

The Economics of Conflicts and Co-operation in the Middle East and North Africa Region

2th European Conference of the MEEA

C3ED/UVSQ

Saint Quentin en Yvelines, 2-3 June 2003

LE SYSTEME AQUIFERE DU SAHARA SEPTENTRIONAL

"Une conscience de bassin"

Communication du Dr Marc BIED-CHARRETON, Professeur émérite de l'UVSQ, ancien Doyen de la faculté des Sciences économiques, sociales et des Humanités de l'UVSQ

Sommaire

- 1 Qu'est-ce que le Système aquifère du Sahara Septentrional. Problématique du « projet SASS ».
- 2 – Les Objectifs du « projet SASS ».
- 3 – Les Résultats obtenus:
 - 3 -1– L'hydrogéologie et la base de données SASS.
 - 3-2– Le modèle SASS.
 - 3-3 - Le mécanisme de concertation et la coopération entre les pays.
- 4 – Conclusions. La gestion durable du SASS.

1 – Qu'est ce que le Système aquifère du Sahara Septentrional. Problématique du « projet SASS ».

Les pays de la zone Nord et Sud du Sahara ainsi que ceux de la péninsule arabe sont situés sur des grands bassins sédimentaires qui contiennent des réserves d'eau souterraine considérables. Ces réserves ne se reconstituent que très faiblement et on les appelle des « **aquifères** ». En Afrique au Nord de l'Equateur on distingue tout particulièrement les bassins de **Nubie** (Egypte et Libye), du **Tchad** (Tchad et Niger), d'**Iullemeden** (Niger, Mali, Algérie), de **Taoudeni- Tanezrouft** (Mali, Algérie), **Sénégal- Mauritanien** et celui du **Sahara Septentrional**, plus communément appelé « **SASS** », partagé entre l'Algérie, la Tunisie et la Libye (source : Ressources en eau communes de la Région de l'OSS, carte dressée par J.Margat, OSS 1995). (se référer à la carte des bassins et à la carte Michelin)

Le SASS occupe une superficie d'un plus d'un million de km² dans la partie occidentale de l'Afrique du Nord : environ 700 000 km² en Algérie, 80 000 km² en Tunisie et 250 000 km² en Libye. Ce sont des dépôts continentaux dans lesquels on distingue en réalité **deux aquifères** que l'on va appeler, de bas en haut , le « **continental intercalaire** », **CI**, et le « **complexe terminal** », **CT**.

La mise en place de ces réserves d'eau s'est effectué pendant les périodes humides de l'ère quaternaire, il y a plusieurs milliers d'années. Les couches géologiques dans lesquelles se sont constituées ces réserves datent essentiellement de l'ère secondaire (Trias, Jurassique, Crétacé) pour le continental intercalaire et sont plus récentes (Secondaire et Tertiaire) pour le complexe terminal. L'écoulement souterrain complexe se traduit par certaines sources et exutoires naturels (Chotts et sebkhas). Le SASS constitue un énorme réservoir d'eau accumulée dans différentes roches, estimé à 30 000 x 10 *puissance* 9 m³, qui ne se renouvelle pratiquement pas, la recharge annuelle étant estimée à un milliard de m³ par an. Toute cette eau n'est hélas pas utilisable

Il s'agit donc la d'une **ressource naturelle non –renouvelable** dont l'exploitation est de type minière.

Les exutoires naturels sont exploités depuis des temps lointains, ils ont donné naissance à des **oasis** bien connus dans les trois pays concernés.

Depuis plus d'une cinquantaine d'années on a commencé à exploiter cette réserve d'eau souterraine : les prélèvements sont passés de 600 hm³/an en 1970 à environ 2,5 milliards de m³/an dans les années 95-2000 ; ils sont utilisés à des fins agricoles (irrigation), domestiques (eau potable et élevage) et industrielles (exploitation du pétrole, tourisme, divers). Le nombre de points d'eau est supérieur à 7 000 : forages et sources (4000 en Algérie, 2000 en Tunisie, 1000 en Libye).

Dans les trois pays concernés des administrations responsables de l'eau sont en charge de la gestion de cette ressource: ce sont respectivement l'ANRH (Agence Nationale des

Ressources Hydrauliques) en Algérie, la DGRE (Direction Générale des Ressources en Eau) en Tunisie et la GWA (General Water Authority) en Libye. Les utilisateurs sont les agriculteurs traditionnels qui cultivent intensément les oasis, ceux qui pratiquent la céréaliculture irriguées, les éleveurs qui bénéficient de points d'eau ou forages, des maraîchers, les habitants des villes situées dans la zone concernée par le SASS, des industries, notamment les exploitants de pétrole, les touristes. En général l'administration fait les investissements nécessaires à la mise à disposition de l'eau, des systèmes traditionnels ou actuels en assurent la distribution, payante ou non.

La problématique du SASS, c'est à dire la question essentielle qui se pose maintenant, est celle de la meilleure utilisation possible de ce réservoir d'eau dans une optique de durabilité , sachant qu'un certain nombre de problèmes se posent de plus en plus sérieusement :

- à force de pomper dans les deux systèmes le niveau de l'eau baisse régulièrement , donc le coût du pompage augmente ;
- les exutoires naturels s'assèchent (sources, puits artésien), d'où la nécessité de pomper l'eau ;
- on s'est aperçu que pomper en un lieu avait des répercussions importantes sur le reste de cette réserve. En effet, des études hydro-géologiques montrent qu'il y a des échanges internes entre CT et CI, un écoulement naturel et des connexions importantes entre différents points du bassin chaque fois que le niveau varie quelque part.
- l'irrigation des cultures en milieu aride peut avoir des conséquences graves sur la salinisation des sols et rendre ceux-ci improductifs ;
- d'une façon générale le risque de détérioration de la qualité de l'eau et d'accroissement de sa salinisation est grand ;
- à tous ces risques viennent s'ajouter des problèmes locaux de drainage des eaux agricoles, d'épuration des eaux usées et de mélanges des eaux entre nappes phréatiques oasiennes et nappes profondes.
- La gestion de l'eau a toujours été une gestion de l'offre, basée sur un raisonnement uniquement hydraulicien. Aujourd'hui les problèmes de gestion durable et de valorisation économique de cette eau, à court, moyen et long terme , sont à poser de manière concertée entre les trois pays

Les responsables des trois pays ont pris conscience de ces risques à la fin des années 60 , et en 1972 un grand programme algéro-tunisien, l'ERES, a permis de faire une première modélisation de l'exploitation de cet aquifère sur la base des prélèvements dans ces deux pays et de prévisions d'utilisation.

