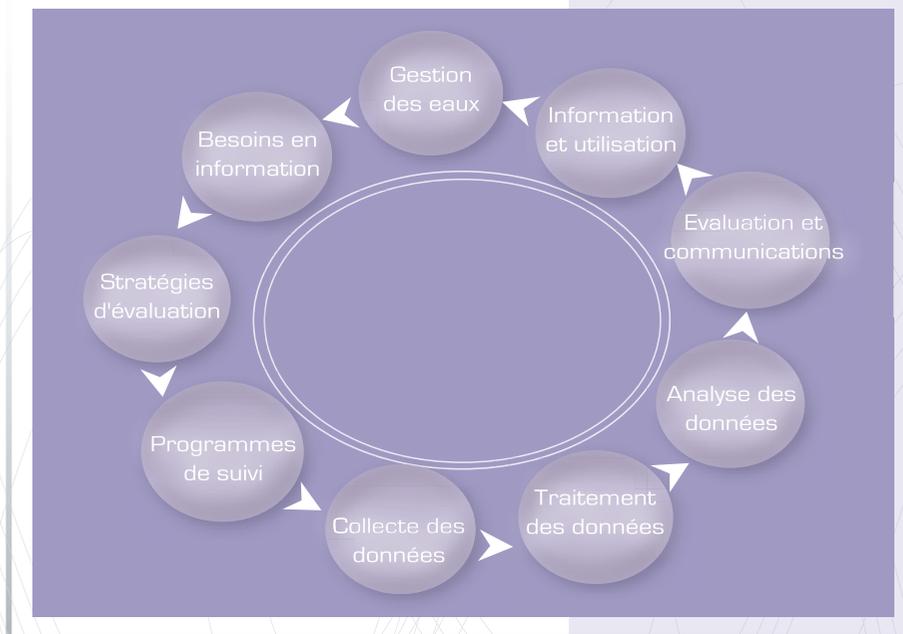


# Systeme Aquifere d'Iullemeden

Mali - Niger - Nigeria

Tome V

## SUIVI-ÉVALUATION DES AQUIFÈRES TRANSFRONTALIERS



OSS OBSERVATOIRE DU SAHARA ET DU SAHEL



# Systeme Aquifere d'Iullemeden

Mali - Niger - Nigeria

Tome V

## **SUIVI ET EVALUATION**

---

## **DES AQUIFERES TRANSFRONTALIERS**

Guide methodologique

Tunis, 2011

## Autres ouvrages (SAI)

Tome I : Analyse diagnostique transfrontalière

Tome II : Base de données commune

Tome III : Modèle hydrogéologique

Tome IV : Gestion participative des risques transfrontaliers : éléments stratégiques

Copyright © Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS), 2011

Edité à Tunis avec le soutien financier de l'Unesco/PHI et de la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

ISBN : 978-9973-856-45-6

# Remerciements

Ce document a été relu et édité sous la supervision de M. Chedli FEZZANI, Secrétaire exécutif de l'Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS). Il émane du travail conséquent mené de janvier 2004 à juin 2009, en partenariat avec le Mali, le Niger et le Nigeria, sous la coordination scientifique et technique de l'équipe du projet « Système aquifère d'Iullemeden » basée à l'OSS, composée de M. Abdel Kader Dodo, Coordinateur régional du projet ; M. Mohamedou Ould Baba Sy, expert en Base de données, SIG et modélisation hydrogéologique, Ahmed Mamou, conseiller scientifique et Wafa Jouini, assistante du Programme Eau de l'OSS.

Ce travail est l'aboutissement de leurs efforts conjugués à ceux des experts des trois pays concernés à travers notamment leur participation aux sessions de formation en base de données, SIG et Modèle mathématique animé par Mohamedou Ould Baba Sy.

A cette œuvre, ont contribué des personnalités à qui nous exprimons notre profonde gratitude. Il s'agit tout particulièrement de :

## MALI

- /// M. Sidi TOURE, Direction nationale hydraulique Bamako (DNH)
- /// M. Séidou Maiga, Hydrogéologue, point focal national, DNH
- /// M. Bessama MAIGA, Direction régionale de l'hydraulique, Kidal
- /// M. Luc Diakité, Ingénieur hydrogéologue, DNH
- /// Pr Amadou Zanga TRAORE, Ecole nationale d'ingénieurs de Bamako
- /// D. Adama MARIKO, Ecole nationale d'ingénieurs et Université de Bamako

## NIGER

- /// M. Radji GARBA, Directeur des ressources en eau, ministère de l'Hydraulique (MH)
- /// Sanoussi RABE, Hydrogéologue, Directeur des ressources en eau (DRE)
- /// M. Moussa AMADOU, DG/GR, ministère du Développement Agricole
- /// M. Bako Mamane Hydraulicien informaticien, SIGNER, DRE
- /// M. Atahirou KARBO, FEM/ABN, DRE
- /// Dr Nazoumou YAHAYA, Département de géologie, Faculté des sciences, Université Abdou Moumouni de Niamey
- /// M. Issa ADA, PGIE/CMNNC, Commission mixte nigéro-nigériane de coopération, Niamey.

## NIGERIA

- /// Mr. John Chabo, National focal, Executive Director of Nigeria Hydrological Services Agency (NHSA), Federal Ministry of Agriculture and Water Resources, Abuja
- /// Mr. Patrick OBURO, Assistant Director, Hydrogeologist/Geophysicist, NHSA, Federal Ministry of Agriculture and Water Resources, Abuja
- /// Mr. Eluma G.M. Geologist/Environmentalist, NHISA, Federal Ministry of Agriculture and Water Resources Abuja
- /// Mr. Stephan Margima Jabo, Hydrogeologist, NHISA, Federal Ministry of Agriculture and Water Resources, Abuja
- /// Mr. Ibrahim A. Maliki, Hydrologist, Sokoto-Rima River Basin Development Authority.

Nous exprimons toute notre profonde gratitude à nos Partenaires de coopération pour leur soutien financier, scientifique et technique :

- /// Takehiro Nakamura, PNUE/GEF
- /// Alice Aureli, Unesco

Nous remercions également l'Unesco/PHI et la GIZ pour leur soutien financier à l'édition de ce document, ainsi que la France, la Suisse, la FAE/BAD et l'ABN pour leur soutien constant au programme Eau de l'OSS.

Nous sommes aussi redevable à Mme Tharouet Elamri qui a assuré la conception de la maquette et la mise en forme finale de ce document sans oublier l'équipe administrative et financière qui n'a ménagé aucun effort pour la bonne mise en œuvre de toutes les activités de ce projet.

Le Coordinateur du Programme Eau

Abdelkader Dodo



Le Secrétariat exécutif

Dr Chedli Fezzani



# Table des matières

---

<b>PRÉFACE</b>	<b>9</b>
<b>I. PROBLEMATIQUE DE LA DEFINITION D'UN RESEAU DE SUIVI DES RESSOURCES EN EAU DU SAI</b>	<b>11</b>
I.1. Rappel sur le Système aquifère d'Iullemeden	11
I.2. Etat des connaissances sur les réseaux de suivi dans les pays du SAI	11
I.3. Conclusion	16
<b>II. CYCLE DU SUIVI ET D'EVALUATION DES AQUIFERES TRANSFRONTALIERS</b>	<b>17</b>
II.1. Rappel introductif	17
II.2. Méthodologie	20
<b>III. CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS</b>	<b>39</b>



# LISTE DES ACRONYMES ET DES ABREVIATIONS

---

<b>ADT</b>	Analyse diagnostique transfrontalière
<b>AEP</b>	Alimentation en eau potable
<b>AGRHYMET</b>	AGRONomie - HYdrologie - METéorologie du CILSS
<b>AIEA</b>	Agence internationale de l'énergie atomique
<b>BDD</b>	Base de données
<b>CDI</b>	Centre de documentation et d'informatique (du Mali)
<b>CI</b>	Continental intercalaire
<b>CT</b>	Continental terminal
<b>DIEPA</b>	Décennie internationale de l'eau potable et de l'assainissement
<b>DNH</b>	Direction nationale de l'hydraulique (Mali)
<b>DRE</b>	Direction des ressources en eau (Niger)
<b>DRHE</b>	Direction régionale de l'hydraulique et de l'énergie (Mali)
<b>DWC</b>	Digital Word Chart
<b>ESRI</b>	Environmental Science Research Institute
<b>GEF</b>	Global Environmental Facility
<b>GTOPO30</b>	Modèle numérique de terrain pour le Globe développé par USGS.
<b>IGN</b>	Institut géographique national
<b>IRH</b>	Inventaire des ressources hydrauliques (service rattaché aux DRE)
<b>MCBD</b>	Modèle conceptuel de la Base de données commune
<b>MCD</b>	Modèle conceptuel de données
<b>MNT</b>	Modèle numérique de terrain
<b>NGM</b>	Niveau général des mers
<b>NP</b>	Niveau piézométrique
<b>NS</b>	Niveau statique
<b>OAD</b>	Outil d'aide à la décision
<b>ODBC</b>	Open Database Connectivity
<b>OSS</b>	Observatoire du Sahara et du Sahel
<b>PAC</b>	Programme d'action communautaire
<b>PM5</b>	Processing Modflow version 5
<b>PNUD</b>	Programme des Nations unies pour le développement
<b>PNUE</b>	Programme des Nations unies pour l'environnement
<b>SAD</b>	Système d'aide à la décision
<b>SAI</b>	Système aquifère de l'ullemeden
<b>SAP</b>	Strategic Action Programme (Programme d'action stratégique)
<b>SASS</b>	Système aquifère du Sahara Septentrional
<b>SGBD</b>	Système de gestion de base de données
<b>SGBDR</b>	Système de base de données relationnelle (DBMS en anglais)

<b>SI</b>	Systeme d'information
<b>SIG</b>	Systeme d'information géographique
<b>SIGMA</b>	Systeme d'information géographique du Mali (= Base de données)
<b>SIGNER</b>	Systeme d'information géographique du Niger
<b>SISAI</b>	Systeme d'information géographique du SAI
<b>SRP</b>	Stratégie de réduction de la pauvreté
<b>SRTM</b>	Shuttle Radar Topography Mission
<b>UNESCO</b>	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

# PRÉFACE

---

Dans le cadre du projet initié par l'OSS et intitulé « Gestion des risques hydrogéologiques dans le Système aquifère d'Iullemeden (SAI) » partagé par le Mali, le Niger et le Nigeria, ces pays conjuguent leurs efforts pour identifier, analyser et évaluer les risques transfrontaliers qui affectent leurs ressources en eau souterraines communes. Ces risques sont : la réduction des ressources en eau, la dégradation de la qualité des eaux souterraines, et l'impact de la variabilité et changements climatiques.

Ayant reconnu qu'aucun pays pris isolément, ne saurait maîtriser ces risques, le Mali, le Niger et le Nigeria ont adopté la création et la mise en place d'un mécanisme de concertation pour une gestion intégrée, concertée et durable des ressources en eau du Système aquifère d'Iullemeden avant que celles-ci ne se trouvent dans une situation de stress hydrique.

Par ses acquis et expériences tirés de l'étude du Système aquifère du Sahara Septentrional (SASS) partagé par l'Algérie, la Libye et la Tunisie, l'OSS a renforcé les capacités des pays par la construction de leur Base de Données, l'élaboration du Système d'Information Géographique et du modèle mathématique du SAI. Ce dernier a permis entre autres, de préciser le bilan en eau du Système aquifère, les relations hydrauliques existantes entre les aquifères, et le soutien du fleuve Niger par les eaux souterraines. Ces outils ont été développés sur la base de données et informations fournies par les pays (cartes topographiques, cartes géologiques, données issues des puits et forages, prélèvements, chimie des eaux, etc.).

Cependant, il n'existe pas encore de réseau piézométrique de référence à l'échelle du SAI qui permet de suivre et d'évaluer les ressources en eau transfrontalière sur le double plan quantitatif et qualitatif, d'alerter les décideurs pour maîtriser et réduire les risques ou des impacts transfrontaliers sur leurs ressources communes.

Le présent document est un guide méthodologique destiné aux responsables chargés de la gestion des ressources en eau en vue de mettre en place le(s) réseau(x) de suivi et d'évaluation des aquifères transfrontaliers du SAI qui contribueront à renforcer la coopération entre les pays exploitant conjointement les ressources en eau du SAI.

Ce guide synthétise et adapte une méthodologie développée par la Commission Economique Européenne (CEE) sur les stratégies pour le suivi et l'évaluation des eaux souterraines transfrontalières. Ces stratégies sont basées sur les résultats d'ateliers régionaux et surtout des expériences acquises avec la mise en œuvre par les Parties de la Convention sur l'eau (adoptée à Helsinki en 1992) des premières directives sur la surveillance et l'évaluation des eaux souterraines transfrontalières dans des projets pilotes.

Ce guide s'appuie également sur des expériences et leçons tirées de l'étude du SASS initiée par l'OSS et qui concerne les eaux souterraines transfrontalières partagées par l'Algérie, la Libye et la Tunisie. L'étude du SASS a aussi transposé et adapté ces directives développées par la CEE sur la base des résultats obtenus pour définir les réseaux d'observations des ressources en eau du SASS.

Ce document constitue donc un outil d'aide suggéré aux pays pour mieux identifier les problèmes transfrontaliers et mettre en évidence de nouveaux besoins en données et informations. Les directives de la CEE fournissent une approche sur les étapes à franchir pour suivre et évaluer les eaux souterraines des aquifères transfrontaliers. Il reviendra aux équipes nationales de rendre ces directives opérationnelles en les adaptant à leurs réalités, à travers des ateliers régionaux et des missions sur le terrain.

Le document est subdivisé en deux grandes parties :

- /// la problématique de la définition d'un réseau piézométrique du SAI
- /// les étapes du processus pour le suivi des aquifères transfrontaliers.

Le processus pour le suivi des aquifères transfrontaliers est un cycle d'activités liées que les pays devront étudier conjointement pour déterminer avec précision l'évolution à long terme des caractéristiques et du comportement des aquifères partagés.

