

*Master Aménagement du Territoire et Télédétection
Université Paul Sabatier
Centre d'Études Spatiales de la Biosphère
13 avenue du Colonel Roche
31062 Toulouse cedex 9*

*IRD – Centre de Ouagadougou
956 avenue Agostino Netto – BP 182 –
Ouagadougou 01
Burkina-Faso*

Des bassins versants aux écosystèmes aquatiques : développement d'un Système d'Information Géographique sur le bassin du Nariarlé au Burkina Faso.

Nicolas Moiroux



Cultures irriguées, barrage de Napagtinga, N.M.2006

Septembre 2006

Rapport de stage de Master 2

Maître de stage : Philippe CECCHI
Chargé de Recherche IRD/
UR CyRoCo

**Tuteur Universitaire : Valérie
LEDANTEC**
Maître de conférence UPS/
UMR CESBIO

Remerciements

Mes remerciements iront d'abord à Philippe CECCHI pour la confiance qu'il m'a accordée tout au long de ce travail et pour son accueil au sein de l'UR Cyroco au centre IRD de Ouagadougou.

Je remercie également Valérie LEDANTEC et Patrick MORDELET pour leur confiance, leur aide et leur compréhension.

J'adresse ma plus vive gratitude à Jean-François LECORNU pour son aide précieuse et amicale en SIG et programmation.

Pour ses conseils et son accompagnement, je remercie Aude NIKIEMA.

Pour tous les petits services rendus, merci à Célestin SANOU BAKARI.

Un grand Merci, à l'ensemble des chercheurs, doctorants, volontaires, stagiaires, étudiants, loueurs de P50... pour leur accueil, leur aide, leur gentillesse et leur amitié. Merci Nico, Florence, Pierre, Marjolaine, Gilles, Manu, Manue, Emeraude, Benoît, Alexandra, Elodie, Lassina, Alfred, César, Daïna, Angélique et tout ceux que j'oublie.

Sommaire

Introduction.....	4
La structure d'accueil : l'IRD	6
Matériels et Méthode	7
1 La zone d'étude :.....	7
2 Structure du Système d'Information Géographique :	9
3 Les étapes de création du projet SIG :.....	11
3.1 Le Modèle Conceptuel de Donnée	11
3.2 Le Modèle Logique de Donnée	14
3.3 Le Modèle Physique de Donnée	17
3.4 De la base de donnée à la géodatabase : la composante graphique.....	17
3.5 Implémentation de la base de donnée.....	22
Résultats et Discussion	26
Conclusion et perspectives.....	28
Bibliographie :.....	29
Annexe 1 : Modes d'occupation du sol et évolution.....	30
Annexe 2 : Population et Ressource en eau.....	31

Table des illustrations :

Figure 1 : Situation du Burkina Faso	7
Figure 2 : Le Bassin du Nariarlé	8
Figure 3 : Structure simplifiée du SIG.....	10
Figure 4 : Le modèle conceptuel de donnée.....	13
Figure 5 : Méthode de définition de la limite des bassins versants.....	22
Figure 6 : Les jonctions hydrographiques.....	24
Figure 7 : Identification des exutoires des BVE et BV	25
Figure 8 : Création des Bassins Versants.....	25

Introduction

Aujourd'hui, la protection des milieux aquatiques et la gestion de la ressource en eau sont devenues des préoccupations majeures à l'échelle planétaire. L'accroissement de la consommation et de la dégradation de l'eau dans de nombreux pays du monde, représente un défi sans précédent pour l'humanité : celui du partage, de l'approvisionnement et de la préservation de l'eau pour les générations futures. (Water Institute, 2005)

En Afrique sahélienne, la diminution des précipitations observée depuis 50 ans a naturellement conduit les populations de ces zones défavorisées à modifier et adapter leurs systèmes de production agricole. L'utilisation des bas-fonds s'est imposée et la construction de petits barrages fut privilégiée comme opportunité de stockage d'eau pour lutter contre la sécheresse. (BERTON, 1998)

DURAND & Al. (1999) ajoute que le développement de l'Afrique suppose la maîtrise des ressources en eau, parmi lesquelles les eaux de surface qui ont une importance vitale pour toute entreprise agricole ou pastorale entre autre. Ainsi, depuis plusieurs décennies, l'édification de petits barrages a été une solution très largement utilisée pour résoudre les délicats problèmes de mobilisation des ressources en eau.

Ainsi, de très nombreux réservoirs ont été édifiés au Burkina Faso depuis quelques dizaines d'années pour sécuriser la ressource en eau, tant à l'échelle saisonnière qu'interannuelle. Beaucoup continuent à être édifiés. Cette densification d'aménagements et son impact à l'échelle des bassins versants fait émerger de nouvelles interrogations quant aux propriétés et services attendus de ces aménagements : impacts économiques, hydrologiques, sanitaires, écologiques, etc. Si par le passé les études ont préférentiellement concerné des "individus réservoirs", les questions nouvelles qui se posent concernent des "ensembles de réservoirs", considérés comme unité de résolution. Les approches conduites à une telle échelle demeurent rares. (CECCHI, 2005)

Le Nakambé, ex. Volta Blanche, est l'un des principaux cours d'eau du Burkina Faso. Se concentrent sur son bassin versant environ 50 % de la population nationale, la majeure partie de la demande en eau toujours à l'échelle nationale, et une fraction importante des 1500 barrages et réservoirs officiellement répertoriés dans ce pays. Ce bassin versant et

cette rivière sont considérés comme stratégiques, tant en raison de la forte dépendance nationale que du partage des ressources en eau avec le Ghana, pays riverain situé en aval.

De nombreuses et diverses interrogations se posent quant à l'état et au devenir des écosystèmes aquatiques de ce bassin, et en premier lieu des lacs et réservoirs qui s'y trouvent. Le coeur des activités conduites par l'Unité de Recherches CyRoCo (Cyanobactéries, Rôles et Contrôles) de l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) est focalisé sur le déterminisme et les conséquences des efflorescences à cyanobactéries, en raison principalement des risques écologiques (eutrophisation) et sanitaires (toxicité) qui leur sont potentiellement attachés. Sans que des réponses claires ne soient encore apportées, il paraît probable que les interactions entre "usages" des bassins versants et des écosystèmes, et qualité de ces écosystèmes sont déterminants. A notre connaissance, rares sont les études qui se positionnent à une telle échelle.

Pour mener à bien la caractérisation des bassins versants, l'emploi d'un Système d'Information Géographique (SIG) s'impose de façon évidente (SAAM, 1998). En effet les SIG se prêtent particulièrement bien à l'étude des problèmes environnementaux de part leur mode de gestion de données à référence spatiale. Ces outils ont amélioré la capacité des écologues à examiner des relations et à tester des théories sur des régions plus étendues et plus hétérogènes qu'auparavant (JOHNSON & GAGE., 1997). La mise au point un tel outil en vue d'étudier un sous-bassin du Nakambé semble indispensable. Cet outil permettra l'étude des relations entre bassins versants et écosystèmes aquatiques. De façon plus pragmatique, l'objectif est donc de réaliser un SIG qui permettra dans un premier temps :

- D'acquérir une connaissance du territoire à l'échelle du bassin versant du Nariarlé et des bassins versants des petits barrages, d'un point de vue physique, hydrologique, météorologique et socio-économique.
- D'acquérir une connaissance du territoire à une échelle plus fine qu'est la zone périphérique du barrage, d'un point de vue socio-économique.

A l'approche descriptive succédera une approche typologique, destinée, dans un second temps, à rechercher les liens éventuels entre bassins versants, retenues et qualité des écosystèmes aquatiques. La compréhension de ces interactions constitue la finalité de l'étude dans laquelle le SIG est un outil de création de donnée et d'analyse déterminant.

La structure d'accueil : l'IRD

L'Institut de Recherche pour le Développement est un établissement public à caractère scientifique et technologique. Créé en 1944, cet établissement est placé sous la double tutelle des ministères chargés de la Recherche et de la Coopération. Présent dans l'ensemble de la zone intertropicale, l'IRD remplit trois missions fondamentales : la recherche, l'expertise et la formation.

Ses programmes de recherche sont centrés sur les relations entre l'Homme et son environnement dans les pays du Sud, avec l'objectif de contribuer à leur développement. L'IRD conduit ses activités en relation avec des universités, des grandes écoles, des établissements de recherche publics ou privés tant en France que dans les pays en développement.

Il intervient dans une quarantaine de pays et dispose de 35 centres et représentations en France et à l'étranger.

Les activités de l'IRD s'articulent autour de six thèmes prioritaires :

- Aléas environnementaux et sécurité des populations du Sud.
- Gestion durable des écosystèmes du Sud.
- Ressources et usages des eaux continentales et côtières du Sud.
- Sécurité alimentaire dans le Sud.
- Santé au Sud : épidémies, maladies endémiques et émergentes, systèmes de santé.
- Enjeux économiques, sociaux, identitaires et dynamiques spatiales au Sud.

Au sein de l'IRD, l'Unité de Recherche CyRoCo (Cyanobactéries des Milieux aquatiques tropicaux peu profonds– Rôles et Contrôles) a pour projet de recherche de mieux comprendre l'importance des cyanobactéries afin de déterminer les facteurs à l'origine de leur prolifération et ceux qui les contrôlent. L'innovation majeure amenée par ce projet sera la définition, à partir d'une approche holistique, des différents modes de contrôle du développement et des proliférations des cyanobactéries dans des milieux variés, perturbés par les activités humaines ou dédiés à ses besoins ...

L'UR Cyroco est implantée en France à Marseille et Montpellier, au Sénégal, au Burkina-Faso et à Madagascar.