Vingt ans plus tard, l'Observatoire du Sahara et du Sahel organisait au Caire , en 1992, le premier atelier de travail sur les aquifères des grands bassins, suivi d'un autre atelier en 1994, au Caire également, consacré aux impacts économiques et environnementaux de l'exploitation de ces aquifères.

C'est dans le cadre global du programme OSS intitulé « aquifère des grands bassins » que le projet spécifique « SASS » est né après une série de séminaires et d'ateliers régionaux entre 1994 et 1997, appuyés par l'Allemagne, la France, la Suisse, le FIDA et des partenaires comme l'UNESCO, la FAO, l'OACT, l'ACSAD, le CILSS, le CEDARE.

Un document de projet a été adopté lors d'un séminaire organisé à Tunis en septembre 1997 à l'issue duquel l'OSS a été chargé de la maîtrise d'ouvrage du programme et de la recherche de financements.

En 1998 l'OSS a obtenu l'appui de la coopération suisse, du FIDA et de la FAO pour une première phase de trois ans qui a été lancée officiellement en mai 1999 à Rome avec un appui financier de 1 , 473 M€ (FIDA et coopération suisse) et 0,293 M\$ mis en œuvre directement par la FAO.

2 – Les objectifs du projet SASS

Les objectifs du projet SASS ont été ainsi définis :

- **apporter une valeur ajoutée aux modèles précédents**, notamment l'ERES, en intégrant la partie libyenne et en exploitant les données et études qui se sont accumulées en trente ans ;
- faire une évaluation des volumes d'eau exploitables et **mettre au point un modèle mathématique** de gestion en associant en permanence les compétences nationales des trois pays et en tenant compte des politiques nationales ;
- réaliser **une base de données commune aux trois pays** destinée à valoriser l'information et être un outil d'échange ; cette base de données devrait préfigurer un futur « **observatoire du SASS** » ;
- organiser des **séminaires thématiques et de formation regroupant les techniciens des trois pays** travaillant sur un même système, pour la mise à jour des informations et les échanges d'expériences ;
- **actualiser les états de prélèvements** ;
- mettre en place un **mécanisme de concertation** destiné à institutionnaliser le cadre de coopération créé par le programme , rendre durable les programmes d'actualisation des informations, d'échanges et de suivi et concrétiser la « conscience de bassin » qui a progressivement vu le jour à la suite des ateliers entrepris par l'OSS dès les années 90.
- Susciter des réflexions quant à **la durabilité de cette ressource**, à l'optimisation de son exploitation, aux liens avec la lutte contre la désertification, l'amélioration du niveau de vie des habitants et la coopération régionale.

Ce projet a nécessité une coopération de tous les instants entre les trois autorités responsables de l'eau dans les trois pays et la constitution d'une équipe SASS, à Tunis, dont la base a reposé sur un trio composé de spécialistes renommés des trois pays : Djamel Latrech, coordinateur, Ahmed Mamou et Sadek Kadri , appuyé par des consultants chevronnés et des spécialistes des trois pays.

Les objectifs exposés ci-dessus ont été déclinés en « activités » détaillées, portant sur trois composantes : une composante « système d'information », dont les principaux résultats sont exposés dans le paragraphe 3-1 « l'hydrogéologie et la base de données SASS », une composante « modèles de gestion » et une composante « simulations exploratoires », dont les résultats sont exposés dans le paragraphe 3-2 « le modèle SASS » , enfin une composante « mécanisme de concertation », exposée dans le paragraphe 3-3. Une conclusion sur cette première phase et des recommandations sont exposées en paragraphe

3 – Les résultats obtenus

3-1 – L’hydrogéologie et la base de données SASS

3-1-1- L’hydrogéologie

Le projet ERESS (Etude des ressources en eau du Sahara septentrional, 1972), actualisé en 1980, des études algériennes, tunisiennes et libyennes avaient permis d’avoir une vision du SASS à la fin des années 80. **Le projet SASS a permis d’améliorer la connaissance géologique du bassin dans son ensemble et celle des sous-bassins du grand Erg occidental, de l’exutoire tunisien et de la Hamada El Hamra**, grâce à de nouveaux sondages et de nouvelles études hydro- géologiques .

Une étude historique sur 50 ans (1950 – 2000) de la *piézométrie (c’est à dire de la profondeur du plan d’eau mesurée dans des puits ou des forages)*, de la salinité de l’eau et de son exploitation, d’analyses chimiques et isotopiques, et de la *transmissivité (c’est à dire de l’aptitude du sol à être traversé par l’eau)* ont permis cette synthèse.

On a pu ainsi définir avec une grande précision quelles étaient les formations aquifères du SASS par une stratigraphie des couches du bassin : Trias, Jurassique inférieur et moyen, Crétacé inférieur et supérieur, Tertiaire continental, préciser l’extension des aquifères dans ces couches et faire la carte des affleurements des principales formations aquifères .

Des coupes Nord- Sud et Est- Ouest ont mis en évidence les corrélations entre différents points du bassin .

On a pu également définir la **géométrie des principaux aquifères** en précisant l’**épaisseur** des couches remplies d’eau dans les différentes zones , soit la différence entre le « mur », c’est à dire la base de la couche d’eau, et la surface piézométrique, c’est à dire le haut de la couche d’eau ; on a caractérisé les **coefficients d’emmagasinement** (c’est à dire le pourcentage des vides dans la couche) par couche.

