 ; Diagana, 1992 et 1997).

● ● ● CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La mise en place des BD du SASS et du SAI a permis de rassembler et de rendre homogène l'ensemble des informations disponibles à ce jour sur ces deux bassins dans des structures relationnelles cohérentes.

Sans de telles architectures ouvertes, il aurait été difficile d'imaginer que se réalisent tous les traitements, requêtes et cartes thématiques que ces projets ont pu produire.

Le système développé au cours de l'exécution de ces projets, qui s'articule autour des liaisons BD-SIG-Modèle, a été d'une grande utilité et constitue pour les pays une base de départ pour le développement d'outils de gestion efficaces. Ce système est d'autant plus performant qu'il permet de gagner un temps considérable en comparaison avec le temps que nécessitait, il y a juste quelques années, l'actualisation d'un modèle après un changement de maillage, l'intégration de données nouvelles ou l'incorporation d'un nouveau scénario de prélèvement.

Sur le plan des contenus des BD, des avancées considérables ont été faites, mais des anomalies subsistent qu'il convient de corriger avec les équipes nationales :

- grand nombre de forages sans identifiant ou sans coordonnées ;
- répartition spatiale et temporelle des données non homogène ;
- prélèvements mal maîtrisés.

Afin de se hisser à un niveau de fiabilité élevé et pour que les données ne soient plus entachées de doute, il est nécessaire de travailler davantage sur les données collectées et de définir des procédures claires pour le recueil de données nouvelles.

La première tâche ne pourra être réalisée que par les pays eux-mêmes en utilisant

les outils et moyens mis à leur disposition par le projet. Quant aux mises à jour ultérieures, elles ne seront fiables que si les procédés de collecte, de codification et de contrôle sont réalisés au niveau local.

Une décentralisation des moyens de gestion et de traitement devra être prévue et encouragée pour faciliter les mises à jour ultérieures et régulières des données.

Mais, les tâches les plus urgentes consistent dans le « nettoyage » et la stabilisation des BD actuelles pour mieux refléter la situation réelle. Cette opération devra impliquer essentiellement les équipes des pays.

Pour ce faire, il est recommandé que les pays continuent à mener les tâches suivantes :

| Pays | Tâches devant être réalisées sur les contenus des BD nationales |
|---------|--|
| Algérie | <ul style="list-style-type: none"> – vérification des données d’inventaire, affectation d’un numéro d’identification et élimination des doublons ; – saisie des informations manquantes : coordonnées, profondeur, formation captée, altitude, dates de réalisation et d’arrêt, état... ; – confrontation des historiques de prélèvement avec les informations disponibles au niveau des usagers ; – constitution de la table des groupes d’exploitation et leur rattachement aux points d’eau ; – vérification des informations géologiques ; – délimitation précise des zones d’exploitation et leur cartographie. |
| Libye | <ul style="list-style-type: none"> – confrontation des données saisies au niveau du SASS avec les forages réellement existants, élimination des doublons et affectation d’identifiants ; – constitution d’historiques de prélèvement par forage ; – constitution de la table des groupes d’exploitation et rattachement aux points d’eau ; – vérification des informations concernant la géologie ; – délimitation précise des zones d’exploitation et cartographie ; |
| Tunisie | <ul style="list-style-type: none"> – vérification des caractéristiques des points d’eau et ajout des informations manquantes ; – constitution de la table des groupes d’exploitation et son rattachement aux points d’eau ; – vérification des informations géologiques ; – délimitation précise des zones d’exploitation et leur cartographie ; |

| Pays | Tâches devant être réalisées sur les contenus des BD nationales |
|----------------|---|
| Mali | <ul style="list-style-type: none"> – confrontation des données saisies au niveau du SAI avec les forages réellement existants, élimination des doublons et affectation d'identifiants ; – constitution d'historiques de prélèvement par forage ; – constitution d'historiques piézométriques par piézomètre ; – vérification des informations concernant la géologie ; – délimitation précise des zones d'exploitation et cartographie ; |
| Niger | <ul style="list-style-type: none"> – confrontation des données saisies au niveau du SAI avec les forages réellement existants, élimination des doublons et affectation d'identifiants ; – constitution d'historiques de prélèvement par forage ; – constitution d'historiques piézométriques par piézomètre ; – vérification des informations concernant la géologie ; – délimitation précise des zones d'exploitation et cartographie ; |
| Nigéria | <ul style="list-style-type: none"> – confrontation des données saisies au niveau du SAI avec les forages réellement existants, élimination des doublons et affectation d'identifiants ; – constitution d'historiques de prélèvement par forage ; – constitution d'historiques piézométriques par piézomètre ; – vérification des informations concernant la géologie ; – délimitation précise des zones d'exploitation et cartographie. |