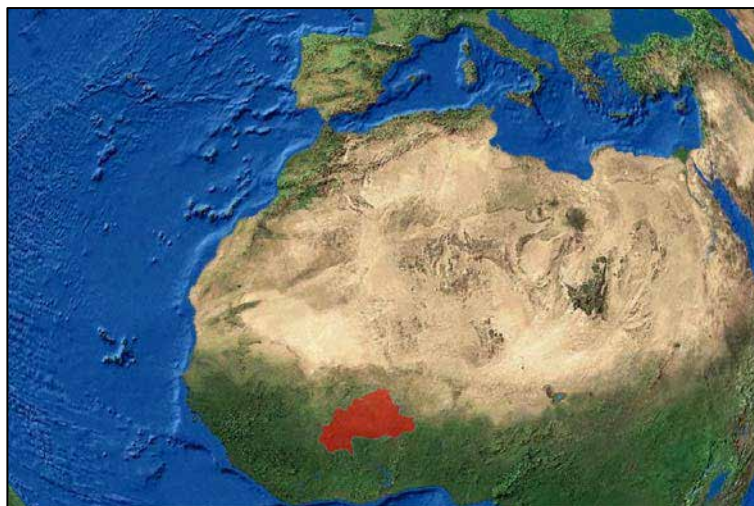
Matériels et Méthode

1 La zone d'étude :

Inscrit dans la boucle du Niger, le Burkina Faso est un pays sahélien d'Afrique de l'ouest.

Entre le Mali et le Niger au nord et à l'est, avec la Côte d'Ivoire, le Ghana, le Togo et le Bénin au sud, le Burkina Faso est un pays enclavé de 274 000 km² et d'une population estimée à 13 900 000 habitants en 2005 (Atlas de l'Afrique, 2005).

Figure 1 : Situation du Burkina Faso



Du centre au sud du pays, le bassin du Nakambé concentre la moitié de la population nationale, 90% de la demande en eau du pays et la moitié des ouvrages de rétention des eaux de surface recensés.

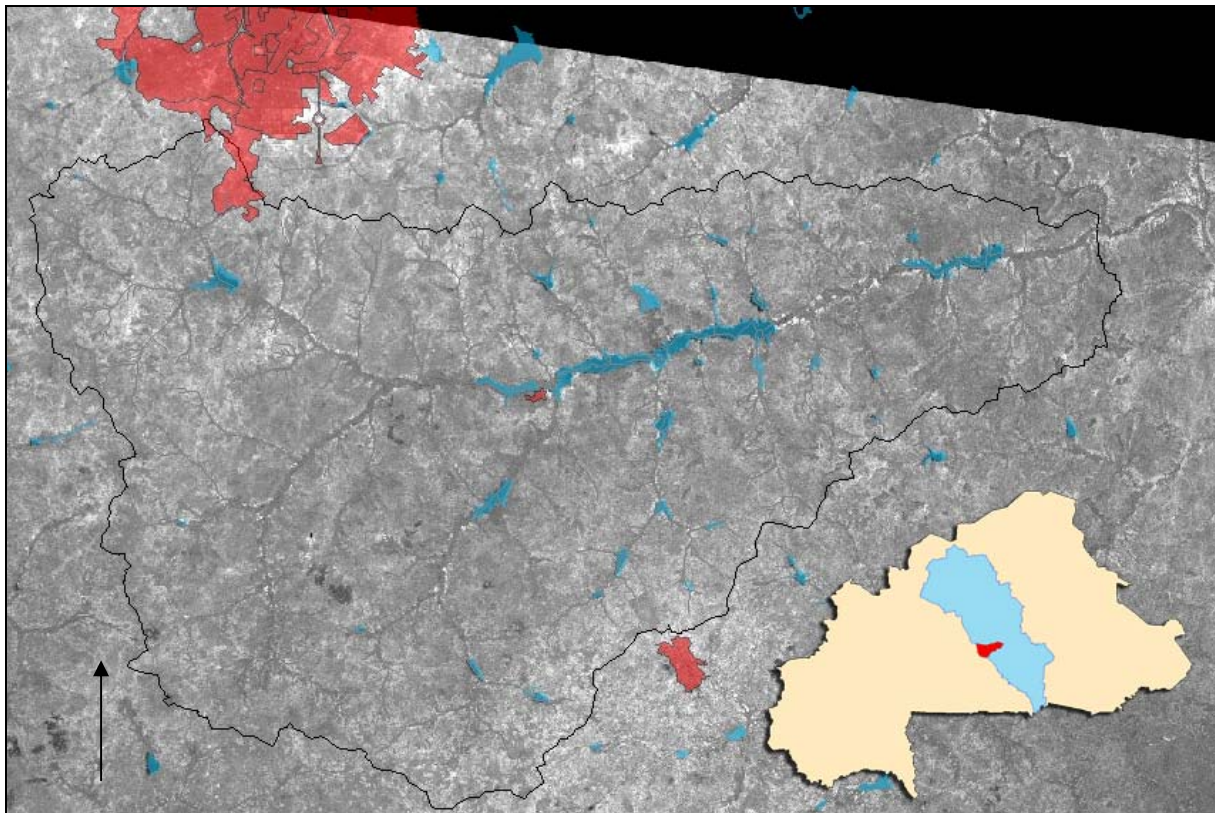
A l'ouest de ce bassin, le Nariarlé est un affluent important qui conflue avec le Massili avant de rejoindre le Nakambé en rive gauche. Le bassin versant du Nariarlé occupe une superficie de 1000 km². Il est caractérisé par un dénivelé d'une centaine de mètres, une largeur moyenne du nord au sud de 25km et une longueur d'est en ouest de 50km. La densité de population (75 hab./km²) y est très supérieure à la moyenne nationale (50 hab./km²).

Dans la figure 2 qui suit, une carte situe dans le pays : le bassin du Nakambé (en bleu) et, à l'intérieur de celui-ci le bassin du Nariarlé (en rouge). Sur l'image apparaît en rouge les centres urbains dont l'agglomération de Ouagadougou au Nord, les villes de Koubri et Kombissiri respectivement au centre et au sud. En bleu apparaissent les retenues d'eau.

D'un point de vue climatique, la région est située en zone soudano-sahélienne caractérisée par une saison des pluies (hivernage) de 4 à 5 mois (entre juin et octobre) durant lesquels il tombe environ 800 millimètres (le gradient de précipitation étant croissant du nord au sud du

Pays). La diminution des précipitations depuis 35 ans est effective, on observe en effet un glissement des isohyètes de précipitation de 100 à 150 kilomètres vers le sud. Ces précipitations se caractérisent par des événements orageux parfois violents, intenses (jusqu'à 60mm/h) et localisés, en début et fin d'hivernage. La saison sèche est fraîche de décembre à janvier et extrêmement chaude de mars à avril. Pendant cette saison, la région est soumise à l'harmattan, un alizé continental desséchant.

Figure 2 : Le Bassin du Nariarlé



Echelle : 1/400.000

Source : Scène Landsat ETM+ panchro 03/11/2001, BDOT IGB 2002, IRD 2006.

Le bassin du Nariarlé concentre plus de 50 retenues d'eau. Cette densité de barrage, qui est parmi les plus importantes du pays, est à mettre au compte de l'initiative du Frère Adrien du Monastère de Kouabri qui, depuis une trentaine d'année, aménage les bas-fonds de la région. Cet ensemble de réservoirs constitue, pour l'agglomération de Ouagadougou limitrophe au nord, une source non négligeable de produits alimentaires. En effet, de nombreuses fermes agro-pastorales, privées ou communautaires, se sont installées sur ce bassin et écoulent leur production dans les marchés urbains. Le maraîchage est une activité également très présente et qui s'intensifie en saison sèche à la périphérie et dans « le lit » des réservoirs sous la forme de cultures et de jardins irrigués (CECCHI P., 2005). A cela s'ajoute des activités de pêche en complément de cultures vivrières pluviales (mil) un peu partout sur le territoire de la zone d'étude.

2 Structure du Système d'Information Géographique :

Deux grands types de modèles de données doivent être distingués :