On a finalement mis en évidence la géométrie complexe des couches géologiques de ce bassin : il n’y a pas de couches horizontales, mais plissés avec déformation suite au jeu des failles, il y a donc des écoulements internes et des corrélations entre les différents points de l’aquifère.

Un autre résultat est une meilleur connaissance des exutoires et des zones qui alimentent des nappes comme celle de la Djeffara, et des écoulements souterrains.

Le résultat de cette connaissance intime de l’hydrogéologie du bassin est une schématisation des aquifères en vue de la réalisation du modèle mathématique. On a une alternance de couches perméables ayant entre elles des liaisons hydrauliques et qui forment des réservoirs d’eau, d’épaisseur variable, avec des couches moins perméables, que l’on appelle « aquitards ».

Le bassin saharien est une grande entité sédimentaire multicouches. L’adoption d’une représentation de l’ensemble des couches aquifères – aquitards en un système multicouches va permettre de rendre compte des liaisons latérales et verticales qui conditionnent les échanges hydrauliques et chimiques, et donc du comportement de système à moyen et long terme.

On a la séquence suivante dans tout le SASS :

- le substratum imperméable général du système : Trias ou Jurassique argilo-marneux ;
- le réservoir aquifère du CI (continental intercalaire)
- l'imperméable surmontant la nappe du CI : série argilo-marneuse du mésozoïque inférieur ;
- l'aquifère carbonaté dolomitique (Turonien), présent sur l'ensemble du bassin, à épaisseur moyenne de 50 mètres mais à salinité très variable ;
- les séries marno-gypseuses, isolant l'aquifère précédent du complexe terminal (CT) qui est au dessus ;
- le complexe terminal, ensemble peu homogène en Algérie et Tunisie, dans les séries carbonatées du Sénonien et des sables ;
- la nappe des calcaires sénoniens et paléocènes, d'épaisseur et de qualité variables ;
- un semi-perméable qui surmonte la nappe précédente, marnes, argiles et calcaires de l'éocène moyen ;
- une nappe de sables tertiaires importante dans le bas Sahara algéro-tunisien ;
- un toit imperméable constitué de séries argileuses ;
- quelques autres aquifères dans le bassin libyen, d'importance locale.

Un autre problème a consisté à définir les limites nord-sud et est-ouest des différentes couches d'aquifères afin de bien délimiter l'espace de raisonnement du modèle.

On a ensuite précisé l'hydrodynamique du SASS grâce à tous les relevés piézométriques de 8 000 points contrôlés et effectué une carte piézométrique de référence.

Les points d'alimentation actuels ont été précisés.

Les exutoires naturels ont été étudiés dans une optique prospectiviste compte tenu du ralentissement constaté du débit des sources.

La carte des transmissivités de tout le bassin a été établie.

Le projet s'est ensuite attaqué à la question de l'analyse des **prélèvements, par aquifères et par pays**, en faisant une historique des débits. On a pu constater que la multiplication des forages a eu une influence négative sur les débits artésiens et le jaillissement des sources.

On a pu également faire une historique piézométrique dans les trois pays de chaque nappe. On en conclut une baisse piézométrique générale sur l'ensemble du CT et du CI, baisse qui est liée à la multiplication des forages et de plus en plus sensible ; elle est en moyenne de 25 à 50 mètres pour la période de 50 ans.

Le projet a poursuivi les études de qualité chimique des eaux entreprises dans chaque pays, et plus particulièrement de la salinité de l'eau. On a pu constater un accroissement différencié de celle-ci, du essentiellement aux eaux des chotts et au retour à la nappe des eaux de drainage dans les zones où le toit de la nappe est peu épais.

La composition chimique en ions Ca, Mg, Na, K, SO₄, Cl et HCO₃ a été mise en évidence ainsi que son évolution.

Les vitesses de circulation souterraine et les temps de transit ont été étudiés par analyse isotopique (O¹⁸, deutérium). On en a conclu que les eaux du SASS ont été mises en place sur plusieurs dizaines de milliers d'années, lors d'épisodes pluviaux du Quaternaire, de – 150 000 à – 20 000 ans. La zone des chotts algéro-tunisiens étaient alors composée de grandes lagunes

deux à trois fois plus étendues que les chotts actuels. Le climat est devenu plus aride et on a assisté à une vidange lente de ces lagunes et du système aquifère.

Le système aquifère connaît une décompression de plus en plus importante depuis le début du XX^e siècle . De plus, sous l'effet des pressions et des températures l'eau subit des échanges chimiques avec les formations dans lesquelles elle est piégée, compliqués par les échanges verticaux et horizontaux.

Que reste-t-il à faire pour compléter et actualiser cette connaissance de l'hydrogéologie du SASS :

- **améliorer les données** : il y a beaucoup d'**hétérogénéité** dans les mesures piézométriques : manque de connaissance de l'altitude des prélèvements, manque de régularité de collecte des données, adapter les pas de temps;
- préciser la connaissance sur la **géométrie des réservoirs** et **leurs communications**, en particulier dans le Grand Erg occidental et la Jifarah libyenne , vers Biskra et sous le Grand Erg oriental;
- l'alimentation actuelle sporadique est localisée sur les bords du bassin, venant de l'infiltration de pluies exceptionnelles. Cependant aucune mesure fiable n'a été faite et **on ne connaît pas la sensibilité de la recharge sur le modèle** ;
- **harmoniser les analyses chimiques** entre les trois pays et la mesure de la salinité ;
- les **coûts d'exploitation de l'eau**, surtout des pompages, n'ont pas fait l'objet d'études systématiques ;
- le **suivi des prélèvements est à améliorer** : méthodes d'échantillonnage à définir, mesure de consommation d'eau, mesure de superficies irriguées par images satellites .

De manière générale il convient d'acquérir de nouvelles données pour poursuivre l'actualisation des données existantes, donc de constituer un réseau de suivi à l'échelle du bassin.

L'ensemble de ces données est intégré dans une base de données qui est décrite dans le paragraphe 3-1-2 ci-dessous.