# I. PROBLEMATIQUE DE LA DEFINITION D'UN RESEAU DE SUIVI DES RESSOURCES EN EAU DU SAI

## I.1. Rappel sur le Système aquifère d'Iullemeden

Le Système aquifère d'Iullemeden (SAI) est un ensemble simplifié de deux aquifères principaux : le Continental intercalaire surmonté par le Continental Terminal (figure 1). Le Continental Terminal regroupe les séries aquifères du Tertiaire et intègre également les nappes phréatiques logées dans les alluvions quaternaires ; il s'étend sur environ 203000 km<sup>2</sup>. Le Continental intercalaire avec une surface de l'ordre de 486000 km<sup>2</sup>, regroupe le niveau supérieur du Crétacé inférieur. Ces deux aquifères sont séparés par un aquitard principalement constitué des formations paléocènes et éocènes et qui englobe localement (au Mali par exemple) une partie du Crétacé supérieur.

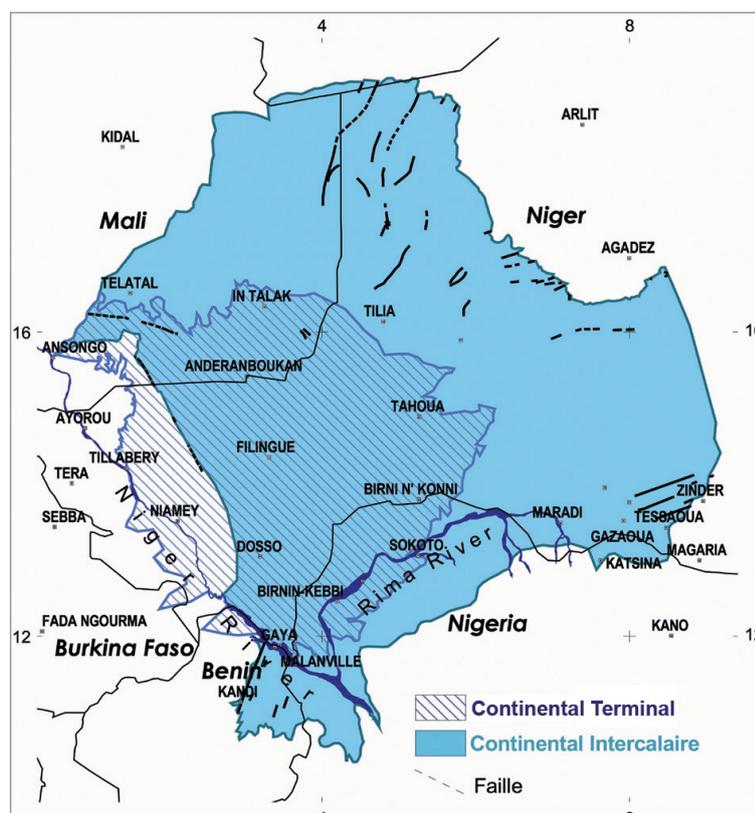


FIGURE 1 : Les aquifères du SAI

## I.2. Etat des connaissances sur les réseaux de suivi dans les pays du SAI

### I.2.1. Rappel introductif sur les objectifs et les types de réseaux de suivi des ressources en eau

Dans un contexte national, les réseaux de suivi ont, de manière générale, deux catégories d'objectifs assez vastes : 1) soit des réseaux de suivi de base ou de référence, 2) soit des réseaux de

suivi à objectif spécifique. Ces réseaux nationaux ont comme principaux objectifs de fournir des données permettant de :

- /// caractériser le régime des eaux souterraines ;
- /// suivre l'évolution à long terme de la variation des niveaux des nappes (quantité) ou de leur qualité.

En revanche, dans un contexte des eaux souterraines des aquifères transfrontaliers, le suivi réglementaire devra être lié, en premier lieu, aux accords signés entre les pays concernés. Dans ce contexte, les objectifs recommandés par la Convention sont au nombre de cinq :

- /// l'évaluation de l'état ;
- /// la conformité avec les normes ou dispositions de l'accord (en rapport avec les fonctions/ usages) ;
- /// les mesures d'urgence ;
- /// les aires spécialement protégées ;
- /// les actions alternatives et remise en état.

Ces objectifs sont récapitulés au tableau 1 suivant :

Objectifs	Types de suivi des eaux souterraines	Information
<b>① Evaluation de l'état</b>  <b>② Conformité avec les normes ou dispositions de l'accord</b>	(a) De base/ de référence	<ul style="list-style-type: none"> <li>• état naturel</li> <li>• évolutions (naturelle, pollution diffuse, régime hydraulique)</li> <li>• état de référence (afin de déceler l'impact anthropique)</li> <li>• niveaux historiques</li> <li>• distribution spatiale</li> <li>• conformité</li> </ul>
<b>③ Mesures d'urgence</b>	(b) Alerte précoce et surveillance	<ul style="list-style-type: none"> <li>• alerte précoce</li> <li>• seuils</li> <li>• tendances</li> <li>• risques</li> <li>• efficacité des mesures</li> <li>• impacts</li> </ul>
<b>④ Conformité aires spécialement protégées</b>  <b>⑤ actions alternatives et remise en état</b>	(c) Suivi lié aux fonctions/ usages (d) Objectifs spécifiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• normes de qualité</li> <li>• critères, seuils</li> <li>• risques à la santé</li> <li>• risques environnementaux</li> <li>• validation</li> <li>• prévision</li> <li>• efficacités des mesures</li> <li>• suivi de mise en œuvre</li> </ul>

**TABLEAU 1** : Principaux types de suivi des eaux souterraines issus de la Convention

Les types de suivi des eaux souterraines transfrontalières sont de quatre catégories décrites ci-après :

### ▶▶▶ SUIVI DE BASE/ DE RÉFÉRENCE

Le suivi de base (ou de référence) comprend le suivi d'évaluation de l'état. Ce type de suivi établit une situation historique (de référence) afin de permettre l'identification des tendances induites par les impacts anthropiques et ceux naturels transfrontaliers.

Aux fins de l'évaluation de l'état, des historiques à long terme sont nécessaires à l'identification de l'impact potentiel des modes d'occupation des sols et de pompage, au moyen d'une analyse statistique. Cette évaluation est souvent effectuée à des échelles bien différentes (locale, nationale, régionale), et elle est également imposée par plusieurs directives et conventions internationales. Dans un contexte transfrontalier, des réseaux de suivi transfrontaliers pourraient être utilisés; mais l'analyse statistique nécessite un pilotage central effectué par un organisme commun tel que l'Unité de coordination du mécanisme de concertation entre les pays concernés.

### ▶▶▶ SUIVI LIÉ AUX FONCTIONS ET USAGES (CONFORMITÉ)

Cette stratégie est liée à la réglementation, aux lois et directives en vigueur, relatives à l'usage des eaux souterraines. Ce type de suivi sert de protection aux fonctions et usages des eaux. Le suivi se doit de répondre à la question de savoir si l'usage des eaux souterraines est conforme à la réglementation et aux normes ci-dessus mentionnées. Pour les aquifères transfrontaliers, les pays concernés établissent et s'accordent sur les fonctions et usages des eaux souterraines qu'ils exploitent.

Etant donné que les résultats de suivi sont susceptibles d'être utilisés aux fins d'actions ou de mesures subséquentes, il est préconisé de mettre en place un programme transfrontalier d'assurance qualité afin de garantir la fiabilité des laboratoires de qualité des eaux relevant des pays concernés. L'annexe 1 fait l'état des capacités d'analyse des eaux du Mali, du Niger et du Nigeria.

### ▶▶▶ SUIVI À OBJECTIF SPÉCIFIQUE

Certaines activités de gestion des ressources en eaux souterraines nécessitent des types d'investigation et de suivi spécifiques se rapportant notamment à :

- /// l'élaboration et l'évaluation des aires spécialement protégées ;
- /// la mise en oeuvre et l'évaluation des mesures alternatives et de remise en état ;
- /// l'étude de l'interconnexion entre les eaux de surface et les eaux souterraines ;
- /// la modélisation relative à la prévision de la migration des polluants ;
- /// l'investigation des sources éventuelles de nitrate dans les eaux souterraines, en tant que fondement des mesures de contrôle de la pollution.

### ▶▶▶ ALERTE PRÉCOCE ET SURVEILLANCE

Cette stratégie cherche à recueillir des informations relatives à l'éventualité et à l'endroit de déversements accidentels pouvant affecter particulièrement l'alimentation en eau potable, et ce, afin de déterminer les risques liés à la santé publique de sites de rejets « abandonnés ou illicites » ou de déterminer des sources réelles de détérioration de la qualité des eaux souterraines. Aux fins de l'alerte précoce, des puits ou forages spéciaux pourront être forés, tandis que pour les besoins de la surveillance, des puits de production (ou d'exploitation) peuvent souvent être utilisés.

Les données issues de cette action devront servir de justificatif suffisant pour entreprendre une action d'urgence, qui peut se décliner soit en mesures supplémentaires spécifiques, soit en mesures alternatives. Les pays concernés devront s'accorder sur l'ensemble des aspects de cette stratégie, ainsi que sur les mesures d'urgence.

## 1.2.2. Revue des réseaux de suivi des ressources en eau dans les trois pays

### ▶▶ MALI

En République du Mali, le suivi piézométrique est récent. C'est la sécheresse des années 70 qui a surtout conduit à la mise en place d'une série de programmes de recherche et d'exploitation des eaux souterraines. Ceci a favorisé l'installation progressive d'un réseau piézométrique par la Direction Nationale de l'Hydraulique et de l'Environnement (DNH) avec l'appui des différents projets financés par le PNUD en particulier et la participation de plusieurs projets d'hydraulique villageoise notamment Helvetas, Mali aqua Viva, KBK, CMI, Caritas, etc. Ce réseau essentiellement situé dans le bassin du fleuve Niger, disposait de 70 sites d'observations dotés de 210 piézomètres constitués d'après la banque de données SIGMA de la DNH, de 88 forages et 122 puits. En 1992, ce réseau comptait 95 sites d'observation avec 231 piézomètres parmi lesquels 37 ont été équipés de limnigraphes (piézographes).

Les piézomètres à l'intérieur du bassin du Niger sont répartis selon le tableau 2. Il y a 5 forages en cours de réalisation dans la zone du SAI.

La presque totalité des piézomètres, tous types confondus, ne sont plus suivis à cause du manque de moyens financiers et matériels. Les suivis piézométriques s'arrêtaient avec la fin des projets qui en étaient initiateurs. D'après la Division des Inventaires Hydrauliques de la DNH, moins de 10 piézomètres ont fait l'objet de suivi en 2003.

Les visites de terrain effectuées par les techniciens de la DNH dans les Régions de Koulikoro, Sikasso, Ségou et Mopti en 2002, ont révélé que :

- /// aucune mesure n'avait été effectuée depuis 1991 dans certains cas, depuis 1994 dans d'autres ;
- /// tous les appareils limnigraphiques doivent être révisés ;
- /// certains limnigraphes ont été démontés et le trou de forage bouché.

Région	Points de mesures (1981 - 2002)			Total
	Manuelles		Limnigraphes (forages)	
	Puits	Forages		
Koulikoro	31	13	22	62
Sikasso	57	36	4	96
Ségou	0	5	3	8
Mopti	7	3	11	21
Tombouctou	2	5	1	8
Gao	0	5	0	5
District de Bamako	0	1	0	1
<b>Total</b>	<b>106</b>	<b>81</b>	<b>43</b>	<b>225</b>
<b>Total en fonctionnement en 2003</b>	<b>0</b>	<b>9 (à Sikasso)</b>	<b>0</b>	<b>9</b>

Source : Rapport national sur la mise en valeur des ressources en eau, 2004

**TABLEAU 2 :** Répartition des points de mesures piézométriques dans les régions situées dans le bassin du fleuve Niger

Le réseau de suivi de la qualité de l'eau est pratiquement inexistant. Récemment, il a été mis dans le cadre du projet GHENIS, un réseau de suivi de 33 stations de prélèvement. Sinon, le laboratoire de la qualité des eaux du service de l'Hydraulique ne dispose pas de réseau de suivi de la qualité

physico-chimique des eaux de surface et souterraine. La plupart des analyses se font sur les eaux de forages, des puits et des cours d'eau que lui transmettent les sociétés et les entreprises. Quelques analyses sporadiques sont effectuées sur les cours d'eau. Toutefois, le Mali a adopté en 2007 le document de suivi et d'évaluation des ressources en eau de point de vue quantitatif et qualitatif. Ledit document est une composante du Plan d'Action GIRE (PAGIRE/Mali).

Par conséquent, le suivi des ressources en eau souterraine nécessite la mise en place d'un réseau piézométrique, indispensable pour l'étude des aquifères notamment pour le suivi des mécanismes de transferts hydrauliques devant permettre d'établir le bilan hydrologique et de déterminer les réserves de ces aquifères. Aussi, il importe de procéder régulièrement à: 1) l'inventaire des points d'eau (puits et forages) avec leurs caractéristiques dans le bassin; 2) des mesures périodiques de niveau d'eau dans les piézomètres installés et dans certains forages.

## ▶▶ NIGER

Le réseau piézométrique actuel du Niger comporte 308 points d'observation captant différentes nappes. Il se compose de 132 forages, 103 puits, 72 piézomètres et un (1) puits-forage.

Il n'est pas aussi bien organisé que celui des eaux de surface. Son suivi est effectué par les services régionaux du ministère de l'Hydraulique pour certains aquifères sensibles pour lesquels un réseau dit minimum de 83 points de mesures a été identifié en 1999.

Le choix des aquifères-cibles est fonction de leurs potentialités hydrogéologiques, de l'intensité de leur exploitation et du développement probable de cette utilisation.

Le suivi piézométrique porte sur les relevés des niveaux dynamiques et statiques; il est surtout caractérisé par la très grande variabilité de la fréquence des mesures, tant entre les différentes régions qu'au sein d'une même région. En effet, la fréquence des observations varie de 2 ou 3 relevés par mois à 1 ou 2 relevés par an.

L'analyse des données recueillies a démontré que celles-ci sont généralement de qualité médiocre. Elles ont cependant permis d'avoir des informations assez intéressantes sur la dynamique des nappes suivies.

## ▶▶ NIGERIA

Le département d'hydrologie et d'hydrogéologie au ministère fédéral des ressources en eau a établi en 2001 une Base de données et un Système d'information géographique hydrologique et hydrogéologique pour le pays tout entier. C'est ainsi qu'une version d'ArcGIS 8.0 et le système de gestion de Bases de données MS Access ont été employés pour créer un système de gestion de base de données relationnelle. En 2007, le logiciel de GIS utilisé a été remplacé par la version d'ArcGIS 9.1.

Actuellement, la Base de données contient des cartes du Nigeria dans différents thèmes tels que l'État, le gouvernement local, 12 bassins de fleuve et 8 frontières de secteur hydrologique ainsi que d'autres attributs. En outre, des données sur les forages sont reportés à ces cartes, aux stations de jaugeage du fleuve et d'autres infrastructures d'eau.