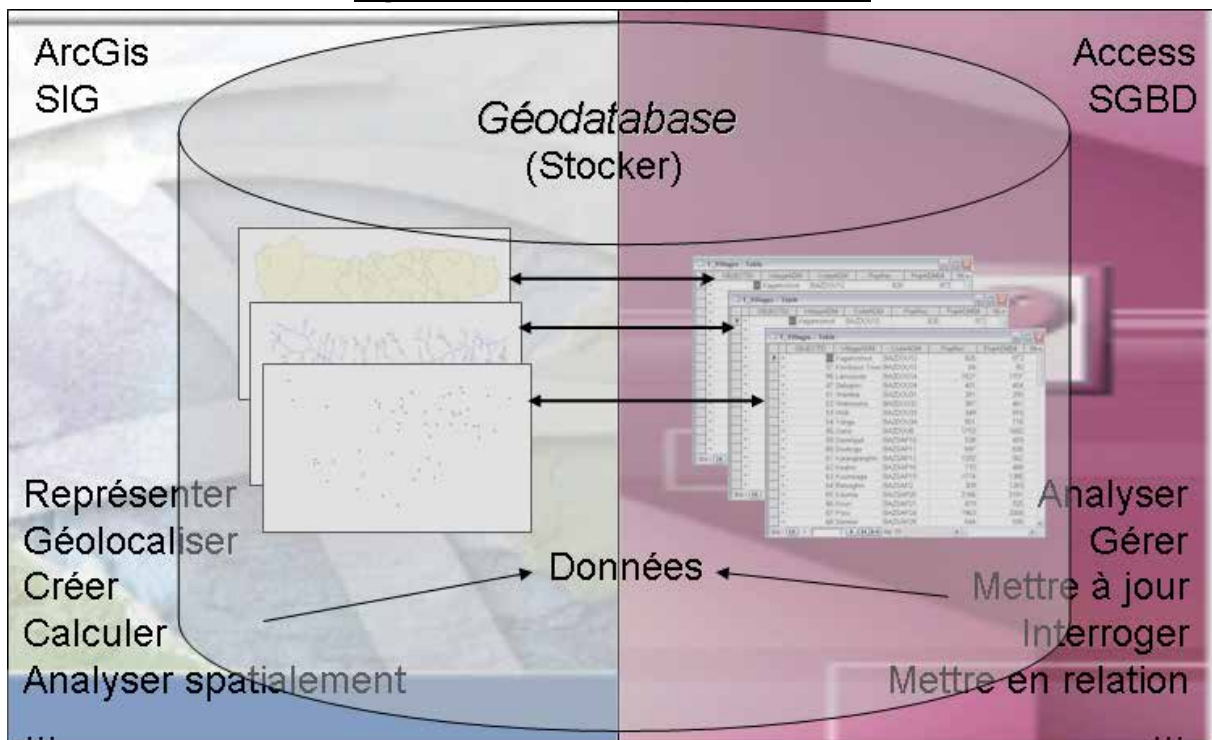
- Les modèles de données graphiques (géoréférencées) qui peuvent se présenter sous deux formats. Premièrement le format vectoriel qui permet de représenter des objets graphiques sous la forme de points, de lignes ou de polygones. Les points sont des paires de coordonnées x, y, les lignes des jeux de paires de coordonnées définissant une forme, et les polygones des jeux de paires de coordonnées définissant des limites qui entourent des zones. Chaque objet possède un identifiant unique. Deuxièmement, le format raster qui correspond à une image (matrice) dont la plus petite zone élémentaire (cellule ou pixel) possède une valeur (compte numérique).
- Les modèles de données tabulaires sont des tables regroupant une population d'individu identifiés de manière unique et caractérisés par les mêmes informations. Ces tables sont organisées en base de données. Elles peuvent contenir de l'information relative à des entités géoréférencées (dont les objets graphiques sont stockés sous forme de fichiers vectoriels). Un objet d'un fichier vectoriel peut donc être lié (grâce à son identifiant) à une série de donnée contenue dans une table. Ces tables peuvent être implémentées de données issues de traitements et calculs sur des données graphiques (raster par ex.).

Des applications logicielles sont spécifiques à la gestion et l'exploitation de ces données. ArcGis est un logiciel SIG de la firme ESRI qui permet de gérer l'ensemble des données citées précédemment. Cependant, il est très vite limité dans la gestion (stockage), l'interrogation, l'exploitation et la mise à jour des données tabulaires. Il est alors préférable de se tourner vers un logiciel SGBD (Système de Gestion de Base de Donnée). ArcGis propose une forme de stockage des données appelée géodatabase (géographic database) personnelle. La géodatabase est au cœur du modèle d'information géographique, qui organise les données SIG en couches thématiques et en représentations spatiales. Elle est constituée d'une série de logiques applicatives et d'outils permettant d'accéder aux données SIG et de les gérer. Les géodatabases personnelles utilisent la structure de fichiers de base de données Microsoft Jet Engine pour conserver les données SIG dans des bases de données de taille restreinte. Elles ressemblent à des espaces de travail à base de fichiers et renferment des bases de données dont la taille ne dépasse pas 2 Go. Microsoft Access, le

SGBD de Microsoft peut donc être utilisé pour travailler sur les tables des géodatabases personnelles. Ce type de géodatabase est idéal pour travailler sur des projets SIG dont les jeux de données sont de taille restreinte et avec des petits groupes de travail.

Le choix de la structure du SIG sera donc, compte tenu des moyen à disposition, la création d'une géodatabase sous ArcGis 9.1 contenant une base de données (BDD) réalisée à l'aide du SGBD Access (versions XP ou supérieures) et les objets graphiques aux formats ArcGis.

Figure 3 : Structure simplifiée du SIG



3 Les étapes de création du projet SIG :

Les objectifs étant définis, la première étape de réalisation d'un SIG est la création de la base de donnée du projet.

La méthode utilisée pour la création de la base de donnée est la méthode MERISE (Méthode d'Etude et de Réalisation Informatique pour les Systèmes d'Entreprise) (TARDIEU & AL., 1986) qui permet notamment de réaliser un système d'information d'une manière standardisée et méthodique :

3.1 Le Modèle Conceptuel de Donnée

La première étape est la réalisation du modèle conceptuel de donnée (MCD). Le MCD vise à modéliser la problématique à traiter d'un point de vue conceptuel et indépendamment du logiciel utilisé. L'objectif est d'identifier les entités (population d'individus homogènes possédants des informations de même nature), les associations qui existent entre ces entités, et les attributs (informations caractéristiques) de chaque table et association. Une entité est donc liée à une association elle-même liée à une ou plusieurs autres entités. Ces liens sont caractérisés par une cardinalité qui précise le minimum et le maximum de fois qu'un individu d'une entité peut être concerné par l'association (minimum : 0 ou 1, maximum : 1 ou n). Une association est « binaire » si elle concerne deux entités, elle est « non binaire » si elle concerne plus de deux entités. Une association entre deux entités est définie par les cardinalités des 2 liens aux entités. Ainsi une association est de type :

- 1.1 (un à un) si aucune des cardinalités maximale n'est n.
- 1.n (un à plusieurs) si une des deux cardinalité maximale est égale à n.
- n.m (plusieurs à plusieurs) si les deux cardinalités maximales sont n.

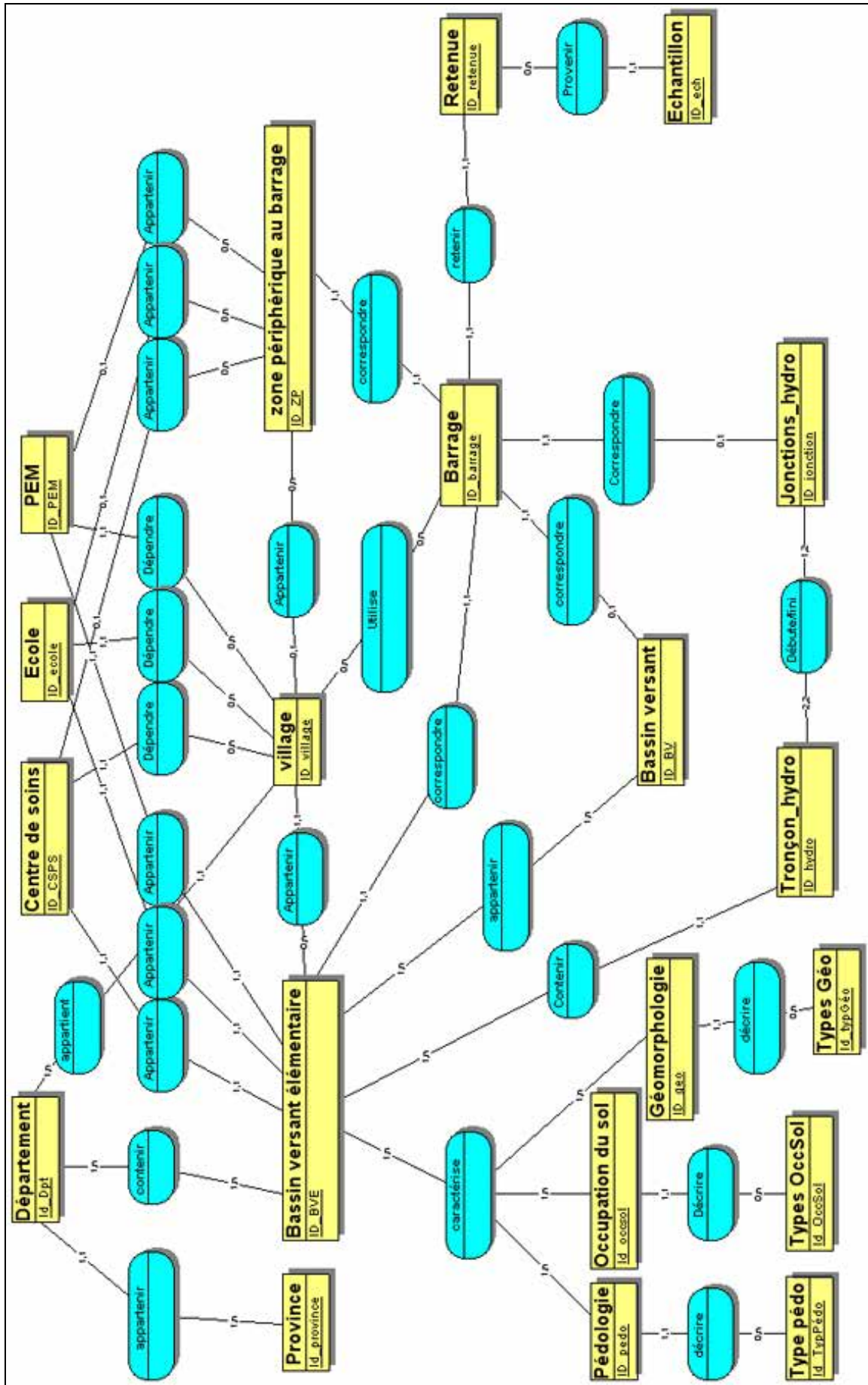
Les entités identifiées sont les suivantes :

- Barrages.
- Retenues : réservoirs de barrage.
- Echantillons : prélèvements d'eau analysés.
- Bassins versants (BV): bassins versants topographique, secteur géographique qui collecte les eaux d'une retenue.
- Bassins versants élémentaires (BVE): correspond au bassin versant dont sont soustraits les bassins versants des retenue situées en amont.