3-1-2 La base de données SASS

Les objectifs du projet SASS nécessitent la réalisation d'une base de données spécifique qui d'une part soit capable de reprendre et de reformater les données des trois pays d'une façon homogène et d'autre part recevoir une quantité très importantes de données nouvelles.

Rappelons qu'une base de donnée, élément constitutif d'un système d'information, est une collection structurée de données relatives à un domaine, contenue dans une mémoire d'ordinateur et gérée par un ou des logiciels spécifiques qui permettent la gestion de la base et que l'on appelle « SGBD » (système de gestion de base de données). A partir de ces données on va fabriquer des informations utiles. Une base de donnée est régie par un modèle, généralement relationnel, qui est une représentation de la réalité et des relations potentielles des données entre elles. Dans une BD il y a obligation d'indépendance entre données et traitement, de non redondance, d'intégrité et de cohérence des données.

Le SGBD est l'outil que va manier l'utilisateur afin d'établir des relations entre les données, les combiner, les comparer afin d'obtenir les informations qu'il souhaite. On va donc successivement définir **l'entité de base** sur laquelle on va entrer des données puis les combiner: dans le cas du SASS **l'entité de base la plus importante sera le « point**

d'eau », en général un forage ; définir ces données par des paramètres, leurs unités de mesure, leur origine, leur date d'acquisition, leur localisation, etc... ; puis établir un modèle relationnel entre les données, en essayant de refléter la réalité. Rappelons enfin que le modèle mathématique « SASS », objet du paragraphe suivant 3-2, va fonctionner à partir de toutes les données de la BD.

L'équipe du projet SASS a donc réalisé successivement les phases :

- de **diagnostic de l'existant** dans les trois pays, et des orientations de développement de la base ;
- de **conceptualisation d'un modèle** (MCD, modèle conceptuel des données) pour la base;
- de **réalisation** de la base de données, après avoir choisi le SGBD et ses composantes (matériels, logiciels, périphériques,...) ;
- de **mise en œuvre de la base**, avec l'objectif de réaliser cette mise en œuvre simultanément au siège du projet et dans chaque administration responsable de l'eau dans chacun des trois pays.

On mesure la difficulté de la tâche quand on connaît les problèmes d'hétérogénéité des données, dans le temps et dans l'espace, d'habitude de manipulation de tel ou tel système pré-existant dans chacun des trois pays, et de la difficulté d'appivoiser un nouveau système.

Des choix techniques ont été faits, en tenant compte du format et de l'entrée des données dans le modèle numérique, des tendances technologiques du moment, de l'existant au sein des trois pays et de la simplicité de mise en œuvre et de la maîtrise par les équipes nationales.

Compte tenu de la puissance croissante des SGBD de bureautique le choix s'est porté sur **ACCESS version 2000** qui permet de manipuler jusqu'à 2 Go, en réseau et en intranet, une bonne sécurisation, un accès multi-utilisateur et la possibilité de évoluer vers des systèmes plus lourds comme **SQL/SERVER**, envisagée par la DGRE et l'ANRH.

Compte tenu de l'importance de la localisation des 8 000 entités de base (les points d'eau) et des traitements géographiques à effectuer, et des sorties cartographiques nécessaires, le SI est complété par un **SIG** (système d'information géographique), le choix s'étant porté sur **ARCVIEW** pour sa simplicité, sa puissance, sa compatibilité avec ACCESS et son usage déjà courant en gestion de l'eau. De plus il permet d'écrire des utilisateurs spécifiques d'entrée dans le modèle. On a acquis aussi les extensions **SPATIAL ANALYST** et **IMAGE ANALYST** pour faire des interpolations entre les points, des cartes d'isovaleurs, la numérisation et le traitement de cartes scannées.

Le tableau suivant donne la liste des entités constituant le SI, avec la première d'entre elle, le point d'eau.

Le modèle conceptuel des données a été élaboré dans le respect du principe de séparation de la structure des données et des traitements subies par celles-ci. On a considéré :

- qu'un point d'eau peut capter un ou plusieurs aquifères ;
- qu'un point d'eau à une date donnée fournit un certain débit ;
- qu'un point d'eau peut servir plusieurs utilisateurs ;

- qu'un usager peut être alimenté par plusieurs points d'eau ;
- qu'un point d'eau possède un numéro de maille dans un maillage donné.

On voit que sur un point d'eau on entre de nombreux paramètres comme la climatologie, l'appartenance à un bassin versant, la topographie, la géologie (couches lithologique, stratigraphie, étage, etc...) la piézométrie, les prélèvements, les utilisateurs, la chimie, avec , bien sur , la date d'entrée des données et le lieu précis du point d'eau (coordonnées, entité administrative), l'historique de l'exploitation.

Le SI ainsi constitué permet un certain nombre d'opérations : des **requêtes statistiques** (comme nombre de points d'eau par wilaya et par aquifère, année par année, prélèvements, variation de la piézométrie,...), des **graphiques** (comme l'évolution des prélèvements par aquifère et par année , des **transferts de données**, **l'introduction de nouvelles données** , des vérifications, des tests de cohérence, des **connections BD-SIG et des cartes**.

L'ensemble de ces outils a été appelé « **SAGESSE** », **système d'aide à la gestion des eaux du Sahara Septentrional**. SAGESSE comporte tous les éléments de base pour constituer le tableau de bord du suivi et de l'exploitation des eaux du bassin. On verra plus loin que la liaison de SAGESSE avec le modèle SASS permettra , par des simulations appropriées, des prévisions et des prospectives de gestion durable des eaux, but ultime du programme SASS. La structure de SAGESSE est décrite par le schéma suivant :

En conclusion , on dispose maintenant d'un outil de gestion de très bonne qualité pour chacun des trois pays et fonctionnel dans chaque administration. Les matériels et les logiciels nécessaires à son utilisation ont été acquis et installés dans chaque pays, les personnels formés.

