

Problèmes d'intégration de données hydrogéologiques dans un Système d'Information Géographique dédié à la gestion intégrée de ressources en eau souterraine

Riahi Ibtissem^{a,c,*}, Bouaziz Samir^{b,c}, Ben Dhia Hamed^{b,c}

^a Institut Supérieur des Sciences et Techniques des Eaux de Gabès.

^b Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax.

^c laboratoire Eau-Energie-Environnement "3E"

Email * : ebtissemhriahi@yahoo.fr

Reçu : Mai 2015; Publié : Décembre 2015.

Résumé : Le système d'information hydrogéologique "SIHYGabès" a été élaboré pour contribuer à la mise en œuvre d'une gestion intégrée des ressources en eau souterraine dans la région de Gabès (Sud de la Tunisie). Dans ce papier on présente les différentes étapes suivies pour sa réalisation. Lors de la conception de ce système on a repéré plusieurs contraintes qui peuvent entraver à la bonne intégration de "SIHYGabès" dans le processus de la gestion intégrée des ressources en eau. Ces contraintes sont liées à la qualité de ses données et au degré de son intégration dans l'organisme d'accueil. On propose ici une démarche à suivre pour la mise en place de SIG institutionnel permettant d'éviter la propagation d'erreurs dans le SIG et de limiter les conflits engendrés par son implémentation.

Mots clés : SIHYGabès, eau souterraine, MADS, gestion durable

Abstract: The hydrogeological information system "SIHYGabès" was developed to contribute to the water resources integrated management in the Gabes region (southern Tunisia). This paper presents the steps that have been taken to carry out this system. During the design of this system we have identified a number of constraints that can hinder the successful integration of "SIHYGabès" in the process of water resources integrated management. These constraints are related to the quality of its data and to the degree of its integration into the receiving organization. In this study we propose a procedure to follow for the implementation of institutional GIS to avoid error propagation in this GIS and reduce conflicts generated by its implementation

Keywords: SIHYGabès, groundwater, MADS, sustainable management.

1. Introduction

L'eau souterraine est un enjeu déterminant dans les pays à climat aride et semi-aride, où cette ressource représente la source principale d'approvisionnement. La gestion rationnelle et durable de cette eau est aujourd'hui indispensable pour le développement de ces pays. La mise en place de cette gestion nécessite une connaissance approfondie et précise des ressources en eau ainsi qu'un niveau de coopération élevé entre les différents acteurs d'eau. Dans ce cadre le système d'information hydrogéologique "SIHYGabès" a été conçu pour harmoniser et centraliser dans un même support toute l'information relative à l'eau souterraine dans la région de Gabès. Ce système permet de fournir une information fiable et de "qualité" et facilite la coopération entre les différents intervenants dans le domaine d'eau souterraine. La mise en œuvre de SIHYGabès doit s'intégrer dans une

démarche plus large d'analyse des objectifs, des besoins des usagers et des conditions d'utilisation pour éviter l'écueil du SIG "alibi" d'une meilleure efficacité mais sans véritable utilité (Pornon, 1996). La démarche suivie pour l'élaboration de ce système a été basée sur une analyse détaillée des données disponibles chez les acteurs impliqués dans la gestion d'eau souterraine et de leur organisation institutionnelle. Ce qui nous a permis d'identifier un ensemble des contraintes qui peuvent nuire à la durabilité et à la bonne intégration de ce système institutionnel dans le processus de la gestion intégrée des ressources en eau dans la région. Ces contraintes sont liées à la qualité des données disponibles et aux choix techniques et organisationnels pour la mise en place du SIG.

Dans ce travail on présente, la démarche suivie pour l'élaboration de SIHYGabès ainsi qu'un aperçu sur les contraintes rencontrées lors de sa mise en place et qui peuvent entraver sa réussite.