- Tronçons hydrographiques : élément du linéaire du réseau hydrographique dont les extrémités sont des jonctions hydrographiques
- Jonctions hydrographiques : sources, confluences, exutoire, projections des barrages sur le réseau hydrographique.
- Zones périphériques des barrages : zones d'interactions locales (socio-économiques) avec les barrages. Il s'agira d'une zone tampon circulaire, dont le rayon reste à déterminer, autour du barrage.
- Villages
- Départements
- Régions
- Ecoles
- Points d'eau modernes : forages.
- Unités pédologiques : zones dont les caractéristiques pédologiques sont homogènes.
- Unités d'occupation du sol : zones dont l'occupation du sol est homogène.
- Unités géomorphologiques : zones dont les caractéristiques géomorphologiques sont homogènes.
- Types pédologiques : différents sols présents sur la zone d'étude.
- Modes d'occupation du sol : différents mode d'occupation du sol présents.
- Types géomorphologiques : différents types géomorphologiques.

Chaque individu d'une entité doit être identifiable d'une manière unique. C'est pourquoi toutes les entités doivent posséder un attribut sans doublons. Cet identifiant est, par convention, souligné dans le schéma du MCD (cf. figure 4).

Figure 4 : Le modèle conceptuel de donnée



3.2 Le Modèle Logique de Donnée

La deuxième étape consiste à traduire le MCD en un modèle logique de donnée (MLD). Le MLD définit les différentes tables qui vont apparaître dans la base de donnée, leurs champs (attributs des entités du MCD) et caractéristiques (nom, type, taille, description), la clé primaire de chaque table (attribut sans doublons des entités du MCD), les relations et leurs cardinalités.

Les attributs des tables devant être décrits, cette étape nécessite donc de définir les paramètres de caractérisation des différentes échelles d'études : bassins versants, bassins versants élémentaires, zones périphériques et retenues. Ceci permettra la recherche des données nécessaires à l'implémentation de la base de donnée. La littérature scientifique traitant des bassins versants décrit un grand nombre de ces paramètres. Certains de ces paramètres peuvent être considérés comme équivalents (SAAM, 1998). Ainsi, un certain nombre de ces paramètres peuvent être écartés. Le caractère prospectif de ce système d'information et les spécificités géographiques de la zone d'étude (Afrique sub-sahélienne) permettent l'élimination de certains paramètres (ex : taux de raccordement à des stations d'épuration des eaux) et l'ajout de paramètres spécifiques (concernant l'accès à l'eau par exemple) non cités dans la littérature. Les paramètres de description des bassins versants peuvent être répartis en quatre grands ensembles :

- 1/ paramètres physiques : ce sont les descripteurs de la surface des bassins versants, leur forme (topographie), leur « composition » (pédologie, géomorphologie) :
 - Altitude moyenne, minimale, maximale.
 - Pente moyenne
 - Périmètre
 - Surface
 - Orientation
 - Compacité : Indice de Gravelius = rapport du périmètre du BV au périmètre du cercle de même surface.
 - Intensité de drainage : d'après Horton, est la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant.
 - Surfaces et pourcentages de chaque types pédologiques et géomorphologiques.

2/ paramètres hydrologiques : ce sont les descripteurs et caractéristiques du réseau hydrographique sur le bassin versant (dimensions et indices divers).

- Longueur totale de cours d'eau.
- Somme des longueurs des cours d'eau du même ordre de Strahler.

3/ paramètres météorologiques : étant donné la taille de la zone d'étude (environ 1000 km²) et la précision (géographique) des données météorologiques, l'uniformité météorologique de la zone d'étude rend peu pertinentes des interpolations à l'échelle des bassins versants. Cependant, l'hivernage étant caractérisé par des épisodes orageux violents et parfois très localisés, il est important de savoir que des différences significatives peuvent être observées en divers points du territoire étudié. Pour une description globale de la zone d'étude, les paramètres retenus sont :

- Températures.
- Précipitations.
- Vents dominants.
- Ecart de température diurne.
- Nombre de jours de pluie.
- Humidité relative.

4/ paramètres socio-économiques : ces paramètres décrivent les bassins versants du point de vue des populations (structure, répartition, activité...), des équipements (accès à l'eau, scolarisation, santé) et de l'utilisation de l'espace (occupation du sol) :

- Population totale.
- Densité de population.
- Nombre et densité de structures d'enseignement et taux d'équipement.
- Nombre et densité de structures de santé et taux d'équipement.
- Nombre et densité de forages et taux d'équipement.
- Surfaces et pourcentages de chaque mode d'occupation du sol.

Concernant les zones périphériques, ce sont les caractéristiques socio-économiques qui présentent de l'intérêt. Ces zones pourront être décrites par les mêmes paramètres socio-économiques des bassins versants.

Dans le cas des retenues, les paramètres descripteurs sont issus de deux campagnes de terrain. Deux catégories de paramètre sont distinguées :

1/ Les paramètres de qualité de l'eau (physico-chimie, diversité biologique...).

- pH.

- Conductivité.
- Concentration en Matières En Suspension (MES).
- Particulate Organic Matter (POM) : part organique des MES (en %).
- Particulate Inorganic Matter (PIM) : part inorganique des MES (en %).
- Concentration en Cyanobactéries, et part dans le peuplement algal.
- Concentration en algues vertes, et part dans le peuplement algal.
- Concentration en algues brunes, et part dans le peuplement algal.
- Concentration en chlorophylles.
- Activité photosynthétique.
- Concentration en nitrates, nitrites, azote total,
- Concentration en phosphates.
- Turbidité.

2/ Les caractéristiques physiques et socio-économiques de la retenue (usages, occupation des berges...).

- Nature et état de la digue.
- Etat du déversoir.
- Pourcentage de la surface recouvert de macrophytes.
- Présence et quantité d'arbres morts.
- Mode d'occupation du sol des terres adjacentes.
- Présence/Absence des activités de pêches, puisages, baignades, élevages, briques et jardins.
- Profondeur, surface.

Pour traduire un MCD en MLD, cinq règles doivent être respectées :

- 1/ Toutes les entités deviennent des tables où les attributs sont des colonnes et l'identifiant sans doublon la clé primaire.
- 2/ Une association binaire de type 1.n disparaît au profit d'une clé étrangère dans la table du coté 0.1 ou 1.1 qui référence la clé primaire de la table du côté 0.n ou 1.n.
- 3/ Une association binaire de type n.m devient une table intermédiaire dont la clé primaire est composée de deux clés étrangères (qui référence les clés primaires des tables associées). Les attributs de l'association deviennent des colonnes de cette nouvelle table.
- 4/ Une association binaire de type 1.1 est traduite comme une association de type 1.n sauf que la clé étrangère se voit appliquer une contrainte d'unicité.
- 5/ Une association non binaire devient une table dont la clé primaire est constituée d'autant de clés étrangères qu'il y a d'entités associées.

3.3 Le Modèle Physique de Donnée

La troisième étape (Modèle Physique de Donnée, MPD) consiste à traduire le travail précédent dans le logiciel SGBD (Système de Gestion de Base de Donnée) : Microsoft Access. Il s'agit de créer les tables (en respectant les caractéristiques précédemment définies) et mettre en place les relations.

NB : le type de donnée est important, ainsi, les champs sur lesquels des calculs peuvent être effectués seront de type numérique, les clés primaires seront toujours de type caractère (ou texte dans Access) car aucun calcul ne peut être effectué sur ces champs. La taille des champs doit être minimale (en fonction des données qui y seront implémentées) pour optimiser le fonctionnement de la base de donnée.

3.4 De la base de donnée à la géodatabase : la composante graphique

Cette phase nécessite de préciser lesquelles des entités définies pour le MCD auront une composante graphique (un fichier graphique vectoriel associé à la table de la base de donnée). Le tableau 1 (cf. infra) décrit pour chaque entité, le besoin d'une composante graphique associée et la source de cette composante.

Les bassins versants n'auront pas de composante graphique pour une raison : la difficulté pour le SIG de gérer une couche (un fichier graphique) dans laquelle les polygones (bassins versants) se superposeraient systématiquement (le BV d'un barrage se superpose à la partie amont du BV d'un barrage plus en aval). Une des difficultés est par exemple l'impossibilité de réaliser des relations spatiales (une relation spatiale dans ArcGis est toujours de type 1-1 alors qu'un point peut appartenir à plusieurs BV). Une solution qui aurait pu être envisagée consiste à réaliser plusieurs couches ne comportant chacune que des bassins versants qui ne se superposent pas (on obtient alors une série de couches avec des bassins versants de taille croissante, la première couche est composée des bassins les plus en amont, la dernière couche est composée du plus grand bassin, celui de la retenue la plus en aval). Cette solution pose le problème de l'accumulation et de la dispersion de la donnée (graphique et attributaire). Pour palier à ce problème, on considérera que l'information graphique des bassins versants est contenue dans le fichier des bassins versants élémentaires. Le bassin versant d'une retenue est l'agrégation du bassin versant élémentaire de cette retenue et des bassins versants élémentaires des retenues situées en amont. La

création et le calcul des paramètres à l'échelle des bassins versants peuvent donc se faire par itération de la création des bassins versants à partir des bassins versants élémentaires. Ce travail peut être assuré par des programmes (macros) qu'il faudra développer. Les bassins versants créés (graphiquement) existeront de manière temporaire, le temps du calcul des paramètres, pour limiter l'accumulation de données. Il n'y aura donc, pour les bassins versants, que la composante attributaire implémentée à l'aide des programmes.

