

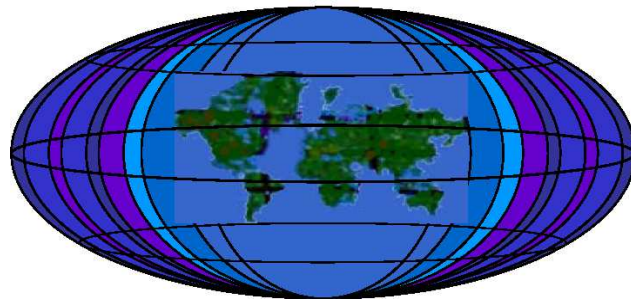


United Nations
Educational, Scientific and
Cultural Organization



Analyse et Modélisation du Cycle Hydrologique Continental pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau au Bénin *Cas du Bassin de l'Ouémé à Bétérou*

Thèse de Doctorat



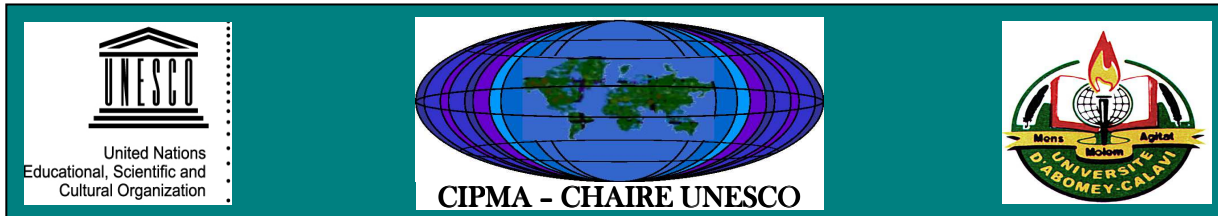
Chaire Internationale en Physique Mathématique et Applications
(CIPMA - Chaire UNESCO)

Par

Arnaud Bruno Yémalin ZANNOU

**Faculté des Sciences et Techniques (FAST)
Université d'Abomey-Calavi (UAC)
Cotonou, République du Bénin**

ICMPA PUBLISHING © 2011



Université d'Abomey-Calavi (UAC), BENIN
Faculté des Sciences et Techniques (FAST)
Chaire Internationale en Physique Mathématique et Applications
(CIPMA - Chaire UNESCO)

N°006/PhD/CIPMA/FAST/UAC

Analyse et Modélisation du Cycle Hydrologique Continental
pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau au Bénin
Cas du Bassin de l'Ouémé à Bétérou

Thèse de Doctorat
en
Hydrologie et Gestion Intégrée des Ressources en Eau (PhD-HGIRE)

Présentée et Soutenue Publiquement le 17 Octobre 2011 par

Arnaud Bruno Yémalin ZANNOU

Superviseurs : Prof Abel AFOUDA et Dr Eric SERVAT

Jury :

Président :	Prof Norbert HOUNKONNOU	<i>Professeur Titulaire en Physique, FAST/UAC, Bénin</i>
Rapporteur :	Prof Abel AFOUDA	<i>Maître de Conférences, Co-Directeur de Thèse, FAST/UAC, Bénin</i>
Rapporteur :	Dr Christophe PEUGEOT	<i>Chargé de Recherche, Encadreur de Thèse, HSM/IRD, France</i>
Examineur :	Prof Euloge AGBOSSOU	<i>Maître de Conférences en Sciences de l'Eau, FSA/UAC, Bénin</i>
Examinatrice :	Dr Sylvie GALLE	<i>Chargé de Recherche en Hydrologie, LTHE/IRD, France</i>
Examineur :	Dr Harouna KARAMBIRI	<i>Maître Assistant en Hydrologie, 2iE, Burkina Faso</i>
Examineur :	Dr Jean-Claude GBODOGBE	<i>Expert en Hydrogéophysique, DG-Eau/MERPMEDEP, Bénin</i>

Cotonou, Rép. du Bénin



DEDICACES

Qu'il me soit permis de dédier ce travail à :

- La mémoire de mon Regretté Père Joël-Alfred Dah-ZANNOU décédé le 04 octobre 2001, pour le sens de loyauté qu'il a su encourager en moi...
- Ma brave mère Marie-Jeanne AHOUMENOU, qu'elle y trouve la consolation après tous les caprices que je lui ai fait endurer...
- Mon Cher tuteur et éducateur Joseph HODEHOUTOU, qu'il y voit le sens de responsabilité qu'il m'a inculqué...
- Mes frères Térance et Gildas ZANNOU, et plus largement aux frères du groupe Facebook « Zannou », qu'ils y découvrent la noblesse de mon métier...
- Mon Epouse Fabienne INGABIRE, qu'elle y trouve la marque de ses sentiments affectifs dans le chemin que nous avons entrepris...en répondant très modestement « merci, mais je n'ai rien fait, sinon, en quoi ai-je contribué ! » lorsque Mon Professeur lui adressait ses « pré-félicitations » à l'occasion de la remise du tout premier draft compilé du présent document, elle n'a fait que mimer l'ignorance très savante du philosophe *Jules Lachelier*¹ qui répondit « je ne sais pas » à la question « qu'est-ce que la philosophie ? » ;
- Mon petit Arning Kristopher Rukundo ZANNOU, dont l'arrivée a failli coïncider avec l'abandon de ce travail, qu'il y prenne la force morale de relèvement nécessaire dans la vie d'un homme ;
- Ma large famille, en particulier à Sidonie AGBAKOU, Delphine TOHOUSSO, Samson HINDJINO, Léonce ZANNOU, Gaston KOKODE, Delphin KOUMBO, Saliou BAKARY, Rock, Françoise et Sévérin AOUMENOU...qu'ils y retrouvent le résultat de tout le sérieux qui m'a souvent caractérisé ;
- Ma Belle-Famille, Pépé, Maman, Christian, Bertrand et Florence, qu'ils soient convaincus qu'en dépit de toutes choses, la valeur d'un homme se mesure à travers la réussite de ses enfants...

¹ Philosophe français, 1832-1918.

- Mes amis de lutte : Pacôme NONFODJI et François BLOCHAOU, Maurille AGOUA et Silvère DJOSSA, Ousmane SACCA et Masmoud ALAO ainsi que leurs familles respectives, qu'ils y trouvent le sens du combat que nous avons développé...
- Mes amis du BENIN : Crépin AROUNA, Désiré et Roméo DADJIN, Franck et Rolande COSSOU, Gérard AHIDAZAN, Sosthène MENSAN, Lucienne HOUENOUEDE et Monique EZIN, qu'ils y voient le fruit de l'effort...
- Tous mes maîtres formateurs et éducateurs du primaire et du secondaire au Bénin, en particulier, Charles GNANMEY, Adrien ADE, Alice HOUNGUE, François KOUCHAMI, Félix HOUNKPE, Pascal SOGLO, Thècle CODJO, Joseph BABALOLA, Achille MAGNON, Evelyne OUENSAVI, Adélaïde ALLAGBADA, Pierre AKPOVO, Florentin TAMADAHO, Jeanne GOVI ...qu'ils y voient l'esprit qu'ils ont formé...
- Mes amis d'école primaire et de collège secondaire à Vèdoko, qu'ils y voient le résultat de la détermination qui m'a toujours poussé à rechercher la première place qu'ils m'ont souvent gracieusement concédée ;
- Mes amis du Groupe « wô-koli » et des clubs de foot de Vèdoko, Tankpè et Godomey pour les bons moments passés ensemble à table et sur le terrain;
- Au « show-club » des fréquents week-end endiablés et sans tabous, en particulier à Ousmane, Hervé, Enock, Cédrik, Marius, Elias, Brice ; et au « club anonyme » ; qu'ils y trouvent l'exploitation judicieuse des regains d'énergie et de vitalité que m'ont procurés nos chaudes soirées ;
- Tous mes enseignants et formateurs du supérieur en Tunisie, en particulier Hafedh ZAHAF, Fethi LEBDI, Khémaïs ZAYANI, Jamila TARHOUNI, Aws ALOUINI, Mohamed SLIMANI et Mohamed MECHERGUI de l'INAT, Sami TOUZI de STUDI, Xavier BOULENGER de la BAD, Jean-Paul LUC de l'ENSAM (Agro-Montpellier), Fouzaï Mohamed TAHAR du CRDA-Ariana et Khaled ALOUANI de la Faculté des Sciences; à mes camarades de l'INAT, particulièrement Jihed BOUBAKER, Kane Oumar MAMADOU, Marguérite Téwa CAMARA et Zied FOUZAÏ ; à la Communauté Béninoise en Tunisie, en particulier Dr Seifeddine AKASSI, Epiphane LIGAN, Aristide NONONSI et Clotaire YAHOUUEDEHOU, qu'ils y constatent ce qu'est devenu le remuant, dynamique et parfois absentéiste Bruno ;

- Mes amis au loin : Léonie au Cameroun, Jérémie et Prosper en Centrafrique, Thérèse et Thierry en Côte d'Ivoire, Arnaud et Armand au Gabon, Cissé en Guinée, Louis et Silver en Guinée Equatoriale, Ben au Mali, Hyppolyte, Adam et Ada à Ouagadougou, Cissé, Alsim et N'Diaye au Sénégal, Olivier à Bordeaux, Adidjath à Lyon, Christel à Metz, Laure et Jeff à Montpellier, Fabienne, Cyriaque et Fall à Paris, Hervé en Angleterre, Alain et Kiza en Belgique, Paulette, Franck et Noël aux Etats-Unis...qu'ils y voient le résultat presque final d'un long périple qu'ils ont parfois partagé ;
- Au Mouvement International des Etudiants Catholiques (MIEC), au Révérend Père Etienne TRIAILLE, Aumônier Panafricain et aux Pères ivoiriens Célestin Koffi IGBRAGO et Désiré Amangoua ELIASON, anciens Aumôniers de la JCAT-Tunis, à Jules ZANNOU du MIEC-JEC Bénin, qu'ils y trouvent l'accomplissement du verset biblique Mt 7, 7.

A tous, je dis : ceci n'est qu'un petit pas de plus ...

Arnaud Bruno ZANNOU

REMERCIEMENTS

Aucun travail ne s'accomplit dans la solitude². Aussi ai-je voulu, au terme de cet humble travail, remercier ceux qui, de près ou de loin, consciemment ou sans le savoir, y ont contribué sous quelque forme que ce soit.

D'entrée, je me dois de m'adresser particulièrement à Monsieur Christophe PEUGEOT, sans qui cette thèse, telle un navire n'aurait pu lever l'ancre. Chercheur Hydrologue au laboratoire HSM de l'IRD et Coordonnateur du Programme International de Recherches AMMA au Bénin, le sort a voulu que ce soit avec vous principalement que je fasse ce travail alors que tout était parti pour en être autrement. Vous m'avez alors accepté et proposé de réfléchir avec vous sur certains aspects de vos préoccupations scientifiques particulièrement intéressantes. Malgré ma prise d'autonomie, de très large autonomie d'ailleurs, et parfois risquée, vous avez su me favoriser au sein de vos charges professionnelles et me faciliter grandement le travail par votre attention permanente et votre encadrement scientifique sans encombrement. Vos conseils éclairés, vos remarques pertinentes, vos exigences régaliennes et vos connaissances dans le domaine de l'hydrologie m'ont été d'un apport très appréciable et m'ont accompagné jusqu'à ce document que j'ose espérer, voire prétendre inscrit dans nos succès partagés. Avec cet Encadreur, j'ai beaucoup discuté, confronté ses avis et jugements, argumenté et défendu les miens, sans tabou ni complexe quelconque, et quand cela a commencé à prendre forme, il m'a offert un ouvrage : « *l'art de la thèse*³ » comme pour me booster encore plus loin. Cher Encadreur, acceptez, malgré votre attrayante simplicité et votre humilité légendaire mes profonds remerciements.

Bien Cher Professeur Abel AFOUDA : avec vous, je me suis toujours senti en présence d'un homme respecté, rigoureux et travailleur. Que cette thèse m'offre la possibilité d'hériter ces caractères auprès de vous ! Enseignant chercheur en mathématique et hydrologie, Directeur du Laboratoire d'Hydrologie Appliquée (LHA), Président du Partenariat National de l'Eau du Bénin, membre de plusieurs comités thématiques nationaux et internationaux, vous avez accepté, malgré vos multiples engagements, d'assumer la direction de la présente thèse, en sachant pertinemment les difficultés auxquelles j'étais exposé et qui risqueraient d'entraver la bonne exécution de cette

² Michel BEAUD, *L'Art de la thèse*, La Découverte ; nouvelle éd. 1994, page 5

³ Michel BEAUD, *L'Art de la thèse*, La Découverte ; nouvelle éd. 1994

opération. Lors de notre entrevue à Ouagadougou le 5 avril 2011 avec Monsieur Eric SERVAT, il n'était possible d'envisager mon éventuelle soutenance que courant première semaine d'octobre 2011, si elle aurait lieu au cours de cette année académique. Oui, il faut employer le conditionnel, car rien n'était sûr après les multiples tentatives ratées ci et là, et engendrant au passage moult interrogations aux réponses à peine osées. Mais, cette nouvelle date butoire fut finalement la bonne, car, profitant d'une autre situation professionnelle particulière à moi, j'ai réussi à mettre le second trimestre de l'année à profit pour assurer la rédaction des résultats de mes travaux scientifiques pourtant achevés depuis plusieurs mois. Lorsque le 21 avril 2008, j'ai débuté avec mon encadrement des réflexions au sujet de la poursuite ou non de ma thèse, et fini par prendre la décision de l'arrêter en 2009, c'est avec votre acharnement positif sur moi et vos conseils avisés que j'ai pu redéfinir, en complicité avec Monsieur Christophe PEUGEOT, mon Encadreur rapproché, un nouveau format pour cette thèse, en vue de la reprendre et l'achever. Avec toute cette contribution à mon travail, qu'auriez-vous mérité de ma part que je puisse avoir et renoncer à vous donner ? Rien, mais à défaut, je vous prie d'accepter par contentement mes remerciements les plus sincères.

Je me dois de remercier Monsieur Eric SERVAT. Tout d'abord hydrologue et Directeur de recherche à l'IRD, puis Directeur du Laboratoire HydroSciences Montpellier (HSM), et ensuite Président du Conseil Scientifique de l'IRD pour ne citer que ces fonctions-là, vous avez accepté malgré vos multiples occupations, de participer à la direction de la présente thèse, de m'encourager et de me suivre étape par étape, dans la confiance à l'étudiant que je suis et à Monsieur Christophe PEUGEOT mon encadreur rapproché. Sans avoir déterminé le contrôle continu de mon travail, vous en avez assuré les conditions aux limites avec toute votre expérience, votre expertise et votre sens aigu de discernement. Je voudrais pouvoir vous dire tout le rôle de guide éclairé et efficace, que vous avez assumé pour mon encadrement. Que vous en soyez infiniment remercié.

Aussi, devrais-je dire à Madame Sylvie GALLE, chercheur hydrologue au laboratoire LTHE de l'IRD, tout le bonheur qu'elle m'a donné en acceptant d'être la correspondante de ma thèse dans son laboratoire. Par ce geste et votre intérêt constant pour l'avancement de mon travail de thèse, vous avez contribué significativement à l'obtention de mes résultats. Je vous en remercie du fond du cœur.

Je voudrais également remercier le personnel de l'IRD à Cotonou, à leur tête, Mr Bruno BORDAGE, Représentant de l'IRD au Bénin, pour m'avoir permis de travailler avec les équipes de l'IRD. Mesdames Josette BERDUCK et Laurence QUILICHINI, Bellinda HOUMASSE et

Rita SAUDEGBEE ; Messieurs Gaëtan SESSINOU, Chancel KONATE et Gérard KPOHOENON, qu'ils voient dans ce travail le fruit de tout l'accompagnement administratif, logistique et financier qu'ils nous ont apporté tout au long de ces années. Que Madame Marielle GOSSET, Messieurs Marc DESCLOITRES, Bernard BOURLES, Luc SEGUIIS et Luc LE BARBE y trouvent le fruit des multiples perturbations que j'ai souvent engendrées au cœur de leur concentration au travail. De même, ma reconnaissance toute particulière va à Mesdames Annick DADE et Sarah SOUBEYRAN, Messieurs Maxime WUBDA, Stéphane BOUBKRAOUI, Simon AFOUDA, Théodore OUANI, Vincent JORIGNE, Antoine PERIAULT, Marc AJOURNIN, Fred MALINUR, Patrick MARTINS, Frédéric CAZENAVE, Armand MARISCAL, Randel HAVERKAMP, Jean-Michel BOUCHEZ, Nicolas THEVENOT, Zacharie SEYGONA et Tobias EL FAHEM...pour leur disponibilité et leur soutien technique. Aussi, je n'oublie point les équipes de jaugeages et de tournée ORE qui ont produit, par leur travail, la matière première (les données) de la présente étude.

A Montpellier, je remercie les autorités de l'Université des Sciences et Techniques, de la Maison des Sciences de l'Eau, et en particulier Mesdames Nicole COUESNON et Nadine PERES, Claudine DIEULIN et Kristine GRUJDA, Sandra ARDOIN-BARDIN, Sandra VAN EXTER et Josiane SEGHIERI, Messieurs Michel DESBORDES et Gil MAHE, Bernard CAPPELAERE et Vincent GUINOT, Christian LEDUC et Patrick LE GOULVEN, Jean-Emmanuel PATUREL et Pierre GENTHON, Christian DARLET et Roger SARAIVA, pour leur précieuse collaboration lors de mes séjours. De même, je me souviens des collègues Marjolaine METADIER, Marc ESSY et Bamory KAMAGATE, Cécile AFAGNITODE et Dragana TODOROVIC, Moussa M'BAYE et Mahmoud KOÏTA pour leur sens de partage. Madame Laure PINEDON, Messieurs Jeff NIALOSASO et Taiwo OLUSEGUN m'ont parfois amené à retrouver de temps en temps des sensations typiquement africaines dans une ville où je semblais être perdu. A Grenoble, je ne peux me permettre de ne pas citer Mesdames Isabelle ZIN et Véronique CHAFFARD, Messieurs Thierry LEBEL (Directeur du LTHE) et Arona DIEDHIOU, Luc DESCROIX et Christian DEPRAETERE, Thierry PELLARIN et Jean-Michel VOUILLAMOZ pour leur accompagnement sans cesse renouvelé. De même, que mes collègues Adrien GUYOT et Moussa DOUCOURE reçoivent ma gratitude. A Toulouse, que Monsieur Jean-Luc REDELSPERGER du CNRM (Météo-France) y trouve un des fruits de son investissement scientifique sur la mousson africaine et la promotion des connaissances hydrologiques en Afrique.

Au Bénin, ma reconnaissance toute particulière s'adresse aux maîtres et enseignants à l'Université d'Abomey-Calavi, et en premier lieu les Professeurs Norbert Cossi AWANOU (Recteur), Brice SINSIN (Vice-Recteur), Antoine VIANOU (Vice-Recteur), Norbert HOUNKONNOU (Président de la CIPMA-UNESCO), Eugène AZATASSOU, Euloge AGBOSSOU, Michel BOKO et Christophe HOUSSOU. Je me dois de remercier particulièrement les Docteurs Etienne HOUNGNINO, Basile KOUNOUEWA, Aristide AKPO, Nicaise YALO, Emile COMLAN, Ezinvi BALOÏTCHA, Jean Cossi HOUNDAGBA, François TCHIBOZO, Crépin ZEVOUNOU, Victor GBAGUIDI ; ainsi que ceux que je dérange plus souvent, Docteurs Jean-Bosco VODOUNOU et Emmanuel LAWIN, Luc SINTONDJI et Vincent OREKAN, Ernest AMOUSSOU et Expédit VISSIN, Brice TENTE et Henri TOTIN. Que mes frères et sœurs d'arme Ossénatou MAMADOU et Norbert AGOÏNON, en particulier Eric ALAMOU avec qui, nous avons l'occasion de soutenir les toutes premières thèses de doctorat en hydrologie au Bénin, y voient l'aboutissement de la solidarité fraternelle partagée.

Dans mon milieu professionnel, je dois tout d'abord adresser ma profonde gratitude aux Autorités de mon Ministère de tutelle, en particulier, Messieurs Jonas GBIAN, Sacca LAFIA, Jocelyn DEGBEY et Kamarou FASSASSI, quatre ministres à vision éclairée qui se sont succédés depuis mon intégration. De même, que Mesdames Amratou Bio GOUNOU DJARRA et Bintou Taro CHABI ADAM, Messieurs Raoufou BADAROU, Marius HOUNKPATIN, Safiri IBOURAÏMA, Corneille AHOANSOU, Machioudi YESSOUFOU, Imorou ZAKARI, Parfait TOSSA, Evariste AGLI, Serge MARIANO, Crépin BOSSOU actuels et anciens responsables à divers niveaux du Cabinet ministériel, Directeurs et Directeurs Adjointes de Cabinet, Secrétaire Général, Directeurs Centraux, Conseillers Techniques et Chef de la Cellule de Communication en soient remerciés pour leur intérêt à l'avancement de la connaissance sur les ressources en eau. Messieurs Clément HOUSSOUKPE et Alfred YERGO méritent également d'être remerciés pour leur compréhension à notre égard, lorsque nous manquons parfois de produire à temps les points périodiques d'exécution des projets dont nous avons la charge.

J'adresse ma profonde gratitude à Messieurs Samari BANI et Marius AHOKPOSSI, mes Directeurs Généraux successifs sans qui ce travail n'aurait pu être fait ainsi que les Directeurs Généraux Adjointes successifs Messieurs Pierre DJAGOUN, Christian ATINDEHOU et Anatole Léon FASSINO, qu'ils reçoivent ma profonde gratitude pour nous avoir encouragé dans cette voie. Je remercie autant Madame Secondina GONÇALVES, Messieurs Grégoire SEWADE, Adrien SODOKIN, Pierre ADISSO, Germain LOKO, Jean-Claude GBODOGBE, Comlan

GODOUI, Julien SEDJAME, Marc TCHABI, Méré KONA, Joachim SAMA, Colin GBAGUIDI, Félix AZONSI, Grégoire ALE, Victor DANSOU actuels/anciens Directeurs Techniques et Départementaux à la DG-Eau pour leurs conseils et encouragements qui m'ont galvanisé le moral. Je pense également aux doyens et collègues Coordonnateurs de Sous-Programme : Messieurs Donatien AHOUANSE, Blaise DOSSA et Laurent FATON. Je n'oublie point tous les Chefs Projets, les Chefs Service centraux et déconcentrés, et tous les agents de la DG-Eau pour la bonne ambiance de travail ainsi que les échanges très fructueux que nous entretenons. En particulier, je voudrais citer ceux avec qui le travail au quotidien est requis, je veux nommer Mesdames Rafatou FOFANA, Diane BADA et Evelyne LOKOSSOU, Messieurs Tchokponhoué ALLOMASSO et Aurélien TOSSA, Flavien LANHOUSSE et Rachidou TCHALEDDJI, Antoine GOHOUNGOSSOU et Philippe ADJOMAYI, Léonce DOVONON et Martin KPOMASSE, Joël TOSSOU et Evariste VIGAN, Simplicite AGONDJA et Yves GANDIGBE, Herman HOUSSOU-DJEDJE et Magloire SIEMA, Jean-Pierre MONTCHO, Farouk MAZOU et Martial DOSSOU, Michel YABI et la Cellule PHPA de Parakou, la liste est très longue...

Que Mesdames Mathilde HEURTAUX, Christine KOENING et Antje MAUME, Messieurs William BENICHOU, Conrad THOMBANSEN, Jean-Pierre TRIBOULET, Carel DE GROOT, Camille DANSOU, Alain DEGUENON, Moukaramou DAOUDA, Falk NEGRAZUS, Juvénal MUNYANEZA, Guy CLEGBAZA, Elie TOGNON soient remerciés pour leur soutien moral et financier.

Que les collègues de la Direction Nationale de la Météorologie (DNM) et à leur tête Messieurs Martin KASSIN et Francis DIDE (actuel et ancien Directeurs), ainsi que Monsieur Roger DJIMAN du CRHOB/CBRST reçoivent ma reconnaissance pour les très bonnes relations que nous entretenons au sein de différentes initiatives et projets.

A ce stade, je ne saurais oublier des personnes ressources que j'ai eu l'occasion de cotoyer à diverses occasions et qui m'ont apporté leurs précieux concours : les Professeurs Andréas FINCK, Michael CHRISTOPH et Bernd DIEKKRÜGER ainsi que les collègues Simone GIERTZ, Gero STEUP, Alexandra UESBECK et Conforte MENSAH du projet IMPETUS. Egalement que Messieurs Harouna KARAMBIRI du 2iE, Antoine BRICOUT du FSP-RIPIECSA et mes homologues porteurs de projet trouvent ici l'accomplissement de la mission.

Que mes contacts aux cabinets d'étude CANAL-EAU, LAMEN, GECA-PROSPECTIVE, BENAUDIT soient remerciés de leur concours à cette réalisation ; de même que Messieurs Henrik CHRISTENSEN du Danemark, Ludovic TAPSOBA, Jean-Pierre MIHIN

et son équipe de la Direction Générale des Ressources en Eau à Paspanga sont remerciés pour nos fructueux travaux au Burkina Faso. A Niamey, je sais que le collègue Didier ZINSOU, en poste à l'Autorité du Bassin du Niger a été très regardant sur ce que je faisais, et je l'en remercie de tout cœur.

Que la société GPGMB, en particulier Messieurs Laurent ALOWANOU et Calixte AKOTEGNON soient remerciés pour leur appui à la famille ZANNOU, et notamment à mon travail. De même, mon ami Crépin AROUNA doit trouver dans ce travail, le couronnement des moments d'accueil qu'il m'a offerts chez lui à Parakou pour m'isoler du bouillant monde professionnel de Cotonou et favoriser l'avancement de mes travaux scientifiques. Aussi, j'invite mon très dévoué et jeune frère Norbert HOSSOU à trouver dans ce travail le fruit de son assistance permanente en ma direction.

Que l'ensemble des étudiants du Projet OUEME-2025, en particulier les cinq dont j'ai eu l'occasion de suivre en partie le travail, Adéline AGBIDINOUCOUN, Kassim ASSOUMA, Fernand AVAHOUNLIN, Arsène AKOGNONGBE et Simon COLLOT, voient ici la preuve de la persévérance et de l'investissement dans l'effort. Les moments partagés sont inoubliables. Aussi, je remercie Aurélien TOSSA, Peace ADOLIGBE et Djafarou ABDOULAYE pour leur aide à la réalisation des cartes du présent document.

Mes remerciements vont également à l'endroit des Autorités de l'Ambassade de France, de l'Ambassade des Pays-Bas, de l'IRD et de la Coopération Internationale Allemande (GIZ), pour avoir financé sous diverses formes et à divers moments notre formation et nos travaux.

Avant de finir, je dois faire une halte et dire mes salutations distinguées à tous ceux qui ont bien voulu lire une partie de ce travail et m'adresser leurs observations, corrections et suggestions. Cela m'a permis d'améliorer la présentation de ce résultat final. Aussi, je voudrais redire un grand merci à Monsieur Samari BANI qui a beaucoup œuvré à la réalisation de ce travail. Malgré toute son autorité de Directeur Général sur moi, il ne trouvait aucun inconvénient à tolérer mes absences et retards au service pour cause de finalisation de ma thèse, dans un contexte particulier de réforme de l'Administration Publique où cela a failli se retourner contre lui-même. Malgré les nécessaires accrochages de dernière minute entre lui et moi, il a gardé le sourire et tout le sérieux que je lui connais.

Enfin, reporté plusieurs fois courant 2011, l'achèvement de la rédaction de ce document a finalement eu lieu : 15 juin, 15 juillet, 31 juillet, telles sont les dates successives du report. C'est bien sans fixer une date butoire qu'il nous est arrivé d'achever l'exercice ce 14 août 2011. En cet instant précis où je mets un terme à ma rédaction de ce document par les présentes lignes, c'est à

vous les rapporteurs et membres du jury que je pense. Je vous remercie pour avoir accepté la mission d'évaluer ce travail, ainsi que pour la disponibilité que vous avez bien voulu y consacrer. Je suis d'avance assuré que, aucune œuvre humaine n'étant parfaite, vos analyses, commentaires, questions et contributions viendront améliorer ce travail perfectible à tous égards.

Merci à tous.

Arnaud Bruno ZANNOU

« Permettez-moi de m'attaquer aux impossibilités, et elles finiront par disparaître ! »

14/08/2011

RESUME

La modélisation du cycle hydrologique du bassin de l'Ouémé à Bétérou a été conduite avec le modèle Topamma sur la période 1997-2006 à travers une approche spécialement développée. Cette approche repose sur le souci de réduire le nombre de décisions arbitraires, contrairement aux habitudes en la matière. Nous avons visé en fait une paramétrisation du modèle qui fournit des résultats acceptables pour de bonnes raisons, et non un modèle peu contraint qui donnerait les meilleurs résultats possibles sans raison connue.

Un lot final de 94 jeux a été sélectionné dans l'espace des paramètres constitué de 17.745 jeux. Cette sélection s'est appuyée sur trois (3) critères successifs dont deux de biais (sur le volume et le débit de pic) et un de dynamique (l'efficacité de Nash). La pertinence de l'utilisation du critère Nash en 3^{ème} niveau de sélection pour mieux discriminer les jeux finaux a été démontrée, mais la contribution du critère de biais sur le débit de pic semble négligeable. Les valeurs idéales des critères de biais (biais nuls) ont été observées pour certaines simulations, et les valeurs optimales du critère Nash sont restées entre 89 et 91% en calage, et entre 88 et 93% en validation. Cependant, il a été possible de conclure que la recharge des nappes d'altérite telle que simulée par Topamma n'est pas réaliste au vu de la dynamique observée des niveaux piézométriques. Quelques analyses de sensibilité ont permis de diagnostiquer certaines faiblesses du modèle identifiées à travers ses résultats. En somme, le développement d'une nouvelle version du modèle Topamma, qui améliorerait ses performances actuelles, devrait s'appuyer sur une prise en compte de l'hydrodynamique et de l'occupation des sols, notamment leurs variations respectives dans le temps et l'espace. Ce qui rendrait plus complexe ou trop sophistiqué et moins attrayant le modèle, car il deviendrait plus gourmand en données et en temps de calcul.

L'évaluation du bilan hydrologique a montré que l'ETR représente 53% des précipitations, tandis que la recharge des nappes 33% et les écoulements 14% sur la décennie d'étude (1997-2006). L'incertitude de modélisation sur chacun de ces termes du bilan hydrologique décennal ne dépasse pas ± 1 à 2% ; néanmoins, les termes varient sensiblement d'une année à l'autre, et sont compris entre 46 et 60% pour l'ETR, 29 et 36% pour la recharge, et 9 et 21% pour les écoulements. L'analyse des relations pluie-débit et de la variabilité hydro-pluviométrique montre que le modèle reproduit de façon globalement satisfaisante les dynamiques interannuelles observées ; mais les facteurs d'amplification des extrêmes

pluviométriques (déficit ou excédent) par le système hydrologique sont généralement supérieurs par rapport aux valeurs observées.

Un exercice d'application à la GIRE sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou a pu être réalisé. Malgré la baisse annoncée de 41% de la disponibilité moyenne annuelle des ressources en eau d'ici 2025, il y aura suffisamment de ressources pour satisfaire l'ensemble des besoins (eau domestique, irrigation, élevage et industrie) estimés à 67 millions m³ par an pour les 10 communes du bassin ; à l'exception du besoin hydroélectrique qui, pour le moment absent, pourrait toutefois s'adapter à cette réalité le cas échéant. Le ratio besoins/disponibilité évoluerait de 29% actuellement à plus de 44% à l'horizon 2025. Le scénario d'aménagement préconisé est la construction d'un barrage hydroélectrique multi-fonctions sur l'Ouémé à Bétérou, et de deux (2) petits barrages sur des affluents au nord du bassin pour couvrir les besoins des communes périphériques. Avec les règles de gestion stratégique proposées, on anticipe sur une situation d'alerte jaune entre 2016-2020, c'est-à-dire que la disponibilité en eau sera supérieure aux besoins en eau seulement de 10 à 25% de ces derniers. Dans la gestion tactique, l'évolution du taux de sécurité proposé laisse entrevoir une alerte rouge en 2020 et 2023 (disponibilité inférieure aux besoins), une alerte orange en 2019 (disponibilité supérieure aux besoins de moins de 10% de ces derniers) et une alerte jaune en 2017. A cet effet, des solutions ont été proposées aux Autorités concernées pour anticiper convenablement dans la gestion de ces situations critiques annoncées.

Mots clefs : modélisation et bilan hydrologique, relation pluie-débit, variabilité spatio-temporelle, gestion intégrée des ressources en eau, haute vallée de l'Ouémé.

ABSTRACT

The hydrological cycle modeling of Ouémé watershed at Bétérou outlet was carried out with Topamma model over 1997-2006 period through a specific approach developed here. This approach consists in a very low number of arbitrary decisions, in opposition with current practices. We aimed a model parameterization which provides acceptable results for good reasons, and rejected a less constrained model which would give the best results with unknown reasons.

94 final sets were selected in the parameter space of 17,745 sets. This selection was based on three (3) successive criteria including two of bias (on volume and peak flow) and one of dynamics (Nash efficiency). The relevance of Nash criterion used in 3rd selection level for a better discrimination of final parameter sets was shown, but the contribution of bias on peak flow criterion seems negligible. The ideal values of bias criteria (zero bias) were noted with some simulations, and the optimal values of Nash criterion remained between 89 and 91% in model calibration, and between 88 and 93% in validation. However, it was possible to conclude that the groundwater recharge simulated by Topamma is not realistic compared to observed piezometric dynamics. Some sensitivity analyses helped us to diagnose some weaknesses of the model through its results. The development of new version of Topamma model, which would improve its current performances, should be made by taking into account the soil hydrodynamics and land cover, especially their respective time and space variations. This would transform the model into a more complex or too sophisticated one, and therefore less attractive one, because it would require more data and time for computing.

The hydrological assessment of water budget showed that the real evapotranspiration represents 53% of precipitations, while groundwater recharge is 33% and river flows 14% over the decadal period of this study (1997-2006). The modeling uncertainty on each of these decadal water budget terms does not exceed ± 1 to 2%; nevertheless, the terms move significantly between different years, from 46 to 60% for the real evapotranspiration, 29 to 36% for the groundwater recharge, and 9 to 21% for the river flows. The analysis of rainfall-runoff relation and hydro-pluviometric variability shows that the model reproduces in suitable way the observed interannual dynamic; but the amplification factors of pluviometric extremes (deficit or excess) according to the hydrological system are generally higher than observed values.

An application exercise of integrated water resources management (IWRM) on the Ouémé basin at Bétérou outlet was carried out. Despite the 41% announced fall of the annual average water resources availability at 2025 horizon, there will be sufficient resources for satisfying the whole requirements (domestic water, irrigation, livestock and industry), which is estimated yearly at 67 million m³ for the 10 Communes of the basin; except for the hydroelectric requirement which is actually absent and could nevertheless adapt to this reality if necessary. The ratio requirements/availability would move from 29% currently to more than 44% at 2025 horizon. The recommended management scenario is the building of an hydroelectric and multifunction dam on Ouémé at Bétérou, and two (2) small dams on the streams in the north of basin for peripheric Commune's requirements. With the strategic management suggested rules, we anticipate on a yellow alert between 2016-2020, i.e. the water availability will be 10 to 25% higher than the water requirements. In tactical management, the evolution of proposed security rate shows a red alert occurrence in 2020 and 2023 (availability lower than requirements), an orange alert in 2019 (availability 10% maximum higher than requirements) and a yellow alert in 2017. Facing those future situations, some solutions were proposed to the concerned Authorities for a suitable anticipation in the management of these announced critical situations.

Key words : hydrological modeling, water budget, rainfall-runoff relation, spatio-temporal variability, integrated water resources management, upper Ouémé watershed.

SOMMAIRE

DEDICACES	5
REMERCIEMENTS.....	9
RESUME	17
ABSTRACT	19
SOMMAIRE	21
TABLE DES MATIERES.....	24
SIGLES ET ACRONYMES	31
Liste des figures	35
Liste des tableaux	41
Liste des annexes.....	43
<u>INTRODUCTION GENERALE</u>	<u>45</u>
<u>PREMIERE PARTIE : CONTEXTE GENERAL ET OBJECTIFS.....</u>	<u>53</u>
INTRODUCTION	55
<u>CHAPITRE 1 : CONTEXTE DU TRAVAIL.....</u>	<u>57</u>
1.1 <i>Données générales du Bénin et réalités du secteur de l'eau</i>	57
1.2 <i>Principales missions de la Direction Générale de l'Eau et avancement du processus d'instauration de la Gestion Intégrée des Ressources en Eau</i>	61
<u>CHAPITRE 2 : CADRE DE LA PRESENTE ETUDE.....</u>	<u>67</u>
2.1. <i>Contexte des projets OUEME-2025 et AMMA-CATCH</i>	67
2.2. <i>Projet de thèse.....</i>	72
2.3. <i>Méthodologie sommaire de l'étude.....</i>	75
<u>CHAPITRE 3 : CONTEXTE PHYSIQUE ET SOCIO-ECONOMIQUE DU BASSIN DE L'OUEME A BETEROU.....</u>	<u>77</u>
3.1. <i>Milieu Physique du bassin de l'Ouémé à Bétérou.....</i>	77
3.2. <i>Milieu socio-économique du bassin de l'Ouémé à Bétérou</i>	92
CONCLUSION	99
<u>DEUXIEME PARTIE : MATERIELS ET METHODES</u>	<u>101</u>
INTRODUCTION	103
<u>CHAPITRE 4 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE</u>	<u>105</u>

4.1.	Analyse des données observées.....	105
4.2	Etude et modélisation du cycle hydrologique.....	110
4.3	Dynamique des états de surface et impact sur les ressources en eau.....	128
CHAPITRE 5 : RESEAU D'OBSERVATIONS ET DONNEES UTILISEES		133
5.1	Réseau d'observations hydrométéorologiques.....	133
5.2	Données utilisées	136
CHAPITRE 6 : CHOIX ET DESCRIPTION THEORIQUE DU MODELE UTILISE		151
6.1	Généralités sur les modèles hydrologiques.....	151
6.2	Choix du modèle hydrologique à utiliser.....	153
6.3	Aperçu synthétique du modèle choisi	156
CHAPITRE 7 : DEMARCHE METHODOLOGIQUE DE MODELISATION.....		165
7.1	Echantillonnage des périodes de calage et de validation.....	166
7.2	Définition et exploration systématique de l'espace des paramètres.....	173
7.3	Calage du modèle et vérifications associées.....	174
7.4	Evaluation du modèle	187
7.5	Validation du modèle et contrôles appropriés.....	188
7.6	Calcul du bilan hydrologique	191
7.7	Représentation de la variabilité hydro-pluviométrique interannuelle.....	192
CONCLUSION		193
TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET APPLICATIONS		195
INTRODUCTION		197
CHAPITRE 8 : RESULTATS ET DISCUSSION		199
8.1	Calage du modèle	199
8.2	Evaluation du modèle	207
8.3	Validation du modèle.....	215
8.4	Calcul du bilan hydrologique	222
8.5	Représentation de la variabilité hydro-pluviométrique interannuelle.....	225
CHAPITRE 9 : DIAGNOSTIC A POSTERIORI DES FAIBLESSES DU MODELE.....		229

9.1	<i>Diagnostic de l'hydrogramme 2005 : sensibilité du modèle à la dynamique spatiale des précipitations</i>	<i>230</i>
9.2	<i>Diagnostic de la production d'ETR par le modèle : sensibilité du modèle à l'ETP et à la transformation ETP-ETR.....</i>	<i>236</i>
9.3	<i>Impact de l'origine des forçages utilisés sur les simulations du modèle.....</i>	<i>243</i>
CHAPITRE 10 : <u>APPLICATION POUR LA GESTION INTEGREE DES RESSOURCES EN EAU DU BASSIN A L'HORIZON 2025.....</u>		<u>255</u>
10.1	<i>Dynamique et disponibilité potentielle des ressources en eau du bassin de l'Ouémé à Bétérou</i>	<i>256</i>
10.2	<i>Besoins potentiels en eau sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou.....</i>	<i>264</i>
10.3	<i>Essai de gestion technique des ressources en eau sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou.....</i>	<i>274</i>
10.4	<i>Mesures d'ordre général et recommandations</i>	<i>284</i>
CONCLUSION		289
CONCLUSION GENERALE		<u>291</u>
RECOMMANDATIONS		299
PERSPECTIVES		301
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		303
ANNEXES.....		<u>317</u>

TABLE DES MATIERES

DEDICACES	5
REMERCIEMENTS.....	9
RESUME	17
ABSTRACT	19
SOMMAIRE	21
TABLE DES MATIERES	24
SIGLES ET ACRONYMES	31
LISTE DES FIGURES	35
LISTE DES TABLEAUX	41
LISTE DES ANNEXES.....	43
<u>INTRODUCTION GENERALE</u>	<u>45</u>
<u>PREMIERE PARTIE : CONTEXTE GENERAL ET OBJECTIFS</u>	<u>53</u>
INTRODUCTION	55
<u>CHAPITRE 1: CONTEXTE DU TRAVAIL.....</u>	<u>57</u>
1.1 <i>Données générales du Bénin et réalités du secteur de l'eau</i>	57
1.1.1. Informations générales sur le Bénin.....	57
1.1.2. Secteur de l'eau au Bénin.....	58
1.2 <i>Principales missions de la Direction Générale de l'Eau et avancement du processus d'instauration de la Gestion Intégrée des Ressources en Eau</i>	61
1.2.1. Missions de la DG-Eau en matière de ressources en eau et mise en œuvre à travers quatre sous-programmes en cours.....	61
1.2.2. Focus sur le Sous-Programme Gestion des Ressources en Eau	63
1.2.2.1 Promotion de la connaissance et capitalisation de la recherche sur l'eau	63
1.2.2.2 Mobilisation, exploitation et valorisation des ressources en eau	64
1.2.2.3 Aspects environnementaux et risques liés à l'eau.....	64
1.2.3. Avancement du processus d'instauration de la GIRE	64
<u>CHAPITRE 2: CADRE DE LA PRESENTE ETUDE.....</u>	<u>67</u>
2.1 <i>Contexte des projets OUEME-2025 et AMMA-CATCH</i>	67

2.1.1.	Description du programme AMMA-CATCH	67
2.1.2.	Description du projet OUEME-2025	70
2.2.	<i>Projet de thèse</i>	72
2.2.1	Problématique et justification de l'étude.....	72
2.2.2.	Formulation du sujet et objectifs de la thèse	74
2.3.	<i>Méthodologie sommaire de l'étude</i>	75
<u>CHAPITRE 3 : CONTEXTE PHYSIQUE ET SOCIO-ECONOMIQUE DU BASSIN DE L'OUEME A BETEROU.....</u>		77
3.1.	<i>Milieu Physique du bassin de l'Ouémé à Bétérou</i>	77
3.1.1.	Situation géographique	78
3.1.2.	Relief et hydrographie	78
3.1.3.	Caractéristiques morphologiques.....	80
3.1.4.	Régime climatique	82
3.1.5.	Géologie et hydrogéologie	85
3.1.6.	Pédologie.....	88
3.1.7.	Végétation et couverture du sol.....	90
3.2.	<i>Milieu socio-économique du bassin de l'Ouémé à Bétérou</i>	92
3.2.1.	Découpage administratif	92
3.2.2.	Démographie et données socio-culturelles	93
3.2.3.	Activités socio-économiques	94
3.2.4.	Accès à l'eau	96
CONCLUSION		99
<u>DEUXIEME PARTIE : MATERIELS ET METHODES</u>		101
INTRODUCTION		103
<u>CHAPITRE 4 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE</u>		105
4.1.	<i>Analyse des données observées</i>	105
4.1.1.	Variabilité spatio-temporelle des paramètres hydrométéorologiques	105
4.1.2.	Caractérisation hydro-pluviométrique et analyse pluie-débit.....	108
4.1.2.1	Variabilité hydro-pluviométrique et coefficient d'écoulement	108
4.1.2.2	Date de démarrage de la saison	109

4.2	<i>Etude et modélisation du cycle hydrologique</i>	110
4.2.1	Généralités sur les processus hydrologiques.....	110
4.2.2	Etude des processus du fonctionnement hydrologique du bassin	112
4.2.2.1	Processus identifiés et facteurs influençant les écoulements	112
4.2.2.2	Echanges entre nappe et rivière.....	114
4.2.2.3	Estimation de l'évapotranspiration réelle	116
4.2.3	Modélisation et simulation du cycle hydrologique.....	117
4.2.3.1	Récents résultats de modélisation sur la zone d'étude	118
4.2.3.2	Analyse et évaluation des résultats actuels du modèle Topamma.....	120
4.2.4	Bilan hydrologique.....	125
4.2.4.1	Calcul du bilan hydrologique	126
4.2.4.2	Impact du type d'ETP sur le bilan hydrologique	128
4.3	<i>Dynamique des états de surface et impact sur les ressources en eau</i>	128
4.3.1	Généralités	128
4.3.2	Cas de la haute vallée de l'Ouémé	129
<u>CHAPITRE 5 : RESEAU D'OBSERVATIONS ET DONNEES UTILISEES</u>		133
5.1	<i>Réseau d'observations hydrométéorologiques</i>	133
5.2	<i>Données utilisées</i>	136
5.2.1.	Description des données pluviométriques	136
5.2.2.	Description des données d'évapotranspiration.....	139
5.2.3.	Description des données d'écoulement	141
5.2.3.1	Données limnimétriques	141
5.2.3.2	Données de jaugeage	142
5.2.3.3	Hydrogrammes et volumes écoulés	145
5.2.4.	Description des données piézométriques	145
5.2.5.	Description des données géochimiques.....	147
<u>CHAPITRE 6 : CHOIX ET DESCRIPTION THEORIQUE DU MODELE UTILISE</u>		151
6.1	<i>Généralités sur les modèles hydrologiques</i>	151
6.2	<i>Choix du modèle hydrologique à utiliser</i>	153

6.2.1.	Critères généraux du choix à opérer	154
6.2.2.	Choix de l'échelle temporelle du modèle à retenir	154
6.2.3.	Choix du type de modèle à retenir	155
6.2.4.	Modèle hydrologique choisi	156
6.3	<i>Aperçu synthétique du modèle choisi</i>	156
6.3.1.	Description sommaire de TOPMODEL	157
6.3.2.	Description du modèle hydrologique Topamma	159
6.3.2.1	Formalisation du concept	159
6.3.2.2	Expression des flux hydrologiques.....	160
6.3.2.3	Algorithme et paramétrisation	161
6.3.2.4	Traitements topographiques	164
<u>CHAPITRE 7 : DEMARCHE METHODOLOGIQUE DE MODELISATION</u>		165
7.1	<i>Echantillonnage des périodes de calage et de validation</i>	166
7.1.1.	Aspects généraux	166
7.1.2.	Souci de représentativité de la période totale	167
7.1.3.	Prise en compte de l'incertitude sur les entrées et du temps de calcul	170
7.1.4.	Vérification de l'équilibre interne à chaque échantillon de période	170
7.2	<i>Définition et exploration systématique de l'espace des paramètres</i>	173
7.3	<i>Calage du modèle et vérifications associées</i>	174
7.3.1	Calage du modèle	174
7.3.1.1	Critères considérés	174
7.3.1.2	Equifinalité et approche multi-critère retenue.....	180
7.3.1.3	Technique de calage	182
7.3.2	Vérifications associées et finalisation du calage.....	184
7.3.2.1	Vérification de la pertinence de l'approche multi-critère	184
7.3.2.2	Finalisation du calage	185
7.4	<i>Evaluation du modèle</i>	187
7.4.1	Analyse des simulations particulières.....	187
7.4.2	Appréciation de la corrélation entre débits observés et simulés	187

7.4.3	Evaluation de la moyenne d'ensemble des simulations.....	187
7.5	<i>Validation du modèle et contrôles appropriés.....</i>	188
7.5.1	Analyse des simulations particulières.....	188
7.5.2	Réalisation des tests de validation	188
7.5.3	Contrôles du réalisme des simulations.....	189
7.5.3.1	Contrôle sur les débits.....	189
7.5.3.2	Contrôle sur l'évapotranspiration réelle.....	190
7.5.3.3	Contrôle sur la recharge de la nappe profonde d'altérite	190
7.6	<i>Calcul du bilan hydrologique</i>	191
7.7	<i>Représentation de la variabilité hydro-pluviométrique interannuelle.....</i>	192
	CONCLUSION	193
	TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET APPLICATIONS	195
	INTRODUCTION	197
	<u>CHAPITRE 8 : RESULTATS ET DISCUSSION</u>	<u>199</u>
8.1	<i>Calage du modèle.....</i>	199
8.1.1.	Résultats du calage par échantillon de période.....	199
8.1.2.	Vérifications et finalisation du calage.....	200
8.1.2.1	Vérification de la pertinence de l'approche multi-critère	200
8.1.2.2	Finalisation du calage	205
8.2	<i>Evaluation du modèle</i>	207
8.2.1	Analyse des simulations particulières.....	207
8.2.2	Appréciation de la corrélation entre débits observés et simulés	214
8.2.3	Evaluation de la moyenne d'ensemble des simulations.....	215
8.3	<i>Validation du modèle.....</i>	215
8.3.1	Analyse des simulations	215
8.3.2	Résultats des tests de validation	217
8.3.3	Contrôles du réalisme des simulations.....	218
8.3.3.1	Contrôle sur les débits.....	218
8.3.3.2	Contrôle sur l'évapotranspiration réelle.....	219

8.3.3.3	Contrôle sur la recharge des nappes profondes.....	221
8.4	<i>Calcul du bilan hydrologique</i>	222
8.5	<i>Représentation de la variabilité hydro-pluviométrique interannuelle</i>	225
8.5.1	Confrontation des relations pluie-débit observées et simulées.....	225
8.5.2	Analyse de la variabilité hydro-pluviométrique.....	226
CHAPITRE 9 : <u>DIAGNOSTIC A POSTERIORI DES FAIBLESSES DU MODELE</u>.....		229
9.1	<i>Diagnostic de l'hydrogramme 2005 : sensibilité du modèle à la dynamique spatiale des précipitations</i>	230
9.1.1.	Décryptage des symptômes majeurs des simulations 2005 et diagnostic posé.....	230
9.1.2.	Traitement appliqué et résultats.....	233
9.1.2.1	Version semi-spatialisée de Topamma : n'Topamma.....	233
9.1.2.2	Méthodologie utilisée et résultats obtenus.....	234
9.1.3.	Conclusion et recommandations.....	236
9.2	<i>Diagnostic de la production d'ETR par le modèle : sensibilité du modèle à l'ETP et à la transformation ETP-ETR</i>	236
9.2.1	Eléments de diagnostic.....	236
9.2.2	Traitement par étude de sensibilité	237
9.2.2.1	Etude de sensibilité de Topamma à l'ETP.....	237
9.2.2.2	Etude de sensibilité à la paramétrisation mathématique de l'ETR dans Topamma	241
9.2.3	Conclusion et recommandations.....	242
9.3	<i>Impact de l'origine des forçages utilisés sur les simulations du modèle</i>	243
9.3.1	Problématique, objectifs et forçages utilisés.....	243
9.3.2	Méthodes, résultats et discussion.....	245
9.3.2.1	Evaluation des forçages d'entrée et calculs des biais associés.....	246
9.3.2.2	Evaluation des sorties du modèle et calculs des biais associés	249
9.3.2.3	Analyse de la propagation du biais des forçages par le modèle	250
9.3.3	Conclusion et perspectives.....	251
CHAPITRE 10 : <u>APPLICATION POUR LA GESTION INTEGREE DES RESSOURCES EN EAU DU BASSIN A L'HORIZON 2025</u>.....		255
10.1	<i>Dynamique et disponibilité potentielle des ressources en eau du bassin de l'Ouémé à Bétérou</i>	256

10.1.1.	Données de scénario futur utilisées	257
10.1.2.	A l’horizon stratégique	260
10.1.3.	A l’horizon tactique	262
10.2	<i>Besoins potentiels en eau sur le bassin de l’Ouémé à Bétérou</i>	264
10.2.1	Données de scénario futur utilisées	265
10.2.2	A l’horizon stratégique	267
10.2.3	A l’horizon tactique	268
10.3	<i>Essai de gestion technique des ressources en eau sur le bassin de l’Ouémé à Bétérou</i>	274
10.3.1	Confrontation des besoins aux disponibilités en eau et adéquation	274
10.3.1.1	A l’horizon stratégique	275
10.3.1.2	A l’horizon tactique	275
10.3.2	Indications pour une stratégie de mobilisation des ressources en eau	276
10.3.2.1	Aspects quantitatifs	276
10.3.2.2	Aspects spatiaux	277
10.3.2.3	Synthèse des choix stratégiques préconisés	277
10.3.3	Gestion technique par allocation des ressources en eau	279
10.3.3.1	Gestion stratégique	280
10.3.3.2	Gestion tactique	282
10.4	<i>Mesures d’ordre général et recommandations</i>	284
10.4.1	Mesures d’accompagnement	285
10.4.2	Précautions à prendre	286
10.4.3	Limites à considérer	286
10.4.4	Recommandation particulière	287
CONCLUSION		289
CONCLUSION GENERALE		291
RECOMMANDATIONS		299
PERSPECTIVES		301
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		303
ANNEXES		317

SIGLES ET ACRONYMES

ABN :	Autorité du Bassin du Niger
ADCP :	Acoustic Doppler Current Profiler
AEP :	Approvisionnement (ou Alimentation) en Eau Potable
AEV :	Adduction d'Eau Villageoise
AMMA :	Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine
API :	Anterior Precipitation Index
ASECNA :	Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et Madagascar
BPO :	Budget Programme par Objectif
CATCH :	Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique
CE :	Conductivité Electrique (des eaux)
CEB :	Communauté Electrique du Bénin
CENAGREF :	Centre National de Gestion des Réserves de Faune
CETP :	Centre français d'Etude de l'Environnement Terrestre et Planétaire
DGE :	Direction Générale de l'Energie
DG-Eau :	Direction Générale de l'Eau (ex-DGH)
DGH :	Direction Générale de l'Hydraulique
DNM :	Direction Nationale de la Météorologie
ECLIS :	Elevage, Climat et Société
EIE :	Etude d'Impact Environnemental
EOP :	Enhanced Observation Period
EPSAT :	Estimation des Pluies par Satellite
ETo :	EvapoTranspiration de référence
ETP :	EvapoTranspiration Potentielle
ETR :	EvapoTranspiration Réelle
FAO :	Food and Agriculture Organisation
FIT :	Front Inter Tropical
FNE :	Fonds National de l'Eau
GHYRAF :	Gravimétrie et Hydrologie en Afrique
GIEC :	Groupe d'experts International sur l'Evolution du Climat
GIRE :	Gestion Intégrée des Ressources en Eau
GIZ :	« Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit » traduit par « Agence de Coopération Internationale Allemande »
GLUE :	Generalized Likelihood Uncertainty Estimation
GWP :	Global Water Partnership
HYCOS :	Hydrological Cycle Observing System

IMPETUS :	« Integratives Management-Projekt für einen Effizienten und Tragfähigen Umgang mit Süßwasser in Westafrika » traduit par « Approches Intégrées pour une Gestion Efficiente des Ressources Hydriques Limitées en Afrique de l'Ouest »
INSAE :	Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique
INSU :	Institut National français des Sciences de l'Univers
IRD :	Institut français de Recherche pour le Développement
ITDTE/BN :	Inversion des Tendances à la Dégradation des Terres et des Eaux dans le Bassin du Niger
LIFAD :	Laboratoire d'Ingénierie de Formation et d'Assistance en Développement local
LOP :	Long term Observation Period
LTHE :	Laboratoire d'études des Transferts en Hydrologie et Environnement
MAEP :	Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche
MECCAG-PDPE :	Ministère d'Etat, Chargé de la Coordination de l'Action Gouvernementale, du Plan, du Développement et de la Promotion de l'Emploi
MEE :	Ministère de l'Energie et de l'Eau
MEPN :	Ministère de l'Environnement et de la Protection de la Nature
MMEE :	Ministère des Mines, de l'Energie et de l'Eau
MNT :	Modèle Numérique de Terrain
ODM :	Objectifs de Développement du Millénaire
OHHVO :	Observatoire Hydrométéorologique de la Haute Vallée de l'Ouémé
OMM :	Organisation Mondiale de la Météorologie
ORE :	Observatoire de Recherche en Environnement
OUEME-2025 :	Analyse de la dynamique et de la disponibilité des ressources en eau du bassin de l'Ouémé à l'horizon 2025
P-AEPGRE :	Programme Approvisionnement en Eau Potable et Gestion des Ressources en Eau
PAN-GIRE :	Plan d'Actions National de Gestion Intégrée des Ressources en Eau
PCREau :	Projet de Promotion de la Connaissance et de Capitalisation de la Recherche sur l'Eau
PDREGDE/BN :	Programme de Développement des Ressources en Eau et Gestion des Ecosystèmes dans le Bassin du Niger
PEP :	Programme Eau Potable
PHI :	Programme Hydrologique International
PHPA :	Programme d'Hydraulique Pastorale et Agricole
PIP :	Programme d'Investissement Public

PNUD :	Programme des Nations Unies pour le Développement
PPREau :	Projet de Planification des Ressources en Eau
PTF :	Partenaire Technique et Financier
RFE :	RainFall Estimation
RGPH :	Recensement Général de la Population et de l'Habitation
RIOB :	Réseau International des Organismes de Bassin
SAGE :	Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SDAGE :	Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SETEM :	Service d'Équipement, des Travaux, des Etudes et Maintenance
SO :	Service d'Observation
SONEB :	Société Nationale des Eaux du Bénin
SOP :	Special Observation Period
SP-AEPMRSU :	Sous-Programme Approvisionnement en Eau Potable en Milieu Rural et Semi Urbain
SP-GRE:	Sous-Programme Gestion des Ressources en Eau
SP-IE :	Sous-Programme Initiative Eau
SP-PPEA :	Sous-Programme Pluriannuel Eau et Assainissement
SRTM :	Shuttle Radar Topography Mission
STUDI :	Société Tunisienne d'Ingénierie
TAC :	Technical Advisor Comity (of GWP)
TEC :	Technical Comity (of GWP)
UAC :	Université d'Abomey-Calavi
UNESCO :	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 2- 1 : Observations de long terme sur le continent</i>	69
<i>Figure 3- 1 : Contour du bassin de l'Ouémé à Bétérou et cours d'eau associés.....</i>	77
<i>Figure 3- 2 : Topographie et réseau hydrographique du bassin versant de l'Ouémé à Bétérou.....</i>	79
<i>Figure 3- 3 : Intermittence des écoulements sur la rivière Donga (affluent de l'Ouémé à Bétérou) (Kamagaté B., 2006).....</i>	80
<i>Figure 3- 4 : Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Ouémé à Bétérou.....</i>	81
<i>Figure 3- 5 : Evolution comparée de l'évapotranspiration de référence à Parakou et Natitingou (Roko F., 2007).....</i>	84
<i>Figure 3- 6 : Evolution de la pluviométrie journalière moyenne à Parakou et Natitingou (Roko F., 2007) ..</i>	85
<i>Figure 3- 7 : Carte géologique du bassin de l'Ouémé à Bétérou.....</i>	86
<i>Figure 3- 8 : Coupe géologique du bassin de l'Ouémé à Bétérou (Avahounlin F., 2010)</i>	87
<i>Figure 3- 9 : Carte pédologique du bassin de l'Ouémé à Bétérou.....</i>	89
<i>Figure 3- 10 : Végétation et couverture du sol du bassin de l'Ouémé à Bétérou en 2006.....</i>	91
<i>Figure 3- 11 : Paysages de culture et de savane arborée au mois de janvier à Nalohou (Kamagaté B., 2006).</i>	91
<i>Figure 3- 12 : Limites des communes dans le bassin de l'Ouémé à Bétérou.....</i>	93
<i>Figure 3- 13 : Cultures d'igname et de coton (Kamagaté B., 2006).....</i>	95
<i>Figure 3- 14 : Exemple d'organisation des villageoises lors du puisage de l'eau (Kamagaté B., 2006).....</i>	96
<i>Figure 4- 1 : Indices pluviométriques de 1950 à 2004 sur le bassin de la Donga (Kamagaté B., 2006).....</i>	106
<i>Figure 4- 2 : Indices pluviométriques de 1950 à 2002 sur le Degré carré à Niamey (a) et sur l'OHHVO (b) (Le Lay M. and Galle S., 2005).....</i>	106
<i>Figure 4- 3 : Cycle saisonnier de la pluie sur les années 60-69 (en bleue) et 70-90 (en rouge) (Roko F., 2007)</i>	107
<i>Figure 4- 4 : Schéma du cycle hydrologique [Nasa, 1984 ; cité par (Moussa R., 1991)].....</i>	111
<i>Figure 4- 5 : Schéma type de fonctionnement de versant proposé sur le bassin de la Donga.....</i>	115
<i>Figure 4- 6 : Dimensions de l'évaluation d'un modèle (Le Lay M., 2006).....</i>	120
<i>Figure 4- 7 : Projection de la surface de réponse de Topamma (calage global) dans l'espace des paramètres sur le bassin de la Donga (Métadier M., 2006).....</i>	122

<i>Figure 4- 8 : Evolution de l'occupation du sol entre 1978 et 1995 sur l'OHHVO (Abdoulaye D., 2010).....</i>	<i>131</i>
<i>Figure 4- 9 : Evolution de l'occupation du sol entre 1995 et 2006 sur l'OHHVO (Abdoulaye D., 2010).....</i>	<i>132</i>
<i>Figure 5- 1 : Situation, sous-bassins et stations de mesure de l'OHHVO en 2006.....</i>	<i>134</i>
<i>Figure 5- 2 : Photo d'un pluviomètre (a) et d'un pluviographe à auget basculeur (b).....</i>	<i>136</i>
<i>Figure 5- 3 : Pluviométrie moyenne annuelle 1997-2006 sur l'Ouémé à Bétérou et barres d'erreur associées (Zannou A. B., 2006).....</i>	<i>137</i>
<i>Figure 5- 4 : Répartition mensuelle (a) et décadaire (b) en fraction de la pluie annuelle sur les sous-bassins de l'OHHVO (Zannou A. B., 2006).....</i>	<i>138</i>
<i>Figure 5- 5 : ETP Penman-Monteith, calculée à partir des mesures à la station météorologique de Djougou sur la période 2002-2004.....</i>	<i>140</i>
<i>Figure 5- 6 : ETR journalière calculée à partir des flux de surface (bilan d'énergie) par la méthode d'eddy-covariance sur le site Nalohou entre août 2007 et décembre 2008.....</i>	<i>141</i>
<i>Figure 5- 7 : Courbe de tarage de la station hydrométrique de l'Ouémé à Bétérou (Zannou A. B., 2006)..</i>	<i>143</i>
<i>Figure 5- 8 : Hydrogramme 2002 (a) et volume écoulé 1996-2004 (b) à la station hydrométrique de l'Ouémé à Bétérou avec incertitudes associées (Zannou A. B., 2006).....</i>	<i>145</i>
<i>Figure 5- 9 : Taux de lacunes aux 17 puits d'observations retenues (a) et niveaux piézométriques moyens du bassin de l'Ouémé à Bétérou (b) entre 2001 et 2006.....</i>	<i>146</i>
<i>Figure 5- 10 : Chronique des données de CE du 14 juin au 10 octobre à l'exutoire de l'Ouémé à Bétérou sur la période 2005-2006.....</i>	<i>148</i>
<i>Figure 6- 1 : Génération du ruissellement sur surfaces saturées (a) et équilibre de versant (b).....</i>	<i>158</i>
<i>Figure 6- 2 : Illustration de la distribution de l'indice topographique (en haut) et des zones saturées (en bas) correspondant à différents taux de saturation du bassin de la Donga (Le Lay M., 2006)</i>	<i>159</i>
<i>Figure 6- 3 : Profil de transmissivité seuillé à do.....</i>	<i>160</i>
<i>Figure 6- 4 : Algorithme de Topamma.....</i>	<i>162</i>
<i>Figure 7- 1 : Représentation des 252 échantillons de 5 ans.....</i>	<i>169</i>
<i>Figure 7- 2 : Distribution statistique de la pluie moyenne annuelle sur l'Ouémé à Bétérou (1953-2006)....</i>	<i>171</i>
<i>Figure 7- 3 : Relations entre critères pour les 2 premiers échantillons de période.....</i>	<i>177</i>
<i>Figure 7- 4 : Relations entre critères pour les 2 premiers échantillons de période (suite).....</i>	<i>178</i>
<i>Figure 7- 5 : Relations entre critères pour les 2 premiers échantillons de période (fin).....</i>	<i>179</i>

<i>Figure 8- 1 : Distribution statistique expérimentale des critères Vol et Qmax avant (en bleu) et après (en vert) application du critère Nash en phase calage sur les échantillons de période 1 et 2.....</i>	<i>202</i>
<i>Figure 8- 2 : Distribution statistique expérimentale des critères Vol et Qmax avant (en bleu) et après (en vert) application du critère Nash en phase calage sur les échantillons de période 3 et 4.....</i>	<i>203</i>
<i>Figure 8- 3 : Distribution statistique expérimentale des critères Vol et Qmax avant (en bleu) et après (en vert) application du critère Nash en phase calage sur les échantillons de période 5 et 6.....</i>	<i>204</i>
<i>Figure 8- 4 : Distribution statistique expérimentale des critères Vol et Qmax avant (en bleu) et après (en vert) application du critère Nash en phase calage sur l'échantillon de période 7.....</i>	<i>205</i>
<i>Figure 8- 5 : Relations entre Nash et Vol dans la région des optimums.....</i>	<i>206</i>
<i>Figure 8- 6 : Relations entre Nash et Qmax dans la région des optimums.....</i>	<i>206</i>
<i>Figure 8- 7 : Relations entre Vol et Qmax dans la région des optimums.....</i>	<i>206</i>
<i>Figure 8- 8 : Débits simulés et observés en phase évaluation du calage pour les années 1997 et 1999.....</i>	<i>208</i>
<i>Figure 8- 9 : Débits simulés et observés en phase évaluation du calage pour les années 2000 et 2001.....</i>	<i>209</i>
<i>Figure 8- 10 : Débits simulés et observés en phase évaluation du calage pour les années 2002 et 2003.....</i>	<i>210</i>
<i>Figure 8- 11: Débits simulés et observés en phase évaluation du calage pour les années 2004 et 2005.....</i>	<i>211</i>
<i>Figure 8- 12 : Corrélation entre débits observés et simulés en phase évaluation du calage.....</i>	<i>214</i>
<i>Figure 8- 13 : Débits simulés et observés en phase validation sur les années 1998 et 2006.....</i>	<i>216</i>
<i>Figure 8- 14 : Corrélation entre débits observés et simulés en phase validation du modèle.....</i>	<i>218</i>
<i>Figure 8- 15 : ETR journalière simulée par Topamma (moyenne climatologique d'ensemble sur la période 1997-2006) et ETR observée au niveau de la station de flux de Nalohou en 2008.....</i>	<i>220</i>
<i>Figure 8- 16 : Corrélation entre ETR journalière simulée par Topamma (moyenne climatologique sur la période 1997-2006) et ETR observée au niveau de la station de flux de Nalohou en 2008.....</i>	<i>220</i>
<i>Figure 8- 17 : Contrôle global de la percolation simulée [comparaison ETP et ETR+ETRnappe (a)] et contrôle affiné [comparaison avec la variation de stock souterrain sur 2001-2006 (b)].....</i>	<i>221</i>
<i>Figure 8- 18 : Bilan hydrologique sur la décennie d'étude 1997-2006.....</i>	<i>223</i>
<i>Figure 8- 19 : Répartition de l'écoulement total entre débit de base (Qb) et débit ruisselé (Qr).....</i>	<i>224</i>
<i>Figure 8- 20 : Relation pluie-débit observée et simulée sur la décennie d'étude avec incertitudes du modèle et barres d'erreur des observations.....</i>	<i>225</i>
<i>Figure 8- 21 : Indices et écarts à la moyenne annuelle des précipitations et des écoulements sur la décennie 1997-2006.....</i>	<i>226</i>
<i>Figure 9- 1 : Hydrogramme observé et simulé en 2005.....</i>	<i>230</i>