Actuellement, il y a des projets en cours sur collection des données pour renforcer la Base de données. Ces projets sont aux stades avancés de l'accomplissement.

En outre, le département qui évolue maintenant vers une Agence des services hydrologiques du Nigeria est sur le point de s'embarquer sur la gestion de réseau pour faciliter l'accès facile de PCS des données et de l'information de la base de données. Ce doit être fait sous le projet appelé la gestion de réseau hydrologique nationale de systèmes d'information (HYDRONET).

Le projet « Système aquifère d'lullemeden » tirera bénéfice de cette base de données. Un réseau de mesures spécifique à ce système permettra d'appréhender des aspects comme le bilan hydrique et l'estimation de la recharge est fondamentale pour ajuster la gestion des ressources souterraines aux projets d'irrigation intensive en cours et de prélèvements municipaux. Etant donné que des systèmes de pompage motorisé et manuel sont en train de s'accroître rapidement, des puits de suivi (piézomètres) des ressources en eau souterraines devront également être installés dans des emplacements stratégiques dans l'aire du Système aquifère d'lullemeden.

Les organismes étatiques des eaux relevant du Ministère fédéral des ressources en eau des Etats de Katsina, Kebbi, Sokoto, Zamfara concernés par la gestion des eaux souterraines du Système aquifère d'lullemeden (SAI), ont entrepris plusieurs programmes de forages notamment pour l'alimentation en eau potable en milieux urbain et rural. A ce jour, les statistiques suivantes relatives aux forages ont été enregistrées dans le Bassin de Sokoto Rima (tableau 3). Toutefois, des études supplémentaires sont nécessaires afin de déterminer ceux ayant une influence directe sur le Système aquifère d'lullemeden, notamment dans les Etats de Katsina, Kebbi et Zamfara.

S/No	Etat	Nombre de forages actifs	Programme prévu 2007
1	Katsina	100 +25*	300 + 150*
2	Kebbi	300 +50*	500 + 350*
3	Sokoto	600 +200*	1500 + 500*
4	Zamfara	201 +100*	250 + 400*
	Total	1,706	3850

\* représente des forages réalisés ou sponsorisés par le ministère fédéral des Ressources en eau

**TABLEAU 3 :** Statistiques des forages dans les Etats fédéraux du Nigeria concernés par le SAI

### 1.3. Conclusion

Le Mali, le Niger et le Nigeria sont dotés d'un réseau piézométrique dont le suivi est conditionné la plupart des cas, à la réalisation des activités d'un projet. Ces activités sont très limitées dans le temps et dans l'espace.

Par ailleurs, leur réseau piézométrique nécessite un contrôle pour s'assurer de leur fonctionnalité mais surtout la répartition des ouvrages selon les aquifères captés et leur représentativité de manière à suivre l'évolution spatio-temporelle de la piézométrie et des rabattements engendrés par les prélèvements. De plus, les résultats du modèle mathématique du Système aquifère d'lullemeden, obtenus dans le cadre du projet « Gestion des risques hydrogéologiques dans ce Système » ont, entre autres, mis en évidence **la nécessité de développer un réseau piézométrique de référence à l'échelle régionale**, en vue notamment de préciser les risques et les menaces en vue d'alerter les décideurs politiques.

Dans l'optique de doter les trois pays, pour la première fois, d'un réseau piézométrique étendu aux limites naturelles des aquifères transfrontaliers du SAI qu'ils exploitent ensemble, une démarche méthodologique est proposée dans les chapitres développés ci-après. Un exemple illustratif est donné en **annexe 2**. Il s'agit de la mise en place du réseau piézométrique du Système aquifère du Sahara Septentrional partagé par l'Algérie, la Libye et le Tunisie.

## II. CYCLE DU SUIVI ET DE L'ÉVALUATION DES AQUIFERES TRANSFRONTALIERS

### II.1. Rappel introductif

#### II.1.1. Rappel de quelques définitions

##### ►► Suivi

Le suivi est souvent entendu comme étant un processus de mesures répétitives, à plusieurs fins établies, d'un ou de plusieurs élément(s) de l'environnement selon des calendriers préalablement définis dans l'espace et le temps, utilisant des méthodologies comparables pour la détection environnementale et la collecte des données. Autant que faire se peut, les mesures de la variation des niveaux des nappes devront se faire et les échantillons devront être pris aux mêmes endroits à des intervalles de temps réguliers.

L'un des objectifs du suivi est de permettre d'évaluer l'état actuel de la quantité et de la qualité des eaux, ainsi que de leur variabilité spatio-temporelle. Souvent, ces évaluations sont des appréciations des conditions hydrogéologiques, morphologiques, physio-chimiques, biologiques et/ou microbiologiques en relation avec des conditions de référence, des effets sur la santé humaine et/ou des usages de l'eau existants ou envisagés.

Un second objectif du suivi est d'aider à la prise de décision et à la gestion opérationnelle des eaux dans des situations critiques (inondations, sécheresses, pollution). Des données fiables sont nécessaires, ce qui requiert des systèmes d'alerte précoce pouvant indiquer quand les niveaux critiques sont atteints ou dépassés. Dans ces cas, les modèles mathématiques aident souvent à la prise de décision. Par exemple, le modèle mathématique du SAI a mis en évidence l'importance des prélèvements par rapport à la ressource renouvelable dont le seuil de surexploitation a été franchi en 1995, année à partir de laquelle les prélèvements estimés à 152 millions m<sup>3</sup> excèdent la recharge moyenne (ligne rouge) estimée à 150 millions m<sup>3</sup> en 1970.

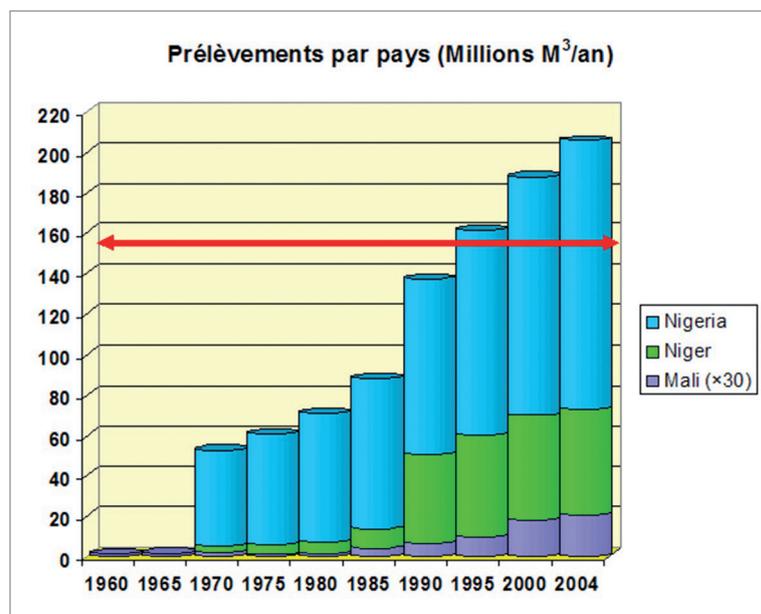


FIGURE 2 : Le seuil de surexploitation (ligne rouge) a été franchi en 1995

## ▶▶ EVALUATION

L'évaluation est l'appréciation de l'état hydrogéologique, chimique et/ou microbiologique des eaux souterraines en relation avec les conditions historiques, les effets anthropiques, et les usages réels ou envisagés, susceptibles d'avoir un impact négatif sur la santé humaine ou sur l'environnement.

### II.1.2. Aspects spécifiques du suivi des eaux souterraines

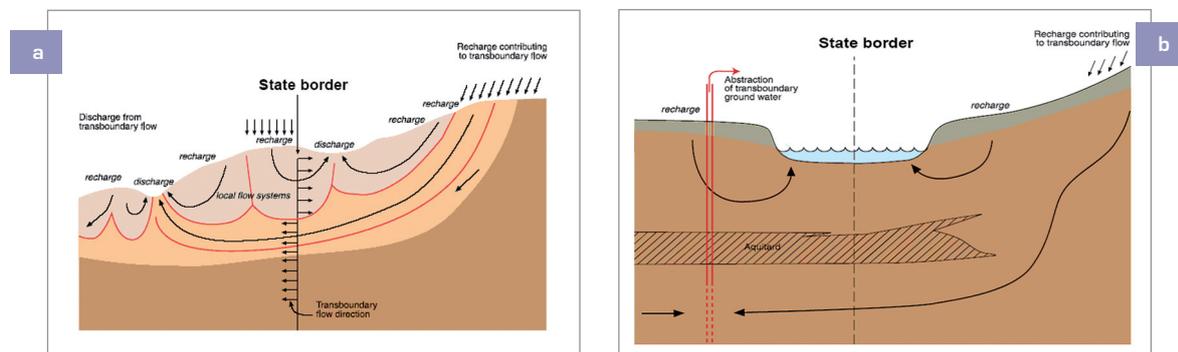
Lors de la réalisation du suivi transfrontalier, il est essentiel de restituer l'hydrogéologie sous forme de modèles conceptuels et/ou de schémas graphiques. Ceci doit comprendre une caractérisation de l'aquifère transfrontalier (géométrie), les conditions d'écoulement, y compris la recharge et ses aires de recharge ainsi que l'évolution de la qualité des eaux souterraines.

La caractérisation et la description des systèmes pertinents des aquifères transfrontaliers représentent une condition préalable du suivi des eaux souterraines transfrontalières. Les caractéristiques qui influent sur la manière dont les eaux souterraines sont suivies et évaluées et qui les distinguent des eaux de surface sont les suivantes :

- /// un mouvement lent (longues périodes de séjour) des eaux souterraines accroît l'éventualité que la qualité de ces eaux soit modifiée par leur interaction avec la roche. De plus, une fois polluées, ces eaux souterraines restent ainsi pendant plusieurs années, et il est difficile d'intervenir efficacement dans ce processus ;
- /// l'interaction entre l'eau et la roche est de nature à induire une évolution de l'hydrogéochimie naturelle au fur et à mesure que les eaux souterraines infiltrées passent en profondeur. Afin de pouvoir identifier et quantifier les impacts conjugués des activités anthropiques, la qualité « de base (ou de référence) » des eaux souterraines ainsi que leurs variations latérale et en profondeur, doivent être évaluées (par exemple, le cas de Tibiri) ;
- /// l'écoulement des eaux souterraines peut être interstitiel (intergranulaire) et/ou à travers les fractures. L'écoulement des eaux souterraines sera beaucoup plus rapide, mais variable et difficile à estimer à travers des roches largement fissurées. L'écoulement interstitiel des eaux souterraines augmente l'éventualité d'une interaction entre l'eau et la roche de l'aquifère ;
- /// les aires de recharge et de décharge (l'exutoire) doivent être déterminées. Les activités susceptibles d'affecter la quantité ou la qualité des eaux souterraines doivent aussi être appréhendées. Une connaissance des systèmes d'écoulement des eaux souterraines signifie notamment les endroits des aires de recharge et de décharge des eaux souterraines, ainsi que la manière dont les eaux souterraines s'écoulent d'une aire à une autre. Ainsi, des activités dans les aires de recharge sur un côté de la frontière peuvent influencer négativement la qualité et la quantité des eaux souterraines de l'autre côté de la frontière (figure 3a). Afin de déterminer les conditions de recharge et de décharge dans certaines aires, l'interaction entre les eaux de surface et les eaux souterraines doit être appréhendée (figure 3b) ;
- /// les changements des conditions historiques au fil du temps et dans l'espace, doivent être déterminés avant de pouvoir déceler tout impact des activités anthropiques ;
- /// les systèmes multi-couches : lorsqu'il existe plusieurs aquifères séparés par des aquitards, les passages ou connexions éventuels entre eux doivent être appréhendés.

Par conséquent, une caractérisation des eaux souterraines nécessite des informations relatives à la géologie, la géophysique et l'hydrogéologie. En plus, il est nécessaire d'appréhender les dynamiques du système d'écoulement des eaux souterraines, telles que les réactions saisonnières et à long terme, et les variations et changements du débit ou de la direction de l'écoulement dus aux activités anthropiques (notamment les prélèvements). La qualité des eaux souterraines est

infiniment variable dans l'espace et dans le temps, mais à des échelles spatiales et temporelles différentes des eaux de surface.



**FIGURE 3 :** Systèmes d'écoulements souterrains hiérarchisés, de part et d'autre d'une frontière entre deux Etats

### II.1.3. Approche intégrée

L'harmonisation des réseaux de suivi des eaux de surface et des eaux souterraines doit être envisagée en vue de gérer et de protéger de manière effective les ressources en eau transfrontalières. Les suivis de base (ou de référence) et de conformité doivent être liés de la manière la plus appropriée.