Les types d'occupation du sol, pédologiques et géomorphologiques n'ont pas de composantes graphiques puisque chaque individu de ces entités décrit un ensemble d'individus des entités unités d'occupation du sol, unités pédologiques, unités géomorphologiques elles-mêmes représentés graphiquement.

Les échantillons ne sont pas géoréférencés, ils sont localisés par la retenue dans laquelle le prélèvement a été réalisé.

Composante graphique						
entités identifiées	Besoin?	Documents sources			utilisation dans l'état?	type vecteur
		type/nom	source	format		
Tronçons hydro	oui	scan numérique des cartes IGB 1/50000	IRD	Image .jpg non géoref	non	linéaire
Jonctions hydro	oui		IRD	Image .jpg non géoref	non	ponctuel
Barrages	oui	fichier barrages	IRD	Excel avec coord.	non	ponctuel
Bassins versants élémentaires (BVE)	oui				MNT radar pas 90m	mission SRTM de l'USGS
Bassins versants	non					
Retenues	oui	Image Landsat ETM+ 11/2001 pas 30m	USGS	raster géoref	non	polygone
Unités d'Occupation du sol	oui	BDOT 1/100000	IGB	Shpfile géoref	oui	polygone
		Image Landsat ETM+ 11/2001 pas 30m	USGS	raster géoref		
Type d'Occupation du sol	non					
Unités pédologiques	oui	BD sols 1/50000	BUNASOLS	Shpfile géoref	oui	polygone
Type de sols	non					
Unités géomorpho	oui	BD géomorph 1/500000	IGB	Shpfile géoref	oui	polygone
Types géomorpho	non					
Ecoles	oui	fichiers écoles	MEBA	Excel avec villages	non	ponctuel
Centre de santé	oui	Base de donnée Points d'eau	DGRE	BDD Access avec coord.	non	ponctuel
Points d'eau	oui				non	ponctuel
villages	oui				non	ponctuel
Départements/ Provinces	oui	BNDT	IGB	Shpfile géoref	oui	polygone
		fichier SIG	IRD	Shpfile géoref		
Echantillon	non					
Zones périphériques au barrage	oui	fichier barrages	IRD	BDD Access	non	polygone

Tableau 1 : Les composantes graphiques des entités

Le tableau 1 met également en évidence les entités pour lesquelles le fichier graphique devra être créé. Ainsi, pour toutes les entités dont l'utilisation de la source dans l'état est possible, les traitements à réaliser se limiteront à une transformation géographique (changement de système de coordonnées). Le système retenue pour le SIG sera basé sur le

datum WGS84 et la projection UTM zone 30 Nord. Ce système a été retenu parce qu'il a la plus forte fréquence d'apparition pour nos données et que le datum WGS84 est celui utilisé par le système GPS (Global Positioning System) ce qui permettra l'apport facilité et sans traitements de nouvelles données de terrain.

Ensuite, plusieurs composantes graphiques sont à créer :

1/ Le réseau hydrographique et les jonctions hydrographiques :

La première phase consiste en un géoréférencement de l'image scannée (sur la base des images landsat). Il faut ensuite digitaliser le réseau hydrographique en prenant soin de digitaliser dans le sens d'écoulement. Le réseau doit ensuite être découpé selon les barrages (outil « Découper les lignes par des points »), il faut au préalable replacer les barrages sur le réseau hydrographique grâce à l'outil « Accrocher des points à des lignes ». Les jonctions hydrographiques sont enfin obtenues grâce à l'outil « Sommets d'entités vers points » appliqué au réseau digitalisé et découpé selon les barrages.

2/ Les barrages, écoles, points d'eau et villages :

Les coordonnées de ces entités ponctuelles sont disponibles dans des tableaux Excel ou des tables de base de donnée Access. Certaines nécessitent un traitement et une conversion éventuelle des coordonnées vers la projection et l'unité souhaitée. Il suffit ensuite d'enregistrer ces tables au format .dbf et de créer (dans ArcCatalog : module d'exploration et de gestion de données du logiciel ArcGis) une classe d'entité (composante graphique) à partir des coordonnées contenues dans la table (« A partir d'un table X Y... » comme définit dans ArcGis).

Les données complémentaires disponibles (pour les écoles et les villages) permettront de réaliser des vérifications et d'effectuer les modifications nécessaires.

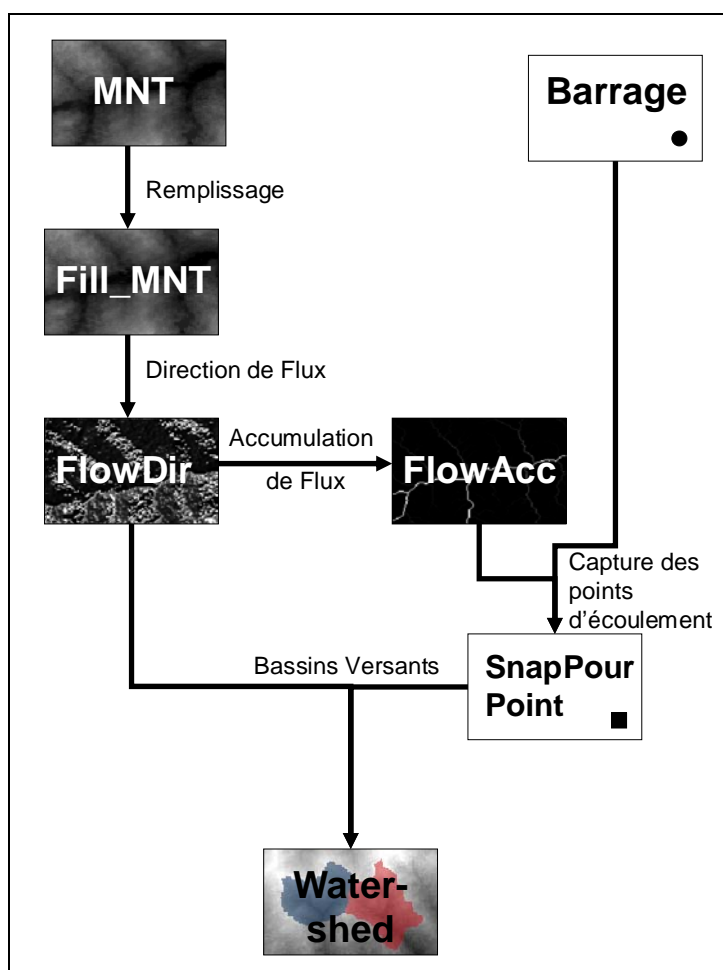
3/ Les bassins versants élémentaires :

Tout d'abord chacun des bassins versants des barrages doit être défini. Dans ArcGis, une série d'outils « Hydrologie » disponibles avec l'extension Spatial Analyst permet de tracer les bassins versants topographiques. Les données nécessaires sont : un Modèle Numérique de Terrain (MNT, ou Digital Elevation Model en anglais) et le fichier graphique des barrages. Le MNT est

un fichier raster dans lequel chaque cellule se voit attribuer comme valeur l'altitude moyenne de la cellule. A partir du fichier barrage, il convient de créer plusieurs fichiers vectoriels comportant 1 ou plusieurs barrages en vérifiant que dans un même fichier il n'y est pas de barrages dont les bassins versants puissent se superposer.

La figure 5 décrit la méthode qui permet, dans ArcGis, de définir les bassins versants des barrages. En premier lieu, la fonction « remplissage » permet de remplir une surface raster, en l'occurrence le MNT, pour supprimer des imperfections dans les données (dépressions locales). Ensuite, il faut créer un raster de direction de flux qui donne pour chaque cellule la direction vers son voisin de plus grande pente descendante. Le raster d'accumulation de flux est obtenu à partir du raster de direction de flux, il met en évidence les zones d'écoulement préférentiel (les pixels situés dans les talwegs ont les plus fortes valeurs, valeurs qui croissent vers l'aval). La fonction « Capture des points d'écoulement » permet de rechercher, dans un rayon déterminé autour du barrage, une cellule de plus forte accumulation de flux (cette fonction vise à replacer les barrages sur le talweg). Le raster de points d'écoulement permet avec le raster de direction de flux d'obtenir les bassins versants.

Figure 5 : Méthode de définition de la limite des bassins versants



Les deux dernières fonctions sont bien évidemment à renouveler autant de fois qu'il y a de fichiers de barrages. Les fichiers raster des bassins versants ainsi obtenus doivent ensuite être vectorisés. Enfin, une série d'intersections (fonction « intersecter ») entre ces fichiers de bassins versants permettra d'extraire les bassins versants élémentaires puis de les rassembler dans un seul fichier vectoriel.

3.5 Implémentation de la base de donnée

Une grande partie des données est directement disponible et ne pose aucune difficulté à l'intégration dans la base de donnée. En revanche, nombreuses sont les données, notamment les paramètres descripteurs qui doivent être calculés. ArcGis offre des possibilités de calculs de paramètres simples (avec l'extension Spatial Analyst) :

- 1/ Calculs des paramètres géométriques des polygones d'une couche (périmètre, aire, compacité... de chaque zone) : fonction « géométrie zonale ».

- 2/ Pour chaque polygone d'une couche, calcul des statistiques des parties d'un fichier raster inscrite dans les polygones (ex : calcul de l'altitude moyenne, min, max...des zones en fonction d'après un MNT) : fonction « statistiques zonales ».
- 3/ Calculer les superficies croisées de deux couches de donnée (obtenir la superficie de chaque mode d'occupation du sol pour chaque zone) : fonction « croiser les superficies ».