Il y a lieu encore de le perfectionner. En effet, un certain nombre de forages sont encore sans identifiant et sans coordonnées, la répartition spatiale et temporelle des données n'est pas homogène, les prélèvements ne sont pas bien maîtrisés. En outre, un nombre limité de forages ne sont pas répertoriés et entrés dans la base. Une liste de tâches spécifiques à chaque pays a été constitué, à charge pour chaque administration de les réaliser.

3 – 2 Le modèle SASS

La gestion prévisionnelle de l'eau suppose que l'on dispose d'un **modèle mathématique**, qui permet de simuler le comportement hydrodynamique des aquifères, d'entrer des hypothèses , de faire des simulations et d'obtenir en sortie des résultats. Le modèle SASS a été élaboré en trois phases : une première phase a permis de caractériser le système aquifère, en bénéficiant des acquis des études hydrogéologiques décrites en paragraphe 3-1, une seconde phase a consisté en l'élaboration du modèle mathématique, avec les étapes de sa construction et de son calage ; une troisième phase a été dédiée à la réalisation de simulations prévisionnelles selon diverses hypothèses en utilisant les données de la BD avec le SAGESSE.

Le modèle est une représentation simplifiée du milieu : le modèle SASS va partir du système multicouches décrit en 3-1, puis établir une répartition spatiale des niveaux piézométriques à une date donnée, des transmissivités, des cotes du toit et du substratum, des zones d'apports et de drainage avec une estimation préliminaire des échanges de flux, des échanges potentiels de flux entre couches adjacentes. Ensuite, pour chaque couche perméable on identifie, on analyse et on met en forme les séries historiques de prélèvements, de niveaux, de salinité ; on établit la répartition spatiale des coefficients d'emménagement. Après la représentation multicouches on a défini la structure générale du SASS en trois bassins :

- le **bassin occidental**, dominé par le grand erg occidental et le secteur des foggaras ;
- le **bassin central**, plus étendu en superficie et en profondeur, dont les couches sont partagées par les trois pays ;
- le **bassin oriental, principalement étendu en Libye avec des influences sur les deux autres pays.**

On tient ensuite compte de tous les paramètres décrits dans les paragraphes précédents pour les caractérisations hydrologiques et hydrodynamiques. Après une première phase d'ajustement, la structure du modèle dans le sud tunisien a été révisée et on a abouti à un nouveau schéma structural du modèle décrit dans le schéma ci-dessous :

La grille du modèle décrit un **maillage carré de 12,5 km x 12,5 km**, soit un total de 16 523 mailles, représentant une superficie développée de près de 2 580 000 km². Le modèle SASS est un modèle quasi- tridimensionnel fondé sur l'hypothèse du multicouche : **écoulement parallèle aux couches dans les aquifères et perpendiculaire aux couches dans les aquitards.**

Le logiciel retenu, devant être porté sur PC dans les trois pays, est **PMWIN dans sa version PM5**. Un programme d'interfaçage entre la base de données et PM5 a été développé. Les limites du CI et du CT, étant les limites du raisonnement du modèle, ont été définies.

On a ensuite procédé au **calage du modèle**, en définissant un état de référence. L'état de référence pour le calage d'un modèle doit refléter un **régime permanent du système**. L'année **1950 a été assimilée à un état permanent qui servira de référence pour le calage en régime permanent**. On a donc reconstitué les variables d'état du système (cartes piézométriques, valeurs ponctuelles observées, débits) ; quelques modifications ont été effectuées et on a effectué un bilan en eau du SASS, calculé pour 1950.

Après cette phase on a effectué un **calage du modèle en régime transitoire**, où l'on s'assure de la répartition spatiale des coefficients d'emménagement. La distribution des différences de niveau piézométrique [calculé – observé] constitue un bon indicateur de « *fidélité régionalisée* » du modèle par rapport à la réalité du terrain : 70% de la superficie d'aquifère, aussi bien du CI que du CT présentent des écarts inférieurs à 25 m. La superposition des courbes isopiézométriques calculées et observées permet d'avoir une idée de la capacité du modèle à épouser les formes des courbes résultant des mesures et donc le point de vue de l'hydrogéologue.

Le modèle a pu sortir des **cartes de rabattements 1950 – 2000** pour le CI et le CT, c'est à dire des **cartes représentant la baisse du niveau de ces deux aquifères**. Il a aussi sorti un bilan du SASS en 1950 et en 2000 .

Ce bilan montre que la somme des recharges du système représente 33% des prélèvements des forages, le prélèvement sur les réserves représentant 66% des prélèvements des forages.

On voit aussi que le débit de l'exutoire tunisien diminue d'environ 50% ; on note également une forte diminution des sorties du CT vers les chotts et les sebkas : 2m³/sec en 2000 contre 8 en 1950 ; cette évolution est présumée très dangereuse pour la région des chotts. Elle dénote une baisse sensible de l'alimentation latérale de la Djeffara en Tunisie (exutoire tunisien) et les risques de l'inversion de l'écoulement de la nappe des chotts vers celle du CT.

L'étape suivante a été celle des simulations prévisionnelles

On a d'abord défini des simulations exploratoires pour évaluer la capacité du modèle à réaliser des **simulations sur une base purement hydraulique**, les données socio-économiques étant peu pris en compte à ce stade. Pour cela, on a :

- précisé des scénarios , ou des plans de développement, par rapport à l'an 2000, en terme de prélèvements additionnels spatialement distribués et d'échéancier de réalisation . Chaque plan fait l'objet d'une simulation ;
- défini les conditions de calcul, l'état initial, les paramètres d'entrée, les conditions aux limites ;
- analysé les résultats des simulations .

La durée de simulation adoptée est de **cinquante ans** , l'état initial du système étant celui de l'an 2000, reconstitué par le modèle.