Dans une deuxième phase, il sera peut-être nécessaire d'intégrer les informations relatives à la description des équipements de forage et des installations annexes (pompes, moteurs...) au moins pour les forages les plus importants.

Sur le plan du SIG, il y a lieu de réaliser une cartographie numérique plus précise des zones présentant un intérêt hydrogéologique particulier : fonds topographique à grande échelle, MNT plus précis, limites des zones agricoles et des extensions envisagées...

Sur le plan de la modélisation, le développement des modèles hydrogéologiques a conduit à des avancées significatives dans la gestion des ressources en eau. Leur utilisation pour mieux connaître le fonctionnement hydraulique des systèmes aquifères est en plein essor et devient indispensable. Il est important que l'utilisation des modèles soit bien maîtrisée et ses limites clairement indiquées. Se soucier de la qualité des modèles est tout aussi indispensable dans la perspective d'une réflexion sur le développement durable.

La modélisation réalisée dans le cadre des projets de l'OSS vise l'actualisation des connaissances (SASS et SAI) et la mise en place d'un programme de gestion rationnelle et concertée entre les pays. Cette activité est d'une importance première car même si le but fixé n'est pas atteint, la modélisation permet d'identifier des aspects qui n'avaient pas été considérés initialement, de comprendre les imperfections du modèle conceptuel et de vérifier si les hypothèses retenues étaient ou non justifiées.

Un modèle, même s'il restitue mal les mesures, peut permettre de cerner un problème. L'exemple le plus édifiant est donné par le modèle du SASS qui, en plus de la réalisation de ses objectifs, a permis d'identifier de nouveaux aspects instructifs. Au cours du calage du modèle, la configuration de l'exutoire tunisien a été reconsidérée, ce qui a permis de mieux comprendre son fonctionnement hydraulique. Les potentialités hydrauliques du bassin occidental en Algérie, insoupçonnées au départ, ont ainsi été mises en exergue.

La modélisation peut être une bonne méthode heuristique spécialement utile dans le domaine de la recherche. La réflexion sur l'utilisation conjointe de différents types de modèles est interdisciplinaire et nécessaire. L'utilisation de la modélisation hydrologique dans le SASS a, par ailleurs, permis de confirmer la recharge appliquée dans le modèle hydrodynamique (Babasy, 2005). Les interactions entre interrogations, informations et modèles conduisent à une meilleure connaissance, caractérisation, compréhension et quantification des phénomènes modélisés. Les modèles permettent de faire des prévisions et de dégager des options de gestion optimale.

L'OSS développe cette activité de modélisation dans le cadre de ses projets, en étroite collaboration avec les pays et en considérant les aquifères dans leurs limites globales. Des actions adéquates ont été menées pour le bassin aquifère du Sahara septentrional à travers la promotion et le développement d'une conscience de bassin par la mise au point d'une approche méthodologique ayant abouti à la mise en place d'une structure de concertation.

Cette approche méthodologique a été dupliquée/adaptée dans le bassin de l'Ullemeden ; et il est envisagé de l'étendre au bassin de Taoudeni. Pour le bassin du Sénégal-mauritanien, un document de projet est en cours de développement, mais la concrétisation du projet tarde encore. Il s'agira, pour ce dernier bassin, mais aussi pour celui de Taoudeni et du lac Tchad, de définir un programme de concertation, de faire le bilan des connaissances, de définir les contraintes actuelles et, enfin, d'arrêter un programme de sensibilisation des décideurs et des

populations puis, éventuellement, de proposer quelques actions pilotes d'exploitation à finalité expérimentale et démonstrative, en étudiant leur localisation et leur faisabilité optimale. Et ce, à l'instar du projet SASS où les simulations exploratoires ont permis d'identifier des réserves (potentialités) importantes dans le bassin occidental (zone non exploitée) dont la mobilisation pourrait être une alternative pour soulager d'autres zones très sollicitées.