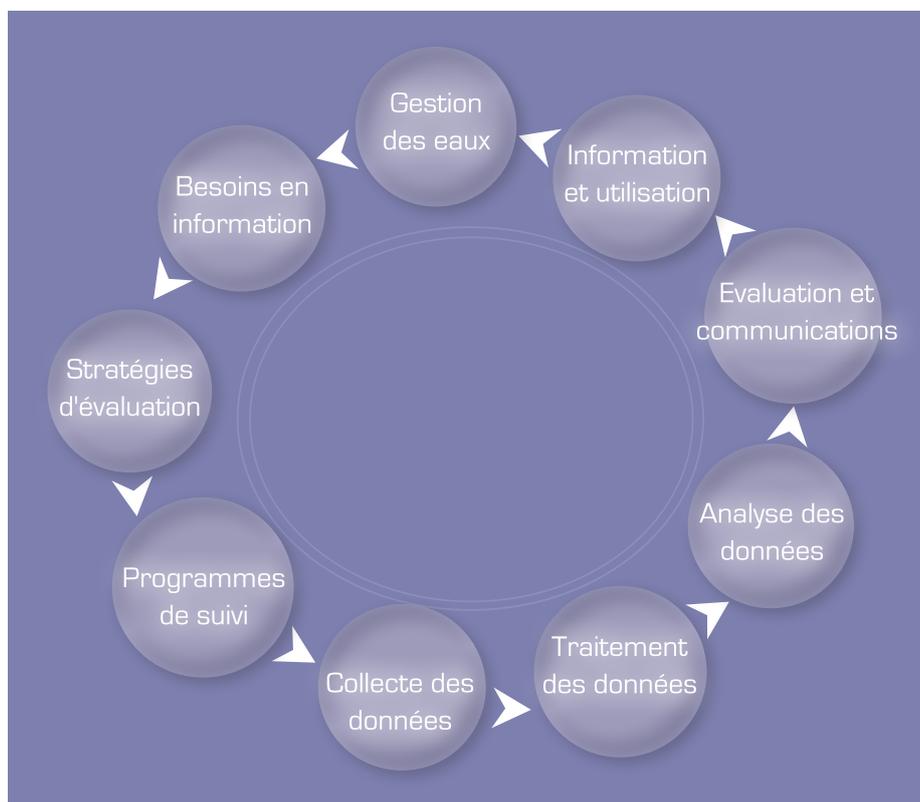
Pour mettre en place des programmes de suivi, les aspects suivants, permettant une plus grande intégration, doivent être pris en compte :

- /// **intégration de la collecte et du stockage des données :** le suivi quantitatif et qualitatif des eaux souterraines et des eaux de surface est souvent entrepris par des organismes différents. Les données ainsi obtenues doivent être conjointement évaluées (modélisation) ;
- /// **interaction eaux souterraines – eaux de surface :** le suivi et l'évaluation des eaux de surface et des eaux souterraines peuvent être davantage intégrés, notamment lorsque la recharge se fait par infiltration des eaux de surface ou dans le cas d'écosystèmes vulnérables ;
- /// **quantité – qualité :** il existe souvent des relations et des interactions claires entre la quantité et la qualité des eaux souterraines. Des mesures de la quantité des eaux souterraines sont utilisées pour caractériser le système d'écoulement des eaux souterraines, à la fois dans son état naturel et sous l'influence conjuguée des activités anthropiques (exploitation). Cette exploitation peut aussi induire un impact sur la qualité, comme l'appel d'eaux salées (ou très minéralisées) dans un aquifère trop exploité. Tous ces impacts (ainsi que toute mesure visant à les réduire) peuvent, alors, être évalués de la manière la plus efficace par l'observation de la quantité et de la qualité des eaux souterraines prises dans leur intégralité.

Le modèle mathématique élaboré dans le cadre du projet « gestion des risques hydrogéologiques dans le Système aquifère d'Iullemeden (SAI) », a mis en évidence les échanges hydrauliques existant entre les aquifères, d'une part, entre ces aquifères et le fleuve Niger, d'autre part, notamment le soutien des écoulements du fleuve Niger par les eaux souterraines. Ainsi, **le fleuve Niger reçoit environ 46 millions m<sup>3</sup>/an à partir du Continental intercalaire et 79 millions m<sup>3</sup>/an du Continental Terminal soit un total annuel de 125 millions m<sup>3</sup>. Un affluent du Niger, le river Rima (ou Goulbi de Maradi au Niger), apporte environ 20 millions m<sup>3</sup>/an au Continental intercalaire et reçoit environ 12 millions m<sup>3</sup>/an à partir du Continental Terminal avant sa confluence avec le fleuve Niger.**

## II.2. Méthodologie

Un partage de l'information (et une évaluation/modélisation conjointe) entre pays riverains ne saurait être significatif que lorsque les données sont comparables. Ceci peut être réalisé quand toutes les composantes des activités de suivi des eaux souterraines de part et d'autre de la frontière utilisent des principes similaires ou adoptent une approche telle que celle représentée par le cycle de suivi schématisé ci-après (figure 4).



**FIGURE 4 :** Cycle de suivi des eaux souterraines transfrontalières (d'après UN/ECE, 2000)

Les sorties générées par chacun de ces éléments sont utilisées pour l'élément ou les éléments suivants du cycle. Dans l'idéal, à la fin du cycle, les informations utiles pour la planification, la prise de décision et la gestion opérationnelle des eaux sont obtenues sous forme de rapport ou selon un format convenu. Ceci devrait également mettre en évidence quel type d'information est encore recherché pour une meilleure prise de décision et autres tâches relatives à la gestion des eaux, étant donné que les politiques et/ou objectifs pourraient avoir subi des changements entre temps. Ainsi, un nouveau cycle serait-il engagé donnant lieu à des besoins en information redéfinis avec plus de précision, à une stratégie d'information mise à jour, et ainsi de suite.

### II.2.1. Identification des problématiques de la gestion des eaux souterraines

#### ►► FONCTIONS, PRESSIONS ET OBJECTIFS

La gestion des eaux souterraines fait partie de la gestion et de la protection intégrées des ressources en eau. Les éléments fondamentaux de la gestion des eaux souterraines, tels que les fonctions, pressions et impacts sur les aquifères transfrontaliers, doivent être identifiés, et les priorités doivent être établies. Ces éléments fondamentaux sont :

- /// les fonctions et usages des aquifères (par exemple conservation des zones humides [fonction], eau potable ou d'irrigation [usage] ;

- /// les problèmes et pressions (menaces) (par exemple rabattement de la nappe, pollution) ;
- /// l'impact des mesures sur le fonctionnement général de l'étendue des eaux : les mesures pourront inclure des investigations des problèmes et menaces, des analyses des risques, des alternatives (réduction des prélèvements des eaux souterraines et/ou recharge artificielle (infiltration), le contrôle des activités polluantes ou des prélèvements excessifs.

Lors de la mise au point de stratégies de suivi des eaux souterraines transfrontalières, les aspects suivants devront être identifiés et convenus de manière conjointe en incluant les aspects quantitatif et qualitatif :

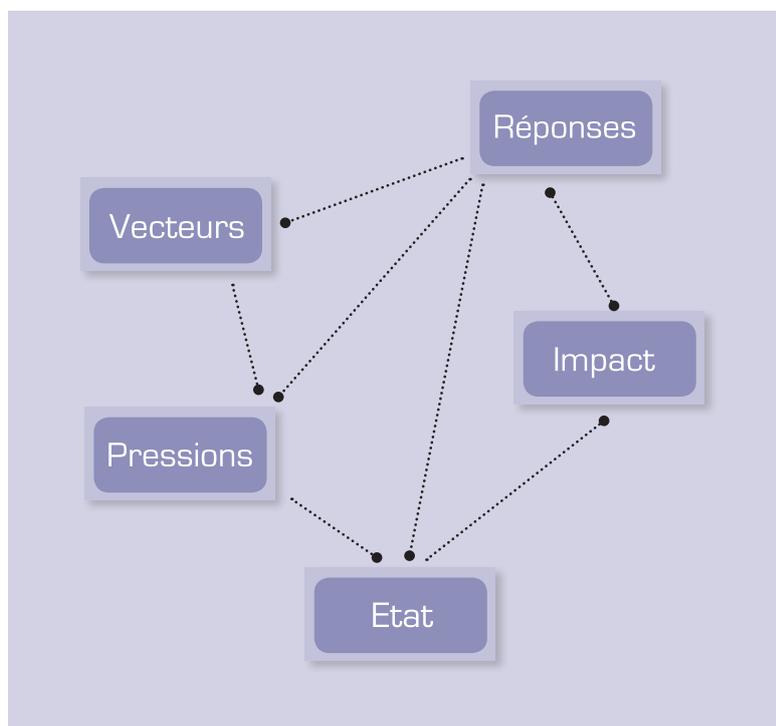
- /// l'aquifère transfrontalier et les relations avec les eaux de surface et les écosystèmes associés ;
- /// les usages humains des eaux souterraines transfrontalières ;
- /// la fonction écologique des ressources en eaux souterraines transfrontalières ;
- /// les pressions ayant un impact sur les usages humains et sur le fonctionnement des écosystèmes dépendants des eaux souterraines ;
- /// les objectifs de gestion chiffrés, ou autrement clairement définis, permettant la mise au point de restrictions pouvant être mises en œuvre dans un délai spécifié.

## II.2.2. Besoins en informations

L'analyse des problématiques de gestion des eaux est la base à partir de laquelle les besoins en informations sont spécifiés. Les besoins en informations sont liés aux aspects suivants :

- /// les usages et fonctions des aquifères, et qui sont de nature à imposer des exigences sur leur qualité et leur disponibilité ;
- /// les problèmes (par exemple salinisation, pollution) qui empêchent un usage et un fonctionnement adéquats des aquifères ;
- /// les mesures prises en vue de résoudre les problèmes ou d'améliorer l'usage ou le fonctionnement des aquifères, y compris les aspects environnementaux.

L'analyse des besoins en informations est l'étape la plus critique de la mise au point d'un programme de suivi réussi, adapté et efficace en termes de coût. Afin de concevoir et mettre en œuvre de manière adéquate un programme de suivi et d'évaluation, les besoins en informations doivent être spécifiés le plus précisément possible pour divers niveaux (par exemple sur l'ensemble du bassin et aux niveaux locaux), et en utilisant les composantes du cadre du DPSIR (Driving force-Pressure-State-Impact-Response) (Vecteurs - Pressions - Etat - Impacts - Réponses) (figure 5).



**FIGURE 5 :** Le cadre DPSIR : Vecteurs - Pressions - Etat - Impact - Réponses

**Les vecteurs** décrivent les activités anthropiques. **Les pressions** décrivent le stress exercé par les problèmes sur les fonctions/ usages de l'aquifère. **L'état de l'aquifère** est décrit en termes de caractéristiques hydrauliques. **L'impact** décrit la perte des fonctions/usages, tel que l'usage pour l'alimentation en eau potable. **Les réponses** décrivent les politiques déjà mises au point, ou en cours d'élaboration, pour résoudre le problème.

Le cadre DPSIR présuppose que les systèmes sociaux, économiques et environnementaux sont étroitement liés. Ces liens sont illustrés conceptuellement par des vecteurs de changement environnemental qui induisent des pressions sur l'environnement (figure 5). Celles-ci affectent, à leur tour, l'état de l'environnement. Les impacts ou modifications de l'état, comprennent des impacts sur les écosystèmes, les économies et les communautés. Les **impacts négatifs** donneront éventuellement lieu à des réponses de la part de la société, telles l'élaboration de politiques de protection des bassins. Si une politique donnée atteint l'effet escompté, sa réalisation influera sur les vecteurs, les pressions, l'état et les impacts.

Les étapes relatives à la spécification des besoins en informations sont comme suit :

- /// identifier les fonctions ou usages et les problèmes (tels que pollution et le rabattement des nappes) du système des eaux souterraines ;
- /// établir un tableau fonction/ problème permettant de voir si les problèmes sont en conflit avec les fonctions des systèmes des eaux souterraines.

Des objectifs de gestion doivent être formulés et convenus visant la protection des ressources en eaux souterraines. Lorsque les budgets sont limités, un tableau **fonction/problème** pourra être utilisé en tant que moyen d'établir un ordre de priorité. Le caractère urgent d'un problème donné et la disponibilité des moyens (techniques et financiers) détermineront les priorités.

- /// recueillir au moins les informations suivantes relatives aux facteurs variant dans l'espace et le temps :
  - le fonctionnement hydrodynamique et géochimique du système des eaux souterraines (dans le temps et l'espace) ;
  - les utilisateurs de l'information (décideurs politiques et/ou gestionnaires opérationnels) ;
  - l'étape relative à la gestion (identification des problèmes, élaboration de politiques, exécution des politiques et contrôle) ;
- /// utiliser le concept DPSIR pour spécifier davantage les besoins en informations. L'approche systémique de ce concept est utile pour dégager les causalités entre les problèmes environnementaux (pressions), l'impact sur les ressources en eaux souterraines (impact, état) et les mesures à prendre (réponse) ;
- /// établir une liste récapitulative avec des critères auxquels il faut répondre, liés aux facteurs précités.

Les besoins en informations doivent être spécifiés afin de pouvoir mettre au point un programme de suivi et d'évaluation. Une fois spécifiés, ils devront au moins mener :

- /// aux variables appropriées qui seront suivies ;
- /// aux critères d'évaluation (par exemple indicateurs, critères d'alerte précoce relative aux inondations ou pollution accidentelle) ;
- /// aux conditions de communication et présentation des données (par exemple présentation sur des cartes, Système d'Information géographique) ;
- /// à l'exactitude pertinente de chaque variable de suivi ;
- /// au degré de fiabilité des données ;

/// au temps de réponse spécifié (c'est-à-dire le délai pour lequel l'information est requise), par exemple, les minutes/heures pour les prévisions d'inondations ou pour les systèmes d'alerte précoce, pour la détection des tendances (par exemple nombre de semaines après échantillonnage) et autres tâches.

Les indicateurs renvoient souvent à un ensemble de variables principales, orientant ainsi la stratégie de suivi sur une certaine problématique. Les indicateurs offrent un moyen de communication des résultats du suivi à l'endroit des décideurs. Les indicateurs peuvent, par ailleurs, être utilisés pour illustrer les différents aspects de l'information souhaitée (tableau 4).

Problèmes	Vecteurs	Pression	Etat	Impact	Réponse
Excès de nutriments	Intensification agricole	Charge-N sur les exploitations	Nitrate dans les eaux souterraines	Nitrate dans l'eau potable	Contrôle de l'usage de la fumure/des fertilisants
Pollution par des substances dangereuses	Production industrielle chimique (ou minière)	Emissions de métaux lourds	Concentration de métaux lourds	Problèmes de potabilité	Changements de teneurs toxiques dans les produits et procédés de production
Rabattement des nappes	Développement économique	Demande en eau potable/industrielle	Rabattement des nappes des aquifères	Perte des rendements	Contrôle des prélèvements Recharge artificielle
Salinisation/intrusion des eaux salines	Développement économique	Surexploitation	Concentration élevée en chlorures	Détérioration de la qualité de l'eau potable	Recharge artificielle

TABLEAU 4 : problèmes pour lesquels des indicateurs peuvent être élaborés, en utilisant le concept DPSIR

### II.2.3. Stratégies de suivi et d'évaluation

Les stratégies de suivi servent de guide à l'établissement de priorités réalistes de suivi, non seulement en termes de ce qui doit faire l'objet d'un suivi, mais également en termes de délais et de fonds. Les organismes communs doivent évaluer de manière périodique leurs activités de suivi afin de s'assurer qu'ils sont en train de réaliser leurs objectifs de la manière la plus efficace et la plus économique.