Ce type d'information est facile à obtenir pour les bassins versants élémentaires ou pour les zones périphériques (calculs pour un seul fichier de zones). Le choix de ne pas travailler avec plusieurs fichiers de bassins versants prends ici tous sont sens, en effet, le réalisation des calculs précédemment cités aurait nécessité de renouveler les opérations autant de fois qu'il y a de fichiers bassin versant. Ce travail fastidieux sera prit en charge par des programmes qui automatiseront les calculs des paramètres pour les bassins versants et ceci à partir du fichier des bassins versant élémentaires.

Description des programmes réaliser pour le calcul des différents descripteurs des bassins versants et bassins versants élémentaires :

Les programmes sont développés au format AML (Arc Macro Language). Quatre programmes ont été développés et exportent au format DBF, pour chaque bassin versant et bassin versant élémentaire, des statistiques concernant de l'information contenue dans (1) un fichier raster, (2) un fichier vectoriel polygonal, (3) un fichier vectoriel linéaire, (4) un fichier vectoriel ponctuel. Les programmes suivants ont été développés :

- 1/ *hydro_stat_grid.aml* qui retourne pour chaque BV et BVE la moyenne, le maximum, le minimum, l'étendue, la somme, l'écart-type, la variété, la valeur majoritaire, la valeur minoritaire et la médiane d'un raster. Ex : recherche de l'altitude moyenne sur les BV d'après un MNT.
- 2/ *hydro_stat_poly.aml* qui retourne pour chaque BV et BVE la surface de chaque classe (contenue dans un champ) d'un fichier de zone (raster ou vecteur polygonal). Ex : surface de chaque mode d'occupation du sol présent sur les BV.
- 3/ *hydro_stat_arc.aml* qui retourne pour chaque BV et BVE la somme des longueurs des tronçons de même classe (contenue dans un champ) d'un fichier linéaire (vectoriel). Ex : longueur de chaque type de routes présent sur les BV.

4/ *hydro_stat_point.aml* qui retourne pour chaque BV et BVE la somme, la moyenne, le maximum, le minimum et l'écart-type des valeurs d'un champ d'un fichier graphique ponctuel. Ex : Détermination de la population (connue à l'échelle du village) totale des BV.

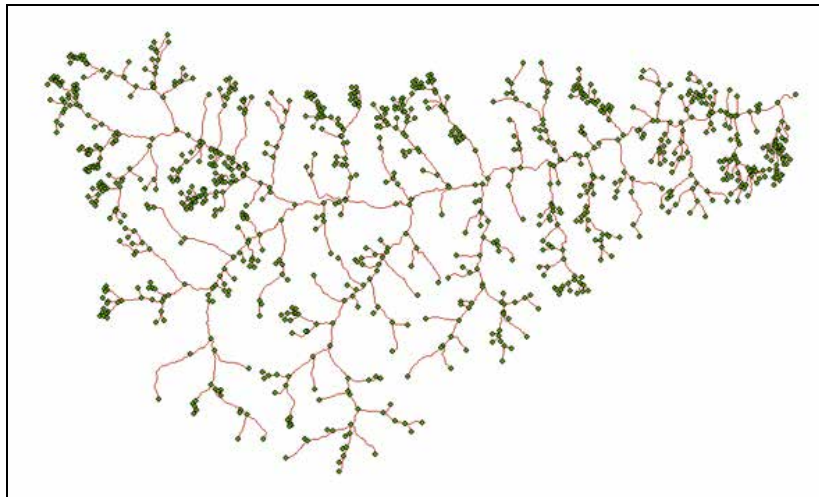
Les fichiers communs nécessaires au fonctionnement des programmes sont :

- Le fichier graphique (format shapefile) des bassins versants élémentaires.
- Le fichier graphique (format shapefile) des tronçons hydrographiques.
- Le fichier graphique (format shapefile) de l'exutoire du réseau hydrographique.
- Le fichier informatif d'après lequel sont calculés les paramètres/statistiques.

Les étapes de fonctionnement des programmes :

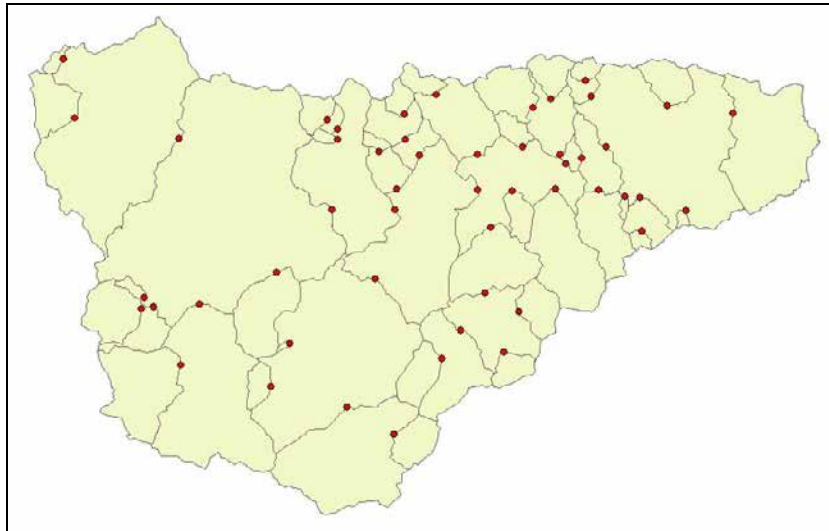
- Vérification des données en entrée (existence, projection, géométrie).
- Calcul des statistiques pour les BVE.
- Le fichier des tronçons hydrographiques est converti en réseau (format SIG avec relations topologiques particulières.)
- Création d'un fichier jonction hydrographique (points remarquables du réseau : sources, confluences, intersection avec les BVE...)

Figure 6 : Les jonctions hydrographiques



- Calcul de la distance de chaque jonction hydrographique à l'exutoire du réseau.
- Identification des exutoires de chaque BVE et BV (Jonctions incluses dans le BVE et ayant la plus faible distance à l'exutoire du réseau).

Figure 7 : Identification des exutoires des BVE et BV



➤ Création des BV et calcul des statistiques :

1. Le premier BV traité par le programme est celui dont l'exutoire est le plus proche de l'exutoire du réseau hydrographique.
2. Création du réseau hydrographique de ce BV.
3. Sélection des BVE qui intersectent avec ce nouveau réseau hydrographique.

Figure 8 : Création des Bassins Versants



4. Union des BVE sélectionné pour former un BV.
 5. Calcul des statistiques sur le BV formé.
 6. Le deuxième BV traité est celui dont l'exutoire est le deuxième plus proche de l'exutoire du réseau hydrographique.
 7. etc... pour obtenir tous les BV et effectuer les calculs.
- Regroupement des statistiques dans une table.

Résultats et Discussion

Le Système d'Information Géographique mis en place est opérationnel. Compte tenu de la qualité et de l'échelle des données sources, ce SIG permet dans l'état actuel de décrire de façon convenable (compte tenu des objectifs) le bassin du Nariarlé, les bassins versants et bassins versants élémentaires des retenues. Une analyse de l'occupation du sol et de son évolution a été réalisée (cf. Annexe 1 et 2).

Concernant les données collectées, il faut noter l'importance des traitements et vérifications nécessaires à leur implémentation dans la géodatabase. Il convient donc de connaître la source et le moyen de recueil des données et ainsi avoir une vision critique de la qualité des données implémentées.

L'ensemble de ces données est disponible de manière simple à l'aide de requêtes spatiales ou thématiques. L'export au format DBF permet de traiter aisément les données et de les convertir dans des formats lisibles par les logiciels dédiés aux statistiques.

La table de l'entité zones périphériques aux barrages n'a pas été implémentée, il n'a pas été possible de convenir d'une définition de ces zones périphériques. Le rayon des zones périphériques doit être défini en essayant dans la mesure du possible d'éviter leur superposition.

L'entité graphique représentant les retenues n'a pas été réalisée, en effet, toutes ne peuvent être discriminées sur les images landsat qui ne permettent donc pas la digitalisation systématique. L'obtention des données morphologiques des retenues (notamment leur surface) paraît pourtant pertinente. La surface des retenues est un paramètre analysé dans plusieurs études s'intéressant aux relations entre des plans d'eau et leurs environnements (MARTIN S.L., SORANNO P.A., 2006. et DECLERCK S. & AL., 2006. par exemple). A la même échelle, l'acquisition de données sur les pratiques agricoles (localisation, évolution, intensivité) à la périphérie des retenues semble également utile à la compréhension des interactions avec le milieu aquatique.

L'intérêt de ce SIG et de sa réalisation réside dans son exportabilité à d'autres sites d'étude (notamment sur d'autres sous-bassins du Fleuve Volta), cette qualité réside dans l'utilisation d'un MNT issue de la SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) en téléchargement gratuit sur le site Internet de l'USGS (United States Geological Survey). Ces MNT sont disponibles à l'échelle mondiale et nécessitent peu de traitements. Le MNT permet en effet de créer les

bassins versants élémentaires, objets géographiques de base du projet. De plus, ces MNT peuvent être utilisés pour définir un réseau hydrographique (d'une précision variable selon la résolution du MNT et parfois faux dans le cas de modifications anthropiques et sur les terrains plats). L'avantage réside alors dans le fait que les fichiers ainsi obtenus peuvent être utilisées par les programmes développés pour le calcul des descripteurs.

Il faut cependant noter que des limites apparaissent quant à la définition et au tracé des bassins versants :

Premièrement, une limite à l'exportabilité de la méthode : ici, la base de travail est le bassin versant topographique. Le bassin versant topographique ne prend en compte que les apports en eau atmosphérique et pas les apports souterrains. Dans certaines structures géologiques, les apports souterrains peuvent provenir de nappes ou de rivières souterraines se rechargeant en dehors du bassin versant topographique (en milieu karstiques par exemple). Il convient donc de vérifier la structure hydrogéologique de la zone d'étude et d'adapter la méthode de délimitation des bassins versants.