Le développement des outils techniques entrepris dans le cadre des projets de l'OSS met en place un cadre de concertation entre les différents acteurs (OSS et représentants des pays) qui devra être maintenu pour leur mise à jour. L'OSS poursuivra son rôle de coordination du développement à l'échelle des bassins, ce qu'aucun des Etats ne peut faire seul.

L'apport de la modélisation dans la gestion des ressources en eau conduit à envisager son application systématique dans le cadre des projets de l'OSS. L'utilisation conjointe des modèles couplés eaux souterraines/eaux superficielles est aussi à envisager, dans les régions où les nappes sont en rapport étroit avec les fleuves. Une réflexion sur l'utilisation des modèles climatiques peut également être développée, afin de mieux caractériser la ressource.

Cependant, les outils techniques ne sont pas suffisants à eux seuls pour garantir le bon fonctionnement du dispositif de collecte et de mise à jour du système d'information. Il faudrait également mettre en place une organisation adaptée et des procédures de travail compatibles avec celles qui sont déjà en place au sein de chaque pays.

C'est ce volet qui mérite d'être développé afin que les structures de concertation (existantes ou envisagées) jouent pleinement leur rôle de production d'éléments décisionnels fiables pour une gestion rationnelle des eaux du bassin.

La mise en place d'un circuit de l'information et de procédures formalisées de traitement est déterminante pour la réussite du Mécanisme de concertation. Ce sont ces aspects, souvent occultés dans le passé, qui permettent d'accompagner et de pérenniser les outils techniques développés dans le cadre des études et de les rendre plus efficaces.

●●● BIBLIOGRAPHIE

- Baba Sy (2005). *Recharge et paléorecharge du système aquifère du Sahara septentrional*. Thèse de doctorat, Faculté des sciences de Tunis, 271p.
- Besbes M. (2010). *Commentaires sur les outils de gestion des ressources en eau souterraines*.
- Diagana B. (1992). *Les ressources en eau des pays du Sahel et leur mise en valeur*. Atelier de Caire, 22-25 novembre 1992, Bulletin des liaisons du CIEH (Comité interafricain d'études hydrauliques), n° 92, avril 1993.
- Diagana B. (1997). *Aquifères des grands bassins : synthèse des connaissances hydrogéologiques des bassins au sud du Sahara*. OSS, 52p.
- Mamou et Ben Marzouk (1992). *Approche de calcul des réserves en eau souterraines en Tunisie*. Atelier du Caire, 22-25 novembre 1992.
- Margat J. (1992). *Quelles ressources en eau les grands réservoirs aquifères offrent-ils ? Evaluation et stratégie d'exploitation*.
- Merrien-Soukatchoff V. (2002). *Éléments de réflexion sur la qualité des modélisations en hydrogéotechnique*. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches en Génie civil – Hydrosystème - Géotechnique ; Laboratoire Environnement, géomécanique et ouvrages (LAEGO), Ecole nationale supérieure des mines de Nancy (ENSMN), 109p.
- OSS (1993). *Programme de concertation « Aquifères des grands bassins »*. Atelier du Caire, 22-25 novembre 1992. Bulletin des liaisons du CIEH (Comité interafricain d'études hydrauliques), n° 92, avril 1993.