2. Matériel et méthodes:

Le système d'information SIHYGabès a été élaboré en se basant sur la méthode MERISE (Tardieu, 1983). Les étapes suivies sont les suivantes :1) analyse des données relatives à l'eau souterraine disponibles chez les différents intervenants, 2) modélisation conceptuelle et logique de la base de données hydrogéologique, 3) numérisation, harmonisation et intégration de données et 4) mise en place du système d'information hydrogéologique. Le formalisme spatio-temporel "Modélisation d'Applications à Données Spatiales" (MADS) a été adopté pour la modélisation conceptuelle des données. Il s'agit d'un formalisme "entité-association" (Codd, 1970) étendu aux concepts principaux de l'approche orientée objets (structures complexes, héritage et méthodes) (Parent *et al.* 1997). MADS permet la modélisation et la représentation graphique des applications spatio-temporelles avec multi-représentation. Il est soutenu par un Atelier de Génie Logiciel gratuitement téléchargeable sur le web et qui comporte un éditeur visuel de schémas pour la définition, la consultation et la mise à jour des schémas MADS.

Le résultat des deux premières étapes est l'élaboration d'un Modèle conceptuel de données (MCD). Ce MCD représente sous format graphique les données spatiales et alphanumériques relatives à l'eau souterraine tout en respectant leur aspect spatial et temporel. Ces données multi-échelles relatives à l'hydrologie, l'hydrogéologie, la géologie, la pédologie, le climat et autres sont collectées chez les différents acteurs d'eau dans la région. Elles présentent une importante masse d'information indispensable pour la gestion intégrée des ressources en eau souterraine. La nature et la qualité de ces données ne sont pas homogènes, elles varient selon la source de l'information et l'objectif visé par leur élaboration.

A leur état initial, ces données ne répondent pas toutes aux exigences de MCD. Plusieurs modifications doivent être apportées à ces dernières pour les rendre plus cohérentes et plus précises. Avant leur intégration dans la base de données de SIHYGabès, ces données ont été harmonisées et ajustées au modèle élaboré. L'implémentation physique de la base de données a été réalisée sous forme d'une géodatabase personnelle sous ArcGis....

3. Résultats et Discussion :

La démarche de conception de SIHYGabès a commencé par une analyse détaillée des données relatives à l'eau souterraine chez les différents intervenants dans la région de Gabès. Les résultats de cette analyse nous a permis de définir une liste de données à intégrer dans ce système. Ces données ont été organisées dans un MCD selon le formalisme spatio-temporel MADS. Plusieurs contraintes qui peuvent entraver l'intégration de SIHYGabès dans le processus de la gestion intégrée ont été repérées lors la réalisation de ce travail.

3.1. Les données relatives à l'eau souterraines

Les données relatives à l'eau souterraine relèvent de plusieurs domaines à s'avoir l'hydrographie, la géologie, le climat, l'hydrologie et autres. Ces données sont variables dans l'espace et dans le temps. Elles sont généralement acquises par différents intervenants à des pas de temps et des échelles très variées. Une fois collectées elles sont interprétées pour décrire et comprendre l'état des ressources en eau et leur environnement. Selon leur nature on distingue des données qui décrivent:

- Les Caractéristiques des aquifères : tels que les limites, géométrie, nature et implication en termes de "réservoir", d'accès, d'homogénéité/hétérogénéité des milieux, vulnérabilité à la pollution ;
- le fonctionnement hydrodynamique ; qui informe sur les apports naturels et artificiels, les prélèvements et le drainage par l'eau de surface ;
- la qualité de l'eau : leur évolution et sa répartition spatiale, la propagation des polluants et autres.

En plus de ces données décrivant directement les ressources en eau souterraine et leurs environnements, on trouve des données techniques sur les ouvrages d'exploitation et de contrôle des ressources, des données relatives à l'usage et des données administratives.