#### ▶▶ ASPECTS STRATÉGIQUES CLÉS

Une fois les objectifs arrêtés, une stratégie plus spécifique devra être élaborée avant d'entamer la conception technique effective d'un réseau de suivi. Les aspects suivants doivent être traités dans une stratégie adéquate :

- /// **données disponibles et systèmes de suivi** : des informations doivent être collectées sur les zones pertinentes de l'aquifère transfrontalier objet de l'accord entre les pays ;
- /// **évaluations nécessaires** : quels types d'évaluation doivent être effectués (par exemple situation naturelle, situation historique, conformité avec les exigences des usages et fonctions, niveaux de pollution, évaluations des risques relatifs à la santé publique et/ou à l'environnement, évaluation de l'alerte précoce) ?
- /// **Type de suivi** : au cas où un suivi est nécessaire, quel type de suivi doit être effectué ? Doit-on se contenter d'une seule étude ou faut-il procéder à un suivi plus large ?
- /// **Techniques de suivi** : quelles sont les techniques de suivi disponibles et indiquées (par exemple suivi des eaux de surface, suivi météorologique, techniques de télédétection, suivi d'évaluation précoce (par exemple, l'usage de pesticides), usage des eaux, méthodes géophysiques,

système de réseau de suivi de zone non saturée, système de suivi à base d'enregistrement continu] ?

- /// **Approche par étapes** : une approche par étapes pour l'élaboration d'un système de réseau de suivi serait-elle utile, menant d'une évaluation sommaire à une évaluation détaillée ?
- /// **Responsabilités** : qui sera responsable de l'organisation du système de suivi (pour la conception, la réalisation, l'exploitation et l'évaluation) ?
- /// **Ressources financières et humaines** : quel est le budget disponible et, par conséquent, quelles seront les ressources humaines à mettre à disposition ? Les autorités compétentes doivent réaliser que le suivi des eaux souterraines doit être assuré le plus souvent à long terme.
- /// **Intégration** : l'intégration précoce des activités de suivi, pour des raisons de rapport coût-efficacité dans le cycle de suivi, peut induire un sur/sou-dimensionnement des réseaux de suivi. Ainsi, une stratégie d'information devra-t-elle être élaborée par objectif de suivi ou par besoin en données.

## ▶▶▶ ÉLÉMENTS DE SUIVI ET STRATÉGIES D'ÉVALUATION

Les résultats de l'élaboration de la stratégie de suivi devront mener à la spécification d'une ou de plusieurs option(s) pour lesquelles un système doit être conçu. Les éléments suivants aborderont la conception des diverses composantes d'un système de suivi :

- /// **Inventaire et études préliminaires** : des inventaires et autres activités préliminaires devront être réalisés par les pays concernés avant d'engager des efforts dans le suivi des aquifères transfrontaliers. L'étendue de ces activités dépend des objectifs du programme, la complexité de l'hydrogéologie et le nombre et la nature des problématiques à traiter. Les études fournissent les données de base nécessaires à une mise en place du suivi qui serait aussi efficace et effectif que possible. Les inventaires comprendront une sélection de toutes les données existantes et pertinentes à l'aspect en question, une évaluation des caractéristiques de l'aquifère, du cadre hydrogéologique, ainsi qu'un examen de l'incidence de polluants au moyen d'études, ou des impacts négatifs à des niveaux variables des eaux souterraines. Par ailleurs, le besoin de données supplémentaires, le cas échéant, deviendra plus clair au vu de ces inventaires. Des études devront être réalisées là où l'inventaire révèle un manque de données. Les études sont également utiles pour déterminer la variabilité spatio-temporelle des paramètres de suivi.
- /// **Approche par étapes** : étant donné que le suivi sert à atteindre plusieurs objectifs et vu que les besoins en informations varient des indications générales à des caractéristiques de diagnostic détaillées, le choix des paramètres et méthodes en dépend également. En général, une approche par étapes à la mise en oeuvre des efforts de suivi, allant du simple au sophistiqué, est indiquée pour des raisons de rapport coût-efficacité. En outre, l'établissement d'un ordre de priorité dans le temps est préconisé pour l'introduction de nouvelles stratégies de suivi, allant de méthodes à fort coefficient de main d'œuvre à des méthodes à fort coefficient de technologie. Dans plusieurs cas, le manque de données adéquates et fiables et l'absence d'un repère de base par rapport auquel on pourra mesurer l'avancement réalisé, font de cette approche la démarche la plus réaliste.
- /// **Cartographie de la vulnérabilité des aquifères** : en général, les aquifères les plus vulnérables nécessiteront des efforts plus grands de suivi et, par conséquent, la cartographie de la vulnérabilité des aquifères peut constituer un moyen permettant d'établir un ordre de priorité des efforts de suivi.
- /// **Évaluation des risques** : l'évaluation des risques peut aider de manière significative à l'établissement d'un ordre de priorité des activités de suivi. Par exemple, un petit aquifère transfrontalier situé dans une zone à très faible densité de population est rarement affecté par des

risques. L'évaluation des risques peut également être utilisée en vue de déterminer si la stratégie de suivi retenue couvrira la plus grande partie des besoins en informations. L'utilisation de modèles contribuera à cette évaluation. Par ailleurs, l'optimisation de la conception d'un réseau inclura un élément d'évaluation des risques.

- /// **Modèles** : les modèles mathématiques jouent plusieurs rôles dans le suivi et l'évaluation des eaux souterraines transfrontalières. Outre le suivi, les modèles peuvent être utilisés en tant que partie des programmes d'optimisation du suivi. **Lors du choix de la modélisation des aquifères transfrontaliers, les pays concernés devront garder à l'esprit que la standardisation et l'accessibilité des données (interfaces avec les bases de données et le Système d'information géographique) sont absolument essentielles, plutôt que la standardisation des logiciels.**
- /// **Indicateurs** : dégager les bons indicateurs requiert une approche équilibrée entre les besoins en informations des décideurs politiques et les coûts et contraintes relatifs à l'acquisition des données adéquates. Une approche par étapes de sélection et d'élaboration des indicateurs est recommandée. Elle peut être basée sur les éléments principaux de gestion des eaux souterraines (des problèmes et pressions (menaces) ; et de l'impact des mesures sur le fonctionnement général du système aquifère).
- /// **Evaluation intégrée** : le besoin d'intégrer le suivi des eaux souterraines et des eaux de surface dépendra du degré d'interdépendance entre les processus et variables des eaux souterraines et des eaux de surface.

## II.2.4. Programmes de suivi

Les programmes de suivi et d'évaluation des eaux souterraines sont élaborés progressivement, et ce, au vu des contraintes administratives, budgétaires et de personnel. L'allocation de ressources au titre du suivi doit adopter une approche conçue à cet effet.

Un classement et un découpage des zones où les sources éventuelles de pollution (par exemple) sont localisées, ou au niveau desquelles l'usage des eaux souterraines est élevé, contribueront à une efficacité plus accrue du programme.

### ▶▶ ASPECTS D'ORDRE GÉNÉRAL

Une fois les objectifs techniques établis et les stratégies spécifiques élaborées pour les programmes de suivi respectifs, chaque stratégie pourra être associée à une conception du réseau de suivi.

La conception des réseaux de suivi comprend la définition :

- /// de la densité du réseau et l'emplacement des points de mesures ;
- /// des paramètres de suivi ;
- /// des types des points de suivi ;
- /// de la fréquence des mesures et de l'échantillonnage.

La conception est fonction de la sélection du type de point d'échantillonnage, de la densité et de l'emplacement, du mode ainsi que de la fréquence de l'échantillonnage, et du choix des paramètres comme illustré ci-après (tableau 5).

Les caractéristiques hydrogéologiques des aquifères transfrontaliers, les usages des eaux et l'occupation des sols, ainsi que la disponibilité des fonds, sont parmi les facteurs de base à prendre en compte lors de l'élaboration d'un réseau de suivi.

Les principaux aspects techniques des programmes de suivi sont : a) **la densité du réseau**, b) **le choix des sites**, c) **les paramètres**, d) **les mesures de la quantité et procédures d'échantillon-**

Point d'échantillonnage/ mesures		Fréquence de l'échantillonnage/ mesures	Choix des paramètres/ Charge d'eau
Type	Densité		
Hydrogéologie (complexité)	Hydrogéologie (complexité)	Hydrogéologie (temps de séjour)	Usages des eaux
	Géologie (distribution de l'aquifère)	Hydrologie (influences saisonnières)	Problèmes relatifs à la qualité des eaux
	Occupation des sols		Exigences légales
	Considérations statistiques	Considérations statistiques	
Coût	Coût	Coût	Coût

**TABLEAU 5 :** Facteurs déterminant la conception du réseau (d'après Chilton et autres, 1996)

nage, e) la fréquence d'échantillonnage et mesures de la quantité, f) les méthodes statistiques, g) les méthodes indirectes de suivi de la qualité des eaux souterraines, et h) les coûts. Une description de chaque aspect est donnée dans les paragraphes suivants.

### 1 Densité du réseau

La densité souhaitée d'un réseau est déterminée principalement par la complexité hydrogéologique et la complexité hydrochimique de l'aquifère. Les unités hydrogéologiques avec un degré élevé d'hétérogénéité nécessiteront un réseau plus dense de sites de suivi.

Dans le cas des aquifères affectés par une exploitation intensive et/ou autres impacts anthropiques (industrie, agriculture intensive, activités minières, décharges publiques, sites municipaux ou industriels abandonnés, etc.), la densité du réseau devra être plus élevée. En règle générale, des facteurs de pondération, tels que les caractéristiques de l'aquifère, la vulnérabilité, l'exploitation des eaux souterraines, l'usage des eaux et l'occupation des sols, ainsi que la population desservie en eaux souterraines, peuvent être utilisés en tant que référence dans la conception du réseau.

### 2 Sélection des sites

Le choix du type et de l'emplacement des points d'observation est souvent fonction de deux critères étroitement liés :

- /// la représentativité spécifique des points d'observation de l'aquifère ;
- /// la possibilité de déterminer la tendance spatiale dans les niveaux des eaux souterraines ou des charges hydrauliques sur l'échelle requise.

Les sites ou points d'observation d'un réseau doivent être représentatifs de :

- /// la délimitation des systèmes pertinents d'écoulement des eaux souterraines ;
- /// l'étendue des aquifères, aquitards et aquicludes, ou bien de la délimitation des unités hydrogéologiques ;
- /// toutes informations supplémentaires.

Lors du choix d'un site, diverses activités doivent être entreprises. Il s'agit notamment de :

- /// la caractérisation des systèmes aquifères et de la géométrie des principales formations aquifères ;
- /// l'évaluation de la vulnérabilité, basée notamment sur les conditions d'écoulement des eaux souterraines, la composition des sols et la géologie ;
- /// l'identification des menaces auxquelles le système aquifère est exposé et des problèmes qui l'affectent.

Les sites de suivi des eaux souterraines peuvent être des puits ou des forages, à condition qu'ils ne soient pas substantiellement affectés par des prélèvements des eaux souterraines dans les zones avoisinantes. Pour les réseaux de qualité des eaux souterraines, il est possible d'utiliser des sondages d'observation ou des puits de pompage. Il faut souligner que les sources peuvent également être utilisées en tant que sites de suivi, notamment à des fins d'échantillonnage des eaux souterraines. En ce qui concerne les données représentatives, une source peut remplacer un nombre de points d'observation.

### 3 Paramètres

Le choix des paramètres de suivi peut être lié aux éléments principaux de la gestion des eaux souterraines, et il dépendra :

- /// des exigences des fonctions et usages définis du système aquifère ;
- /// des menaces auxquelles le système aquifère est exposé ;
- /// des problèmes déjà existants.

Avant de procéder au choix des paramètres, il faut établir un inventaire qui regroupera les éléments suivants :

- /// la caractérisation quantitative et qualitative de l'aquifère (**réseaux de base/de référence**) ;
- /// l'identification des fonctions et usages réels des eaux souterraines et des exigences de qualité (par exemple fonction écologique, eau potable, agriculture, industrie) (**réseaux de conformité**) ;
- /// la spécification des menaces auxquelles ce système aquifère est exposé (telles que l'occupation des sols : agriculture, industrie, décharges publiques, sites miniers) (**réseaux d'alerte précoce et de surveillance**) ;
- /// la spécification des problèmes déjà rencontrés par le système aquifère (par exemple tarissement, salinisation, pollution) (**suivi à des fins spécifiques**).

Un ensemble de paramètres de base pour l'évaluation de la quantité des eaux souterraines par rapport à certaines problématiques et fonctions/usages, est récapitulé au tableau 6 suivant :

Problème	Fonctions et usages	Paramètres
Tarissement	Écosystèmes, agriculture	Niveaux des eaux souterraines
Sols hydromorphes	Écosystèmes, agriculture	Niveaux des eaux de surface et des eaux souterraines
Approvisionnement en eau	Eau potable, agriculture, écosystèmes	Niveaux des eaux souterraines, décharge (prélèvements)
Aspects relatifs à la qualité des eaux	Eau potable, écosystèmes	Niveaux/ Charges des eaux souterraines, décharge (prélèvements), niveaux des eaux de surface
Affaissement/subsidence des sols	Zone urbaine, agriculture	Niveaux des eaux souterraines et des eaux de surface, décharges (prélèvements)
Salinisation/intrusion d'eaux salines très minéralisées	Agriculture, eau potable	Niveaux/ Charges des eaux souterraines, décharge (prélèvements)

**TABLEAU 6** : paramètres d'évaluation de la quantité des eaux souterraines liés à certaines problématiques et fonctions/usages

Un ensemble de base de paramètres d'évaluation de la qualité des eaux souterraines (tableau 7) est regroupé en composés inorganiques et organiques, ainsi que par méthode d'analyse. Ce **tableau, qui est important en ce qui concerne les besoins en informations, présente uniquement une approche, mais il n'est pas assez détaillé pour un usage direct**. Une subdivision supplémentaire est requise, puisqu'il est bien souhaitable d'avoir une approche formelle dans laquelle les

métaux, les pesticides et les autres composés organiques puissent être choisis, de façon à ce que les ensembles 3, 4 et 5 puissent être liés aux conditions locales.

Problèmes	Fonctions et usages	Ensembles/Groupes	Paramètres
Acidification, salinisation	Écosystèmes, agriculture	❶ Paramètres de terrain	Température, pH, Oxygène Dissous (OD), Conductivité Electrique (CE)
Salinisation, excès de nutriments	Eau potable, agriculture, écosystèmes	❷ Ions principaux	Ca, Mg, Na, K, HCO <sub>3</sub> , Cl, SO <sub>4</sub> , PO <sub>4</sub> , NH <sub>4</sub> , NO <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , TOC, EC, bilan ionique.
Pollution par des substances dangereuses	Eau potable, écosystèmes	❸ Ions mineurs et éléments en trace	Le choix dépend en partie des sources de pollution locales, telles qu'indiquées par une approche basée sur l'occupation des sols
		❹ Composés organiques	Hydrocarbures aromatiques, hydrocarbures halogènes, phénols, chlorophénols. Le choix dépend en partie des sources de pollution locales telles qu'indiquées par une approche basée sur l'occupation des sols.
			❺ Pesticides
Pollution par des substances dangereuses	Eau potable, agriculture	❻ Bactéries	Coliformes totaux, Coliformes fécaux.