- OSS (2002a). *Système aquifère du Sahara septentrional : une conscience de bassin. Base de données et système d'information géographique*. Volume 3. OSS, 147p.
- OSS (2002b). *Système aquifère du Sahara septentrional : une conscience de bassin. Modèle mathématique*. Volume 4. OSS, 234p, annexes.
- OSS (2005a). *Le programme Eau de l'OSS : la gestion concertée des ressources en eau partagées, un enjeu stratégique pour l'intégration économique en Afrique*. OSS, 8p.
- OSS (2005b). *Etude sur modèle mathématique de la nappe de la Djéffara tuniso-libyenne. Construction et calage des modèles d'écoulement et de transport*. OSS, 108p.
- OSS (2005c). *Etude sur le modèle mathématique de la nappe de Biskra-Nord des chotts*. Rapport final. OSS, 123p.
- OSS (2007a). *Base de données commune du Système aquifère d'Iullemeden (SAI)*. OSS, 97p.
- OSS (2007b). *Modèle hydrogéologique du Système aquifère d'Iullemeden (SAI)*. OSS, 85p.
- Pallas P. (1992). *Performances et limites des méthodes d'évaluation des ressources en eau souterraines non-renouvelables*. Atelier du Caire, 22-25 novembre 1992. Bulletin des liaisons du CIEH (Comité interafricain d'études hydrauliques), n° 92, avril 1993.
- Piguet J.P. (1995). *Ingénierie en Mécanique des roches : de nouveaux progrès en informatique comme moyen de traiter l'empirisme*. Keynote lecture – Proc. of the 8th Congress of the Rock Mechanics (ISRM), Balkema, Tokyo, Japon, Vol. 3, pp.997-1003.
- Unesco (1972). *Etude des ressources en eau du Sahara septentrional*. Rapport final, 78p., 1 carte, 12 planches.

●●● LISTE DES ACRONYMES

| | |
|-------|--|
| ACSAD | <i>Arab Center for the Studies of Arid Zones and Dry Lands</i> |
| ANRH | Agence nationale des ressources hydrauliques (Algérie). |
| BD | Base de données |
| BRGM | Bureau de recherches géologiques et minières (France) |
| CRDA | Commissariat régional au développement agricole |
| DGRE | Direction générale des ressources en eau (Tunisie) |
| DNHE | Direction nationale de l'hydraulique et de l'énergie (Mali) |
| ERESS | Etude des ressources en eau du Sahara septentrional |
| GWA | <i>General Water Authority (Libye)</i> |
| IRH | Inventaire des ressources hydrauliques (Niger) |
| MCD | Modèle conceptuel de données |
| SAI | Système aquifère d'Iullemeden |
| SASS | Système aquifère du Sahara septentrional |
| SGBD | Système de gestion de base de données |
| SIG | Système d'information géographique |

OUTILS DE GESTION DES SYSTÈMES AQUIFÈRES TRANSFRONTALIERS DE L'ESPACE OSS

Approche méthodologique

Dans le domaine de l'eau, l'Observatoire du Sahara et du Sahel axe ses activités sur la problématique de la gestion conjointe des aquifères partagés. Il prône la concertation scientifique et technique entre les pays afin de promouvoir la notion de conscience de bassin et édifier des bases solides pour la gouvernance de ces ressources stratégiques. Dans ce processus, la modélisation occupe une place de choix car elle permet d'analyser, de comprendre et de prévoir les phénomènes qui affectent ou pourraient affecter les systèmes aquifères.

L'approche de l'OSS s'articule autour des liaisons entre base de données, système d'information géographique et modèle. Cet ensemble développé dans le cadre des systèmes aquifères du Sahara septentrional (SASS) et d'Iullemeden (SAI) est d'une grande utilité pour les pays et constitue une première étape pour le développement d'outils de gestion efficace. Son premier maillon rassemble les données disponibles de manière structurée. Le second permet de réaliser une cartographie numérique précise des zones présentant un intérêt hydrogéologique particulier. Le modèle, au final, permet de mieux connaître le fonctionnement hydraulique des systèmes aquifères et de servir d'outils d'aide à la décision pour leur gestion rationnelle et concertée.

L'OSS a développé ces outils en étroite collaboration avec les pays et en prenant en considération l'ensemble des bassins aquifères. Les trois pays partageant le SASS (Algérie, Libye, Tunisie) poursuivent l'activité de modélisation du bassin sous la houlette du Mécanisme de concertation mis en place depuis 2008 et hébergé à l'OSS.

Cette note a donc pour objectif d'analyser ce qui a été fait et ce qu'il est possible de faire en matière de modélisation des grands bassins aquifères de l'espace OSS.

ISBN : 978-9973-856-40-1

Observatoire du Sahara et du Sahel

Boulevard du Leader Yasser Arafat - BP 31 - 1080 Tunis, Tunisie - Tél. : (+216) 71 206 633 - Fax : (+216) 71 206 636

E-mail : boc@oss.org.tn - URL : www.oss-online.org