Les données relatives à l'eau souterraines sont disponibles sous plusieurs formats et selon diverses précisions. Les plus importantes sources de données sont les inventaires d'exploitation et de contrôle réalisés par les autorités régionales. Ces inventaires sont réalisés sur des points d'exploitation et sur les réseaux d'observation. Ils portent sur : la piézométrie, la qualité et le prélèvement d'eau. En plus de cette masse importante de données régulièrement actualisées, on trouve des données collectées à l'occasion des études scientifiques ou techniques et qui concernent la géométrie, la géologie et les paramètres hydrodynamiques des aquifères. La qualité de ces informations varie selon les objectifs visés pour leur acquisition et des outils utilisés. La quantité de ces données dépend de plusieurs facteurs, notamment le taux et l'ancienneté de l'exploitation des aquifères et de leurs rôle socio-économique dans la région.

Les données récoltées pendant l'implantation d'un ouvrage d'exploitation ou de contrôle constituent une importante masse d'informations géologiques et hydrodynamiques. L'implantation des ouvrages s'effectue généralement sous le contrôle d'un hydrogéologue /géologue, chargé de noter tous les indices possibles susceptibles d'informer et de caractériser l'aquifère sous-jacent. Ces informations concernent : la coupe lithologique prévisionnelle renseignant sur la stratigraphie et l'épaisseur des formations traversées par le forage et sa profondeur totale, la coupe technique, la date de réalisation et les personnes ou organismes impliqués (puisatier, hydrogéologue ou géologue) ...etc. Après exécution du forage, les essais de pompage informent sur le niveau statique d'eau, le niveau d'eau en condition d'exploitation, débit de pompage, durée de l'essai de pompage, le nombre d'essais de pompage, les résultats d'interprétation de ces essais... etc.

D'autres types d'informations, sous forme des rapports internes et des études techniques : tels que les études de vulnérabilité, rapport d'implantation de forage, prospection hydrogéologique et autres. Les informations relatives à la demande en eau dans les divers secteurs, à savoir : l'eau potable, l'agriculture et l'industrie sont disponibles chez divers organismes. Des informations concernant la géologie de la région, la morphologie, l'occupation de sol, l'hydrographie et autres peuvent être collectées chez d'autres organismes tels que ; les bureaux d'études, les sociétés pétrolières... etc. Ces informations sont disponibles sous forme de cartes thématiques, des rapports internes ou des publications scientifiques.

3.2. Modélisation conceptuelle

Selon le formalisme MADS, les données relatives à l'eau souterraines sont organisées dans le modèle conceptuel grâce à trois concepts : les entités; les attributs et les relations (Parent *et al*, 1997). On trouve des entités simples et des entités spatiales. Ces entités sont définies par leur homogénéité par rapport à certains nombres d'attributs qui les caractérisent et qui sont déterminants pour leur comportement (fig.1). Un ou l'ensemble de ces attributs sont choisis comme identifiant pour chaque classe d'objet. Entre ces entités on définit des relations logiques, temporelles, spatiales ou d'héritage. Ces relations servent à définir des liens qui peuvent exister entre les classes d'objets. Elles reflètent les multiples interactions entre les éléments qui gèrent la situation de ressource en eau souterraine.

Point_eau *	
code_pt_eau	1:1
nom du pt eau	0:n
Coordonnée X	1:n
Coordonnée Y	1:n
type de projection	1:n
précision de coord..	
altitude	0:1
precision altitu	0:1
lieu-dit	1:1
fonction	1:n
commentaire de pt ..	
Etat pt d eau	1:n
date de mise à jour	1:1
périmètre de prote..	
carte de localisat..	
code_nat_local	0:n
Aquifère	1:n

Fig. 1. Exemple de la représentation graphique d'une entité dans MADS. Entité spatiale « point d'eau »

Le Système d'Information hydrogéologique intègre un volume énorme d'informations relatives à divers domaines. Le modèle conceptuel a été donc subdivisé en plusieurs sous-modèles pour faciliter son développement (fig.2) :

- Le paquetage "point d'eau "
- Le paquetage "géologie "
- Le paquetage "hydro climatique"
- Le paquetage "administratif"
- Le paquetage "étude"

Le cœur de ce modèle est constitué par l'entité "aquifère".