On simule un débit constant sur toute la durée du calcul, ce débit représentant le débit maximum envisagé. Chaque scénarios est défini par un débit maximum. Pour chaque scénarios on sort les résultats suivants :

- carte des rabattements 2000 – 2050 ;
- courbes des rabattements pour cette période ;
- principaux termes du bilan 2050, notamment débit calculé aux trois principaux exutoires ;
- évaluation, en termes de rabattement, de l'impact du scénarios sur chacun des pays voisins ;
- carte des profondeurs du niveau piézométrique 2050 par rapport au sol ;
- carte des profondeurs de ce niveau sous les chotts algéro-tunisiens, définition de l'intensité du risque de salinisation.

On a défini un **scénarios de référence**, qui consiste en le maintien de l'actuel, ou **simulation zéro**, quelque fois nommé « business as usual ». Il consiste à maintenir constant les prélèvements effectués en 2000 et à calculer l'évolution correspondante cinquante ans plus tard.

On a ensuite défini plusieurs scénarios :

En Algérie, deux scénarios :

- une hypothèse dite **forte** , **représentant un prélèvement additionnel de 101 m³/s**, qui porterait les prélèvements algériens de 42 à 143 m³/s de 2000 à 2030 ;
- une hypothèse dite **faible, pour un prélèvement additionnel de 62 m³/s**, ce qui porterait les prélèvements de 42 à 104 m³/s .

En Tunisie le scénario envisagé prévoit que les économies réalisées par l'amélioration de l'efficacité de l'irrigation vont compenser la demande additionnelle des nouveaux périmètres irrigués ; cela correspond au scénario « business as usual »

En Libye les simulations exploratoires concernent deux programmes : le champ de pompage de Ghadames-Derj, avec un débit additionnel de 90 Mm³/an, et le champ captant de Djebel Hassaounah.

Les résultats sont les suivants :

Scénario zéro :

- **pour le CI :** le scénario zéro entraînera d'importants rabattements , supérieurs à **40 mètres** dans le bas Sahara algérien ; en Tunisie ils seront de l'ordre de 20m, parfois 25 et 40 autour du Chott Fedjej ; en Libye les rabattements seront de l'ordre de 25m.
- **pour le CT :** ce scénario donne les résultats suivants : en Algérie des rabattements dépassant 30m et 60m autour des chotts ; en Tunisie 20 à 30m, en Libye un maximum de 60m.
- On constatera aussi la disparition totale de tout artésianisme dans la région des chotts algéro-tunisiens. On montre enfin que l'on risque une réalimentation de la nappe du CT par les eaux des chotts, et donc de contamination par les sels.

De ce point de vue, la poursuite du rythme actuel constitue donc un danger potentiel majeur.

Scénario « hypothèse forte » :

Au CI les rabattements seront de **300 à 400m** dans le bas Sahara algérien, avec disparition totale de l'artésianisme ; la Libye n'est pas touchée par ce scénario, pour la Tunisie on constatera des rabattements de **200 à 300m** et la disparition de l'artésianisme et des exutoires tunisiens.

Au CT, pas d'incidence en Libye, d'importants rabattements en Algérie, les chotts seront en position de réalimentation de la nappe.

Scénario « hypothèse faible » :

Au CI les rabattements sont également importants (250m) , l'artésianisme disparaît de tout le bas Sahara, les profondeurs de forage y sont de 100 m, l'exutoire tunisien est tari.

Au CT les rabattements sont élevés et les chotts sont en position de réalimentation potentielle. En Libye les rabattements sont négligeables, au CI ils sont de l'ordre de 50m.

Ces simulations exploratoires ont mis en évidence des nuisances et des risques auxquels est exposée la ressource en eau. Pour continuer l'exploitation des nappes du CI et du CT il va falloir minimiser et gérer ces risques, que l'on peut synthétiser en

- disparition de l'artésianisme
- hauteurs de pompage excessives et trop onéreuses

- tarissement de l'exutoire tunisien
- interférences exagérées des rabattements entre pays
- ré alimentation potentielle par les Chotts.

Ces simulations ont montré les limites de l'approche de simulations pures dans la perspective de recherche de plans de gestion durable du SASS.

On a donc rechercher une autre façon de procéder à la définition de solutions acceptables pour tous, en, définissant un **modèle miniature, ou micro modèle**.

Son principe est le suivant : on applique dans une maille « i » un prélèvement égal à l'unité de débit et maintenu constant pendant toute la durée de la simulation, et on calcule le rabattement dans chacune des mailles du modèle ; on répète ce calcul pour toutes les mailles et on aboutit à une matrice d'influence à n^2 si n est le nombre total des mailles du modèle. On obtient une formule qui définit le rabattement provoqué en j par un pompage en i. En fait on limite le calcul aux mailles qui seront amenées un jour à servir à des pompages. On s'affranchit ainsi de scénarios de développement à priori sans relations directes avec les propriétés de l'aquifère, fondés uniquement sur des prédictions a priori de prélèvements , pour bâtir des scénarios sur une base « **hydraulique** » , c'est à dire fondés sur les capacités de production de SASS en minimisant les nuisances . On a été amené à définir tous les sites de pompage potentiel, soit 89 sites (55 au CI et 34 au CT). Chaque site a fait l'objet d'une simulation unitaire calculant, sur 50 ans, la fonction de rabattement. On a du construire un convertisseur débits- rabattements qui permet à l'utilisateur de disposer, sur le même écran, des données et des résultats ; cela a en outre été facilité par la décomposition de l'espace d'étude en micro- modèles par pays et par nappes, avec des puits témoins transfrontaliers.

Le résultat des simulations réalisées sur le micro- modèle a permis de prévoir un certain nombre de scénarios qui répondent aux objectifs de développement tout en minimisant les risques de dégradation. Ces scénarios ont été ensuite simulés sur le modèle numérique et donnent des résultats plus complets, qui permettent de préciser les contraintes. Les indicateurs de sortie sont : les rabattements nets ; les interférences en rabattements ; le débit des exutoires ; l'artésianisme pour le CI et la position des niveaux par rapport aux chotts pour le CT ; le bilan en eau en 2050. Huit simulations ont été faites sur le CI et cinq sur le CT, le nombre des simulations étant déterminé par des zones géographiques : bas Sahara algérien, Tunisie, bassin de Ghadames, ensemble du CI sur le bassin central, Grand Erg Occidental ; ensemble du CI. Les résultats détaillés et globaux donnent des informations beaucoup plus affinées que ceux des simulations exploratoires et nettement moins pessimistes.