<i>Figure 9- 2 : Pluie et écoulement observés sur 1998-2004 et 2005 en pourcentage cumulé de chaque mois dans l'année.....</i>	232
<i>Figure 9- 3 : Champ pluviométrique annuel moyen de 2002 à 2007 sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou....</i>	232
<i>Figure 9- 4 : Maillage topographique de l'OHHVO utilisé dans le modèle hydrologique semi-spatialisé n'Topamma.....</i>	234
<i>Figure 9- 5 : Hydrogrammes observé et simulés pour l'année 2005 par Topamma et n'Topamma sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou</i>	235
<i>Figure 9- 6 : Evolution de la moyenne journalière d'ETR simulée sur la période 1997-2006 avec les 16 scénarios en fonction de la moyenne journalière d'ETP.....</i>	238
<i>Figure 9- 7 : Propagation des biais d'ETP en moyenne et en variance dans les sorties cibles ETR et débit</i>	239
<i>Figure 9- 8 : Représentation des paramétrisations mathématiques associées à la fonction de production de la composante de subsurface de l'ETR.....</i>	241
<i>Figure 9- 9 : Technique d'extraction des forçages pluviométriques sur l'Ouémé à Bétérou.....</i>	246
<i>Figure 9- 10 : Hydrogrammes simulés en 2005 avec les forçages EPSAT et RFE</i>	246
<i>Figure 9- 11 : Relation entre forçages satellitaires et données observées à différents pas de temps</i>	247
<i>Figure 9- 12 : Champ pluviométrique annuel moyen (en mm) 2005 des différents forçages utilisés (coordonnées géographiques en degrés).....</i>	248
<i>Figure 9- 13 : Biais sur la moyenne (Moy) et les variances (Vij) des forçages satellitaires en entrée du modèle hydrologique (Vij=variance sur les données journalières cumulées au pas de i jours).....</i>	248
<i>Figure 9- 14 : Confrontation entre débits journaliers simulés avec Topamma (a) et biais des critères Nash et Vol (b) obtenus avec les différents forçages pluviométriques</i>	249
<i>Figure 9- 15 : Confrontation entre débits journaliers simulés avec n'Topamma (a) et biais sur la moyenne (Moy) et les variances (Vij) des simulations [(b), Vij=variance sur les données journalières cumulées au pas de i jours].....</i>	249
<i>Figure 9- 16 : Propagation des biais des forçages pluviométriques par les modèles hydrologiques.....</i>	250
<i>Figure 10- 1 : Pluviométrie annuelle observée (1997-2006) et scénario IMPETUS (2011-2025) sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou</i>	258
<i>Figure 10- 2 : Volumes décennaux et quinquennaux d'eau de surface disponible à l'horizon 2025.....</i>	261
<i>Figure 10- 3 : Volumes annuels et mensuels moyens d'eau de surface disponible à l'horizon 2025</i>	262
<i>Figure 10- 4 : Besoins totaux (cumuls) estimés avec prise en compte de l'hydroélectricité d'ici 2025.</i>	268
<i>Figure 10- 5 : Evolution annuelle des besoins totaux en eau par commune d'ici 2025.....</i>	268
<i>Figure 10- 6 : Cartes de répartition spatiale des besoins totaux en eau.....</i>	269

<i>Figure 10- 7 : Evolution des besoins en eau potable par commune d'ici 2025.....</i>	<i>270</i>
<i>Figure 10- 8 : Cartes de répartition spatiale des besoins en eau potable.....</i>	<i>270</i>
<i>Figure 10- 9 : Evolution des besoins en eau pour l'élevage par commune d'ici 2025.....</i>	<i>271</i>
<i>Figure 10- 10 : Cartes de répartition spatiale des besoins en eau pour l'élevage</i>	<i>271</i>
<i>Figure 10- 11 : Evolution des besoins en eau pour l'irrigation par commune d'ici 2025</i>	<i>272</i>
<i>Figure 10- 12 : Cartes de répartition spatiale des besoins en eau pour l'irrigation</i>	<i>272</i>
<i>Figure 10- 13 : Evolution des besoins en eau industrielle par commune d'ici 2025.....</i>	<i>273</i>
<i>Figure 10- 14 : Cartes de répartition spatiale des besoins en eau industrielle.....</i>	<i>273</i>
<i>Figure 10- 15 : Confrontation des disponibilités aux besoins en eau (courbe de l'offre et de la demande) sur différentes périodes quinquennales d'ici 2025</i>	<i>275</i>
<i>Figure 10- 16 : Confrontation des besoins en eau aux disponibilités de ressources en eau par an d'ici 2025</i>	<i>276</i>
<i>Figure 10- 17 : Les 3 sites de barrages préconisés dans le bassin de l'Ouémé à Bétérou (en rouge).....</i>	<i>278</i>
<i>Figure 10- 18 : Nouvelle confrontation besoins-ressources en eau sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou.....</i>	<i>279</i>
<i>Figure 10- 19 : Définition des niveaux d'alerte pour la gestion technique des ressources en eau</i>	<i>280</i>
<i>Figure 10- 20 : Taux quinquennaux de sécurité stratégique et niveaux d'alerte correspondants d'ici 2025 sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou.....</i>	<i>282</i>
<i>Figure 10- 21 : Taux annuels de sécurité tactique et niveaux d'alerte correspondants d'ici 2025 sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou.....</i>	<i>283</i>

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 3- 1 : Classes de relief des bassins versants (Zannou A. B., 2004).....</i>	<i>82</i>
<i>Tableau 3- 2 : Caractéristiques morphométriques du bassin versant de l'Ouémé à Bétérou.....</i>	<i>82</i>
<i>Tableau 3- 3 : Départements et communes du bassin de l'Ouémé à Bétérou avec superficie concernée.....</i>	<i>93</i>
<i>Tableau 4- 1 : Décalage entre saison des pluies et écoulements sur le bassin de la Donga pour la période 2002-2004 (Métadier M., 2006).....</i>	<i>110</i>
<i>Tableau 4- 2 : ETR et ETo sur l'OHHVO pour 2002-2004 (Zannou A. B., 2006).....</i>	<i>116</i>
<i>Tableau 4- 3 : Valeurs du critère de Nash pour la période 2002-2004, obtenues avec Topamma par calage global et spécifique (Métadier M., 2006)*.....</i>	<i>121</i>
<i>Tableau 4- 4 : Part de l'écoulement de base dans l'écoulement total pour les années 2003 et 2004 (Kamagaté B., 2006).....</i>	<i>124</i>
<i>Tableau 4- 5 : Bilan hydrologique de l'année 2002 avec incertitudes associées sur 3 sous-bassins de l'OHHVO (Zannou A. B., 2006).....</i>	<i>127</i>
<i>Tableau 4- 6 : Bilan hydrologique de l'année 2002 sur la Donga avec Topamma et pour 2 types d'ETP (Métadier M., 2006).....</i>	<i>128</i>
<i>Tableau 5- 1 : Densité du réseau d'observation OHHVO comparée aux normes OMM.....</i>	<i>134</i>
<i>Tableau 5- 2 : Incertitude sur les valeurs de débit et de volume écoulé en 2004 à toutes les stations hydrométriques de l'OHHVO (Zannou A. B., 2006).....</i>	<i>144</i>
<i>Tableau 7- 1 : Les 10 échantillons de 5 années les plus représentatifs.....</i>	<i>169</i>
<i>Tableau 7- 2 : Période de retour et caractère humide, moyen ou sec de l'année pluviométrique sur différentes sous-périodes de la période de référence observée 1953-2006.....</i>	<i>172</i>
<i>Tableau 7- 3 : Définition de l'espace des paramètres.....</i>	<i>173</i>
<i>Tableau 7- 4 : Valeur seuil des critères en phase calage.....</i>	<i>181</i>
<i>Tableau 7- 5 : Caractère arbitraire ou non des décisions selon l'approche de modélisation.....</i>	<i>187</i>
<i>Tableau 7- 6 : Valeur seuil des critères en calage et en validation.....</i>	<i>189</i>
<i>Tableau 8- 1 : Effectif des lots de jeux de paramètres retenus en calage par échantillon.....</i>	<i>199</i>
<i>Tableau 8- 2 : Valeurs optimales des critères de calage.....</i>	<i>200</i>
<i>Tableau 8- 3 : Effectif du lot Lf selon le 3^{ème} critère utilisé.....</i>	<i>207</i>

<i>Tableau 8- 4 : Bornes des paramètres des jeux finaux et jeux optimaux selon chaque critère.....</i>	<i>214</i>
<i>Tableau 8- 5 : Valeur des critères de calage en phase évaluation.....</i>	<i>215</i>
<i>Tableau 8- 6 : Valeur observée et simulée du coefficient d'exfiltration.....</i>	<i>219</i>
<i>Tableau 8- 7 : Valeurs extrêmes des termes du bilan hydrologique annuel sur la décennie d'étude.....</i>	<i>223</i>
<i>Tableau 8- 8 : Comparaison des bilans hydrologiques de l'année 2002.....</i>	<i>223</i>
<i>Tableau 9- 1 : Impact de la paramétrisation de la composante de subsurface de l'ETR sur les résultats du modèle Topamma en 2005</i>	<i>242</i>
<i>Tableau 9- 2 : Description des forçages utilisés.....</i>	<i>245</i>
<i>Tableau 9- 3 : Définition des références pour l'évaluation des différents forçages et résultats.....</i>	<i>246</i>
<i>Tableau 10- 1 : Mesures de gestion stratégique préconisées en fonction du niveau d'alerte.....</i>	<i>281</i>
<i>Tableau 10- 2 : Mesures de gestion tactique préconisées en fonction du niveau d'alerte.....</i>	<i>282</i>

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 :__APERÇU SUR LE SECTEUR DE L'EAU ET LA GIRE AU BENIN

ANNEXE 2 :__DESCRIPTION DES PROJETS AMMA-CATCH ET OUEME-2025

**ANNEXE 3 :__STATIONS HYDROMETRIQUES DE L'OHHVO ET SUPERFICIE
DU BASSIN DRAINE**

ANNEXE 4 :__VARIANTE DU TEST DE KOLMOGOROV-SMIRNOV

**ANNEXE 5 :__METHODE DE DECOMPOSITION HYDROGEOCHIMIQUE DU
DEBIT TOTAL**

ANNEXE 6 :__LISTE DES 94 JEUX FINAUX

**ANNEXE 7 :__APPROCHE IMPETUS POUR LA COMBINAISON DES
MODELES CLIMATIQUES**

INTRODUCTION GENERALE

« Nous vivons tous sur la même planète, liés les uns aux autres par un réseau délicat et complexe de relations écologiques, sociales, économiques et culturelles qui déterminent notre existence. Pour parvenir à un développement durable, il nous faudra faire preuve d'un plus grand sens des responsabilités : envers les écosystèmes dont dépend toute vie, envers tous ceux qui composent la communauté humaine et envers les générations à venir qui, demain, auront à faire face aux conséquences des décisions que nous prenons aujourd'hui. »

Koffi Annan, Secrétaire Général des Nations Unies, Octobre 2001

INTRODUCTION GENERALE

Que ce soit avec la thèse évolutionniste (évolution graduelle des espèces) ou la thèse fixiste (création de l'univers par « Dieu »), la nature met à la disposition de l'être humain, voire de tout être vivant, des biens relevant de son environnement. La jouissance desdits biens naturels est une question évidente et légitime, mais leur sauvegarde est et demeure une autre problématique... Les « *objectifs de développement du millénaire* » adoptés par l'Assemblée Générale des Nations Unies en 2000 recommandent entre autres d'assurer un environnement durable en intégrant les principes du développement durable dans les politiques nationales et en inversant la tendance actuelle à la déperdition des ressources environnementales.

Parmi ces ressources naturelles, il y a l'eau, élément indispensable à la vie et dont l'étude requiert, de nos jours, une grande importance car elle constitue une ressource rare, distribuée de façon irrégulière dans le temps et dans l'espace. Lorsqu'elle est trop rare, elle entraîne des situations de pénurie, de désertification, d'exode des populations ; à l'opposé, trop abondante, elle devient la cause d'inondations catastrophiques (Vodounou J-B. *et al.*, 2011) et rappelle à l'homme l'impossibilité d'en maîtriser totalement les forces. Sa qualité naturelle est de plus en plus liée aux déséquilibres des écosystèmes aquatiques soumis aux pollutions d'origine humaine ; sa qualité de distribution quant à elle, est l'enjeu de compétitions économiques et technologiques que se livrent les grands groupes industriels. Abrisant faune et flore, vecteur transmettant des maladies, érodant et modifiant les paysages, élément vital d'alimentation, l'eau devient avec l'accroissement de la population, une denrée de plus en plus convoitée. La question de l'eau dans le monde appelle donc une attention réelle et constante afin de pouvoir garantir le droit d'accès des populations à cette ressource, droit reconnu et mentionné dans les dispositions légales internationales en la matière.

En Afrique en général, l'eau est un élément dont la disponibilité et la gestion influent énormément sur le développement sous tous ses aspects. Que ce soit pour les pays sahéliens où l'eau est une denrée rare ou pour les pays équatoriaux mieux pourvus en eau mais plus vulnérables, le facteur eau entrave encore la vie humaine, le progrès socio-économique, etc... On peut donc dire que sa maîtrise, loin d'être atteinte, est tributaire de véritables investissements en termes d'infrastructures, de compétences, de recherche, d'éducation, de sensibilisation, de vulgarisation, d'organisation etc... Cette maîtrise ou gestion de la ressource n'est possible si l'on ignore son volume et sa répartition spatio-temporelle.

Les pays africains en particulier, et ceux du tiers monde en général, ne sont pas seuls dans le combat pour la maîtrise de ce facteur indispensable à leur développement qu'est l'eau. Les partenaires au développement (bailleurs de fonds, organismes régionaux ou internationaux, partenaire bilatéral ou multilatéral), après l'époque des volumineux financements alloués directement aux gouvernements, politique qui s'est révélée inefficace pour promouvoir un développement réel, sont résolus de nos jours à un investissement direct dans des projets de développement (Zannou A. B., 2004).

Le développement en général, et celui des pays du tiers-monde en particulier, passe par une mobilisation et une meilleure gestion des ressources naturelles dont l'eau constitue un élément primordial. Si cette mobilisation ou gestion, à l'échelle d'un pays, peut être aisément réglemantée moyennant des normes ou dispositions légales définies et respectées, il n'en demeure pas moins évident qu'à l'échelle régionale ou sous-régionale, des conflits soient présents. Qu'il s'agisse de la problématique d'affectation et de gestion des eaux du fleuve Nil ou de celles du fleuve Niger pour ne citer que ceux-là, l'eau est objet de questions politiques au cœur de tensions croissantes, et les Etats sont appelés à « coopérer » pour un meilleur partage de la ressource commune disponible afin de garantir parfois la survie de leurs populations respectives (Zannou A. B., 2004).

La gestion intégrée des ressources en eau (GIRE), tenant compte des besoins des populations, de la durabilité environnementale et de l'intérêt économique des sociétés, est aujourd'hui d'un intérêt crucial et relève d'un impératif de développement. Au Bénin, l'alimentation, la santé et toutes les activités humaines dépendent de la disponibilité en quantité et qualité suffisantes de l'eau. Actuellement, l'approvisionnement en eau potable (AEP) constitue une des priorités nationales, consacrée dans les documents de référence du Bénin (Document de Stratégie de Réduction de la Pauvreté, Programme d'Action du Gouvernement...) et bénéficie d'importants appuis techniques et financiers de la part des partenaires au développement. Dans le cadre d'une vision de gestion intégrée des ressources en eau, le Gouvernement du Bénin a adopté en 2009 la Politique Nationale de l'Eau, et promulgué en 2010 la nouvelle loi portant gestion de l'eau en République du Bénin. Le Ministère en charge de l'eau, avec l'appui des partenaires au développement, a élaboré le Plan d'Action National GIRE, qui attend son adoption par le Gouvernement.

L'eau est reconnue comme facteur de développement et si l'on n'y prend garde, cette ressource naturelle risque à terme de s'imposer comme « facteur limitant » pour le développement. Ainsi, pour en assurer la maîtrise au profit du développement, des études et

travaux scientifiques sont nécessaires afin de « connaître la ressource elle-même », et en envisager une raisonnable exploitation qui préserve l'environnement. Au Bénin, la GIRE est rendue nécessaire par un contexte d'accroissement rapide de la population joint à l'extension de la culture irriguée et au développement industriel progressif ; mais elle est fortement tributaire des connaissances disponibles sur la quantité et la qualité de l'eau dans tous nos ensembles hydrographiques (Zannou A. B., 2006). La compréhension et la prévision des changements apportés ou non par l'homme dans le régime des eaux et le bilan hydrologique posent des problèmes complexes. Un des enjeux de cette complexité réside sans doute dans le fait que, des trois grandes moussons existantes (mousson africaine, indienne et sud-américaine), la mousson africaine paraît la moins bien connue. Or, elle est la source première d'eau et ses caprices (en termes de variabilité ou changement climatique par exemple) ont des répercussions dramatiques pour des populations déjà vulnérables. La baisse très marquée de la pluviométrie observée dans la région ouest-africaine au cours des décennies 1970 et 1980 a eu des conséquences importantes tant au plan hydrologique et agricole, qu'au plan économique, social, voire politique (Sintondji L. O., 2005). A cette situation déplorable, s'ajoute le fait qu'en Afrique, très peu de données existent pour appréhender et mesurer l'impact des changements apportés par l'homme sur son environnement et les rétroactions avec la mousson. Pour les hydrologues, face à ce contexte de non-stationnarité à la fois climatique et anthropique, il y a lieu d'investir dans l'optimisation des moyens ou méthodes actuellement disponibles pour améliorer ou approfondir les connaissances existantes, et dans la mise au point d'outils d'aide à la gestion qui permettent d'orienter au mieux les décisions à prendre.

Un des principaux aspects, dans l'application pratique de l'hydrologie, réside dans l'estimation des éléments de base du régime hydrologique, tels que les caractéristiques de l'écoulement fluvial, les précipitations, l'évaporation, la dynamique des masses d'eau, les transports solides, la qualité de l'eau, etc..., éléments dont la connaissance est essentielle pour la planification, la conception, la réalisation et l'exploitation des aménagements (OMM, 1994). Les données hydrologiques et météorologiques recueillies au moyen de réseaux d'observation sont la base principale des estimations hydrologiques. La qualité de ces estimations est donc liée à la disponibilité de ces données, à leur densification dans le temps et l'espace ainsi qu'à leur précision. Il va de soi que la sécurité, le coût et l'efficacité des aménagements et de leurs ouvrages hydrauliques dépendent étroitement de la fiabilité de ces estimations hydrologiques (Zannou A. B., 2006).

La présente thèse de doctorat intitulée « Analyse et modélisation du cycle hydrologique continental pour la gestion intégrée des ressources en eau au Bénin : cas du bassin de l'Ouémé à Bétérou » se propose d'approfondir une partie de ces estimations hydrologiques sur ce bassin. La question principale au cœur de la problématique de notre thèse est la suivante : « **comment modéliser de façon raisonnable le cycle hydrologique du bassin en vue d'aboutir à une estimation cohérente des ressources en eau à planifier sur le long terme ?** ». En effet, dans son ouvrage intitulé « *L'art de la thèse* »⁴ paru aux éditions « *La Découverte* » en 1994, Michel Beaud indique que la définition de la question principale au cœur de la problématique est « aussi indispensable pour l'auteur d'une thèse que la connaissance du cap à suivre pour un navigateur, et permet de ne pas s'égarer ».

Après donc avoir sacrifié à cette obligation pédagogique, le présent document qui rend compte du travail de recherche réalisé est structuré en 3 parties subdivisées en 10 chapitres :

➤ **Première Partie : Contexte Général et Objectifs**

Il s'agit pour nous de situer cette étude dans son contexte global (celui du Bénin) et particulier (celui du bassin de l'Ouémé à Bétérou et des projets de recherche y opérant) d'une part, et, d'autre part, d'en préciser la problématique, les objectifs et la méthodologie générale. Cette Première Partie comporte 3 chapitres.

➤ **Deuxième Partie : Matériels et Méthodes**

Nécessaire pour tout travail de recherche, cette Deuxième Partie développée en 4 chapitres nous permet d'abord de faire une synthèse des principaux éléments extraits de la bibliographie, et qui ont servi de base à notre étude. Ensuite, elle présente le réseau d'observation installé sur le bassin et exposera les données utilisées pour la présente étude. Enfin, cette partie précise les méthodes employées et insiste sur la démarche de modélisation développée.

➤ **Troisième Partie : Résultats et Applications**

La Troisième et dernière Partie du document comporte 3 chapitres. Nous y présentons l'ensemble des résultats obtenus en ce qui concerne la modélisation et le calcul du bilan hydrologique. Aussi, nous passons en revue les principaux constats issus de l'analyse de la représentation des relations pluie-débit par le modèle. Ensuite, certaines faiblesses identifiées à travers les résultats du modèle sont diagnostiquées et des voies d'amélioration proposées. Enfin,

⁴ Michel BEAUD, *L'Art de la thèse*, La Découverte ; nouvelle éd. 1994, page 35

dans le but de fournir des bases scientifiques à la DG-Eau pour sa mission nationale de planification à long terme, les résultats du modèle sont appliqués pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou.

PREMIERE PARTIE :

CONTEXTE GENERAL ET OBJECTIFS

« Un texte sorti de son contexte devient un prétexte. »

Yvan Castanou, Pasteur français⁵

⁵ Dans « Maintenant, ça suffit, il faut que ça change, Editions Métañoïa et Vie, 2005, 115 pages. »

INTRODUCTION

Au début de cette thèse portant sur l'analyse et la modélisation du cycle hydrologique continental pour la gestion intégrée des ressources en eau au Bénin, précisément sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou, il importe de situer l'étude dans son contexte et de préciser ses objectifs. Ainsi, la première partie de ce document intitulée « CONTEXTE GENERAL ET OBJECTIFS » est développée en trois (3) chapitres.

D'abord le Chapitre 1 porte sur le contexte du travail. Il s'agit pour nous de rappeler les réalités du Bénin en général, et en particulier, celles du secteur de l'eau notamment les politiques gouvernementales en la matière. En outre, la structure responsable du secteur (Direction Générale de l'Eau du Ministère en charge de l'Eau) est présentée à travers ses missions régaliennes exécutées par la mise en œuvre de divers projets/programmes. En fin de Chapitre, l'avancement du processus de gestion intégrée des ressources en eau a été résumé pour présenter les enjeux actuels du secteur de l'eau.

Ensuite le Chapitre 2 présente le cadre de recherche dans lequel s'est déroulée notre étude ainsi que les objectifs visés. Nous y présentons les projets de recherche (AMMA-CATCH et OUEME-2025) qui ont servi de cadre à nos travaux. Notre projet de thèse y est exposé en détails, notamment la problématique abordée, la justification de l'étude et les objectifs généraux et scientifiques spécifiques poursuivis. On finit ce Chapitre 2 en décrivant la méthodologie de l'étude de façon très sommaire et en présentant la contribution de cette thèse au renforcement de capacité et à l'exercice des attributions de la DG-Eau.

Enfin, le Chapitre 3 présente le contexte physique et socio-économique de la zone d'étude.

« Science sans conscience n'est que ruine de l'âme. »

François Rabelais, Médecin et écrivain humaniste français, 1483-1553

CHAPITRE 1: Contexte du travail

Après quelques informations générales sur le Bénin, ce Chapitre aborde d'entrée les réalités secteur de l'eau notamment ses problèmes et défis, ses faiblesses et contraintes, ses forces et opportunités, ses atouts ou potentiels. Ensuite, la disponibilité et la variabilité des ressources en eau ainsi que les usages et besoins liés à l'eau sont rappelés. Il en est de même de la politique du secteur et des missions et projets/programmes de la DG-Eau. Un focus est réalisé sur les activités du Sous-Programme Gestion des Ressources en Eau dont nous assurons la coordination, dans la mesure où ces activités sont largement en relation avec la problématique de la présente thèse (modélisation des ressources en eau en vue d'une gestion intégrée). Enfin, l'avancement de la GIRE au plan national est présenté à travers les récentes réformes sur la Politique Nationale de l'Eau et la Loi portant gestion de l'eau en République du Bénin, ainsi que les perspectives actuels.

Pour celui qui connaît peu le secteur de l'eau et le contexte de la GIRE au Bénin, ou celui qui souhaite en savoir un peu plus que le présent Chapitre, des informations plus détaillées sont disponibles dans un document élaboré à cet effet et situé en Annexe 1.

1.1 Données générales du Bénin et réalités du secteur de l'eau

1.1.1. Informations générales sur le Bénin

La République du Bénin est un pays situé en Afrique de l'Ouest sur la côte du Golfe de Guinée. Avec ses 112.622 km² de superficie, le Bénin se situe entre les longitudes 0°45' et 4°Est, les latitudes 6°25' et 12°30'Nord ; et partage ses frontières terrestres avec le Togo à l'ouest, le Nigéria à l'est, le Niger et le Burkina Faso au nord. Il s'étend sur 670 kilomètres de la côte Atlantique au sud vers le fleuve Niger au nord. Sa façade sur l'Océan Atlantique (frontière maritime) s'étend sur 122 km d'est en ouest (Adam K. S. and Boko M., 1993).

Le relief du pays est peu accidenté et comprend une région côtière, basse et sablonneuse limitée par des lagunes, un plateau d'argile ferrugineux, un plateau silico-argileux parsemé de quelques sous-bois, le massif de l'Atacora au nord-ouest qui culmine à 650 m et les plaines du Niger silico-argileuses très fertiles au nord-est (Judex M. *et al.*, 2009).

Le Bénin est caractérisé par un climat tropical subhumide, un milieu naturel en voie de

dégradation, un taux de croissance démographique élevé (moyenne annuelle de 3,25%) et des indicateurs sociaux faibles. Ces conditions particulièrement difficiles touchent notamment les 61,1% de la population du pays vivant en zones rurales, dont les conditions de vie demeurent précaires et font du Bénin l'un des pays les plus pauvres au monde (134^{ème} rang sur 169 pays au niveau de l'indice de développement humain du PNUD en 2010).

La population est estimée en 2002 à 6.769.914 habitants (INSAE, 2003) et est relativement jeune (46,8% ont moins de 15 ans). Elle est répartie en 8 groupes socio-linguistiques, dont 4 forment 75,9% des effectifs : ce sont les *Fon*, les *Adja*, les *Yoruba* et les *Bariba*.

Le Bénin est administrativement divisé en 12 départements qui sont subdivisés en 77 communes. Le régime politique est de type présidentiel depuis 1990 (République du Bénin, 1990), date de l'instauration du système démocratique à l'issue de la Conférence nationale des forces vives. Depuis lors, le pays a déjà connu 2 alternances au pouvoir en 20 ans.

1.1.2. Secteur de l'eau au Bénin

Au Bénin, la problématique du secteur de l'eau revêt globalement un triple aspect caractérisé par l'importance de l'approvisionnement en eau potable des populations, la timide progression des aménagements hydro-agro-pastoraux pour la valorisation de la ressource, et la faible connaissance des besoins en eau industriels et touristiques.

Le secteur fait face à plusieurs faiblesses et contraintes (cf. Annexe 1) dont les principales identifiées par le Document de Politique Nationale de l'Eau (République du Bénin, 2009) sont les suivantes : la **main mise des institutions étatiques**, une **répartition peu judicieuse des responsabilités**, une **démographique croissante peu maîtrisée**, et une **répartition spatio-temporelle peu adéquate** des ressources en eau avec des **connaissances et données insuffisantes**.

Le secteur dispose néanmoins de forces et opportunités (cf. Annexe 1) parmi lesquelles : l'existence d'une volonté politique, l'opportunité de la décentralisation, et l'expérience technique et méthodologique en matière de gestion et de mobilisation des ressources, accumulée depuis l'indépendance du pays en 1960. Parmi les principaux problèmes recensés dans le secteur de l'eau (cf. Annexe 1), ceux qui sont en lien avec le présent travail sont : l'eau est une **ressource relativement abondante mais faiblement connue et valorisée**, le **système national de formation-recherche est peu adapté** ; les **variabilités et changements climatiques ne sont pas pris en compte** dans la planification et la gestion.

Pour faire face efficacement à cette situation du secteur de l'eau, les défis suivants doivent être relevés : mieux connaître les ressources en eau disponibles par l'organisation du suivi permanent de leur évolution qualitative et quantitative dans l'espace et dans le temps ; mieux valoriser l'eau pour soutenir le développement socio-économique du pays ; mettre en place une gouvernance de l'eau reposant sur la coordination des actions et des acteurs.

Pour relever ces défis, le Bénin dispose d'un certain potentiel en matière de ressources en eau. Le pays reçoit une pluviométrie annuelle abondante (800-1200 mm) qui alimente son potentiel hydrologique naturel à travers les 4 ensembles hydrographiques : le Niger (3 affluents béninois), la Volta (Pendjari), l'Ouémé-Yéwa et le Mono-Couffo. En effet, les ressources en eau de surface du Bénin sont évaluées à plus de **13 milliards de mètres cubes** (Le Barbé L. *et al.*, 1993) et les capacités de recharge des aquifères sont estimées à un peu moins de **2 milliards de mètres cubes** par an (MECCAG-PDPE, 2000). Ces ressources sont inégalement réparties sur l'ensemble du territoire national. En outre, le Bénin dispose de plus de **15.000 ha de zones humides**, de plus de **300.000 ha de terres irrigables** dont 117.000 ha de plaines d'inondation et de vallées et de 205.000 ha de bas-fonds. Le Bénin compte plus de **300 ouvrages de retenues d'eau à but agropastoral** dont une centaine est en bon état (Tossa A. *et al.*, 2010), permettant de stocker environ **40 millions de m³ d'eau**. S'agissant des eaux souterraines, elles sont essentiellement utilisées pour l'alimentation en eau potable des villes et des campagnes. Les prélèvements annuels sont de l'ordre de **30 millions de m³ par an**.

Pour le Bénin, le problème de l'adéquation ressources/besoins à long terme se pose donc, non pas en terme de déficit de la ressource, mais en terme de maîtrise des ressources existantes (MMEE/LIFAD, 2006). Les ressources en eau sont donc disponibles et les problèmes rencontrés dans ce secteur sont liés à leur inégale répartition et à leur faible mobilisation (moins de 2%).

Au plan stratégique, depuis l'adoption de la GIRE comme approche de développement des ressources en eau en 1998, les actions conduites par le Bénin se sont inscrites dans les principes du développement durable. Une "*Vision Eau Bénin 2025*" a été élaborée (DGH/MMEH, 2000) et définit l'eau comme la ressource essentielle à partir de laquelle l'on peut satisfaire les besoins sociaux et produire des richesses. Au 31 décembre 2010, le taux de desserte en eau potable était de **57,2% en milieu rural** (DG-Eau, 2011) et de **58,5% en milieu urbain** (SONEB, 2011). Le Gouvernement du Bénin a retenu cinq axes stratégiques de développement, dont deux supposent des interventions dans les domaines de l'hydraulique, de l'assainissement, de

la valorisation socio-économique et de la gestion des ressources en eau (République du Bénin, 2007).

Les objectifs visés par la Politique Nationale de l'Eau (République du Bénin, 2009) sont de 2 ordres : assurer un **accès équitable à l'eau et une exploitation durable des ressources en eau** d'une part, et, d'autre part, une **utilisation efficiente de l'eau pour en optimiser le bénéfice social et économique**. Quatre orientations stratégiques en découlent, à savoir : **réformer le cadre de gestion** pour une bonne gouvernance de l'eau ; assurer un **accès équitable et durable** à l'eau potable et à l'assainissement pour les populations ; garantir et assurer la **disponibilité de l'eau en quantité et en qualité** pour les activités de production ; et, assurer **la santé, la sécurité publique et la conservation des écosystèmes**.

S'agissant de la mobilisation des ressources pour le financement du secteur de l'eau, outre la contribution directe de l'Etat, des Partenaires Techniques et Financiers (PTFs) et des bénéficiaires, plusieurs nouvelles dispositions peuvent être mises à profit afin d'atteindre le niveau de financement escompté. La plus importante est sans doute les articles 46 et suivants de la nouvelle loi (loi n°2010-44 du 24 novembre 2010) portant gestion de l'eau en République du Bénin, qui crée un établissement public appelé **Fonds National de l'Eau (FNE)**. Au titre de l'article 47 de cette loi, les ressources du FNE sont constituées entre autres par le produit des **redevances fixées, taxes instituées et amendes prononcées** en application de ladite loi (cf. Annexe 1). Cette loi instaure certains principes dont l'application peut contribuer à l'auto-financement du secteur de l'eau sont : les principes « **utilisateur-payeur** » et « **pollueur-payeur** » (cf. Annexe 1).

Toujours au titre de cette nouvelle loi, le cadre institutionnel approprié pour le secteur de l'eau est composé de : l'Etat, les collectivités territoriales décentralisées, l'administration centrale, le conseil national de l'eau, les comités de bassin et les organes de gestion locale de l'eau. L'Etat et les collectivités territoriales décentralisées assurent la gestion durable de l'eau. Le Ministre en charge de l'eau est responsable de la gestion du secteur au plan national. Au plan technique et opérationnel, il est recommandé la création d'une **Agence Nationale de Gestion de l'Eau**, établissement public à caractère scientifique, doté de la personnalité juridique, qui exerce des missions scientifiques, techniques et administratives dans le domaine de l'eau. En outre, la prise en compte de l'approche participative implique la mise en place d'un **Conseil National de l'Eau**, qui apporte son concours à la définition des objectifs généraux et des orientations de la politique nationale et de la planification de l'eau et, d'une manière générale, formule toutes propositions de nature à améliorer ou à faciliter la gestion de l'eau. Le conseil national de l'eau

rassemble les différents groupes d'intérêts du domaine de l'eau, tant du secteur public, que du secteur privé et de la société civile. Le **Comité de Bassin**, créé au niveau de chaque ensemble hydrographique regroupe des représentants de l'Etat, des collectivités territoriales et des groupes socio-professionnels concernés par la gestion de l'eau ainsi que des personnalités qualifiées. Ce comité de bassin délibère sur les projets de schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux, les programmes d'intervention de l'Etat et des collectivités territoriales concernant l'eau, ainsi que sur le taux des redevances éventuelles.

1.2 Principales missions de la Direction Générale de l'Eau et avancement du processus d'instauration de la Gestion Intégrée des Ressources en Eau

Durant plusieurs années, la structuration du service public de l'eau et de l'assainissement au Bénin avait été faite autour des deux milieux que sont : l'urbain et le rural (Présidence de la République, 2006). La DG-Eau (MMEE, 2007a) a compétence dans le milieu rural en mettant en œuvre des actions d'hydraulique villageoise (MMEE/DGH, 2005); et la SONEB (ancien département Eau de la SBEE) est en charge de la mise en œuvre de la politique du gouvernement en matière d'alimentation en eau potable (AEP) en milieu urbain (MMEE, 2007b). La SONEB a également pour mission le traitement et l'évacuation des eaux usées en milieu urbain.

Plus largement, les principales missions de la DG-Eau peuvent être résumées en 4 points :

- l'élaboration et le suivi de la mise en œuvre de la politique du secteur de l'eau ;
- l'élaboration et le suivi de la mise en œuvre de la stratégie du secteur de l'eau ;
- l'approvisionnement en eau potable en milieu rural ;
- la mise en œuvre de la gestion intégrée des ressources en eau.

1.2.1. Missions de la DG-Eau en matière de ressources en eau et mise en œuvre à travers quatre sous-programmes en cours

La DG-Eau assure la réglementation des ressources en eau, elle propose des textes d'orientation de la politique sectorielle, assure le respect des textes de loi en vigueur, et la constitution d'une base de données relative aux ressources en eau.

En ce qui concerne ses attributions (cf. Annexe 1), on peut citer entre autres :

- l'orientation et la coordination des actions de l'Etat dans le secteur de l'eau ; la coordination des intervenants dans le secteur ;
- la promotion du secteur de l'eau ; la gestion globale et intégrée des ressources en eau du pays en assurant la mise en œuvre concertée et coordonnée de la politique nationale de l'eau ; la mise en œuvre du processus de gestion intégrée des ressources en eau, s'appuyant sur un Plan d'Action National de GIRE ;
- la création d'un cadre de coopération régionale pour la gestion intégrée des ressources en eau, l'harmonisation des politiques et des législations en matière d'eau et les échanges d'expérience ; la création ou la redynamisation des cadres de concertation entre pays riverains pour la gestion concertée des eaux des bassins partagés ;
- la mise en place et le fonctionnement du système d'information et la gestion d'une banque de données sur les ressources en eau et leur mobilisation.

Ces missions et attributions sont mises en œuvre à travers quatre (4) Sous-Programmes. En effet, la réforme des projets intervenue au Ministère en charge de l'Eau à l'occasion de l'élaboration du Budget Programme par Objectif (BPO) triennal 2010-2012 a consisté fondamentalement au regroupement des projets en des ensembles cohérents (en matière d'objectif) dénommés Programmes. Ainsi, le Ministère a vu l'ensemble de ses projets regroupés en 3 Programmes (« Energie », « Eau » et « Administration Centrale ») dont le Programme Approvisionnement en Eau Potable et Gestion des Ressources en Eau (P-AEPGRE). Ce Programme est subdivisé en 6 Sous-Programmes dont 2 exécutés par la SONEB et 4 par la DG-Eau.

Les 4 sous-programmes placés sous la responsabilité de la DG-Eau sont :

- le Sous-Programme Approvisionnement en Eau Potable en Milieu Rural et Semi Urbain (SP-AEPMRSU) ;
- le Sous-Programme Initiative Eau (SP-IE) ;
- le Sous-Programme Pluriannuel Eau et Assainissement (SP-PPEA) ; et
- le Sous-Programme Gestion des Ressources en Eau (SP-GRE).

Ces deux derniers sous-programmes sont les seuls à développer des activités dans le domaine de la GIRE, à l'exception des deux premiers qui n'endossent que des actions relatives à l'PAEP.

1.2.2. Focus sur le Sous-Programme Gestion des Ressources en Eau

Le SP-GRE assure la mise en œuvre des aspects opérationnels de la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE) dans le cadre des attributions de deux Directions Techniques (Direction de l'Information sur l'Eau et Direction de la Planification et de la Gestion de l'Eau) de la DG-Eau. Les activités du SP-GRE couvrent 3 champs opérationnels à savoir :

- la promotion de la connaissance et la capitalisation de la recherche sur l'eau ;
- la mobilisation, l'exploitation et la valorisation des ressources en eau à des fins autres que l'PAEP (approvisionnement en eau potable) ;
- les aspects environnementaux et risques liés à l'eau.

1.2.2.1 Promotion de la connaissance et capitalisation de la recherche sur l'eau

En plus du suivi courant des ressources en eau, les activités de ce champ opérationnel concernent surtout un **suivi ponctuel, densifié et renforcé des ressources en eau**, afin de produire des données destinées à alimenter des travaux de recherche. Ces travaux de recherche se focalisent sur **l'étude de la disponibilité et l'analyse de la dynamique des ressources en eau à toute échelle spatio-temporelle, en prenant en compte les aspects liés aux changements climatiques et activités humaines**.

A cet effet, il est à signaler que la DG-Eau est impliquée depuis plusieurs années dans divers projets, notamment les projets AMMA-CATCH, IMPETUS, OUEME-2025, HYCOS (Niger et Volta), GHYRAF, ECLiS. Ainsi, les activités du SP-GRE dans ce champ opérationnel regroupe tout ce qui concerne ces projets cités dans le cadre d'une unique Composante du SP-GRE dénommée PCREau (Projet de promotion de la Connaissance et de Capitalisation de la Recherche sur l'Eau). Cette Composante endosse également d'autres activités d'amélioration de la connaissance sur l'eau, notamment celles du PEP/GIZ relatives à l'actualisation de la carte hydrogéologique du Bénin et de la monographie des ressources en eau de surface, l'établissement d'un guide de suivi des ressources en eau ; et la reprise du suivi des bassins expérimentaux dans le cadre du PHI-UNESCO. Ces activités se déroulent avec la participation des universités et centres

de recherche béninois et étrangers, et comme principaux partenaires l'Université d'Abomey-Calavi (UAC/Bénin), l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD/France), la Coopération Technique allemande (GIZ) et l'Autorité du Bassin du Niger (ABN).

1.2.2.2 Mobilisation, exploitation et valorisation des ressources en eau

Les activités tournent actuellement autour de la **mise en place de retenues d'eau agropastorales et d'aménagements hydro-agricoles**. Ainsi, plusieurs barrages, périmètres irrigués, étangs piscicoles, couloirs d'accès pour le bétail et pistes rurales d'accès aux sites ont été aménagés et/ou réhabilités. Aussi, une étude prospective de mobilisation des ressources en eau pour l'AEP des centres urbains à l'horizon 2030-2040 est envisagée.

Ces activités se déroulent dans le cadre de 3 Composantes du SP-GRE à savoir le PHPA (Projet d'Hydraulique Pastorale et Agricole), le PDREGDE/BN (Projet de Développement des Ressources en Eau et Gestion Des Ecosystèmes dans le Bassin du Niger) et le PPREau (Projet de Planification des Ressources en Eau) ; et connaissent l'implication des différents acteurs concernés dont les Directions et Services appropriés du Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche (MAEP), les Collectivités Locales, la GIZ et l'ABN.

1.2.2.3 Aspects environnementaux et risques liés à l'eau

Les activités de champ opérationnel sont liées à la **protection de l'environnement, au reboisement et à la restauration/gestion des forêts** aux fins de préserver la ressource en eau. Elles portent également sur **l'étude et l'établissement de système de prévision des crues et d'alerte aux inondations**.

Quatre (4) Composantes du SP-GRE sont concernées par ces activités à savoir le PHPA, le PDREGDE/BN, le projet ITDTE/BN (Inversion des Tendances à la Dégradation des Terres et des Eaux dans le Bassin du Niger) et le PPREau. Ces activités impliquent différents acteurs concernés dont les Directions et Services appropriés du Ministère de l'Environnement et de la Protection de la Nature (MEPN), les Collectivités Locales, la GIZ et l'ABN.

1.2.3. Avancement du processus d'instauration de la GIRE

Par définition, la **Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE)** est un processus qui favorise le développement et la gestion coordonnée de l'eau, des terres et des ressources connexes, en vue de maximiser, de manière équitable, le bien-être économique et social, sans pour autant compromettre la pérennité d'écosystèmes vitaux (GWP/TAC, 2000, GWP/TEC, 2005). Ainsi, la GIRE consiste à prendre en considération ensemble et à concilier les différentes utilisations et fonctions physiologiques, socioculturelles, économiques, environnementales de l'eau, ainsi que ses éventuels effets négatifs sur les personnes, les biens ou l'environnement (GWP/TAC, 2000, GWP/TEC, 2005). A l'instar de la démarche mondiale, elle repose au Bénin sur un certain nombre de principes et critères (cf. Annexe 1) bien décrits par le Document de Politique Nationale de l'Eau (République du Bénin, 2009). Néanmoins, l'atteinte d'une bonne gouvernance de l'eau est soumise à un certain nombre d'actions stratégiques telles que la volonté et l'engagement politique ; l'adoption d'une approche transparente, cohérente et équitable ; la mise en œuvre d'actions concrètes sur le terrain ; le renforcement des capacités des institutions et des acteurs ; l'utilisation des canaux de relais de l'information et de suivi. Bien que reconnaissant l'impossibilité d'une standardisation du processus GIRE, les milieux spécialisés estiment que ce processus devrait comprendre au moins dix étapes clés (cf. Annexe 1) indépendamment des lieux ou des pays de sa mise en œuvre. Dans ce cadrage, le Bénin est à la huitième étape relative à l'adoption de son Plan d'Action National (PAN-GIRE).

Au titre des avancées significatives, il faut rappeler que la Politique nationale de l'eau est fondée sur l'approche GIRE, et sa mise en œuvre sera réalisée à travers le Plan d'action national de gestion intégrée des ressources en eau (PAN-GIRE). La récente loi portant gestion de l'eau en République du Bénin précise les principales dispositions qui favoriseront la mise en œuvre de cette Politique. Le document de Plan d'Action National de Gestion Intégrée des Ressources en Eau (PANGIRE) est élaboré et attend son adoption par le Gouvernement. Il est la pièce maîtresse du processus de transition vers la GIRE. Il définit le cadre national approprié de gestion de l'eau pour la mise en œuvre de la politique nationale de l'eau, ainsi que les modalités et le calendrier de sa mise en place progressive.

Au titre des perspectives actuelles de la GIRE au Bénin, et à côté de la mise en œuvre du PAN-GIRE après son adoption par le Gouvernement, il y a lieu d'insister sur l'élaboration et la mise en œuvre des schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) et des schémas d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE) tels que fixées par la nouvelle loi en vigueur dans le secteur.

A cet effet, le SDAGE et le SAGE sont des outils de planification dont la mise en place fait cristalliser des besoins émergents en matière de connaissance scientifique du potentiel de ressources en eau et donc, de modélisation du cycle de l'eau et de ses variations. Et c'est en cela que la présente thèse constitue une contribution au contexte national de GIRE au Bénin.

CHAPITRE 2 : Cadre de la présente étude

Les enjeux scientifiques autour des ressources en eau ne sont plus à démontrer. Ils sont abordés par plusieurs initiatives à différents niveaux géographiques et/ou politiques et sont généralement approfondis dans le cadre de projets spécifiques bien ciblés. Sans ignorer l'existence et l'impact des nombreux projets qui travaillent sur la question des ressources en eau du Bénin, en particulier à l'échelle du bassin de l'Ouémé, nous nous limiterons dans le présent Chapitre aux deux projets dans le cadre desquels s'est déroulée la présente étude : AMMA-CATCH et OUEME-2025. A cet effet, nous présenterons succinctement les objectifs scientifiques de ces projets, leurs échelles spatiales et temporelles d'intérêt, leurs volets et observations qui sont directement en lien avec notre étude.

En milieu de Chapitre, est détaillé notre projet de thèse. Nous présentons la problématique abordée dans toutes ses dimensions avant préciser le but principal visé et les objectifs scientifiques que nous nous sommes fixés.

Le Chapitre s'achève sur une présentation très sommaire de la méthodologie utilisée (dont nous présentons tous les détails en Deuxième Partie du document) et de la contribution de la présente thèse au renforcement de capacité et à l'exercice des attributions de la DG-Eau.

2.1. Contexte des projets OUEME-2025 et AMMA-CATCH

2.1.1. Description du programme AMMA-CATCH

Depuis les années 70, le Bénin comme les autres pays de l'Afrique de l'Ouest est soumis à des perturbations climatiques dont les conséquences sont la sécheresse de 1970 et 1980 (*Bokonon-Ganta E. B.*, 1987; *Le Barbé L. and Lebel T.*, 1997; *Houndénou C.*, 1999; *Yabi I.*, 2002) accompagnée d'une réduction de la disponibilité des ressources en eau (*Vissin E. W.*, 2001, *Tossa*, 2005), le développement des maladies tels que le paludisme et le choléra. C'est dans ce contexte d'impacts socio-économiques et démographiques forts, auxquels s'ajoute la perspective de changement global lié à l'augmentation des gaz à effet de serre, qu'il est apparu essentiel à la communauté scientifique de décrire et de comprendre les modes de variabilité du climat en Afrique de l'Ouest pour en améliorer les prévisions (*Nicholson S. E.*, 1979; *Nicholson S.E.*, 1986; *Boko M.*, 1988; *Moron V.*, 1994; *Houndénou C. and Hernandez K.*, 1998; *Le Barbé L. et al.*, 2002).

La mousson d'Afrique de l'Ouest est caractérisée par une très forte variabilité interannuelle et décennale, dont les conséquences pour les populations sont énormes. Une pluviométrie capricieuse, de faibles capacités de prédiction et les modifications rapides de l'environnement conduisent à des conditions particulièrement sévères qui menacent le succès des politiques de développement. Partant de ce constat, les trois objectifs principaux du programme AMMA⁶ sont les suivants :

- (1) Améliorer la compréhension de la mousson ouest-africaine et de son influence sur l'environnement physique, chimique et la biosphère aux échelles régionale et globale;
- (2) Produire les connaissances qui permettront de relier la variabilité du climat aux problèmes de santé, de ressources en eau et de sécurité alimentaire pour les nations d'Afrique de l'Ouest et définir les stratégies de surveillance appropriées;
- (3) Faire en sorte que la recherche multidisciplinaire mise en place soit effectivement relayée par une activité dans les domaines de la prévision et de la prise de décision.

Quatre échelles spatiales principales sont distinguées (cf. Annexe 2) : l'échelle **globale** (échelle d'interaction entre la mousson d'Afrique de l'Ouest et le reste du globe), l'échelle **régionale** [échelle des interactions Continent-Océan-Atmosphère (*Figure 2- 1*)], la **méso**-échelle telle que celle de l'Ouémé montré à la *Figure 2- 1* (échelle des systèmes convectifs organisés qui sont à l'origine de l'essentiel des précipitations et dont la dynamique est influencée par les rétroactions de la surface) et l'échelle **locale** (échelle de la convection locale qui joue un grand rôle dans la variabilité interne aux champs de pluie et dans le forçage des systèmes hydrologiques, et est donc déterminante pour comprendre la variabilité des rendements agricoles et de la répartition des ressources en eau).

Trois périodes d'étude sont définies pour échantillonner la variabilité interannuelle et intra-saisonnière, ainsi que pour documenter correctement le cycle saisonnier moyen et, éventuellement, donner des indications sur les tendances à plus long terme. Ces trois périodes sont (cf. Annexe 2) : la période d'observations à long terme (LOP, 2001-2010), la période d'observations renforcées (EOP, 2005-2007) et la période d'observations spéciales (SOP, 2006).

⁶ <http://www.amma-international.org>

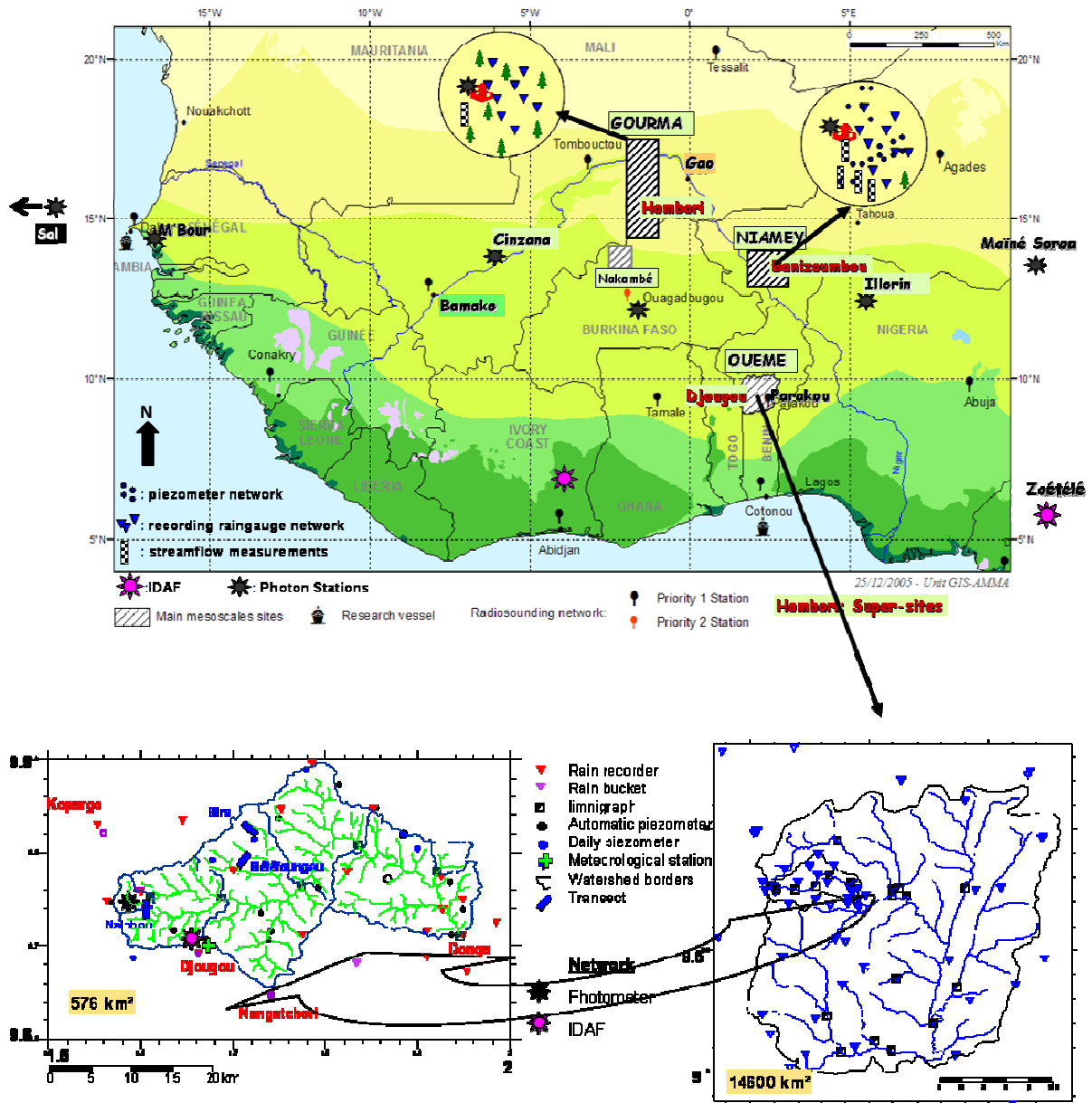


Figure 2-1 : Observations de long terme sur le continent

Remarque: Sur le continent, l'échelle régionale est prise en compte à la fois par les réseaux opérationnels et par des réseaux spécifiques. Les trois sites de méso-échelle (Gourma, Niamey, Ouémé) incluent des « super-sites » et des sites locaux intensifs. Cette stratégie est illustrée de manière détaillée ci-dessus sur le bassin de l'Ouémé.

La compréhension du cycle hydrologique continental et de ses interactions avec l'atmosphère est un volet important du programme. Le support de ces études est l'Observatoire

de Recherche en Environnement (ORE), ou « Service d'Observation » AMMA-CATCH, qui vise à maintenir sur le long terme, des observations hydro-météorologiques coordonnées sur les 3 sites du Bénin, Niger et Mali. Financé par le Ministère français de la recherche et par l'IRD avec la contribution de l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU-France), cet observatoire fonctionne sur le terrain grâce à un partenariat avec les services opérationnels des pays d'accueil, notamment les directions chargées de la météorologie et des ressources en eau.

L'année 2011 est la 15^{ème} année de fonctionnement de l'Observatoire Hydro-météorologique de la Haute Vallée de l'Ouémé (OHHVO), instrumenté dans le cadre du programme AMMA-CATCH depuis 1997.

2.1.2. Description du projet OUEME-2025

Au Bénin, le bassin de l'Ouémé représente à lui seul, environ 65% des eaux de surface et 60% des eaux souterraines. Il représente ainsi un bassin stratégique pour le développement du Bénin, et la mise en place concrète d'une GIRE à son échelle constitue une nécessité qui s'impose à tous. La GIRE requiert, comme base technique de sa fondation, le suivi scientifique et la connaissance de la ressource en eau, des besoins et des usages à l'échelle du bassin considéré, de leur évolution quantitative et qualitative prenant en compte les variabilités et changements globaux actuels du climat, de l'environnement et des sociétés. C'est au développement de cette base technique de la GIRE à l'échelle du bassin de l'Ouémé que s'est attelé le projet OUEME-2025 depuis son démarrage en juin 2007. Elle implique ainsi un suivi scientifique de la ressource et de son évolution dans un contexte de variabilité et changement climatique. Pour ce faire, il apparaît indispensable que les réseaux d'observation soient pertinemment densifiés, suivis et maintenus avec une qualité constante sur le plus long terme possible.

La haute vallée de l'Ouémé instrumentée progressivement depuis 1997 (ORE/SO AMMA-CATCH) fait l'objet d'un suivi renforcé des processus hydrologiques et des interactions surface-atmosphère. Ce réseau dense se situe en tête du bassin et en couvre près du 1/3 de la superficie, les 2/3 en aval restants (32400 km²) étant très peu suivis compte tenu des moyens nationaux limités. Cet état de choses a motivé la DG-Eau à initier en 2007, en collaboration avec l'Université d'Abomey-Calavi, le projet « OUEME-2025 » en partenariat avec d'autres équipes de recherche nationales et étrangères.

Au milieu des années 2000, le manque de moyens financiers explique en partie l'abandon de la plupart des stations nationales de suivi hydrologique et la qualité peu satisfaisante du réseau

hydrométrique sur les 2/3 en aval du bassin qui draine pourtant 65% des eaux de surface et 60% des eaux souterraines du pays ; et regorge de 65% de la population sur 42% du territoire national. Ce déficit de données freine la résolution d'un certain nombre de problèmes spécifiques de développement à l'échelle du Bénin en général, et du bassin en particulier.

L'objectif global du projet OUEME-2025 est l'analyse de la dynamique et de la disponibilité des ressources en eau du bassin de l'Ouémé à l'horizon 2025. Il vise le triple objectif suivant :

- i) Comprendre les processus hydrologiques à l'échelle du bassin de l'Ouémé dans un contexte de changement climatique,
- ii) Identifier la contribution opérationnelle de cette compréhension aux stratégies d'adaptation du socio-écosystème (systèmes d'approvisionnement en eau potable, politique d'aménagement du territoire, de développement rural, de développement économique...),
- iii) Former et renforcer les capacités des jeunes chercheurs de la sous-région à produire la science nécessaire pour répondre aux enjeux du développement, notamment dans le secteur de l'eau.

Le projet OUEME-2025 a réalisé l'ambition de renforcer les acquis du projet AMMA-CATCH, en réhabilitant et en complétant le réseau d'observations existant sur l'Ouémé Supérieur (OHHVO exclue) avec de nouveaux équipements de suivi des eaux continentales [5 limnigraphes et 2 piézomètres (OUEME-2025, 2008a)], et en améliorant le suivi des stations pour la collecte et le traitement des données. Sur l'OHHVO suffisamment densifié et en cours de suivi dans le cadre du programme AMMA-CATCH, OUEME-2025 a installé une nouvelle station de mesure de flux verticaux (acquisition Campbell, mesures météorologiques de bases, bilan radiatif CNR1, anémomètre sonore, LICOR 7500) en vue de compléter le dispositif d'acquisition de données de flux surface-atmosphère à une échelle plus fine.

L'importance des perspectives de la phase 1 du projet a justifié la formulation d'une phase 2 (cf. Annexe 2) afin de satisfaire le besoin de valorisation opérationnelle des données et résultats scientifiques déjà acquis. De plus, l'ensemble des travaux déjà réalisés a débouché sur un certain nombre de recommandations (OUEME-2025, 2008b) à l'endroit de plusieurs acteurs (des secteurs de l'eau, de la météorologie, de l'environnement, de l'agriculture, de l'élevage, de la santé publique et des communes) qu'il convient de diffuser, vulgariser et appliquer.

2.2. Projet de thèse

2.2.1 Problématique et justification de l'étude

Il a été présenté au Chapitre 1, le besoin pour le Bénin, d'arriver rapidement à une gestion durable des ressources en eau à l'échelle du territoire national. Cette gestion n'est possible que si on connaît de façon scientifiquement fondée, la dynamique et la disponibilité actuelle, récente et historique des ressources en eau à toute échelle de temps (du journalier, voire de l'horaire à l'interannuelle en passant par la saisonnière) et d'espace (du local au national, en privilégiant le niveau bassin) judicieusement choisie, et si on sait convenablement anticiper sur ce qu'elles seront à court, moyen et long terme avec une incertitude renseignée et raisonnable. C'est dire que, bien connaître ce bien naturel qu'est l'eau, est donc un préalable indispensable pour en assurer une gestion avertie.

Pour une ressource naturelle comme l'eau, régie donc par des lois de la nature souvent peu ou difficilement accessibles, arriver à une connaissance à la fois globale et détaillée, générale et pointue, relevant du passé, de l'actuel et du futur, est un défi pour tous, notamment les scientifiques pour lesquels, il n'y a pas d'autres stratégies que d'œuvrer pas à pas, étape par étape, adoptant une démarche tant ascendante que descendante.

Si la première étape d'une telle stratégie semble évidente et consiste à « observer » le phénomène –ici, la dynamique et la disponibilité de l'eau- pour en déduire les lois régissant son fonctionnement, l'étape suivante, dans la perspective d'anticiper son évolution future, réside dans sa modélisation au travers d'une approche simplificatrice ou non, à choisir selon le principe de parcimonie.

Les progrès en modélisation des systèmes hydrologiques sont étroitement liés à l'apparition de l'informatique et des ordinateurs. L'évolution des capacités de calcul à travers la disponibilité des ordinateurs et la mise au point des méthodes numériques qui leur sont associées, ont fait connaître à la modélisation hydrologique un essor considérable depuis les années 60 (Perrin C., 2000) et ont permis aux hydrologues d'effectuer des calculs répétitifs complexes portant sur de grandes quantités de données. La modélisation du débit des cours d'eau est devenue un élément important dans la planification et la gestion des approvisionnements en eau et des ouvrages régulateurs ainsi que dans la prestation de services hydrologiques de prévision et d'avertissement.

Par ailleurs, il a été signalé que le nombre élevé de paramètres libres, combiné au manque ou à l'insuffisance de données de mesures sur le terrain, rendent les prédictions des modèles hydrologiques incertaines (Afouda A. and Alamou E., 2009). De plus, la complexité de l'objet de modélisation (c'est-à-dire le milieu naturel) et des processus impliqués oblige à un certain degré d'imperfections dans un modèle aussi élaboré soit-il. Mais, bien qu'il soit admis que « modéliser le naturel » relève d'une entreprise complexe et harassante pour le modélisateur, il s'avère nécessaire et il n'y a d'ailleurs pas d'autres choix que de réussir à modéliser de façon convenable ou pertinente, le cycle hydrologique continental. Ce n'est qu'à partir de cet exercice de modélisation « bien réussi » qu'il sera possible d'élucider de façon fiable la dynamique et la disponibilité future de la ressource en eau, et d'atteindre ainsi ce préalable nécessaire à une gestion durable desdites ressources.

Mais qu'est-ce qui rend la modélisation aussi critique au point d'insister sur « un exercice réussi, convenable ou satisfaisant » ? En fait, la modélisation consiste à représenter de façon formelle, voire analytique, les processus du phénomène étudié ainsi que leurs inter-relations. Ainsi, si un processus quelconque, fut-il majeur ou prépondérant (ne serait-ce qu'au plan quantitatif) par rapport au phénomène étudié, est mal appréhendé par la formulation du modèle retenu, il va sans dire que la représentation de la « réalité naturelle » par le modèle ne pourrait en être qu'autant approximative ou complètement insatisfaisante.

C'est bien le cas que l'on rencontre souvent dans les modèles hydrologiques, où la composante majeure du cycle hydrologique qu'est l'évapotranspiration réelle est difficilement cernable ou du moins pas directement ; et il n'y a pas encore d'autres possibilités actuellement éprouvées que de l'approcher au travers d'une évapotranspiration dite potentielle, estimée théoriquement ou empiriquement à partir de mesures météorologiques de base.

Cela soulève la question de l'effort nécessaire à déployer pour appréhender de façon plus rigoureuse les échanges surface-atmosphère, en plus de la nécessité soulignée plus haut d'un effort de modélisation « réussi » pour aboutir en premier lieu, à une connaissance idoine des ressources en eau, et en dernier lieu à leur gestion durable.

C'est bien cet effort nécessaire qui est engagé par le programme international de recherche AMMA, dont les travaux portent sur la compréhension des processus de la mousson africaine et de ses impacts, notamment sur les ressources en eau. Dans ce cadre, un volet hydrologique (cf. Section 2.1.1 et Annexe 2) dédié à une analyse fine des processus hydrologiques continentaux est mis en place. Il doit déboucher sur l'élaboration de scénarios de disponibilité de ressources en eau à travers une approche qui combine modèle hydrologique (Topamma) et divers

scénariis climatiques. Cela nécessite de qualifier et de quantifier les différentes composantes du cycle hydrologique continental (eau souterraine, sub-surface, eaux de surface, évapotranspiration et pluviométrie). Ce qui permettra une connaissance approfondie de la dynamique et des mécanismes de renouvellement des eaux souterraines ou de surface. Cette connaissance constitue un enjeu important en termes de développement durable, puisque ces stocks sont essentiels pour la satisfaction des besoins en eau (AEP, industrie, agriculture/élevage, tourisme...) dont les objectifs sont précisés par les Objectifs de Développement du Millénaire (ODM) auxquels adhère le Bénin.

Ainsi, disposer d'un modèle performant de simulation du cycle de l'eau à des pas de temps et d'espace pertinents contribuera à la mise en place d'une gestion intégrée des ressources en eau. Cette gestion, si l'on ne s'en tient qu'à sa dimension technique, requiert que l'on s'attarde sur quelques aspects dont :

- la gestion courante qui vise, à partir de la connaissance disponible sur les ressources en eau dans le temps et l'espace, à envisager un schéma de mobilisation et d'allocation desdites ressources en adéquation avec les besoins identifiés et quantifiés ; et en tenant compte des principes de durabilité environnementale et d'efficacité économique notamment en ce qui concerne les activités de production ;
- la gestion des crises liées à l'eau qui vise à concevoir les dispositifs appropriés pour anticiper les situations de crise, notamment les inondations et les crues aux conséquences multiples ; à cet effet, la disponibilité de données climatiques satellitaires presque en temps réel constitue une opportunité pour les hydrologues de pouvoir anticiper certaines situations.

C'est dans le cadre de cette problématique, caractérisée par la nécessité d'une modélisation réussie du cycle hydrologique et le défi d'opérationnalisation d'une gestion intégrée des ressources en eau, que s'inscrit la présente thèse qui s'appuie sur 3 thématiques clés (cycle hydrologique continental, échanges surface-atmosphère, dynamique et gestion des ressources en eau) dont découle la formulation du sujet de thèse proposée ci-après.

2.2.2. Formulation du sujet et objectifs de la thèse

Cette thèse s'intitule : « Analyse et modélisation du cycle hydrologique continental pour la gestion intégrée des ressources en eau au Bénin : cas du bassin de l'Ouémé à Bétérou ».

Il s'agit en fait de modéliser le cycle hydrologique continental dont le fonctionnement a été préalablement étudié et adopté, et de conduire cette modélisation dans une perspective d'application opérationnelle du modèle pour les besoins de GIRE du bassin.

Ainsi, l'objectif général poursuivi dans cette thèse est d'approfondir et d'appliquer les connaissances sur la dynamique hydrologique et la disponibilité en eau pour la gestion intégrée des ressources en eau du bassin de l'Ouémé.

Cet objectif général peut être précisé en 4 objectifs scientifiques spécifiques détaillés ci-après :

- analyser le cycle hydrologique continental à l'échelle de l'Ouémé à Bétérou : qualifier/quantifier ses différentes composantes et analyser la variabilité spatio-temporelle des écoulements en réponse à la variabilité pluviométrique observée ;
- modéliser le cycle hydrologique du bassin de l'Ouémé à Bétérou : appliquer et valider le modèle hydrologique Topamma sur une période récente contrastée (présence d'années sèches et humides) d'au moins 10 ans sur laquelle on évaluera le bilan hydrologique, en prenant en compte les incertitudes connues sur les débits de référence dans l'évaluation globale des simulations et des performances du modèle ;
- proposer, à posteriori et si nécessaire, des améliorations relatives à la formalisation des processus : critiquer les faiblesses du modèle utilisé et diagnostiquer leurs liens avec les hypothèses de base considérées d'une part, et d'autre part, la formalisation des processus physiques, en vue de suggérer des améliorations possibles le cas échéant ;
- appliquer les résultats scientifiques obtenus pour la GIRE : valider et exploiter les scénarii de ressources produits par le modèle à l'horizon 2025 pour quelques applications opérationnelles en matière de GIRE, notamment pour la gestion technique de l'eau du bassin.

2.3. Méthodologie sommaire de l'étude

La méthodologie sommaire employée pour cette étude se décline en 3 points :

- A partir de l'analyse des données historiques (pluviométrie, météorologie, hydrométrie), des données récentes du SO AMMA-CATCH (pluviométrie, météorologie, limnimétrie, piézométrie) et des observations géochimiques (conductivité électrique, majeurs, traces, température, niveau), il s'agit de s'intéresser à l'origine des écoulements et de retenir les hypothèses de fonctionnement hydrologique du bassin.

- Ensuite, il s'agit d'intégrer ces hypothèses et observations avec incertitudes associées dans l'outil de modélisation choisi (Topamma), de diagnostiquer au travers des résultats obtenus les faiblesses du modèle utilisé afin de donner un feed-back pour une meilleure représentation du fonctionnement du bassin par le modèle (meilleure estimation des bilans d'eau).
- Enfin, il s'agit d'étudier la sensibilité du modèle aux types de champs de pluie utilisés (sol, radar, satellite) à des fins de prévision de crue et/ou d'estimation de ressource ; puis d'élaborer la disponibilité des ressources en eau à l'horizon 2025 avant d'en dégager des applications en matière de mobilisation et de gestion technique.