Deuxièmement, concernant la définition des limites des bassins versants, il faut préciser que quelques difficultés ont été rencontrées dans la méthode utilisée (fonctions ArcGis). Il arrive parfois que les bassins versants produits soient faux. Ainsi il est nécessaire d'adapter la méthode et les traitements. Par exemple il est possible d'obtenir de meilleurs résultats en remplaçant les points d'écoulement (points sur le barrage) par le polygone de la retenue (lorsque c'est possible) ou tout autre polygone dont il est sûr qu'il est inscrit dans le bassin versant et dont un sommet est le point d'écoulement. L'utilisation du logiciel Idrisi (Clarklabs) s'est révélée parfois plus efficace. Il faut retenir que la délimitation automatique des bassins versants ne permet pas de se prévaloir des vérifications et éventuelles modifications manuelles d'après les cartes topographiques et le réseau hydrographique.

Plusieurs productions cartographiques ont d'ores et déjà été réalisées pour illustrer notamment un projet d'étude et un poster exposé à la *2006 World Water Week in Stockholm*.

De premières analyses statistiques sont menées, elles visent à rechercher les potentielles relations des concentrations en MES et la PIM dans l'eau des retenues avec les usages fait de ces retenues.

Conclusion et perspectives

Aux vues des objectifs énoncés, l'outil développé permet de répondre à la demande, la description des différentes échelles d'étude peut être réalisée. L'emploi de méthodes standardisées (MERISE) apparaît comme étant indispensable à la bonne conduite d'un projet de création de base de donnée et par extension d'un Système d'Information Géographique.

Dans le cas de l'étude des bassins versant et de leur intégration dans un SIG, se pose le problème de la représentation de ces bassins versants lorsque ceux-ci ne sont pas indépendants. La solution qui a été choisie ici consiste en l'utilisation d'objets graphiques facilement gérables dans le SIG (les bassins versants élémentaires) et au développement d'applications automatisées pour extraire la donnée souhaitée à l'échelle des bassins versants. L'utilisation de données accessibles à tous et libres de droits dans le création des bassins versants élémentaire permet une bonne exportabilité de la méthode et des programmes.

Comme il a déjà été énoncé, l'acquisition de données concernant la géométrie des retenues et les pratiques agricoles est indispensable : ces données peuvent s'obtenir par la réalisation d'une enquête associée à une campagne de prises de vue aériennes pour comprendre et représenter les retenues et la pression agricole qui s'exerce sur celles-ci.

Cet outil permet sans aucun doute d'augmenter les connaissances sur le bassin du Nariarlé et pourra s'avérer déterminant dans la compréhension des relations entre les bassins versants et les écosystèmes aquatiques que sont les petits réservoirs du Burkina Faso. Les enjeux sont d'importance : alimentaires, agricoles, sanitaires dans un pays à la démographie croissante et dont la gestion de la ressource en eau constitue une étape indispensable au développement. L'étude des relations entre l'écologie des retenues et leurs bassins versants doit maintenant se poursuivre à travers un important travail d'exploitation statistique des données organisées.

Bibliographie :

Atlas de l'Afrique, Burkina Faso, 2005 - 1^{ère} édition, Les éditions J.A.

BERTON S., 1988 – *La maîtrise des crues dans les bas-fonds, petits et microbarrages d'Afrique de l'ouest*, Avant propos de HASSANE A., GRET éditions.

CECCHI P., 2005 – *Les petits barrages du Burkina Faso : un vecteur du changement social et de mutations des réalités rurales*, Argumentaire militant en faveur de la réhabilitation des ouvrages de Koubri, non publié.

DECLERCK S. & AL., 2006 – *Ecological characteristics of small farmland ponds: Association with land use practices at multiple spatial scales*, Biological conservation 131. pp 523-532.

DURAND J-M, ROYET P., MERIAUX P., 1999 - *Technique des petits barrages en Afrique sahélienne et équatoriale*, EIER – Cemagref Editions, p. 5.

JOHNSON L.B., GAGE S.H., 1997 – *Landscape approaches to the analysis of aquatic ecosystems*, Freshwater Biol. 37: pp. 113-132.

MARTIN S.L., SORANNO P.A., 2006 – *Lake landscape position: relationship to hydrologic connectivity and landscape features*, Limnol. Oceanogr. 51(2). pp 801-814.

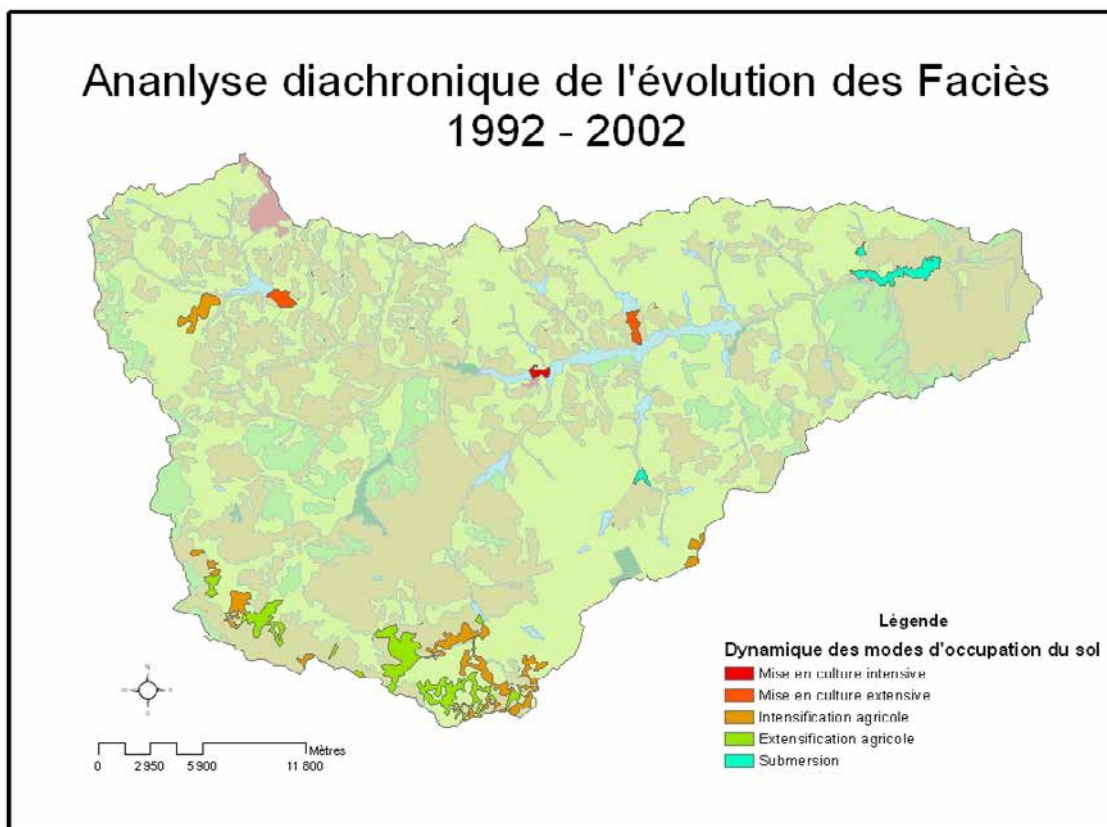
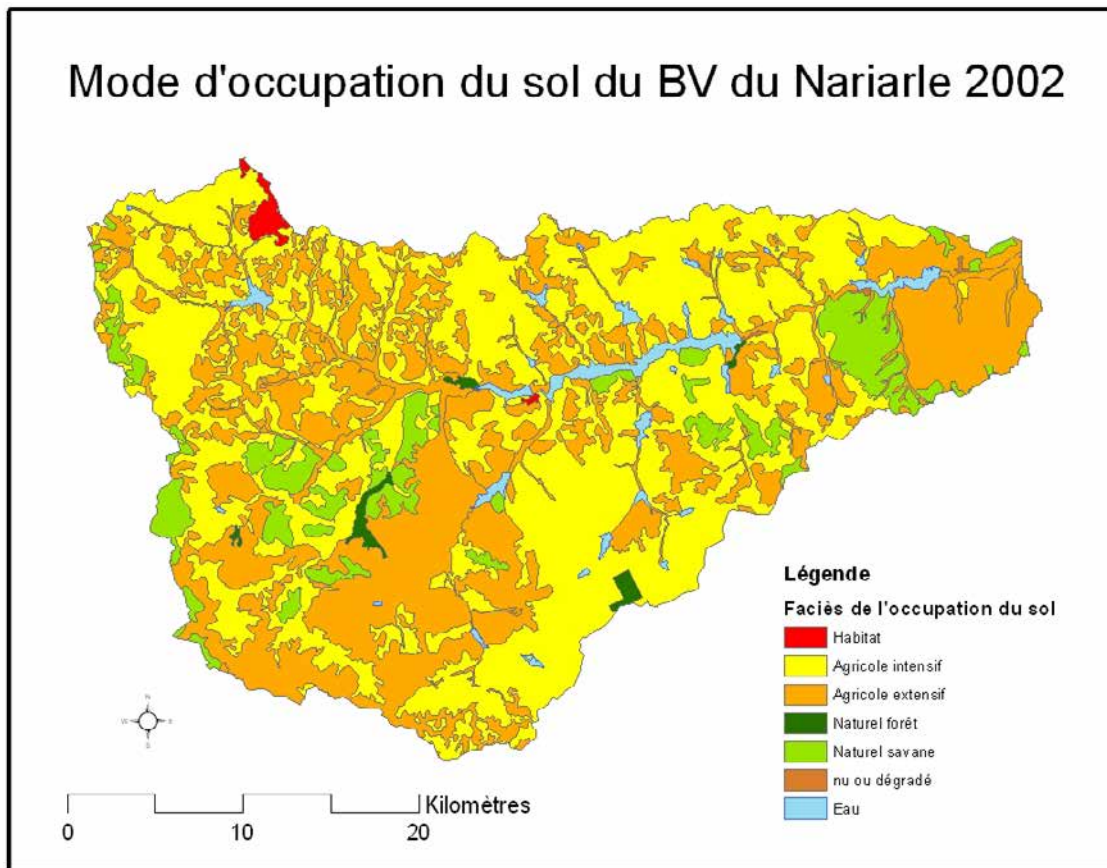
SAAM M., 1998 – *Analyse SIG et caractérisation des bassins versants de petits plans d'eau en relation avec la biodiversité*, Thèse, Faculté des Sciences de l'Université de Genève, p 53.