Les premières conclusions sont les suivantes : *il existe une possibilité de porter l'exploitation des forages du SASS, estimée à 2,2 Milliards de m³ en 2000 (1,33 en Algérie, 0,55 en Tunisie, 0,34 en Libye) jusqu'au niveau de 7,8 Milliards de m³ par an à l'horizon 2030 en respectant au mieux l'ensemble des contraintes relatives au risque de dégradation de la ressource.* Par pays cela donne 6,1 Milliards de m³/an en Algérie, 0,72 en Tunisie et 0,95 en Libye. La possibilité de tripler les prélèvements actuels ferait passer le régime d'exploitation du SASS à un niveau représentant huit fois ses ressources renouvelables ; il faudra donc puiser sur les réserves du système plus qu'avant.

Cette situation n'est réalisable qu'en acceptant de transférer l'essentiel des prélèvements additionnels vers de nouvelles zones de développement éloignées des

agglomérations et oasis actuels, principalement dans le bassin du Grand Erg Occidental, en Algérie.

Comme on peut le voir l' exploitation combinée des connaissances hydrogéologiques et de l'utilisation d'un modèle permet d'apporter des conclusions réalistes et mieux éclairées sur les capacités du SASS à fournir des quantités d'eau appréciables en minimisant les risques sur l'environnement. Il montre qu'il convient **de planifier conjointement** l'utilisation de cette ressource.

C'est dans le but de préparer cette utilisation conjointe qu'a été développé un « **mécanisme de concertation** » décrit dans le paragraphe 3-3 ci-dessous.

2 – 3 – Le mécanisme de concertation

Comme on l'a vu précédemment la base de données commune a été établie par les apports de chaque pays, puis le système SAGESSE a été installé dans chaque pays, le modèle a fonctionné sous la responsabilité de l'équipe projet avec la participation des personnels compétents de chaque pays. Une coopération très étroite s'est donc instaurée entre techniciens et responsables de services.

Par ailleurs, chacun des trois pays a rédigé un rapport national qui fait état des préoccupations et des projets en matière d'utilisation du SASS.

Les simulations réalisées ont mis en évidence trois zones où les ressources partagées étaient les plus vulnérables, dénommées « **périmètres prioritaires d'observation** » :
Le Bassin de Ghadames dans le CI ; le bassin du Grand Erg Oriental débouchant sur l'exutoire tunisien dans le CI ; le bassin des chotts pour le CT.

Les habitudes prises de travail en commun et la mise en évidence de risques partagés ont conduit le programme SASS à proposer d'aller encore plus loin dans la coopération et la concertation en mettant au point un « mécanisme de concertation » avec l'appui d'un programme technique de terrain de la FAO conduit par son service juridique. Chaque pays a donc fait une requête à la FAO, avec l'appui de l'OSS ; un protocole d'agrément a été signé entre FAO, pays et OSS, dont l'objectif général était de rechercher un management commun approprié dans l'optique d'une gestion durable de la ressource en eau du SASS , et notamment du maintien d'une agriculture traditionnelle et des oasis.

Le mécanisme de concertation que l'on cherche à mettre en place aura les missions suivantes :

- mettre en place un réseau permanent commun d'observation, qui pourrait s'appeler « réseau d'observation du SASS », ou **ROSASS** ;
- d'actualiser les données de la base de données mise au point en première phase par des collectes régulières, prenant en compte les défauts observés lors de la constitution initiale de la BD ;
- d'effectuer régulièrement des simulations avec le modèle mathématique SASS ;
- de renforcer les capacités nationales, notamment par la formation ;
- de conduire des réunions régulières de concertation entre les pays.

Pour proposer un tel mécanisme de concertation il y a eu de nombreuses missions dans chaque pays, deux réunions de l'équipe SASS à Rome en 2002, des séminaires nationaux dans chaque pays et un séminaire régional en décembre 2002.

Le résultat est un projet d'arrangement tripartite entre les trois pays, proposé aux autorités politiques.

Les détails ci-dessous donnent une indication sur la nécessité de cette concertation, qui s'est imposée au fil des années du projet, et qui peut confier à une entité de type ROSASS les missions décrites plus haut, avec les avantages suivants :

- bénéficier d'une expertise confirmée et disponible ;
- bénéficier d'une grande capacité à absorber , adapter et transférer tous les progrès techniques ;
- bénéficier d'une grande souplesse de fonctionnement, à faible coût ;
- pouvoir mobiliser les cadres nationaux, les encadrer, les former ;
- faire travailler en réseau les trois pays ;
- agir ensemble au plan international .

Cette entité serait ainsi à même de gérer les outils développés en phase 1 du programme SASS, de poursuivre la mise en place des réseaux d'observation et de valider les données acquises puis de les insérer dans la BD, de coordonner toutes acquisitions nouvelles et d'harmoniser la mise à jour conjointe de la BD tant au siège de l'entité que dans chaque pays.

D'autre part de nouveaux besoins sont apparus à l'issue de cette première phase et ils pourraient faire l'objet de missions spécifiques nouvelles :

- des études techniques et scientifiques , pouvant par ailleurs bénéficier des technologies nouvelles, sont à conduire pour en faire bénéficier les pays ;
- les matériels et les logiciels informatiques évoluent vite, de même que les outils mathématiques ; l'entité devra donc avoir une mission de veille technologique ;
- **enfin et surtout compléter la base de données et le modèle avec des données d'ordre socio- économique** : en effet, jusqu'à présent on a accentué les efforts d'observation sur le potentiel hydraulique et le modèle mathématique est un modèle essentiellement hydraulique. Or il apparaît qu'il convient maintenant d'identifier avec beaucoup de précision les agents économiques et leurs logiques, les pratiques locales de distribution de l'eau, les coûts de production, largement liés au coût de l'eau et du pompage, la valorisation actuelle et d'autres valorisation futures de l'eau.