Remarque: Le modèle hydrologique Topamma a déjà été utilisé pour deux (2) autres études sur notre zone d'étude (Le Lay M, 2006, Métadier M, 2006). Sa capacité à représenter les processus hydrologiques dans leur ensemble a été jugé satisfaisante, et ce modèle est approprié pour simuler de façon acceptable les eaux de surface. Ce sont globalement ces raisons qui ont motivé son choix pour la présente étude dans la mesure où il paraît bien approprié pour le but visé ici. On trouvera plus loin (cf. Section 6.2 à la page 153) l'ensemble des critères de choix qui ont permis de le retenir.

Avant de poursuivre vers les méthodes utilisées et applications réalisées dans le cadre de cette thèse, il est utile de s'imprégner des réalités physiques et socio-économiques du milieu d'étude.

CHAPITRE 3: Contexte physique et socio-économique du bassin de l'Ouémé à Bétérou

Ce Chapitre présente dans une première section les éléments du milieu physique du bassin de l'Ouémé à Bétérou, à savoir situation géographique, relief et hydrographie, morphologie du bassin, régime climatique, géologie et hydrogéologie, pédologie, végétation et couverture du sol. Les éléments présentés nous serviront de base pour l'analyse des méthodes et résultats exposés dans la suite du document.

Le Chapitre 3 aborde dans sa deuxième section le milieu socio-économique du bassin à travers les points suivants : découpage administratif à l'échelle du bassin, démographie et données socio-culturelles, activités socio-économiques en général et accès à l'eau en particulier. Les informations présentées nous seront utiles dans le Chapitre 10 consacré à l'application de nos résultats de modélisation pour la GIRE à l'échelle du bassin.

3.1. Milieu Physique du bassin de l'Ouémé à Bétérou

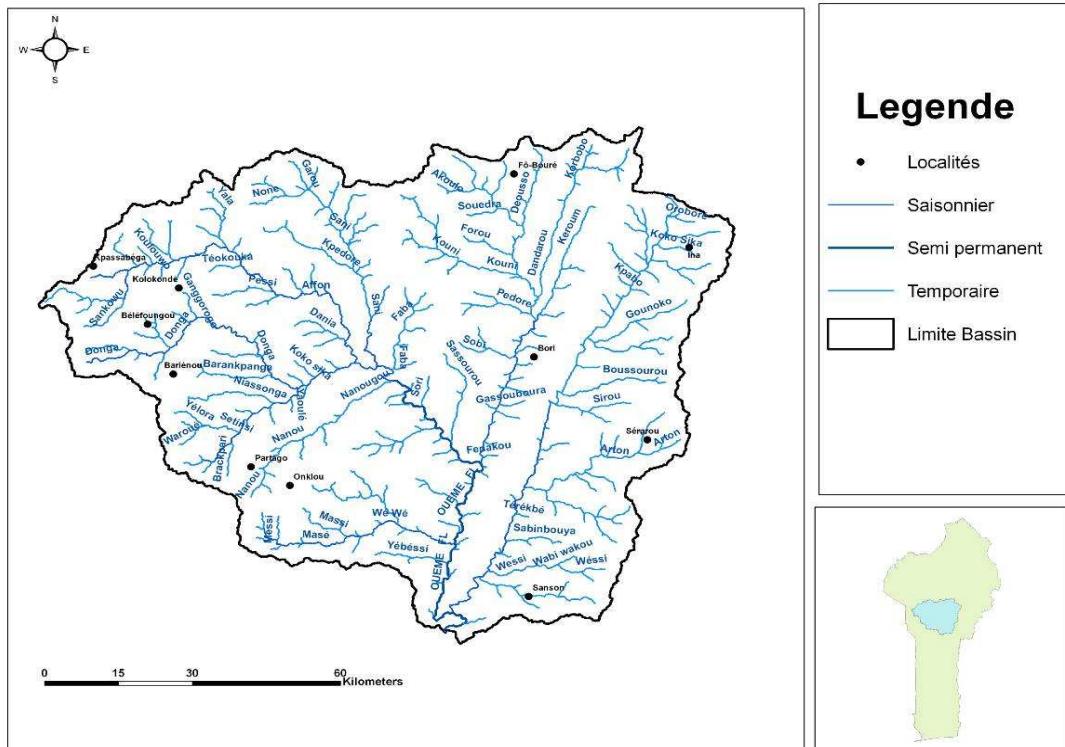


Figure 3-1: Contour du bassin de l'Ouémé à Bétérou et cours d'eau associés

L'Ouémé est le plus important fleuve du Bénin. Long de 510 km, il reçoit annuellement en moyenne entre 700 et 1.200 mm de hauteur de pluie selon que l'on est dans la zone de climat soudanien ou béninien (subéquatorial) (Adam K. S. and Boko M., 1993).

C'est un bassin à réseau hydrographique assez dense (*Figure 3- 1*) dont certains cours d'eau ont un régime d'écoulement saisonnier. Il est constitué d'importants sous-bassins dont les affluents sont la Donga, la Yérou-Marou, la Térrou, la Beffa, le Zou et l'Okpara (Le Barbé L. *et al.*, 1993). Son haut bassin est situé en zone soudanienne et couvre une superficie de 14.600 km² ; il est bordé au Nord-Ouest par le Massif de l'Atacora qui culmine à 650 mètres d'altitude et influence la pluviométrie de la zone.

3.1.1. Situation géographique

La station hydrométrique de l'Ouémé à Bétérou a été créée depuis le 29 mai 1952, aux coordonnées géographiques suivantes : latitude 09°11'56" Nord et longitude 02°16'00" Est, à une altitude de 272 mètres au niveau du pont sur la route nationale Parakou-Djougou (DG-Eau, 2008).

Le bassin de l'Ouémé à Bétérou (*Figure 3- 1*) est situé au nord du Bénin, à cheval entre 3 départements administratifs (Borgou, Donga et Atacora). Il est accessible par les deux principaux axes inter-états Nord-Ouest (Bassila-Djougou) et Nord-Est (Parakou-Malanville) en direction du nord à partir de Cotonou via Dassa sur environ 500 km. Le bassin est situé entre les parallèles 9°12' et 10°12' de latitude Nord, d'une part, et les méridiens 1°30' et 3° de longitude Est, d'autre part.

3.1.2. Relief et hydrographie

Depuis avril 2004, un modèle numérique de terrain (MNT) permet une couverture du bassin (*Figure 3- 2*). Il est issu des données SRTM⁷ (Shuttle Radar Topography Mission 2000) utilisant la méthode d'interférométrie radar avec une résolution spatiale de trois (3) secondes d'arc (environ 90 m) et une précision altimétrique de 10 à 16 m.

⁷ <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>

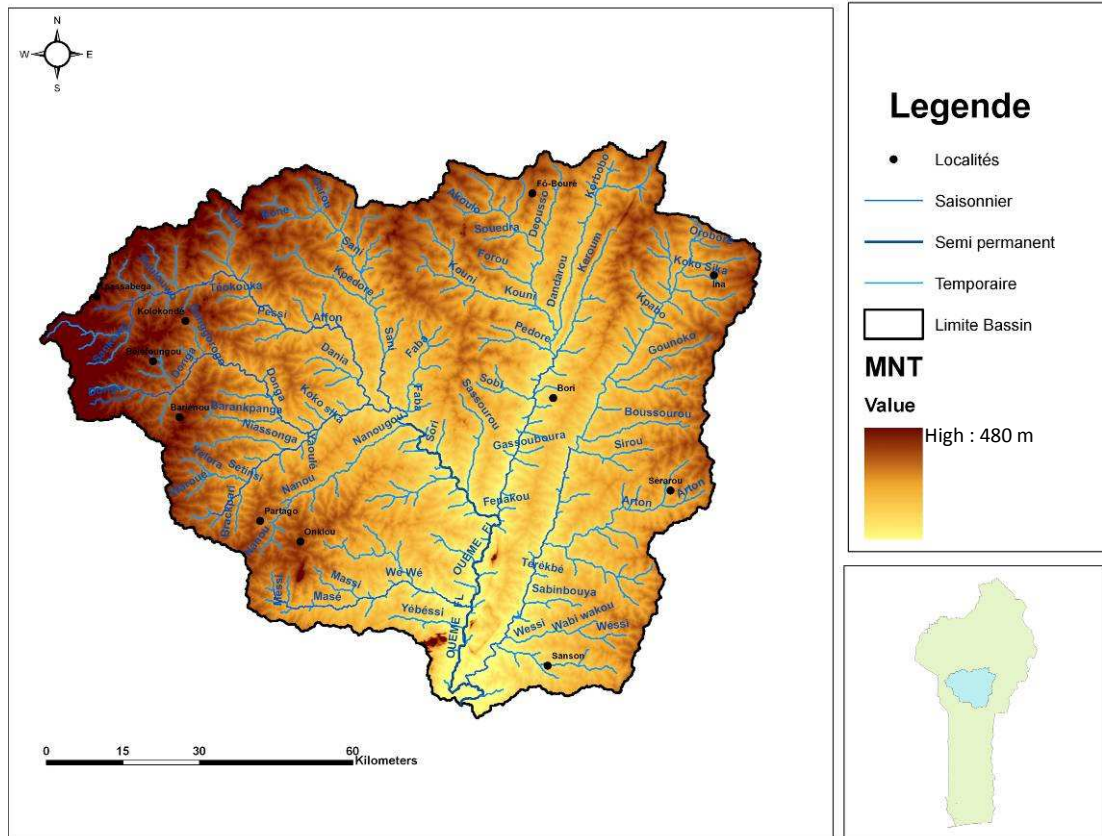


Figure 3- 2 : Topographie et réseau hydrographique du bassin versant de l'Ouémé à Bétérou

Le bassin de l'Ouémé à Bétérou présente un relief peu marqué, faiblement vallonné, avec des altitudes comprises entre 480 m à l'amont (Ouest) et 272 m à l'exutoire (Sud) pour une pente moyenne du cours d'eau de l'ordre de 1m/km et une superficie de 10.080 km².

L'Ouémé à Bétérou suit une direction d'écoulement du nord-ouest vers le sud-est. Situé en tête de bassin, ses pentes locales peuvent être très élevées et restent ensuite toujours relativement fortes (1 à 2 m/km). Sur le parcours amont où il porte le nom Affon et draine 4.320 km², l'Ouémé monte d'abord vers le nord sur environ 50 km, puis descend vers le sud-est sur 100 km à la confluence avec l'Alpouro. Son parcours aval entre cette confluence et la station hydrométrique de Bétérou est long de 45 km dans le sens nord-sud.

Le réseau hydrographique de l'Ouémé à Bétérou peut être décrit en 2 entités :

- le réseau rive gauche situé à l'est de l'axe nord-sud : les rivières suivent ici la direction nord-sud imposée par les formations du socle. D'amont en aval, on peut citer deux affluents : l'Alpouro long de 86 km pour une superficie drainée de 2.010 km² et le Yérou-Marou long de 120 km et drainant 2.590 km² ;
- le réseau rive droite situé vers l'Ouest composé des affluents suivants : la Donga (74 km et 1.285 km²) et la Wéwé (49 km et 617 km²).

Les rivières du bassin présentent un régime d'intermittence caractérisée par un assèchement en saison sèche et une reprise des écoulements en saison humide (*Figure 3-3*).



(a) : Saison sèche (février 2003)

(b) : Saison humide (juillet 2003)

Figure 3-3 : Intermittence des écoulements sur la rivière Donga (affluent de l'Ouémé à Bétérou) (Kamagaté B., 2006).

3.1.3. Caractéristiques morphologiques

L'étude morphologique a pour objectifs essentiels de déterminer les caractéristiques physiques du bassin versant qui sont :

- Sa superficie S et son périmètre P : soit respectivement $S=10.080 \text{ km}^2$ et $P=486 \text{ km}$.
- Les altitudes minimale Z_{\min} et maximale Z_{\max} : soit respectivement $Z_{\min} = 272 \text{ m}$ et $Z_{\max} = 480 \text{ m}$.
- La longueur du talweg le plus long L_T et la longueur totale de tous les talwegs L_{re} : elles valent respectivement $L_T = 197 \text{ km}$ et $L_{re} = 1.776 \text{ km}$
- L'indice de compacité de Graveluis ou indice de forme I_c : c'est le rapport du périmètre du bassin versant au périmètre du cercle de surface équivalente, il se calcule comme suit :

$$I_c = 0,28 \times \frac{P}{\sqrt{S}} \quad (\text{éq. 3- 1})$$

I_c est adimensionnel et toujours supérieur à 1. Il traduit la forme du bassin versant et permet aussi d'appréhender la forme de l'hydrogramme qui en résulterait (Zannou A. B., 2004):

- Si la forme du bassin versant est allongée, I_c sera important (proche de 1,5) et l'hydrogramme sera étalé ;
- Si la forme du bassin versant est ramassée (presqu'un cercle), I_c sera proche de

1 et l'hydrogramme sera pointu ou aigu.

Pour notre cas, $I_c = 1,37$; ce qui est compatible avec la forme intermédiaire, semblable à un triangle du bassin versant.

- La longueur L et la largeur l du rectangle équivalent : on assimile le bassin versant à un rectangle (de dimensions L et l) ayant le même indice de compacité et la même superficie (même répartition hypsométrique). C'est une transformation purement géométrique qui aboutit à la formule :

$$L = \sqrt{S} \times \frac{I_c}{1.128} \times \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{I_c} \right)^2} \right] \quad (\text{éq. 3- 2})$$

Pour notre cas $L = 189,93$ km et $l = 53,07$ km

- L'indice global de pente I_g : il est défini par le rapport

$$I_g = \frac{D}{L} \quad (\text{éq. 3- 3})$$

où D est la dénivelée, c'est-à-dire la différence entre les altitudes correspondant respectivement à 5% et à 95% de la superficie au-dessus d'elles (voir courbe hypsométrique à la *Figure 3- 4*) et L , la longueur du rectangle équivalent. Pour notre cas, on a : $I_g = 0,50$ m/km.

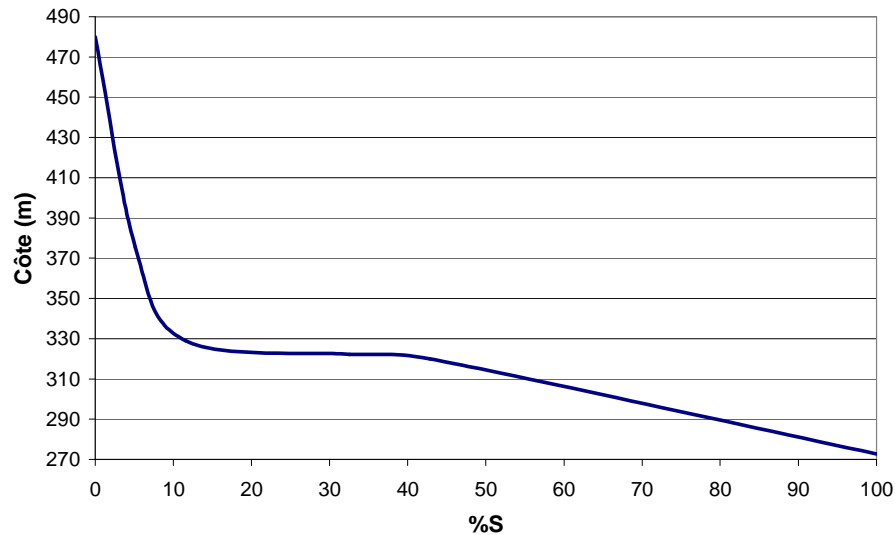


Figure 3- 4 : Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Ouémé à Bétérou

- La dénivelée spécifique D_s : elle est définie par la relation

$$D_s = I_g \times \sqrt{S} \quad (\text{éq. 3- 4})$$

où I_g est exprimé en m/km, S en km^2 et D_s en m. Elle permet de classer le relief du bassin versant comme suit :

Tableau 3- 1 : Classes de relief des bassins versants (Zannou A. B., 2004)

D_s (m)	<10	10-25	25-50	50-100	100-250	250-500	>500
Relief	Très faible	Faible	Assez faible	Modéré	Assez fort	Fort	Très fort

Pour notre cas, $D_s = 50,22$ m et donc nous avons un relief modéré (ou assez faible à modéré).

- La densité de drainage D_d : elle est définie par la relation

$$D_d = \frac{L_{re}}{S} \quad (\text{éq. 3- 5})$$

Pour notre cas, elle vaut $D_d = 0,12$ km/km^2 .

Les principales caractéristiques morphométriques du bassin versant de l'Ouémé à Bétérou sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 3- 2 : Caractéristiques morphométriques du bassin versant de l'Ouémé à Bétérou

Paramètre	Symbole	Unité	Valeur
Surface	S	km^2	10080
Périmètre	P	km	486
Longueur Talweg	L_T	km	197
Altitude min	H_{\min}	m	272
Altitude max	H_{\max}	m	480
Altitude moyenne	H_{mov}	m	315
Altitude médiane	$H_{\text{méd}}$	m	315
Altitude 5%	$H_{5\%}$	m	375
Altitude 95%	$H_{95\%}$	m	280
Indice de compacité	I_c	-	1,37
Indice global de pente	I_g	m/km	0,50
Indice de pente simplifié	I_s	-	1,10
Dénivelée	D	m	95,00
Dénivelée spécifique	D_s	m	50,22
Longueur équivalent	L	km	189,93
Largeur équivalent	l	km	53,07
Longueur réseau	L_{rc}	km	1176
Densité de drainage	D_d	km/km^2	0,12
Relief	assez faible à modéré		

3.1.4. Régime climatique

Comme pour l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest, le climat est régi par le déplacement du Front Inter Tropical (FIT), qui résulte de l'interaction de 2 masses d'air : l'air continental tropical, chaud et sec, venant du secteur Nord-Est à Est, appelé l'Harmattan ; et l'air équatorial maritime, humide et instable, originaire de l'anticyclone de Sainte-Hélène, appelé la Mousson. Le FIT se déplace sur un axe Nord-Sud au cours de l'année.

En été, la position du FIT est fortement écartée de l'équateur (maximum en août) et apporte beaucoup de pluie. En hiver, la position du FIT est proche de l'équateur, la saison sèche s'installe suite au retrait du FIT vers le Sud. L'alternance de la saison des pluies et de la saison sèche a une grande influence sur les autres éléments climatiques, tels que la température de l'air, l'humidité, les vents et l'évaporation.

Sur l'Ouémé à Bétérou, on distingue alors une saison sèche et une saison humide, dont les durées et le fonctionnement sont influencés par l'Harmattan qui est plus important vers le Nord. Le régime pluvieux y est caractérisé par une saison des pluies de 7 mois d'avril à octobre et une saison sèche de 5 mois, de novembre à mars.

La variabilité spatiale des paramètres climatiques est modérée sur un rayon de quelques dizaines de km (à l'exception de la pluviométrie). Ainsi, l'analyse des éléments du climat sur la zone d'étude a été faite à partir des données des stations synoptiques de l'ASECNA/DNM situées à Natitingou et Parakou qui disposent de données historiques depuis 1921. Toutefois, l'absence de données et le manque de chronologie dans certaines séries avant 1965, a contraint à ne considérer que la période 1965-2006 (Roko F., 2007). Les résultats de cette étude, notamment en ce qui concerne les paramètres climatiques les plus importants sont synthétisés ci-après.

Les températures minimums dans la zone d'étude varient de 12,5 à 30°C avec une moyenne journalière de l'ordre de 21,1°C. Quant aux températures maximums journalières, elles varient de 21 à 43°C avec une moyenne d'environ 33,1°C. Les variations diurnes peuvent dépasser 15°C en janvier et en février. A l'échelle interannuelle, on note une augmentation moyenne des températures minimum et maximum respectivement de 1,3°C et 1°C entre 1965 et 2006 sur la zone. On peut signaler que ces valeurs sont supérieures à la moyenne mondiale estimée à 0,74°C (GIEC, 2007) en 100 ans (1906-2005), avec une hausse de cette moyenne sur la décennie (1996-2005). Globalement, les tendances thermiques sont à la hausse d'une manière générale pour le Bénin (Azonsi F. and Dépraète C., 2001, Götzing J. and Bardossy A., 2006).

La durée de l'insolation journalière est inférieure à 12 heures. L'évolution saisonnière de l'insolation journalière sur la zone d'étude présente deux grandes phases à savoir : une 1^{ère} phase

de novembre à mars (saison sèche) avec des valeurs d'insolation élevées, supérieures à 8 heures et une 2^{ème} phase d'avril à octobre (saison pluvieuse) avec des valeurs d'insolation faibles à nulles.

L'évolution saisonnière de l'humidité relative minimum à Parakou et Natitingou, révèle le mouvement unimodal de la saison pluvieuse dans le septentrion. L'humidité minimum est très faible (inférieure à 40%) en saison sèche (novembre à décembre) et peut atteindre les 90% en saison pluvieuse. L'humidité maximum varie dans une fourchette de 15 à 100%, en restant au dessus de 95% en saison pluvieuse. A l'échelle interannuelle, on note une baisse de l'humidité relative maximum d'environ 6 à 7,4% sur la zone entre 1965 et 2006, l'humidité relative minimum n'ayant pas subit une modification sensible.

La vitesse moyenne journalière du vent dépasse rarement 6 m/s. La vitesse du vent est peu variable au cours de l'année ; toutefois, de septembre à novembre on observe une légère diminution de la vitesse du vent sur la zone d'étude. Entre les localités de Natitingou et Parakou, la vitesse du vent varie nettement et les valeurs de la vitesse moyenne du vent à Parakou (2,4 m/s) sont en général supérieures à celle de Natitingou (1,0 m/s). A l'échelle interannuelle, la vitesse moyenne du vent a augmenté de 5% entre 1965 et 2006 à Parakou, sans modification sensible à Natitingou.

En saison sèche, l'air est sec et la couverture nuageuse réduite, l'évapotranspiration de référence est forte, entre 2 et 8 mm/j avec une moyenne de 5 mm/j. Au cours de la saison pluvieuse, l'évapotranspiration diminue considérablement pour atteindre son niveau le plus bas (3 mm/j en moyenne) au moment où l'ennuagement et les hauteurs de pluie atteignent leurs maximums (*Figure 3- 5a*).

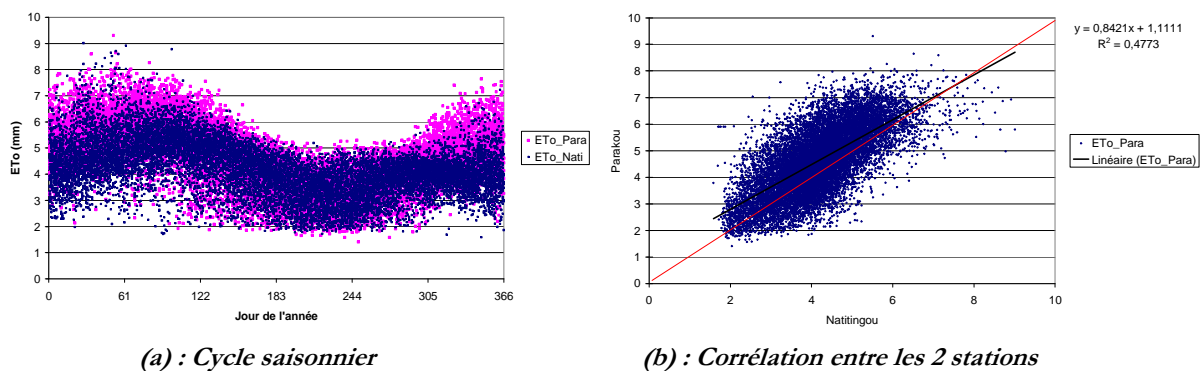


Figure 3- 5 : Evolution comparée de l'évapotranspiration de référence à Parakou et Natitingou (Roko F., 2007)

La corrélation de l'évapotranspiration de référence entre Parakou et Natitingou (*Figure 3- 5b*) est moyenne ($R^2=0,47$). Quoique les deux stations aient une évolution saisonnière comparable

(alternance de saison sèche et de saison des pluies), cette corrélation moyenne s'explique par le fait qu'à l'intérieur des saisons, l'évolution journalière est variable entre ces deux stations distantes de 170 km. Cette variation spatiale de la valeur journalière est due à celle des paramètres météorologiques qui entrent dans le calcul de l'ET₀, notamment l'insolation, l'humidité maximum et le vent qui sont les plus variables sur le plan spatial (Roko F., 2007). A l'échelle interannuelle, l'ET₀ a augmenté de 4,6% en moyenne à Parakou entre 1965 et 2006 sans modification sensible à Natitingou.

L'évolution de la pluviométrie journalière moyenne est illustrée sur la **Figure 3- 6**. Cette courbe révèle un régime quasi-unimodal, avec une grande saison pluvieuse qui dure 7 mois d'avril à octobre (95% de la pluie annuelle) et une saison sèche de novembre à mars. Les premières pluies significatives de la saison humide commencent plus tôt à Parakou et la moyenne annuelle est de l'ordre de 1.160 mm.

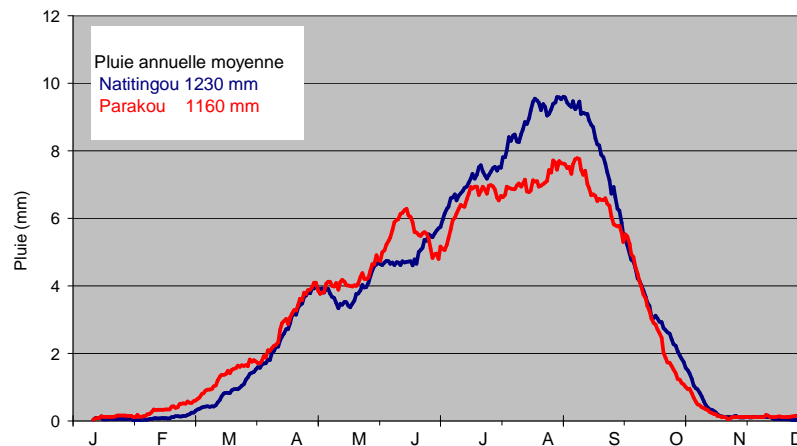


Figure 3- 6 : Evolution de la pluviométrie journalière moyenne à Parakou et Natitingou (Roko F., 2007)

La pluviométrie est plus élevée à Natitingou, située en limite du massif de l'Atacora, et la pluie moyenne annuelle se situe aux environs de 1.230 mm. Ces informations sont similaires sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou, où le régime pluviométrique enregistre une moyenne interannuelle de 1.200 mm sur la période 1952-1984 et se caractérise par la saison des pluies d'avril à octobre et la saison sèche de 5 mois.

3.1.5. Géologie et hydrogéologie

Les plus anciennes formations géologiques rencontrées au Bénin constituent l'étage Dahoméen du Précambrien (Le Barbé L. *et al.*, 1993). Ainsi, la structure géologique du bassin de

l'Ouémé à Bétérou est constituée par le précambrien qui comprend le Dahoméen, l'Atacorien, les granites, les intrusions basiques (*Figure 3- 7*).

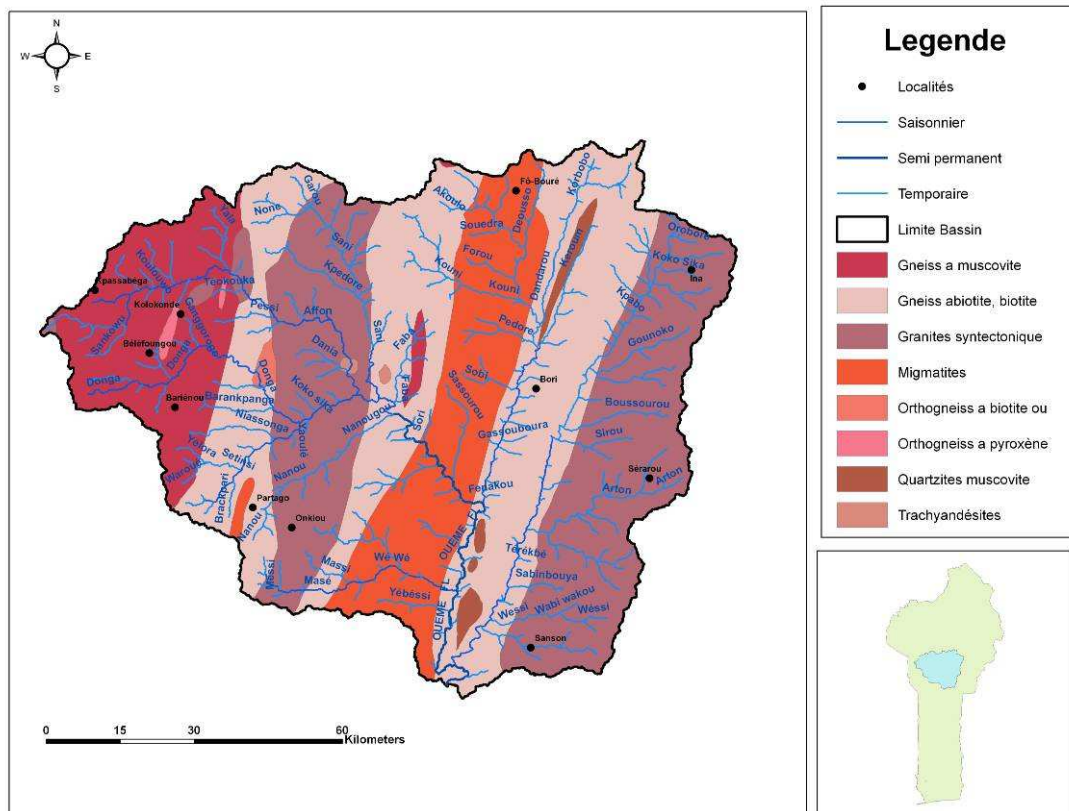


Figure 3- 7 : Carte géologique du bassin de l'Ouémé à Bétérou

Le bassin de l'Ouémé à Bétérou repose sur un socle fracturé constitué essentiellement de migmatites et de gneiss, dit socle Dahoméen (Faure P. and Volkoff B., 1998) à la différence de la partie basse du bassin de l'Ouémé, située sur des formations sédimentaires. Ce socle est le socle ancien de la zone qui a subi de nombreuses transformations métamorphiques depuis le précambrien.

Les formations hydrogéologiques du bassin supérieur de l'Ouémé sont constituées de deux types de nappes d'eau souterraine. Les premiers réservoirs supérieurs d'altérites se situent dans la zone d'altération sablo-argileuse avec une épaisseur généralement de l'ordre de 10 à 30 m. Leur perméabilité est très faible et généralement de l'ordre de 8.10^{-6} m/s (Avahounlin F. and Fassinou E., 2007). Les seconds réservoirs inférieurs de fissures et de fractures sont situés au dessus des roches saines et sont caractérisés par une zone intensément fissurée et altérée vers le haut avec des fissures et diaclases à pendage variable (Avahounlin F. and Fassinou E., 2007). Ceux-ci présentent une épaisseur estimée entre 40 m et 50 m dans les formations cristallines et métamorphiques.

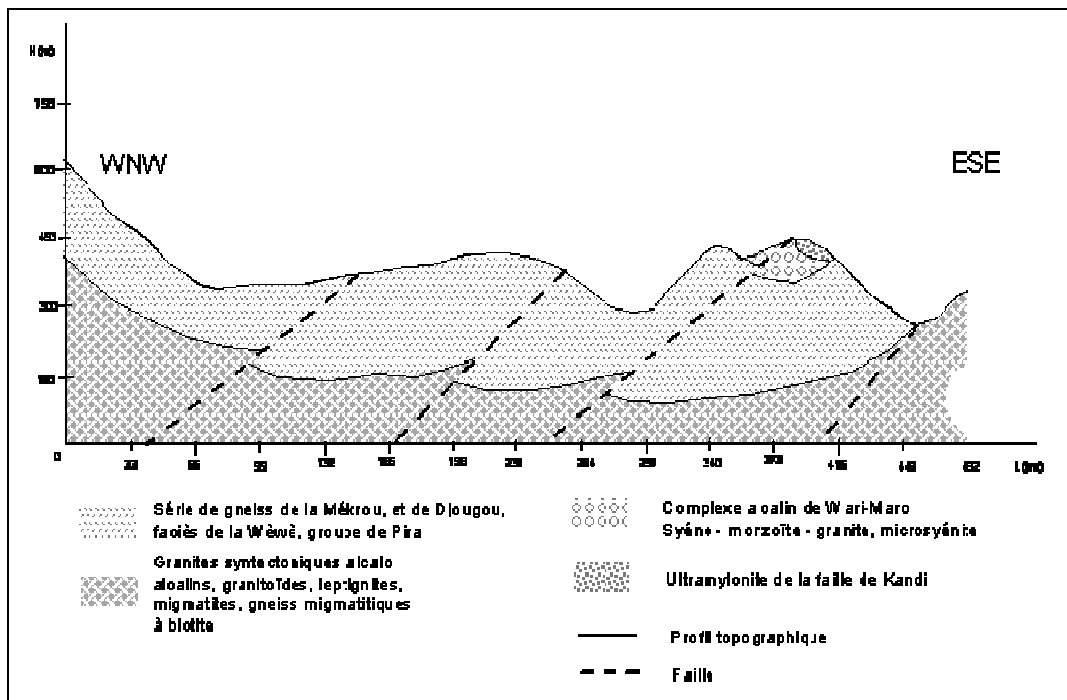


Figure 3- 8 : Coupe géologique du bassin de l'Ouémé à Bétérou (Avahounlin F., 2010)

Les différents réservoirs du bassin supérieur de l'Ouémé se caractérisent tous comme ceux des régions de socle du Bénin, par un comportement hydrogéologique proche. Les roches sont en effet très indurées et cohérentes. Lorsqu'elles ne sont pas physiquement remobilisées et désintégrées par le phénomène d'altération chimique, elles sont dépourvues de porosité d'interstice. Cependant, ces formations sont susceptibles de receler des réserves d'eau non négligeables, liées à un réseau de fractures ouvertes sur d'assez grandes profondeurs par suite des rejets tectoniques épisodiques, ainsi qu'aux divers types de joints et diaclases.

La zone d'étude se situe sur le socle cristallin qui ne renfermerait donc pas d'aquifère continu du fait de l'absence de porosité d'interstice. Ces roches sont quasiment imperméables si elles ne sont pas fissurées ou altérées. Mais suite à l'altération du substratum, un réservoir sus-jacent se développe et contient la nappe des altérites. L'étude des caractéristiques hydrogéologiques du réservoir d'altérite sur le bassin de la Donga (sous-bassin de l'Ouémé à Bétérou), du point de vue de son fonctionnement, concernant à la fois les conditions aux limites (épaisseur du réservoir, position par rapport au substratum et présence de rivières) et les paramètres hydrodynamiques (Zannou A. B., 2003) a révélé les constats suivants (Kamagaté B., 2006) :

- l'observation de coupes lithostratigraphiques montre que les profondeurs du réservoir d'altérite varient de 3 à 20 m, et que le manteau altéritique servant d'aquifère provient bien de l'altération de la roche mère et suggèrerait une connexion hydraulique entre le réservoir d'altérite et celui du socle sous-jacent ;
- sur un site piézométrique expérimental, des mesures géophysiques réalisées par tomographie électrique (Robain H. and Wubda M., 2004) indiquent la présence d'une couche superficielle de 1 à 2 m d'épaisseur, très hétérogène, correspondant à des alternances de matériaux meubles et indurés, d'une couche intermédiaire de 2 à 7 m d'épaisseur, correspondant au réservoir d'altérite (matériaux argileux d'altération à contenu en eau élevé), et d'une couche profonde représentant le substrat rocheux plus ou moins altéré ;
- avec un nivellement au GPS⁸ (Kamagaté B. *et al.*, 2003a), il résulte que le réseau hydrographique constituerait le drain potentiel des eaux souterraines, dans la mesure où la surface piézométrique apparaît plus ou moins parallèle à celle de la surface du sol, ce résultat est confirmé par la géophysique (Descloîtres M. *et al.*, 2003, Robain H. and Wubda M., 2004) ;
- des essais de pompage dans des puits villageois fournissent des conductivités hydrauliques (Ks) de l'ordre de 10^{-5} m/s, tandis que les valeurs de Ks déduites des transmissivités mesurées à partir d'essais de pompage lors de la réalisation de forages d'hydraulique villageoise dans la zone fissurée (entre l'altération et le socle sain) varient de $1,25 \cdot 10^{-4}$ à $9,50 \cdot 10^{-8}$ m/s. En outre, des mesures de Ks sur versant réalisées par la méthode du Slug-test (Cooper H.H. *et al.*, 1976) fournissent des valeurs allant de $3,1 \cdot 10^{-6}$ à $2,9 \cdot 10^{-7}$ m/s. Il en résulte qu'en moyenne, la gamme de Ks = 10^{-5} m/s peut être admise comme valable dans notre zone d'étude.

3.1.6. Pédologie

Le manteau pédologique résulte en général de l'action combinée de plusieurs facteurs tels que le climat, les formations végétales, la roche mère, l'altération, l'histoire géomorphologique et les actions anthropiques. C'est un facteur important pour l'hydrologie d'un bassin versant, dans la

⁸ GPS différentiel Trimble RTK 5700

mesure où il contrôle ou régule directement, à travers le processus d'infiltration, la composante du cycle hydrologique qui est responsable de la recharge en eau souterraine.

Au centre-ouest du Bénin, et plus particulièrement dans la zone d'étude, ce manteau est constitué de sols formés à partir des roches sédimentaires, du socle cristallin et des dépôts alluviaux (Faure P., 1977, Faure P. and Volkoff B., 1998). Le bassin de l'Ouémé à Bétérou présente une variété de sols regroupant trois grands ensembles que sont les sols minéraux bruts et peu évolués représentés par des cuirasses éparpillées dans le secteur, les sols sur quartzite du socle situé le long des collines et les sols à sesquioxyde de fer et de manganèse, sous-classe des sols ferrugineux tropicaux. On distingue deux principaux types de sol : les sols ferrallitiques et les sols ferrugineux régionaux tropicaux (Faure P., 1977) comme l'illustre la **Figure 3- 9**.

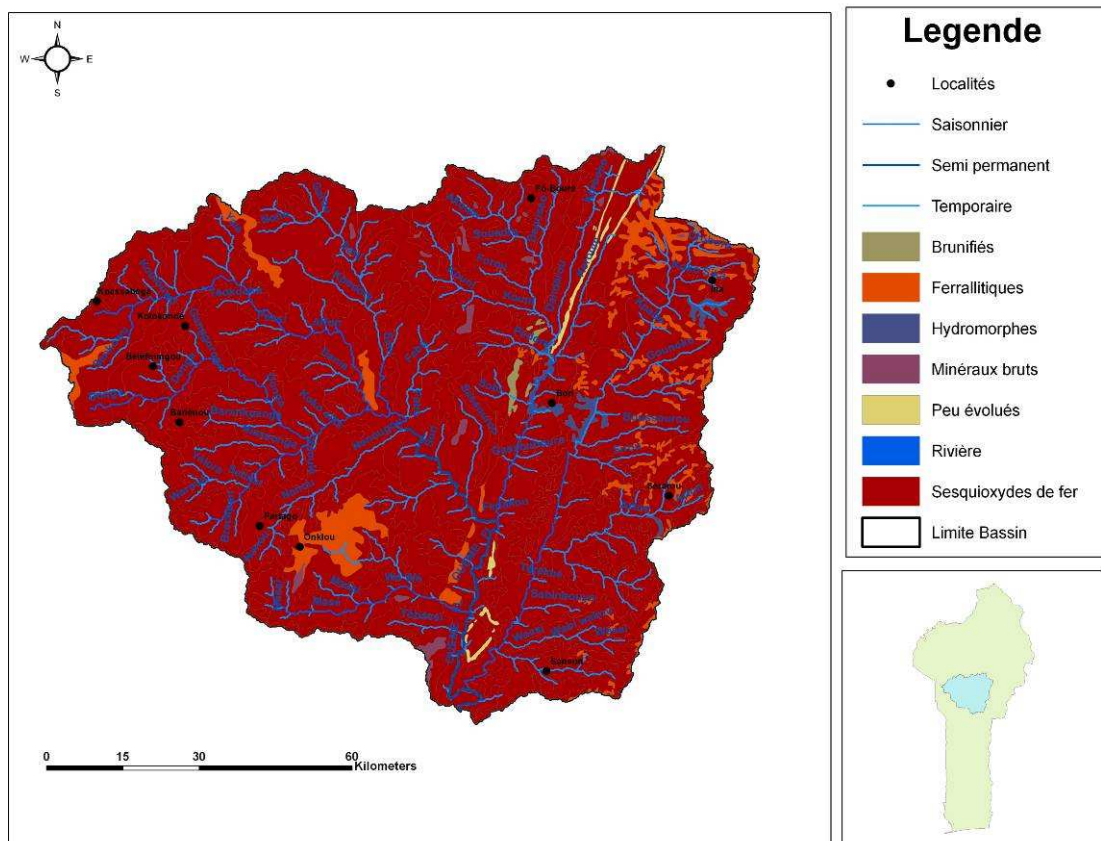


Figure 3- 9 : Carte pédologique du bassin de l'Ouémé à Bétérou

Les sols ferrallitiques sont des sols profonds, caractérisés par une altération complète des minéraux primaires de la roche et une élimination importante des bases aboutissant à la formation de minéraux kaolinitiques et des oxydes métalliques. Les sols ferrugineux régionaux tropicaux sont constitués de sols peu lessivés en argile (faible migration des colloïdes argileux et

forte migration des sesquioxydes), de sols hydromorphes (proches des sols peu lessivés, faible épaisseur, faible perméabilité) et de sols lessivés (lessivés en argile et en sesquioxydes) reposant sur un substratum de nature granito-gnéissique à muscovite et à deux micas (Faure P., 1977).

Quant à la structure verticale des sols, les études de reconnaissance pédologiques (Faure P., 1977) menées sur le bassin ont mis en évidence une structure conforme à celle observée sur l'ensemble de l'Afrique de l'ouest en zone soudanienne. Une couche de sol de surface de 1 à 3 mètres d'épaisseur surplombe une zone d'altérites de 10 à 20 mètres d'épaisseur formées par les arènes issues de la décomposition des roches du sol, qui repose elle-même sur un socle altéré, fracturé et fissuré dans sa partie supérieure et qui l'est de moins en moins en profondeur.

3.1.7. Végétation et couverture du sol

En matière de couverture végétale, le Bénin est découpé en 3 zones écologiques qui correspondent à des zones de pluviométrie contrastées suivant un gradient longitudinal : une zone littorale sèche (850-1300 mm de pluie), une zone continentale sèche (1000-1400 mm de pluie) et une zone continentale très sèche (pluie inférieure à 1000 mm). L'Ouémé à Bétérou se situe dans la zone continentale sèche. Sa végétation est caractérisée principalement par une savane boisée ou arborée avec présence de forêts classées, ainsi que des forêts-galeries le long des principales rivières (Zoumarou K. A. M., 1998).

La végétation joue un rôle important dans le cycle de l'eau, comme moteur des échanges d'eau du manteau pédologique vers l'atmosphère. Elle impacte ainsi la disponibilité d'eau dans le sol, et par conséquent l'ensemble des processus hydrologiques qui en dépendent. Aussi, la végétation, surtout lorsqu'elle est dense et s'étend sur de grandes superficies (forêt par exemple) freine les écoulements et favorise l'infiltration. Son influence sur le cycle hydrologique touche donc à la fois la transpiration, l'écoulement et l'infiltration.

En effet, plusieurs types d'occupation des sols ont été caractérisés dans la zone (Bigot S. *et al.*, 2005). A côté de la végétation typique qu'est la savane arborée, on trouve également d'autres états dégradés de la forêt claire naturelle : savane arbustive, jachère, cultures (**Figure 3- 10**). De même, les formations végétales rencontrées sur le haut bassin de la Donga forment un ensemble de végétation allant de la forêt claire (Béléfoungou) à la savane arborée (Nalohou, **Figure 3- 11**) et arbustive (Bira). Ces dernières sont dominées par des herbacées telles que *Andropogon fastigiatus*, *Brachiara ssp. haevelat*, *Pennisetum polystachion* et sont parsemées de quelques mégaphanérophytes conservés pour des vertus thérapeutiques et alimentaires dans les zones de culture permanente

tels que le néré (*Parkia biglobosa*), le karité (*Vitellaria paradoxe*), le baobab (*Adansonia digitata*). Les espèces herbacées peuvent être pérennes ou annuelles en fonction de la pluviométrie et de l'humidité, elles ont en effet un système racinaire dense en surface comme les cultures et sont donc capables d'extraire l'eau en surface, contrairement aux arbres qui peuvent à la fois grâce à leur système racinaire fasciculé et pivotant prélever simultanément l'eau des couches les plus profondes et celle des couches superficielles (Sounouvou E., 2007).

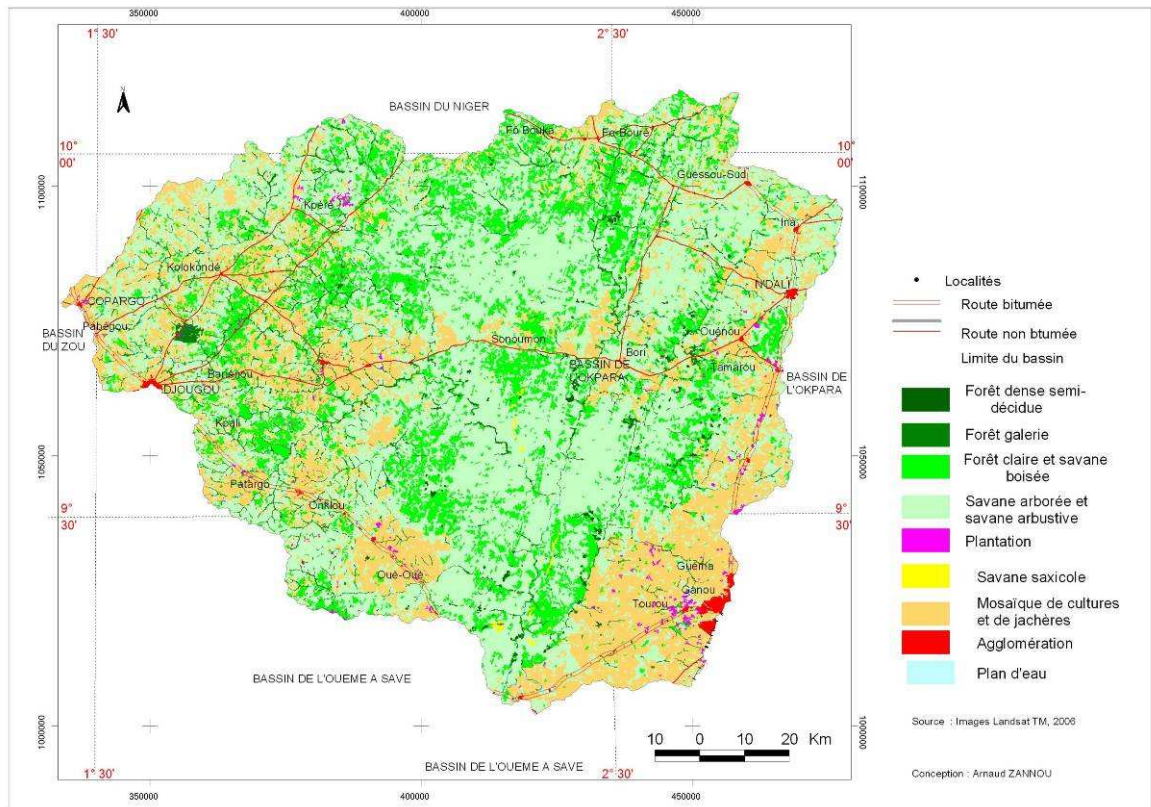


Figure 3- 10 : Végétation et couverture du sol du bassin de l'Ouémé à Bétérou en 2006



(a) : Culture



(b) : Savane arborée

Figure 3- 11 : Paysages de culture et de savane arborée au mois de janvier à Nalohou (Kamagaté B., 2006).

Actuellement, les couverts végétaux naturels sont en pleine évolution du fait de l'anthropisation agro-pastorale croissante de la zone (Judex M. *et al.*, 2009) : les forêts sont de plus en plus défrichées (par brûlis) au profit de culture de rente (coton et anacarde) ou vivrière (igname, manioc, maïs, sorgho, mil et riz).

Les sous-bassins de la haute vallée de l'Ouémé Supérieur les plus anthropisés se situent au nord-ouest (Donga et Affon) avec un pourcentage total de champs compris entre 30 et 45%, de savane arbustive et de jachère compris entre 20 et 25% puis de sol nu compris en général entre 2 et 10% (Atindogbé C., 2007). Les formations forestières sont en général inférieures à 40%. Le sous-bassin de la Donga à Ara (12 km²) est fortement anthropisé et diffère des premiers par ses forts pourcentages de savane arbustive et de jachère (40%) puis de sol nu (28,1%). On note 22% de champs et 9,7% de formations forestières. La forte anthropisation de ces sous-bassins conduit à un défrichement rapide des forêts par brûlis au profit des cultures de rente telle que le coton (Le Lay M., 2006). Or, les sols ferrugineux tropicaux présentent souvent des déficiences en phosphore (P), en potassium (K) et en azote (N) (ORE AMMA-CATCH, 2004) d'où la culture du coton exige un apport complémentaire sous forme d'engrais.

Les sous-bassins du sud-ouest et de l'est ont des formations forestières supérieures à 50%, des champs inférieurs à 20%, les savanes arbustives et jachères comprises entre 25 et 10%. Les sols nus sont inférieurs à 5%. Ces sous bassins sont donc moins anthropisés (Atindogbé C., 2007).

Il faut également remarquer la forte végétalisation des lits majeurs des rivières, à l'origine des forêts galeries, composées de végétations hydrophiles telles que le palmier raphia (*Raphia huqeri*), *Elaies guineensis*, *Berlinia grandiflora*, *Mimusop endogensis*, qui longent les cours d'eau à partir des zones drainées. Cette occupation des lits majeurs des rivières entraîne d'importantes incertitudes sur les mesures de débit en hautes eaux.

3.2. Milieu socio-économique du bassin de l'Ouémé à Bétérou

3.2.1. Découpage administratif

Le bassin de l'Ouémé à Bétérou est à cheval sur 3 départements administratifs et 10 communes comme l'illustrent le *Tableau 3-3* et la *Figure 3-12*:

Tableau 3- 3 : Départements et communes du bassin de l'Ouémé à Bétérou avec superficie concernée

Département	Superficie			Commune	Superficie		
	concernée (km ²)	% bassin	% département		concernée (km ²)	% bassin	% commune
Atacora	360	3,6%	1,8%	Kouandé	59	0,6%	1,8%
				Pehunco	301	3,0%	15,9%
Borgou	6346	63,0%	24,5%	Bembèrèkè	571	5,7%	17,1%
				N'Dali	3197	31,7%	85,3%
				Parakou	227	2,3%	51,5%
				Sinendé	737	7,3%	32,2%
				Tchaourou	1614	16,0%	22,2%
Donga	3370	33,4%	30,3%	Bassila	33	0,3%	0,6%
				Copargo	358	3,6%	40,9%
				Djougou	2979	29,6%	75,1%

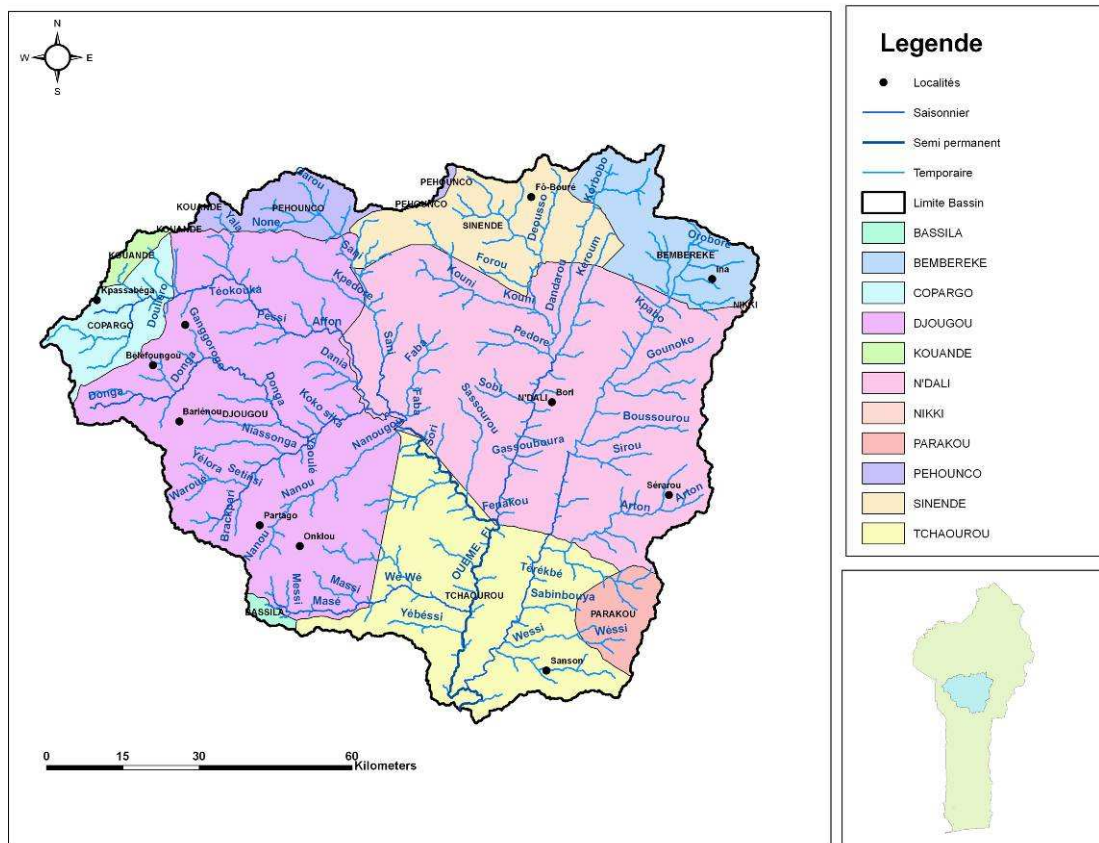


Figure 3- 12 : Limites des communes dans le bassin de l'Ouémé à Bétérou

3.2.2. Démographie et données socio-culturelles

La population totale des 10 communes du bassin est estimée à plus de 901.338 habitants⁹ (INSAE, 2003, Afrique Conseil, 2006b, c, a) en 2002 (soit 13,31% de la population nationale) dont 62,67% en milieu rural. Les projections de l'Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique (INSAE, 2003) prévoient un doublement de cette population d'ici 2025. Ce qui implique une pression anthropique de plus en plus croissante sur les ressources naturelles dont l'eau constitue l'élément primordial.

L'analyse des résultats du troisième Recensement Général de la Population et de l'Habitation (RGPH3) de février 2002 (INSAE, 2003) montre que, sur les 3 départements administratifs concernés par la zone d'étude, la population active est de 40% (contre 42% au niveau national). Il s'agit d'une population fortement jeune avec 50% d'enfants âgés de moins de 14 ans (contre 46% au niveau national). La population féminine représente 50 % de l'ensemble des habitants (contre 52% au niveau national). On enregistre un accroissement intercensitaire au niveau des 3 départements de 4,02% (contre 3,25% au niveau national) entre 1992 et 2002. Cette croissance démographique s'explique par le croît naturel mais aussi par une tendance à l'émigration de la population. En effet, deux flux affectent la zone et entretiennent le phénomène. D'abord, il y a des jeunes qui quittent la région pour diverses raisons (scolarisation, apprentissage, recherche d'emploi, etc.) pour les centres urbains comme Djougou centre, Parakou, Natitingou et Cotonou. Ensuite, il y a des jeunes filles qui partent pour les travaux domestiques et les garçons pour un mieux être dans les autres départements et à l'extérieur (Niger, Nigéria, Ghana, Allemagne, Italie).

Il s'agit d'une région caractérisée par la pauvreté, où l'indice de pauvreté humaine est de 59% dans la région contre 48% au niveau national. Plusieurs groupes socio-culturels cohabitent dans la zone d'étude. En majorité, on rencontre des Yom-Lokpa, des Dendi, des peuhls, des Ditamari et des Bariba. Dans la zone d'étude, l'islam est la religion la plus pratiquée ; ensuite viennent le christianisme, la religion traditionnelle et d'autres sectes.

3.2.3. Activités socio-économiques

⁹ Chiffre obtenu avec les données du RGPH 2002 (INSAE, 2003), sauf pour Kouandé, Péhunco et N'Dali, dont les effectifs de 2000 et 1992 (Afrique Conseil, 2006a, b, c) ont été projetées en 2002 avec le taux d'accroissement intercensitaire moyen (INSAE, 2003) des 3 Départements du bassin (4,02%).

L'agriculture demeure la principale activité dans le bassin de l'Ouémé à Bétérou. Elle occupe plus de 80 % de la population active. L'agriculture pratiquée dans cette région est de type traditionnel. Les techniques de production utilisées sont rudimentaires. La pression humaine sur les terres du fait de la croissance démographique entraîne une forte dégradation du milieu naturel et une perturbation des équilibres environnementaux. Les principales cultures sont : le maïs, l'igname, le coton, le manioc, le sorgho, l'arachide, le niébé et le riz.



(a) : Champ d'igname



(b) : Champ de coton

Figure 3- 13 : Cultures d'igname et de coton (Kamagaté B., 2006)

L'augmentation des superficies emblavées suite à l'afflux des migrants du sud et du nord du Bénin et ceux du Togo, entraîne l'augmentation de la pression humaine exercée sur les aires naturelles protégées de la région. Cette situation est favorisée par l'accès facile à la terre des ouvriers d'hier, devenus agriculteurs aujourd'hui. Depuis quelques années, les jachères sont transformées en plantation d'anacardier (Houinato M. R. B., 2001; Mulindabigwi V. and Janssens M.J.J., 2002; 2003).

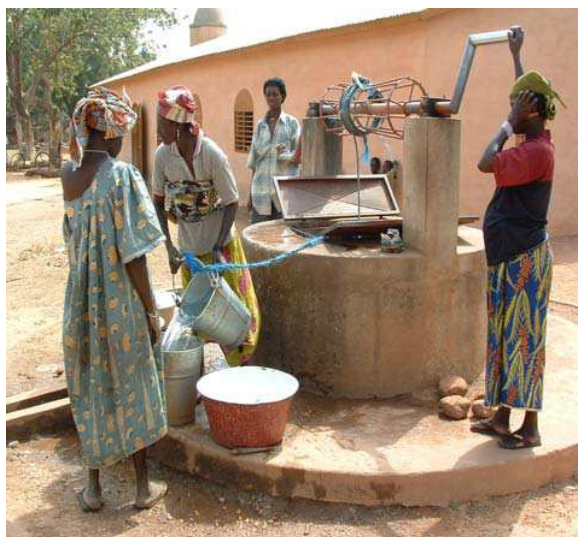
L'élevage est la deuxième activité économique après l'agriculture dans le secteur d'étude. Cet élevage est de type extensif et concerne surtout les bovins, les caprins, les ovins et les volailles. En effet, dans chaque ménage, les animaux domestiques tels que les volailles et les petits ruminants sont élevés. L'élevage des bovins est réservé aux Peulhs et concerne essentiellement des taurins et zébus. Les espèces *Somba* et *Borgou* sont les plus élevées par les agro-éleveurs et les transhumants nationaux (Houinato M. R. B., 2001, Mulindabigwi V. and Janssens M.J.J., 2003). La forte présence du bétail dans cette région est due à la proximité des aires protégées. La richesse de ces réserves en fourrage et en points d'eau en période difficile constitue un atout pour les éleveurs riverains et les transhumants transfrontaliers. Du point de vue écologique, cet élevage a un impact facilement appréciable sur le couvert végétal, notamment sur les arbres fourragers de

saison sèche que sont *Azelia africana*, *Khaya senegalensis* et *Pterocarpus erinaceus*, souvent étagés sans discernement.

3.2.4. Accès à l'eau

Les eaux souterraines constituent la principale source d'approvisionnement permanent en eau des populations de la zone. Une estimation par suivi de terrain des puisages quotidiens, effectuée en 2003 dans 4 villages représentatifs, indique une consommation domestique en eau de l'ordre de 21 l/hab/jour (Kamagaté B., 2006) ; cette valeur est proche de celle estimée pour l'ensemble de la haute vallée de l'Ouémé à 17 l/hab/jour (Hadjer K. *et al.*, 2005).

La ressource en eau est accessible de façon quasi permanente pour l'ensemble des communautés. La mobilisation des eaux souterraines reste donc vitale et le nombre impressionnant des ouvrages de captage (puits villageois et forages) atteste bien de leur importance socio-économique. Les puits et forages, en dehors de leur rôle quotidien sont particulièrement sollicités lors des grandes cérémonies notamment en période de fête (fête d'igname, fête de la chicote, fête du mil, tabaski, pâque), de mariage, de funérailles et même pendant les jours de marché. Ceci implique nécessairement une forte relation entre population et points d'eau. C'est l'exemple du village de Dendougou où le port des chaussures est strictement interdit dans les périmètres de protection définis autour des puits par les villageois eux-mêmes.



(a) : Puits de Monè



(b) : Forage de Kparsì

Figure 3- 14 : Exemple d'organisation des villageoises lors du puisage de l'eau (Kamagaté B., 2006).

Le puisage domestique reste une activité exclusivement réservée aux femmes. Celles-ci accomplissent cette tâche généralement trois fois par jour. Une organisation quasi-parfaite des parties de puisage, caractérisée par une discipline basée sur « l'ordre d'arrivée » appliquée par tous sous l'œil vigilant mais à distance des hommes est de règle (*Figure 3-14*). Le puisage est également favorable au développement de complicité entre femmes. C'est un lieu privilégié pour se faire des confidences qui portent généralement sur la vie de couple ou de celle de la concession voisine.

Des sources d'approvisionnement en eau de moindre importance sont également sollicitées. Ce sont notamment les eaux de rivière et marigots dont le rôle varie d'une localité à l'autre. Ces ressources, peu sollicitées pour la consommation domestique, sont souvent destinées à la lessive. Elles constituent également des lieux sacrés et d'adoration pour certaines communautés. C'est le cas du marigot *Al Hiron* dans la localité de Babayaka, qui, compte tenu de sa pérennité est un véritable lieu sacré qui serait protégé par des génies.

En 2002, 75,6% de la population des 3 départements administratifs concernés (Atacora, Donga, Borgou) utilise directement l'eau souterraine (puits protégé ou non, forages...) pour satisfaire leurs besoins (contre 84,6% au niveau national). Plus largement, une récente étude du Projet OUEME-2025 relative à la gestion socio-communautaire des ressources en eau sur un échantillon de 8 communes du nord au sud du bassin de l'Ouémé, signale que 89% des personnes interrogées font un usage domestique de l'eau des AEV (Gbaï I. *et al.*, 2011). L'eau des forages équipés de pompes hydrauliques à motricité humaine, des bornes-fontaine et des puits à grand diamètre sert de boisson aux habitants. Cette eau est aussi utilisée pour la lessive, la vaisselle et la douche. Seulement 11% des personnes interrogées utilisent cette eau pour développer de petites activités génératrices de revenus (lavage auto-moto, fabrication de glace et sucettes, élevage de la volaille et de petits rongeurs). En outre, en analysant les facteurs de conflits liés à l'accès à l'eau, la même étude signale que 71% des personnes interrogées ont un point d'eau dans un rayon de 1 km, 19% dans un rayon de 2 km et 10% dans un rayon de 3 à 4 km. On conclut donc que la distance ne constitue pas un facteur limitant pour 90% des usagers. Mais, ce fort taux d'accès est atténué par la disponibilité quantitative limitée de la ressource à ces points d'accès, dans la mesure où l'on note une réduction notable de la quantité disponible au cours de la saison sèche (Gbaï I. *et al.*, 2011). Seulement 19% des personnes interrogées estiment que le difficile accès à l'eau potable engendre des conflits, alors que ce chiffre est de 65% en ce qui concerne l'eau des retenues à but agricole. 56% estiment que les conflits dans le cas de l'eau des barrages hydro-agricoles opposent des éleveurs aux agriculteurs.

Aujourd'hui, le rythme d'exploitation de la ressource, conséquence d'un besoin de plus en plus accru, ne s'observe pas sans difficulté. En l'occurrence, l'eau extraite dans les zone centre et nord du bassin de l'Ouémé présente des dépassements de taux par rapport aux normes de qualité en vigueur (fluorures et nitrates notamment). Cette préoccupation est abordée dans le cadre d'une thèse de doctorat à l'Université d'Abomey-Calavi par Léonce DOVONON, Chef du Service de Qualité des Eaux à la Direction Générale de l'Eau (Dovonon L., 2011).

Ainsi, le recours aux eaux de surface se précise de plus en plus. Ces eaux superficielles proviennent essentiellement du haut bassin de l'Ouémé, d'où la nécessité d'approfondir les connaissances sur la ressource et sa variabilité au niveau de ce bassin.

Par exemple, pour les villes de Parakou, Djougou, Savè et Savalou, l'approvisionnement en eau potable à partir des eaux de surface n'est plus sécurisé dans la mesure où les besoins actuels dépassent la capacité des ouvrages de mobilisation (Assouma K., 2009, Assouma K. and Zannou A., 2011). Dans la perspective de solution régionale, une approche globale d'approvisionnement en eau potable de ces villes a été analysée et révèle que la disponibilité en eau sur l'Ouémé à Bétérou est largement suffisante pour couvrir les besoins de l'ensemble de la zone sur un rayon de 50 à 100 km sous réserve de l'efficience socio-économique (Assouma K. and Zannou A., 2011).

Cette approche globale préconisée sur la base d'une étude très sommaire mérite d'être étudiée plus profondément (cf. Chapitre 10) à travers des données et méthodes exposées dans les prochains Chapitres.

CONCLUSION

Le secteur de l'eau au Bénin est caractérisé par une réforme visant à instaurer l'approche GIRE. Dans ce cadre, après un diagnostic sectoriel et une évaluation des potentialités, les premiers instruments de la nouvelle approche se mettent progressivement en place : il s'agit de la Politique Nationale de l'Eau et de la Loi portant gestion de l'eau en République du Bénin. Le Plan d'Actions National (PAN-GIRE) est quant à lui en cours d'adoption par le Gouvernement. Ces éléments témoignent donc de la dynamique du secteur et militent en faveur de l'importance croissante de l'eau dans les préoccupations nationales.

Sur un autre plan, la GIRE requiert comme base technique de sa fondation, le suivi scientifique et la connaissance de la ressource en eau, des besoins et des usages à l'échelle du bassin considéré, de leur évolution quantitative et qualitative prenant en compte les variabilités et changements globaux (climatiques et anthropiques) actuels. La réussite de la GIRE n'est donc possible que si l'on connaît de façon scientifiquement fondée, la dynamique et la disponibilité actuelle, récente et historique des ressources en eau à toute échelle de temps et d'espace judicieusement choisie, et si on sait convenablement anticiper sur ce qu'elles seront à court, moyen et long terme avec une incertitude renseignée et raisonnable. Tout comme les projets internationaux OUEME-2025 et AMMA-CATCH qui intègrent cette question dans leurs préoccupations, la présente thèse voudrait s'insérer dans ce cadre en proposant une contribution scientifique à l'approfondissement des connaissances et à leur application pour la GIRE sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou. Aucune œuvre humaine n'étant parfaite, ce travail souffre sans doute d'insuffisances et en souffrirait davantage, si cette thèse était conduite avec de bonnes données/méthodes et en ignorance des réalités physiques et socio-économiques du milieu pour lequel elle propose des solutions à moyen et long terme. La première partie du présent document a donc permis de caractériser physiquement le bassin d'étude (réseau hydrographique, régime climatique, géologie, pédologie et végétation) et de décrire son milieu socio-économique (démographie, activités de production et accès à l'eau).

Cette première partie s'achève ici, et est suivie de la deuxième partie qui porte sur les données et méthodes utilisées pour atteindre les objectifs scientifiques fixés.

« Un travail opiniâtre vient à bout de tout... »

(Labor omnia vincit improbus)

INTRODUCTION

Les études en modélisation requièrent bon nombre de données traitées avec des méthodes judicieusement choisies et permettent d'accéder à un niveau de connaissance donné. Mais, quel que soit le besoin scientifique à satisfaire avec ces données et méthodes, il est toujours important de documenter préalablement les connaissances pré-existantes par rapport au sujet ou à la zone d'étude à travers la littérature disponible. Ainsi, la deuxième partie de ce document intitulée « MATÉRIELS ET MÉTHODES » est développée en quatre (4) chapitres.