**TABLEAU 7 :** ensembles de paramètres d'évaluation de la qualité des eaux souterraines liés à certaines problématiques et fonctions/usages (d'après Chilton et autres, 1994). Les substances de la Liste II sont : Fe, Mn, Sr, Cu, Pb, Cr, Zn, Ni, As, Hg, Cd, B, F, Br et cyanure (Directive sur l'Eau Potable et le Nitrate)

#### ❹ Mesure de la quantité et procédures d'échantillonnage

Les niveaux des nappes doivent être mesurés par rapport à un point de référence fixe. Les données de niveau observés sur des puits doivent être consignées dans des fiches spécifiques et adressées à l'organisme concerné.

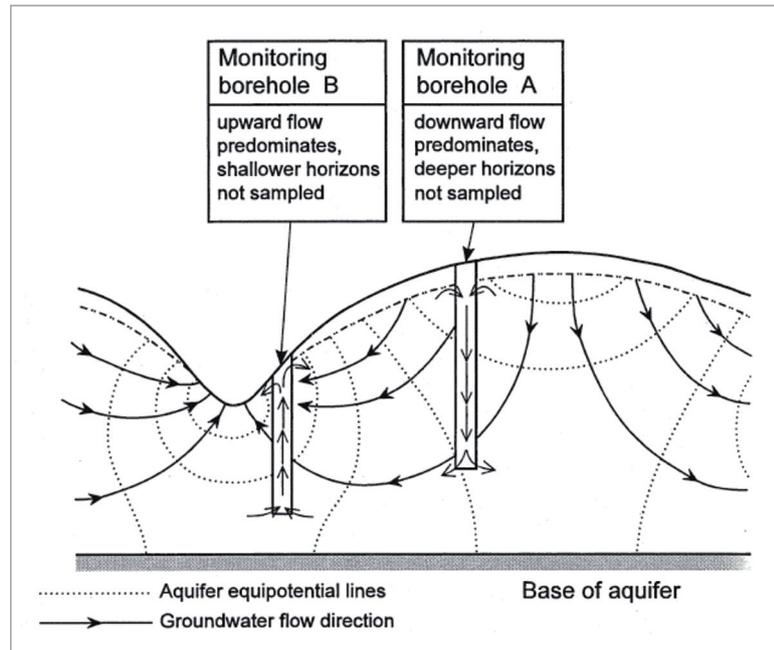
Une attention particulière sera accordée au degré auquel le niveau d'eau mesuré est représentatif des conditions réelles de la charge hydraulique. Par exemple, là où il existe un prélèvement d'eaux souterraines, l'influence de ce pompage sur la variation des niveaux de la nappe devra être prise en compte. **Dans le cas des aquifères transfrontaliers captifs ou multi-couches, la confection de groupes de points de suivi à diverses profondeurs devra être envisagée. Ceci est aussi valable pour les réseaux de suivi de la qualité des eaux.**

Les procédures d'échantillonnage varient en fonction du paramètre ou du groupe de paramètres à mesurer. Certains paramètres, tels que la température, le pH, l'Oxygène Dissout (OD) et la Conductivité Electrique (CE), peuvent être mesurés directement in situ (sur le terrain). D'autres paramètres devront faire l'objet d'analyses en laboratoire. Dans ce cas, les échantillons sont prélevés et doivent être transportés dans des conditions spéciales. Lorsqu'un ensemble important de paramètres est requis, plusieurs échantillons sont nécessaires, dont chacun sera gardé dans un type de récipient selon une technique de conservation différente.

Les échantillons d'eau sont prélevés dans des puits et forages de prélèvement et/ou forages d'observation. Les échantillons d'eau brute à partir de forages ou de sources productifs peuvent fournir des échantillons globaux acceptables de la qualité de l'eau, notamment lorsque les fo-

rages pénètrent l'aquifère plus ou moins complètement et que ce dernier est crépiné sur une bonne partie de son épaisseur (figure 6).

Ces échantillons sont moins représentatifs lorsqu'il existe des variations verticales dans la chimie des eaux souterraines. Un échantillon d'eau pris dans un forage d'exploitation peut également constituer un mélange variable de l'eau souterraine ayant pénétré la partie crépinée ou ouverte du forage, laquelle peut être très longue. Dans ce cas, l'eau est puisée sur une épaisseur importante de l'aquifère, voire de plus d'un seul aquifère. Les échantillons prélevés à partir de ce type de forage peuvent constituer un indicateur insensible à une éventuelle détérioration de la qualité des eaux souterraines induite par des activités menées à la surface du sol.



**FIGURE 6 :** effet des composants de l'écoulement vertical sur les forages de suivi complètement crépinés ou ouverts [d'après Foster et Gomes, 1989]

Un autre problème de représentativité des échantillons est lié au forage lui-même lorsqu'il est situé dans les aires de recharge ou d'exutoire des eaux souterraines avec des composants verticaux importants de l'écoulement des eaux souterraines.

Le prélèvement des échantillons d'eaux souterraines à partir de puits de suivi doit se faire en deux temps :

- // **la première étape consiste à retirer l'eau stagnante à partir du puits :** une pompe électrique puissante peut être utilisée, mais la capacité de pompage doit être adaptée aux conditions hydrogéologiques. En général, le rabattement du niveau des eaux souterraines ne devrait pas dépasser les 2 mètres, ou plus de 10 % de l'épaisseur, de la zone saturée de l'aquifère. Pour l'échantillon lui-même, une basse vitesse de pompage est de mise afin de prévenir une entrée d'air. La pompe est descendue dans le puits jusqu'au niveau de la crépine, mais toujours un peu au-dessus de la crépine (afin d'éviter d'endommager la pompe par l'apport de sable, ainsi qu'en raison de l'hydraulique du puits). L'extraction de l'eau stagnante doit être contrôlée par la mesure de la valeur du pH, de la température de l'eau souterraine et/ou de la conductivité électrique.
- // **la seconde étape constitue la prise de l'échantillon :** les échantillons doivent être prélevés après que ces paramètres se soient stabilisés.

Les échantillons aux fins de l'analyse inorganique doivent normalement être filtrés avant leur conservation afin d'éliminer les particules en suspension qui risquent de se dissoudre lorsque les conservateurs acides sont rajoutés, induisant ainsi des valeurs biaisées de concentration des solutions.

**Les pays concernés** (Mali, Niger, Nigeria) **doivent convenir des méthodes standard d'échantillonnage.** L'échantillonnage doit être effectué par un personnel qualifié. Les analyses chimiques doivent être réalisées par des laboratoires agréés.

## 5 Fréquence d'échantillonnage et périodicité des mesures de la qualité

Les fréquences d'échantillonnage dans les programmes de suivi de la qualité des eaux souterraines se font normalement sur la base de considérations relatives au budget et aux ressources, ainsi qu'aux stratégies. Cependant, il existe également des considérations d'ordre scientifique et technique. La fréquence de l'échantillonnage comprend des dimensions hydrologiques et hydrogéologiques (tableau 5).

**La dimension hydrologique** implique la possibilité de variations saisonnières de certains paramètres de qualité. La recharge des eaux souterraines intervient de manière saisonnière. Le début de la recharge peut provoquer un lessivage accru de solutés à partir de la surface du sol suivi d'une plus grande dilution. Ces variations saisonnières peuvent également être importantes par rapport aux paramètres dont l'usage est fortement saisonnier, comme par exemple l'utilisation des pesticides agricoles et non agricoles.

**Les fréquences d'observation** des niveaux des nappes dépendent largement de la fluctuation des eaux souterraines, laquelle est déterminée par la situation hydrogéologique (type et profondeur de l'aquifère), les circonstances hydrologiques (météorologie) et l'impact humain (prélèvements des eaux souterraines, recharge induite, débit en retour à partir de l'irrigation, contrôle du niveau des eaux de surface). Les facteurs à prendre en compte sont :

- /// la fréquence des mesures doit être ajustée à la fluctuation temporelle des niveaux et la précision requise quant à l'identification des modes de fluctuation ;
- /// le suivi des variations et tendances à long terme requiert une fréquence relativement basse d'observation, alors que l'identification précise des fluctuations saisonnières nécessite une fréquence plus élevée ;
- /// la conception du réseau doit être adaptée à l'ensemble des objectifs pertinents et les critères de conception doivent être adéquats, au vu des fonds disponibles.

Dans la pratique, une large gamme de fréquences est utilisée, allant d'une fois par an, à deux fois par mois, à un suivi permanent (enregistrement en continu).

## 6 Méthodes statistiques

Aux fins de la conception du réseau, il existe plusieurs approches et méthodes statistiques (Loaiciga et autres, 1992). Deux domaines généraux peuvent être identifiés :

- /// **la représentativité** : optimiser le réseau afin de s'assurer que la complexité hydrogéologique et les variables de qualité soient adéquatement représentées ;
- /// **l'évaluation fiable** : fournir un conseil sur la fréquence d'échantillonnage requise à même de déceler les changements temporels intervenant dans la concentration moyenne de tout paramètre.

## 7 Méthodes indirectes de suivi de la qualité des eaux souterraines

Dans certaines circonstances, et pour des objectifs et paramètres spécifiques, il est possible d'utiliser des méthodes indirectes de suivi de la qualité des eaux souterraines. Ces méthodes sont les suivantes :

- /// l'usage de la **conductivité fluide** au niveau des puits d'observation afin d'assurer un suivi de l'évolution tri-dimensionnelle de l'intrusion saline constitue l'un de ces cas ;
- /// l'usage des **méthodes géophysiques** est le plus efficace là où les différences de qualité des eaux souterraines sont assez grandes pour induire des contrastes physiques. C'est le cas des

diagraphies. La mesure de la **résistivité au sol** au moyen de la géophysique de surface peut être utilisée dans certaines situations hydrogéologiques pour évaluer l'étendue latérale de la salinité à travers un aquifère ;

- ⚡ l'usage des **méthodes de détection des gaz dans le sol**, pour les sources ponctuelles de pollution impliquant des hydrocarbures volatiles, peut fournir un moyen assurant un rapport coût-efficacité d'étude de l'évolution d'une gamme de contaminants.

Chacune de ces méthodes indirectes dépend d'un contrôle adéquat issu d'un échantillonnage direct quelconque basé sur un forage d'investigation et de la réalisation de points de suivi permanent.

## 8 Coûts

**Des sites de suivi existants ou des puits de production** situés au niveau de l'aquifère trans-frontalier **doivent toujours être pris en compte lors de la phase initiale** du programme de suivi, notamment à des fins d'échantillonnage des eaux souterraines. Si possible, des puits de propriété publique devront être choisis pour assurer une continuité d'accès.

Au vu des aspects financiers de la conception du réseau, une **distinction pourra être faite entre les composantes d'investissement, d'échantillonnage et celles d'ordre analytique.**

Concernant les réseaux d'évaluation de la quantité des eaux souterraines (tableau 8), les coûts d'investissement ainsi que les coûts d'échantillonnage (observation) seront plutôt moins élevés que ceux relatifs aux réseaux d'évaluation de la qualité des eaux souterraines. Les traitements relatifs aux données d'observation des eaux souterraines (niveaux), tels que la vérification et le contrôle de la qualité, sont considérés comme faisant partie de la gestion des données. Par conséquent, il n'y a dans ce cas pas de coût analytique.

L'amélioration de l'évaluation de la quantité des eaux souterraines a de fortes implications en termes de coût d'observation, dans le cas où cette amélioration nécessite une densité plus élevée de points de mesure et une fréquence de mesure plus élevée. Les coûts supplémentaires de gestion des données sont relativement modestes par rapport aux coûts de mesures.

L'amélioration de l'évaluation de la qualité des eaux souterraines (tableau 9) n'a de fortes implica-

Composante de coût	Points de mesure		Fréquence de mesure
	Type	Densité	
<b>Coût d'investissement</b>	Incidence importante	Incidence importante	Incidence négligeable
<b>Coût d'observation (mesures)</b>	Incidence mineure	Incidence importante	Incidence importante
<b>Coût de gestion des données</b>	Incidence négligeable	Incidence mineure	Incidence mineure

**TABLEAU 8 :** Incidence de la conception du réseau d'évaluation de la quantité des eaux souterraines sur les coûts de suivi

tions en termes de coût d'investissement que si un nombre important de points d'échantillonnage nouvellement implantés est requis en remplacement de points non adéquats ou pour assurer une couverture supplémentaire. En comparaison, les exigences en coût d'investissement pour des pompes supplémentaires d'échantillonnage ou pour du matériel de terrain sont relativement modestes. Il y aura toujours une provision pour coût d'investissement à long terme afin de pouvoir suivre les avancées en termes de matériels, ainsi que pour satisfaire les exigences de seuils de détection toujours plus réduits.

Composante de coût	Points d'échantillonnage		Fréquence d'échantillonnage	Choix des paramètres
	Type	Densité		
Coût d'investissement	Incidence importante	Incidence importante	Incidence négligeable	Incidence mineure <sup>1</sup>
Coût d'échantillonnage	Incidence mineure	Incidence importante	Incidence importante	Incidence mineure <sup>2</sup>
Coût d'analyse	Incidence négligeable	Incidence importante	Incidence importante	Incidence importante

<sup>1</sup> Peut avoir une certaine incidence sur les besoins en matériel des laboratoires.

<sup>2</sup> L'intégration de paramètres de terrain augmente les coûts d'échantillonnage.

**TABLEAU 9 :** incidence de la conception du réseau d'évaluation de la qualité des eaux souterraines sur les coûts de suivi (D'après Chilton et Milne, 1994)

## ►► EXIGENCES DE CONCEPTION SPÉCIFIQUES POUR DIFFÉRENTS TYPES DE SUIVI

Des stratégies de suivi et d'évaluation différentes signifient souvent des réseaux de suivi et des programmes d'évaluation différents. Lors de l'élaboration de programmes d'évaluation pour les aquifères transfrontaliers, l'objectif et les exigences de chaque programme de suivi doivent être établis et convenus par les pays concernés.