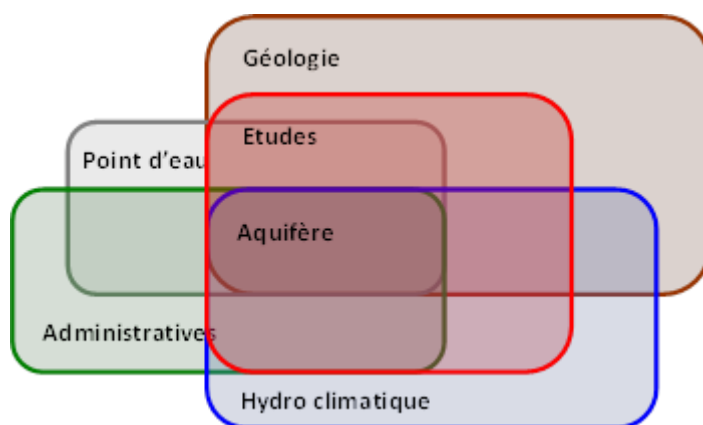


Fig 2. Les composantes du modèle conceptuel

Le paquetage « point d'eau » regroupe les classes d'entité relatives aux : 1) données générales sur les points d'eau tel que les données de localisation, codage régional et national et autres. 2) les données sur la qualité d'eau, récoltées sur le réseau des qualitomètres ou à l'occasion des études

réalisées sur les ressources en eau souterraine dans la région. 3) Les données quantitatives représentées par l'exploitation et la piézométrie. 4) Les équipements et le tubage des ouvrages et 5) les données géologiques et

hydrodynamiques déterminées sur le log des forages et des puits.

Le paquetage « géologie » intègre les données décrivant la nature et les caractéristiques géologiques des aquifères et de leurs environnements. Ces données concernent les formations géologiques en affleurement et/ou celles rencontrées par les forages ainsi que les données structurales.

Dans le paquetage hydro-climatique, on trouve les données collectées sur les stations climatiques et les stations de jaugeage et les informations décrivant les bassins versants et leurs réseaux hydrographiques.

Les données administratives sur les autorités et les différents intervenants dans les domaines d'eau souterraine, les limites administratives et les voies de communication sont regroupées dans le paquetage « données administratives ».

Le paquetage « étude » présente les références de toutes les études réalisées sur la région qui concernent la géologie, l'hydrogéologie, l'hydrographie et autres, ainsi que les annuaires et notes publiés par les autorités.

SIHYGabès est un système d'information multi-échelle, il présente trois niveaux de représentation (fig. 3). Les entités spatiales sont modélisées dans la base de données suivant ces trois niveaux.

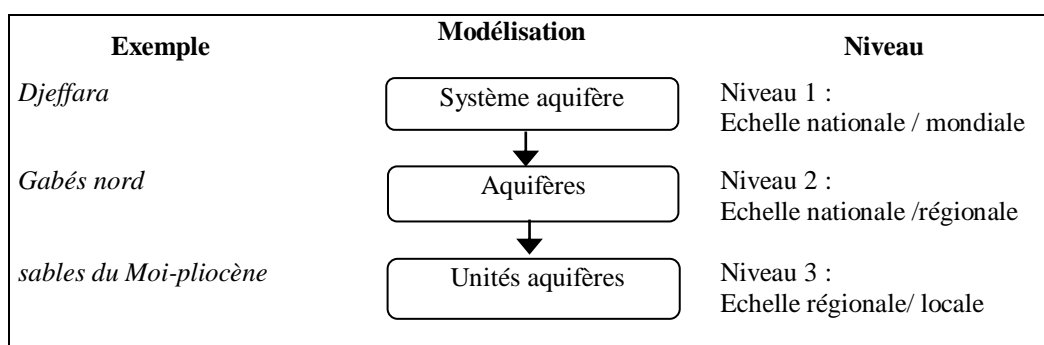


Fig. 3. Modélisation multi-échelle de l'entité " Aquifère "

3.3. Contraintes liées à la mise en place du SIG

Si la modélisation conceptuelle du système d'informations ne dépend que de la vision du concepteur et de sa perception du phénomène à modéliser, sa mise en œuvre dépendra de plusieurs facteurs externes. Parmi ces facteurs on cite : 1) la disponibilité et la qualité de données, 2) le degré d'intégration du système dans l'organisme d'accueil.