D'abord, le Chapitre 4 présente une synthèse bibliographique. Nous y rappelons les principaux résultats scientifiques antérieurs disponibles sur notre zone d'étude et relatifs à l'analyse des données observées, à l'étude et à la modélisation du cycle hydrologique, et à l'impact de la dynamique des états de surface sur les ressources en eau. Quelques notes relatives à des définitions de termes hydrologiques particuliers y sont également insérées.

Ensuite, le Chapitre 5 présente les données utilisées (pluviométrie, évapotranspiration, écoulement, piézométrie et géochimie) ainsi que l'Observatoire Hydrométéorologique de la Haute Vallée de l'Ouémé (OHHVO) qui sert de cadre opérationnel à leur collecte.

Puis, dans le Chapitre 6, nous proposons une description théorique simplifiée du modèle hydrologique choisi (Topamma) pour notre étude, ainsi que les critères qui nous ont conduit à son choix.

En fin de deuxième partie, le Chapitre 7 détaille la démarche méthodologique de modélisation (calage/validation). Il précise également le mode de calcul du bilan hydrologique et d'évaluation de la reproduction de la variabilité hydro-pluviométrique.

CHAPITRE 4 : Synthèse bibliographique

Sans avoir la prétention d'être exhaustif, il est indispensable de faire une synthèse des travaux précédents, en particulier ceux dont les méthodes et/ou résultats nous ont inspirés. Le choix de ces travaux a évidemment tenu compte de la zone d'étude et de la problématique abordée de cette étude. Ainsi, dans le présent Chapitre, l'essentiel de la bibliographie se rapportant directement à la connaissance des ressources en eau sur la haute vallée de l'Ouémé (OHHVO) est synthétisée en 3 volets retenus comme suit :

- Analyse des données observées : il est question de s'intéresser aux études relatives à la variabilité spatio-temporelle des paramètres hydrométéorologiques observées, à la caractérisation hydro-pluviométrique et aux analyses pluie-débit à l'échelle du bassin ;
- Etude et modélisation du cycle hydrologique : il est question de rappeler les principaux résultats et méthodes des études antérieures, relatives aux processus physiques du fonctionnement hydrologique de la zone d'étude, à la modélisation/simulation du cycle hydrologique et au calcul du bilan hydrologique.
- Dynamique des états de surface et impact sur les ressources en eau : on rappelle les généralités relatives au lien entre ressources en eau et états de surface avant de s'apesantir sur les résultats d'études réalisées sur la haute vallée de l'Ouémé par certains auteurs.

4.1. Analyse des données observées

4.1.1. Variabilité spatio-temporelle des paramètres hydrométéorologiques

Plusieurs études antérieures (Nicholson S. E., 1981, Hubert P. *et al.*, 1989, Vissin E. W., 2001, Le Barbé L. *et al.*, 2002, Ndong J. B., 2003, Le Lay M. and Galle S., 2005, Kamagaté B., 2006, Lawin E. A., 2007, Roko F., 2007, Vissin E. W., 2007) ont montré au moyen de différents tests statistiques (Pettitt, Spermann, Mann-Kendall) sur les indices pluviométriques calculés sur la chronique des données historiques en Afrique de l'Ouest, l'existence d'une rupture pluviométrique autour de l'année 1970 (cf. *Figure 4-1* et *Figure 4-2*).

Cette rupture est confirmée dans les séries pluviométriques de la station synoptique de Natitingou, contrairement à Parakou où elle n'est pas détectée (Roko F., 2007). Néanmoins, la tendance est à la baisse sur les deux stations et la comparaison de la moyenne de 1960-1969 à

celle de 1970-1990 (*Figure 4-3*) montre que les hauteurs de pluie ont considérablement baissé après 1970 notamment à Natitingou (-24%) et à Parakou (-13%).

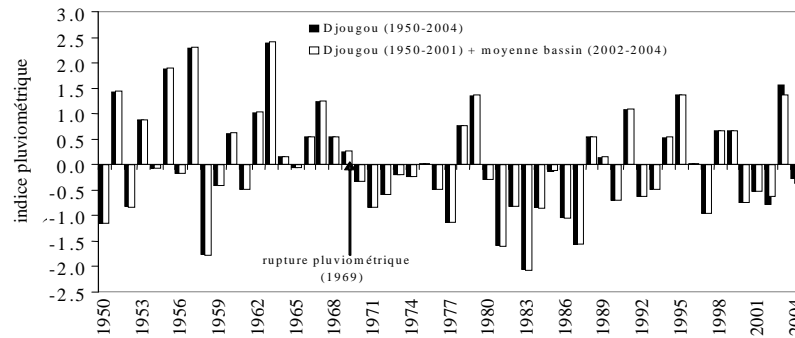


Figure 4-1 : Indices pluviométriques de 1950 à 2004 sur le bassin de la Donga (Kamagaté B., 2006)

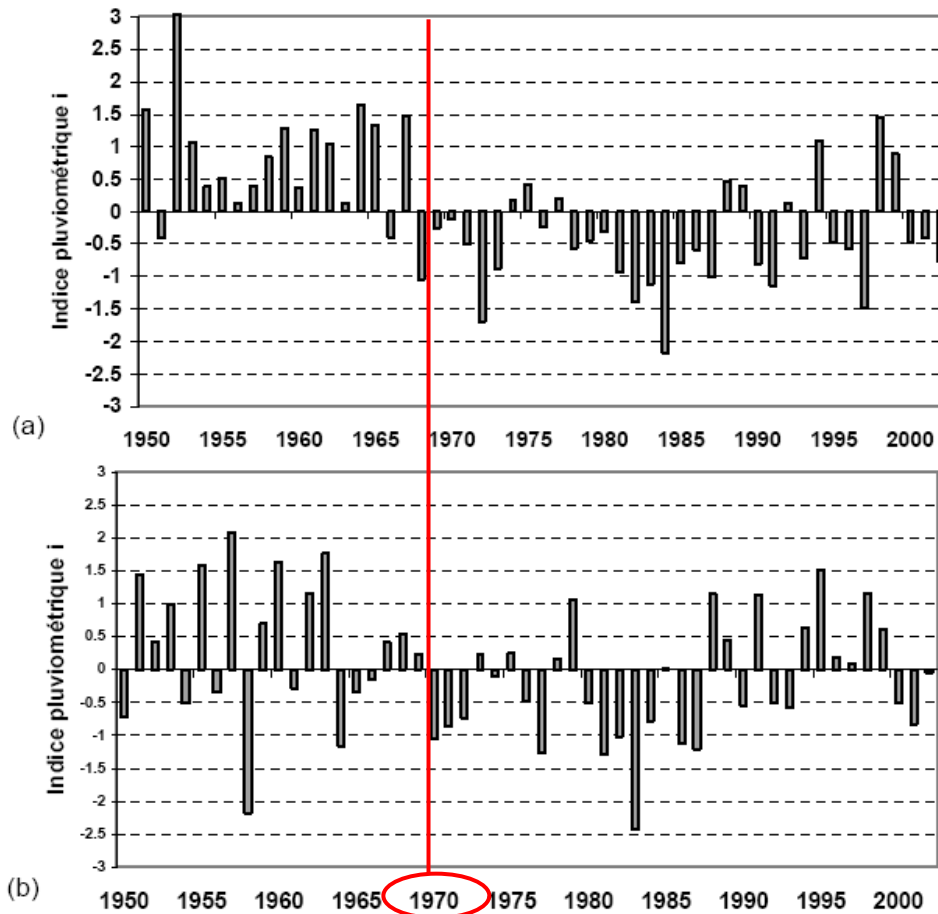


Figure 4-2 : Indices pluviométriques de 1950 à 2002 sur le Degré carré à Niamey (a) et sur l'OHHVO (b) (Le Lay M. and Galle S., 2005)

Ces résultats montrent la baisse pluviométrique des années récentes sur notre zone d'étude, et s'accorde avec les conclusions du Groupe d'experts International sur l'Evolution du

Climat (GIEC, 2007) «... il est très probable que les précipitations augmenteraient aux hautes latitudes et probablement diminueraient dans les régions subtropicales. Le modèle de ce changement est similaire à ce qui a été observé durant le 20^e siècle».

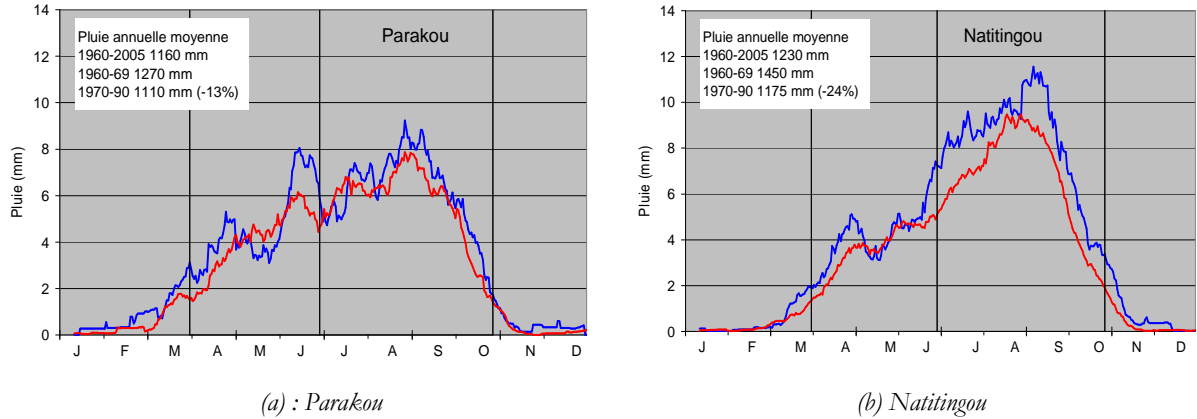


Figure 4- 3 : Cycle saisonnier de la pluie sur les années 60-69 (en bleue) et 70-90 (en rouge) (Roko F., 2007)

A partir de 1969-1970, date à laquelle on observe une rupture remarquable de la pluviométrie, on constate également une augmentation de l'insolation durant la saison des pluies et une baisse en saison sèche sur la zone d'étude (Roko F., 2007). Selon la même source, l'augmentation de l'insolation en saison des pluies serait liée à la diminution du nombre de systèmes précipitants observée dans cette région, et la diminution de l'insolation en saison sèche à une augmentation des aérosols dans l'air. Les autres variables suivent aussi une évolution régulière : le vent a connu une constante augmentation à Parakou sur toutes les saisons, et une baisse à Natitingou en saison sèche. L'augmentation des températures maximum et minimum de l'air a dépassé le degré Celsius en 42 ans. Les données d'humidité relative de l'air ont baissé, en l'occurrence l'humidité relative maximum. Cette évolution des variables climatiques provoque une influence certaine sur l'évapotranspiration de référence, si bien qu'il est admis que la région à laquelle appartient le bassin de l'Ouémé, a un taux d'évapotranspiration de forte variabilité temporelle et spatiale (Kounouhewa B. *et al.*, 2007, Guyot A., 2010). L'évapotranspiration reste très sensible à la variation du vent, de l'insolation et de la température maximum, et en 42 ans (1965-2006), les valeurs annuelles de l'évapotranspiration de référence ont augmenté de 4,6% à la station synoptique de Parakou (Roko F., 2007).

De façon générale, les tendances sont à la hausse ; et dans l'hypothèse où aucun phénomène ne venait modifier l'état actuel des choses (c'est-à-dire si l'évolution des variables climatiques reste la même), le retour d'eau vers l'atmosphère va augmenter dans le futur. Ce qui préconise une baisse de la disponibilité des ressources en eau sur le haut bassin de l'Ouémé. Face

à cette situation, tout devrait être mis en œuvre pour atteindre une gestion optimale de l'eau disponible sur le haut bassin de l'Ouémé.

4.1.2. Caractérisation hydro-pluviométrique et analyse pluie-débit

4.1.2.1 Variabilité hydro-pluviométrique et coefficient d'écoulement

La variabilité spatiale des écoulements sur 3 sous-bassins de l'Ouémé [le Zou à Atchérigbé (6.950 km²), l'Ouémé à Savè (23.600 km²) et l'Ouémé à Bétérou (10.080 km²), situés respectivement au sud, au centre et au nord du bassin (le bassin à Savè emboîte celui à Bétérou)] a été analysée (Zannou A. *et al.*, 2009b). L'année 2007 comparée à la moyenne de la période historique humide 1952-1968 se révèle au plan hydrologique excédentaire au sud, alors qu'elle est déficitaire au nord du même bassin. Ce résultat témoigne de la très forte variabilité spatiale qui existe, et les modèles hydrologiques adoptés doivent être capables de reproduire cette variabilité à grande échelle. En outre, la variabilité temporelle des écoulements à travers les débits journaliers aux stations hydrométriques Atchérigbé, Savè et Bétérou a été analysée (Zannou A. *et al.*, 2009). En comparant les années 2007 et 2008, on observe que la dynamique est très différente d'une année à l'autre même si chaque année paraît suffisamment déconnectée des autres années au plan hydrologique. Cette forte variabilité temporelle est confirmée que l'on situe au sud, au centre ou au nord du bassin, et ne paraît pas liée à la variabilité spatiale ci-dessus mise en évidence. Les modèles hydrologiques doivent donc être capables de reproduire toute la variabilité hydrologique observée, tant à l'échelle temporelle qu'à l'échelle spatiale, variabilité hydrologique elle-même liée évidemment à celle du climat (mousson).

En Afrique de l'Ouest sous régime de mousson, la sécheresse sévère en cours depuis le début des années 70 et caractérisée par une diminution de l'ordre de 20% à 30% de la pluviométrie (L'Hôte Y. *et al.*, 2002, Lebel T. and Vischel T., 2005) a engendré une diminution encore plus importante des débits (Mahé G. and Olivry J.C., 1999). Cette sécheresse a parfois provoqué le tarissement des rivières. De nombreux cours d'eau comme le Niger ont accusé une baisse importante de leurs écoulements. Au centre du Bénin, dans le bassin de l'Ouémé, le déficit des écoulements de l'ordre de 40% correspond à une diminution de la pluviométrie de 15 à 20% (Lebel T. and Vischel T., 2005). Une étude sur les données hydro-pluviométriques du bassin de l'Ouémé Supérieur jusqu'à l'exutoire de Bonou de 1951 à 1990, séparées en une période humide (1951-1970) et une période sèche (1971-1990), montre que la baisse moyenne des précipitations de 11,63% a entraîné une baisse moyenne des écoulements de 46,82% (Agbidinokoun A. S. and

Gbaguidi F., 2007). Dans le même sens, les déficits pluviométriques sont amplifiés par le système hydrologique et cette amplification peut atteindre le double (Lawin E. A. *et al.*, 2009).

Cette relation non linéaire entre pluviométrie et écoulement, ainsi que sa variabilité spatio-temporelle, est encore mal comprise à l'échelle régionale voire locale ; les principales études ont, jusqu'à présent, été menées à partir des données hydrologiques acquises sur de grands bassins versants (de l'ordre de 10.000 à 100.000 km²) par des approches indirectes ou conceptuelles du type tests statistiques, calculs de coefficients de tarissement, etc... (Mahé G. and Olivry J.C., 1999, Mahé G. *et al.*, 2000). Le lien entre précipitation et écoulement a été analysé sur l'OHHVO en utilisant le coefficient d'écoulement. Ce coefficient observe une croissance monotone non linéaire (allure parabolique) en fonction de la lame précipitée, de même que l'incertitude sur ce coefficient (Zannou A. B., 2006). Le coefficient d'écoulement a augmenté de 40% entre 2002 et 2003 sur l'Ouémé à Bétérou, suite à une hausse concomitante des précipitations de 13% et des écoulements 58% (Zannou A. *et al.*, 2009b). Le lien établi entre lame précipitée et lame écoulée pour la période récente 1998-2005 (Zannou A. B., 2006), n'est pas différente de ce qui a été établi pour la période historique 1952-2000 (Le Lay M., 2006) en ce qui concerne les années à pluviométrie intermédiaire ; mais par contre, pour les années exceptionnellement pluvieuses, on note des écoulements plus abondants en période récente qu'en période historique, ce qui pose le problème de l'influence de la dynamique des états de surface sur les écoulements.

On observe aussi que le coefficient d'écoulement est faiblement lié à la superficie (Métadier M., 2006, Zannou A. B., 2006) des sous-bassins ; ce qui indique clairement que l'écoulement est plutôt dépendant des autres paramètres de l'environnement (pluie, nature et occupation des sols, topographie, activité humaine...). Même dans un bassin de zone humide, assez plat comme celui de la Sô, situé dans le Bas-Ouémé, on observe une corrélation assez forte ($R^2=70\%$) entre pluie annuelle et écoulement (Vodounou J-B., 2010).

4.1.2.2 Date de démarrage de la saison

Les premières pluies et le début des écoulements sont décalés d'environ 150 à 200 jours (soit 5 à 7 mois) et la pluie cumulée au-delà de laquelle les écoulements naissent est de l'ordre de 300 mm quelles que soient les années (Peugeot C. *et al.*, 2005, Zannou A. B., 2006). Il y a donc un vide laissé probablement par l'évapotranspiration (vidange des réservoirs du sol) lors de la saison sèche qui doit être comblé avant le démarrage des écoulements. Ceci témoigne de l'importance de l'évapotranspiration dans les échanges d'eau entre le continent et l'atmosphère. Il peut également y avoir des stockages en surface en début de saison (bas-fonds par exemple) et l'écoulement ne

démarré que lorsqu'ils sont pleins et débordent. Ces résultats sont confirmés sur le bassin de la Donga (*Tableau 4- 1*) sauf que le décalage est plus court et de l'ordre de 70 à 100 jours sur un bassin 20 fois plus petit, mais le cumul pluviométrique n'est apparemment pas le seul facteur qui provoque l'apparition des écoulements, puisqu'il diffère notablement suivant les années (Métadier M., 2006). Une notion temporelle, comme l'occurrence des événements pluvieux d'intensité déterminée doit probablement être prise en compte pour mieux expliquer le retard des écoulements par rapport à la saison pluvieuse.

Tableau 4- 1 : Décalage entre saison des pluies et écoulements sur le bassin de la Donga pour la période 2002-2004 (Métadier M., 2006)

Année	Début de la saison des pluies	Début des écoulements	Décalage (jours)	Lame précipitée (mm)
2002	30-mars	03-juil	95	310
2003	24-mars	01-juin	69	250
2004	01-avr	12-juin	72	280

Sur l'OHHVO en général, la confrontation des données hydrologiques aux données pluviométriques mensuelles montre qu'il n'y a pas d'écoulement significatif avant le mois d'avril et que l'écoulement continue jusqu'au mois de décembre après qu'il ait cessé de pleuvoir depuis octobre (Zannou A. B., 2006).

4.2 Etude et modélisation du cycle hydrologique

4.2.1 Généralités sur les processus hydrologiques

Les processus hydrologiques représentés à l'échelle du bassin versant, et qui contrôlent le cycle de l'eau sont : le ruissellement de surface, l'écoulement à surface libre, l'écoulement en milieu saturé et non saturé, l'interception, l'évapotranspiration, et le cas échéant, la fonte de neige (*Figure 4- 4*).

L'interception est la rétention de la précipitation par la partie aérienne de la végétation (au dessus de la surface du sol). Elle joue un rôle particulier et faiblement visible dans le cycle de l'eau en réduisant le volume d'eau des précipitations qui atteint le sol et alimente les autres processus d'une part et, d'autre part, elle répartit dans la masse des végétaux une lame d'eau qui sera potentiellement évaporée. Ainsi, elle fait partie des principales causes qui induisent des différences de production d'écoulement entre un bassin forestier et un bassin dépourvu de végétation. Par exemple, une forêt dense de conifères intercepte généralement près de 25% à plus

de 30% de la précipitation (Trimble G. R., 1959). Pour la plupart des modèles hydrologiques, l'interception est représentée par un schéma conceptuel d'un réservoir à un ou plusieurs paramètres.

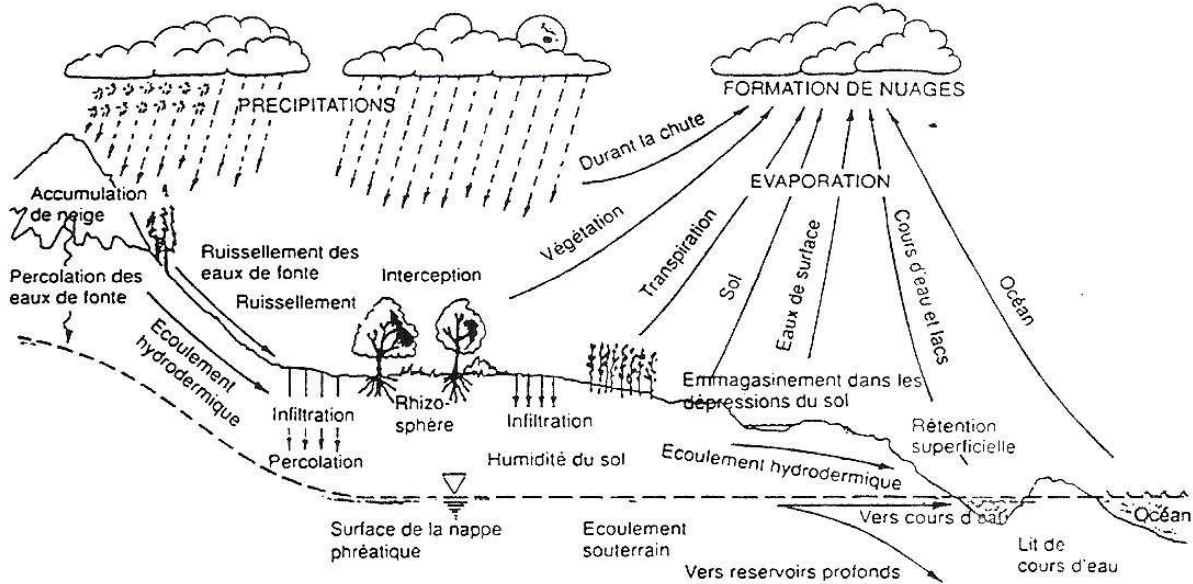


Figure 4- 4 : Schéma du cycle hydrologique [Nasa, 1984 ; cité par (Moussa R., 1991)]

L'évapotranspiration englobe tous les phénomènes de transfert de vapeur d'eau à partir de la surface du sol et à travers les stomates des feuilles des végétaux vers l'atmosphère. L'évapotranspiration est donc la somme de la transpiration du couvert végétal et de l'évaporation du sol nu et des surfaces d'eau libre. La valeur de ce flux à un instant donné est appelée évapotranspiration réelle (ETR). Lorsque la disponibilité en eau du sol n'est pas limitante, et si l'on suppose qu'aucune résistance ne s'oppose aux transferts d'eau, ce flux tend vers une valeur dite potentielle (ETP) qui représente la demande à satisfaire. L'évapotranspiration est une composante essentielle du cycle de l'eau dans la mesure où elle assure le retour d'importantes quantités d'eau vers l'atmosphère à travers un changement d'état. Son taux varie en fonction des conditions météorologiques et l'ETP est généralement estimée à partir de différentes méthodes ou formules (Penman H. L., 1948, Thornwaite C. W., 1948, Blaney H. F. and Criddle W. D., 1950, Turc L., 1961, Bouchet R. J., 1963, Linacre E. T., 1973, Brochet P. and Gerbier N., 1974, FAO, 1998) la reliant aux paramètres météorologiques (Riou C., 1975, Moussa R., 1991). L'ETR est quant à elle, le plus souvent estimée à partir de l'ETP avec des méthodes plus ou moins empiriques (Linacre E. T., 1963, Eagleman J. R., 1971, Priestley C. H. B. and Taylor R. J., 1972, Linacre E. T., 1973, Shuttleworth W. J., 2010).

L'écoulement à surface libre se produit dans les ruisseaux ou rivières et est régi par les équations générales de la mécanique des fluides (Navier-Stokes), avec plusieurs applications concernant les écoulements en rivière : équations de Saint-Venant (onde cinématique et onde diffusante) et hydrogramme unitaire [modèle de Nash (Nash J.E., 1957), hydrogramme unitaire géomorphologique (Gupta V. K. *et al.*, 1980), et différence première de la fonction de transfert (Guillot P. and Duband D., 1980)].

Le ruissellement de surface peut être défini comme le cheminement à la surface du sol de l'eau précipitée vers la plus proche rivière, et décrit par les deux équations fondamentales de l'hydrodynamique (équation de continuité et équation dynamique). Il est généralement causé par une intensité de précipitation qui dépasse la capacité d'infiltration du sol (ruissellement hortonien dû à un refus à l'infiltration) ou par affeurement de la nappe en certains points (ruissellement sur surfaces saturées).

L'infiltration dans le cycle de l'eau est un processus qui fait passer l'eau de la surface ou des couches supérieures du sol vers les couches inférieures. Elle peut intervenir en milieu poreux saturé (équation de Boussinesq) ou non saturé (loi de Darcy ou équation de Richards).

On retiendra que le débit d'un cours d'eau a deux origines possibles : le ruissellement de surface et la vidange de nappe.

Quoi qu'il en soit, la conceptualisation de certains des processus hydrologiques reste assez arbitraire et n'est schématisée que par des relations empiriques (validées par l'expérience) et généralisées sur tout le bassin (loi de Darcy pour les écoulements en milieu poreux, loi de Manning-Strickler pour les écoulements à surface libre etc...).

4.2.2 Etude des processus du fonctionnement hydrologique du bassin

4.2.2.1 Processus identifiés et facteurs influençant les écoulements

La complexité du fonctionnement hydrologique d'un bassin versant mérite que dans le cadre d'une étude de bilan, l'on s'interroge sur les facteurs qui influencent significativement la transformation de la pluie en débit.

Le bassin versant représente l'unité hydrologique de base pour la gestion, l'aménagement et la protection des ressources en eau. Dans les dernières décennies, les investigations hydrologiques sur les versants et les petits bassins versants (Kirkby M., 1988) ont entraîné des améliorations significatives de la compréhension de processus de génération de ruissellement. En effet, la réponse hydrologique à l'exutoire d'un bassin versant est le résultat le plus souvent de la

combinaison de plusieurs facteurs dont un certain nombre [pluviométrie et autres paramètres météorologiques, états de surface (type, couverture et utilisation du sol), géologie et relief du bassin, etc ...] influence la productivité des écoulements par le bassin (Rodier J., 1964, Servat E. and Dézetter A., 1991, Servat E., 1993, Latron J. and Gallart F., 2008). Evidemment, les activités humaines elles aussi impactent les écoulements. Parmi ces facteurs, les caractéristiques physiographiques (pente, pédologie, géologie, occupation du sol...) jouent un rôle important dans la distribution spatiale de la production des écoulements sur l'OHHVO (Akognongbé A., 2009).

On a signalé plus haut, qu'il existe une relation non linéaire entre pluie et débit, traduite par le fait que les baisses de précipitations engendrent des baisses d'écoulement encore plus importantes. L'explication avancée est que la diminution relativement plus importante des débits trouve son origine dans une réduction durable des apports en eau souterraine. La validation de cette hypothèse nécessiterait une analyse des processus physiques à une échelle comparable à celles des observations de surface, c'est-à-dire des données piézométriques disponibles sur plusieurs milliers de km² et sur la période pluridécennale des observations de débits (Kamagaté B., 2006). Mais des éléments de réponse peuvent cependant être apportés par la caractérisation des processus physiques affectant les différents réservoirs hydriques d'un bassin versant représentatif, étudié sur des années à pluviométrie et écoulement contrastés. En zone soudano-sahélienne, quelques études à fine échelle existent (Chevallier P. and Planchon O., 1993; Peugeot C. et al., 1997; Braun J.-J. et al., 2002; Séguis L. et al., 2004; Kamagaté B., 2006) et montrent que la discrimination des écoulements rend nécessaire une approche pluri-disciplinaire des différents termes du bilan.

Contrairement aux zones sahéliennes, caractérisées par des écoulements principalement hortonien du fait de sols peu couverts aux surfaces encroûtées (Peugeot C., 1995), et des nappes relativement profondes avec comme principaux points de recharge le fond des vallées et les mares (Favreau G., 2000), les zones soudaniennes se caractérisent par une coexistence de ruissellement hortonien et d'écoulements de subsurface et souterrains (Chevallier P., 1990, Chevallier P. and Planchon O., 1993). Les nappes y sont peu profondes à affleurantes et contribueraient aux écoulements. A cet effet, une étude approfondie (Kamagaté B., 2006) a tenté de répondre à la question : quel pourrait donc être le niveau de connexion entre le réseau hydrographique et les réservoirs souterrains en zone soudanienne, notamment sur le bassin de la Donga dans l'Ouémé Supérieur ?

4.2.2.2 Echanges entre nappe et rivière

Suite à un nivellement topographique des puits et des stations limnimétriques aux exutoires des bassins (Kamagaté B. *et al.*, 2003a), il a été constaté qu'en toute période de l'année les niveaux piézométriques sont supérieurs à ceux des fonds des rivières (Kamagaté B., 2006). Or, ces dernières sont tariées une partie de l'année, ce qui met en évidence une faible connexion entre les deux compartiments (nappes d'altérite et rivières). Sur le bassin de la Donga, on observe des fluctuations saisonnières annuelles, ce qui indique qu'il n'y a pas de zone préférentielle de recharge (Kamagaté B., 2006), mais atteste également d'une forte variabilité spatiale de la recharge avec des amplitudes piézométriques annuelles variant de 2,5 à 12,5 m.

Au cours de ces trente dernières années, l'utilisation du traçage géochimique a été à l'origine de la remise en cause et du renouvellement des concepts hydrologiques concernant la genèse des débits. Les traceurs constituent un outil important d'investigation dans la recherche hydrologique et ont permis d'avancer dans la connaissance de la genèse des processus hydrologiques (Gnouma R., 2006). Dans le cadre du renforcement des observations du Programme AMMA (2005-2007), une étude du fonctionnement hydrogéochimique a été réalisée. Les signatures chimiques représentées par la conductivité électrique¹⁰ (CE) des eaux de pluies en surface (10 $\mu\text{S}/\text{cm}$), de la sub-surface (90 $\mu\text{S}/\text{cm}$), du réservoir de socle (288 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et de la nappe d'altérite (155 $\mu\text{S}/\text{cm}$) ont été déterminées et montrent que cette dernière participe très faiblement aux écoulements dans les rivières (Kamagaté B., 2006). La signature chimique des éléments majeurs des débits de base, se rapproche fortement de celles des eaux de subsurface. Elle indique que l'apport du réservoir de subsurface (nappe perchée durant la saison des pluies) mis en évidence par ailleurs (Jacquin F. and Seygona Z.Y., 2004) et confirmé par les piézomètres à 2 m sur les toposéquences, semble plus important en période basse c'est-à-dire plus fort à l'étiage.

Un fonctionnement hydrologique type du bassin versant de la Donga a donc pu être proposé (*Figure 4-5*) à partir des données d'observation obtenues depuis l'année 2000 :

- comme généralement sous climat humide, l'écoulement provient d'une part d'un ruissellement sur surfaces saturées, observable pendant les épisodes pluvieux,

¹⁰ La conductivité électrique des eaux, compte tenu de son caractère intégrateur, est un paramètre important utilisé dans le traçage hydrogéochimique des eaux.

l'écoulement d'origine souterraine contribuant aux écoulements est ici majoritairement sub-superficiel, avec la formation d'une nappe saisonnière de sub-surface.

- la nappe permanente dans les altérites participe peu aux écoulements, sa vidange naturelle ne serait donc expliquée que par l'hypothèse d'un drainage régional des eaux souterraines et/ou d'une reprise par évapotranspiration.

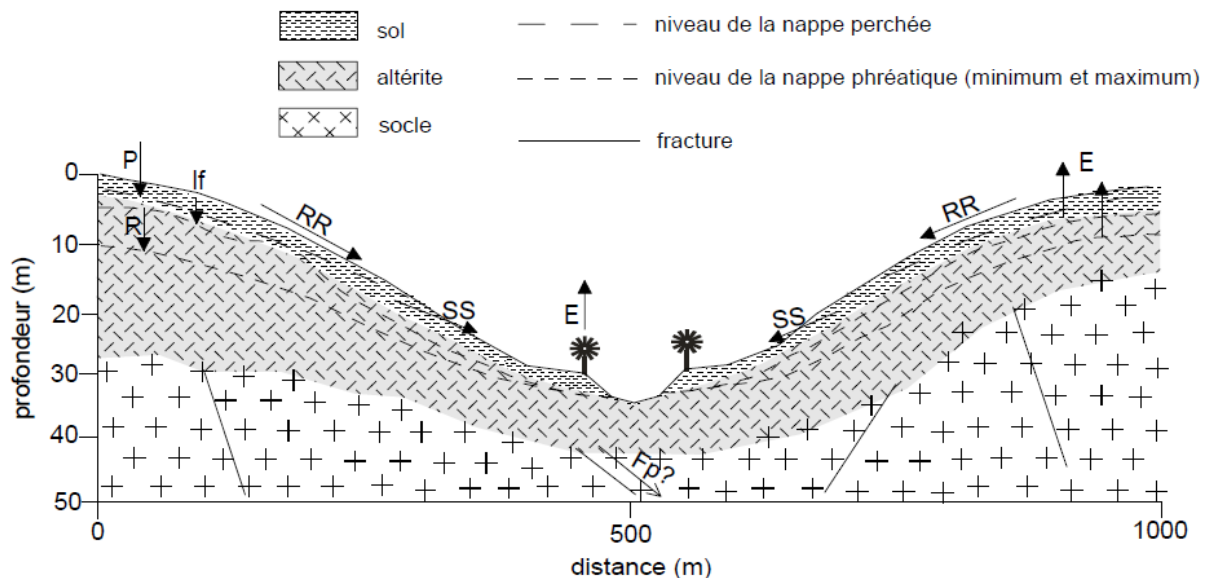


Figure 4- 5 : Schéma type de fonctionnement de versant proposé sur le bassin de la Donga (P=pluie, E=évapotranspiration, RR=ruissellement direct, SS=écoulement de subsurface et Fp=flux profond), (Kamagaté B., 2006)

En accord avec ce fonctionnement type mis en évidence, une déconvolution de l'hydrogramme (cf. Annexe 5) à la station hydrométrique de la Donga à Kolokondé en deux composantes (ruissellement rapide sur surface saturée et flux de subsurface) pour les années 2003 et 2004 a été réalisée (Kamagaté B., 2006). Les flux de subsurface représentent $68 \pm 13\%$ et $83 \pm 13\%$ de l'écoulement total, respectivement en 2003 et 2004. Ces résultats sont en accord avec le contraste pluviométrique des deux années. Ils suggèrent également que la baisse des écoulements est liée à un déficit combiné des flux de surface et de sub-surface.

L'évolution piézométrique n'est pas synchrone dans le temps et sur l'ensemble du bassin de la Donga (Kamagaté B., 2006). On note des retards ou des anticipations dans la recharge, ce qui peut être la conséquence de variations locales de la porosité de l'aquifère. Toutefois au pas de temps annuel, la vidange est toujours équivalente à la recharge. La vitesse de cette dernière est principalement liée aux propriétés hydrodynamiques de l'aquifère, et varie de 2 à 12 m/an (Kamagaté B., 2006). Sa variabilité interannuelle peut être approchée par l'importance relative de l'amplitude piézométrique moyenne saisonnière (Crosbie R.S. *et al.*, 2005). La recharge sur le

bassin de la Donga a été estimée dans l'ordre de 45 à 350 mm/an sur la période 2002 à 2004, soit des coefficients de recharge de 4 à 23 % du total pluviométrique (Kamagaté B., 2006) relativement compatibles avec les rares valeurs publiées pour des aquifères en zone de socle et sous climat soudanien (Filippi C. *et al.*, 1990).

4.2.2.3 Estimation de l'évapotranspiration réelle

Si l'évolution des variables météorologiques est globalement connue, et notamment la hausse de température (GIEC, 2007), il s'est avéré que très peu d'études ont été faites sur l'évolution locale des variables météorologiques et leur impact sur l'évapotranspiration de référence (Roko F., 2007). Or, il faut noter que l'estimation de l'évapotranspiration réelle (généralement à partir de l'évapotranspiration de référence) est primordiale à la fois pour les agronomes (l'eau utilisée par les forêts, les cultures et les pâturages), les hydrologues (elle est un des termes majeurs du bilan hydrologique) et les climatologues (restitution d'eau à l'atmosphère, ou recharge de la mousson en humidité). Les modifications de l'ETR impliquent donc des conséquences agronomiques, hydrologiques et climatologiques. Cette réalité a poussé bon nombre d'auteurs à s'investir dans l'estimation de l'évapotranspiration, en développant différentes approches, méthodes ou formules largement décrites dans la littérature (Priestley C. H. B. and Taylor R. J., 1972; Riou C., 1975; Shuttleworth W. J. and Wallace J. S., 1985; Shuttleworth W. J., 1993; OMM, 1994; Shuttleworth W. J., 2006; Shuttleworth W. J. and Wallace J. S., 2009; Shuttleworth W. J., 2010).

Sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou, le passage de l'ETo à l'ETR a été réalisé (Zannou A. B., 2006) avec l'indice de précipitation antérieure [API, (Chevallier P., 1988)] et a permis de trouver que l'ETR représente environ 41 à 45% de l'ETo comme le montre le **Tableau 4- 2** :

Tableau 4- 2 : ETR et ETo sur l'OHHVO pour 2002-2004 (Zannou A. B., 2006)

Année	2002	2003	2004
ETo (mm)	1433	1395	1390
ETR (mm)	586	623	600
Pourcentage	41%	45%	43%

Toutefois, il est important de faire remarquer que la méthode utilisée [API, (Chevallier P., 1988)] annule l'ETR en saison sèche (ETR=0), ce qui n'est pas réaliste car la végétation transpire. Cette limite que présente la méthode trouve son justificatif dans le fait que l'API a été ajusté sur la tranche superficielle du sol d'épaisseur 40 cm. Effectivement, en saison sèche, on peut

supposer que cette tranche de sol est sèche, cependant, les arbres puisent l'eau beaucoup plus loin (jusqu'à 20 m par exemple), ce qui n'est pas pris en compte par la méthode.

La part des précipitations annuelles qui retournent dans l'atmosphère par évapotranspiration a été estimée à 85% pour l'année 2008 (Guyot A., 2010). Aussi, a-t-il été montré (Mamadou O., 2009, Guyot A., 2010) que durant la saison des pluies, l'évapotranspiration réelle est pratiquement égale à l'évapotranspiration de référence.

4.2.3 Modélisation et simulation du cycle hydrologique

Les modèles hydrologiques sont appliqués pour des aspects variés de la gestion des ressources en eau (estimation des ressources en eau, conservation des eaux et des sols, effet des changements climatiques et/ou d'utilisation des terres etc...). En particulier, l'évaluation des ressources en eau (quantité, qualité, disponibilité) sur la base de laquelle on conçoit une exploitation raisonnable et un développement durable requiert des données hydrologiques de bonne qualité et des modèles ou techniques appropriés (Servat E. and Dézetter A., 1988). Différents types de modèle hydrologique (global, conceptuel, distribué à bases physiques etc...) sont utilisés pour viser des buts divers. De nos jours, ces modèles visent à prédire les effets du changement climatique et des changements d'utilisation des terres sur les processus hydrologiques (Bormann H. and Diekkrüger B., 2003, Giertz S. and Diekkrüger B., 2003, Legesse D. R. *et al.*, 2003). Les modèles les plus simples peuvent permettre de prédire les composantes du cycle hydrologique, mais on recourt généralement à des modèles plus complexes en vue de restituer l'impact climatique ou anthropique sur le cycle hydrologique. A cet effet, les modèles spatialisés à bases physiques paraissent indiqués, mais nécessitent beaucoup de données d'entrée qui ne sont pas souvent disponibles (existence, quantité, qualité, pas de temps et d'espace des données requises). De ce fait, pour un modèle très complexe aussi puissant soit-il, même si ses résultats sont jugés relativement appréciables, il est souvent recommandé la nécessité d'autres tests avant leur utilisation pour la prise de décision et la gestion des ressources en eau (Legesse D. R. *et al.*, 2003). L'applicabilité des différents types de modèles hydrologiques dépend des buts visés et des données disponibles. Si des données précises et détaillées existent, les capacités de prédiction sont meilleures avec des modèles complexes qu'avec des modèles conceptuels simplifiés. Mais si les données sont lacunaires ou incertaines, les simples modèles globaux peuvent donner des résultats meilleurs à cause de leur robustesse liée aux erreurs ou aux lacunes dans les données (Grayson R. and Blöschl G., 2001), et il apparaît alors important d'arriver à un bon compromis entre la complexité scientifique du modèle et son application en pratique.

4.2.3.1 Récents résultats de modélisation sur la zone d'étude

Dans le cadre des travaux du projet OUEME-2025, les modèles hydrologiques globaux GR4J (pas journalier) et GR2M (pas mensuel) ont été appliqués pour analyser la disponibilité en eau à l'horizon 2025 sur 3 sous-bassins de l'Ouémé (Agbidinoukoun A. S., 2011). Cet auteur obtient des valeurs du coefficient d'efficacité de Nash (cf. Section 7.3.1.1) de 78% (GR4J) et 89% (GR2M) sur l'Ouémé à Bétérou en calage sur la période 1995-2002 contre 80% et 90% en validation sur 2003-2006. Mais la corrélation entre débits simulés et observés paraît moins satisfaisante, de l'ordre de 61% (calage) et 73% (validation) pour GR4J et atteignant 85 et 86% respectivement pour GR2M. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus sur les données historiques (Vodounnon J., 2008, Lawin E. A. *et al.*, 2009). Néanmoins, en utilisant les scénarii pluviométriques élaborés par le projet IMPETUS (Christoph M. *et al.*, 2010) à l'horizon 2025, on conclut à une hausse probable des écoulements de l'ordre de 27% sur l'Ouémé à Bétérou (10.080 km²), et 49% sur l'Ouémé à Savè (23.600 km²) contre une baisse de l'ordre de 35% sur le Zou à Atchérigbé (6.950 km²) à l'horizon 2025 (Agbidinoukoun A. S., 2011). Mais, une autre étude (Le Lay M., 2006) obtient avec GR4J sur le même bassin sur la période 1998-2002, des performances légèrement supérieures de l'ordre de 93% en calage à 83% en validation, et 91% en corrélation (R^2) entre observations et simulations. Ces auteurs finissent par conclure que les modèles GR présentent des insuffisances qui résident dans le fait que les propriétés physiques des bassins ne sont pas prises en compte. En outre, la validation sur une période humide d'un calage effectué en période sèche donne des résultats non appréciables (Vodounnon J., 2008).

Le modèle physique semi-distribué SWAT 2003 (pas mensuel) a été appliqué sur le bassin de la Téro à Igbomakoro entre 1998 et 2003 avec une efficacité de 70%, et indique une baisse de 56% des écoulements à l'horizon 2025 (Sintondji L. O., 2005).

L'application du modèle hydrologique Topamma sur le bassin de la Donga (sous-bassin de l'Ouémé à Bétérou) a permis de tester une période de calage englobant la totalité de la période d'étude ou une période annuelle. En comparant les jeux de paramètres spécifiques à chaque année au jeu optimal sur la période 1998-2002, et en utilisant les résultats de l'analyse de sensibilité du modèle adjoint de Topamma (Castaings W., 2007), il est constaté que toutes les années ne sont pas reproduites de la même façon par le jeu global : certaines années (1998) sont bien simulées par le jeu de paramètres global, contrairement aux autres (Le Lay M., 2006). Ces résultats mettent en évidence la spécificité hydro-climatique des différentes années. La question

de la pertinence de l'utilisation d'un calage global se pose, surtout dans un contexte caractérisé par une variabilité hydro-climatique prononcée comme celle de notre cas.

Souvent, il est question de sélectionner un seul jeu de paramètres, dit « jeu de paramètres optimal » ou « jeu optimal » tout court, à même de simuler au mieux les débits observés au vu d'un critère, généralement celui de l'efficacité de Nash. Cependant, il n'est pas évident qu'il n'existe pas plusieurs combinaisons de paramètres capables de simuler les débits de manière aussi satisfaisantes les unes que les autres. Certains auteurs (Beven K. and Binley A. M., 1992), en développant une méthode dite GLUE (*Generalized Likelihood Uncertainty Estimation*) à la suite des travaux sur l'analyse de sensibilité régionalisée (Hornberger G. M. and Spear R. C., 1981), considèrent qu'il existe en modélisation un ensemble de jeux de paramètres à même de simuler de manière acceptable le comportement d'un bassin, ces jeux étant considérés comme équifinaux.

En effet, la sélection du jeu optimal peut varier suivant la ou les fonctions « objectif » utilisées en calibration (Le Lay M., 2006). De plus, l'utilisation d'un critère global mathématique semble une procédure insuffisante dans la mesure où elle réduit la calibration à un ajustement de courbes. Il n'est pas évident que deux valeurs identiques de la fonction « objectif » choisie simulent des hydrogrammes de qualité visiblement équivalente. Il est donc nécessaire d'analyser finement les hydrogrammes afin d'orienter le choix de la combinaison optimale. On peut considérer un cadre d'évaluation des simulations plus complet (Le Lay M., 2006), incluant trois dimensions : (i) la performance, (ii) les incertitudes et (iii) le réalisme. Wagener (Wagener T. *et al.*, 2001, Wagener T. *et al.*, 2003) est un des auteurs qui a proposé ce cadre :

- Par performance, il faut entendre : (i) la validation du modèle sur des jeux de données non utilisés dans la calibration afin d'évaluer la robustesse du modèle et (ii) la qualité des simulations.
- Le terme incertitude sous-entend une analyse de sensibilité du modèle aux paramètres ainsi qu'une analyse des incertitudes proprement dite sur les données simulées.
- Enfin le réalisme des simulations s'évalue à travers différentes approches : l'utilisation d'une meilleure information sur les données d'entrée du modèle, l'analyse multi-critère (comme la simulation de débits intermédiaires sur le bassin) et l'étude de la significativité des paramètres.

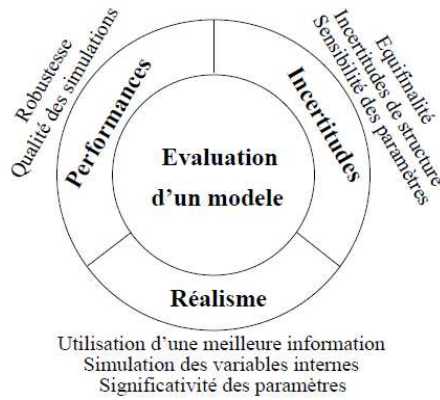


Figure 4- 6: Dimensions de l'évaluation d'un modèle (Le Lay M., 2006)

La prise en compte de données exogènes telles que des niveaux de nappe, le rapport entre le ruissellement direct et l'exfiltration dans les écoulements peuvent parfois réduire la performance du modèle en terme de simulation des débits à l'exutoire mais augmenter le réalisme du modèle (Seibert J. and McDonnell J.J., 2002). Dans la grande majorité des cas, les modèles hydrologiques sont uniquement calibrés et estimés sur les valeurs de débit à l'exutoire, variable la plus facile à mesurer et la plus intégrative du fonctionnement du bassin. Il n'est alors pas du tout évident que les autres composantes du bilan hydrologique simulées par le modèle soient bien reproduites, c'est-à-dire réalistes. Le développement de modèles distribués et parallèlement des techniques de mesure, autorise la prise en compte des variables autres que les débits dans la calibration ou simplement l'évaluation d'un modèle. On parle d'approches multi-critère. Ces dernières ont pour objectif de mieux contraindre les modèles, c'est-à-dire de diminuer l'incertitude d'estimation des paramètres. Les stratégies « multi-objectifs » par exemple, consistent à sélectionner les combinaisons de paramètres optimales au vu du calcul de plusieurs fonctions objectives (calculées sur les débits uniquement, ou également sur plusieurs autres variables observées, par exemple les hauteurs de nappe). Dans les stratégies « multi-échelle », on utilise des données disponibles à différentes échelles spatiales ou temporelles (par exemple les débits intermédiaires sur le bassin).

4.2.3.2 Analyse et évaluation des résultats actuels du modèle Topamma

La robustesse de la paramétrisation identifiée sur la période 1998-2002 a été étudiée (Métadier M., 2006). Pour cela, le jeu optimal de paramètres obtenu (Nash=82%) par calage global du modèle sur les cinq années (Le Lay M., 2006) a été utilisé pour simuler les années 2002 à 2004. Si l'année 2003 est bien simulée par le jeu optimal global avec une valeur assez élevée de l'efficacité de Nash (proche de 84%), la performance obtenue pour les années 2002 et 2004 est

assez moyenne avec des valeurs d'efficacité inférieure à 65%. On retrouve dans ces résultats, la signature de la spécificité hydro-climatique des trois années d'étude (2002-2004), avec un jeu optimal global plus représentatif des années à forte pluviométrie comme c'est le cas de 2003, année mieux simulée par le jeu global au vu du critère de Nash. Cette variabilité interannuelle de la qualité des simulations peut paraître surprenante dans la mesure où les paramètres du bassin décrivent des caractéristiques censées être indépendantes des conditions de forçage et sont donc supposés ne pas varier entre les années. Une explication est que le modèle simplifie le bassin de manière imparfaite en cherchant à s'adapter aux mieux aux observations elle-mêmes imprécises (Zin I., 2002). Ainsi, on conclut que le jeu optimal obtenu par calage de Topamma sur la période 1998-2002 n'est pas un compromis acceptable pour simuler les années 2002 et 2004. Une nouvelle paramétrisation de Topamma sur la Donga s'est donc imposée et un calage global sur la période 2002-2004 ainsi qu'un calage spécifique année par année ont été réalisés (Métadier M., 2006). Il s'agit de savoir si la combinaison optimale de paramètres obtenue par calage global sur 2002-2004 constitue un compromis acceptable pour les trois années considérées séparément.

Tableau 4- 3 : Valeurs du critère de Nash pour la période 2002-2004, obtenues avec Topamma par calage global et spécifique (Métadier M., 2006)*.

Année	Type de calage	M (m)	To (m ² /h)	do/M	Vr (m/s)	Nash
2002	Global	0,04	3	9,2	0,2	0,860
	Spécifique	0,03	13	10,8	0,3	0,881
2003	Global	0,04	3	9,2	0,2	0,860
	Spécifique	0,04	3	9,0	0,2	0,855
2004	Global	0,04	3	9,2	0,2	0,860
	Spécifique	0,03	9	10,4	0,3	0,905

*Avec To la transmissivité latérale en surface lorsque le sol est saturé, M le coefficient de décroissance de cette transmissivité avec la profondeur, do l'épaisseur de la couche de sol superficielle et Vr la vitesse de propagation de l'onde de crue en rivière.

On observe qu'en 2003, les paramètres optimaux retenus sont très proches des paramètres globaux et la performance du modèle obtenue par calage global très proche de celle obtenue par calage spécifique, comme le montrent les valeurs de l'efficacité (*Tableau 4- 3*). Pour ce qui est des années 2002 et 2004, les valeurs des paramètres M, do/M et Vr sont assez proches des valeurs du jeu global, mais les valeurs de To sont dans les deux cas très nettement supérieures. Ainsi on note une faible capacité de Topamma, à représenter correctement à travers un seul jeu de paramètres, les spécificités hydrologiques interannuelles de la zone d'étude, si bien que toute approche de modélisation basée sur l'identification d'un unique jeu optimal de paramètres doit être écartée Cette information capitale sera prise ne compte dans la présente étude (cf. Chapitre 7).

Sur un autre plan, la sensibilité du modèle Topamma à ses paramètres a été étudiée à travers la surface de réponse de l'efficacité de Nash.

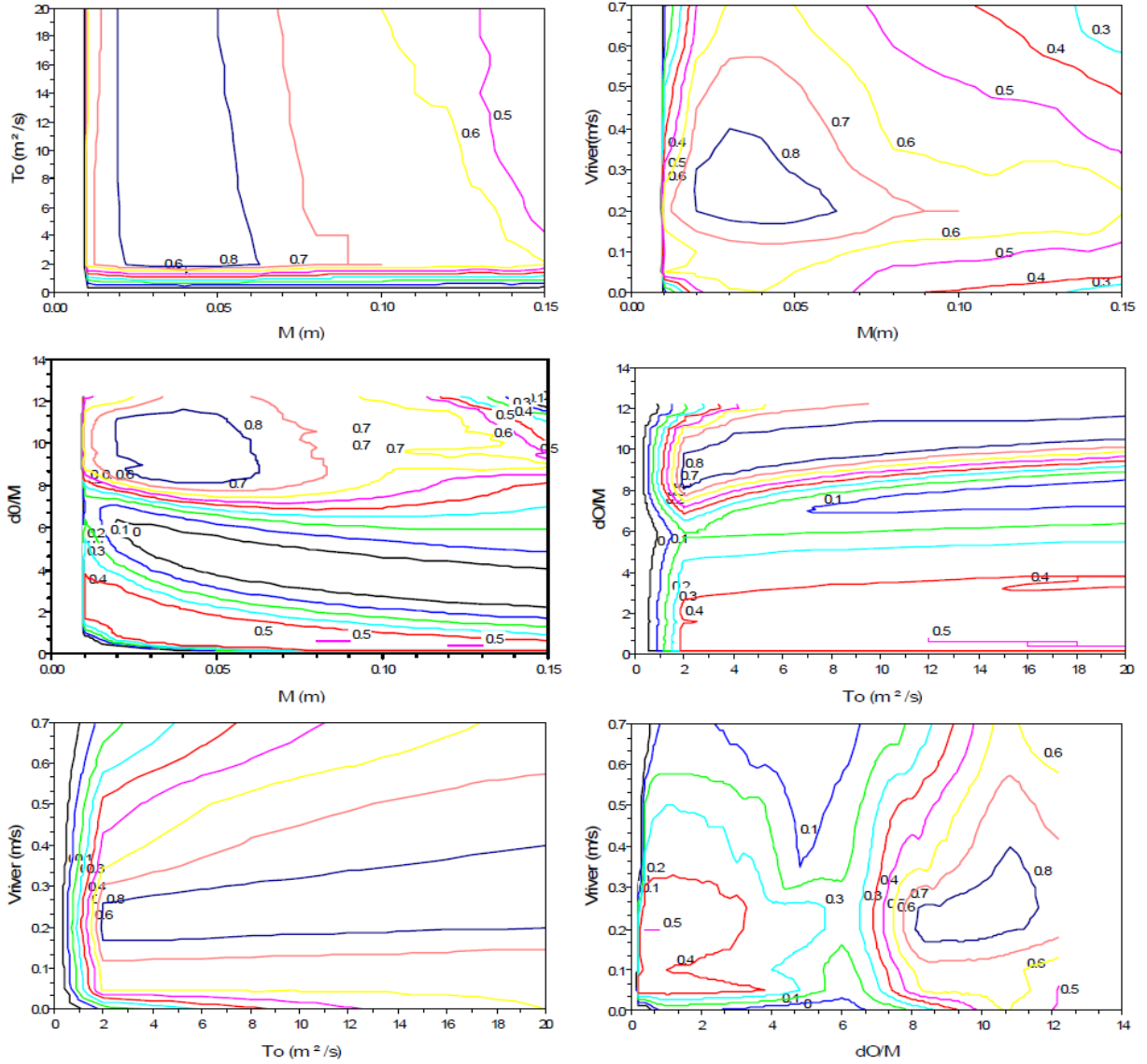


Figure 4- 7 : Projection de la surface de réponse de Topamma (calage global) dans l'espace des paramètres sur le bassin de la Donga (Métadier M., 2006)

La **Figure 4- 7** représente, pour deux valeurs de paramètres fixées, la performance maximale atteinte par le modèle en optimisant sur les deux autres paramètres. Cette surface traduit donc les effets de compensation possibles entre les paramètres, et par conséquent la contrainte de chaque paramètre. Une surface plate traduit un paramètre peu contraint, au sens où sa valeur a peu d'importance (en termes d'efficacité) pour le modèle, qui arrive à s'adapter en jouant sur les autres paramètres. De l'analyse de ces surfaces, il ressort que :

- le paramètre T_0 est le moins contraint (surface plate),
- le paramètre le plus sensible est do/M . Les valeurs optimum de l'efficacité sont identifiées pour des valeurs de do/M proches de 10. Un optimum secondaire semble se dessiner pour des valeurs inférieures à 2.

Aussi, il existe une équifinalité certaine. L'identification d'un modèle optimal n'est donc pas possible, au regard des données et de la fonction objectif utilisée (efficacité sur les débits). Ce qui vient renforcer l'idée de proscrire l'utilisation d'un unique jeu de paramètres, aussi optimal soit-il, pour représenter le fonctionnement hydrologique global du bassin.

S'agissant du réalisme des simulations de Topamma, on peut s'intéresser à la représentation de l'hydrodynamique du sol par le modèle.

D'une part, les chroniques de hauteur de nappe à 2 m disponibles pour l'année 2004 sur le bassin de la Donga ont permis de comparer localement (site de Nalohou) le niveau d'eau observé dans la nappe temporaire de sub-surface, et celui simulé par Topamma. Le modèle simule un début de saturation dès mi-avril alors qu'on observe une mise en charge des piézomètres qu'à partir du mois d'août (Métadier M., 2006). Le modèle simule donc mal la dynamique d'apparition de la saturation de la zone de sub-surface. Ces résultats peuvent s'expliquer par une hétérogénéité spatiale sur le bassin. Une perméabilité plus importante des sols localement peut expliquer qu'on observe moins de saturation en sub-surface (cf. Section 4.1.6.3.1), avec une infiltration directe de l'eau en profondeur vers la nappe pérenne (percolation).

D'autre part, une analyse de l'exfiltration de la nappe de sub-surface par le modèle Topamma a été réalisée à travers la déconvolution des hydrogrammes (cf. Annexe 5) sur la base de chroniques de conductivité électrique (C.E.) enregistrées en 2003 et 2004 à la station hydrométrique de la Donga à Kolokondé (Kamagaté B., 2006). Les hypothèses sous-jacentes à la décomposition par un modèle de mélange, sont la conservation de la masse et la constance du signal géochimique de chaque compartiment identifié. Dans le cas spécifique du bassin de la Donga, une caractérisation des compartiments hydriques à base de traceurs chimiques a mis en évidence un mélange à deux composantes à l'exutoire : le ruissellement rapide sur surfaces saturées et l'écoulement lent (flux de sub-surface). L'incertitude sur les valeurs exactes du signal géochimique pour chaque compartiment est transcrite dans le modèle au moyen d'une méthode de Monte-Carlo (tirage aléatoire de 200 valeurs de la concentration de chaque composante de l'écoulement à partir d'une loi de distribution connue). En 2003, 68 ± 13 % du volume écoulé à l'exutoire du bassin de Kolokondé, provient du réservoir de sub-surface. En 2004, 83 ± 13 % de

l'écoulement provient de ce même réservoir (Kamagaté B., 2006). Pour les deux bassins, la part de l'écoulement de base Q_b dans le débit total simulé Q_t par le modèle géochimique (Q_b/Q_t) est largement supérieure à celle simulée par Topamma (*Tableau 4- 4*).

Tableau 4- 4 : Part de l'écoulement de base dans l'écoulement total pour les années 2003 et 2004 (Kamagaté B., 2006)

Années	Qb/Qt (%)		
	Modèle géochimique Kolokondé	Topamma Donga	Topamma Kolokondé
2003	68 [55-80]	45	46
2004	83 [70-96]	68	61

Cette comparaison montre que les valeurs Q_b/Q_t correspondant aux simulations optimales pour les deux années ne sont pas comprises dans les intervalles déterminés par le modèle géochimique. Ces derniers mettent donc en évidence une surestimation du ruissellement sur surfaces saturées simulé par le modèle Topamma.

Ainsi, la simulation par Topamma de la dynamique de la nappe temporaire de subsurface, et sa contribution à l'écoulement total, ne semble pas réaliste. Face à ce constat, un nouveau seuil de critère acceptation/rejet a été testé à travers une méthode GLUE (Métadier M., 2006). Une double sélection est effectuée :

- Une première sélection sur l'efficacité de Nash calculée sur les débits comme dans la méthode GLUE normale. On considère un seuil arbitraire de 0,7.
- Une deuxième sélection sur les jeux précédemment identifiés. On ne retient que les jeux de paramètres telle que :
 - pour l'année 2003 : $0,55 < Q_b/Q_t < 0,80$
 - pour l'année 2004 : $0,70 < Q_b/Q_t < 0,96$

Avec cette double sélection, la distribution des paramètres est mieux précisée (diminution de l'incertitude sur l'identification des paramètres) et l'amplitude des intervalles prédictifs (interquantile 90%) diminue. Mais, la plupart des valeurs de débit observées ne se retrouvent plus dans l'intervalle simulé pour le bassin de Kolokondé, contrairement au bassin de la Donga.

En conclusion, on retient que les jeux équitifs sélectionnés sur les débits ($Eff > 0,7$) ne sont pas représentatifs de la composante d'exfiltration du modèle sur le bassin de Kolokondé. Par contre la double sélection réalisée permet de retenir des jeux représentatifs de la proportion d'écoulement de base dans la rivière, sous l'hypothèse de la transposabilité des résultats du modèle géochimique obtenus sur Kolokondé à l'échelle de la Donga.

Par ailleurs, en considérant que la vidange de la nappe profonde des altérites serait due à l'évapotranspiration des grands arbres par exemple (*ETR_{nappe}*) et à un drainage profond vers le socle fracturé, il a été montré que la percolation calculée par Topamma paraît bien vraisemblable (Métadier M., 2006). En effet, en négligeant le drainage profond, l'*ETR_{nappe}* est au plus égale à la différence entre percolation et variation de stock ; et la somme de l'*ETR_{nappe}* et de l'ETR calculée par Topamma reste inférieure à l'ETP. Ainsi, ce résultat ne remet pas en cause la percolation calculée par Topamma, mais ne garantit néanmoins pas que cette percolation soit correcte ; compte tenu des soupçons d'une faible productivité d'ETR par le modèle.

4.2.4 Bilan hydrologique

Plusieurs définitions du terme « **bilan hydrologique** » existe dans la littérature. Pour le *Glossaire International d'Hydrologie* (1992), c'est le « **bilan d'eau fondé sur le principe selon lequel, pendant un certain intervalle de temps, le total des apports à un bassin versant ou à une formation aquatique doit être égal au total des sorties, plus la variation, positive ou négative, du volume d'eau stocké dans le bassin ou la formation** », tandis que le *Grand Larousse Encyclopédique* (1970) définit le « **bilan de l'écoulement ou bilan hydrologique** » par l'« **état comparatif des pluies et des débits sur un bassin fluvial durant une période donnée (année, saison, averse)** ». Cette même source précise que le « **bilan hydrique** » est la « **comparaison entre les quantités d'eau fournies à une plante et celles utilisées par elle** ». Quant au *Vocabulaire de l'Hydrologie et de la Météorologie* (1978) et au *Dictionnaire de la Géographie* (1984), ils définissent de manière indistincte bilan hydrologique ou hydrique. Le premier définit le « **bilan hydrologique** » comme une « **expression exprimant la répartition des différents volumes d'eau compris dans chacune des parties du cycle de l'eau, pour une période et un bassin donnés. On dit aussi bilan hydrique** » ; et la seconde « **le bilan hydrique ou hydrologique** » comme une « **étude comparée de la lame d'eau tombée à la surface d'un territoire ou d'un bassin versant et les différentes formes de transfert de cette eau, soit par évapotranspiration, écoulement, infiltration et alimentation des nappes souterraines** ».

Quoi qu'il en soit, le bilan hydrologique repose sur un caractère comptable, s'évalue à l'échelle d'un bassin versant et relève d'une démarche d'hydrologie tandis que le bilan hydrique se situe à l'échelle de la plante et interpelle l'agronome.

L'eau précipitée à l'échelle du bassin versant se répartit en eau interceptée, retenue à la surface du sol, infiltrée et ruisselée. La totalité de l'eau interceptée et une partie de l'eau retenue à la surface du sol et infiltrée est perdue par évaporation et évapotranspiration. La hauteur d'eau

ruisselée en surface se transforme en ruissellement direct et constitue l'essentiel de l'écoulement vers l'exutoire. Les autres composantes de l'écoulement à l'exutoire sont l'écoulement retardé et le débit de base qui proviennent respectivement de l'eau infiltrée en zone non saturée (exfiltration) et de l'eau des nappes souterraines (résurgence).

Ces processus hydrologiques interagissent de façon complexe dans le temps et dans l'espace. La prise en compte des échelles de variabilité de ces processus dans les modèles est l'un des enjeux majeurs de l'hydrologie contemporaine. Pour cerner cette variabilité, il est courant de suivre sur une longue période, l'évolution du bilan hydrologique.

Le bilan hydrologique se définit donc à l'échelle d'un bassin versant et se traduit par l'équation simplifiée suivante :

$$P=Q+E+\Delta S \quad (\text{éq. 4- 1})$$

où P désigne la pluie, Q le volume écoulé à l'exutoire, E l'évapotranspiration et ΔS la variation de stock (tous exprimés en mm). P et Q sont facilement mesurables contrairement à E et ΔS dont l'estimation s'avère plus délicate. En général, on partira de deux premiers, avec une estimation de E pour déduire la variation de stock moyennant quelques hypothèses plus ou moins simplificatrices. La détermination des termes du bilan hydrologique s'avère compliquée lorsqu'interviennent les interactions entre bassins hydrologiques voisins. En effet, le bassin versant n'est pas toujours un système fermé comme on le considère souvent, car la superposition entre bassin topographique et bassin hydrogéologique n'est pas toujours parfaite. En conséquence, des échanges entre bassins versants voisins se produisent au niveau de la composante ΔS , ce qui complexifie l'évaluation précise de ce dernier.

4.2.4.1 Calcul du bilan hydrologique

Les bilans hydrologiques sur les 3 bassins de l'Ouémé à Aval-Sani, de l'Ouémé à Bétérou et de la Térou à Igbomakoro ont été calculés pour l'année 2002 (Zannou A. B., 2006) en utilisant la méthode de l'indice de précipitation antérieur (Chevallier P., 1988) pour estimer l'ETR. Le calcul de la variation de stock souterrain a été faite à partir de l'équation 4.1 sous la forme suivante :

$$\Delta S = P - Q - E \quad (\text{éq. 4- 2})$$

où P désigne la pluie, Q le volume écoulé à l'exutoire, E l'évapotranspiration et ΔS la variation de stock souterrain (tous exprimés en mm).

Le **Tableau 4- 5** recense les valeurs de chaque terme :

Tableau 4- 5 : Bilan hydrologique de l'année 2002 avec incertitudes associées sur 3 sous-bassins de l'OHHVO (Zannou A. B., 2006)

Sous-bassins	Aval Sani	Bétérou	Igbomakoro
Lame précipitée (mm)	1104 +/- 2%	1150 +/- 2%	1235 +/- 2%
Lame évaporée (mm) supposée sans incertitude	586	586	586
Lame écoulée (mm)	145 +/- 15%	123 +/- 10%	139 +/- 14%
Variation de stock souterrain (mm)	372 +/- 11%	440 +/- 7%	510 +/- 8%
Coefficient d'écoulement	0,13 +/- 0,02	0,11 +/- 0,01	0,11 +/- 0,02

On remarque que le bassin de l'Ouémé à Aval Sani ayant reçu la plus faible quantité de pluie ruisselle mieux que les deux autres. Cette remarque appelle 2 réflexions :

- A la station de Bétérou, la taille du bassin est 3 fois supérieure à celle du bassin à Aval-Sani, et la forêt classée de l'Ouémé Supérieur qui se situe entre les deux stations le long du cours d'eau, constitue un facteur potentiel ralentissant l'écoulement et favorisant l'infiltration, ce qui peut expliquer cette différence d'écoulement entre ces deux bassins emboîtés.
- La Téro à Igbomakoro, bassin de taille voisine de l'Ouémé à Aval Sani, semble accentuer les constats faits pour l'Ouémé à Bétérou : en effet, le bassin à Igbomakoro est occupé sur une bonne partie par une forêt qui fait d'ailleurs l'objet d'un défrichement prononcé. Il est difficile, avec ces données, de détecter l'influence éventuelle de cette anthropisation poussée du bassin de la Téro, d'où l'intérêt d'un suivi à long terme.