SINGH V. P., FIORENTINO M., 1996 – *Geographical information systems in hydrology*, Kluwer Academic Publishers, 443 p.

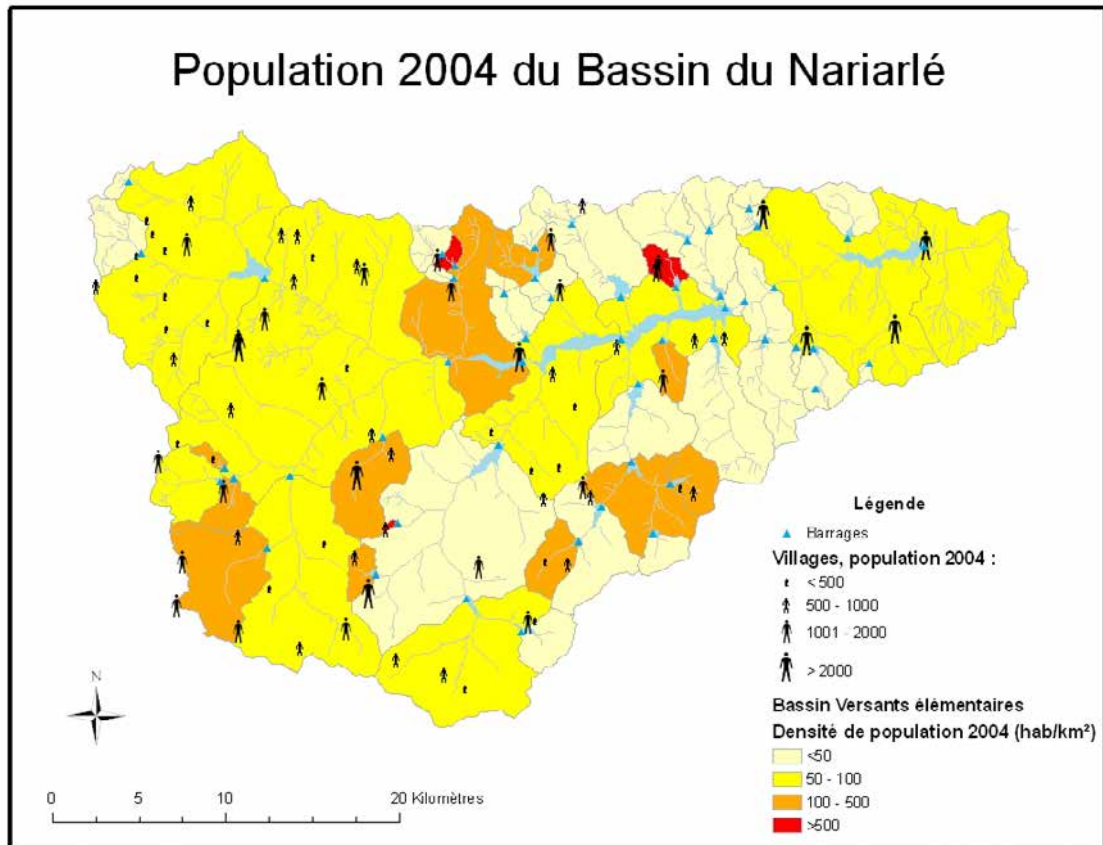
TARDIEU H., ROCHFELD A., COLETTI R., 1986 – *La méthode MERISE. Principes et outils*, Edition d'organisation.

Water institute, 2005: www.water-institute.com

Annexe 1 : Modes d'occupation du sol et évolution

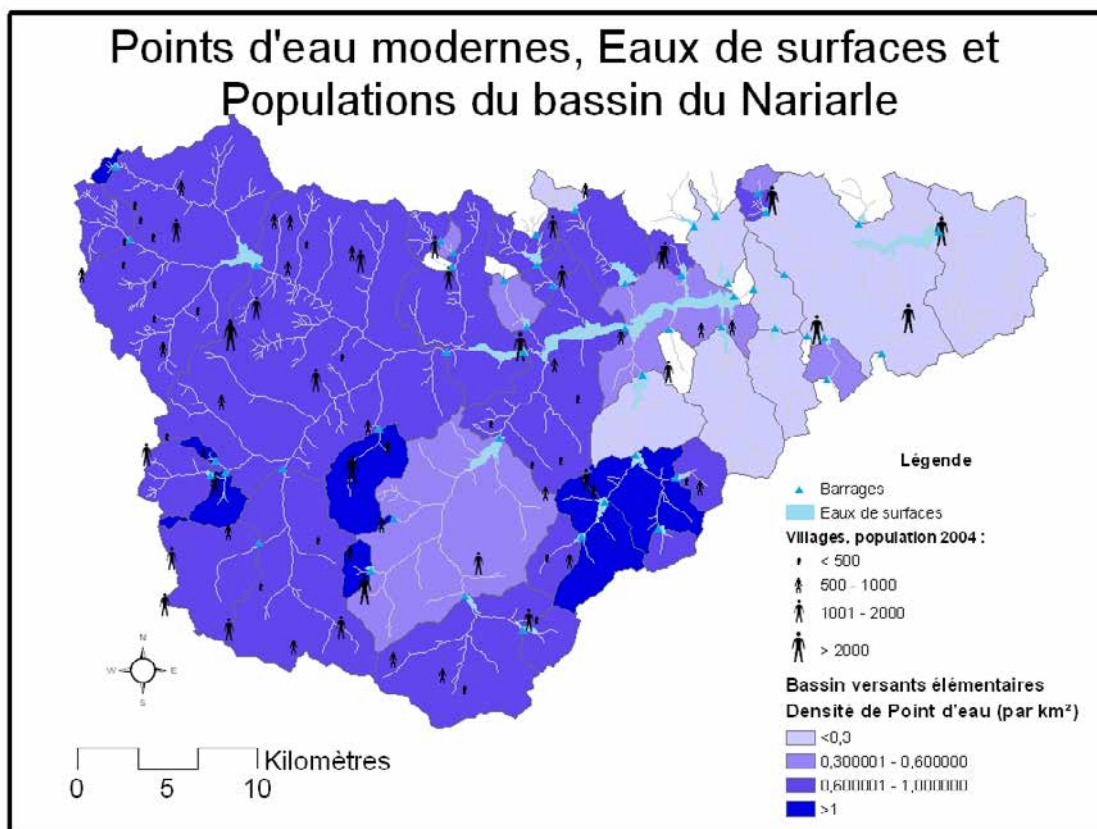


Annexe 2 : Population et Ressource en eau



Source : DGRE 2004, IRD.

N. MOIROUX, IRD, UR CyRoCo, Juillet 2006.



Sources : IRD et Base de donnée Points d'eau DGRE

N. MOIROUX, IRD, UR CyRoCo, juillet 2006

Résumé

De nombreux barrages ont été édifiés au Burkina Faso en vue de sécuriser la ressource en eau. Le bassin du Nakambé (ex. Volta Blanche) est considéré comme stratégique en raison de la dépendance nationale et du partage de la ressource en eau avec le Ghana. De nombreuses et diverses interrogations se posent quant à l'état et au devenir des écosystèmes aquatiques de ce bassin, et en premier lieu des lacs et réservoirs. Les activités conduites par l'Unité de Recherches CyRoCo (Cyanobactéries, Rôles et Contrôles) de l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) se focalisent sur le déterminisme et les conséquences des efflorescences à cyanobactéries, en raison principalement des risques écologiques (eutrophisation) et sanitaires (toxicité) qui leur sont potentiellement attachés. Sans que des réponses claires ne soient encore apportées, il paraît probable que les interactions entre "usages" des bassins versants et des écosystèmes, et qualité de ces écosystèmes sont déterminants. Pour la caractérisation d'un bassin versant, pour l'étude des relations entre bassins versants et qualité des écosystèmes aquatiques, le Système d'Information Géographique est indispensable. Cet outil est mis en place sur le bassin versant du Nariarlé, affluent du Nakambé, qui est caractérisé par une des plus forte concentration de barrages du Pays. Le SIG s'articule sous la forme d'une géodatabase ArcGis contenant les objets graphiques et une base de donnée gérée par le Système de Gestion de Base de Donnée Access. La base de donnée est créée d'après la méthode MERISE. Les tables obtenues sont liées à une composante graphique dans la géodatabase. Des programmes ont été réalisés dans le but d'automatiser le calcul de paramètres descriptifs des bassins versants. Le SIG est opérationnel et exportable, quelques travaux visant à étudier notamment l'évolution des modes d'occupation du sol ont été réalisés. Cet outil permet sans aucun doute d'augmenter les connaissances sur le bassin du Nariarlé et pourra s'avérer déterminant dans la compréhension des relations entre les bassins versants et les écosystèmes aquatiques que sont les petits réservoirs du Burkina Faso.

Mots clés

SIG – bassin versant – lac – réservoir– Burkina Faso – écologie