3.3.1. Qualité de données et propagation d'erreurs dans le SIHYGabès

L'analyse de données spatiales et alphanumériques relatives à l'eau souterraine montre que la qualité de données est l'un des principaux facteurs qui entravent à la mise en œuvre d'une gestion intégrée de cette ressource. Ces données sont collectées pour divers objectifs par des méthodes et selon des échelles de précision différentes. Elles sont très hétérogènes et présentent plusieurs anomalies. L'intégration de ces données dans leur état initial dans un SIG favorisera la propagation des erreurs et diminue sa fiabilité. Parmi les anomalies rencontrées pour la mise en œuvre de SIHYGabès on cite :

- La précision de la localisation des entités spatiales ponctuelles :

Une importante partie de données collectées sur les eaux souterraines est attachée à des entités spatiales de type ponctuel. Ces données sont utilisées pour étudier la variation spatio-temporelle des paramètres gérant l'état

d'eau souterraine et pour la réalisation des modèles hydrogéologiques et géologiques etc.... La précision de localisation de ces entités a un important impact sur les résultats de ces études et par la suite sur le niveau de connaissance des aquifères. Dans le cas de la région de Gabès, les coordonnées de la plus part des entités ponctuelles sont déterminées sur des cartes topographiques 1 :100 000. Cette méthode donne une précision de l'ordre de plusieurs centaines de mètres. Ces coordonnées ne peuvent être utilisées qu'à titre indicatif et pas dans un SIG à l'échelle régionale ou locale.

- Hétérogénéité de données :

L'hétérogénéité des données est due essentiellement au nombre important des intervenants dans le domaine d'eau souterraine et au non adoption des normes identiques pour la collecte d'informations. Les données ne sont pas toutes compatibles :

- 1) les unités stratigraphiques sont identifiées de manières différentes d'une carte à l'autre et dans les logs de forages (nom de formation, symbole et couleur, lithologies ...etc.). Ceci rend les corrélations laborieuses surtout au niveau des bordures des cartes et lors de la réalisation des coupes.

- 2) les unités de mesure utilisées pour les paramètres hydrodynamiques et autre sont très diverses. On note aussi que l'utilisation des valeurs négatives pour les profondeurs et les altitudes inférieures au niveau zéro de la mère n'est pas régulier... etc.

3) la description des logs stratigraphiques n'a pas toujours été réalisée avec le même soin. La qualité et la précision des données indiquées dépendent de la diligence et du professionnalisme de la personne en charge de suivre la réalisation de forage en question.

- Format du support de données

Les problèmes liés aux méthodes de sauvegarde des données relatives à l'eau souterraine chez différents organismes et services impliqués dans la gestion de ces ressources sont à l'origine de la perte et la détérioration d'une importante masse des données. Les enquêtes réalisées chez les différents acteurs de l'eau dans la région ont montré que :

1) les documents cartographiques imprimés sont pour la plupart en très mauvais état, difficile à numériser et à comprendre.

2) La saisie manuelle des données alphanumériques dans les nouveaux rapports à partir d'autres plus anciens, a été source d'erreurs par l'oubli ou la modification de certaines informations. Il s'avère donc nécessaire de vérifier toutes ces données à partir de document d'origine pour éviter la propagation des erreurs dans la base de données.

3) plusieurs rapports des années 80 ont été perdus ou ils sont dans un état abîmé. Ces documents représentent une source importante d'informations. Les années 80 ont connus la réalisation de plusieurs études de prospection et la création d'un grand nombre de forages et puits dans la région.