A l'échelle annuelle, on aperçoit que l'évapotranspiration réelle représente près de 50% du bilan tandis que le stockage avoisine les 35-40%. Ainsi, la plus grosse part de la pluie tombée s'évapore tandis que 11-13% se transforme en écoulement. Les résultats sur l'Ouémé à Bétérou sont en accord avec ceux du modèle Topamma (Le Lay M., 2006) à savoir : évapotranspiration = 50% ; écoulement = 12% et variation de stock souterrain = 38%. Ceci justifie la crédibilité de l'estimation grossière de l'ETR utilisée (modulation de l'ETP par l'API). Toutefois, il est important de valider ce calcul de la variation de stock souterrain dans une approche de bilan car, d'une part cette variation est estimée comme résidu (il n'y a pas d'observations directes et il est possible qu'il y ait un effet de compensation entre ETR et ΔS) et d'autre part, elle constitue un élément important dans la problématique de l'approvisionnement en eau potable (cf. Section 3.2.4).

Ces résultats sont confirmés par Kamagaté qui trouve un déficit d'écoulement (Pluie-Écoulement) important (70 à 85%) sur le bassin de la Donga entre 2002 et 2004, imputable d'une

part, à l'évapotranspiration et, d'autre part, au stockage annuel dans l'aquifère, et probablement aux flux piégés par les fractures fermées en profondeur (Kamagaté B., 2006).

4.2.4.2 Impact du type d'ETP sur le bilan hydrologique

Aussi, la nature de l'ETP utilisée dans la modélisation (Topamma) a un impact sur les résultats, et il est intéressant de regarder les conséquences en termes de bilan hydrologique (*Tableau 4- 6*).

Tableau 4- 6 : Bilan hydrologique de l'année 2002 sur la Donga avec Topamma et pour 2 types d'ETP (Métadier M., 2006)

ETP	Percolation profonde (%)	Ruissellement sur surfaces saturées (%)	Exfiltration (%)	ETR (%)
Climatologique	35	8	10	46
Penman-Monteith	31	4	4	62

Il apparaît que l'utilisation d'une ETP climatologique amène Topamma à sous-estimer l'évapotranspiration réelle par rapport à la valeur simulée avec une ETP mesurée. L'écart de 16 % entre ces valeurs se répercute sur les autres termes du bilan avec une compensation des valeurs de ruissellement sur surfaces saturées et d'exfiltration de l'ordre de 50%.

4.3 Dynamique des états de surface et impact sur les ressources en eau

4.3.1 Généralités

La connaissance des variations spatio-temporelles de l'occupation et de l'utilisation des sols est un des éléments-clé permettant d'effectuer des simulations de l'évolution des climats, notamment à partir de l'exploitation de longues séries d'images satellites (Champeaux J. L. *et al.*, 2000). Dans les régions tropicales sèches d'Afrique de l'Ouest, les évolutions régressives du couvert végétal posent de nombreuses questions en termes d'interprétation du milieu et ses écosystèmes (Ballouche A., 2004). Au Bénin en général, et dans le bassin de l'Ouémé à Bétérou en particulier, il est noté un stress hydrique d'origine climatique et anthropique au cours de ces dernières années. Dans ce bassin, la culture extensive du coton entraîne une occupation accrue de l'espace, ce qui constitue une menace pour la trilogie interdépendante sols, eaux et couvert végétal (Sinsin B., 1985). Ainsi, les effets directs ou indirects des mauvaises pratiques agricoles adoptées par les paysans sont la dégradation de la végétation, l'extension des espaces désertifiés, la

destruction des écosystèmes, la pollution du milieu par les produits dérivés des pesticides et engrais chimiques (Adam S. I., 2005). Les modifications affectant la couverture végétale du bassin de l'Ouémé à Bétérou, ont une influence plus ou moins directe sur la relation existant entre précipitations et écoulements de surface (Vissin E. W., 2007). La nature de la couverture végétale intervient sur l'intensité de cinq processus fondamentaux dans le cycle de l'eau en surface : interception, évaporation directe après interception, infiltration dans le sol, évapotranspiration et écoulement de surface (Gregoire J-M. and Giovani F., 1990).

Dans un bassin, les caractéristiques du couvert végétal déterminent les ressources en eau réelle, c'est-à-dire l'eau stockée par le milieu, par rapport aux ressources en eau potentielles que sont les précipitations. Ainsi, toute modification des états et de la structure de la couverture végétale a des impacts sur les ressources en eau du bassin (Servat E. and Dézetter A., 1991, Servat E., 1993, Cosandey C. *et al.*, 2003, Vissin E. W., 2007, Latron J. and Gallart F., 2008). Les changements éventuels dans le cycle hydrologique du fleuve apparaissent graduellement au bout d'une longue période et sous les conditions hydro-climatiques variées (Ouedraogo M., 2001). A ce sujet, plusieurs études ont tenté de montrer l'impact de la dynamique des états de surface sur les ressources en eau, surtout dans la région ouest-africaine (Houndénou C., 1992, Vissin E. W., 2001, Amoussou E., 2005, Vissin E. W., 2007, Abdoulaye D., 2010, Vodounou J-B., 2010). Il est prouvé qu'en zone sahélienne et soudanienne, les labours ou les sarclages modifient radicalement le comportement hydrodynamique des sols cultivés, et qu'en zone soudanienne, la croissance du couvert végétal herbacé modifie aussi radicalement le comportement hydrodynamique des sols de savane (Lamachère J. M., 1994). Le même auteur montre aussi que la position de la surface élémentaire sur le versant est également susceptible de faire évoluer plus ou moins rapidement les caractéristiques de son état de surface en fonction des apports hydriques. D'autres auteurs (Fournier J. *et al.*, 2000) ont montré, par ailleurs, l'impact de la jachère sur les écoulements de surface en zone soudanienne du Burkina-Faso sur le site de Bondoukuy : les jachères génèrent de faibles ruissellements à l'échelle du bassin versant et, donc, une diminution de leur superficie peut accroître, dans des proportions importantes, les ruissellements locaux ou régionaux accompagnés de manifestations érosives. Au Sahel, la dégradation de la végétation et l'augmentation des surfaces cultivées, consécutives à la sécheresse et la pression anthropique, ont entraîné l'augmentation des coefficients de ruissellement, pouvant aboutir à une augmentation des écoulements (Séguis L. *et al.*, 2004, Mahé G. *et al.*, 2005).

4.3.2 Cas de la haute vallée de l'Ouémé

Pour démontrer l'impact des états de surface sur les écoulements, plusieurs démarches sont utilisées par les auteurs. Une étude a réalisé trois différentes cartes d'occupation du sol (*Figure 4- 8*) sur l'OHHVO (1978, 1995, 2006) et a montré que les superficies occupées par les formations naturelles (forêts et savanes) ont régressé de 9,26 % tandis que celles des formations anthropiques (cultures et jachères) ont progressé de 52,26 % (Abdoulaye D., 2010). Aussi, les taux de recouvrement des unités du couvert végétal ont été confrontés à l'écoulement moyen des années 1978, 1995 et 2006 respectivement sur l'Ouémé à Bétérou et sur l'Ouémé à Savè, sans qu'on puisse tirer une conclusion à cause de l'insuffisance des données disponibles (Abdoulaye D., 2010, Assaba M., 2011). Mais, il faut souligner que les formations naturelles représentent encore 77,13% de la superficie totale du bassin de l'Ouémé à Bétérou contre 22,87 % pour les formations anthropisées. Ainsi, il y a un recul généralisé des forêts et des savanes sur l'ensemble du bassin et une forte progression des surfaces cultivées et/ou mises en jachère.

Si les données nécessaires pour appréhender l'impact de la dynamique des états de surface sur la disponibilité en eau sont actuellement insuffisantes sur la haute vallée de l'Ouémé, il n'en est pas de même pour les autres types de données. Ainsi, nous présentons au prochain Chapitre, les données qui servent à modéliser et évaluer les ressources en eau, et que nous avons utilisées pour la présente étude.

« ...le plagiat est à la base de toutes les littératures, sauf la première ... qui d'ailleurs est inconnue ! »

Jean Giraudoux, Diplomate, Dramaturge, Romancier français, 1882-1944

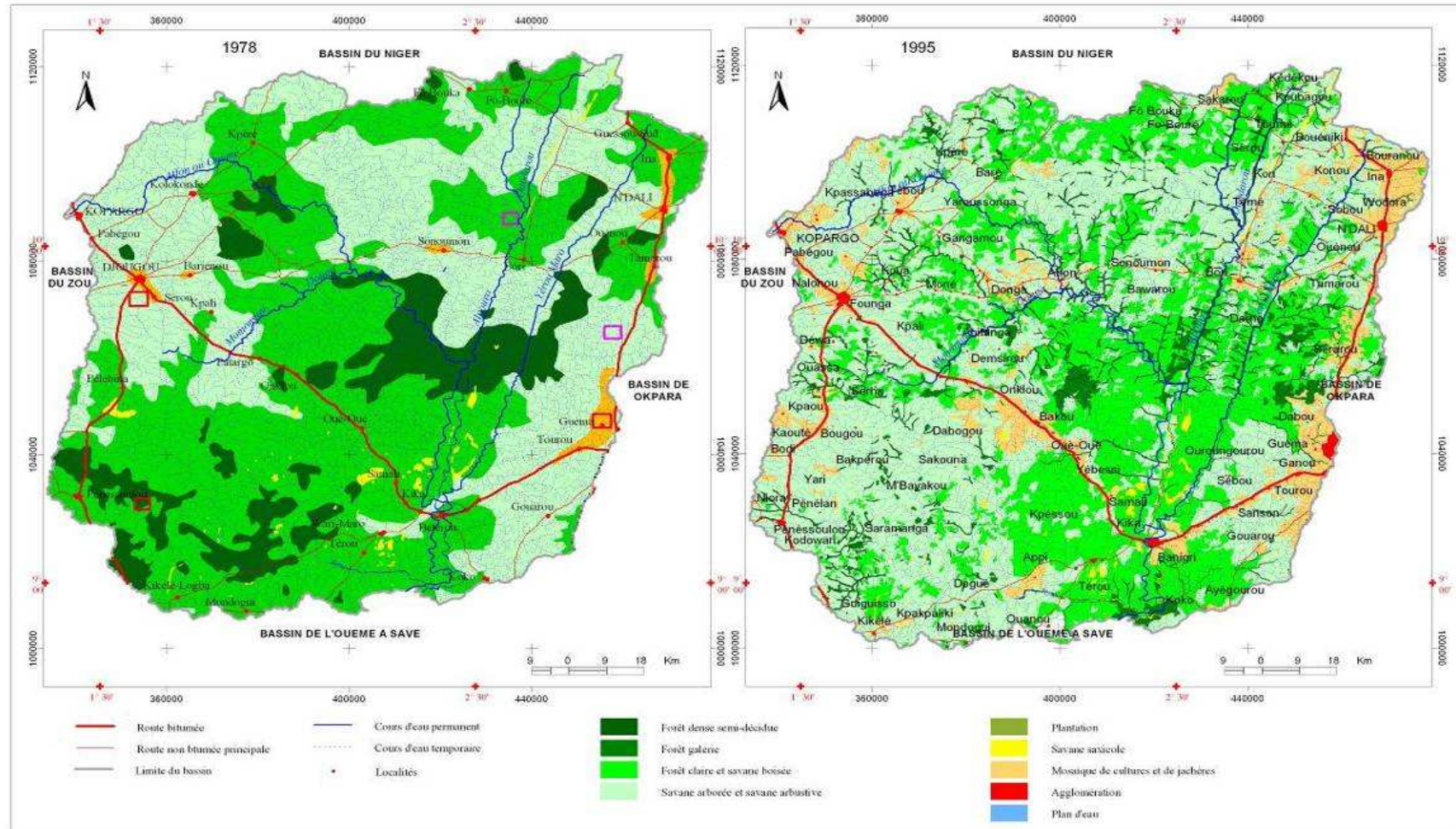


Figure 4- 8 : Evolution de l'occupation du sol entre 1978 et 1995 sur l'OHHVO (Abdoulaye D., 2010)

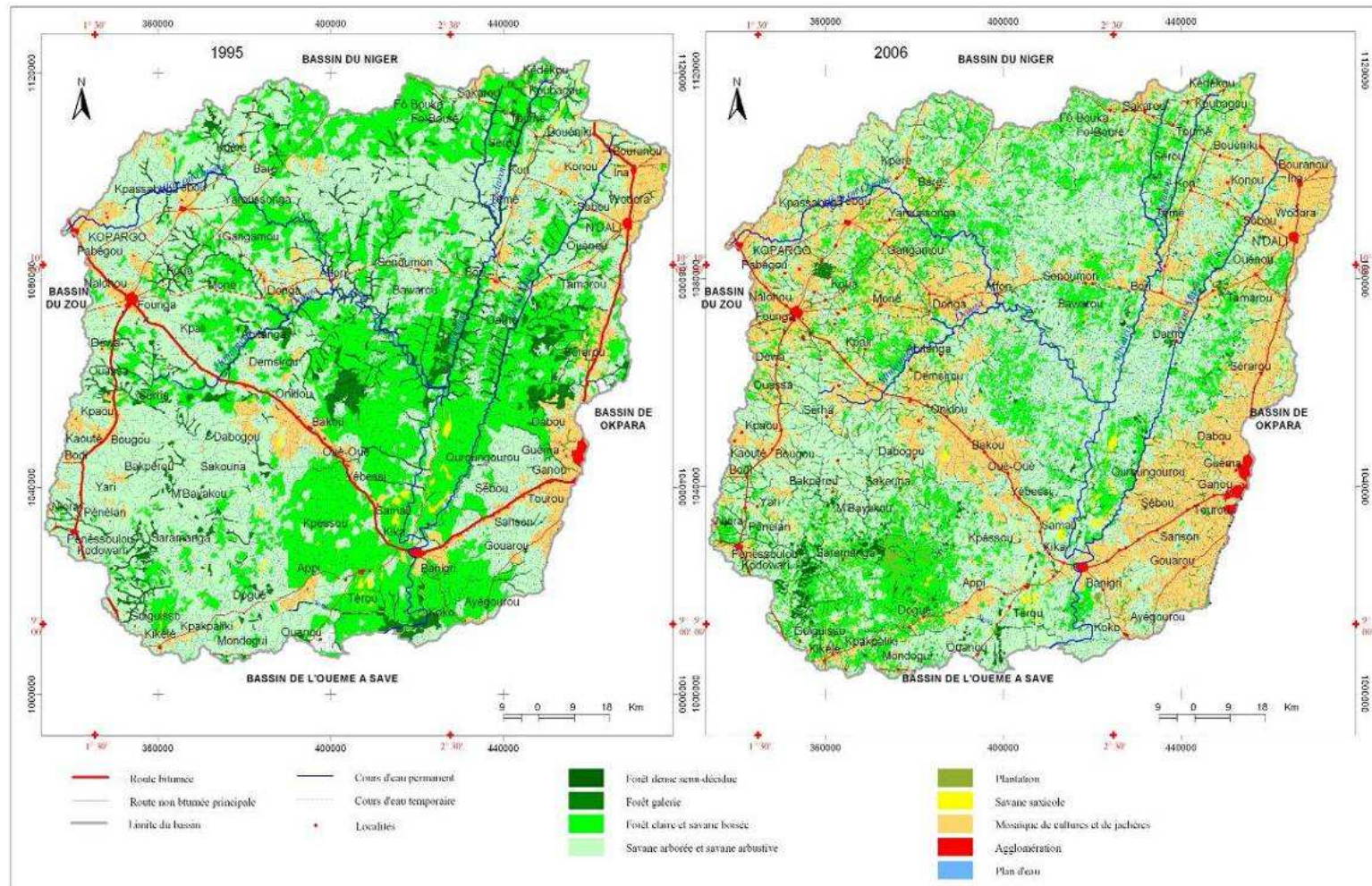


Figure 4- 9 : Evolution de l'occupation du sol entre 1995 et 2006 sur l'OHVVO (Abdoulaye D., 2010)

CHAPITRE 5 : Réseau d'observations et données utilisées

Dans ce chapitre, seront présentés successivement le dispositif qui sert aux mesures de terrain, et les données utilisées pour la présente étude. Ces données concernent respectivement la pluviométrie, l'évapotranspiration, les écoulements, la piézométrie et la chimie (conductivité électrique) des eaux.

5.1 Réseau d'observations hydrométéorologiques

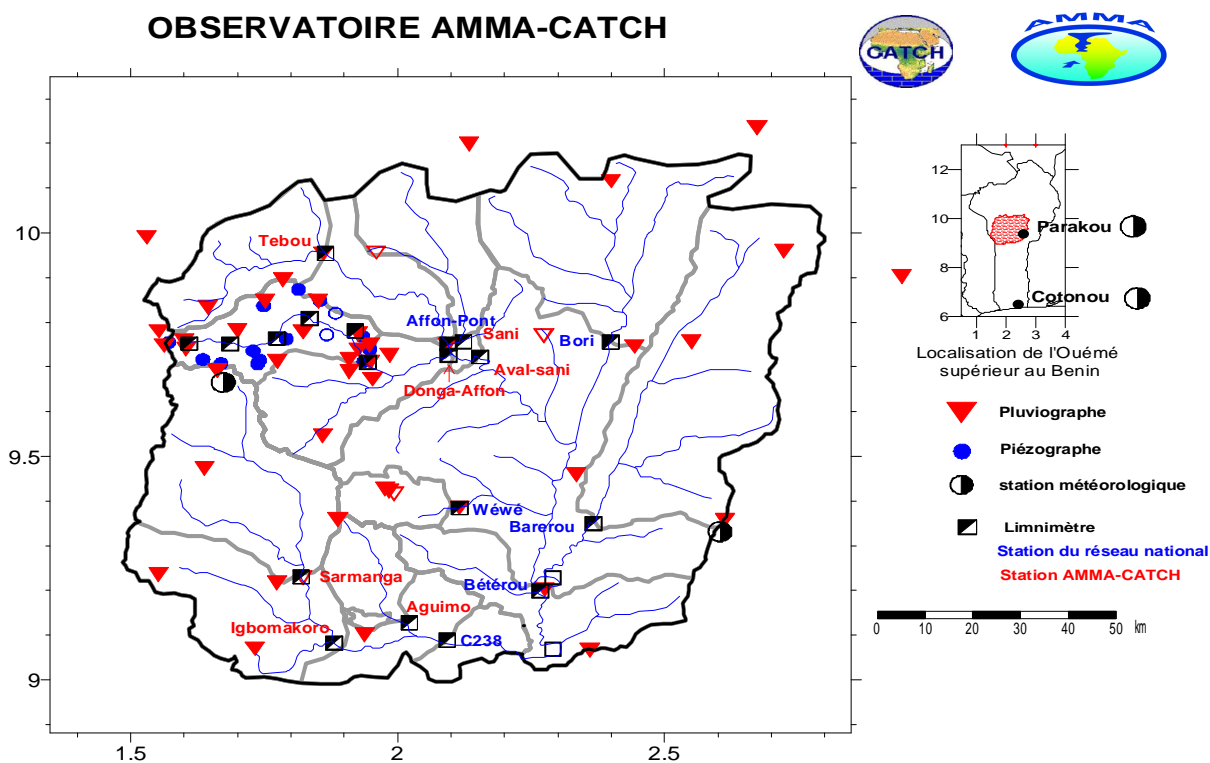
L'instrumentation de l'Observatoire Hydrométéorologique de la Haute Vallée de l'Ouémé (OHHVO, qui intègre le bassin de l'Ouémé à Bétérou) s'appuie à la base sur un réseau national de 12 pluviomètres gérés par la Direction Nationale de la Météorologie (DNM) et de 6 limnigraphes gérés par la Direction Générale de l'Eau (DG-Eau). À ce réseau primaire, s'est ajouté celui du projet AMMA-CATCH, en permanente évolution depuis 1997.

En 2006, date de démarrage de notre étude, le dispositif de mesure de l'ORE/SO AMMA-CATCH était constitué de (*Figure 5- 1*) :

- 46 pluviographes pour le suivi des précipitations ;
- 19 stations limnimétriques (dont les 6 du réseau national, conjointement gérées par l'IRD et la DG-Eau) pour le suivi des débits des rivières (cotes instantanées et conductivité électrique de l'eau) ;
- 36 piézomètres et 32 puits/forages dont 13 équipés en enregistreur automatique pour le suivi de la dynamique des eaux souterraines (niveau piézométrique et conductivité électrique de l'eau) ;
- 4 stations sur transects pour le suivi de l'humidité du sol ;
- 1 station météorologique, et 3 stations de mesure de flux surface-atmosphère (sur lesquelles sont réalisées des mesures météorologiques complémentaires).

Pour l'analyse approfondie à fine échelle des processus du fonctionnement hydrologique du bassin, trois toposéquences ont été instrumentées sur les trois principaux types de couvert végétal du bassin (jachère-culture, savane arbustive, et forêt) depuis 2004. Dans chaque cas, trois stations localisées respectivement sur le haut, le milieu et le bas de la toposéquence ont été instrumentées avec des sondes automatiques permettant le suivi de la teneur en eau du sol, de la

succion, de la température et des niveaux d'eau au niveau de plusieurs piézomètres crépinés à 2, 10 et 20 m de profondeur.



D'après le Guide des Pratiques Hydrologiques (OMM, 1994), le réseau de suivi des ressources en eau doit répondre à certaines normes de densité telles que rappelées dans le **Tableau 5- 1**. On note que sur l'OHHVO, ces normes sont largement respectées et cette situation est unique au Bénin.

Tableau 5- 1 : Densité du réseau d'observation OHHVO comparée aux normes OMM

Type de station	Normes OMM ¹¹	Nombre de stations sur l'OHHVO	
		selon norme OMM	existant
Pluviographique	1 station pour 2.500 à 5.750 km ²	3 à 6	46
Evaporimétrique	1 station pour 50.000 km ²	1	5 ⁽¹²⁾
Débitmétrique	1 station pour 1.000 à 1.875 km ²	8 à 15	19
Piézométrique	1 station pour 1.600 km ²	9	32 ⁽¹³⁾

¹¹ : Les normes OMM sont définies par unité physiographique et celles mentionnées ici se réfèrent aux zones montagneuses, aux plaines intérieures et aux régions de collines.

¹² : Sur l'OHHVO, existent les stations météorologiques de Djougou et de Parakou. Si en plus, on prend en compte les 3 stations de flux (qui servent à mesurer l'ETR), on a au total 5 stations.

Remarque : Nous venons de voir que la densité des pluviographes sur l'OHHVO respecte les normes OMM. Toutefois, d'autres recommandations (Bertrand-Krajewski J.-L. *et al.*, 2000) indiquent le contraire. En effet, certains auteurs, tenant compte de la variabilité spatiale de la pluviométrie, ont proposé, à partir de plus de 270.000 simulations de répartition des pluviographes sur les bassins versants, de relier le nombre idéal de pluviographes (N_p) sur un bassin versant à sa superficie (A) exprimée en km^2 par la relation $N_p = 2,5955 \times A^{0,457}$ (Paturel E. *et al.*, 1986). Cette relation, qui permettrait d'assurer dans 75% des cas une incertitude sur la lame précipitée sur le bassin versant inférieure à 20% [l'incertitude sur la lame journalière précipitée sur l'OHHVO a été évaluée à 8,61% (Zannou A. B., 2006)], donne sur l'OHHVO un nombre idéal de pluviographes égal à 208, soit presque 4,5 fois plus que la densité actuelle. Dans le même sens, d'autres travaux établissent la relation $N_p = A^{0,5}$, pour obtenir des données d'entrée satisfaisantes pour les modèles de simulation de la transformation pluie-débit, en considérant une incertitude maximale admissible sur les débits calculés à l'exutoire des bassins versants de l'ordre de 20 à 30% (Schilling W., 1983, 1991). Cette dernière relation donne 120 pluviographes sur l'OHHVO, soit 2,6 fois plus que la densité actuelle.

Un certain nombre d'instruments ou d'appareils spécifiques de mesure ont été déployés sur le bassin pendant les phases EOP et SOP d'AMMA. A titre informatif, bien que les données de ces équipements n'intègrent pas le présent travail, on peut en citer quelques-uns :

- le radar bande X (X-Port) du Laboratoire d'étude des Tranferts en Hydrologie et Environnement (LTHE) a été installé de 2005 à 2008 à Djougou en vue d'améliorer la connaissance de la dynamique spatio-temporelle des systèmes précipitants avec une portée de 90 km ;

- un disdromètre a participé aux campagnes de mesures de 2005 à 2008, il émet un signal lumineux qui est atténué par les gouttes d'eau lors de leur passage dans le faisceau. Cette atténuation permet d'obtenir une information concernant la taille (diamètre), la vitesse et le nombre des gouttes. Par intégration, on obtient la quantité de pluie à la station ;

- le radar « Ronsard » du CETP (Centre français d'Etude de l'Environnement Terrestre et Planétaire) installé à Copargo en 2006, lors de la phase intensive du programme, et qui permet de suivre le déplacement des systèmes précipitants avec une portée de 200 km.

¹³ : Ici, on ne prend en compte que les 32 puits/forages bien répartis sur l'OHHVO, les 36 piézomètres complémentaires n'étant installés que sur des toposéquences ponctuelles à l'échelle du bassin de la Donga pour des études fines très localisées.

5.2 Données utilisées

5.2.1. Description des données pluviométriques

Le parc des 46 appareils installés dans les stations pluviométriques est composé essentiellement de pluviographes à augets basculeurs. Les données brutes sont les temps de basculement des augets correspondant à une hauteur de pluie égale à 0,5 mm. Pour l'exploitation, on établit ensuite les cumuls sur différents pas de temps (5 min, jour, année).

Des lacunes existent dans les chroniques. Elles sont imputables à des défauts d'alimentation en énergie électrique (batterie, panneau solaire), à l'obstruction de la base du cône du pluviographe aboutissant aux augets et à du vandalisme (vol du panneau solaire). Des corrections sont donc apportées à ces lacunes en tenant compte de la cohérence entre le contrôle seau (en mm, l'eau ayant fait basculer les augets est conservée et sert de cumul de contrôle) et le nombre de basculements sur la période de fonctionnement. On tient compte également de la cohérence entre les données de la station considérée et celles observées aux stations les plus proches.



(a)



(b)

Figure 5- 2 : Photo d'un pluviomètre (a) et d'un pluviographe à auget basculeur (b)

La configuration du réseau pluviométrique varie d'une année à l'autre (Afouda A. *et al.*, 2001a, Afouda A. *et al.*, 2001b, Boubkraoui S. *et al.*, 2001, Bouchez J-M. *et al.*, 2001a, Bouchez J-M. *et al.*, 2001b, Afouda A. *et al.*, 2002, Afouda A. *et al.*, 2003) et sur l'ensemble du réseau, le taux de lacune est relativement élevé, entre 7 et 40% selon les années (Lawin E. A., 2007).

Les lames de pluies ponctuelles observées sur le réseau pluviométrique ont été krigées (ajustement d'un variogramme exponentiel sur les données normées par leur écart-type) dans le cadre du programme AMMA-CATCH (Gosset M. *et al.*, 2007; Lawin A. E. *et al.*, 2007; Lawin E. A. *et al.*, 2010), et les lames journalières moyennes sur nos sous-bassins sont disponibles sur la période 1997-2006 avec leur variance d'estimation.

La pluviométrie moyenne annuelle sur l'Ouémé à Bétérou pendant la période 1997-2006 est présentée à la **Figure 5- 3**. On constate que les années sèches les plus déficitaires sont 2000 et 2001 tandis que 1998, 1999 et 2003 ont été les années humides les plus excédentaires. Ces chiffres donnent une pluviométrie moyenne annuelle de l'ordre de 1147 mm avec une incertitude moyenne¹⁴ d'environ 2,65%. Les calculs antérieurs (Zannou A. B., 2006) ont par ailleurs montré sur l'OHHVO que :

- L'incertitude moyenne sur la pluie mensuelle est de 4,55 % ;
- L'incertitude moyenne sur la pluie décadaire est de 7,14 % ;
- L'incertitude moyenne sur la pluie journalière est de 8,61 %.

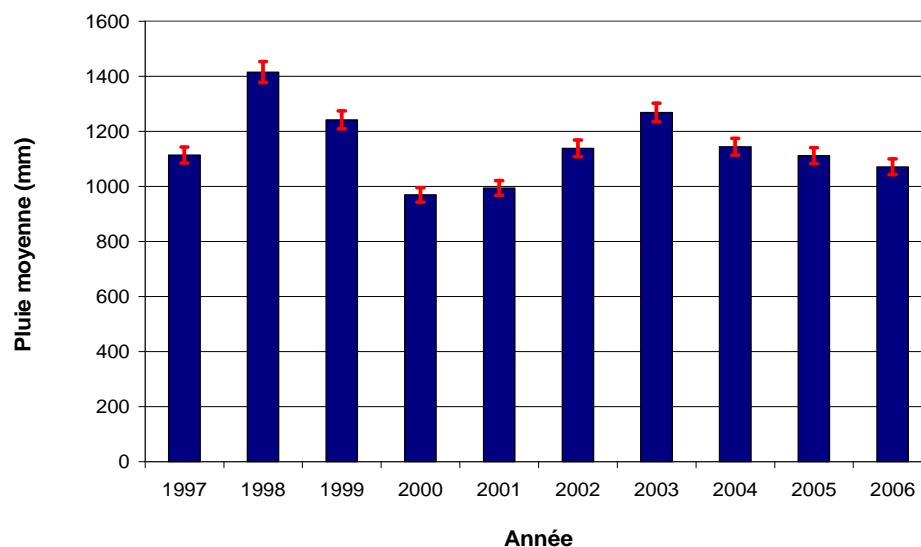


Figure 5- 3 : Pluviométrie moyenne annuelle 1997-2006 sur l'Ouémé à Bétérou et barres d'erreur associées (Zannou A. B., 2006).

On enregistre ainsi une décroissance de l'incertitude moyenne sur la pluie à mesure que le pas de temps utilisé augmente. Ce qui indique une atténuation de l'incertitude liée à l'effet

¹⁴ Intervalle de confiance à 95% à calculée partir de l'écart-type de krigeage.

d'agrégation de la variable (résultat similaire sur les volumes écoulés selon l'échelle spatiale). Ce résultat corrobore la thèse selon laquelle les phénomènes naturels en général, et les processus hydrologiques en particulier sont connus avec plus de précision aux grandes échelles : plus on descend vers une échelle plus petite de temps, plus l'incertitude augmente.

La répartition mensuelle et décadaire de la pluie annuelle sur l'OHHVO est très homogène d'un sous-bassin à l'autre (*Figure 5- 4*) entre 1998 et 2005. On constate que chaque mois affiche une part assez constante dans le cumul annuel, cette part pouvant atteindre son maximum (20-23%) au mois d'août et son minimum au mois de décembre selon les sous-bassins. L'écart entre sous-bassins ne dépasse jamais 3% et est généralement de l'ordre de 1 à 1,5%. Au pas de temps décadaire, on enregistre une variation caractéristique en dents de scie du phénomène. Ainsi, certaines décades semblent être privilégiées par la pluie. Les décades 4 à 8 (1^{er} février – 20 mars) affichent toujours les mêmes parts de pluie tombée quel que soit le sous-bassin. On détecte bien une caractéristique de la mousson ouest-africaine aux décades 17 et 18 (10 au 30 juin) ; car, il y a une stabilisation des observations et un signal un peu plus brouillé que pour les autres décades : cette période correspond au phénomène qualifié de « saut de mousson » par des études antérieures dans la sous-région ouest-africaine (Janicot S. and Sultan B., 2001). La date moyenne du saut de mousson sur la zone est le 27 juin indépendamment du caractère excédentaire ou déficitaire de la saison (Lawin E. A., 2007).

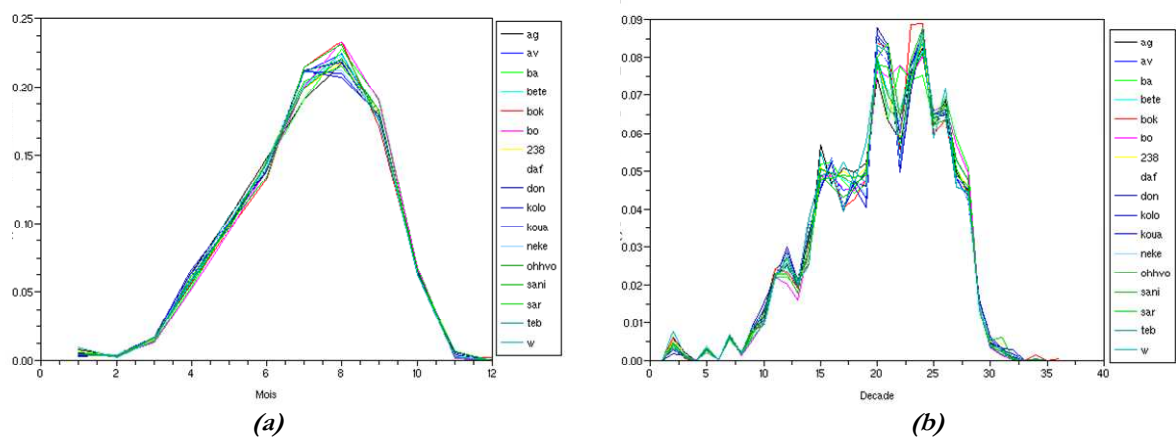


Figure 5- 4: Répartition mensuelle (a) et décadaire (b) en fraction de la pluie annuelle sur les sous-bassins de l'OHHVO (Zannou A. B., 2006)

En termes de variabilité spatio-temporelle, il existe une tendance entre la variabilité interannuelle de la précipitation et l'échelle spatiale à laquelle on opère (Zannou A. B., 2006). La pluviométrie de la zone présente un gradient Est-Ouest de 1,4 mm/km environ (Lawin E. A., 2007). En outre, la variabilité temporelle interannuelle (estimée par l'écart-type interannuel des

lames krigées par sous-bassin) de la pluie (>10%) est supérieure à sa variabilité spatiale (estimée par l'écart-type spatial des lames krigées pour chaque année (<10%), et que la variabilité spatiale selon les années n'est pas liée de façon évidente au cumul annuel moyen de précipitations (Zannou A. B., 2006). La dynamique saisonnière des années humides ne semble pas différente de celle des années sèches à l'exception du retrait précoce de la mousson au cours des saisons déficitaires (Lawin E. A., 2007).

5.2.2. Description des données d'évapotranspiration

L'évapotranspiration constitue une variable principale du bilan hydrologique surtout en zone tropicale où elle peut représenter 50 à 90% du bilan (Servat E., 1993, Derive G., 2003). Toutefois, elle est d'accès difficile et son calcul nécessite l'acquisition d'un grand nombre de données météorologiques. La station, de type *Campbell CR 10 X*, installée en 2002 dans la cour du Service des Travaux Publiques de Djougou, effectue des mesures météorologiques (vent, pression, température, humidité et rayonnement) au pas de temps de 15 minutes.

La mesure de l'évapotranspiration réelle (ETR : quantité totale d'eau qui s'évapore du sol et des plantes lorsque le sol est à son taux d'humidité naturel, et qui peut être évaluée de façon ponctuelle et directe en se basant par exemple, sur les pertes en eau d'une case lysimétrique portant de la végétation) est complexe, délicate et onéreuse, si bien que de nombreux auteurs ont développé des relations empiriques la reliant à l'évapotranspiration de référence (ET₀). L'évapotranspiration de référence (confondue ici avec l'évapotranspiration potentielle) a été calculée avec la formule de Penman-Monteith (Riou C., 1975) selon la méthode proposée par la FAO (FAO, 1998) avec les données de la station météorologique de Djougou (Roko F., 2007). Cette méthode définit une évapotranspiration de référence ET₀ correspondant à une surface de référence bien irriguée (gazon de 12 cm de haut, albédo de 0,23 et résistance de surface de 70 s/m). Avec ces hypothèses, l'ET₀ est calculée à partir de la formule de Penman-Monteith comme suit :

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \psi \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \psi (1 + 0,34 u_2)} \quad (\text{éq. 5-1})$$

où ET₀ désigne l'évapotranspiration de référence (mm/j), R_n la radiation nette (MJ.m⁻².j⁻¹), G le flux de chaleur du sol (MJ.m⁻².j⁻¹), T la température moyenne journalière (°C), u₂ la vitesse du vent à 2 m du sol (m/s), e_s et e_a les pressions de vapeur saturantes et réelles (kPa), Δ la pente de la

courbe de pression de vapeur à la température moyenne de l'air ($kPa/^\circ C$) et ψ la constante psychrométrique ($kPa/^\circ C$).

Dans cette étude, l'évapotranspiration potentielle (assimilée à l' ET_0) est déterminée au pas journalier (**Figure 5- 5**). La pression de vapeur réelle (e_a) est calculée à partir des minimum et maximum de température observés dans la journée au pas de 15 minutes. La description détaillée des variables et du calcul est disponible dans le guide conçu à cet effet (FAO, 1998).

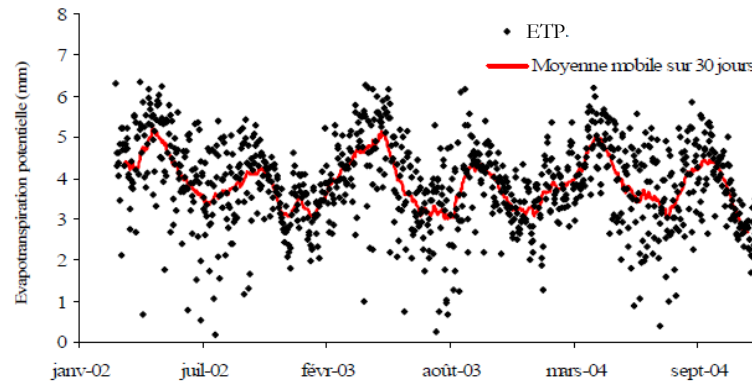


Figure 5- 5 : ETP Penman-Monteith, calculée à partir des mesures à la station météorologique de Djougou sur la période 2002-2004

Les années 1997 à 2001, ainsi que les 3 premiers mois de l'année 2002 présentant des lacunes ont été reconstitués par corrélation entre les données des stations synoptiques de Parakou et de Natitingou (recueillies par la Direction de la Météorologie Nationale) et les données de la station météorologique de Djougou sur les années de la période 2003 à 2005.

A défaut d'une information spatialisée sur la valeur de l'ETP, cette estimation locale de 1997 à 2006 sera prise comme variable de forçage à l'échelle entière du bassin versant de l'Ouémé à Bétérou lors de la mise en œuvre du modèle hydrologique.

Aussi, est-il important de signaler que dans la zone d'étude, l'ETR est mesurée de manière ponctuelle par les stations de flux à travers le bilan d'énergie à la surface (Mamadou O. *et al.*, 2009, Périault A. *et al.*, 2009). Aujourd'hui, la méthode d'eddy covariance est considérée comme la méthode standard de mesure de flux de surface. Dans cette méthode, les flux turbulents sont calculés directement comme la covariance entre les fluctuations de la composante verticale de la vitesse du vent et les fluctuations d'un terme scalaire (température, humidité, concentration de CO_2). Il s'agit donc de mesures directes de la turbulence utilisées pour obtenir les flux de surface (Mamadou O., 2009, Mamadou O. *et al.*, 2009). Cette méthode permet de mesurer à l'échelle de quelques dizaines à quelques centaines de m^2 , le flux de chaleur latente en W/m^2 qui est lié à l'évapotranspiration réelle (ETR) en mm/j .

Les données utilisées dans la présente étude sont celles de la station de flux de Nalohou, au pas horaire et couvrent la période du 4 août 2007 au 31 décembre 2008. Mais la série n'est pas complète pour tous les jours (24 valeurs), si bien que, pour obtenir les valeurs journalières, il a été fixé un seuil d'au moins 18 données horaires (taux de lacunes maximal = 25%). Sur cette base, seules 8 données journalières sont disponibles en 2007 comme l'illustre la *Figure 5-6*.

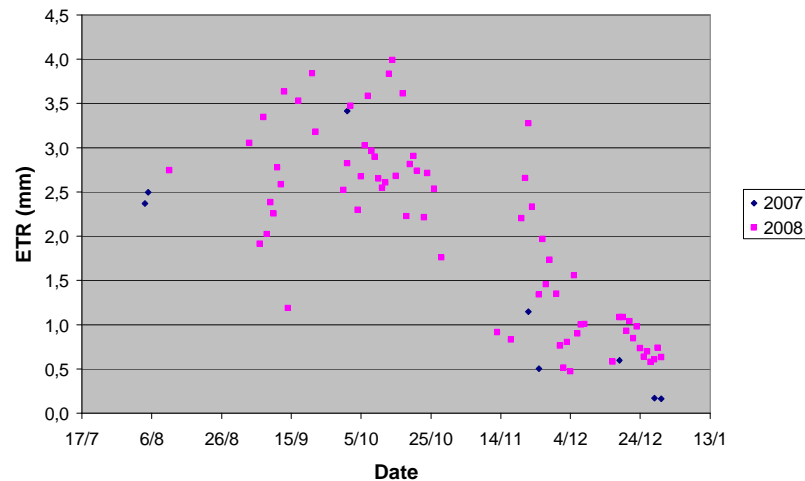


Figure 5-6 : ETR journalière calculée à partir des flux de surface (bilan d'énergie) par la méthode d'eddy-covariance sur le site Nalohou entre août 2007 et décembre 2008.

5.2.3. Description des données d'écoulement

5.2.3.1 Données limnimétriques

Au total, 19 stations hydrométriques sont installées et suivies sur l'OHHVO (cf. Annexe 3).

Il existe 3 types de données limnimétriques brutes (Bouchez J-M. *et al.*, 2003, Thévenot N. *et al.*, 2004, Zannou A. B., 2006) que nous traitons : les données "enregistreur" qui sont issues des limnigraphes enregistreurs (OTT Thalimedes¹⁵) dont sont équipées les stations (sauf une – Wéwé – où on dispose d'une sonde à pression Orphéus OTT), les données "lecteur" qui sont issues des lectures journalières ou bi-journalières des lecteurs d'échelles (toutes les stations équipées d'enregistreur ne sont pas suivies par un lecteur), et les données "contrôle" qui sont

¹⁵ OTT Messtechnik, Kempten, Germany

collectées lors des tournées des équipes d'hydrologues sur le terrain par une lecture de l'échelle limnimétrique. L'incertitude sur ces trois types de données brutes est de l'ordre de 0,5 cm car le Thalimèdes est paramétré en cm et l'échelle de lecture est graduée dans cette même unité.

Ces données brutes subissent 2 niveaux de traitement : nous corrigeons d'abord au niveau 1 les décalages de cote et/ou de temps et les inversions de données ; ensuite nous reconstituons au niveau 2 les valeurs manquantes en début de saison par des valeurs nulles, en milieu de saison par corrélation avec d'autres stations, et en fin de saison par la loi de tarissement de Maillet (Le Lay M., 2002, Avahounlin F., 2010).

5.2.3.2 Données de jaugeage

Des séries de jaugeages exploitables sont disponibles à chaque station hydrométrique et ont fait l'objet d'une synthèse aboutissant à l'établissement de courbes de tarage (Le Lay M. *et al.*, 2004) utilisées pour les premières études sur notre zone. Certaines stations sont suivies depuis les années 50 ou 70 (réseau national) ; par contre, la majorité des stations de l'OHHVO sont en service depuis environ 1998 à 2000. En 2006, nous avons évalué le nombre moyen de jaugeages par station à 18 avec 2 cas extrêmes : Barérou (41 jaugeages) et Bokpérou ou Aguimo (9 jaugeages). La plupart de ces jaugeages sont réalisés par la technique de l'ADCP¹⁶ (Acoustic Doppler Current Profiler), largement décrite dans la littérature (Le Coz J. *et al.*, 2008; Olivier A. *et al.*, 2008; Hauet A. *et al.*, 2009; Le Coz J. *et al.*, 2009).

Toutefois, ce nombre moyen de jaugeages cache des disparités significatives : certaines stations présentent des jaugeages mal répartis et disponibles seulement en basses eaux (cas de Aguimo, Bokpérou, Cote 238, Ara, Nékété et Sarmanga), ce qui est de nature à compromettre la représentativité du nuage des points jaugés et par conséquent, d'importantes incertitudes sur l'extrapolation en hautes eaux (Mathevet T. *et al.*, 2008; Olivier A. *et al.*, 2008b; Pobanz K. *et al.*, 2008). A cet effet, la station de Bokpérou a d'ailleurs fait l'objet d'une étude hydraulique particulière (Richard A. *et al.*, 2007). Cet aspect essentiel de la qualité des données de débit, données dont on connaît l'importance en hydrologie et en modélisation, a été examiné de près

¹⁶ ADCP Workhorse Rio Grande, RD-Instruments, Poway (CA), USA

par le développement d'une méthode réaliste pour traiter l'incertitude sur les débits en hautes eaux (Zannou A. B., 2006).

Dans ce précédent travail, nous avons constaté que les courbes de tarage, calculées par les formules du « Seuil » et « Manning-Strickler » sont généralement confondues dans la gamme des cotes où l'on a des données de jaugeages et s'écartent vers les hautes eaux. Cela s'explique par le fait, dans la formule de Manning-Strickler, en plus du débit et du rayon hydraulique (assimilable à la hauteur d'eau H pour une rivière de très large section), il y a une variable supplémentaire liée à l'écoulement : la section mouillée, ce qui fait qu'on a un meilleur contrôle en hautes eaux où il n'y a pas de jaugeages. Classiquement d'un point de vue hydraulique, la courbe de vitesse d'écoulement $V=f(H)$ présente un aplatissement vers les hautes eaux (Bertrand-Krajewski J.-L. *et al.*, 2000), c'est-à-dire que $V=$ constante ou varie très peu en hautes eaux, ce qui fait tendre le régime d'écoulement vers un régime uniforme (vitesse=constante) et on se retrouve dans des conditions idéales d'application de la loi de Manning-Strickler. En conséquence, nous avons retenu la courbe qui s'ajuste le mieux aux données en hautes eaux, et à défaut, la courbe Manning-Strickler.

Néanmoins, sur 13 des 19 stations hydrométriques ; nous avons dû recourir à une courbe combinée (des 2 formules) comme l'illustre la **Figure 5- 7** pour la station Bétérou :

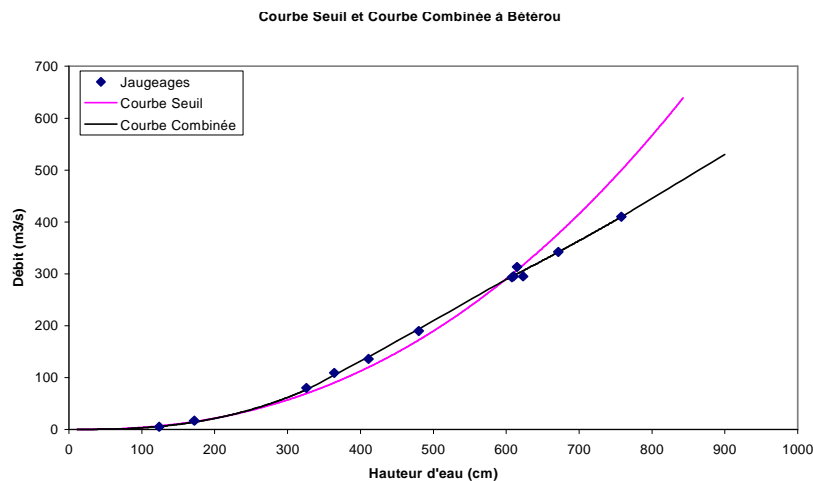


Figure 5- 7 : Courbe de tarage de la station hydrométrique de l'Ouémé à Bétérou (Zannou A. B., 2006).

Une méthode améliorée a été testée et validée pour le calcul des enveloppes de confiance des courbes de tarage sur les stations hydrométriques où l'on ne dispose pas de jaugeages en hautes eaux (Zannou A. B., 2006). Nous avons développé cette méthode pour les besoins de la circonstance (rendre réaliste les incertitudes en hautes eaux). Elle est surtout adaptée à des

besoins d'ingénierie, et son principe repose sur l'hypothèse fortement discutable d'une dispersion des points jaugés en hautes eaux équivalente à celle observée en basses eaux¹⁷. Elle a néanmoins été jugée applicable sur l'OHHVO et le **Tableau 5- 2** présente la synthèse des résultats que nous obtenus à toutes les stations.

Tableau 5- 2 : Incertitude sur les valeurs de débit et de volume écoulé en 2004 à toutes les stations hydrométriques de l'OHHVO (Zannou A. B., 2006).

Station	Courbe	%Q	%V2004	Priorité de Jaugeage
Cote 238	combinée	12,30	12,50	1
AffonPont	combinée	23,85	24,10	1
Barérou	combinée	6,40	6,98	
Bétérou	combinée	19,11	9,50	
Bori	combinée	9,59	5,44	
Wéwé	combinée	6,69	8,77	2
Aguimo	seuil	18,86	19,85	1
Ara	combinée	36,8	36,33	1
Aval Sani	seuil	14,71	14,79	
Bokpérou	strickler	45,57	45,90	1
Donga Affont	strickler	25,43	21,22	2
Donga Pont	combinée	14,58	21,07	1
Igbomakoro	strickler	14,67	13,76	2
Kolokonde	combinée	9,06	7,96	2
Koua	combinée	9,67	10,43	2
Nekete	combinée	10,68	10,72	2
Sani	seuil	17,86	20,53	1
Sarmanga	combinée	180,20	79,76	1
Tébou	combinée	12,17	11,90	2

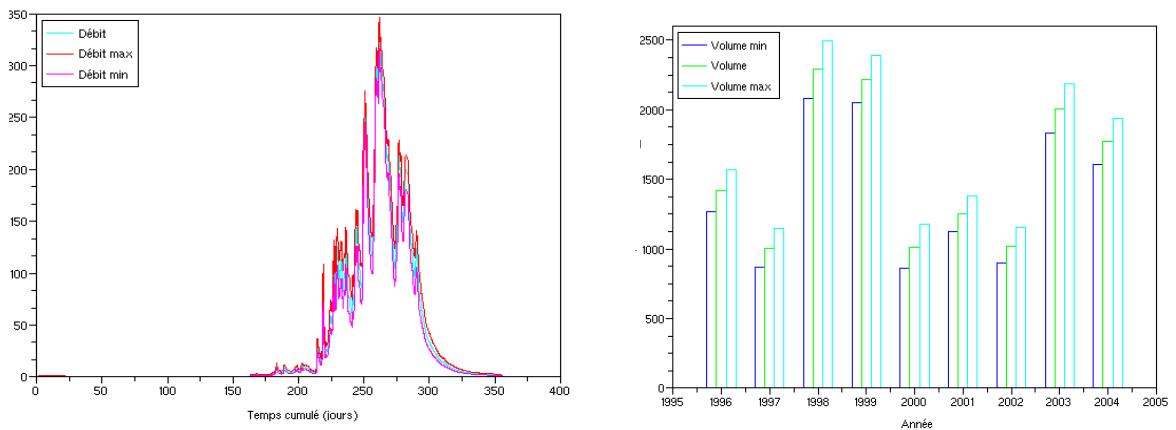
Les stations qui présentent les plus faibles taux d'incertitude sont Bori (%V= incertitude moyenne sur le volume de 2004=5,44%) et Barérou (%Q=incertitude moyenne sur le débit=6,40%), elles sont à l'opposé de Bokpérou (%V=45,90%) et Sarmanga (%V=79,76%).

Ces résultats nous ont permis de définir un ordre de priorité entre stations pour les campagnes de jaugeage, dans la mesure où ces incertitudes sont essentiellement liées au nombre de jaugeages, à leur répartition entre basses et hautes eaux et à leur dispersion.

¹⁷ Cette hypothèse n'est pas souvent vérifiée, elle doit donc être impérativement validée sur des stations ayant suffisamment de jaugeages (tant en hautes qu'en basses eaux) avant d'utiliser la méthode, ce qui représente une limite non négligeable.

5.2.3.3 Hydrogrammes et volumes écoulés

Calculés avec les données limnimétriques et les courbes de tarage, les hydrogrammes et les volumes moyens annuels écoulés sont disponibles sur tous les sous-bassins de la haute vallée de l'Ouémé. Ils ont fait l'objet de différents rapports de campagne (Thévenot N. et al., 2002; Bouchez J-M. et al., 2003; Thévenot N. et al., 2003; Thévenot N. et al., 2004). Nous avons réactualisé et mis à jour la base des données hydrométriques de l'OHHVO avec les données des années récentes y compris leurs incertitudes respectives à l'issue de l'actualisation des courbes de tarage. Les données de l'Ouémé à Bétérou de 1997 à 2006 ont été utilisées pour la présente étude.



(a) : Débit journalier en m^3/s

(b) : Volume annuel en millions de m^3

Figure 5- 8 : Hydrogramme 2002 (a) et volume écoulé 1996-2004 (b) à la station hydrométrique de l'Ouémé à Bétérou avec incertitudes associées (Zannou A. B., 2006).

Par exemple, l'année 2002 a connu un volume moyen écoulé d'environ 1 milliard de m^3 (compris entre 0,9 et 1, 15 milliards de m^3) sur l'Ouémé à Bétérou avec un débit annuel maximal d'environ $320 m^3/s$ (compris entre 300 et $350 m^3/s$) comme le montre la **Figure 5- 8**.

5.2.4. Description des données piézométriques

La mise en place du réseau piézométrique sur l'OHHVO a débuté en 1999 avec 6 puits d'observations équipés de limnigraphe à flotteur (type Thalymédes OTI). Mais l'essentiel du réseau actuel a été installé en 2000. On compte au total 32 puits d'observations dont 13 sont équipées de système de mesure automatique et suivies trois fois par jour par des observateurs villageois recrutés et formés sur place. Les autres sont uniquement suivies par les observateurs. Les puits sont, pour la plupart, cimentés à partir d'un empilement de buses d'environ 1 m de

hauteur à paroi étanche, sauf à la jointure. Les diamètres des puits varient de 1 à 2 m. Ils sont généralement surmontés d'une margelle dont la hauteur par rapport au sol varie dans l'ensemble de 0,6 à 1,25 m.

Sur le bassin de la Donga, les profondeurs totales des stations piézométriques varient de 7 à 18 m, mais près de 60 % présentent des profondeurs comprises entre 11 et 13 m. Les altitudes s'échelonnent de 340 à 480 m (Kamagaté B., 2006). Les données piézométriques de 1999 à 2002 sur le bassin de la Donga (sous-bassin de l'Ouémé à Bétérou) ont fait l'objet d'un rapport (Kamagaté B. *et al.*, 2003b).

Remarque: Sur le bassin de la Donga (586 km²), super-site du Programme AMMA-CATCH, sont installés 36 piézomètres rapprochés sur des toposéquences pour des études fines à l'échelle locale. Les données de ces piézomètres n'ont pas été prises en compte dans la présente étude sur l'Ouémé à Bétérou (10.080 km²) afin d'éviter des biais sur la dynamique piézométrique moyenne.

Au total sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou, seuls les 17 puits d'observation ayant des taux de lacunes (dans les données journalières) inférieurs à 10% par an ont été considérés dans la présente étude (*Figure 5- 9a*).

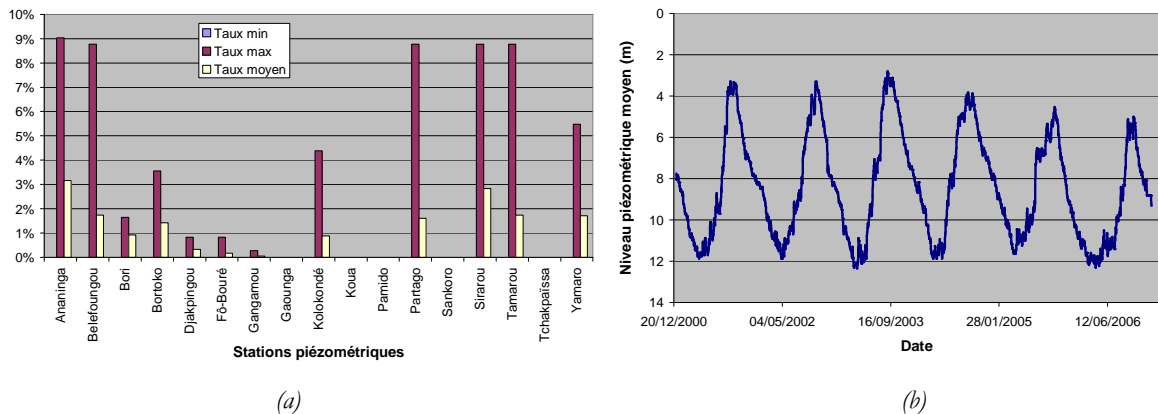


Figure 5- 9: Taux de lacunes aux 17 puits d'observations retenues (a) et niveaux piézométriques moyens du bassin de l'Ouémé à Bétérou (b) entre 2001 et 2006

Les données journalières de piézométrie observées (niveaux de nappe) sont disponibles sur la période 2001-2006 et le taux moyen de lacunes sur les 17 stations et les 6 années est de 4,3% (1.605 valeurs manquantes sur 37.247 valeurs attendues). Chaque lacune $X_{i,j}$ du jour i à la station j est reconstituée par régression linéaire multiple, avec comme variables explicatives les données $X_{i,k}$ du même jour aux autres stations k (variant de 1 à n), c'est-à-dire :

$$X_{i,j} = \sum_{k=1}^n \alpha_{i,k} X_{i,k} + C \quad (\text{éq. 5- 2})$$

avec $\alpha_{i,k}$, les coefficients obtenus par régression linéaire multiple sur les données de toutes les dates (toutes années confondues) sur lesquelles la station expliquée i et les autres stations explicatives k en possèdent, et C une constante.

La dynamique piézométrique moyenne de la zone d'étude indique une fluctuation de l'ordre de 9 mètres (*Figure 5- 9b*) avec une tendance à la baisse des 3 premières années 2001-2003 aux 3 dernières années 2004-2006.

Des perturbations observables dans les chroniques des puits d'observation proviennent des puisages domestiques. Les prélèvements villageois (matin, milieu de journée et soir), aussi bien en saison sèche qu'en saison pluvieuse, modifient le niveau piézométrique véritable de la nappe en induisant un cône de rabattement local. Mais l'impact semble plus important en saison sèche. La conséquence en est que le niveau statique n'est jamais observé. Mais l'estimation d'une ampleur moyenne des prélèvements villageois à partir uniquement de la piézométrie reste très complexe du fait de la très forte variation des intensités de puisage (Kamagaté B., 2006). L'essentiel des ressources en eau à usage domestique provient des puits villageois disséminés sur l'ensemble du bassin. Les prélèvements ont été estimés en 2003 par suivi de terrain des puisages quotidiens, dans neuf villages choisis de façon homogène sur l'ensemble du bassin de la Donga (comptage journalier du nombre de seaux d'eau extraits par puits dans la localité choisie) et on a trouvé une consommation domestique en eau de l'ordre de 21 l/hab/jour (Kamagaté B., 2006), valeur proche de celle de 17 l/hab/jour estimée pour l'ensemble de la haute vallée de l'Ouémé (Hadjer K. *et al.*, 2005). Ceci implique des prélèvements anthropiques faibles, de l'ordre de 0,2 mm/an (Kamagaté B., 2006).

5.2.5. Description des données géochimiques

Peu de données géochimiques anciennes existent sur la zone de l'OHHVO, et sont inexistantes pour les eaux de pluie et d'écoulement en rivière. Les quelques rares données qui existent sont relatives à l'hydraulique villageoise (Jacquin F. and Seygona Z.Y., 2004). La collecte des données géochimiques dans le cadre du programme AMMA-CATCH a démarré en 2002 et

donne lieu chaque saison à des prélèvements d'échantillons d'eau pour analyse au laboratoire¹⁸ ou à des analyses in-situ. Cette collecte a pour but de déterminer les caractéristiques hydrogéochimiques des eaux [pH, conductivité électrique (CE) et teneur en ions majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , NO_3^-)] en vue d'identifier leur origine potentielle. En effet, il est question d'identifier et d'évaluer la contribution des écoulements souterrains et de sub-surface à l'écoulement total en rivière (Kamagaté B., 2006, Atindogbé C., 2007, Akognongbé A., 2009).

Les données utilisées dans la présente étude sont celles de conductivité électrique (CE) des eaux mesurées à la station hydrométrique de l'Ouémé à Bétérou sur la période du 14 juin au 10 octobre (saison pluvieuse) des années 2005-2006 (*Figure 5- 10*). Cette période a été ciblée parce qu'elle représente la saison des pluies et des écoulements et peu de données existent à l'extérieur de ces dates, sauf après l'année 2006.

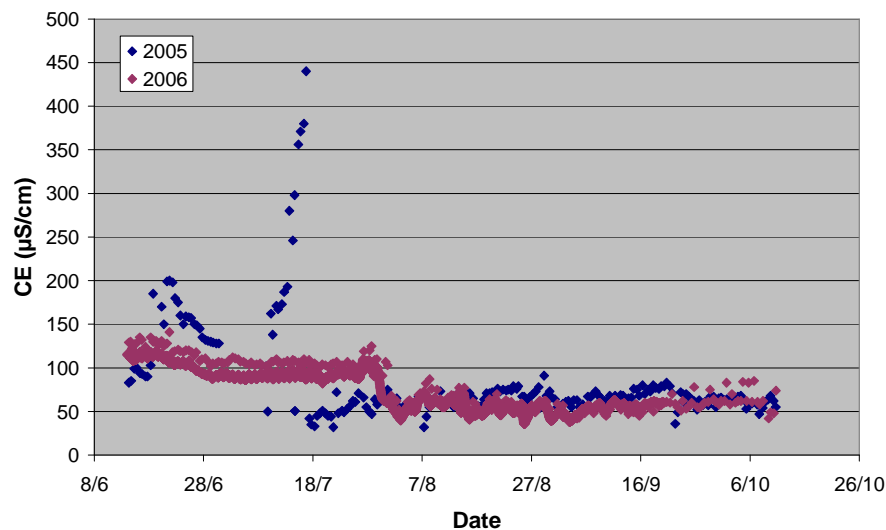


Figure 5- 10 : Chronique des données de CE du 14 juin au 10 octobre à l'exutoire de l'Ouémé à Bétérou sur la période 2005-2006

Ces données ont été mesurées à l'aide d'un conductimètre automatique de marque Greenspan¹⁹ (précision $\pm 0,2\%$) configuré à une résolution temporelle d'une mesure toutes les 15 minutes. Parallèlement à ce suivi en continu, un lecteur effectue des mesures ponctuelles trois (3) fois par jour (matin, midi, soir) doublées de mesures de contrôle prises lors des tournées

¹⁸ Laboratoire de Chimie des Eaux, HydroSciences Montpellier (HSM), <http://www.hydrosciences.org>

¹⁹ Greenspan EC350 www.greenspan.com.au

(mensuelles) des équipes techniques. Ces mesures ponctuelles et de contrôle se font à l'aide de conductimètre portatif de type Crison²⁰ (précision $\pm 10\%$) ou d'un multimètre WTW²¹ (précision $\pm 10\%$).

La *Figure 5- 10* montre deux phases : une première jusqu'à fin juillet pendant laquelle on enregistre des valeurs de CE supérieures à celles de la deuxième phase à partir de début août. Cela illustre le fait que, les écoulements en rivière sont dilués à partir du mois d'août correspondant à l'apport des eaux faiblement minéralisées issues essentiellement du ruissellement (Kamagaté B., 2006).

L'ensemble des données présentées dans ce Chapitre ont été utilisées dans notre étude pour mettre en œuvre le modèle hydrologique Topamma. Le prochain Chapitre présente une description théorique simplifiée de ce modèle après avoir rappelé les raisons qui nous ont poussé à son choix.

²⁰ Crison CM35 www.crison.es

²¹ WTW 340i www.wtw.com

CHAPITRE 6 : Choix et description théorique du modèle utilisé

D'après le *Dictionnaire Nouveau Petit Robert* (2007), un modèle est une **représentation simplifiée d'un processus ou d'un système**. Autrement, c'est un ensemble de définitions qui décrit les relations entre les différents éléments du système. Un modèle mathématique est une représentation formelle du système, formée d'expressions mathématiques et destinée à simuler les processus sous-jacents. Le choix de la structure d'un modèle, des équations qui régissent les relations entre les différents éléments et des paramètres à prendre en compte dépend de la disponibilité et de la qualité des données, de l'objectif recherché et de la précision désirée (Moussa R., 1991).

Avant de présenter le choix et la description théorique du modèle utilisé dans ce travail, il nous semble utile de rappeler quelques généralités à propos de la modélisation hydrologique. C'est ce qui sera fait dans la première section de ce Chapitre. Ensuite, seront précisés les critères qui ont gouverné le choix du modèle hydrologique Topamma pour cette étude. Enfin, la description théorique du modèle sera exposée pour la base conceptuelle TOPMODEL et sa version Topamma.

6.1 Généralités sur les modèles hydrologiques

Les modèles hydrologiques constituent des outils essentiels pour la gestion optimale des ressources en eau en vue de satisfaire les divers besoins. D'après le Guide des Pratiques Hydrologiques (OMM, 1994), l'expression «modélisation des systèmes hydrologiques» désigne habituellement l'utilisation d'expressions mathématiques et logiques définissant des relations entre les caractéristiques de l'écoulement (sorties) et ses facteurs conditionnels (entrées). Avec cette définition très large, il est nécessaire de distinguer deux objectifs principaux généralement assignés à la modélisation hydrologique : d'une part, la vérification de certaines hypothèses de fonctionnement hydrologique du milieu étudié, et, d'autre part, l'évaluation de la réponse du bassin sous réserve d'hypothèses définies (Beven K., 1989). Dans le premier cas, le modèle sert d'**outil d'analyse**, tandis que dans le second cas, il intervient comme **outil de prévision** (Peugeot C., 1995). Tout modèle hydrologique est donc un instrument permettant d'atteindre un objectif grâce à des données (Hubert P., 1984).

Ainsi, en fonction des buts visés, il existe tout un éventail de modèles. Il y a, d'une part, les modèles purement **empiriques et systémiques (dites «boîtes noires»)**, qui n'ont pas la prétention de simuler la structure interne et la réponse physique du bassin versant, et qui ne font que mettre en correspondance les entrées et les sorties du système que constitue un bassin versant. D'autre part, il y a des méthodes faisant intervenir des systèmes complexes d'équations basées sur des lois physiques et des concepts théoriques, qui régissent les processus hydrologiques (Moussa R., 1991), et que l'on appelle modèles **hydrodynamiques ou mécanistes**. Les modèles **conceptuels** se situent entre ces deux extrêmes. Ces derniers modèles consistent en représentations logiques d'éléments conceptuels simples, par exemple des réservoirs et des chenaux linéaires ou non linéaires, permettant de simuler les processus observés dans les bassins. Qu'ils soient empiriques, conceptuels ou hydrodynamiques, ces modèles fournissent des sorties auxquelles ne sont pas associées des probabilités d'occurrence. C'est pourquoi ils sont qualifiés de **déterministes**.

L'expression «modélisation des systèmes hydrologiques» englobe également la modélisation **stochastique** qui s'attache à la reproduction des caractéristiques statistiques des séries hydrologiques sans chercher à modéliser une quelconque relation entrée-sortie. Les relations purement empiriques ont été, et resteront, très utiles dans certaines circonstances, mais elles engendrent de sérieuses erreurs lorsqu'il est nécessaire de s'y fier dans des conditions non observées antérieurement. Les modèles par lesquels des concepts théoriques sont appliqués au traitement de processus hydrologiques variés et liés entre eux devraient être plus fiables dans ces situations, et leur application paraît plus prometteuse pour faire avancer la science.

Le développement d'un modèle hydrologique repose sur trois éléments : le système observé et sa discrétisation spatiale et temporelle, l'objectif de la modélisation et le choix d'une formulation de la réalité (Vissin E. W., 2007). A cet effet, les modèles hydrologiques sont nécessairement simplificateurs ou réducteurs de la complexité naturelle, si bien que le classement d'un modèle hydrologique comme modèle hydrodynamique, conceptuel ou empirique se heurte à l'arbitraire d'une décision quant au degré d'empirisme du modèle. Il est néanmoins proposé une classification rigoureuse (mais non exhaustive) des modèles hydrologiques (Moussa R., 1991, Peugeot C., 1995, Le Lay M., 2006). Cette classification, bien qu'elle soit sujette à discussion, peut être détaillée en s'appuyant sur 4 critères à savoir :

- ❖ la conceptualisation des processus hydrologiques : si la conceptualisation est basée exclusivement sur les lois de la physique, de la thermodynamique ou de la biologie, le modèle est dit **mécaniste ou hydrodynamique**; par contre, si le modèle s'appuie sur

une relation directe entrée-sortie et ne représente pas la structure interne du système étudié, il est dit **empirique** ; à l'intermédiaire de ces deux cas, si la conceptualisation n'est pas rigoureusement mécaniste, mais utilise des lois physiques, le modèle est dit **conceptuel** ;

- ❖ la distribution statistique des paramètres : si les paramètres du modèle sont considérés comme des variables aléatoires (avec des distributions de probabilité connues ou non), les sorties du modèle sont alors aléatoires et le modèle est dit **stochastique** ; par contre, si les paramètres sont supposés connus avec exactitude (valeur unique), le modèle est dit **déterministe**.
- ❖ la discrétisation spatio-temporelle des variables internes du système : si les variables internes du système sont uniformément représentés dans l'espace et le temps, le modèle est dit **global** ; par contre, si le modèle assume la variabilité spatiale et temporelle des différentes unités du système, il est dit **distribué** ; à l'intermédiaire entre ces 2 cas, il est considéré **semi-distribué** ;
- ❖ la discrétisation spatiale des données d'entrée : si la variabilité spatiale de toutes les données d'entrée du modèle est prise en compte par ce dernier, alors il est dit **spatialisé** ; par contre, si cela ne concerne qu'une partie seulement des données d'entrée, le modèle est dit **semi-spatialisé** ; mais lorsque les données d'entrée sont représentées par des valeurs moyennes par pas de temps, le modèle reste **global**.