### 1 Suivi de base/de référence

**Pour un suivi de base/de référence, un réseau de base doit être installé ou des réseaux existants peuvent être échantillonnés.** Les points de mesure et d'échantillonnage font fonction de stations de référence et sont régulièrement suivis à des intervalles moyens. **La fréquence de suivi** est d'environ **quatre fois l'an**, selon les caractéristiques de l'aquifère. Pour un aquifère libre, la fréquence de mesure et d'échantillonnage sera plus élevée que pour un aquifère captif. De plus, la densité de ce type de réseau est moyenne. Les paramètres à échantillonner sont normalement les paramètres de terrain et les principaux ions (groupes de paramètres de la nappe pour l'évaluation de la qualité des eaux souterraines liée à certaines problématiques et fonctions/usages), mais ils dépendent également des objectifs, occupation des sols et type de puits. Pour les eaux souterraines transfrontalières, les pays concernés doivent convenir des objectifs et des implications qui en résultent pour la conception du réseau.

### 2 Suivi lié aux fonctions et usages (conformité)

La densité des réseaux et la fréquence d'échantillonnage dépendent des fonctions et usages des eaux souterraines. Un exemple est le suivi d'assurance qualité relatif aux approvisionnements en eau potable, impliquant des échantillonnages périodiques de puits publics afin de déterminer si les normes d'eau potable sont satisfaites. Pour les approvisionnements en eau potable, chaque fonction a ses propres normes.

### 3 Suivi à des fins spécifiques

La densité du réseau et la fréquence de mesure et d'échantillonnage seront souvent plus élevées que pour les réseaux de suivi mentionnés ci-haut et sont étroitement liées à l'occupation des sols et au type d'aquifère. Dans un contexte transfrontalier, ce type de suivi nécessite une coopération étroite entre les pays concernés.

### 4 Alerte précoce et suivi de surveillance

Les activités d'alerte précoce et de suivi de surveillance sont pour la plupart effectuées à un niveau local et ont une densité plus élevée que celle des réseaux de base/de référence. Les fréquences d'échantillonnage et d'observation sont elles aussi souvent assez élevées. Des paramètres spécifiques doivent être échantillonnés, en fonction des menaces et de l'occupation des sols.

**D'une manière générale, les règles de base d'un programme de suivi réussi sont les suivantes :**

- /// les objectifs doivent être préalablement définis et le programme doit être adapté aux objectifs, et non le contraire (comme cela est souvent le cas dans un suivi polyvalent). Ensuite, un soutien financier adéquat devra être obtenu.
- /// le type et la nature de l'aquifère doivent être bien appréhendés (le plus souvent au moyen d'études préliminaires), y compris la variabilité spatiale et temporelle à l'intérieur de l'aquifère. Des sources d'information très utiles seront les cartes à une échelle appropriée (ex. : 1:200.000) de l'aquifère transfrontalier concerné :
  - cartographie hydrogéologique et de vulnérabilité de la zone (si disponible) ;
  - cartographie (isolignes) des formations géologiques sous-jacentes et sur-jacentes des aquifères ;
  - cartographie des changements des niveaux des eaux souterraines ;
  - cartographie et listes des points d'eau (profils caractéristiques et paramètres hydrogéologiques), puits de suivi/piézomètres (avec leurs données de base), prélèvements importants d'eau souterraine (puits ou champs de captage), données sur l'emplacement et sur les prélèvements, et puits d'échantillonnage régulier de la qualité des eaux (liste de paramètres) ;
  - toutes les données isotopiques concernant l'âge et l'origine des eaux souterraines (exemple du delta intérieur du fleuve Niger) ;
- /// le type de puits (ou source) adéquat doit être choisi ;
- /// les paramètres, type et fréquence des mesures et de l'échantillonnage, ainsi que les emplacements, doivent être choisis par rapport aux objectifs ;
- /// le matériel analytique de terrain et les moyens de laboratoire et d'analyse des données (ex. les modèles) doivent être choisis en fonction des objectifs, et non pas le contraire ;
- /// un schéma de traitement des données intégré et opérationnel (Protocole d'analyse des données : PAD) doit être établi ;
- /// le suivi des eaux souterraines doit être couplé d'un suivi des eaux de surface, le cas échéant ;
- /// la qualité des données collectées doit être vérifiée de manière régulière par le biais d'un contrôle interne et externe. Les données doivent être transmises aux décideurs politiques, non pas réduites à une liste de variables et leurs concentrations ou niveaux, mais plutôt sous forme interprétée et évaluée par des experts, et accompagnée de recommandations pour des actions de gestion (telles que soutenues par des indicateurs) ;
- /// le programme doit être évalué périodiquement, notamment si la situation générale a changé ou au cas où une incidence particulière sur le système d'écoulement des eaux souterraines a été modifiée, soit de manière spontanée ou induite par les mesures prises.

## **II.2.5. Gestion des données**

Les données de suivi recueillies par les pays concernés pour les aquifères transfrontaliers doivent être comparables, prêtes à une intégration avec des informations issues de diverses sources et pouvant facilement être agrégées aux niveaux spatial et temporel.

Les données générées par les programmes de suivi des eaux souterraines doivent être validées, stockées et mises à disposition. Le but de la gestion des données est de convertir les données en informations qui répondent aux besoins spécifiés en informations, ainsi qu'aux objectifs y afférents du programme de suivi.

### **▶▶ ÉTAPES DE GESTION DES DONNÉES**

La collecte et le traitement des données représentent une procédure coûteuse. Les aspects essentiels sont la collecte des données pertinentes selon une procédure de contrôle de la qualité,

en utilisant les outils et techniques statistiques appropriés et en communiquant les messages en temps opportun et de manière compréhensible. Ces exigences peuvent paraître assez simples ; cependant, elles ne sont pas souvent satisfaites et requièrent un effort considérable en matière de connaissances et de matériels afin d'assurer le retour escompté sur l'investissement engagé en collecte des données. Les pays concernés ont déjà harmonisé leurs méthodes de suivi et de convenir de formats standard.

Afin d'assurer une utilisation future des données collectées, plusieurs étapes de gestion sont nécessaires avant que les informations puissent être utilisées convenablement :

- /// les données doivent être analysées, interprétées et converties en formats d'information définis, en utilisant des techniques appropriées d'analyse des données ;
- /// les données collectées doivent être validées et approuvées avant qu'elles ne soient mises à la disposition de tout usager ou consignées dans une archive de données ;
- /// les informations doivent être communiquées à ceux qui en ont besoin pour la prise de décision, la validation des modèles, l'évaluation de la gestion ou l'investigation approfondie. Les informations doivent aussi être présentées sous des formats personnalisés pour les divers groupes cibles (par exemple les cartes issues du Système d'Information Géographique SIG sont facilement accessibles) ;
- /// les données et informations nécessaires à une utilisation future doivent être stockées, et l'échange des données doit être facilité non seulement au niveau de l'organisme de suivi lui-même, mais également aux autres niveaux pertinents (international, aquifère, etc.).

#### ▶▶ LEXIQUE DES DONNÉES

Le premier archivage des données de suivi est normalement effectué au niveau des agences de suivi (Directions des Ressources en eau ou de l'Hydraulique) dans chacun des pays concernés. La coopération transfrontalière comprendra l'échange de données, notamment lorsque la modélisation est utilisée dans le cadre d'évaluations conjointes (c'est le cas du Système aquifère d'Iullemeden SAI). Ensuite, les bases de données doivent être harmonisées selon le besoin. Afin de faciliter la comparabilité des données, des accords rigoureux et précis doivent être établis concernant à la fois les données principales et les données supplémentaires. Au cas où les données sont destinées à un stockage, un soin particulier doit être accordé aux logiciels de gestion des données, ainsi qu'aux formats de stockage des données, afin de favoriser les possibilités d'échange de ces données.

Par ailleurs, des accords relatifs à la disponibilité et à la dissémination des données sont de nature à faciliter l'échange à cet égard. **Un lexique de données** comprenant ces informations et les accords sur la définition des termes utilisés pour l'échange des informations ou données **doit être convenu et établi de manière conjointe.**

#### ▶▶ VALIDATION DES DONNÉES

Outre le contrôle de la qualité des procédures individuelles (forage, puits, échantillonnage, analyse), la validation des données doit constituer une partie intégrante de la manipulation (traitement) des données. Le contrôle régulier des données nouvellement générées doit inclure la détection des anomalies, valeurs manquantes et autres erreurs évidentes (par exemple mg/l versus µ/l). Les logiciels informatiques peuvent aider à effectuer les diverses fonctions de contrôle, telles l'analyse des corrélations et l'application des paires limites.

Une fois les données parfaitement vérifiées et les corrections et ajouts effectués, les données pourront être approuvées et mises à disposition.

## STOCKAGE DES DONNÉES PRINCIPALES ET DONNÉES SUPPLÉMENTAIRES

Pour les rendre disponibles à une utilisation future, les données doivent être stockées de manière à ce qu'elles soient accessibles et complètes par rapport à l'ensemble des conditions et réserves (par exemple limites de détection) inhérentes à la collecte et l'analyse des données. Les informations relatives aux dimensions et unités (NO3-N ou NO3) doivent être stockées.

Par ailleurs, une quantité suffisante de données supplémentaires, nécessaires à l'interprétation, doit être stockée. Les caractéristiques relatives à l'emplacement de l'échantillonnage et de sa profondeur, type de point d'observation, et techniques de pré-conditionnement et d'analyse sont généralement stockées.

**Les immenses quantités de données recueillies** à partir des réseaux de suivi des eaux souterraines sont de préférence **stockées dans des bases de données relationnelles**, qui devront constituer **la pierre angulaire d'un système d'information géographique (SIG) intégré**. Pour autant que celles-ci soient stockées dans une base de données bien conçue, un système d'information est nécessaire pour gérer, extraire et visualiser les données stockées sous des formats tels que cartes, graphiques, diagrammes, et rapports. Des interfaces graphiques rendront le système de gestion des données encore plus convivial, étant donné qu'une connaissance de la structure physique de la base de données n'est plus nécessaire. Le SIG constituera une sorte d'échafaudage autour de la base de données.

Dans le cas du projet SAI, les informations et les données collectées au Mali, au Niger et au Nigeria (climatologie, hydrologie, géologie, hydrogéologie), ont permis de mettre en place un système d'information commun composé d'une base de données et d'un Système d'Information Géographique (SIG). La base de données compte près de 17 200 points d'eau soit 740 au Mali, 16 170 au Niger et 300 au Nigeria (figure 7).

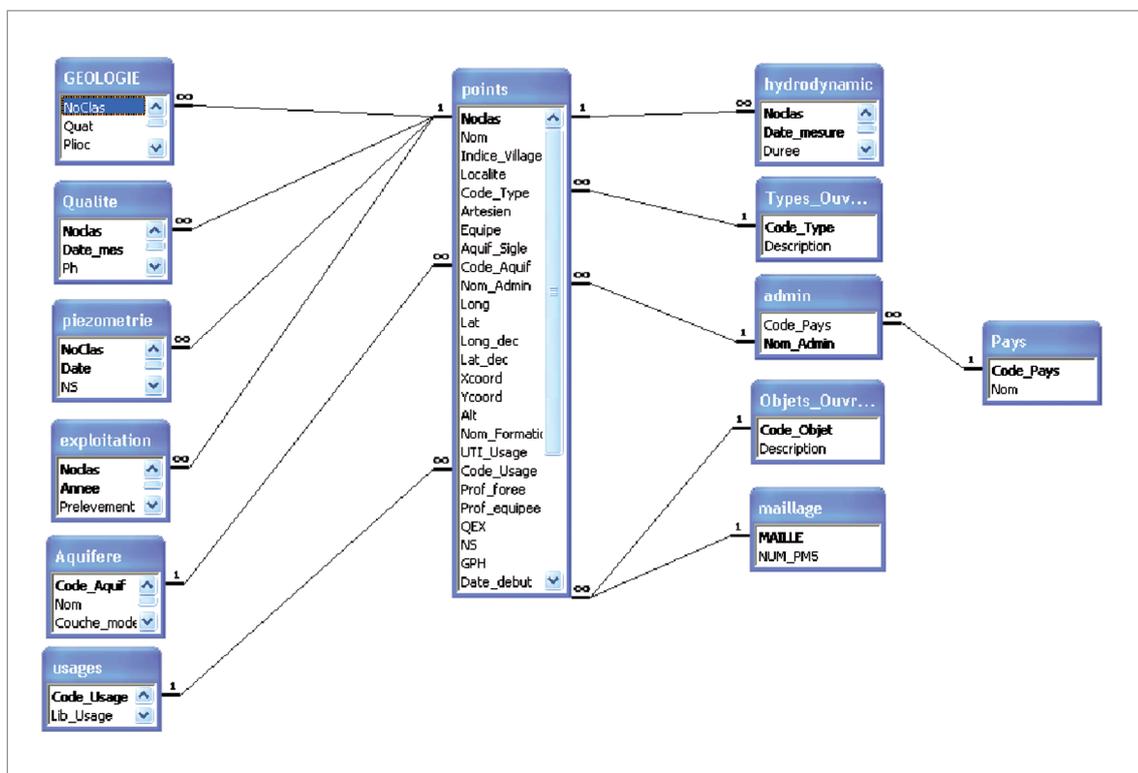


FIGURE 7 : structure de la Base de données du SAI

Le SIG a permis de mieux visualiser l'information et de faciliter son traitement grâce aux cartes

thématiques produites comme les cartes d'évolution décennale du nombre de points d'eau (figure 8), les cartes piézométriques et les cartes des paramètres hydrodynamiques du système.