- Manque des métadonnées

Les métadonnées représentent un composant essentiel dans les bases de données géographiques. Elles facilitent la consultation de données dans le SIG et permettent aux utilisateurs d'évaluer la fiabilité des données à répondre à leurs besoins. Les informations décrivant la qualité des données disponibles ne correspondent pas aux normes établies pour ce genre d'information. On note l'absence des données sur la précision et la méthode de mesure pour plusieurs paramètres, ainsi que des justificatifs pour les choix des valeurs nominales. Il manque souvent les informations concernant la validité et la durée de vie des données, et aussi les dates mesure, de saisi ou /et des modifications en plus de dates imprécises telles que les indications de "saison sèche" et "saison humide" pour les mesures piézométriques. Les producteurs des données ou les personnes responsables qui pourraient être contacté pour clarifier certaines informations en cas de besoin ne sont pas souvent mentionner.

3.2.2. Problèmes d'intégration du projet

La mise en œuvre d'un système d'information fiable et durable n'est pas évidente. L'étude bibliographique réalisée dans le cadre de ce travail montre que le nombre des projets SIG abandonnés pour divers raisons est très important. L'emploi d'une démarche formelle ne peut pas garantir le succès d'un projet SIG. Il s'agit de prendre en compte un

ensemble des facteurs favorisant la réalisation de l'application (Crausaz, 2000). Une analyse de plusieurs projets SIG réalisés à l'échelle régionale et nationale tel que le cas du projet "Carte agricole" et le "SIG à la SONEDE", montre que les objectifs visés par l'élaboration de ces projets n'ont pas été atteints et que la plus part de ces projets ont été abandonnés. Les raisons de l'échec de ces projets SIG sont multiples et varient d'un projet à l'autre. On note :

- L'implémentation du projet SIG n'a pas été accompagnée par des réformes administratives tenant compte de la nouvelle technologie ;

- l'absence d'un spécialiste géomaticien à temps plein dans l'équipe concernée par le projet surtout dans les structures régionales ;

- les formations consacrées aux agents utilisateurs du SIG ont concernées uniquement l'aspect technique. l'impact de du SIG sur les fonctionnements administratives n'a jamais été abordé par ces formations ;

- l'aspect spatiotemporelle de données n'été pas pris en compte pour la modélisation conceptuelle. Ce qui a engendré plusieurs problèmes pour la mise à jour de données ;

- Il n'y a pas un processus de mise à jour bien structuré pour l'actualisation des données spatiales et attributaires. L'actualisation de quelques thèmes est souvent réalisée suites à des initiatives personnelles dans le cadre d'un projet utilisant les données numériques sur une partie de la région.

- dans la plupart des projets l'accent a été mis sur l'aspect cartographie numérique et non sur l'aspect base de données

- dans plusieurs cas la conception et la mise en œuvre du projet ont été réalisés par des bureaux d'études sans implication réelle des futurs utilisateurs du SIG.

SIHYGabès doit permettre de faciliter l'accès à l'information et renforcer la coopération entre les différents acteurs d'eau dans la région. L'incompréhension du vrai rôle de ce système et le manque de communication entre les concepteurs du projet et les différents intervenants dans le projet n'aide pas ces derniers à accepter les changements engendrés par la mise en place de ce projet. Sa réussite et sa durabilité nécessitent un climat de coopération et d'échanges vrais entre les futurs utilisateurs et les opérateurs du projet. SIHYGabès ne doit pas être imposé aux services et organismes impliqués dans la gestion de l'eau, mais doit se réaliser en collaboration avec eux.

L'intégration du système doit se réaliser de préférence progressivement et suivant un plan bien détaillé. Dans ce plan, on présente une démarche claire, cohérente et réaliste, prenant en compte les aspects indiqués précédemment. C'est en grande partie de la pertinence de ce plan que dépend la réussite du projet. Dans ce contexte (Mottier, 2001) explique que « l'intégration harmonieuse d'un SIG

dans une structure administrative ou un organisme publique implique un processus de planification qui déborde largement la simple intégration de données et de logiciels. Il faut suivre une démarche de conception rigoureuse pour atteindre la concordance la plus étroite entre les besoins de l'institution et les résultats produits avec le SIG ». Le plan a pour objectif de préciser le projet dans tous ses détails. Il permet de : découper le projet en tâches, décrire leur enchaînement dans le temps et affecter à chacune une durée et un effort.