Ainsi, en fonction du critère considéré, tout modèle hydrologique rentre dans une catégorie donnée. Néanmoins, un modèle global peut l'être à la fois au sens de la discrétisation spatiale des données d'entrée et/ou de la discrétisation spatio-temporelle des variables internes du système étudié (discrétisation absente). Aussi, un modèle peut être distribué sans être spatialisé, mais il n'est point pertinent d'utiliser un modèle (semi)spatialisé qui ne soit pas (semi)distribué.

En pratique, on retiendra qu'il y a recours aux modèles plus complexes du type hydrodynamique, distribué ou spatialisé (en partie ou totalement) lorsque les modèles plus simplifiés, du type global ou empirique sont jugés moins aptes ou peu appropriés pour rendre compte du but visé dans toute sa complexité (plus ou moins grande). L'adaptation de l'outil à l'objectif doit donc préoccuper l'utilisateur qui doit choisir un modèle selon ses besoins.

6.2 Choix du modèle hydrologique à utiliser

Les résultats obtenus par les études de modélisation sont conditionnés par les modèles utilisés, les bassins sur lesquels ils ont été appliqués, les données disponibles, et les critères d'appréciation retenus. Les performances d'un modèle dépendent aussi bien des erreurs d'observations, des valeurs des paramètres, des conditions initiales et aux limites que de la structure du modèle (Moussa R., 1991). Mais, globalement, l'objectif pour chaque modélisateur reste de trouver une formalisation conceptuelle ou non, mais pertinente pour modéliser le cycle hydrologique. Cette formalisation devrait pouvoir prendre en compte au mieux, les processus hydrologiques dominants, leur description mathématique et les échelles spatio-temporelles adéquates.

6.2.1. Critères généraux du choix à opérer

Dans cette étude, nous avons voulu choisir un modèle qui :

- s'adapte ou puisse s'adapter au contexte en prenant en compte la connaissance actuelle du fonctionnement hydrologique dans notre région d'étude, afin de capitaliser les efforts de recherche accomplis depuis plus d'une décennie ;
- permette une exploitation ou une valorisation au mieux de la grande masse de données hydro-météorologiques disponibles sur la haute vallée de l'Ouémé d'une part ; et, d'autre part, une paramétrisation ouverte, souple et accessible au modélisateur, en vue de favoriser des adaptations ultérieures, le cas échéant ;
- soit suffisamment connu de l'équipe des hydrologues qui nous a accueilli ; et représente un intérêt pour une plus large communauté d'hydrologues d'une part, et, d'autre part, pour la DG-Eau qui pour ses besoins opérationnels, requiert un modèle donnant des résultats acceptables, et présentant un caractère simple et conviviale à une échelle spatio-temporelle convenable.

Nonobstant ces critères particuliers, il est généralement pris en compte le fait que le modèle doit bien représenter les mécanismes ou processus, être robuste et fournir des résultats réalistes. A cet effet, deux études antérieures sur notre domaine d'étude (Le Lay M., 2006, Métadier M., 2006) nous ont fourni des orientations dont découle notre choix.

6.2.2. Choix de l'échelle temporelle du modèle à retenir

S'agissant de l'échelle temporelle du modèle, c'est-à-dire le pas de temps à considérer, il est conditionné par la dynamique du bassin étudié, notamment celle des débits en tant que variable pronostique. Dans ce cas, il apparaît indispensable d'échantillonner correctement la dynamique temporelle de la réponse du bassin étudié. Le temps de réponse sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou étant de l'ordre de 2 à 3 jours, le pas de temps journalier apparaît être une résolution convenable pour cet exercice. De plus, tout en permettant la simulation du bilan hydrologique annuel telle que visée dans la présente étude, il a l'avantage de permettre également une prévision de crues, dans la mesure où, pour cette perspective, certains auteurs (Berne A. *et al.*, 2004) ont préconisé de travailler à un pas de temps inférieur à la moitié du temps de montée de l'hydrogramme.

6.2.3. Choix du type de modèle à retenir

Notre travail s'est déroulé au sein de l'équipe des hydrologues du Programme AMMA, qui testaient un certain nombre de modèles hydrologiques, principalement les modèles conceptuels globaux du type GR (GR2M et GR4J) et physiques semi-distribués du type TOPMODEL.

En effet, les modèles du type GR, largement expérimentés dans le monde (Perrin C., 2000) et dans la sous-région, quoique simples, faciles à mettre en œuvre et donnant des résultats assez satisfaisants, voire surprenants, ont montré leur limite. Le modèle GR4J par exemple, utilise un terme source/puits pour représenter les échanges avec les nappes d'eau profondes. Même si cette hypothèse est pour beaucoup dans les bonnes performances du modèle, en permettant d'ajuster le bilan d'eau sur le bassin, elle joue néanmoins un double rôle de compensation des erreurs d'estimation sur les variables de forçage et de l'inadéquation éventuelle de la fonction de rendement du modèle (Le Lay M., 2006). Ce modèle a, par ailleurs, une structure rigide, dans la mesure où un certain nombre de termes dans les équations du modèle sont fixés [facteur « puissance » dans plusieurs équations, coefficient de partage des écoulements pseudo-directs et des écoulements retardés (10% - 90%)]. De plus, le formalisme du modèle ne permet pas de distinguer et simuler spécifiquement les différents types d'écoulements (ruissellement hortonien, ruissellement sur surfaces saturées, écoulements de sub-surface, écoulements souterrains, etc...). A l'instar du GR4J, les modèles GR ne permettent pas de prendre en compte in fine certains processus ou hypothèses de fonctionnement hydrologique observés sur le bassin à travers les investigations de terrain. Ainsi, compte tenu du rôle prépondérant du compartiment « sol » dans

la distribution de l'eau précipitée, il s'est imposé aux hydrologues de ne point se contenter des modèles GR, qui ne permettent pas au modélisateur une paramétrisation suffisamment contrôlable des flux, tant verticaux que latéraux à travers ce compartiment.

L'équipe d'hydrologues du Programme AMMA s'est donc investie dans la configuration et le test d'un modèle semi-distribué, basé sur la topographie et qui permet un meilleur contrôle de la paramétrisation des différents flux ou processus hydrologiques. C'est ainsi, que le modèle hydrologique TOPMODEL, appliqué précédemment par plusieurs auteurs en milieu tropical (*Quinn P. F. et al.*, 1991; *Molicova H. et al.*, 1997; *Campling P. et al.*, 2002) a servi de base pour la mise au point sur la haute vallée de l'Ouémé du modèle hydrologique Topamma. Il s'agit d'une version modifiée de TOPMODEL, qui intègre des hypothèses de fonctionnement hydrologique validées sur le sous-bassin de la Donga, et qui donne des simulations moins incertaines que celles du modèle GR4J (Le Lay M., 2006).

6.2.4. Modèle hydrologique choisi

Le modèle Topamma est choisi pour la présente étude. C'est un modèle conceptuel semi-distribué à bases physiques qui prend en compte la topographie du bassin. Il fonctionne au pas de temps journalier et reçoit en entrée la pluie et l'évapotranspiration potentielle moyenne du bassin. Il se cale sur 4 paramètres : l'épaisseur de la couche superficielle de sol qui contribue à l'écoulement en rivière, la transmissivité latérale du sol de cette couche à saturation, son coefficient de décroissance avec la profondeur et la vitesse de propagation de l'onde de crue en rivière. Aussi, le pas de temps journalier est convenable pour satisfaire à la fois le besoin d'estimation de ressources en eau à l'échelle du bassin, et le besoin de prévision hydrologique sur notre bassin. Plus tard, une version semi-spatialisée de Topamma, appelée n°Topamma a été développée et prend en compte la spatialisation de la pluviométrie. Elle sera considérée dans cette étude, seulement pour diagnostiquer la sensibilité du modèle à la spatialisation de l'entrée « pluie » (cf. Section 9.1.2.1).

6.3 Aperçu synthétique du modèle choisi

Le présent travail est la première véritable adaptation du modèle Topamma sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou en recherchant les meilleures performances possibles. Néanmoins, l'histoire de l'utilisation de Topamma sur la haute vallée de l'Ouémé comporte essentiellement 2

travaux de référence (Le Lay M., 2006, Métadier M., 2006) : le premier a développé le modèle hydrologique Topamma sur le bassin de la Donga, et appliqué cette version « Donga » sur l'Ouémé à Bétérou, afin d'effectuer quelques premières analyses de l'impact du changement d'échelle sur les simulations du modèle ; et le second a étudié le réalisme des simulations du modèle sur les bassins de la Donga à Donga et à Kolokondé.

Ainsi, la description théorique détaillée du modèle hydrologique Topamma n'est plus à inventer et nous en faisons ici une courte synthèse qui nous semble essentielle pour la suite. Néanmoins, pour de plus amples détails, on pourra toujours se référer aux deux études ci-dessus citées (notamment la thèse de Mathieu Le Lay en accès libre sur internet²²). D'abord, nous présentons la base conceptuelle TOPMODEL, puis son adaptation Topamma.

6.3.1. Description sommaire de TOPMODEL

Le modèle hydrologique TOPMODEL (Beven K. and Kirby M.J., 1979, Beven K. and Wood E. F., 1983, Beven K. *et al.*, 1984, Beven K., 1987) repose sur une simplification du cadre physique avec essentiellement une prise en compte de l'hétérogénéité de la topographie du bassin. Cette hétérogénéité est représentée par une fonction de distribution d'un indice topographique calculé pour chaque point du bassin à partir d'un MNT.

Sur les zones de sols perméables, il est admis que la dynamique hydrologique superficielle et interne contrôle la réponse hydrologique des bassins. Pendant un épisode pluvieux, cette réponse dépend de la répartition spatiale de l'humidité dans le sol, et cette répartition est essentiellement liée à la topographie des versants et aux caractéristiques hydrodynamiques des sols (Beven K. and Kirby M.J., 1979). Ainsi, le concept de TOPMODEL est fondé sur la génération des écoulements par ruissellement sur surfaces saturées contributives (*Figure 6- 1a*) et exfiltration de la nappe (Le Lay M., 2006); mais il est également possible dans le modèle de générer du ruissellement par refus à l'infiltration (ruissellement hortonien) lorsque l'intensité de la pluie dépasse la capacité d'infiltration des sols (conductivité hydraulique à saturation).

TOPMODEL est bâti sur 5 hypothèses à savoir :

²² http://tel.archives-ouvertes.fr/index.php?halsid=ou215et253vfcaq256cc415tm258sndl256&view_this_doc=tel-00116912&version=00116911.

- le versant (*Figure 6- 1b*) est en équilibre à chaque pas de temps (égalité des flux d'eau entrant et sortant d'un pixel saturé) ;
- le flux subsuperficiel est fonction de la charge hydraulique (loi de Darcy) ;
- le profil de transmissivité du sol est supposé spatialement homogène ;
- le gradient hydraulique est invariant dans le temps et approché par la pente locale du sol ;
- le taux de recharge de la zone saturée est constant dans l'espace (moyenne spatiale).

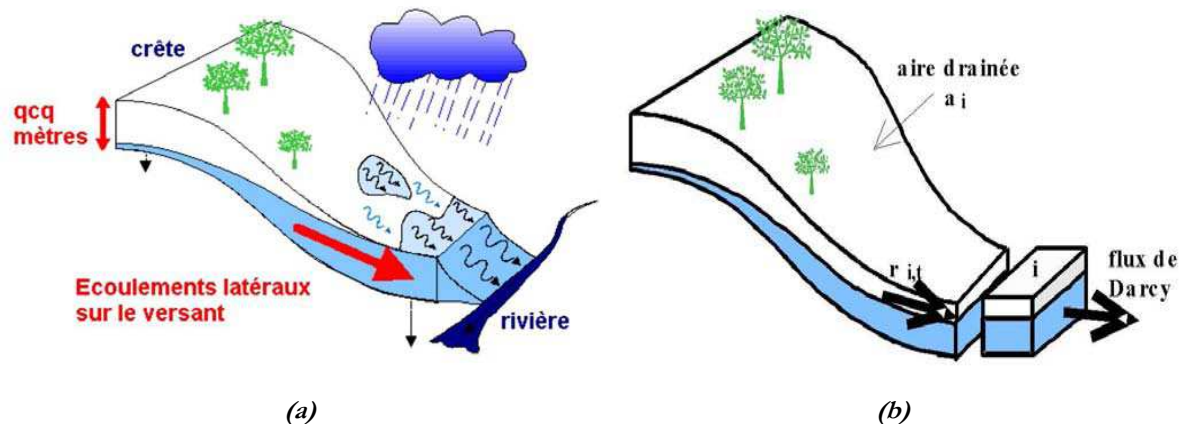


Figure 6- 1: Génération du ruissellement sur surfaces saturées (a) et équilibre de versant (b)

En effet, le fonctionnement hydrodynamique du bassin versant est établi sur l'hypothèse d'une relation exponentielle entre l'écoulement saturé de bas de versant et la profondeur du niveau piézométrique, supposé parallèle à la surface du sol de sorte que le gradient hydraulique local pour l'écoulement latéral saturé est donné par l'angle local de pente (Moussa R., 1991).

Un indice topographique de contrôle de l'hydrologie du versant est défini dans TOPMODEL. L'indice topographique est calculé selon une position relative sur le bassin et a pour base la loi de Darcy. Sa formule est $\text{Log}(a/\tan\beta)$ avec a la surface cumulée par unité de longueur de courbe de niveau et $\tan\beta$ le gradient de pente locale. A chaque pas de temps, tous les points du bassin de même indice (dits points hydrologiquement semblables) ont le même déficit hydrique, si bien que les points saturés sont aisément identifiables.

L'optimisation du modèle repose sur un nombre de paramètres limité (en général trois), et à chaque pas de temps, le modèle renseigne sur l'évolution spatiale des zones saturées (

Figure 6- 2).

TOPMODEL est un modèle semi-distribué dans la mesure où son concept s'appuie sur la topographie pour représenter l'hydrologie en chaque point du bassin. C'est sa version adaptée Topamma (Le Lay M., 2006) qui est utilisée dans le présent travail.

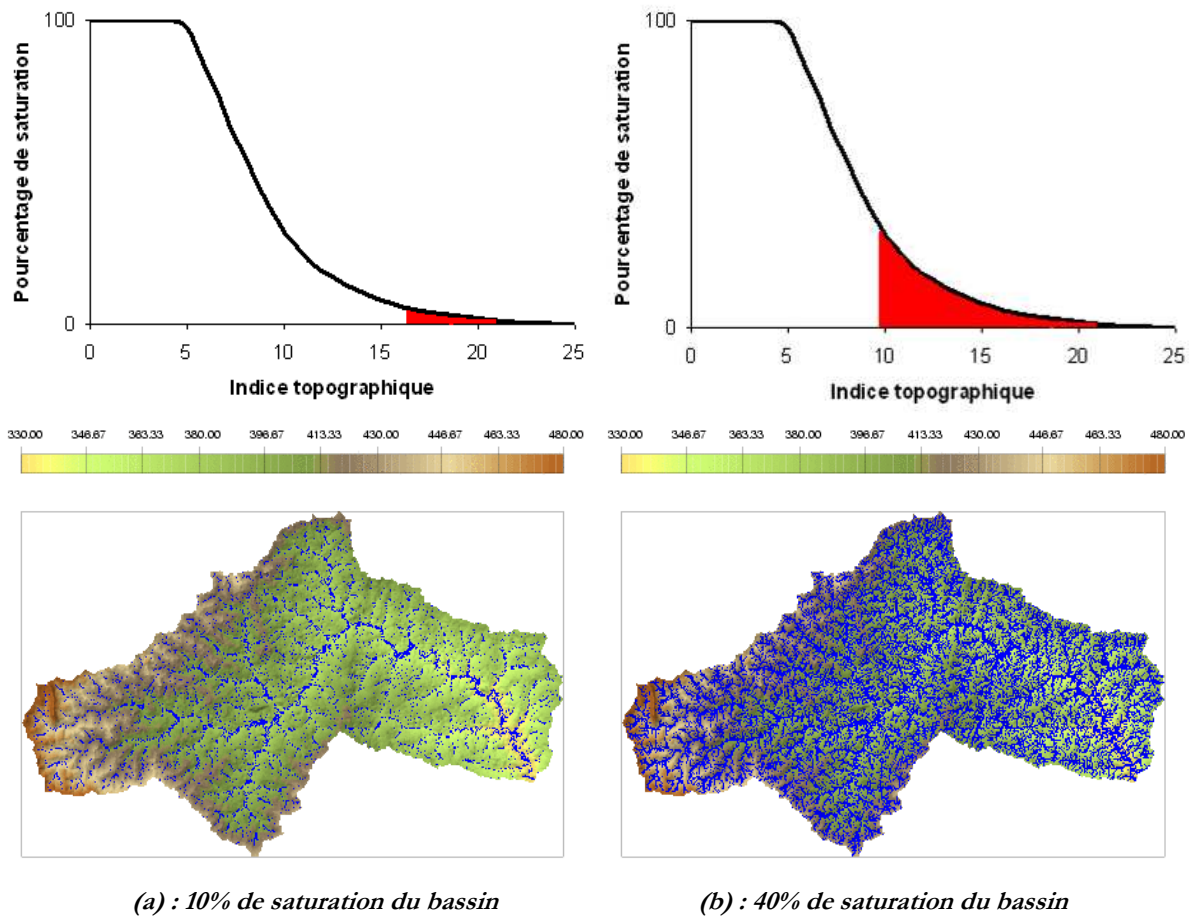


Figure 6- 2 : Illustration de la distribution de l'indice topographique (en haut) et des zones saturées (en bas) correspondant à différents taux de saturation du bassin de la Donga (Le Lay M., 2006)

6.3.2. Description du modèle hydrologique Topamma

6.3.2.1 Formalisation du concept

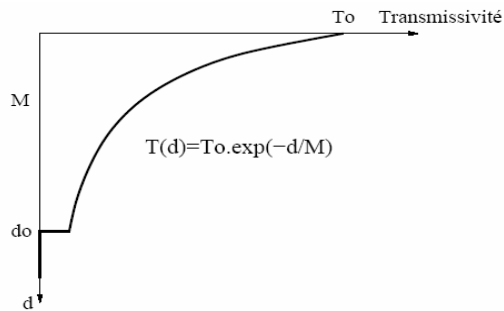
Pour tenir compte de la déconnection nappe-rivière (Kamagaté B., 2006) issue des investigations de terrain (cf. Section 4.2.2.2) et ainsi, limiter les écoulements latéraux à une tranche de sol restreinte, il est apparu nécessaire d'introduire dans le profil exponentiel de transmissivité $T(d)$ utilisé dans la version originale de TOPMODEL (Beven K. and Kirby M.J., 1979), un paramètre d_0 (Le Lay M., 2006) homogène à un déficit en eau (

Figure 6- 3).

Les écoulements souterrains sont donc considérés nuls au delà de cette profondeur seuil,

et cette version adaptée du modèle est appelée Topamma.

Remarque : d_0 étant une mesure de la profondeur à un terme de porosité près, la profondeur z_0 correspondant au plancher de la zone de sub-surface, s'écrit : $z_0 = d_0/\theta$ avec θ la porosité du sol.



$$T(d_{i,t}) = T_0 \cdot \exp\left(-\frac{d_{i,t}}{M}\right) \quad [L^2 \cdot T^{-1}] \quad (\text{éq. 6-1})$$

T_0 représente la transmissivité latérale [$L^2 T^{-1}$] quand le sol est saturé (déficit nul, $d=0$) et M le paramètre de décroissance de cette transmissivité [L].

Figure 6-3 : Profil de transmissivité seuillé à d_0

6.3.2.2 Expression des flux hydrologiques

Topamma simule à chaque instant les différents flux suivants :

- ❖ les flux latéraux : le ruissellement par refus à l'infiltration (hortonien), le ruissellement sur surface contributive et, l'exfiltration de la nappe vers le réseau hydrographique ;
- ❖ Les flux verticaux : l'évapotranspiration, l'infiltration dans la tranche de sol susceptible de fournir du drainage latéral (pour une profondeur inférieure à d_0 au terme de porosité près) et, le flux de percolation au delà de cette tranche de sol (cette composante spécifique à la version Topamma est un flux « perdu » pour le modèle, et physiquement, il recharge la nappe d'altérite actuellement non modélisée dans Topamma).

Le ruissellement sur surface contributive et l'exfiltration sont les flux caractéristiques de TOPMODEL. En revanche, la représentation des flux verticaux n'est pas le propos principal de TOPMODEL, et en conséquence, les formulations diffèrent suivant les versions utilisées. Nous résumons ci-après quelques formulations sous-jacentes à la version Topamma.

En effet, l'évapotranspiration potentielle (ETP) est utilisée comme variable de forçage (valeur moyenne sur l'ensemble du bassin) et à chaque pas de temps t , l'évapotranspiration réelle ETR(t) est calculée comme somme de deux composantes : ETRsurf(t) en neutralisant la pluie $P(t)$

par l'ETP(t), et si nécessaire, ETRsub(t) par prélèvement dans la zone non saturée (de sub-surface), c'est-à-dire :

- Si $P(t) \geq ETP(t)$ alors $P_n(t) = P(t) - ETP(t)$ et $E_n(t) = 0$, ainsi $ETR_{surf}(t) = ETP(t)$ et $ETR_{sub}(t) = 0$;
- Si $P(t) \leq ETP(t)$ alors $P_n(t) = 0$ et $E_n(t) = ETP(t) - P(t)$, ainsi $ETR_{surf}(t) = P(t)$;

avec $P_n(t)$ la pluie nette au temps t (différence entre la pluie et l'évapotranspiration potentielle) et $E_n(t)$ l'évapotranspiration nette. Dans le cas où $E_n(t)$ n'est pas nulle, une reprise évaporatoire complémentaire ETRsub(t) est autorisée dans la zone de sub-surface, à un taux proportionnel au contenu en eau du sol et à $E_n(t)$:

$$ETR_{sub}(t) = E_n(t) \cdot \left(1 - \frac{\overline{D(t)}}{d_0} \right) \quad (\text{éq. 6- 2})$$

avec $\overline{D(t)}$ le déficit moyen en eau du sol sur l'ensemble du bassin.

Topamma modélise le transfert de la zone non saturée à la zone saturée dans la tranche de sol plafonnée à d_0 , en confrontant le volume d'eau V effectivement disponible dans la zone non saturée par unité de temps à la conductivité hydraulique K du sol. Ainsi, il y a recharge de la nappe d'altérite ou percolation profonde lorsque $V < K$, et si $V > K$, l'excédent d'eau non drainable verticalement est stocké dans la zone non saturée et utilisé au pas de temps suivant. Contrairement à la plupart des versions de TOPMODEL, Topamma relaxe l'hypothèse d'isotropie de la conductivité hydraulique et en distingue les composantes verticale K_v et latérale K_h .

Les écoulements subsuperficiels participent au débit à l'exutoire, sous forme de débit d'exfiltration ou débit de base. Ce débit de base est nul lorsque le déficit moyen du bassin est égal à sa valeur maximale d_0 . Il en est de même pour la percolation profonde.

6.3.2.3 Algorithme et paramétrisation

Les simulations sont effectuées sur des classes de valeurs d'indice topographique. Puis, la réponse totale du bassin est calculée comme la somme de chacune des réponses simulées pour chaque classe d'indice, et pondérée par la représentativité (% de la surface extrait de la distribution cumulée) de chacune des classes d'indices sur le bassin étudié.

La conservation de la masse à l'échelle du bassin versant permet de mettre à jour le déficit moyen (différence entre la pluie et la somme de l'évapotranspiration, du ruissellement, de l'exfiltration et de la percolation) à chaque pas de temps. A l'initialisation des simulations (1^{er} janvier), le déficit moyen est considéré maximum [$\overline{D(t=0)} = d_0$], c'est-à-dire que le bassin (couche de subsurface) est sec.

Pour le transfert des volumes d'eau produits en chaque point du bassin à l'exutoire, la fonction utilisée est l'hydrogramme unitaire géomorphologique, qui réalise la convolution d'une réponse de versant et d'un routage dans le réseau hydrographique. Le choix de cette approche et de ses hypothèses a été discuté (Le Lay M., 2006). Cette approche fait apparaître deux paramètres : la vitesse d'écoulement sur le versant (v_v) et la vitesse d'écoulement en rivière (v_r).

Dans l'étude sur le bassin versant de la Donga (Le Lay M., 2006), la fonction de transfert est considérée comme statique dans le temps et calculée pour une valeur moyenne de saturation du bassin prise à 20% (moyenne des pourcentages de saturation calculés sur plusieurs années). Ces considérations sont maintenues dans la version Topamma utilisée au cours de la présente thèse.

En synthèse, l'algorithme de Topamma démarre par l'initialisation du déficit moyen et la figure ci-contre résume la démarche.

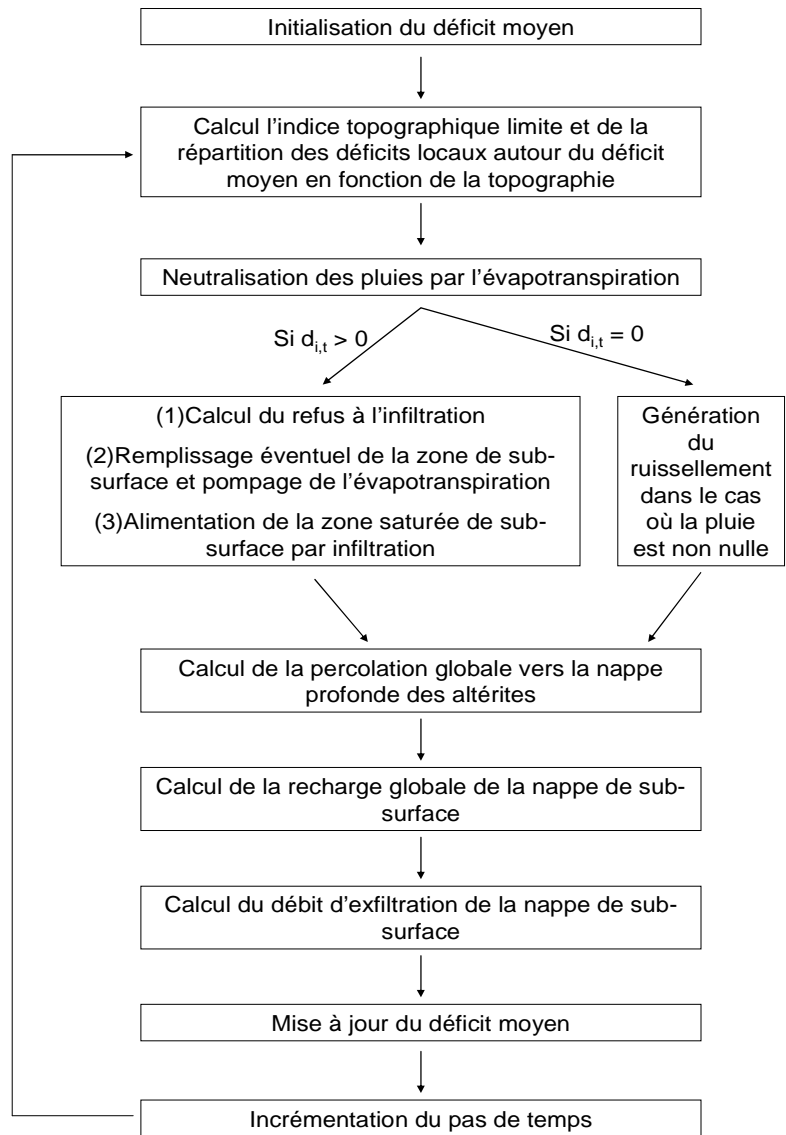


Figure 6- 4 : Algorithme de

Topamma

Le fonctionnement de Topamma nécessite donc la connaissance des paramètres suivants : v_v , v_r , T_{OV} , T_{OH} , M , et d_0 . Parmi ces paramètres, deux ont été fixés comme suit pour l'application au bassin de la Donga (Le Lay M., 2006, Métadier M., 2006) sur la base d'indications bibliographiques et dans le but de disposer d'un modèle de même degré de liberté (même nombre de paramètres) que le GR4J en vue de les comparer :

$$\frac{v_r}{v_v} = 10 \quad \text{et} \quad \frac{T_{OV}}{T_{OH}} = 10^{-2}, \quad \text{ou} \quad \text{bien} \quad \frac{K_{OV}}{K_{OH}} = 10^{-2} \quad (\text{éq. 6- 3})$$

Néanmoins, il en est ressorti une simulation quasi-insatisfaisante des crues en début de saison (Le Lay M., 2006, Métadier M., 2006), et on pourrait incriminer l'état hydrique du bassin tel qu'il est simulé par Topamma. L'hypothèse avancée pour tenter d'expliquer cette situation est que les premières crues de la saison résultent d'écoulement par refus à l'infiltration (processus hortonien). D'après l'algorithme de Topamma, le modèle simule du ruissellement hortonien lorsque la pluie nette est supérieure à la composante verticale de la conductivité hydraulique du sol à saturation K_{OV} . Or, d'après les paramètres de calage de Topamma (sur la Donga à Kolokondé au pas horaire), et la relation $K_{OV}/K_{OH}=0,01$, on trouve une valeur de K_{OV} de 3.750 mm/h (Métadier M., 2006), tandis que des essais d'infiltration dans le sol réalisés sur le bassin par la méthode Beerkan (Haverkamp *et al.*, 1998, De Condappa D. and Soria Ugalde J., 2002, Zannou A. B., 2003) fournissent des valeurs comprises entre 80 et 160 mm/h (Afouda E., 2006). Ainsi, l'importance de cette valeur par rapport aux observations explique qu'à aucune heure de l'année le modèle ne simule de ruissellement hortonien. Bien qu'implémenté dans le modèle, le ruissellement hortonien ne peut donc apparaître du fait des valeurs excessives et irréalistes sélectionnées lors des calages.

Ainsi, dans le cadre de la présente étude et pour l'adaptation de Topamma au bassin de l'Ouémé à Bétérou, il nous a fallu, après un test de sensibilité préalable, ré-évaluer le rapport d'anisotropie de la conductivité hydraulique à saturation comme suit :

$$\frac{K_{OV}}{K_{OH}} = 4 \times 10^{-4} \quad (\text{éq. 6- 4})$$

Le rapport fixé par les précédents auteurs sur le bassin de la Donga (Le Lay M., 2006, Métadier M., 2006) est divisé par 25 pour assurer les meilleures performances possibles sur l'Ouémé à Bétérou. Ainsi, à saturation, la composante verticale de la conductivité hydraulique du sol est très négligeable devant sa composante horizontale ($K_{OH} = 2500 * K_{OV}$).

En pratique, l'épaisseur efficace de sol est à la fois contrôlée par M et d_0 , si bien que le paramètre sensible pour le modèle est, en définitive, le ratio d_0/M , appelé par la suite d_0Ratio . Au final, la structure retenue ne nécessite donc l'optimisation que de quatre paramètres libres : M , T_{OH} , d_0Ratio , et v_r .

6.3.2.4 Traitements topographiques

La mise en œuvre de Topamma nécessite un certain nombre de traitements topographiques, notamment l'extraction du bassin versant et du réseau hydrographique, et le calcul des indices topographiques. Le modèle numérique de terrain (MNT) utilisé à cette fin est issu des données SRTM²³ (cf. Section 3.1.2).

Le calcul des indices topographiques est effectué selon une méthode proposée en 1997 (Saulnier G. M. *et al.*, 1997). Pour l'extraction du réseau hydrographique, les points sources sont identifiés tels que leur aire drainée est supérieure à 70 ha et leur indice topographique est supérieur à 16 (Le Lay M., 2006).

Dans le présent Chapitre, nous avons présenté le modèle hydrologique retenu pour notre étude. Ce modèle en tant qu'outil est mis en œuvre à travers une démarche méthodologique que détaille le Chapitre suivant.

« Nul n'entre s'il n'est géomètre ».

Platon

²³ MNT issu d'un radar embarqué sur la navette américaine durant une mission de 11 jours en février 2000 (<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>). Une couverture globale de la Terre est disponible au pas de 3" d'arc (90 mètres environ).

CHAPITRE 7 : Démarche méthodologique de modélisation

La mise en œuvre d'un modèle hydrologique passe par plusieurs étapes. D'abord, une analyse de sensibilité sommaire permet de mesurer l'influence de chaque paramètre du modèle sur les résultats de ce dernier afin d'appréhender le niveau de précision requis pour chacun des paramètres. Ensuite, le calage consiste à rechercher les valeurs des paramètres qui permettent une reconstitution acceptable des observations par le modèle. Il est parfois assorti d'une étape de vérification des hypothèses sous-jacentes. Enfin, la validation consiste à s'assurer que le modèle ainsi calé peut reconstituer valablement les observations sur un échantillon de données qui n'a pas servi au calage.

Le modèle hydrologique Topamma est mise en œuvre dans le cadre de cette étude à travers une approche détaillée en 5 étapes, basées successivement sur les questions courantes auxquelles doit répondre un modélisateur à l'œuvre :

- comment, ou sur quels critères, doivent être échantillonnées dans la série des données disponibles, les périodes qui serviront respectivement aux phases de calage et de validation du modèle ?
- comment, ou sur quels critères, doivent être définis les jeux de paramètres à explorer ?
- comment, ou sur quels critères, doivent être identifiés, dans l'espace des paramètres, les jeux à retenir (calage du modèle) ?
- comment, ou sur quels critères, doivent être déclarés valables les jeux de paramètres retenus (validation du modèle) ?
- comment peut être appréciée la représentation de la relation globale pluie-débit par le modèle ?

Les réponses à ces questions sont présentées dans les Sections suivantes. Néanmoins, il importe de préciser d'entrée que le but visé ici n'est pas de bâtir ou configurer un modèle qui donne des résultats meilleurs par rapport à d'autres modèles, mais de concevoir une approche de modélisation (calage/validation) qui repose sur un nombre très réduit de décisions arbitraires, contrairement à ce que l'on rencontre souvent. Aujourd'hui, on s'intéresse de plus en plus à échapper au piège tendu par des modèles qui donnent des « résultats justes » pour de « fausses raisons », et on préfère se contenter de modèles qui, pour de « bonnes raisons » donnent des « résultats moins satisfaisants » (Seibert J. and McDonnell J.J., 2002). Ainsi, le choix des périodes

de calage/validation et des critères d'appréciation ainsi que de leurs valeurs seuils ou valeurs admissibles est fait sur la base de considérations objectives telles que décrites dans la suite du présent Chapitre. Si nos résultats sont parfois comparés à ceux d'autres modèles, notamment aux résultats des travaux antérieurs avec le même modèle (cf. Chapitre 8) mais utilisant une approche différente (cf. Section 4.2.3.2), c'est juste pour appréhender les différences éventuelles et tenter de les expliquer et comprendre, et non pas dans le but d'une comparaison rigoureuse d'outil ou d'approche. Toutefois, en recherchant une approche basée sur le moins d'arbitraire possible, on espère mieux contraindre le modèle vers une plus raisonnable (et non meilleure) simulation de la réalité observée.

Ce Chapitre comporte sept (7) sections. D'abord, nous présentons les modalités d'échantillonnage des périodes de calage/validation (Section 7.1) et d'exploration de l'espace des paramètres (Section 7.2), ensuite la méthodologie de calage (Section 7.3) et d'évaluation du modèle (Section 7.4), et enfin les critères de validation (Section 7.5), le calcul du bilan hydrologique (Section 7.6) et les indices pour évaluer la reproduction de la variabilité hydropluviométrique par le modèle (Section 7.7).

7.1 Echantillonnage des périodes de calage et de validation

7.1.1. Aspects généraux

Cette étude a démarrée en 2006, et toutes les données hydrométéorologiques existantes sur notre zone d'étude pour la période hydroclimatologique récente (à partir des années 90) ont été considérées, notamment les données collectées par le Programme AMMA-CATCH. Ainsi, 10 années (1997-2006) de données hydrométéorologiques étaient disponibles au démarrage et ont été utilisées pour la présente étude (cf. Chapitre 5).

Remarque : Les données antérieures aux années 90 ont fait l'objet de plusieurs études (*Le Lay M and Galle S, 2005; Sintondji L. O, 2005; Le Lay M, 2006; Lawin E. A, 2007; Vodounnon J, 2008*) qui fournissent l'état des connaissances disponibles sur la Haute Vallée de l'Ouémé, et il ne nous semble nécessaire de les ré-analyser dans un sens ou dans un autre, le lecteur intéressé pourra toujours se référer à la littérature indiquée.

La plupart des études en modélisation hydrologique sur notre zone d'étude (cf. Section

4.2.3.1) ont préconisé de scinder la période disponible en 2 sous-périodes de durées relativement égales : l'une servant au calage du modèle, l'autre à sa validation (Sintondji L. O., 2005, Le Lay M., 2006, Métadier M., 2006, Ahouansou D. M. M., 2008, Akognongbé A. *et al.*, 2008, Vodounnon J., 2008, Agbidinokoun A. S., 2011). Cette approche, tout de même simpliste et assez aléatoire, repose sur le principe du partage équilibré de l'information disponible entre les 2 phases de la modélisation (calage et validation). Toutefois, le calage étant la phase la plus critique de la modélisation (phase d'apprentissage), certains des auteurs cités précédemment n'ont point hésité à utiliser une large part de l'information disponible dans cette phase, au détriment de la phase de validation à laquelle est réservé un échantillon restreint. Ainsi, quel que soit le mode de partage (équilibré ou non) de la période des données disponibles, il ne prend généralement pas en compte le souci naturel de représentativité de la population mère (toute la période disponible) par l'échantillon qui en est issu (période de calage par exemple).

7.1.2. Souci de représentativité de la période totale

Considérant la variable pluviométrique par exemple, la population mère est constituée d'années humides et d'années sèches en comparaison avec sa moyenne interannuelle. Sous un autre angle, elle affiche une certaine dynamique interannuelle (caractérisée ici par la variance interannuelle des précipitations annuelles) qui ne saurait être la même pour toute sous-période extraite de la période mère. Or, pour un modèle hydrologique pluie-débit, le contexte climatique, notamment pluviométrique, est d'une importance capitale. Il constitue une composante essentielle de l'environnement dans lequel le modèle sera « éduqué ». Il est donc très important que cet environnement de base soit inculqué au modèle lors de sa phase d'apprentissage, ou phase de calage. Pour prendre en compte cette réalité et par soucis de représentativité, nous accordons de ne considérer pour la phase de calage, que des périodes d'égale durée fixée arbitrairement à 5 ans (moitié de la durée de la population mère), mais ayant leurs caractéristiques pluviométriques interannuelles (moyenne et écart-type) les plus proches de celles de la période mère de 10 ans.

Remarques:

- ❖ Le contexte climatique est généralement représenté en modélisation hydrologique par 2 variables: la pluviométrie et l'évapotranspiration. Généralement, la pluie est la variable d'entrée la moins incertaine et la plus sensible pour les modèles hydrologiques. C'est pour

cette raison, que l'identification des échantillons représentatifs de la période d'étude a été portée sur cette variable ici. Il est possible d'appliquer la même approche en utilisant la variable évapotranspiration.

- ❖ L'approche adoptée ici repose la sélection d'échantillons de période représentatifs à l'échelle interannuelle, et ne prend donc pas en compte la structure de la saison. Néanmoins, la structure ou dynamique saisonnière des précipitations paraît assez homogène sur l'OHHVO (cf. *Figure 5- 4* à la page 138) si bien que l'hypothèse d'une variabilité saisonnière de moindre importance par rapport à la variabilité interannuelle est convenable. Aussi, avons-nous montré à la Section 9.3 que cette hypothèse est vérifiée dans la mesure où le modèle Topamma est plus sensible à la variabilité interannuelle (conditions sèches ou humides) qu'à la variabilité saisonnière.

Compte tenu du fait que l'Ouémé à Bétérou a un régime d'écoulement intermittent (l'écoulement s'arrête une partie de l'année avant de reprendre en début de saison) et que les niveaux piézométriques observés atteignent toujours en fin de saison des valeurs similaires, nous pouvons émettre l'hypothèse d'une déconnection hydrologique et hydrogéologique entre 2 saisons ou années, si bien que chaque année hydrologique peut être considérée comme indépendante des autres et prise comme un individu à part entière de la population mère des 10 ans de données. Ainsi, les sous-périodes ou échantillons de calage (ou de validation) peuvent valablement être constituées d'années consécutives ou non.

Considérons la famille des 252 combinaisons de 5 années (l'ordre des années dans la combinaison n'importe pas) parmi les 10 années de données disponibles ($C_{10}^5 = 252$). Pour chaque combinaison ou échantillon i , considérons ses caractéristiques statistiques interannuelles, moyenne m_i et écart-type σ_i des pluies annuelles, respectivement en abscisse et en ordonnée. Les points représentant les échantillons se répartissent autour du point « population mère » comme l'illustre la

Figure 7- 1.

Les échantillons les plus représentatifs sont ceux les plus proches de la population mère, c'est-à-dire ceux qui minimisent le critère distance d_i suivant exprimé en mm :

$$d_i = \sqrt{(m_i - m_p)^2 + (\sigma_i - \sigma_p)^2} \quad (\text{éq. 7- 1})$$

Où m_p et σ_p désignent respectivement la moyenne et l'écart-type interannuel de la population mère de 10 ans, tous exprimés en mm.

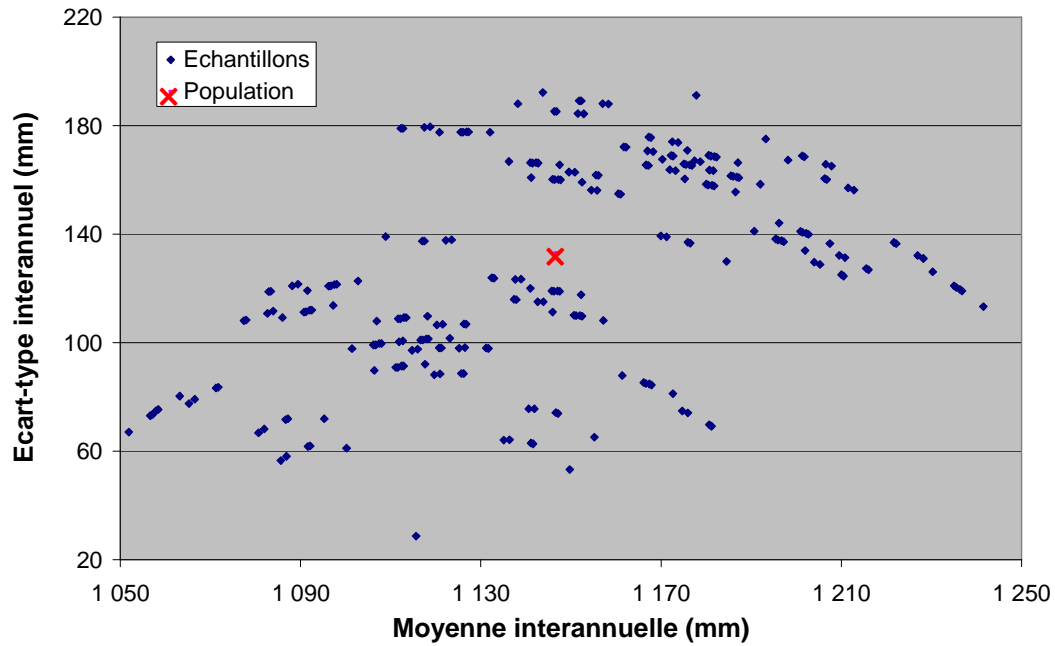


Figure 7- 1 : Représentation des 252 échantillons de 5 ans

Le *Tableau 7- 1* montre le résultat pour les 10 échantillons de 5 années les plus représentatifs selon le critère d_i . Il est à noter que le critère d_i accorde une importance égale à la moyenne et à l'écart-type interannuel. Cela est un choix volontaire qui se justifie par le fait qu'on a besoin d'une représentation de la période totale, autant équivalente en moyenne qu'en dynamique interannuelle.

Tableau 7- 1 : Les 10 échantillons de 5 années les plus représentatifs

N° Echantillon	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Critère d_i (mm)
1	1999	2000	2002	2003	2005	12,391
2	1999	2000	2003	2004	2005	13,255
3	1997	1999	2000	2003	2005	13,911
4	1997	1999	2001	2003	2005	13,954
5	1999	2001	2002	2003	2005	14,055
6	1999	2001	2003	2004	2005	14,149
7	1999	2000	2001	2002	2003	14,208
8	1998	2001	2002	2004	2006	16,303
9	1997	1998	2001	2004	2006	16,601
10	1997	1998	2001	2002	2006	16,954

Ainsi, deux échantillons A et B, présentant le premier la même moyenne, et le second le même écart-type que la population mère P, seront équivalents (au sens représentativité de P) si

l'écart entre les écarts-type de A et P est identique à l'écart entre les moyennes de B et P. d_i a donc un sens et signifie l'écart en mm, entre la moyenne pluviométrique interannuelle d'un échantillon et celle de la population mère à variance interannuelle égale. De ce fait, si la pluviométrie est connue avec une certaine incertitude sur le bassin, quelles peuvent être les valeurs réalistes de d_i ? Nous tentons une réponse à cette question dans la Section suivante.

7.1.3. Prise en compte de l'incertitude sur les entrées et du temps de calcul

Sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou, la pluviométrie moyenne annuelle sur la période 1998-2005 est connue avec une incertitude d'environ 2,65% comme rappelé à la Section 5.2.1 (Zannou A. B., 2006). En admettant cette valeur ici, la marge d'incertitude sur la pluviométrie moyenne annuelle (1147 mm) de notre population mère serait de ± 30 mm. Ce qui signifierait que les échantillons de période ayant un $d_i \leq 30$ mm sont bien dans la marge d'incertitude autour de la population mère. Nous retenons donc une valeur maximale réaliste de d_i égale à 30 mm, ce qui donne 37 échantillons (ceux qui respectent cette limite $d_i \leq 30$ mm).

Pour chaque échantillon, il faut 17745 simulations du modèle (cf. Section 7.2) en 10 jours 6 heures 27 minutes et 30 secondes (chaque simulation dure 50 secondes), et donc pour les 37 échantillons, il faudrait environ 380 jours, soit plus d'un an de simulation en continue (sans arrêt) !!! Ce long temps de calcul requis, ajouté au coût et à la complexité de la logistique informatique à déployer pour assurer la continuité du calcul (sans se soucier des coupures intempestives d'électricité et du délestage électrique fréquent à Cotonou) nous a poussé à ne cibler au départ que les 10 premiers échantillons les plus représentatifs, soit une réduction du temps de calcul de plus d'un an à moins de 4 mois (réduction d'environ 73%). Mais à l'arrivée, compte tenu des résultats peu convaincants des échantillons n° 8 à 10 (lorsqu'on les intègre dans le calage, tous les jeux de l'espace des paramètres sont rejetés, c'est-à-dire que leurs résultats sont assez, voire très différents de ceux des 7 premiers échantillons), nous convenons de retenir pour la présente étude les 7 échantillons les plus représentatifs de la période mère. Pour tenter une explication aux résultats peu convaincants des échantillons n° 8 à 10, on peut analyser les valeurs de d_i . Elles montrent que les valeurs (de d_i) des 7 premiers échantillons sont assez proches les unes des autres, mais elles sont toutes assez écartées (de plus de 2 mm) des valeurs des échantillons 8 à 10 (cf. *Tableau 7-1* à la page 169).

7.1.4. Vérification de l'équilibre interne à chaque échantillon de période

A l'issue de cette sélection d'échantillons de période représentatifs, il est important de vérifier le caractère humide, sec ou moyen de chaque année pluviométrique dans les échantillons de période retenus, afin de s'assurer d'un équilibre entre différents types d'année au sein de l'échantillon (à l'image évidemment de la population mère). A cet effet, nous supposons que la pluie annuelle est distribuée normalement au sein de la série de 54 années (1953-2006), et l'espace des valeurs est partagé en 3 intervalles de même probabilité (33%) correspondant respectivement aux années sèches, moyennes et humides (*Figure 7-2*).

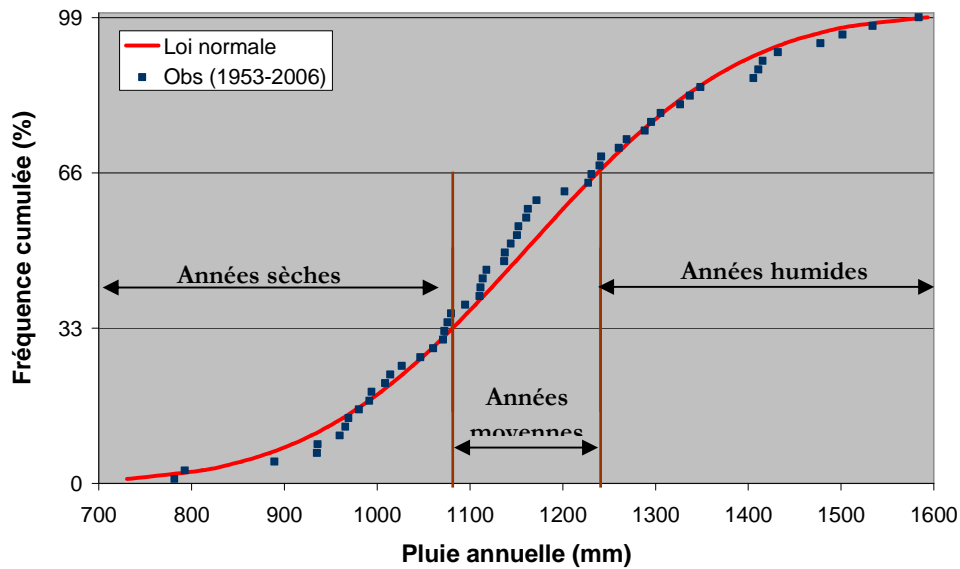


Figure 7-2 : Distribution statistique de la pluie moyenne annuelle sur l'Ouémé à Bétérou (1953-2006)

Le *Tableau 7-2* présente la période retour ainsi que le caractère de chaque année de la période 1997-2006 par rapport à 5 périodes de référence : 1953-1970 (période globalement humide de 18 ans), 1971-1988 (période globalement sèche de 18 ans également), 1989-2006 (période intermédiaire de 18 ans toujours), période 1953-2006 (la plus longue, 54 ans) et 1997-2006 (période d'étude de 10 ans).

Ainsi, nous constatons que chaque échantillon de période présenté dans le *Tableau 7-1* (cf. page 169) est équilibré en différents types d'année pluviométrique (humide, sèche et moyenne) avec chaque type d'année présent au plus 2 fois dans l'échantillon. En l'occurrence, chacun des 7 premiers échantillons de période est constitué de 2 années humides, 2 années moyennes et 1 année sèche sauf l'échantillon de période n°6 qui a plutôt 2 années sèches et 1 année moyenne (avec 2 années humides). Les 3 derniers échantillons de période sont constitués de 2 années

sèches, 2 années moyennes et 1 année humide.

Tableau 7- 2 : Période de retour et caractère humide, moyen ou sec de l'année pluviométrique sur différentes sous-périodes de la période de référence observée 1953-2006

Année	Période de retour (ans)	Sous-période de référence considérée				
		1953-1970	1971-1988	1989-2006	1953-2006	1997-2006
1997	1	Sec	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen
1998	5	Humide	Humide	Humide	Humide	Humide
1999	2	Moyen	Humide	Humide	Humide	Humide
2000	4	Sec	Sec	Sec	Sec	Sec
2001	3	Sec	Sec	Sec	Sec	Sec
2002	1	Sec	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen
2003	2	Moyen	Humide	Humide	Humide	Humide
2004	1	Sec	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen
2005	1	Sec	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen
2006	2	Sec	Moyen	Sec	Sec	Sec

Globalement la période d'étude reste pluviométriquement modérée par rapport à la période de 54 ans (1953-2006), avec des années humides, sèches ou moyennes dont les périodes de retour n'excèdent pas 5 ans. Néanmoins, les années 1998 et 2000 sont les années respectivement humide et sèche les plus extrêmes au sein de la période de 10 ans étudiée.

Remarques:

- ❖ On constate que, les années 1998 (humide) et 2006 (sèche) n'appartiennent à aucun échantillon retenu pour le calage (les 7 premiers). Elles sont donc utilisées pour la validation du modèle, qui consiste à appliquer le modèle déjà calé, sur un échantillon n'ayant pas servi au calage. Les résultats obtenus sur ces 2 années (1998, 2006) subiront ainsi les tests de validation décrits plus loin (cf. Section 7.5.2).
- ❖ Une phase d'évaluation du modèle (entre son calage proprement dit et sa validation) est mise en œuvre : elle consiste à appliquer les jeux de paramètres retenus à l'issue du calage (en fait, nous avons procédé à un calage par échantillon représentatif de 5 ans, soit 7 calages individuels pour les 7 échantillons représentatifs) sur l'ensemble des 8 années utilisées en calage, et à en analyser les résultats. Notamment, il est question de vérifier que les hypothèses et critères du calage individuel (par échantillon), sont aussi respectés sur les 8 années prises ensemble. L'intérêt de la phase d'évaluation réside dans le fait qu'elle mixe ou synthétise les simulations des 7 calages individuels en une seule, rendant ainsi unique la moyenne d'ensemble des simulations sur toute la période de calage. C'est l'évolution des statistiques de cette moyenne d'ensemble qui est mesurée et appréciée en phase validation.

Cette phase d'évaluation diffère de la phase de validation par le fait que, l'évaluation s'appuie sur les données ayant servi au calage et effectue essentiellement des vérifications, tandis que la validation concerne exclusivement des données n'ayant pas servi au calage et est prononcée sur la base de tests de validation préalablement convenus.

7.2 Définition et exploration systématique de l'espace des paramètres

Pour définir l'espace des paramètres à explorer, on doit préciser :

- les bornes de la variation de chaque paramètre (bornes de l'espace), qui ont été fixées sur la base de l'expérience de terrain, de la littérature, de quelques considérations physiques et tests de sensibilité préalables ;
- le pas de scrutation de chaque paramètre, qui est le résultat du compromis entre le souci de précision et le temps de calcul.

Pour cette étude, l'espace des paramètres est composé de $13 \times 39 \times 7 \times 5 = 17.745$ jeux définis comme le précise le tableau suivant :

Tableau 7- 3 : Définition de l'espace des paramètres

Paramètre	Unité	Valeur minimale	Valeur maximale	Pas de scrutation	Nombre de pas
M	m	0,06	0,09	0,0025	13
To	m ² /h	12,6	20,2	0,2	39
doRatio	-	5,6	6,8	0,2	7
Vitesse	m/s	0,25	0,35	0,025	5

Cette définition des jeux de paramètres résulte ainsi d'un échantillonnage uniforme des valeurs des paramètres. Cet échantillonnage tient compte de celui utilisé par Le Lay (Le Lay M., 2006) avec 28.000 combinaisons de valeurs de paramètres. La différence fondamentale (de 28.000 à 17.745 combinaisons) réside dans le fait qu'ici, il y a essentiellement un rétrécissement des bornes de variation (gain en temps de calcul) et une réduction notable des pas de scrutation (gain en précision), après s'être assuré de bien localiser les optimums.

L'exploration systématique consiste à simuler chacun des 17.745 jeux de paramètres. Cette méthode exige un grand nombre de calculs, contrairement à une approche d'optimisation basée sur des méthodes convergentes de résolution d'équation de type Newton-Raphson, Bolzano-Weierstrass, Lagrange, etc... ; mais elle permet une analyse intégrale de la surface de

réponse du modèle, et s'avère adaptée à la quantification des incertitudes. Elle donne lieu à 17.745 simulations par échantillon, soit 177.450 simulations en calage (7 échantillons retenus + 3 échantillons abandonnés plus tard) et 17.745 simulations en validation, donc 195.195 simulations au total. Avec un temps de 50 secondes par simulation (temps observé sur notre micro-ordinateur, pour une simulation sur un échantillon de 5 ans), on a un temps de calcul continu d'environ 4 mois (3 mois 22 jours 23 heures 2 minutes et 30 secondes !!!) sans compter le temps de préparation des données d'entrée, de la configuration du modèle, les inévitables reprises de simulations, et les longs traitements informatiques des 195.195 fichiers résultats, malgré l'utilisation d'un logiciel de programmation adéquat (plus de 11.000 lignes de programmation ont été écrites sous Scilab).

7.3 Calage du modèle et vérifications associées

7.3.1 Calage du modèle

Le calage (on utilise parfois le terme « calibration ») du modèle consiste à rechercher et à identifier les jeux de paramètres qui permettent de simuler au mieux, au vu d'un critère choisi (appelé aussi « fonction objectif »), la variable réponse, qui est ici le débit. Plusieurs critères mathématiques ou fonction objectif existent pour quantifier la distance entre simulations et observations. Les plus souvent utilisés en modélisation hydrologique sont décrits ci-après.

7.3.1.1 Critères considérés

Les critères suivants ont été systématiquement calculés pour chaque simulation :

- l'efficacité de Nash sur les débits, notée ci-après « Nash » : certains auteurs ont proposé une fonction dans laquelle les performances du modèle sont normées par les performances d'un modèle élémentaire constant, égal à la moyenne des observations (Nash J.E. and Sutcliffe J.V., 1970). Cette fonction, est sans doute la plus célèbre et la plus utilisée pour mesurer l'écart entre simulation et observation en modélisation hydrologique. Elle est connue sous le nom d'efficacité ou critère de Nash, et s'exprime comme suit :

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_{obs}} (Z_{sim_i} - Z_{obs_i})^2}{\sum_{i=1}^{n_{obs}} (Z_{obs_i} - \bar{Z}_{obs})^2} \quad (\text{éq. 7- 2})$$

où Z_{sim_i} est la variable simulée au pas de temps i , Z_{obs_i} la variable observée au pas de temps i , \bar{Z}_{obs} la moyenne des observations et n_{obs} le nombre d'observations.

Elle permet d'exprimer la part de variance des observations expliquée par le modèle (sous réserve que les résidus soient indépendants, centrés et gaussiens). Plus l'efficacité de Nash est proche de 1, plus les simulations sont proches des observations.

- l'efficacité de Nash sur la racine carrée des débits, notée ci-après « NashRac » : le critère de Nash, à l'instar des fonctions d'erreur quadratique, compte tenu de leur formulation, amplifient l'importance des erreurs relatives sur les fortes valeurs des variables pronostiques. Lorsque de telles fonctions « objectif » sont utilisées à l'échelle interannuelle, les années humides sont privilégiées par rapport aux années sèches. A l'échelle saisonnière, les périodes de crue ont un poids prépondérant par rapport aux périodes basses, c'est-à-dire que ces fonctions favorisent une meilleure simulation des hautes eaux au détriment des moyennes et basses eaux. Pour atténuer cette amplification des erreurs relatives sur les fortes valeurs, il est possible d'utiliser le critère Nash sur des valeurs transformées des débits, notamment des valeurs racinaires ou logarithmiques (ces fonctions permettent de réduire l'importance des fortes valeurs compte tenu de l'allure de leurs courbes respectives). C'est ainsi que l'efficacité de Nash sur la racine carrée des débits (NashRac) est utilisée pour viser une meilleure simulation des moyennes eaux, tandis que l'efficacité de Nash sur le logarithme népérien des débits est utilisée pour viser une meilleure simulation des basses eaux.

$$NashRac = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_{obs}} (\sqrt{Z_{sim_i}} - \sqrt{Z_{obs_i}})^2}{\sum_{i=1}^{n_{obs}} (\sqrt{Z_{obs_i}} - \sqrt{\bar{Z}_{obs}})^2} \quad (\text{éq. 7- 3})$$

- le coefficient de détermination sur les débits, noté généralement R^2 : il exprime la corrélation entre débits observés et simulés :

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n_{obs}} (Z_{sim_i} - \bar{Z}_{sim}) (Z_{obs_i} - \bar{Z}_{obs}) \right]^2}{\sum_{i=1}^{n_{obs}} (Z_{sim_i} - \bar{Z}_{sim})^2 \cdot \sum_{i=1}^{n_{obs}} (Z_{obs_i} - \bar{Z}_{obs})^2} \quad (\text{éq. 7- 4})$$

Sa valeur maximale est 1. Mais, ce critère n'est sensible qu'à la co-fluctuation des 2 variables et pas au biais. Il ne doit donc jamais être utilisé seul.

- le biais sur les volumes écoulés, noté ci-après « Vol » : des fortes valeurs d'efficience ou de coefficient de détermination n'attestent pas de l'absence d'une erreur systématique. Le critère de biais sur les volumes écoulés, permet de mesurer la tendance du modèle à sous estimer ou à surestimer les observations :

$$Vol = \frac{\sum_{i=1}^{n_{obs}} Z_{sim_i}}{\sum_{i=1}^{n_{obs}} Z_{obs_i}} - 1 \quad (\text{éq. 7- 5})$$

- le biais sur le plus fort pic de débit, noté ci-après « Q_{max} » : il s'exprime de façon similaire au biais sur les volumes écoulés et permet d'apprécier la reconstitution du plus fort débit observé par les simulations.

$$Q_{max} = \frac{Max(Z_{sim_i})}{Max(Z_{obs_i})} - 1 \quad (\text{éq. 7- 6})$$

Chacun des 5 critères ci-dessus permet de quantifier, au vu d'un souci particulier, la distance entre les observations et les simulations. Il est intéressant d'étudier, si de part leur formulation mathématique respective, certains de ces critères ne sont pas liés entre eux, permettant ainsi d'éviter des redondances. A cet effet, l'approche graphique permet d'obtenir une appréciation globale rapide (**Figure 7- 3**) pour le cas des 2 premiers échantillons de période.

L'observation de ces nuages de points révèle un épaississement des nuages vers la région des valeurs optimales des critères, ce qui signifie que le jeu optimal selon chaque critère n'est pas très bien isolé. Ainsi, la forte densité du nuage dans la région proche de l'optimum indique que plusieurs jeux de paramètres affichent les mêmes valeurs des critères concernés (jeux équivalents au vu de ces critères), si bien que le choix d'un unique critère pour extraire les jeux finaux n'est pas pertinent.

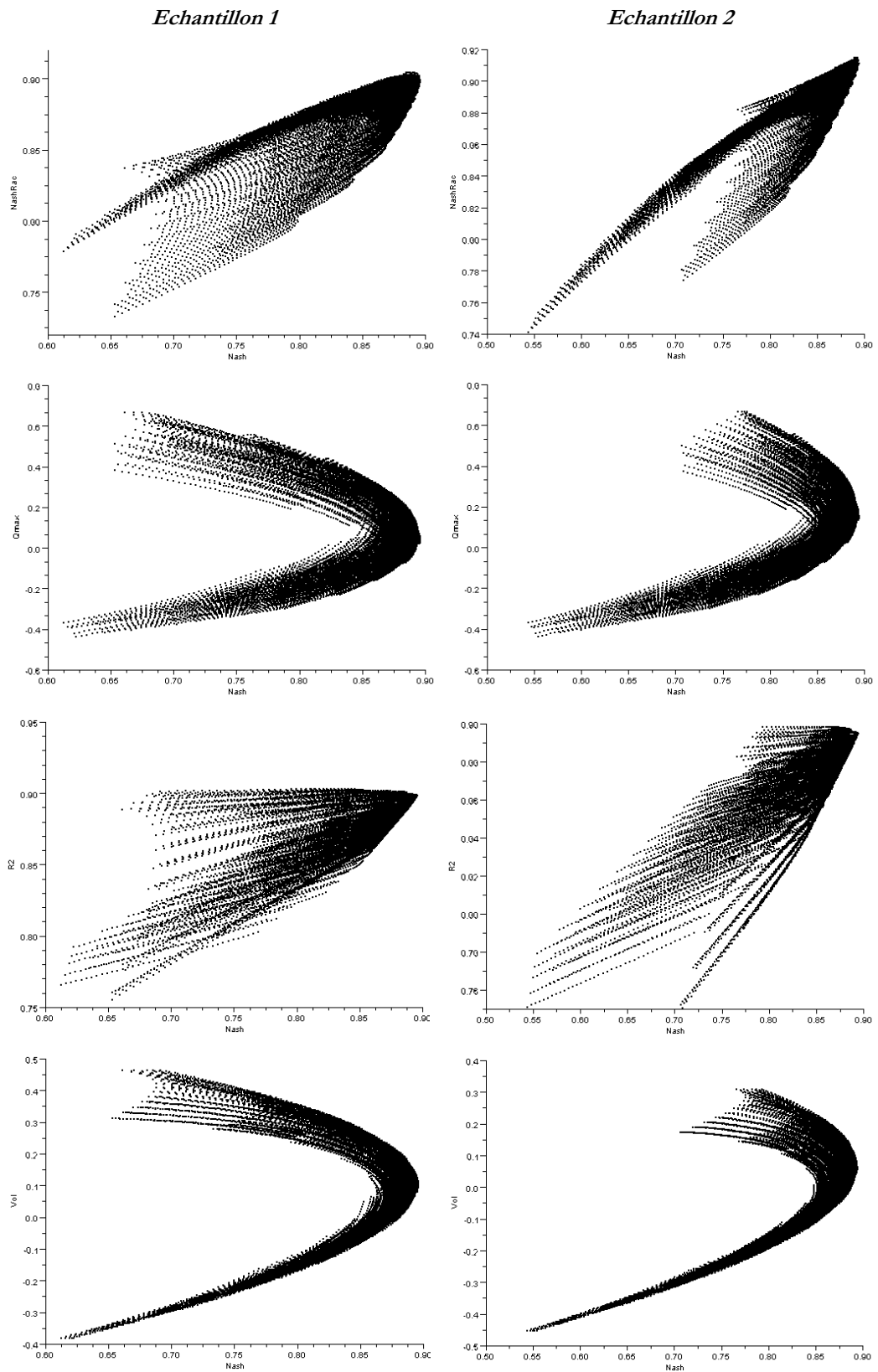


Figure 7-3 : Relations entre critères pour les 2 premiers échantillons de période

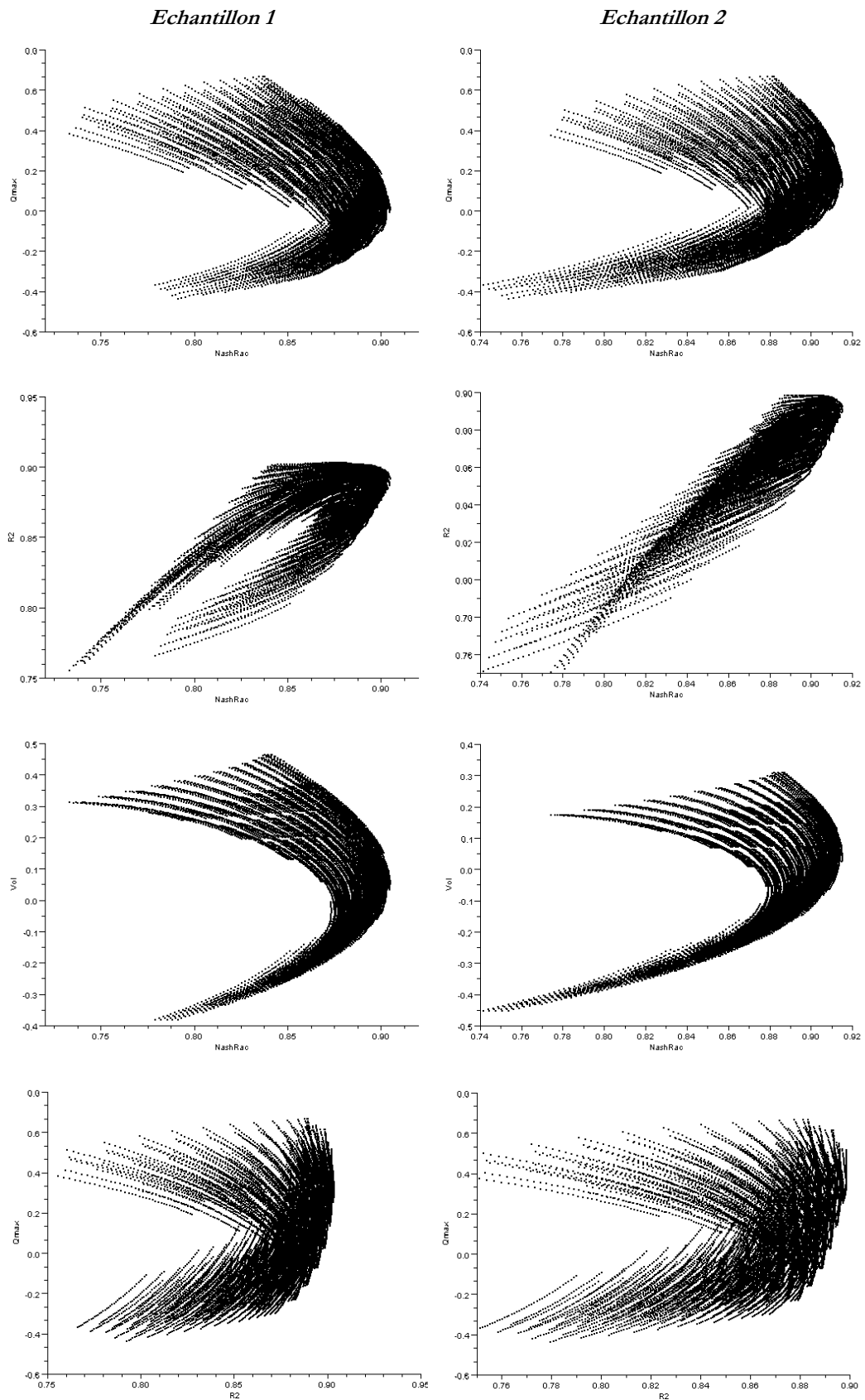


Figure 7- 4 : Relations entre critères pour les 2 premiers échantillons de période (suite)

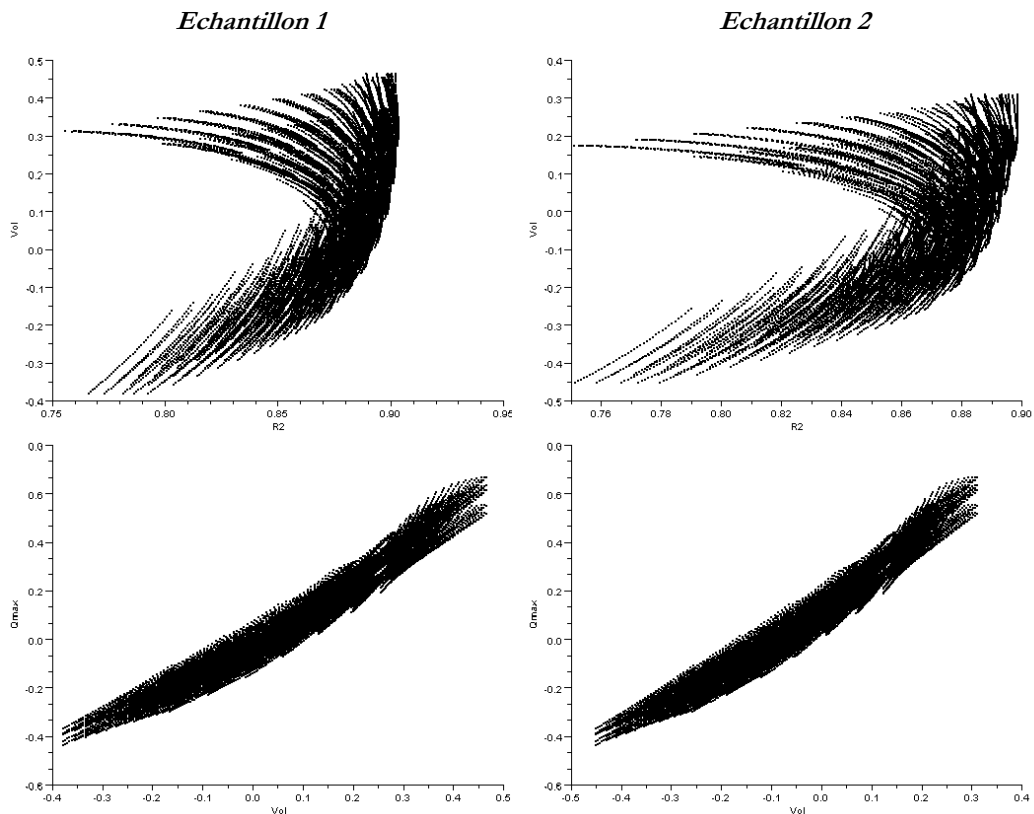


Figure 7- 5 : Relations entre critères pour les 2 premiers échantillons de période (fin)

En général, aucun jeu de paramètres n'est optimum simultanément pour 2 des critères, ce qui confirme le caractère exclusif de l'objectif visé par chaque critère. Il existe des jeux qui donnent des biais nuls en volume ou en débit de pic, et ils sont vers les valeurs élevées de Nash mais restent systématiquement décalés des valeurs optimales. Dans beaucoup de cas, les jeux ont tendance à surestimer qu'à sous-estimer (il y a plus de points pour des biais positifs). A une valeur de Nash donnée, la gamme de biais en vol est plus étendue pour les biais positifs.