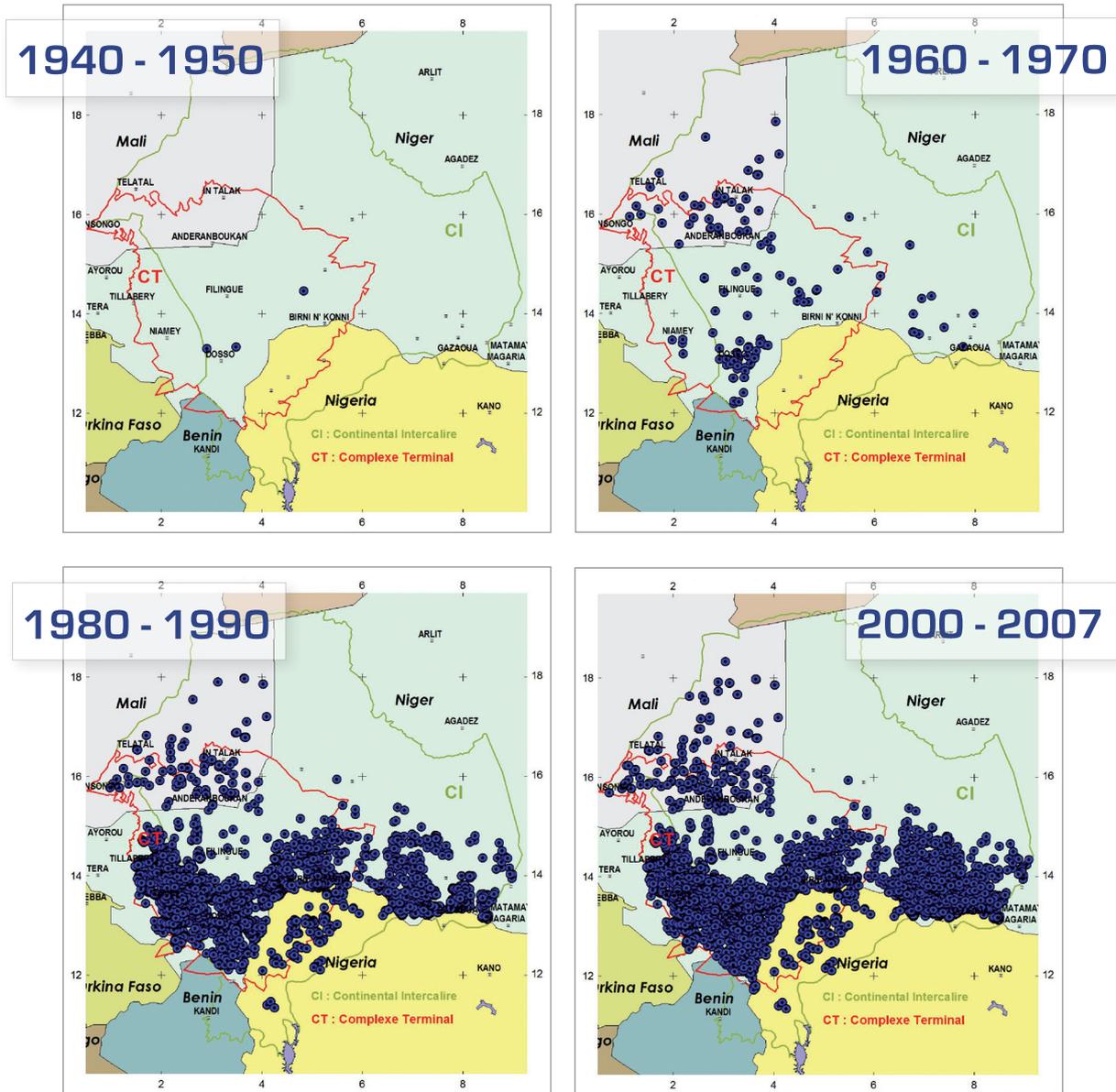


FIGURE 8 : Carte de répartition des points d'eau réalisés dans le SAI

Il est essentiel que tout système de base de données soit protégé contre des entrées de données principales sans données supplémentaires. Souvent, il est nécessaire d'effectuer une modélisation conjointe par les pays concernés, et cela exige des formats d'échange de données numériques convenus.

### ▶▶ ANALYSE DES DONNÉES ET INTERPRÉTATION DES DONNÉES

La conversion des données en informations implique l'analyse et l'interprétation de ces données. L'analyse des données doit être intégrée au niveau du Protocole d'analyse des données (PAD) qui définit clairement une stratégie d'analyse des données et tient compte des caractéristiques spécifiques des données concernées, telles que les données manquantes, limites de détection, données censurées, anomalies, aberrations, et corrélation en série. L'adoption des PAD confère à l'organisation de collecte des données ou à l'organisme commun une certaine flexibilité dans ses procédures d'analyse des données, mais requiert que ces procédures soient documentées.

De manière générale, les données seront stockées dans des ordinateurs, et l'analyse des données, qui est principalement une opération statistique, peut recourir à des logiciels génériques et/ou SIG. Pour réaliser une analyse automatique standard des données, l'usage d'un logiciel adapté est recommandé. Un PAD doit comprendre des procédures de traitement des données de suivi visant à satisfaire les besoins spécifiques de l'interprétation des données (par exemple les calculs basés sur des données de mesures individuelles ou sur des moyennes annuelles, et les techniques statistiques utilisées afin d'éliminer les influences déterministes non pertinentes). Ces procédures doivent également comprendre des méthodes admises pour la détection de tendances et pour les tests de conformité.

### ▶▶ ECHANGE DE DONNÉES

Un formulaire standard (ou format) a été élaboré aux fins de l'échange des données numériques. Le lexique des données doit constituer la base de la définition de ce formulaire standard ou ce format. Les systèmes de stockage des données dans les pays concernés doivent être capables de traiter le format d'échange de données convenu et, dans l'idéal, permettre l'importation de données dans les logiciels de modélisation ou d'analyse. Aux fins du stockage, un système commun pourrait être envisagé, dans le cadre d'une coordination assurée par un organisme commun (la structure de coordination).

### ▶▶ COMMUNICATION

Le Protocole d'analyse des données (PAD) peut être élargi aux formats de communication des informations générées (par exemple les cartes produites à partir d'un SIG). Un protocole de communication peut aider à définir les différentes caractéristiques pour chaque utilisation ou public et doit inclure certaines directives relatives à la fréquence de production, contenu/détails des informations et formats de présentation. Les objectifs du suivi doivent toujours être présentés comme constituant une partie de l'information communiquée.

La standardisation des rapports et cartes est encouragée pour chaque aquifère transfrontalier. Des rapports fiables fournis par les pays concernés, décrivant l'état de leurs eaux souterraines transfrontalières concernant les usages humains sans risques et le fonctionnement écologique, nécessiteront des améliorations au niveau de la comparabilité des données (par exemple la standardisation des forages, des puits, échantillonnage et modélisation), ainsi qu'au niveau de l'élaboration du Protocole d'analyse des données (PAD).

La communication des informations constitue l'étape finale du programme de gestion et établit le lien entre la collecte des données et les utilisateurs des informations. Pour disséminer les informations, les rapports doivent être préparés de manière régulière. La fréquence et le niveau de détail dépendent de l'utilisation des informations. Le personnel technique aura besoin de rapports détaillés plus fréquemment que les décideurs politiques. Il est préconisé de prévoir des rapports (annuels) sur l'état de chaque système d'eaux souterraines transfrontalières afin de focaliser sur le lien entre les mesures ayant trait aux politiques (réponse sociétale) et l'état des eaux souterraines concernées.

Une large communication (reporting) qui couvrirait l'ensemble des aquifères transfrontaliers identifiés des pays concernés est également préconisée (par exemple une fois toutes les trois années) afin d'encourager l'évaluation de l'état d'avancement, stimuler l'engagement des membres impliqués, et mettre les résultats obtenus à la disposition du public.



### III. CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

---

Lors du séminaire régional (Rome, les 19 et 20 octobre 2006), le Mali, le Niger et le Nigeria sont parvenus à un consensus clair sur le besoin de mettre en place un mécanisme de concertation, sur sa structure et ses attributions, ainsi que sur l'approche à adopter pour son établissement. Les pays ont approuvé une esquisse amendée du Protocole d'accord concernant le mécanisme à soumettre aux autorités compétentes.

Ce Protocole d'accord comprend l'intégration des aspects relatifs au suivi et à l'évaluation des eaux souterraines transfrontalières parmi les attributions de l'unité de coordination du mécanisme de concertation. Les pays concernés doivent, au moment opportun :

- /// assigner à l'organisme commun la tâche de suivi et évaluation des eaux souterraines transfrontalières ;
- /// assigner à cet organisme commun la responsabilité d'évaluer l'efficacité des mesures convenues et les améliorations qui en résultent au niveau de la gestion des eaux souterraines.

De manière générale, les tâches assignées aux organismes communs comprennent les actions suivantes :

- /// collecter, compiler et évaluer les données afin d'identifier les sources de pollution susceptibles de provoquer un impact transfrontalier ;
- /// élaborer des programmes communs de suivi de la qualité et de la quantité des eaux ;
- /// établir des inventaires et échanger des informations relatives aux sources de pollution citées ci-haut ;
- /// arrêter des limites d'émissions pour les eaux usées et évaluer l'efficacité des programmes de contrôle ;
- /// mettre au point des objectifs de qualité des eaux et des critères relatifs à la prévention, au contrôle et à la réduction des impacts transfrontaliers, ainsi que proposer les mesures à même de maintenir et, le cas échéant, améliorer la qualité des eaux ;
- /// élaborer des programmes d'action concertés visant la réduction des charges de pollution induites à la fois par les sources ponctuelles (ex. sources municipales et industrielles) et par les sources diffuses (notamment dues à l'agriculture) ;
- /// établir des procédures d'alerte précoce ;
- /// constituer un forum d'échange d'informations sur les usages actuels et envisagés de l'eau, ainsi que sur les ouvrages associés, susceptibles d'induire des impacts transfrontaliers ;
- /// promouvoir la coopération et l'échange d'informations sur la meilleure technologie disponible, ainsi que favoriser la coopération en matière de programmes de recherche scientifique ;
- /// participer à la réalisation des études d'impact sur l'environnement relatives aux eaux transfrontalières, conformément à la réglementation internationale y afférente ;
- /// là où deux organismes communs ou plus existent au sein du même bassin, ceux-ci doivent veiller à assurer une coordination de leurs activités afin de renforcer la prévention, le contrôle et la réduction des impacts transfrontaliers.



# BIBLIOGRAPHIE

---

**ALMÁSSY, E. AND ZS. BUZÁS (1999).** Inventory of transboundary groundwaters (background report, volume 1). ISBN 9036952742

**ARNOLD, G.E., R. CHRIASTEL, V. NOVAK, N.S. OGNIANIK AND Z. SIMONFFY (1999).** Application of models (background report, volume 3). ISBN 903695276X

**ECE/UNEP, 2000.** Water management: Guidance on public participation and compliance with agreements. 61 pages.

**GRIFT, B. VAN DER, AND J.G.F. VAN DAEL (1999).** Problem-oriented approach and the use of indicators (background report, volume 2). ISBN 9036952751

**IWAC WEB-SITE** ([www.iwac-riza.org](http://www.iwac-riza.org))

**LOAICIGA, H.A. ET AL., 1992.** Review of groundwater quality monitoring network design. ASCE Task Force Committee on Groundwater Monitoring Network Design. Journal of Hydraulic Engineering, 118(1): 11-37.

**OSS, 2003.** Système aquifère du Sahara septentrional – Gestion commune d'un bassin transfrontière. Rapport de synthèse. 129 pages.

**OSS, 2005.** Mise en place du réseau piézométrique du SASS. 50 pages.

**UIL, H., F.C. VAN GEER, J.C. GEHRELS AND F.H. KLOOSTERMAN (1999).** State of the art on monitoring and assessment of groundwaters (background report, volume 4). ISBN 9036952778.

**UN/ECE (2000).** Guidelines on Monitoring and Assessment of Transboundary Groundwaters. ISBN 9036953154.

**UNECE, 1996.** State of the Art on Monitoring and Assessment of Rivers. 120 pages.

**UNECE, 2002.** Guidelines on Monitoring and Assessment of Transboundary Rivers. 88 pages.

**UNECE, 2002.** Technical report: guidance to operation of water quality laboratories. 94 pages.

**UNECE, 2006.** Strategies for monitoring and assessment of transboundary rivers, lakes and groundwaters. 34 pages.

**UNESCO, 2001.** Internationally Shared (transboundary) Aquifer Resources Management ISARM. IHP-VI, IHP Non Serial Publications in Hydrology. 73 pages. UNESCO, IAH, UNECE, FAO.

**UNESCO, 2007.** Groundwater Resources Sustainability Indicators. IHP-VI Series on groundwater n° 14.





# Systeme Aquifere d'Iullemeden

## Tome V – Suivi-évaluation des aquifères transfrontaliers

L'étude des risques hydrogéologiques du Système aquifère d'Iullemeden (SAI) partagé par le Mali, le Niger et le Nigeria a doté les pays d'acquis incontournables pour une gestion concertée de la ressource. Il s'agit du renforcement de leurs capacités et la mise à leur disposition d'outils communs: une base de données, un système d'information géographique et un modèle mathématique. Les pays ont adopté la création et la mise en place d'un mécanisme de concertation pour pérenniser les acquis et œuvrer pour une gestion intégrée, concertée et durable des ressources en eau du SAI.

Après l'actualisation des connaissances sur le système, il est nécessaire de mettre en place un réseau de suivi des aquifères. Cependant, il n'existe pas encore de réseau piézométrique de référence à l'échelle de l'ensemble du bassin qui permet de suivre et d'évaluer les ressources en eau transfrontalière sur le double plan quantitatif et qualitatif, d'alerter les décideurs pour maîtriser et réduire les risques ou des impacts transfrontaliers sur leurs ressources communes.

Le présent document est un guide méthodologique destiné aux responsables chargés de la gestion des ressources en eau en vue de mettre en place le(s) réseau(x) de suivi et d'évaluation des aquifères transfrontaliers du SAI qui contribueront à renforcer la coopération entre les pays exploitant conjointement la ressource.

Il est fortement inspiré de la méthodologie développée par la Commission économique européenne (CEE) sur les stratégies pour le suivi et l'évaluation des eaux souterraines transfrontalières. Il s'appuie également sur des expériences et leçons tirées de l'étude menée par l'OSS sur le Système aquifère du Sahara septentrional partagé par l'Algérie, la Libye et la Tunisie. L'approche et les étapes à franchir pour suivre et évaluer les eaux souterraines des aquifères transfrontaliers y est largement développé

- Tome I : Analyse diagnostique transfrontalière
- Tome II : Base de données commune
- Tome III : Modèle hydrologique
- Tome IV : Gestion participative des risques transfrontaliers

### Partenaires



Edité  
avec le soutien financier de



### Observatoire du Sahara et du Sahel

Bd du Leader Y. Arafat, BP 31, 1080 Tunis Carthage, Tunisie  
Tél. : (+216).71.206.633 - Fax : (+216).71.206.633  
URL : [www.oss-online.org](http://www.oss-online.org) - Email : [boc@oss.org.tn](mailto:boc@oss.org.tn)