En plus d'aspect institutionnel, on a défini dans ce plan, des règles pour la mise à jour des données spatiales et alphanumériques selon le modèle conceptuel établi. Sans une mise à jour régulière et bien planifiée, le SIG perdra progressivement sa fiabilité et dès lors, les utilisateurs n'auront plus confiance dans ce système d'information et le projet risque de tomber dans l'oubli. Les agents "responsables données" doivent avoir un plan clair et détaillé décrivant la fréquence et les méthodes des mises à jour de toutes les données dans le SIG.

La mise en place du projet doit commencer par un nombre limité d'intervenants comportant les principaux acteurs de l'eau à l'échelle régionale. Les autres services et organismes seront intégrés peu à peu dans le système. L'objectif de cette démarche est de limiter les problèmes générés par la gestion de plusieurs structures administratives à la fois et de mieux gérer les conflits entre différents acteurs.

4. Conclusion :

La gestion intégrée des ressources en eau est une mission collective qui implique plusieurs intervenants et nécessite un taux de connaissance élevé de ces ressources et de leurs environnements. L'utilisation des nouvelles technologies telles que les SIG pour faciliter la gestion et l'échange d'informations est indispensable pour la mise en œuvre de cette gestion.

Dans ce travail la mise en œuvre d'un SIG institutionnel dédié à la gestion de données relatives à l'eau souterraine dans la région de Gabès a été réalisée suivant la méthode MERISE. Le MCD élaboré selon le formalisme spatiotemporel MADS, représente schématiquement les différentes composantes du système et leurs relations.

La conception de SIHYGabès nous a permis d'identifier plusieurs contraintes qui peuvent entraver la mise en œuvre

de ce système. La qualité des données disponibles chez les différents organismes ne répond pas aux exigences de la gestion intégrée. Plusieurs modifications doivent être apportées à ces dernières pour les rendre cohérentes et compatibles avec le MCD établi. Le degré d'acceptation de la nouvelle technologie dans l'organisme d'accueil présente aussi une contrainte majeure pour la réussite et la durabilité de ce système. La planification coopérative et bien dirigée de ce processus permet d'éviter certains conflits engendrés par son implémentation et garantir une mise à jour continue et régulière de sa base de données.

5. Références :

- Pornon, H., 1996**, SIRS et images de l'organisation, Revue internationale de géomatique, vol. 6, p. 61-71.
- Tardieu, H. ; Rochfeld A. ; Colletti, R., 1983**, La Méthode MERISE, Tome 1. Principes et outils.
- Codd, E. F.,** A Relational Model of Data for Large Shared Data Banks. Comm. ACM, V13, N6, June 1970, pp. 377-387.
- Vernier, F. ; Beuffe FE ; Chossat, J.C., 2003**, Forêt et ressources en eau : étude de deux bassins versants en sol sableux (Landes de Gascogne), Revue forestière française, n° 6, p. 523-542.
- Zimanyi, E. ; Donini, P. ; Plazanet, C. ; Vangenot, C. ; Rognon, N. ; Pouliot, J. ; Crausaz, P. A., 1997**, MADS: un modèle conceptuel pour des applications spatio-temporelles. Revue Internationale de Géomatique, 7(3-4):317-352.
- Parent, C. ; Spaccapietra, S., 2000**. Supporting Multiple Representations in Spatio-Temporal databases. 6th EC-GI & GIS Workshop, Lyon, France, June 28-30, 2000.
- Crausaz, P.A., 2000**, Du rôle intégrateur des systèmes d'information à référence spatiale dans la gestion institutionnelle des eaux : analyse, méthode, limites et perspectives, Lausanne, EPFL, Thèse n° 2139.
- Mottier V. (2001)** : Processus métier et composants logiciels pour la gestion intégrée des eaux en milieu urbain. Lausanne, EPFL, Thèse n°2334.-