Quant à la préoccupation de savoir s'il existe une relation entre certains critères, on peut conclure que dans la plupart des cas, il n'y a pas de relation claire et bien précise (nuage resserré). Néanmoins, l'observation de la dernière ligne de la **Figure 7- 5** semble indiquer l'existence d'une relation à tendance linéaire entre les critères de bilan (Vol et Q_{max}), mais un « zoom » dans la région des optimums de chacun de ces critères (cf. **Figure 8- 7** à la page 206) montre qu'il existe une large gamme de valeurs de l'un correspondant à chaque valeur de l'autre. Ainsi, si relation il y a, elle serait tellement imprécise qu'il ne serait pas utile ou indiqué de la considérer. Plus généralement, lorsque les nuages sont zoomés dans la région proche des optimums respectifs, aucune relation particulière et précise ne se dessine entre les critères.

Il y a donc lieu de choisir un critère au vu de l'objectif à viser et des moyens disponibles, ou alors choisir plusieurs critères si les objectifs sont pluriels, quitte à trouver une approche technique pertinente (critère composite ou approche pas à pas), pour la mise en œuvre de la modélisation.

7.3.1.2 Equifinalité et approche multi-critère retenue

Le jeu « optimal » au sens d'un critère donné est le jeu de paramètres, dont les simulations affichent la meilleure valeur du critère considéré par rapport à tous les autres jeux de paramètres.

Lorsque deux jeux de paramètres différents donnent la même valeur pour un critère (même si leurs simulations ne sont pas identiques), ils sont déclarés « équivalents » au sens de ce critère, et l'on ne saurait les départager ou choisir l'un au détriment de l'autre (à moins de faire intervenir un critère supplémentaire). Justement, en considérant le modèle hydrologique comme l'association d'une structure de modélisation et d'un jeu de paramètres (Le Lay M., 2006), les difficultés rencontrées pour identifier un modèle optimal (*Hornberger G. M. and Spear R. C.*, 1981; *Kuczera G.*, 1982; *Sorooshian S. and Arfi F.*, 1982; *Sorooshian S. and Gupta V. K.*, 1983; *Gupta V. K. and Sorooshian S.*, 1985) ont amené certains modélisateurs à considérer l'identification des paramètres comme un problème mal posé, pour lequel il n'existe pas de solution unique. L'existence d'un modèle optimal est alors rejetée au profit du concept d'équifinalité (Beven K., 1993), reconnaissant l'équivalence de différents modèles comme représentations de la réponse hydrologique. Ainsi, il est plutôt question d'identifier ici, des jeux de paramètres qui répondraient à plusieurs critères, et qu'on appellera « jeux équifinaux », ou plus simplement « jeux finaux ».

Un modèle parfait est censé représenter la réalité, et il serait incompréhensible d'espérer ou de demander aux modèles existants qui sont imparfaits ou perfectibles, de faire mieux que cette réalité. Lorsque cette réalité (par exemple les observations) est connue avec une certaine incertitude, il est raisonnable dans le choix des jeux de paramètres à retenir, d'accepter ceux dont les simulations se situent dans l'enveloppe de confiance des observations.

Les incertitudes associées aux débits observés ont été précédemment estimées sur l'OHVVO (Zannou A. B., 2006) et le *Tableau 5- 2* (cf. page 144) en synthétise les résultats à toutes les stations hydrométriques. A Bétérou, le débit moyen annuel (ou le volume moyen annuel) est connu avec $\pm 10\%$ d'incertitude, tandis que les plus forts débits (les pics de saison par exemple) le sont avec $\pm 25\%$ d'incertitude. Ainsi, les simulations qui affichent des biais en volume compris entre $\pm 10\%$ et des biais en pic de crue compris entre $\pm 25\%$ sont bien « réalistes » au vu

de l'incertitude sur les données observées.

Ces deux critères (Vol et Qmax), qui peuvent permettre de se débarrasser de façon précoce des jeux « peu réalistes », seront donc retenus pour le calage. Ces choix s'appuient aussi sur les résultats obtenus par ailleurs en appliquant Topamma sur 2 bassins de la Haute Vallée de l'Ouémé (y compris le bassin de l'Ouémé à Bétérou), et qui donnent des biais en volume inférieurs à 10% en calage et à 15% en validation (Le Lay M., 2006).

Cependant, nous ne saurions nous limiter à ces 2 critères, qui, étant des critères de bilan, n'intègrent point la dynamique de l'écoulement, caractère primordial qu'on cherche à reconstituer par un modèle hydrologique. Parmi les critères susceptibles de prendre en compte cette dynamique (les 3 critères quadratiques cités au 7.3.1.1), il y a le critère de Nash, le plus célèbre et le plus utilisé sans doute. Son choix est guidé par le fait qu'il est plus sensible aux hautes eaux (contrairement aux deux autres critères quadratiques NashRac et R^2) et justifié par la perspective de disposer le cas échéant, d'un outil qui puisse servir à la prévision opérationnelle de crues sur le bassin de l'Ouémé (Zannou A. and Vodounou J-B., 2011).

Généralement, compte tenu des multiples erreurs qui entourent les données et les modèles, on se contente d'une valeur du critère de Nash supérieure à 70%. Le Lay avait trouvé un critère de Nash compris entre 81 et 91% en calage et entre 76 et 90% en validation (Le Lay M., 2006) avec des jeux optimaux. Dans le cadre d'une approche classique de modélisation GLUE (cf. Sections 4.2.3.1 et 4.2.3.2), il avait été suggéré et utilisé de façon tout à fait arbitraire un seuil de Nash=70% (Le Lay M., 2006, Métadier M., 2006). Mais, dans le cadre de la présente étude, vu la gamme de variation du critère de Nash, tout échantillon confondu, nous convenons de fixer ce seuil à 87% afin de mieux discriminer les jeux finaux, compte tenu de la densité des nuages de points dans les régions des optimums sur la *Figure 7-3* (cf. page 177). Cette valeur seuil de ce critère n'est pas arbitraire dans le cadre de l'approche de modélisation utilisée ici, comme expliqué plus bas à la fin de la Section 7.3.2.2 (Finalisation du calage).

En résumé, trois critères seront utilisés (*Tableau 7-4*) pour retenir les jeux de paramètres finaux : Vol, Qmax et Nash.

Tableau 7-4 : Valeur seuil des critères en phase calage

Critère d'optimisation	Vol	Qmax	Nash
Valeur seuil en calage	Compris entre $\pm 10\%$	Compris entre $\pm 25\%$	$\geq 87\%$

Remarques :

- Dans le cadre de cette approche, il n'est pas question d'identifier un jeu optimal (jeu donnant la

valeur optimale du critère) au sens d'un critère donné, mais plutôt de retenir un ensemble de jeux, dits finaux qui respectent les valeurs seuils convenus pour tous les critères.

- Aussi, une autre façon d'appliquer une approche multicritère, serait de choisir un critère composite, reliant grâce à une formule mathématique (généralement une distance) plusieurs des critères ci-haut cités (cf. Section 7.3.1.1), moyennant une pondération choisie de façon généralement arbitraire. Par exemple, nous avons par ailleurs testé une formule de distance calculée sur les critères Nash et Vol, avec un poids 3 fois plus grand pour le premier (Collot S. *et al.*, 2008). Cette façon de faire, ne permet pas d'apprécier ou de contrôler la contribution de chaque critère pris isolément, et ne paraît donc pas opportun ici.
- D'autres formulations de critère composite existent dans la littérature et en particulier, il a été proposé récemment un critère d'« efficacité de Kling-Gupta » (KGE) qui est une distance euclidienne calculée sur trois coordonnées à savoir la corrélation entre observations et simulations, le biais sur le volume et la mesure de la variabilité (Gupta H. *et al.*, 2009). Cette formulation alternative proposée par ces auteurs (critère KGE) permet d'éviter certains problèmes liés au critère de Nash, mais créent de nouveaux problèmes. Il est aussi montré que, sur les bassins à forte variabilité des écoulements, la composante « biais sur le volume » contrôle faiblement (moins que dans le critère KGE) la valeur du critère Nash (décomposée également en ces 3 composantes mais avec une formulation mathématique différente), si bien que d'importantes erreurs apparaissent dans la reconstitution des volumes écoulés. Or ces volumes écoulés, représentant la ressource en eau de surface, constituent la principale cible de notre travail de modélisation en vue de la GIRE, et justifie que le critère Vol soit pris en compte à part entière dans notre approche. Le critère KGE proposé par ces auteurs tend à remédier à cette faible sensibilité du critère d'optimisation au biais sur le volume. Néanmoins, il n'a pas été retenu ici dans la mesure où il ne permet pas d'imposer a priori des valeurs pour le biais sur le volume (tout comme le critère Nash), et il aurait été choisi si la cible visée était l'identification de jeux optimaux. On lui a préféré le critère Nash, plus célèbre et largement utilisé en modélisation hydrologique.
- Le Lay a proposé de qualifier de simulation globalement précise, toute simulation dont les critères Nash et Vol respectent les seuils suivants : Nash > 80% et Vol compris entre $\pm 10\%$ (Le Lay M., 2006). Ainsi, l'approche multi-critère retenue ici favorise le rejet de tout jeu de paramètres donnant une simulation non précise.

7.3.1.3 Technique de calage

La technique adoptée ici pour le calage du modèle hydrologique Topamma est une technique pas à pas, qui consiste successivement à :

- sélectionner pour chaque échantillon de période i , un lot LVi de jeux de paramètres dont les simulations donnent un biais en volume compris entre $\pm 10\%$;
- sélectionner dans chaque lot précédent LVi , un sous-lot LQi de jeux de paramètres dont les simulations donnent un biais en débit de pic compris entre $\pm 25\%$;
- sélectionner dans chaque lot précédent LQi , un sous-lot LNi de jeux de paramètres dont les simulations donnent un critère de Nash supérieur ou égal à 87% ;
- vérifier qu'aucun jeu de chaque LNi n'est sur une borne de l'espace des paramètres.

Cette approche multi-critère pas à pas, a l'avantage de permettre une confrontation des différents lots LVi , LQi et LNi , afin de s'assurer que chaque pas suivant affine les résultats du pas précédent. En d'autres termes, l'approche multi-critère ne serait pas justifiée si, $LVi=LNi$ par exemple ; dans un tel cas, on retiendrait un seul critère pour le calage (puisque son résultat reviendrait au même que le résultat des autres).

Remarque :

- L'approche « pas à pas » préconisée ici s'oppose à l'approche « intersection » qui consiste à appliquer chaque critère sur les 17745 jeux de chaque échantillon (on obtient 3 lots de jeux de paramètres par échantillon), puis à prendre l'intersection des 3 lots. Les deux approches, tous multi-critères, donnent le même résultat (l'intersection des 3 lots est identique à LNi), mais l'approche « intersection » ne permet pas d'apprécier l'apport de l'utilisation de chaque critère dans le calage, et ne justifie donc pas le caractère multi-critère du calage.
- Pour chaque échantillon, l'approche de calage préconisée ici correspond à une méthode GLUE sur l'ensemble des jeux LQi (issus de la double sélection avec Vol et Q_{max}) avec un seuil de rejet/acceptation de Nash=87%. La variante de la méthode GLUE qui consiste à fixer plutôt un nombre de jeux finaux à retenir (en pourcentage de l'effectif de l'espace exploré, soit $x\%$ des jeux les meilleurs au sens du critère Nash), n'aurait pas garanti la même valeur minimale pour le critère Nash selon les différents échantillons de période ; si bien qu'elle ferait preuve de discrimination à l'égard de certains jeux qui auraient des valeurs de Nash relativement élevées mais seraient écartés parce qu'ils appartiennent à un échantillon sur lequel tous les jeux donnent des valeurs élevées de ce critère. Dans le cas présent, où les jeux sont en double

compétition à la fois au sein de chaque échantillon et sur l'ensemble des échantillons (cf. Section 7.3.2.2), la méthode qui ne pénaliserait arbitrairement aucun jeu, et garantirait l'impartialité ou l'égalité de chances pour tous, doit être basée sur la qualité relative des simulations qui en sont issues, et non sur une notion d'effectif. Dans la méthode classique GLUE appliquée à un seul échantillon, ce souci de justice n'est pas une préoccupation particulière, car de toutes les façons (seuil de rejet/acceptation sur la valeur du critère Nash, ou bien sur l'effectif) il est respecté. Par contre, dans notre cas, où la méthode GLUE est appliquée sur plusieurs échantillons à la recherche de jeux finaux communs à l'ensemble des échantillons, il n'y a que le seuil de rejet/acceptation fixé sur la valeur du critère qui garantisse cette justice ou impartialité dans la sélection.

7.3.2 Vérfications associées et finalisation du calage

7.3.2.1 Vérfication de la pertinence de l'approche multi-critère

Les lots LV_i et LQ_i sont issus de l'application successive des critères Vol et Q_{max} qui sont des critères destinés à permettre des simulations autant réalistes que la réalité observée, incertitude prise en compte. Ce sont donc des critères « réalistes » qui s'imposent, dans la mesure où ils sont directement liés à la qualité connue de la cible (les observations).

Par contre, le lot LN_i est obtenu par application du critère Nash, pour lequel un seuil a été fixé. L'application de ce critère Nash vise à extraire du lot LQ_i , les jeux de paramètres qui respectent le seuil fixé. Cette application serait donc pertinente si elle réduisait sensiblement l'effectif de départ. Autrement dit, si l'effectif de LQ_i est proche de celui de LN_i , l'application du 3^{ème} critère (Nash) n'est pas pertinente, et l'approche multi-critère s'en trouve injustifiée.

Dans le cas où cette application du critère Nash réduit sensiblement l'effectif, peut-on être curieux de savoir, si cette réduction quantitative s'accompagne ou non d'une modification des lois de distribution respectives des critères Vol et Q_{max} avant et après application du critère Nash ? En d'autres termes, l'information relative au critère Vol (ou Q_{max}), contenue dans le lot LQ_i est-elle significativement modifiée au sein de son sous-ensemble LN_i ?

Si cette modification significative n'est pas prouvée au moyen d'un test statistique de comparaison de distribution (cf. Annexe 4), cela veut dire que l'application du critère Nash n'a eu pour effet que la réduction quantitative de l'effectif des jeux de paramètres, ce qui implique exclusivement la réduction du temps de calcul sans modification globale de la qualité des

simulations (des débits simulés). Cela signifie que l'information contenue dans le lot LQ_i (caractérisée ici par sa distribution statistique) est restée la même au sein du lot LN_i, on a donc conservé l'information complète donnée par l'application des critères réalistes tout en réduisant sensiblement le nombre de jeux de paramètres qui portent cette information. Or, certains jeux, bien que déclarés réalistes (sur des critères de biais) peuvent donner des simulations inacceptables du point de vue de la dynamique de l'écoulement, si bien que les lois de distribution au sein du lot LN_i peuvent être différentes des lois au sein du lot LQ_i.

Ainsi, si l'hypothèse de la même distribution pour le critère Vol (resp. Q_{max}), avant et après application du critère de Nash est rejetée par le test statistique, cela signifierait que l'application du critère Nash modifie la réalité traduite par le lot LQ_i, ou que les simulations à partir des jeux du lot LN_i sont meilleures par rapport aux simulations à partir du lot LQ_i. Ce qui amènerait à conclure que l'application du critère Nash est doublement pertinente dans la mesure où, en plus de réduire sensiblement l'effectif des jeux de paramètres, elle améliorerait qualitativement les simulations dans leur ensemble.

Remarque : Le test statistique utilisé ici, pour comparer les distributions statistiques expérimentales est une variante du test de Kolmogorov-Smirnov (cf. Annexe 4) dont la description est présente dans la littérature (Saporta G, 1990).

7.3.2.2 Finalisation du calage

L'application successive des 3 critères sur chaque échantillon de période *i*, a finalement donné un lot LN_i. Donc, on dispose en tout de 7 lots LN_i (*i* variant de 1 à 7). Chaque lot LN_i contient les jeux de paramètres retenus pour l'échantillon de période *i*. Puisque chaque échantillon de période *i* est jugé représentatif de la période mère, chacun des jeux de paramètres de LN_i devrait pouvoir représenter au mieux le comportement du bassin sur cette période mère. Or, deux LN_i et LN_j n'étant pas identiques, il existe des jeux de paramètres, retenus pour l'échantillon de période *i*, mais rejetés pour l'échantillon de période *j*, et vice-versa. Cela peut s'expliquer par le fait que, chaque échantillon, quoique représentatif de la population mère, a sa propre spécificité non partagée avec les autres échantillons.

L'idéal serait de conserver les jeux de paramètres retenus pour tous les échantillons, afin de s'affranchir au mieux des éventuelles spécificités qui ne permettraient pas de bien représenter le comportement du bassin sur la période mère. Or, nous souhaitons retenir comme lot final de

jeux de paramètres issus du calage, un lot L_f (idéalement égal à l'intersection des LN_i) d'effectif voisin de 100 pour 2 raisons :

- primo, permettre une utilisation opérationnelle du modèle ainsi calé par les services de la DG-Eau en limitant la quantité et le temps de calcul, environ 100 simulations pour appréhender une variable (ici le débit journalier) semble acceptable ;
- secundo, permettre qu'avec les résultats du modèle calé, on puisse calculer des statistiques valables, notamment y estimer des incertitudes (si l'effectif du Lot L_f est trop réduit, les caractéristiques statistiques des résultats perdent leur sens ; par exemple une moyenne calculée avec un effectif de 100 réalisations ou estimations a plus de sens qu'une moyenne calculée sur un effectif de 20).

Le contrôle de l'effectif du lot L_f sera donc fait de 2 manières :

- Si l'intersection des 7 LN_i donne un effectif trop faible (par rapport à 100) voire nul, on retiendra successivement les jeux de paramètres appartenant à 6 LN_i , ou à 5 LN_i parmi les 7, ainsi de suite. Autrement dit, on ne fera plus une intersection rigoureuse des 7 LN_i , mais une intersection souple conditionnée par le nombre de LN_i dans lequel doit se trouver un jeu pour être finalement retenu, et ce jusqu'à trouver un effectif de jeux finaux proche de 100.
- Si l'intersection des 7 LN_i donne un effectif trop grand (par rapport à 100), on sera alors appelé à rehausser la valeur seuil du critère Nash : plus fort sera le seuil autorisé pour ce critère, plus réduit sera l'effectif de chaque LN_i , et plus réduit sera l'effectif de L_f .

On s'aventure ainsi vers la conception de la modélisation hydrologique, qui consiste à ne rejeter aucun jeu de paramètre dont la simulation s'intègre dans un intervalle de confiance autour de la valeur observée, autrement dit une modélisation basée sur les caractéristiques connues des observations, en dehors de toute subjectivité ou arbitraire couramment admis (critère de Nash dont la valeur est jugée en toute subjectivité en l'absence de référence intimement liée aux données cibles ou au besoin manifesté par l'utilisateur). Le **Tableau 7- 5** compare l'approche classique généralement admise en modélisation hydrologique à celle retenue ici selon le caractère (arbitraire ou objectif) de chaque décision prise, et on s'aperçoit que le degré d'arbitraire dans notre approche de modélisation est trois fois moindre par rapport à l'approche classique, en conformité au but annoncé dans l'introduction de ce Chapitre.

Tableau 7- 5: Caractère arbitraire ou non des décisions selon l'approche de modélisation

Décision	Approche classique	Approche retenue
Choix des périodes de calage/validation	Arbitraire	Objectif
Nombre d'années par période ou échantillon	Arbitraire	Arbitraire
Choix des critères	Objectif	Objectif
Valeur seuil des critères en calage	Arbitraire	Objectif
Taux de décisions arbitraires	75%	25%

7.4 Evaluation du modèle

L'évaluation du modèle est faite sur l'ensemble des 8 années ayant servi au calage du modèle (1997 et 1999 à 2005). Elle a uniquement porté sur la variable pronostique qui est ici le débit (ce que le modèle est censé simuler le mieux, vu qu'il a été calé sur cette variable cible uniquement). Cette évaluation a consisté aux 3 opérations successives décrites ci-après.

7.4.1 Analyse des simulations particulières

Elle consiste à évaluer et visualiser graphiquement les simulations particulières sur la période de 8 ans : on part des n séries de débits simulés avec les n jeux de Lf, puis on calcule les enveloppes minimale et maximale de ces n simulations, et on analyse les simulations particulières à partir de leur représentation graphique. Ces simulations particulières sont les suivantes : les simulations optimales selon chaque critère (Vol, Qmax, Nash) sur la période des 8 ans, les enveloppes minimale et maximale, ainsi que la moyenne d'ensemble des n simulations.

On compare aussi les jeux ayant donné les simulations optimales selon chaque critère (jeux identiques ou différents).

7.4.2 Appréciation de la corrélation entre débits observés et simulés

Elle consiste à visualiser les biais d'ensemble (corrélation globale entre débits observés et débits simulés) afin d'apprécier la sur-(ou sous) estimation globale. On calculera les coefficients de détermination R^2 (cf. Section 7.3.1.1) entre les débits observés et chaque série de débits simulés, et on tiendra compte de leur fourchette de variation lors de la validation.

7.4.3 Evaluation de la moyenne d'ensemble des simulations

Elle consiste à évaluer la moyenne d'ensemble des simulations sur la base des 3 critères considérés en calage, et à vérifier que cette moyenne d'ensemble respecte les seuils des critères Vol et Qmax vu que ce sont des critères de biais ; par contre, il faut plutôt s'attendre à ce que la moyenne d'ensemble atténue plus ou moins la dynamique interne de chaque simulation si bien que son critère de Nash pourrait être conséquemment dégradé. Le degré de cette dégradation éventuelle sera mesuré afin de servir de référence lors de la validation du modèle.

7.5 Validation du modèle et contrôles appropriés

La validation du modèle est faite sur les années non utilisées en calage (1998 et 2006). On a conçu des tests de validation sur la robustesse du modèle (la robustesse est relative à la résistance du modèle à une dégradation de performance entre la phase de calage et la phase de validation). A côté de ces tests qui portent sur les critères de performance (Vol, Qmax, Nash) déjà connus du modèle (critères avec lesquels il a été calé), la validation consiste surtout à contrôler la cohérence entre observations et simulations sur des variables non utilisées en calage, notamment l'ETR et la piézométrie. Il s'agit en fait d'une appréciation du réalisme (cf. Section 4.2.3.2) des simulations du modèle (Métadier M., 2006).

La validation passe par les 3 étapes ci-après décrites.

7.5.1 Analyse des simulations particulières

Elle consiste à visualiser graphiquement et analyser la moyenne d'ensemble des simulations, avec ses enveloppes sur les années de validation.

7.5.2 Réalisation des tests de validation

On évalue la moyenne d'ensemble des simulations de validation sur la base des 3 critères considérés, puis on mesure le taux de dégradation éventuelle de chaque critère à la validation. On convient de valider le modèle si ce taux de dégradation est inférieur à un seuil de tolérance fixé comme ci-après.

Pour le critère Vol, s'appuyant sur les résultats antérieurs disponibles [le biais en validation de Topamma peut atteindre $\pm 15\%$ (en valeur absolue) pour les jeux optimaux (Le Lay M., 2006)] ; il est convenable de fixer le biais maximal tolérable à $\pm 25\%$ (en valeur absolue sur la

moyenne d'ensemble des simulations), ce que nous adoptons ici et qui correspond à une dégradation absolue de $\pm 15\%$ en validation, ajoutée au seuil de $\pm 10\%$ fixé en calage.

Par défaut, nous convenons de ce même taux de dégradation absolue (de $\pm 15\%$) pour le critère Q_{\max} , soit un biais maximal tolérable de $\pm 40\%$ (en valeur absolue) sur le plus fort débit en validation (pour rappel, le seuil en calage est de $\pm 25\%$).

Pour le critère Nash, Le Lay a observé avec les jeux optimaux, que sa chute est toujours inférieure à 10% en valeur relative. Comme la moyenne d'ensemble des simulations atténue leurs dynamiques individuelles, et que nous avons fixé un seuil de critère de Nash relativement élevé en calage, il est raisonnable de tolérer une chute relative du critère de Nash supérieure à 10% . Ainsi, nous convenons de tolérer une dégradation maximale de 15% en valeur absolue, soit un critère de Nash minimal de 72% pour la moyenne d'ensemble des simulations en validation (pour rappel, le seuil minimal en calage est de 87%).

En résumé, le modèle sera déclaré validé, si on obtient sur les 2 années de validation, les valeurs suivantes pour les critères calculés sur la moyenne d'ensemble des simulations : Vol compris entre $\pm 25\%$, Q_{\max} compris entre $\pm 40\%$ et $Nash \geq 72\%$ comme l'indique le tableau ci-après.

Tableau 7- 6 : Valeur seuil des critères en calage et en validation

Critère d'optimisation	Vol	Q_{\max}	Nash
Valeur seuil en calage	Compris entre $\pm 10\%$	Compris entre $\pm 25\%$	$\geq 87\%$
Valeur seuil en validation	Compris entre $\pm 25\%$	Compris entre $\pm 40\%$	$\geq 72\%$

7.5.3 Contrôles du réalisme des simulations

Lorsque le calage d'un modèle est jugé validé ou satisfaisant par rapport à la reproduction de la variable cible, il est souvent utile de vérifier le réalisme des simulations, en confrontant d'autres variables simulées différentes de la cible et non prises en compte lors du calage à leur valeur observée. Ici, on retient de contrôler le réalisme de simulation du coefficient d'exfiltration du débit de base (cf. Annexe 5), de l'évapotranspiration réelle et de la recharge de la nappe profonde d'altérite dans la mesure où des données observées (ou calculées à partir d'observations) sont disponibles pour ces trois variables (cf. Sections 5.2.2, 5.2.4 et 5.2.5).

7.5.3.1 Contrôle sur les débits

Il s'agit de :

- contrôler l'évolution de la corrélation entre débits observés et débits simulés de la phase évaluation du calage à la phase validation : visualiser les biais d'ensemble (corrélation globale entre débits observés et débits simulés sur la période de validation) afin d'apprécier la sur-(ou sous) estimation globale. On calculera les coefficients de détermination (critère R^2 à la Section 7.3.1.1) entre les débits observés et chaque série de débits simulés sur la période de validation, et on les comparera aux mêmes coefficients obtenus en phase évaluation.
- comparer le coefficient d'exfiltration [rapport entre écoulement de subsurface et débit total à l'exutoire (cf. Annexe 5)] calculé sur les simulations de validation avec ce même rapport calculé en phase évaluation d'une part, et sur les observations d'autre part (observations faites du 14 juin au 10 octobre des années 2005 et 2006, cf. Section 5.2.5), puis interpréter.

7.5.3.2 Contrôle sur l'évapotranspiration réelle

Des données d'ETR, calculées directement à partir du bilan d'énergie établi sur la base de mesures météorologiques faites au niveau de la station de flux de Nalohou sont disponibles (cf. Section 5.2.2). Compte tenu du fait que les données journalières d'ETR de 2007 sont disparates (cf. *Figure 5- 6* à la page 141), et qu'elles coïncident assez bien avec le nuage de points des données de 2008, seules ces dernières seront utilisées pour contrôler les données d'ETR simulées par Topamma.

Ce contrôle consistera à superposer graphiquement les 2 séries d'ETR (ETR moyenne climatologique d'ensemble simulée par Topamma sur la période 1997-2006 et ETR de la station de flux de Nalohou observée sur 2008) et à les comparer.

7.5.3.3 Contrôle sur la recharge de la nappe profonde d'altérite

Il s'agit de contrôler le réalisme de la percolation profonde prise comme étant la recharge de la nappe profonde des altérites simulée par Topamma. D'abord, on opère un contrôle global au niveau annuel selon une méthode préconisée par une étude récente (Métadier M., 2006), puis un contrôle affiné au pas jour en confrontant la percolation simulée à la piézométrie observée.

Pour le contrôle global, comme tenu du fait que l'évolution des niveaux piézométriques tels qu'illustrée précédemment [cf. Section 4.2.2.2 (page 114) et **Figure 5- 9b** (page 146)] indique que la recharge et la vidange annuelle sont quasi-équivalentes, il est supposé que toute la recharge ou percolation est reprise en évapotranspiration par les grands arbres, c'est-à-dire que le drainage vertical profond vers le socle fracturé est négligeable et qu'il n'y a pas de flux souterrain horizontal (entrant ou sortant du bassin). Sous ces hypothèses, l'auteur indique que la somme de la percolation (représentant alors l'*ETR_{nappe}* non modélisée par Topamma) et de l'ETR simulée par le modèle devrait rester inférieure à l'ETP (Métadier M., 2006). Si cela n'est pas le cas, alors la percolation simulée par Topamma n'est pas réaliste sous réserve des hypothèses considérées.

Pour le contrôle affiné, on considère que la variation journalière de stock souterrain, est égale à la différence entre la recharge (ou percolation profonde) et la vidange de la nappe. Dans ces conditions, on calcule la variation de stock à partir des niveaux piézométriques moyens annuels observés entre 2001 et 2006, moyennant une porosité du regolithe (partie altérée des roches cristallines) fixée à 5% comme suggérée par certains auteurs (Descloitres M. *et al.*, 2011). Ainsi, connaissant la variation de stock et la percolation, la vidange est aisément déduite et doit être positive, car en théorie, la recharge est toujours supérieure à la variation de stock ($\Delta S=R-V$, avec R=recharge et V=vidange qui sont tous deux termes positifs, et ΔS =variation de stock).

7.6 Calcul du bilan hydrologique

Cette évaluation a consisté au calcul des termes du bilan hydrologique (cf. Section 4.2.4) avec les résultats des simulations du modèle sur la période décennale totale 1997-2006. Les termes du bilan ont été calculés à partir des flux hydrologiques simulés par les jeux de paramètres retenus (lot Lf).

Les termes calculés sur la base des simulations du modèle sont :

- l'évapotranspiration réelle (ETR) ;
- le volume d'eau écoulee à l'exutoire (Q) avec séparation en écoulement de subsurface ou de base (Q_b) et ruissellement superficiel (Q_r) ;
- la percolation profonde ou recharge de la nappe d'altérite (R) ;
- le stock d'eau dans la zone de subsurface en fin d'année (ΔS).

L'équation adoptée pour le calcul du bilan est le suivant (cf. Section 4.2.4) :

$$P = ETR + Q + R + \Delta S \quad (\text{éq. 7- 7})$$

où P représente la pluviométrie observée.

Chaque terme de droite est évalué en pourcentage du terme pluie P. Il est utile d'établir cette relation année par année afin d'observer l'évolution du bilan hydrologique d'une année à l'autre. Les valeurs moyennes des variables Q et R de cette relation permettent également d'estimer les ressources en eau du bassin (Q=eaux de surface et R=recharge des eaux souterraines). Ce calcul du bilan hydrologique sera fait en prenant en compte les incertitudes liées aux simulations.

7.7 Représentation de la variabilité hydro-pluviométrique interannuelle

Ici, on a analysé d'une part, les relations pluie-débit observées et simulées avec prise en compte des incertitudes sur les observations et les simulations, et, d'autre part, la variabilité hydro-pluviométrique à travers l'évolution comparée des indices pluviométriques et hydrologiques (cf. Section 4.1.1) et des écarts à la moyenne. Dans ce cadre, l'indice I_x et l'écart à la moyenne E_x associés à une variable x (pluie ou écoulement annuel) sont adimensionnels et définis comme suit :

$$I_x = (x - \bar{x}) / \sigma \quad \text{et} \quad E_x = (x - \bar{x}) / \bar{x} \quad (\text{éq. 7- 8})$$

où \bar{x} et σ désignent respectivement la moyenne et l'écart-type interannuel, c'est-à-dire calculés sur les moyennes annuelles de la pluviométrie ou de l'écoulement selon le cas.

Nous venons de présenter dans ce Chapitre 7, les détails méthodologiques de la démarche de modélisation mise en œuvre dans la présente étude. Dans le prochain Chapitre, il sera question de présenter et discuter les résultats obtenus.

« La plus belle activité à laquelle puisse accéder l'être humain est l'apprentissage. »

Baruch Spinoza, Philosophe néerlandais, 1632-1677

CONCLUSION

La deuxième partie du présent document de thèse a permis de faire une synthèse bibliographique des principales connaissances disponibles sur notre bassin en matière de modélisation des ressources en eau. L'analyse des données observées a confirmé la forte variabilité spatio-temporelle des paramètres hydrométéorologiques tant à l'échelle saisonnière qu'à l'échelle interannuelle. Les analyses précédentes ont conclu à une relation non linéaire entre pluviométrie et écoulement, et les situations pluviométriques extrêmes (déficitaires ou excédentaires) sont amplifiées par le système hydrologique du bassin. Sur la base des processus physiques identifiés sur le bassin par certaines études antérieures, un schéma type de fonctionnement hydrologique avait été retenu, et le Chapitre 4 en a rappelé les grandes lignes. Les récents résultats de modélisation sur la zone d'étude ont été exposés, avec un focus sur ceux obtenus avec Topamma avant la présente étude. De même, les résultats des travaux antérieurs relatifs au calcul du bilan hydrologique et à l'impact de la dynamique des états de surface sur les ressources en eau ont été rappelés.

Le réseau d'observations et les données utilisées dans la présente étude ont été présentés au Chapitre 5, et ont permis de définir les limites et contours de la matière première à exploiter pour atteindre nos objectifs scientifiques.

Le modèle hydrologique choisi pour conduire notre travail de modélisation est Topamma. Les raisons et critères de ce choix ont été présentés en Chapitre 6, avant la description théorique de ce modèle.

Enfin, la démarche méthodologique de modélisation a été exposée en détails, et repose sur un nombre très réduit de décisions arbitraires, contrairement aux habitudes du domaine. Il s'agit en fait d'aboutir à une paramétrisation du modèle qui fournit des résultats acceptables pour de bonnes raisons, et non de rechercher coûte que coûte et à tort un modèle qui donnerait les meilleurs résultats possibles sans raison connue. Dans ce dernier cas, le comportement du modèle peut beaucoup varier selon les contextes (période, bassin etc...) dans la mesure où il repose sur plus de décisions arbitraires, et en l'absence de référence observée (par exemple en projection sur l'avenir), le modèle peut induire des biais plus ou moins importants.

Dans la troisième partie de ce document, il est question de présenter les résultats du modèle et d'en faire un exercice d'application à la gestion intégrée des ressources en eau du bassin.

TROISIEME PARTIE :

RESULTATS ET APPLICATIONS

« Il est de la nature humaine de se tromper. »

(Errare humanum est)

INTRODUCTION

La troisième partie de ce document intitulée « RESULTATS ET APPLICATIONS » regroupe les résultats obtenus, présente leur discussion avec les faiblesses identifiées, et leur application à la gestion intégrée des ressources en eau sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou. Ainsi, elle est structurée en 3 chapitres.

D'abord, dans le Chapitre 8, nous présentons et discutons les résultats obtenus en calage/validation du modèle, ainsi que ceux du calcul du bilan hydrologique et de la représentation de la variabilité hydro-pluviométrique par le modèle.

Ensuite, au Chapitre 9, nous procédons à un diagnostic de quelques faiblesses du modèle identifiées à travers les résultats obtenus. Ce diagnostic est fait essentiellement par des analyses de sensibilité à la dynamique spatiale des précipitations, à l'évapotranspiration, et aux biais sur les forçages pluviométriques utilisés en entrée du modèle.

Enfin, dans le Chapitre 10, nous indiquons des voies possibles d'utilisation des résultats de modélisation pour la mise en œuvre de la GIRE. Il s'agit d'un exercice d'application où, en confrontant les besoins prévisionnels à l'horizon 2025 à la disponibilité en eau de surface telle que simulée par Topamma, nous proposons une stratégie de mobilisation assortie de règles d'allocation des ressources en eau.

CHAPITRE 8 : Résultats et discussion

Les résultats obtenus sont présentés et discutés suivant les principales étapes de l'approche de modélisation utilisée (cf. Chapitre 7). Ainsi, le présent Chapitre est structuré en 5 sections qui comportent respectivement les résultats du calage du modèle (Section 8.1), de son évaluation (Section 8.2), de sa validation (Section 8.3), du calcul du bilan hydrologique (Section 8.4) et de l'analyse de la représentation de la variabilité hydro-pluviométrique observée par le modèle (Section 8.5).

8.1 Calage du modèle

8.1.1. Résultats du calage par échantillon de période

Le calage par échantillon de période (cf. Section 7.3.1.3) a produit 3 lots de jeux de paramètres (LV_i , LQ_i et LN_i) par application successive des 3 critères retenus (Vol, Q_{max} et Nash). Les effectifs de ces lots de jeux de paramètres sont résumés dans le *Tableau 8-1* :

Tableau 8-1 : Effectif des lots de jeux de paramètres retenus en calage par échantillon

Nombre de Jeux		Echantillon de période de calage N°							Effectif moyen	%
		1	2	3	4	5	6	7		
Explorés		17745							17745	100%
Retenus par critère	Critère Vol (LV_i)	2481	3138	2862	2805	2433	3060	2793	2796	16%
	Critère Q_{max} (LQ_i)	2481	2882	2861	2805	2433	2905	2793	2737	15%
	Critère Nash (LN_i)	1269	1323	1236	1633	1561	1673	2155	1550	9%

Ce tableau permet de constater que, la seule application des critères « réalistes » (Vol et Q_{max}) conserve seulement 15% des jeux de paramètres explorés, et donc rejette environ 85% des jeux. Cet important taux de rejet illustre le fait qu'on maîtrise généralement mal l'étendue de l'espace « réaliste » de variation des paramètres compte tenu des incertitudes sur la référence observée. Il confirme ainsi, le bien fondé de la prise en compte des incertitudes sur les observations lors de la modélisation ; et notre précédent travail de Master (Zannou A. B., 2006) trouve ici toute son utilité et sa pertinence.

Mais, en observant les nuages de points en bas de la *Figure 7-3* (cf. page 177), on constate que la seule application du critère Nash ($Nash \geq 87\%$) donnerait au moins 2 fois plus de jeux que la dernière ligne du *Tableau 8-1*, en acceptant des jeux ou des simulations qui donnent des biais en

volume assez importants (20 à 30%).

L'application du critère Q_{max} , ne modifie que très peu, voire presque pas (sauf pour les échantillons de période n°2 et 6), le lot de jeux obtenus après application du critère Vol. Ce résultat est prévisible, vu l'allure régulièrement épaisse et à tendance linéaire des nuages de points en bas de la *Figure 7- 5* (cf. page 179), et encourage à ne considérer que l'un des 2 critères Vol et Q_{max} , dans la mesure où l'apport du second est négligeable (cf. Section 7.3.1.1). Toutefois, dans le cadre de la présente étude, ces deux critères ont été maintenus puisqu'il s'agit de critères « réalistes », qui ne dérangent pas (qui ne nuisent pas à la qualité générale des simulations). Si la pertinence de ce choix est moindre ici, il peut, par contre, s'avérer très utile pour des exemples de modélisations avec d'autres modèles ou sur d'autres bassins.

A titre informatif, les valeurs optimales des trois différents critères pour chacun des sept échantillons (cf. Section 7.1) sont résumées dans le tableau ci-après :

Tableau 8- 2 : Valeurs optimales des critères de calage

Lot retenu	Critère	Echantillon de période de calage N°						
		1	2	3	4	5	6	7
LV _i	Vol	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Q_{max}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Nash	0,89	0,89	0,89	0,90	0,90	0,90	0,91
LQ _i	Vol	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Q_{max}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Nash	0,89	0,89	0,89	0,90	0,90	0,90	0,91
LN _i	Vol	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Q_{max}	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Nash	0,89	0,89	0,89	0,90	0,90	0,90	0,91

Ce tableau nous indique d'une part, que les valeurs optimales du critère de Nash (sur tous les échantillons) varient globalement de 89% à 91% et rappelle d'autre part, qu'il existe des jeux de paramètres qui simulent presque exactement les volumes ou les débits de pic observés (biais nuls).

8.1.2. Vérfications et finalisation du calage

8.1.2.1 Vérfication de la pertinence de l'approche multi-critère

L'analyse de la pertinence sur la base des effectifs de lots de paramètres successivement retenus a été abordée ci-dessus (cf. Section 8.1.1). On constate qu'il est bien pertinent d'appliquer

le critère Nash (3^{ème} niveau de sélection) dans la mesure où il permet de réduire sensiblement (de 15% à 9%) l'effectif moyen des jeux de paramètres des lots LQi (2^{ème} niveau de sélection).

A coté de cette réduction essentiellement quantitative du nombre de jeux de paramètres à retenir, il est surtout question ici d'analyser la qualité globale des simulations avant et après application du critère de Nash (cf. Section 7.3.2.1). Pour cela, les figures suivantes montrent les distributions expérimentales des fréquences cumulées des critères Vol et Qmax, avant et après application du critère Nash. Les courbes en noir représentent les distributions du critère Vol avant application du critère Qmax.

Ces figures fournissent les informations suivantes :

- Les jeux qui donnent des valeurs optimales du critère de Nash surestiment systématiquement les volumes et les débits de pic : **cela détecte ainsi le piège classique dans lequel on serait tombé si on avait ignoré les incertitudes autour de la cible qu'on s'évertuait à simuler ;**
- Les jeux qui donnent des valeurs optimales du critère Qmax ont tendance à sous-estimer (5 cas sur 7) les volumes ; de même, les jeux qui donnent des valeurs optimales du critère de Vol tendent à surestimer (4 cas sur 7) les débits de pic : cela témoigne d'une certaine indépendance entre les critères Vol et Qmax, notamment dans la région des optimums comme le confirme la *Figure 8- 7* (cf. page 206). Sur cette figure, on observe en particulier que la gamme des jeux ayant un critère Qmax optimal ($Q_{max}=0$) est très large (de -7% à +10% en Vol) ; de même, la gamme des jeux ayant un critère Vol optimal ($Vol=0$) est aussi large (de -15% à +10% en Qmax). **De plus si un jeu respecte le critère Vol alors il respecte le critère Qmax ; mais la réciproque est fautive et en conséquence, le critère Vol n'est pas remplaçable par le critère Qmax.** On ne devrait donc pas choisir au hasard un des deux critères pour conduire la sélection des jeux de paramètres comme semble l'indiquer le *Tableau 8- 1* (cf. page 199). Bien que l'apport individuel du critère Qmax dans le calage réalisé ici soit quasi-négligeable, son maintien a été jugé convenable pour d'autres raisons rappelées plus haut (cf. Section 8.1.1).

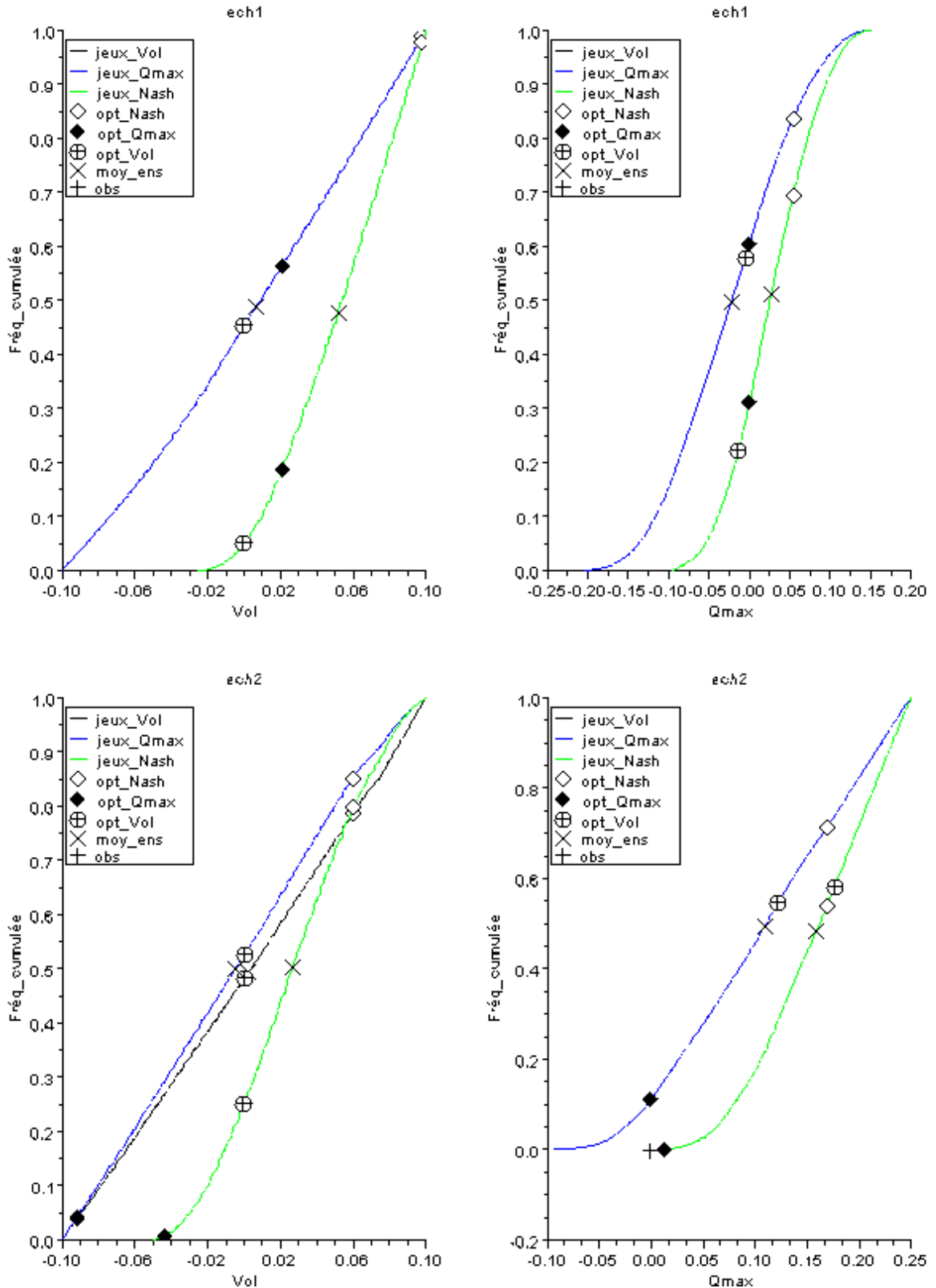


Figure 8- 1 : Distribution statistique expérimentale des critères Vol et Qmax avant (en bleu) et après (en vert) application du critère Nash en phase calage sur les échantillons de période 1 et 2

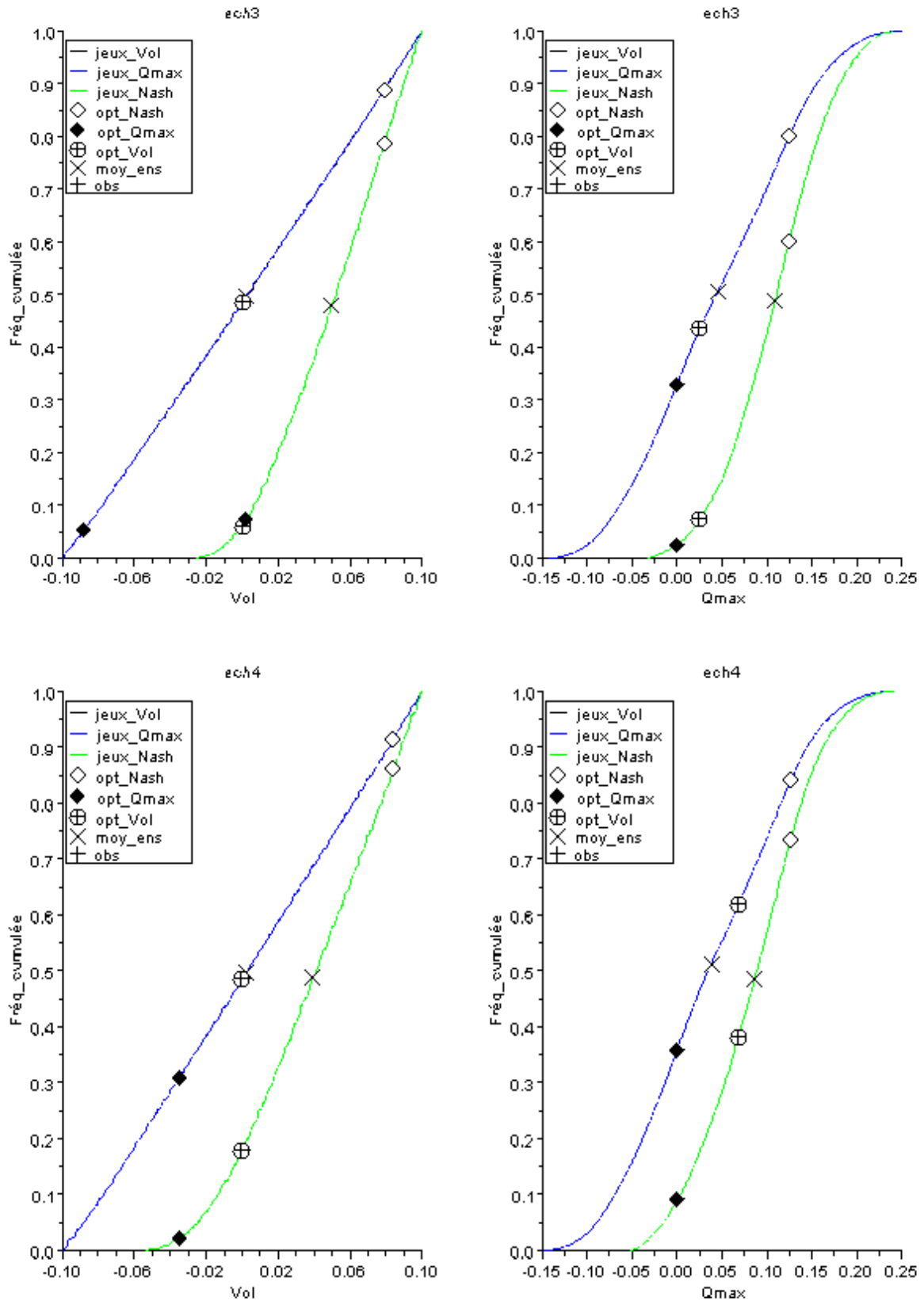


Figure 8- 2 : Distribution statistique expérimentale des critères Vol et Qmax avant (en bleu) et après (en vert) application du critère Nash en phase calage sur les échantillons de période 3 et 4

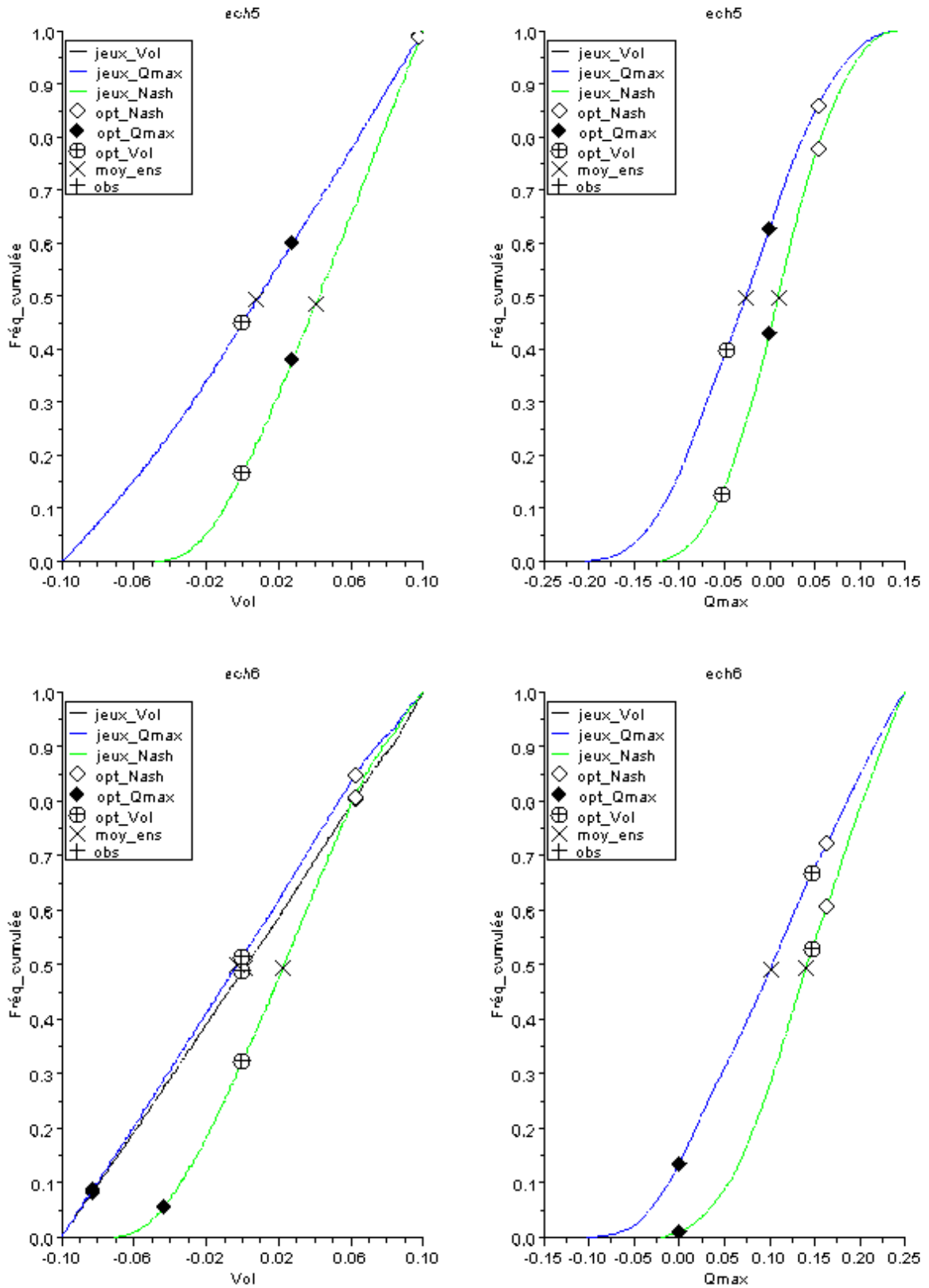


Figure 8- 3 : Distribution statistique expérimentale des critères Vol et Qmax avant (en bleu) et après (en vert) application du critère Nash en phase calage sur les échantillons de période 5 et 6

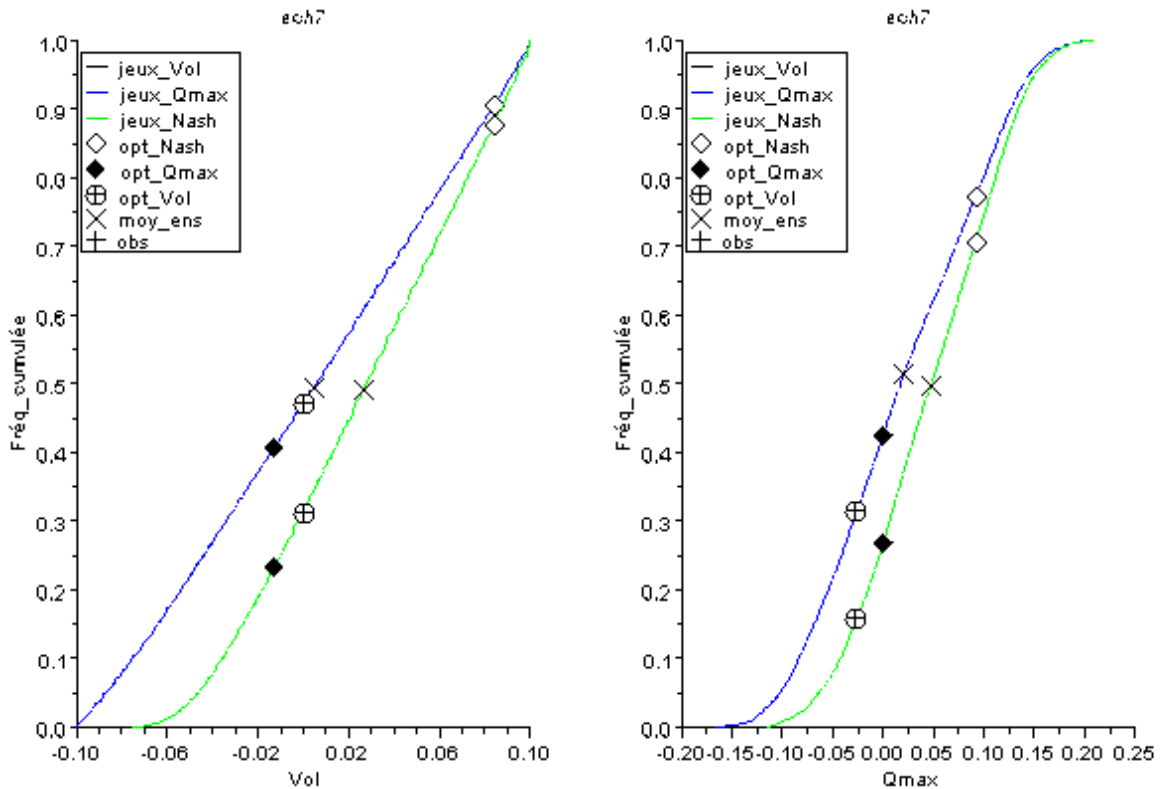


Figure 8- 4 : Distribution statistique expérimentale des critères Vol et Qmax avant (en bleu) et après (en vert) application du critère Nash en phase calage sur l'échantillon de période 7

- Les distributions statistiques avant application du critère Nash (en bleu) sont différentes de celles d'après (en vert) : cela est confirmé par le test statistique réalisé (cf. Section 7.3.2.1 et Annexe 4) qui rejette dans les 14 cas (7 cas pour le critère Vol et 7 cas pour le critère Qmax) l'hypothèse zéro « la distribution statistique est la même ». **Cela prouve que l'application du critère Nash améliore significativement la qualité globale des simulations, et illustre ainsi son caractère de critère doublement pertinent.**

8.1.2.2 Finalisation du calage

L'intersection des 7 lots LNi a donné un lot Lf d'effectif égal à 94 (cf. Annexe 6). En fait, avant d'arriver à ce résultat, nous avons étudié plusieurs options basées sur le 3^{ème} critère choisi (Nash ou NashRac) et sur sa valeur seuil fixée. Les 2 résultats limites obtenus (autour de 100 jeux de paramètres dans Lf) sont consignés dans le **Tableau 8- 3**. Ils confirment les choix faits précédemment (cf. Sections 7.1.3 et 7.3.1.2) : 7 lots pour faire l'intersection et valeur seuil fixée à 87% pour le critère Nash considéré.

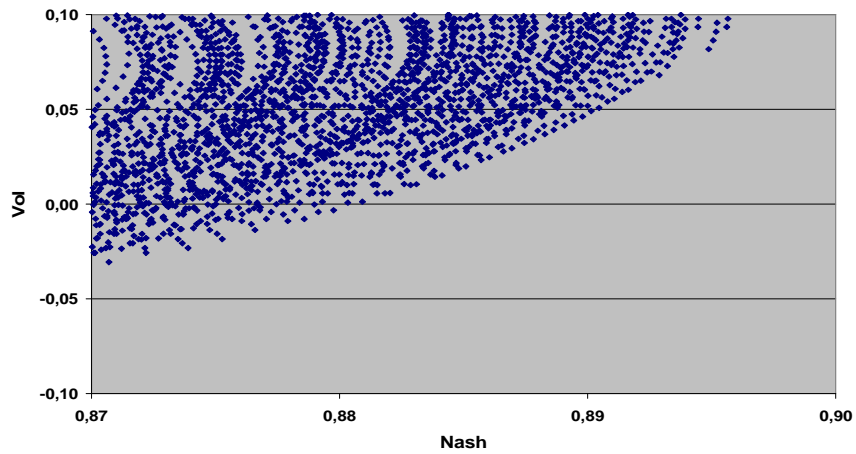


Figure 8- 5 : Relations entre Nash et Vol dans la région des optimums

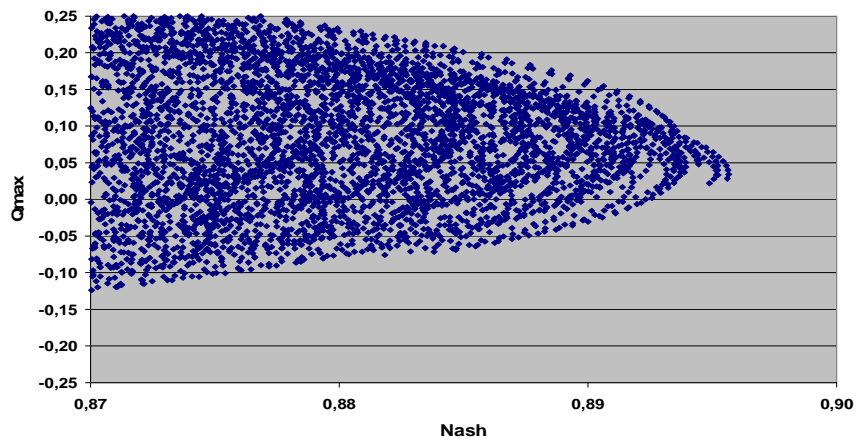


Figure 8- 6 : Relations entre Nash et Qmax dans la région des optimums

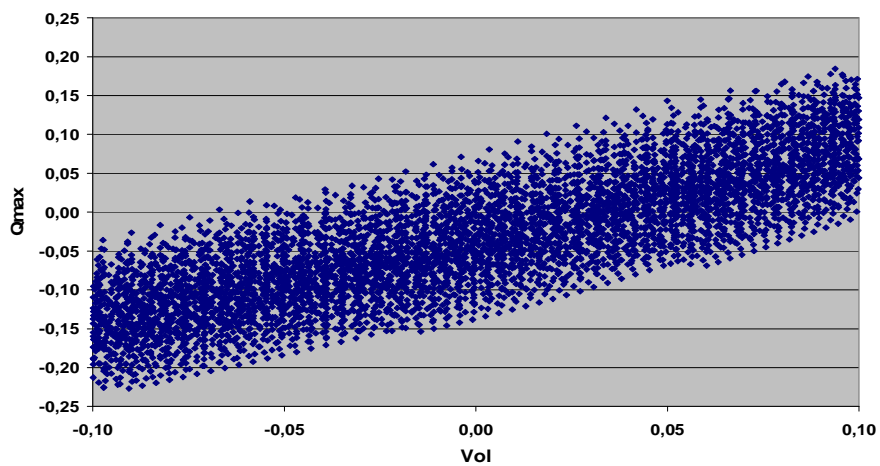


Figure 8- 7 : Relations entre Vol et Qmax dans la région des optimums

Tableau 8- 3 : Effectif du lot Lf selon le 3^{ème} critère utilisé

Critère	Valeur seuil	Effectif de Lf (sur 7 lots)
Nash	≥ 86%	462 jeux
	≥ 87%	94 jeux
NashRac	≥ 89%	481 jeux
	≥ 90%	2 jeux

8.2 Evaluation du modèle

8.2.1 Analyse des simulations particulières

Les figures suivantes montrent les hydrogrammes des 8 années de calage. Y sont représentés :

- l'hydrogramme moyen des simulations [courbe « Moy_ens » qui est la moyenne d'ensemble des 94 simulations à partir des 94 jeux de paramètres finaux de Lf (cf. Annexe 6)], ainsi que l'enveloppe de ces 94 simulations (courbe « Env_ens ») ;
- les simulations relatives aux jeux de paramètres optimaux selon chaque critère (courbes « opt_Vol », « opt_Qmax », « opt_Nash ») ; et,
- l'hydrogramme observé.