Divers scénarios d'utilisation de l'eau en fonction de ces paramètres socio-économiques viendraient ainsi compléter les simulations effectuées en première phase et participer à la définition de plans de gestion durable du SASS.

Il est encore trop tôt pour définir en terme précis la nature juridique de cette entité « ROSASS » ; il lui faudrait une autonomie sur les plans scientifiques, techniques et financiers. Si l'on veut éviter de constituer une nouvelle institution il a été proposé de confier sous contrat la mission de ROSASS à trois institutions scientifiques (ou universitaires) déjà existantes dans chaque pays, travaillant en réseau, liés par contrat et coordonnés par un Chef de file. Ce réseau serait coordonné par un comité de pilotage. Les administrations chargés des ressources en eau dans les trois pays considèrent que cette activité s'intègre dans leurs attributions et ne peut pas être confiée à une autre partie qui n'est pas responsable de l'affectation des ressources et de leur planification.

La nécessité et les bases d'un mécanisme de concertation ont été reconnus à l'issue de la phase 1 du programme, des propositions faites. Il appartient aux responsables de l'OSS et aux autorités des trois pays de décider de sa mise en place.

Il a par ailleurs été noté que la méthodologie de concertation utilisée tout au long de cette première phase pourrait être analysée en tant que telle et comparée aux autres mécanismes de concertation concernant les ressources partagées, comme celles des grands fleuves, Nil et Niger, qui connaissent des fortunes diverses.

Suite aux ateliers ayant discuté cet aspect propre au mécanisme de concertation, l'accent a été mis sur l'aspect du suivi technique de l'exploitation et ses impacts. Il a été souligné que cet aspect est un acquis du SASS qu'il y a lieu de préserver et de développer en attendant d'aboutir à mieux formuler la concertation relative à la planification de l'utilisation des ressources.

3 – Conclusions.

Le projet SASS a rempli les objectifs qui lui été assignés : il a livré à ses partenaires, et en pleine coopération avec eux, une base de données opérationnelle et un modèle mathématique, donc des outils de gestion durable de la ressource en eau de l'aquifère. Les résultats tangibles sur le fond sont les suivants :

On montre, grâce à la connaissance approfondie de l'hydrogéologie du SASS, la constitution de la base de données opérationnelles à partir de l'existant et de nouvelles données, la fabrication du modèle mathématique et la réalisation de simulations selon des hypothèses très diverses :

- **que la simple poursuite des rythmes de prélèvements actuels constituait un danger potentiel majeur pour l'environnement et la nappe.**
- **que les résultats des simulations basées sur des hypothèses fortes aboutissaient à une aggravation de ces risques ;**
- **que l'utilisation de micro modèles a mis en évidence qu'il existait une possibilité de tripler les prélèvements actuels (passer de 2,2 Milliards de m³/s en 2000 à 7,8 Milliards en 2030) ; cela représente huit fois les ressources renouvelables (estimées à 1 Milliards de m³ /an) et donc à un prélèvement important sur les réserves. D'où la nécessité de bien prévoir les rabattements , les conséquences sur l'environnement et sur les coûts de pompage .**

La première phase du programme SASS de l'OSS s'achève fin 2002, dans le strict respect des délais et des financements du programme.

La quatrième et dernière réunion de son comité de pilotage, qui s'est tenue à Tunis les 30 et 31 octobre 2002, a tenu à saluer les résultats obtenus , exposés dans les paragraphes qui précèdent, et qui ont obtenu l'aval des responsables politiques de l'eau de chacun des trois pays.

Des problèmes importants ont été soulevés et ouvrent des perspectives futures.

Il a été principalement recommandé lors de cette réunion :

- de poursuivre avec plus de détails l'analyse de trois régions : la Djefara tunisienne, les chotts algéro-tunisien et le Grand erg occidental ;
- de poursuivre et de renforcer la base de données comme il l'a été indiqué dans le paragraphe précédent ;
- d'approfondir l'étude des impacts sur l'environnement d'un accroissement de l'utilisation de l'eau du SASS, compte tenu des résultats annoncés en sortie des simulations et compte tenu des risques sur l'environnement de certaines utilisations de l'eau (irrigation, drainage des eaux usées,...) ;
- d'améliorer les modèles locaux (les micro modèles du modèle mathématique) et de compléter les connaissances sur certaines zones du SASS ; notamment d'introduire dans la BD des données de forages non contrôlés que l'on pourrait observer par utilisation des images satellitales ;
- de mieux utiliser les isotopes par des techniques nucléaires à usage pacifique afin d'approfondir les connaissances sur la dynamique des eaux du SASS ;
- de mettre l'accent sur les aspects socio-économiques, l'idée étant de passer d'une gestion de l'eau par l'offre, comme c'est le cas maintenant, à une gestion par la demande. Cela nécessite, entre autres, l'utilisation de modèles économiques.
- De poursuivre la réflexion sur le mécanisme de concertation et de continuer d'avancer « en marchant » afin de ne pas stopper la dynamique créée et les rapports confiants qui ont été établis, y compris au niveau des ministres responsables de l'eau des trois pays.

Différents partenaires de développement ont d'ores et déjà manifesté leur intention de participer à une deuxième phase dont les objectifs seraient grosso modo ceux décrits plus haut : la coopération suisse (400 000 €), le Fonds pour l'Environnement Mondial, GEF (600 000 US \$), le Fonds français pour l'environnement mondial (300 000 €), l'Agence internationale pour l'énergie atomique, AIEA (700 000 US \$), le GTZ (dont 50 000 € pour la publication des rapports SASS).

En conclusion, la première phase du SASS apporte une perspective objective et plutôt optimiste de l'exploitation de l'eau pour peu que l'on prenne en compte de façon concertée les observations et les résultats issus du modèle et que l'on introduise maintenant les facteurs socio-économiques.