L'analyse de ces graphiques révèle que l'enveloppe des simulations est généralement très restreinte autour des 4 simulations particulières (Moy_ens, opt_Vol, opt_Qmax, opt_Nash), qui d'ailleurs sont difficilement distinguables à l'œil nu. Ainsi, il y a peu de différence entre les simulations moyenne et optimales, et l'ensemble des 94 jeux de paramètres finaux (cf. Annexe 6) fournissent des débits journaliers très proches les uns des autres. La zone d'incertitude autour de la simulation moyenne est donc très rétrécie et illustre une certaine rigueur ou sévérité dans le calage. Il est possible de relaxer cette rigueur en baissant le seuil fixé pour le critère Nash (et par conséquent en augmentant l'effectif des jeux finaux).

On note également qu'il n'y a aucune année où l'enveloppe de confiance des simulations contient toutes les observations. **Dans le cadre d'une prévision hydrologique par exemple, le modèle calé en l'état est peu satisfaisant, car la gamme des débits journaliers qu'il annoncerait ne contiendrait pas souvent le débit qui serait observé par la suite.**

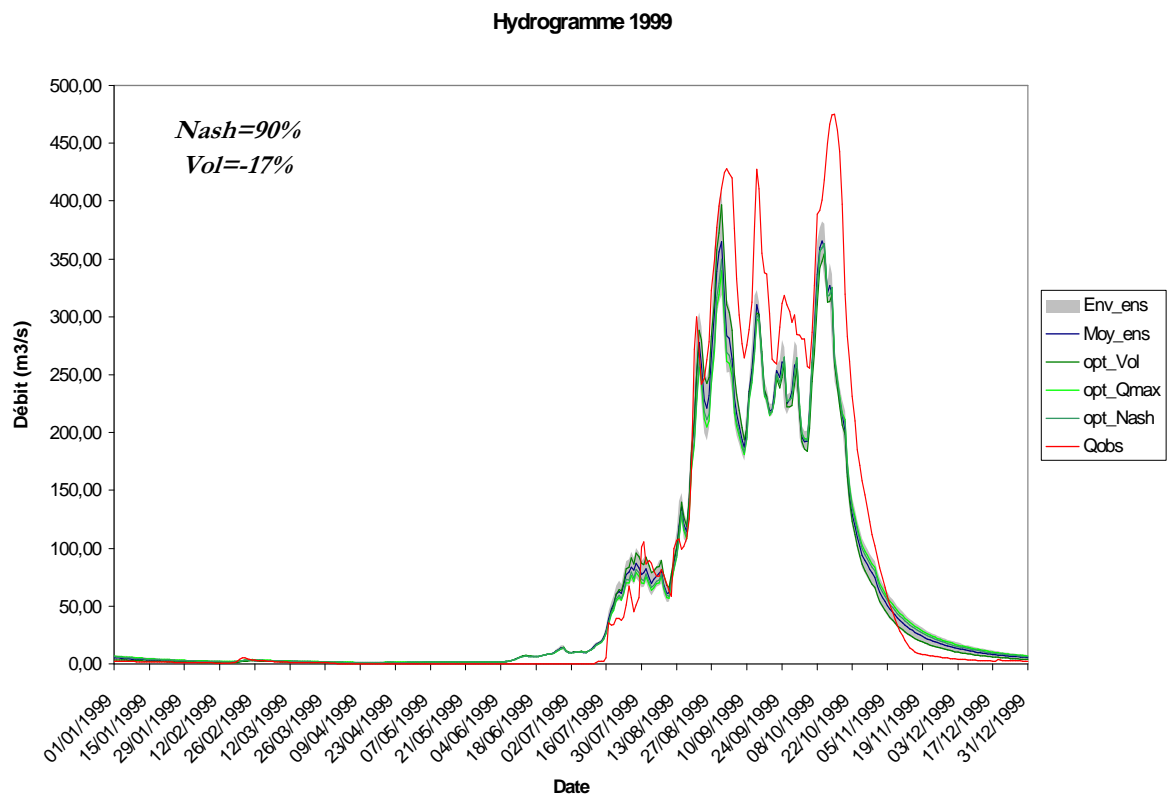
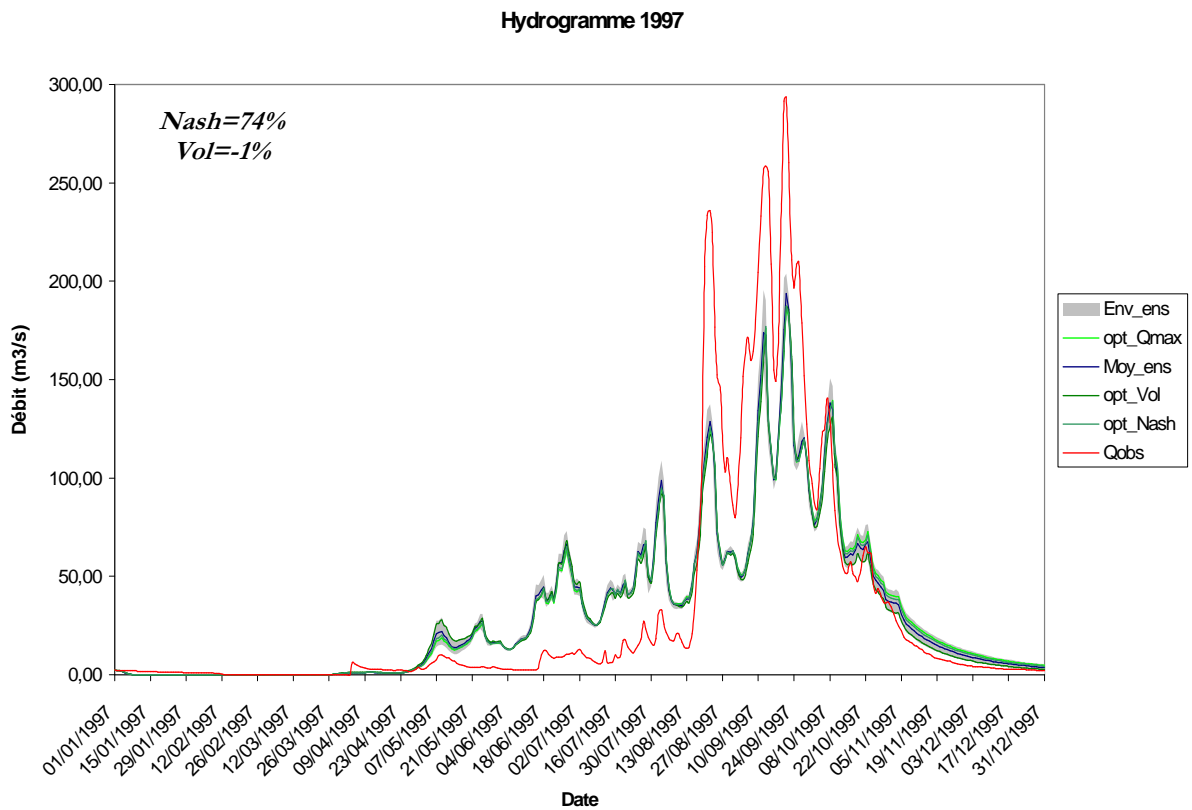


Figure 8- 8 : Débits simulés et observés en phase évaluation du calage pour les années 1997 et 1999

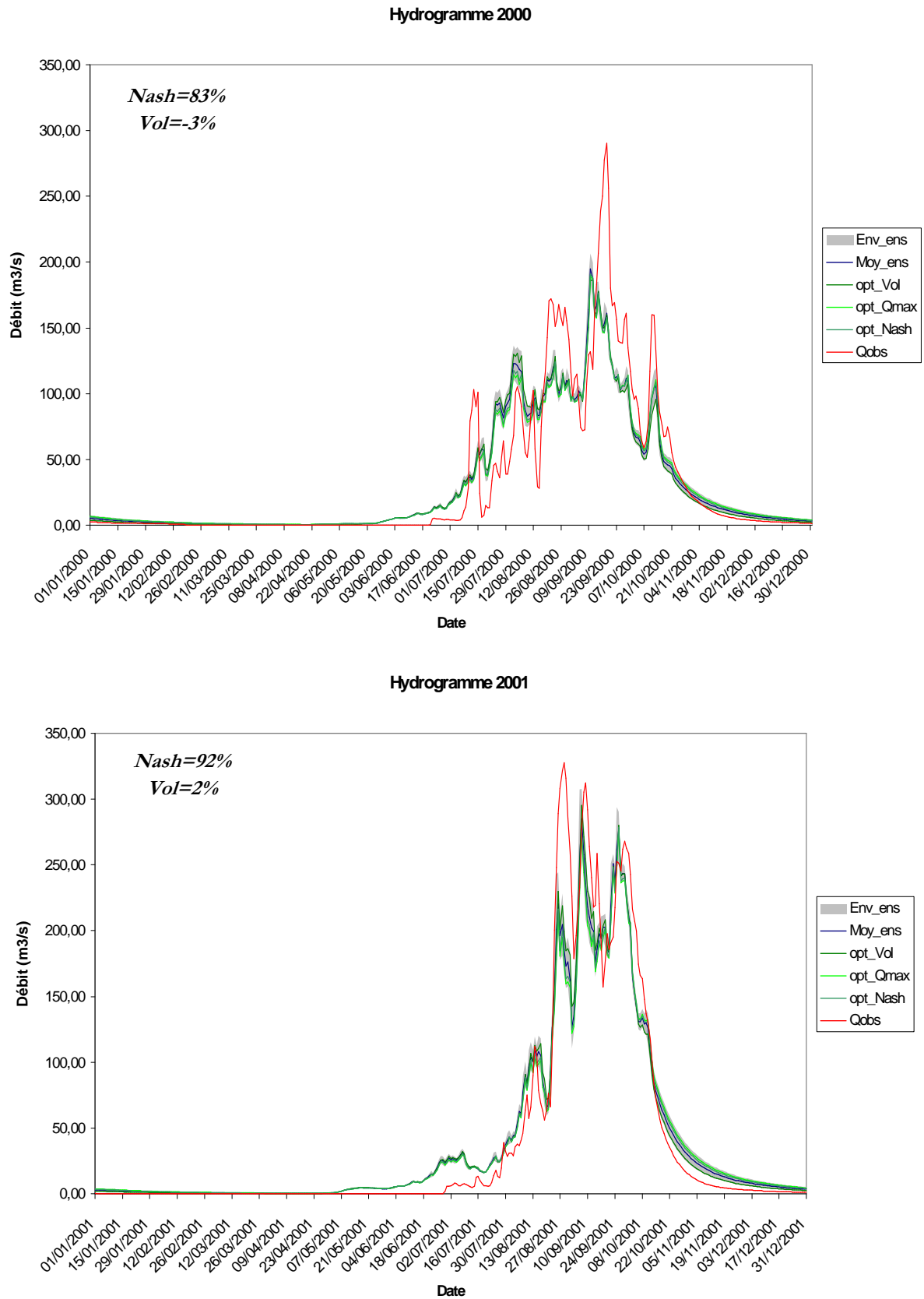


Figure 8- 9 : Débits simulés et observés en phase évaluation du calage pour les années 2000 et 2001

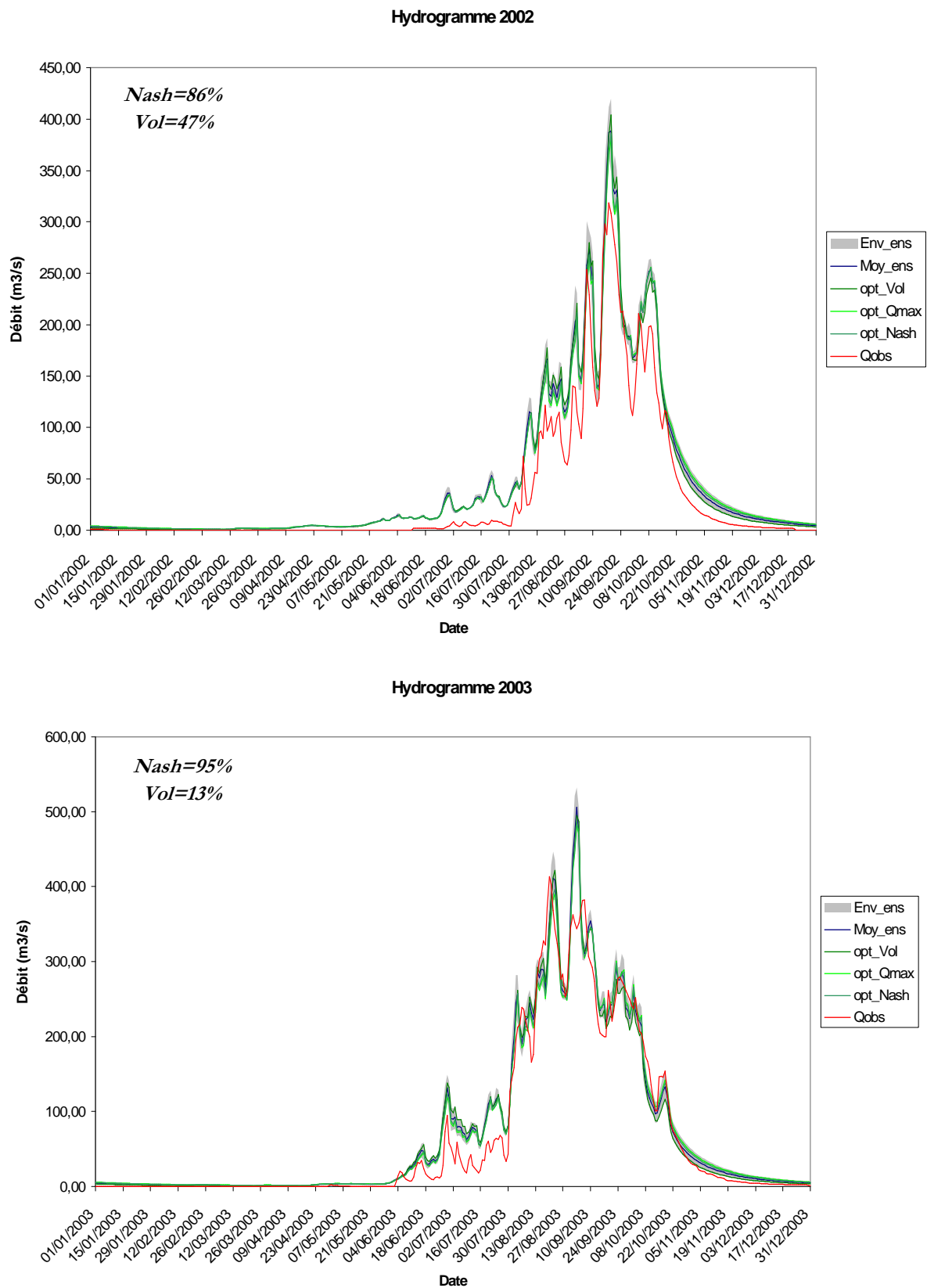


Figure 8- 10 : Débits simulés et observés en phase évaluation du calage pour les années 2002 et 2003

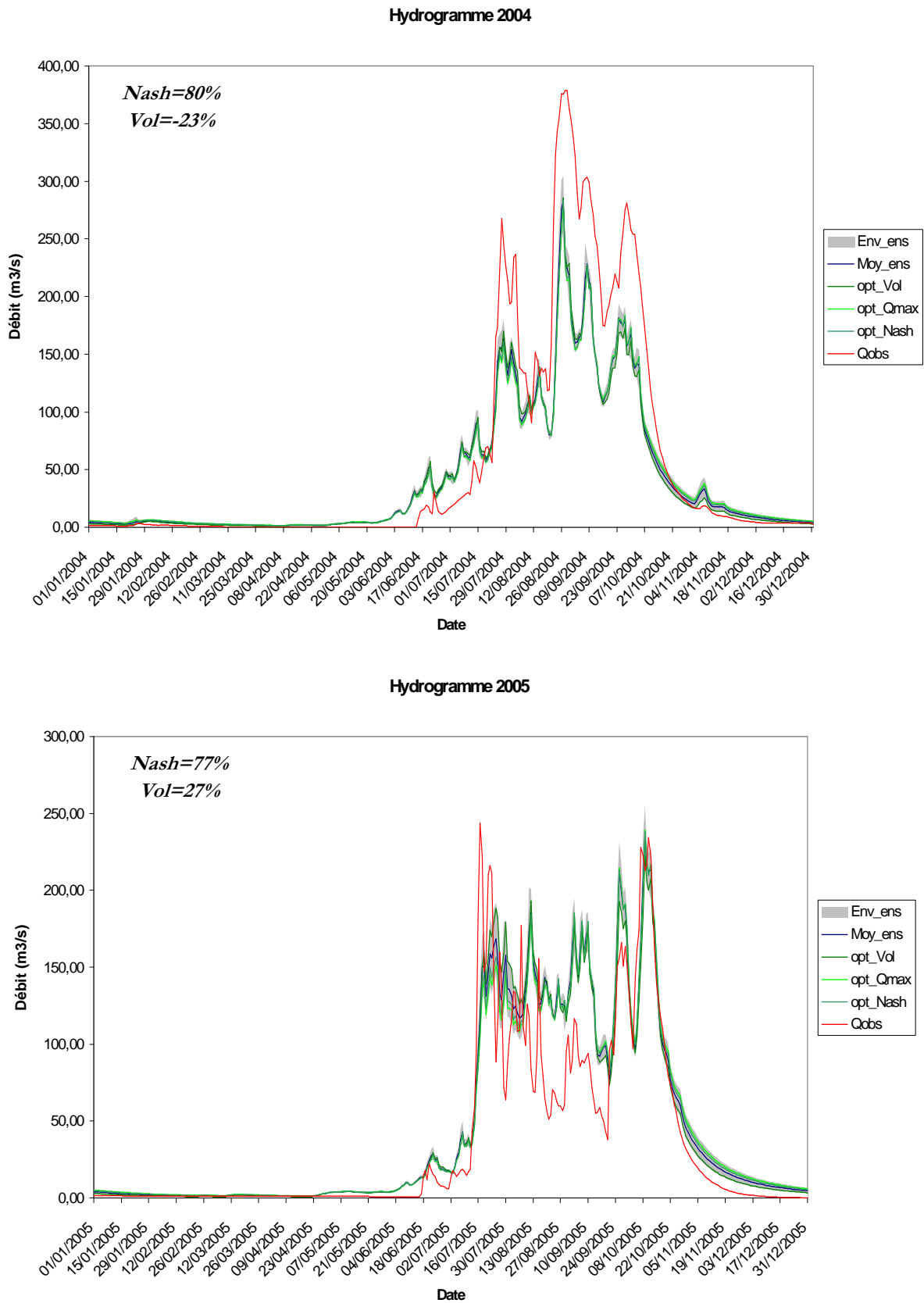


Figure 8- 11: Débits simulés et observés en phase évaluation du calage pour les années 2004 et 2005

L'année 2003 (la plus humide de la série des 8 ans) est visiblement la mieux simulée de toutes avec un critère Nash de 95%, de même l'année 2001 (année sèche) semble assez bien simulée (Nash=92%), par contre les années 1997 et 2005 (années moyennes) apparaissent assez mal simulées (Nash=74% et 77% respectivement). S'il est admis sur notre zone d'étude que, les spécificités hydro-climatiques de chaque année peuvent entraîner des différences notables dans la qualité des simulations (Le Lay M., 2006, Métadier M., 2006), **le cas particulier de l'année 2005 où on a une très mauvaise simulation a retenu notre attention, et fera l'objet d'un diagnostic approfondi dans la suite** (cf. Section 9.1). Nous retiendrons ici que le modèle ainsi calé n'est donc pas trop sensible au caractère humide ou sec de l'année, ce qui représente un avantage en terme d'équilibre, comparativement au cas général où le critère Nash est utilisé seul pour le calage et accorde plus de poids aux années humides au détriment des années sèches. Cela est aussi vrai, lorsqu'on s'intéresse au biais en volume, car on enregistre des sous-estimations pour tous les types d'années [2000 (sèche), 1999 (humide), 1997 et 2004 (moyen)] et des surestimations également [2001 (sèche), 2003 (humide), 2002 et 2005 (moyen)]. Ainsi, il y a 4 cas de sous-estimation et 4 de surestimation répartis de façon équilibrée entre les 3 types d'années.

Pour toutes les années, le démarrage de la saison hydrologique est mal (voire très mal) reproduit par le modèle. Nous avons précédemment rappelé (cf. Section 6.3.2.3) que les fortes valeurs irréalistes de K_0 (3.750 mm/h) sélectionnées lors du calage du modèle (contre des valeurs observées de l'ordre de 80 à 160 mm/h), font qu'à aucun moment de l'année le ruissellement hortonien n'est activé, donnant ainsi des simulations insatisfaisantes en début de saison. Avec le nouveau rapport d'anisotropie de conductivité hydraulique du sol adopté dans la présente étude sur l'Ouémé à Bétérou (cf. Section 6.3.2.3), les valeurs des paramètres obtenues en calage fournissent des estimations de K_0 allant de 173 à 314 mm/h. Malgré que ces valeurs de K_0 soient assez proches des observations, la mauvaise simulation du démarrage de la saison est toujours présente. Cette mauvaise simulation pourrait alors s'expliquer par le fait que l'occupation du sol est absente du modèle. En effet, les processus hydrologiques de génération des écoulements dépendent beaucoup d'une part, des précipitations et d'autre part, des états de surface (cf. Section 4.3) caractérisés par le sol en place et son occupation (utilisation et/ou couverture). Les états de surface ou leur modification jouent un grand rôle dans la production des écoulements (cf Sections 4.2.2.1 et 4.3.1) et peuvent être en relations directes avec les paramètres du modèle (Servat E. and Dézetter A., 1991, Servat E., 1993, Latron J. and Gallart F., 2008). Par exemple, le rôle majeur de la végétation sur la dynamique de la nappe est confirmé (Richard A.,

2010). Dans Topamma, seule la caractérisation hydrodynamique du sol est prise en compte. Mais il s'agit d'une prise en compte très partielle et limitée (cf. Section 6.3), dans la mesure où elle est encadrée par 2 hypothèses peu probables et très simplificatrices de la réalité : homogénéité spatiale [propriétés hydrodynamiques considérées homogènes sur tout le bassin, contrairement aux observations de Sounouvou (Sounouvou E., 2007) qui a analysé le comportement hydrogéologique de 3 versants aux couverts végétaux contrastés] et homogénéité temporelle (caractéristiques hydrodynamiques calées sur l'ensemble des années). Cette très grande limite dans la prise en compte de la caractérisation hydrodynamique du sol a sûrement un effet dégradant sur les performances du modèle en début de saison. Cette dégradation de performance en début de saison est à fortiori exacerbée par l'ignorance complète et totale de l'occupation du sol, de la dynamique de son utilisation et de sa couverture, toute chose (cette variable « occupation du sol ») qu'il n'est pas possible de paramétrer/caractériser dans la version actuelle du modèle. **Ainsi, le développement d'une nouvelle version du modèle Topamma, qui améliorerait les performances en début de saison, devrait s'appuyer sur une prise en compte de l'hydrodynamique et de l'occupation du sol, notamment leurs variations respectives dans le temps et dans l'espace.** Ce qui rendrait plus complexe ou trop sophistiqué le modèle, qui deviendrait plus gourmand en données et en temps de calcul. A défaut d'atteindre ou de viser un tel niveau de modélisation, et en fonction des besoins et objectifs poursuivis, on pourra toujours se contenter raisonnablement de la version actuelle dont les performances apparaissent satisfaisantes dans leur ensemble.

A l'opposé des démarrages de saison, les fins de saison sont relativement bien reproduites par le modèle, contrairement aux résultats antérieurs (Le Lay M., 2006, Métadier M., 2006) pour lesquels l'approche technique de calage du modèle [qui est l'identification d'un jeu de paramètres global optimal (cf. Section 4.2.3)] est différente de celle utilisée dans le présent travail (cf. Sections 7.3.1.3 et 7.3.2.2). Par exemple, les cas des années 2000, 2003 et 2004 sont assez satisfaisants. Il en est de même (bonne reproduction) de la dynamique saisonnière sauf dans quelques cas (2005 par exemple). Cette performance visible serait la conséquence du fait que, le seuil de 87% retenu pour le critère Nash en calage est assez élevé (cf. Section 7.3.2.2).

Enfin, il est utile de signaler à titre indicatif que les jeux de paramètres optimaux sont tous différents selon le critère ciblé, comme l'indique le *Tableau 8-4*.

On peut aisément constater que :

- tous ces jeux optimaux ont la même valeur du paramètre V_r ;

- les jeux optimaux selon les critères Qmax et Nash n'ont que deux paramètres de différence ; néanmoins, ces 2 paramètres différents restent très proches (l'écart entre les valeurs vaut respectivement 1 et 2 pas d'exploration de l'espace des paramètres sur 13 et 39 pas) ; cela peut s'expliquer par le fait que la plus forte valeur de débit journalier qui influence le critère Nash est à la base du critère Qmax (cf. Section 7.3.1.1).

Tableau 8- 4 : Bornes des paramètres des jeux finaux et jeux optimaux selon chaque critère

Paramètre	Unité	Bornes de l'espace exploré	Bornes de variation des 94 jeux finaux	Jeu optimal selon critère		
				Vol	Qmax	Nash
M	m	[0,0600 0,0900]	[0,0625 0,0800]	0,0625	0,0775	0,0750
To	m ² /h	[12,6 20,2]	[13,0 20,0]	19,6	18,0	17,6
doRatio	-	[5,6 6,8]	[6,0 6,4]	6,4	6,2	6,2
Vr	m/s	[0,250 0,350]	[0,275 0,325]	0,275	0,275	0,275

8.2.2 Appréciation de la corrélation entre débits observés et simulés

L'observation de la *Figure 8- 12* révèle qu'il y a une bonne corrélation d'ensemble entre débits observés et simulés. Les 94 coefficients de détermination (R^2) entre chaque série de débits simulés et la série de débits observés varient faiblement et restent dans la fourchette 86%-87%.

Le coefficient de détermination (R^2) entre la moyenne d'ensemble des simulations et les observations est de 86,94%, soit une corrélation supérieure à 93%, ce qui est satisfaisant.

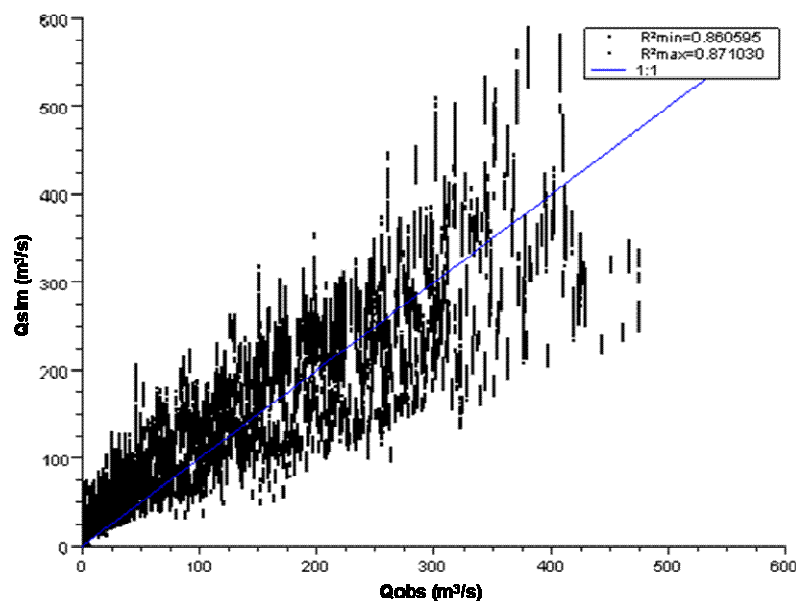


Figure 8- 12 : Corrélation entre débits observés et simulés en phase évaluation du calage

Néanmoins, on peut distinguer une surestimation globale pour les faibles débits inférieurs à $100 \text{ m}^3/\text{s}$ (début et fin de saison) contre une sous-estimation globale pour les très forts débits (6 valeurs) supérieurs à $400 \text{ m}^3/\text{s}$ comme on devrait s'y attendre avec l'utilisation du critère Nash (Gupta H. *et al.*, 2009). Néanmoins, on s'aperçoit que les moyennes et hautes eaux sont globalement mieux simulées (équilibre des biais) par rapport aux basses eaux, ce qui confirme à première vue le rôle de l'utilisation du critère Nash sur les hautes et moyennes eaux comme rappelé précédemment (cf. Section 7.3.1.1). Aussi, peut-on renoncer à toute idée de sous-estimation des hautes eaux, si l'on s'en tient au fait que l'effectif des valeurs élevées sous-estimées est insignifiant par rapport à l'effectif global (6 valeurs sur 2922).

8.2.3 Evaluation de la moyenne d'ensemble des simulations

Les valeurs des critères de calage en évaluation, c'est-à-dire calculées sur la moyenne d'ensemble des simulations sur les 8 années de calage, sont consignées dans le *Tableau 8- 5*.

Tableau 8- 5 : Valeur des critères de calage en phase évaluation

Critère	Valeur seuil en calage	Valeur en évaluation
Vol	compris entre $\pm 10\%$	-2%
Qmax	compris entre $\pm 25\%$	-7%
Nash	$\geq 87\%$	87%

La moyenne d'ensemble des simulations respecte donc bien les seuils de calage. Cela n'est pas surprenant, compte tenu de la méthode utilisée, où toutes les années d'évaluation ont été prises en compte par les échantillons de période lors du calage.

8.3 Validation du modèle

8.3.1 Analyse des simulations

La *Figure 8- 13* montre les hydrogrammes des 2 années de validation 1998 (humide la plus exceptionnelle de la série de 10 ans utilisée) et 2006 (sèche). On y a représenté :

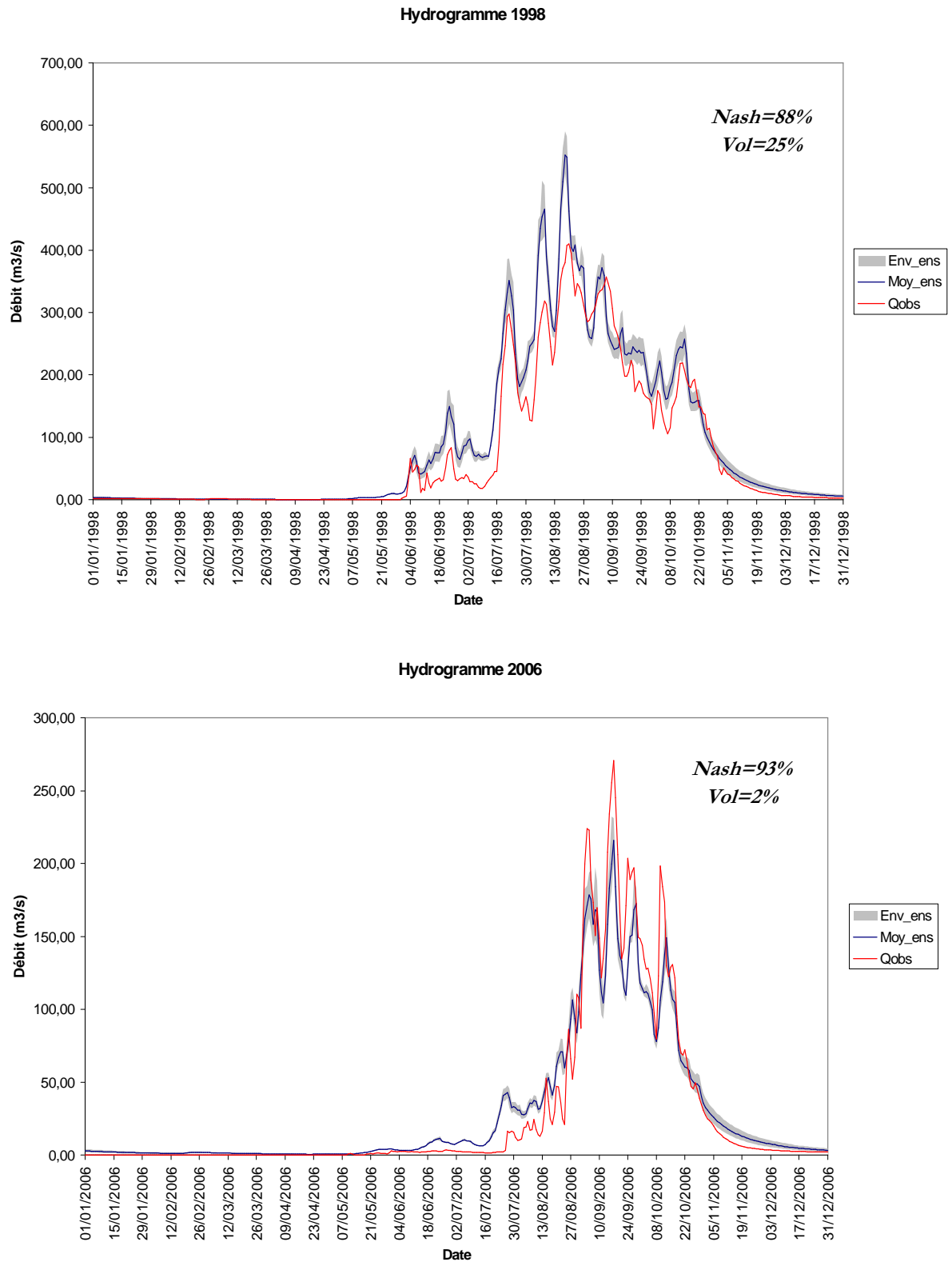


Figure 8- 13 : Débits simulés et observés en phase validation sur les années 1998 et 2006

- l'hydrogramme moyen des simulations « Moy_ens » [moyenne d'ensemble des 94 simulations à partir des 94 jeux de paramètres finaux de Lf (cf. Annexe 6)], ainsi que l'enveloppe de ces 94 simulations « Env_ens » ; et,
- l'hydrogramme observé.

Les graphiques de cette figure confirment l'ensemble des constats faits en phase calage (cf. Section 8.2.1) à savoir que :

- l'enveloppe des simulations est très restreinte autour de leur moyenne d'ensemble ;
- il n'y a aucune année durant laquelle l'enveloppe de confiance des simulations contient toutes les observations ; on constate une sur-estimation de 25% du volume en 1998 (année exceptionnellement humide) contre 2% en 2006 (année sèche) ; et un critère Nash en 2006 (93%) meilleur plus qu'en 1998 (88%) ; ainsi l'année 2006 est mieux simulée que l'année 1998 ;
- le démarrage de la saison hydrologique est toujours mal reproduit par le modèle, tandis que les fins de saison sont relativement bien représentées, à l'instar de la dynamique hydrologique saisonnière.

8.3.2 Résultats des tests de validation

La valeur du critère Vol pour la moyenne d'ensemble des simulations sur les 2 années de validation est de 18% contre un seuil tolérable fixé à $\pm 25\%$ (cf. Section 7.5.2) : le modèle passe donc ce test de volume avec succès. L'importance de cette valeur (+18%) sur les 2 années est liée à la surestimation de 1998 (+25%), année exceptionnellement humide.

La valeur du critère Qmax pour la moyenne d'ensemble des simulations sur les années de validation est de 35% contre un seuil tolérable fixé à $\pm 40\%$ (cf. Section 7.5.2) : le modèle passe aussi ce test de débit de pic avec succès.

La valeur du critère Nash pour la moyenne d'ensemble des simulations sur les années de validation est de 89% contre un seuil tolérable fixé à 72% (cf. Section 7.5.2) : le modèle passe également ce test de dynamique avec succès.

Avec ses 89% comme valeur du critère de Nash, le modèle semble faire légèrement mieux en validation qu'en évaluation (où Nash=87%) en ce qui concerne la dynamique hydrologique saisonnière. Cette situation est sûrement due au caractère très exigeant ou rigoureux du calage, lié

à notre souhait de ne disposer que d'une centaine de jeux finaux (cf. Section 7.3.2.2) sur 17.745 au départ.

En définitive, le modèle calé a passé ces trois tests avec succès. Il est donc validé et sera utilisé pour la suite de l'étude. Néanmoins, comme prévu à la Section 7.5.3, il est utile d'opérer quelques contrôles afin de s'assurer d'un minimum de réalisme dans les simulations du modèle.

8.3.3 Contrôles du réalisme des simulations

8.3.3.1 Contrôle sur les débits

La *Figure 8-14* représente la relation globale entre débits journaliers observés et simulés. Elle confirme la surestimation globale des débits (+18%) avec une très forte corrélation (R^2 variant de 91 à 93%) entre ces 2 variables. Ce résultat illustre une fois de plus que le modèle ainsi calé fait mieux en validation qu'en calage.

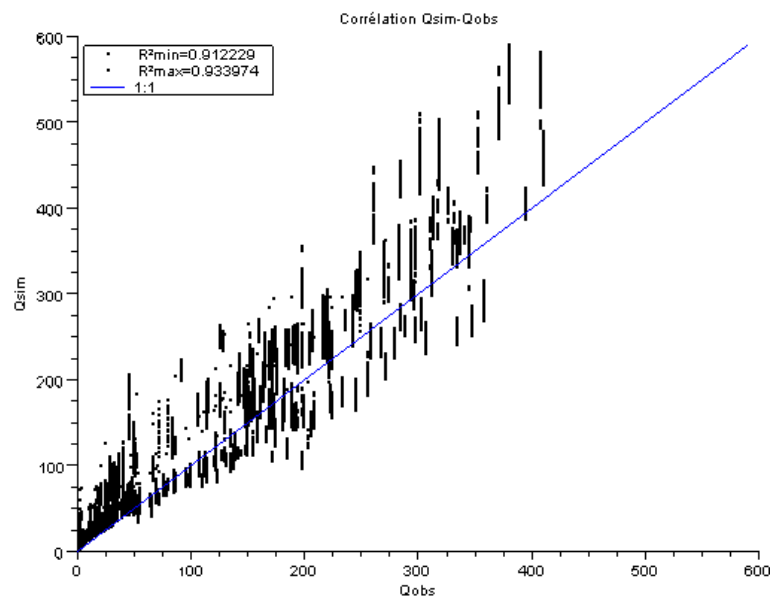


Figure 8-14 : Corrélation entre débits observés et simulés en phase validation du modèle

Les données de conductivité électrique disponibles sur 2005 et 2006 (du 14 juin au 10 octobre) permettent de contrôler la valeur du coefficient d'exfiltration calculé comme indiqué à la Section 7.5.3.1. On constate que les valeurs simulées sont supérieures à celles observées. Elles restent néanmoins plus proches des observations en 2005 qu'en 2006, ce qui peut être logiquement admis, dans la mesure où l'année 2005 est une année de calage. Ces chiffres

démontrent également la fidélité du modèle à reproduire un coefficient d'exfiltration constant compris entre 51 et 58% sur la période concernée comme le montre le tableau suivant.

Tableau 8- 6 : Valeur observée et simulée du coefficient d'exfiltration

Année	Phase de la modélisation	Valeur du coefficient d'exfiltration (%)		
		observée	Minimale simulée	Maximale simulée
2005	Evaluation	49	51	58
2006	Validation	40	51	58

Ces résultats obtenus doivent être admis comme très acceptables, compte tenu des nombreuses incertitudes autour des mesures de géochimie (conductivité électrique des échantillons d'eau) et des approximations faites en appliquant la méthode de déconvolution hydrogéochimique des hydrogrammes (cf. Annexe 5). Nous avons rappelé (cf. Section 4.2.2.2) que le coefficient d'exfiltration calculé sur les données observées à l'exutoire du bassin de la Donga à Kolokondé (sous-bassin de l'Ouémé à Bétérou) oscillait entre 55 et 81% en 2003 et entre 70 et 96% en 2004 en pleine saison (juin-octobre), ce qui donne une incertitude absolue de $\pm 13\%$ ²⁴ (Kamagaté B., 2006). Si cette même valeur d'incertitude absolue est admise ici, on estimerait le coefficient d'exfiltration observé entre 35 et 61% en 2005 (intervalle contenant les valeurs simulées) et entre 27 et 53% en 2006 (intervalle contenant certaines valeurs simulées).

Il faut aussi prendre en compte dans cette analyse le fait que les valeurs de CE (conductivités électriques) sur lesquelles est basée la méthode de déconvolution hydrogéochimique (cf. Annexe 5) tendent à augmenter d'amont en aval dans les écoulements en rivière (Kamagaté B., 2006). **Ainsi, jusqu'à l'exutoire de l'Ouémé à Bétérou, on s'attendrait à des diminutions du débit ruisselé au profit du débit exfiltré (qui augmenterait) et donc le coefficient d'exfiltration observé augmenterait conséquemment, ce qui crédibiliserait davantage les résultats donnés par le modèle ici.**

8.3.3.2 Contrôle sur l'évapotranspiration réelle

²⁴ Evaluation faite par la méthode Monte-Carlo avec un tirage aléatoire de 200 valeurs des pôles de surface et de sub-surface à partir d'une distribution supposée normale et basée sur les caractéristiques (moyenne et écart-type) observées.

La **Figure 8- 15** présente la moyenne climatologique d'ensemble sur 10 ans (1997-2006) de l'ETR simulée et l'ETR observée au niveau de la station de flux de Nalohou en 2008.

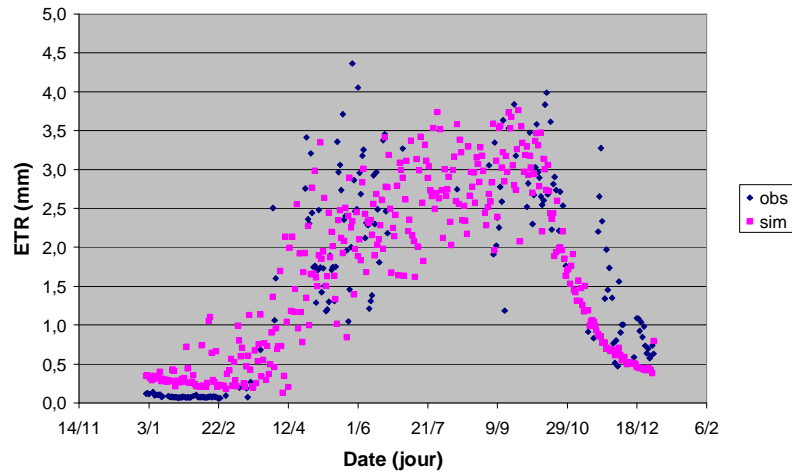


Figure 8- 15 : ETR journalière simulée par Topamma (moyenne climatologique d'ensemble sur la période 1997-2006) et ETR observée au niveau de la station de flux de Nalohou en 2008

Cette figure montre que les 2 variables représentées évoluent dans des gammes de valeur similaires, si bien qu'on peut se dire que les ETR simulées par Topamma paraissent très réalistes. On voit néanmoins une surestimation de l'ETR observée en début d'année (janvier-février) et une sous-estimation en fin d'année (novembre-décembre) ; mais sur l'ensemble de la série disponible (avec 187 valeurs journalières dans l'année), on a une sous-estimation globale (de -7%) comme l'illustre la figure suivante, avec une très forte dispersion des valeurs et une corrélation relativement moyenne ($R^2=63\%$).

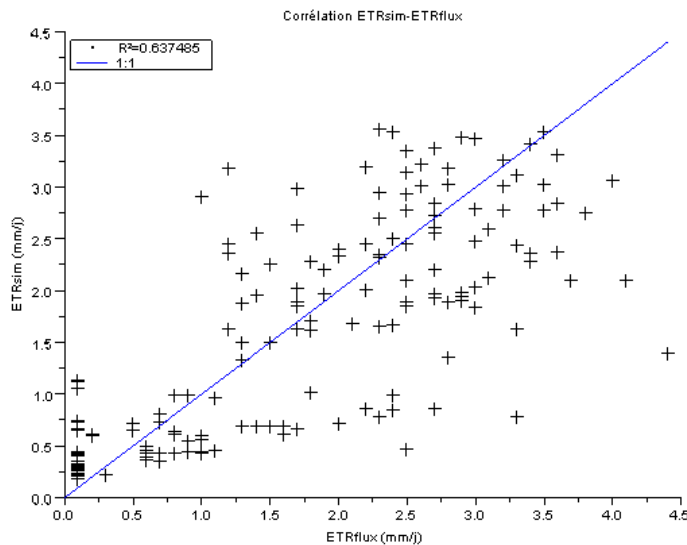


Figure 8- 16 : Corrélation entre ETR journalière simulée par Topamma (moyenne climatologique sur la période 1997-2006) et ETR observée au niveau de la station de flux de Nalohou en 2008

Toutefois, ces résultats doivent être pris avec prudence et sans grande rigueur, dans la mesure où la série d'ETR observée est une série ponctuelle, issue du bilan d'énergie réalisé sur un couvert végétal particulier (jachère) et non représentatif de la zone d'étude (cf. Section 3.1.7). En l'occurrence, on devrait s'attendre à des valeurs moyennes d'ETR observées plus élevées car le type de végétation dominant sur le bassin est la forêt ; et en conséquence, la sous-estimation de l'ETR par le modèle deviendrait plus forte.

8.3.3.3 Contrôle sur la recharge des nappes profondes

La

Figure 8- 17a montre le contrôle global (cf. Section 7.5.3.3) du réalisme de la percolation simulée sur la période 1997-2006. On constate que la somme ETR+ETRnappe est toujours inférieure à l'ETP, et en conséquence, on ne remet pas en cause l'hypothèse d'une percolation réaliste à ce stade du contrôle.

Par contre, avec le contrôle affiné (cf. Section 7.5.3.3) sur 2001-2006, on constate que la percolation simulée (courbe orange) n'est pas toujours supérieure à la variation de stock de la nappe profonde d'altérite (

Figure 8- 17b), et en conséquence, la vidange de la nappe (calculée à partir de la percolation de Topamma comme recharge, et des niveaux piézométriques observés) est parfois négative, ce qui est impossible et remet donc en cause le réalisme de la percolation simulée. En effet, il y a 119 jours dans l'année (soit 33% du temps) où la variation de stock souterrain observée est supérieure à la percolation simulée (courbe rose), et il n'y a pas de période privilégiée au sein de l'année où se produit cette situation anormale.

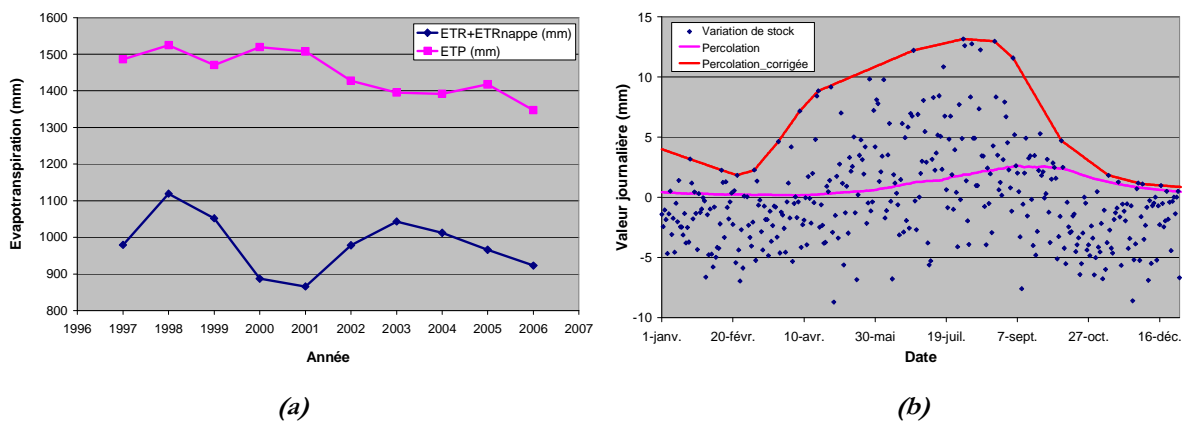


Figure 8- 17 : Contrôle global de la percolation simulée [comparaison ETP et ETR+ETRnappe (a)] et contrôle affiné [comparaison avec la variation de stock souterrain sur 2001-2006 (b)]

Pour rendre réaliste la percolation simulée, il faut avoir une courbe supérieure ou égale à la variation de stock pour tous les jours de l'année. La courbe rouge représente une correction *à minima* de la percolation simulée, calculée en interpolant linéairement entre les points les plus hauts de la série observée de variation de stock. Mais avec cette courbe corrigée, on a une valeur de percolation cumulée de l'ordre de 2.470 mm sur l'année contre une pluviométrie annuelle moyenne de 1.121 mm (sur les 6 années concernées, 2001 à 2006), ce qui est encore impossible. **Ainsi, la percolation simulée par le modèle Topamma ne paraît pas du tout réaliste au vu de la dynamique piézométrique observée, à moins de remettre en cause certaines hypothèses du calcul : la possibilité d'une recharge latérale souterraine (flux entrant) à partir des bassins topographiques voisins, les approximations faites dans le calcul du niveau piézométrique moyen (moyenne spatiale et régression linéaire multiple pour combler les lacunes), et la porosité de 5% admise dans les altérites de socle.** A ce propos, la variation de stock souterrain de la nappe d'altérite est calculée en faisant l'hypothèse d'une porosité de drainage de 5% des altérites de socle dans lesquelles baigne la nappe. Cette valeur de porosité de drainage est un résultat de calculs géophysiques, et il est probable qu'elle soit une valeur maximale, car elle concerne des terrains à grains assez fins de type limons et sables fins (Descloitres M. *et al.*, 2011). **Ainsi, si la valeur de porosité de drainage diminue, la variation de stock diminuera aussi ; et le calcul indique qu'il faut une diminution de la valeur de porosité de drainage de 5% à 0,1% pour rendre la percolation journalière simulée réaliste, c'est-à-dire supérieure à la variation observée du stock souterrain à tous les pas de temps.**

Le taux de 0,1% paraît très peu vraisemblable et on retiendra en conclusion que la percolation simulée par Topamma est sujette à de nombreuses interrogations et incertitudes. **Le fonctionnement de la nappe d'altérite mérite d'être étudié au moyen de méthodes géophysiques et de modèles hydrogéologiques bien affinés en vue d'estimer de façon plus rigoureuse et réaliste les réserves d'eau souterraine, qui demeurent la principale source d'eau exploitée pour satisfaire les besoins sur le bassin.**

8.4 Calcul du bilan hydrologique

Le bilan hydrologique a été calculé sur la période 1997-2006. La moyenne annuelle de la variation de stock (ΔS) est négligée par la suite dans la mesure où elle est très faible (0,08% de la pluviométrie annuelle moyenne).

La **Figure 8- 18a** montre le bilan hydrologique global (cf. Section 7.6) sur la décennie d'étude (1997-2006). Elle répartit globalement la précipitation annuelle moyenne en **53% d'évapotranspiration (ETR)**, **14% d'écoulement (Q)** et **33% de recharge des nappes profondes (R)**. Les disparités d'une année à l'autre sont illustrées par la **Figure 8- 18b**.

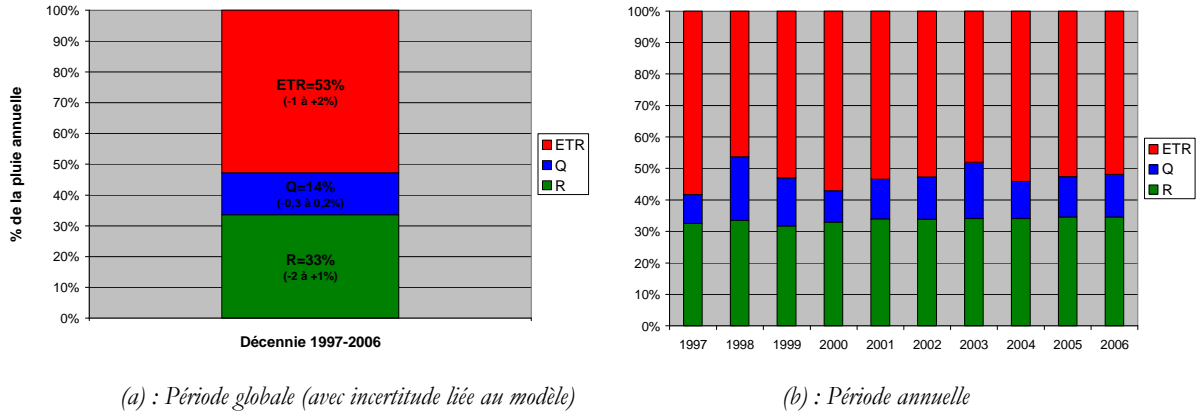


Figure 8- 18 : Bilan hydrologique sur la décennie d'étude 1997-2006

Les valeurs extrêmes de chaque composante du cycle hydrologique ou terme du bilan annuel sont résumées dans le **Tableau 8- 7**.

Tableau 8- 7 : Valeurs extrêmes des termes du bilan hydrologique annuel sur la décennie d'étude

Valeur	ETR	Écoulement (Q)	Recharge (R)
Minimum	46% en 1998	9% en 1997	29% en 1997
Maximum	60% en 1997	21% en 1998	36% en 2005

En comparant les chiffres obtenus ici pour l'année 2002 à ceux obtenus par des études précédentes sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou (cf. Section 4.2.4.1), on observe que la recharge a subi une baisse de l'ordre de 4% tandis que l'ETR et l'écoulement sont en hausse de 1 à 3% (**Tableau 8- 8**).

Tableau 8- 8 : Comparaison des bilans hydrologiques de l'année 2002

Source	ETR	Écoulement	Recharge
Résultats actuels	53%	13%	34%
(Le Lay M., 2006)	50%	12%	38%
(Zannou A. B., 2006)	51%	11%	38%

Cette légère différence peut être expliquée par plusieurs facteurs :

- la redéfinition du rapport d'anisotropie entre composantes horizontale et verticale de la conductivité hydraulique du sol ;
- la redéfinition plus resserrée de l'espace des paramètres ;
- l'approche différente adoptée pour le calage du modèle et l'échantillon de données plus grand (10 ans) utilisés dans le cadre du présent travail.

L'ETR calculée ici par Topamma est comprise entre 46% et 60% du bilan annuel. Ces chiffres paraissent sous-estimés si l'on considère le fait que, dans la région intertropicale, l'ETR est le terme majeur et peut atteindre 85% du bilan (Peugeot C. *et al.*, 2009; Guyot A., 2010; Peugeot C. *et al.*, 2011). De même, les gammes de valeur fournies ici par Topamma, sont plus compatibles avec celles obtenues précédemment sur la zone (cf. Section 4.2.2.3), en utilisant la méthode des précipitations antérieures qui ne prend en compte que la reprise évaporatoire à partir des premiers centimètres du sol (40 cm) à l'exclusion totale de la transpiration (Zannou A. B., 2006). **Ainsi, il y a lieu de s'interroger sur les causes de cette incapacité du modèle à produire plus d'ETR.** Est-ce liée à une demande évapotranspiratoire faible (ETP faible) ou plutôt à la méthode mathématique de conversion de l'ETP en ETR. Cette question est abordée par la suite (cf. Section 9.2) dans le cadre d'un diagnostic du modèle par analyse de sensibilité. Signalons qu'à ce sujet, des investigations sont actuellement conduites sur le bassin de la Donga à travers des mesures de sève, afin d'évaluer l'importance de la reprise évapotranspiratoire des grands arbres qui puiseraient dans le réservoir des altérites, non modélisé par Topamma.

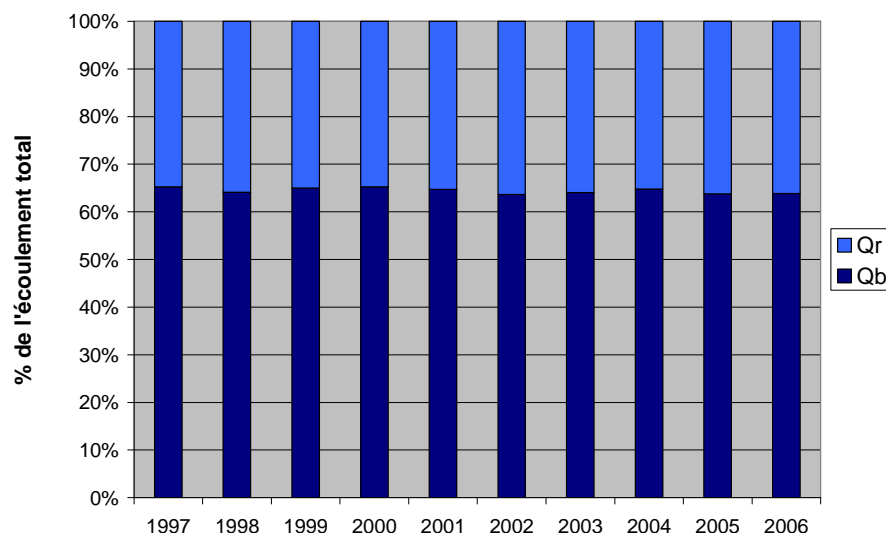


Figure 8- 19 : Répartition de l'écoulement total entre débit de base (Qb) et débit ruisselé (Qr)

Sous un autre angle, on s'intéresse à la variation interannuelle du coefficient d'exfiltration (cf Annexe 5) sur la période d'étude (*Figure 8- 19*).

On observe qu'avec une moyenne de 64% sur les 10 ans, le rapport d'exfiltration varie très peu d'une année à l'autre. Ainsi, environ 58% à 65% de l'écoulement total annuel simulé par Topamma à l'exutoire de l'Ouémé à Bétérou provient de l'exfiltration de la zone de subsurface. Ce même chiffre, calculé sur la saison des pluies (juin-octobre) varie entre 51 et 58% (cf. Section 8.3.3.1), ce qui confirme que les écoulements hors saison des pluies sont essentiellement d'origine subsurface.

8.5 Représentation de la variabilité hydro-pluviométrique interannuelle

8.5.1 Confrontation des relations pluie-débit observées et simulées

Les relations pluie-débit observée et simulée sont représentées sur la figure suivante.

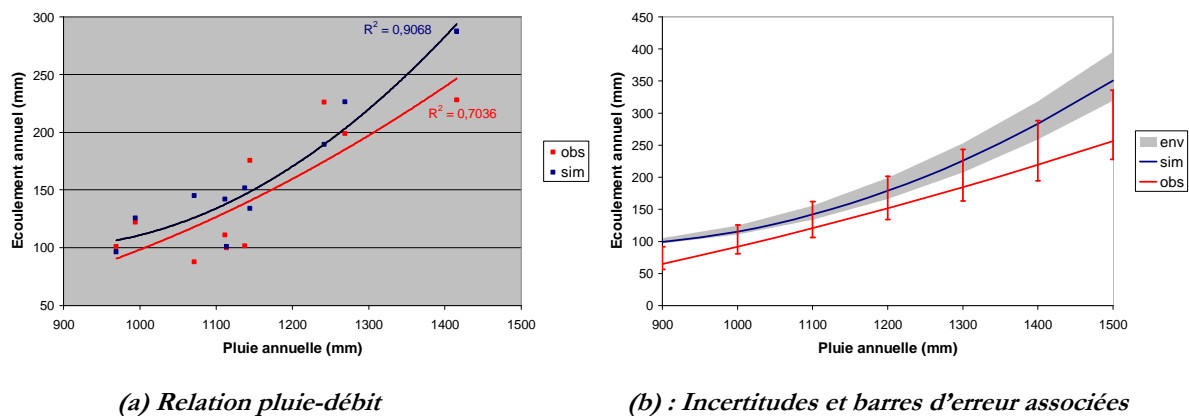


Figure 8- 20 : Relation pluie-débit observée et simulée sur la décennie d'étude avec incertitudes du modèle et barres d'erreur des observations

On constate que la relation globale pluie-débit simulée se situe légèrement au-dessus de la relation observée (*Figure 8- 20a*), notamment entre 1000 et 1300 mm de pluie ; même si pour les 10 années pris individuellement, il y a des situations de surestimation (6 années) et de sous-estimation (4 années). Hors de cette zone moyenne, l'écart entre les 2 relations devient grand. L'ajustement de la relation simulée à une fonction polynôme du second degré donne un coefficient de détermination de l'ordre de 91% contre une valeur de 70% pour la relation observée, ce qui indique que les simulations sont plus resserrées que les observations autour de leur courbe ajustée respective.

La *Figure 8- 20b* représente, outre les ajustements des relations pluie-débit simulée et observée, l'incertitude du modèle autour de la première et les barres d'erreur autour de la seconde. On s'aperçoit qu'entre 1000 et 1300 mm de pluie, la marge d'erreur autour des observations contient l'enveloppe de confiance de la relation simulée. Ainsi, pour une pluviométrie annuelle moyenne de l'ordre de 1200 mm, l'ensemble des simulations d'écoulement annuel reste bien dans la gamme des observations, ce qui contredit toute idée de biais systématique dans la représentation de la relation pluie-débit par le modèle comme on aurait pu anticiper selon la *Figure 8- 20a*.

8.5.2 Analyse de la variabilité hydro-pluviométrique

La variabilité hydro-pluviométrique interannuelle est appréhendée à travers les indices pluviométriques et hydrologiques (cf. Section 7.7), ainsi que les écarts à la moyenne représentés à la *Figure 8- 21*.

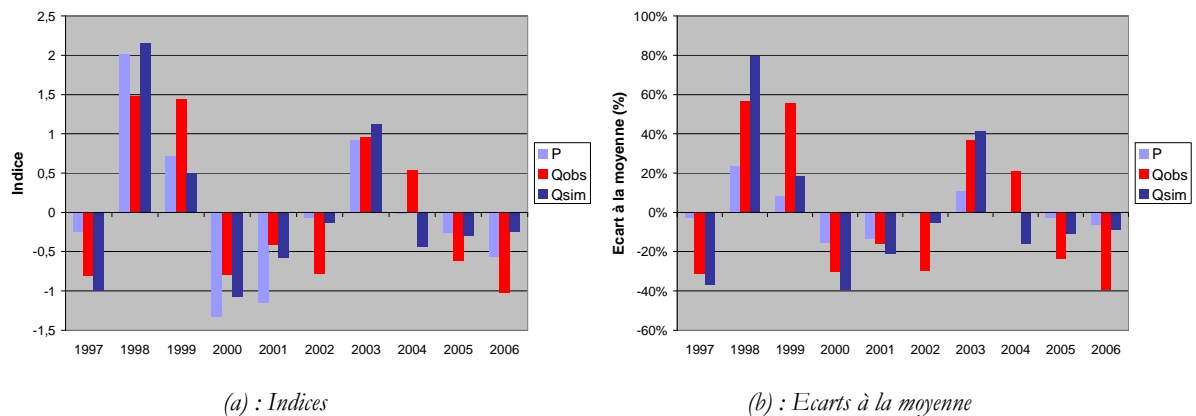


Figure 8- 21 : Indices et écarts à la moyenne annuelle des précipitations et des écoulements sur la décennie 1997-2006

On observe que le modèle reproduit assez bien la variabilité hydro-pluviométrique observée, surtout les dynamiques interannuelles, notamment les passages d'une année excédentaire à une année déficitaire et vice-versa, sauf le cas de l'année 2004, très moyenne en précipitation, mais respectivement excédentaire et déficitaire dans les observations et les simulations hydrologiques.

Aussi, la variation en dent de scie (alternée) est très faible, dans la mesure où il n'existe aucun groupe de trois années consécutives dans lequel, l'année du milieu n'a pas le même signe que les deux autres années. **Le passage d'une année très humide à une année très sèche,**

passé toujours par une année intermédiaire plutôt moyenne (excédentaire ou déficitaire). Cette constatation, bien visible dans les données de précipitations est convenablement reproduite par le modèle dans les simulations.

Avec la *Figure 8- 2b*, on s'intéresse particulièrement à la traduction ou propagation des situations extrêmes par le modèle. A cet effet, on observe deux cas extrêmes :

- l'année 1998, la plus humide a connu une pluviométrie excédentaire de 23% par rapport à la moyenne des 10 ans ; cet excédent pluviométrique a provoqué un excédent en écoulement simulé de 80%, soit une amplification par 3,5. Avec les observations, on obtient un facteur d'amplification moindre qui s'établit à 2,5.
- l'année 2000, la plus sèche, a connu une pluviométrie en baisse de 15% par rapport à la moyenne des 10 ans, et une baisse des écoulements simulés de 40%, soit une amplification par 2,7 au lieu de 2,1 avec les observations.

Ainsi, les situations extrêmes (excédentaires ou déficitaires) sont globalement amplifiées par le système hydrologique. L'amplification semble légèrement plus forte pour les situations excédentaires que pour les déficits. **Dans tous les cas, le modèle hydrologique Topamma fournit des facteurs d'amplification plus élevés que la réalité observée. La sensibilité de ce modèle aux biais dans les données pluviométriques d'entrée mérite donc d'être regardée de près.** Ce qui sera fait au prochain Chapitre.

CHAPITRE 9 : Diagnostic à postériori des faiblesses du modèle

Les résultats du modèle hydrologique Topamma, obtenus au Chapitre précédent, ont révélé quelques faiblesses auxquelles il convient de s'intéresser :

- La simulation très peu satisfaisante de l'année 2005 : l'hydrogramme simulé 2005 (cf. Section 8.2.1) est visiblement très en désaccord avec l'hydrogramme observé, par rapport aux autres années. Cette très mauvaise simulation à côté des neuf autres années plus acceptables laisse penser à l'existence au sein de l'année 2005 d'une singularité qui échappe au modèle. C'est ce qui sera diagnostiqué en premier lieu à la Section 9.1 du présent Chapitre.
- L'évapotranspiration réelle simulée par le modèle hydrologique, de l'ordre de 53% de la pluviométrie annuelle semble être sous-estimée (cf. Section 8.4). En supposant que la pluviométrie ne soit pas limitante, cette situation pourrait être liée à deux facteurs : un premier facteur externe au modèle et lié à une demande évapotranspiratoire éventuellement faible (logiquement si l'on ne demande pas assez au modèle, il produira moins), ou alors, un second facteur interne au modèle, lié à la formule mathématique de transformation de l'ETP en ETR qui limiterait la production d'ETR. Cette question fera l'objet de la Section 9.2 du présent Chapitre.
- Les situations pluviométriques excédentaires et déficitaires extrêmes enregistrées sur la période d'étude 1997-2006 ont été amplifiées par le modèle avec des facteurs d'amplification allant de 2,7 à 3,5 (cf. Section 8.5.2), supérieurs aux facteurs calculés sur les observations. Or, un des intérêts de la modélisation hydrologique est de permettre l'élaboration de scénarios de ressources en eau sur un bassin, notamment dans le cadre d'une gestion intégrée mise en œuvre par un service opérationnel comme la DG-Eau. A cet effet, il est fréquent de recourir à des données climatiques du futur (données non observées) issues généralement d'images satellites ou générées par des modèles climatiques. Ces données sont souvent entachées de biais par rapport aux observations réelles ; et il est alors important de connaître au préalable, la sensibilité de son modèle hydrologique dans de telles conditions (Paturel J.-E. *et al.*, 1995). C'est ce qui sera fait en dernier lieu à la Section 9.3 du présent Chapitre pour Topamma.

Ainsi, dans ce qui suit, nous nous intéressons à diagnostiquer successivement ces faiblesses identifiées en vue de proposer des voies éventuelles d'amélioration du modèle. Néanmoins, il n'est pas précoce de répondre à la question « pourquoi des analyses de sensibilité après mise en œuvre du modèle ? ». En effet, il n'est pas fréquent de jeter un regard retrospectif sur un outil qu'on a mis des soins à construire en vue d'un usage bien précis, c'est-à-dire un outil qu'on a construit avec le maximum d'assurance. Mais l'usage d'un modèle scientifique dans un cadre d'ingénierie opérationnelle qui est celui de l'évaluation des ressources en eau par exemple, comporte l'avantage de la critique qui permet à l'ingénieur de tester par lui-même les limites de l'outil proposé par le scientifique. Quels que soient les résultats du test, l'ingénieur pourra toujours utiliser l'outil mais en toute connaissance de cause. C'est bien cette préoccupation de l'ingénieur du service opérationnel que nous sommes qui nous a poussé à ce Chapitre 9.

9.1 Diagnostic de l'hydrogramme 2005 : sensibilité du modèle à la dynamique spatiale des précipitations

La faible satisfaction que l'on ressent à la vue des résultats de l'année 2005 par rapport aux neuf autres années (cf. *Figure 8-11* à la page 211) pousse à faire des investigations. D'abord, il convient de bien décrypter les symptômes des simulations de cette année 2005.

9.1.1. Décryptage des symptômes majeurs des simulations 2005 et diagnostic posé

La *Figure 9-1* présente les hydrogrammes (observé et simulé) de l'année de 2005.

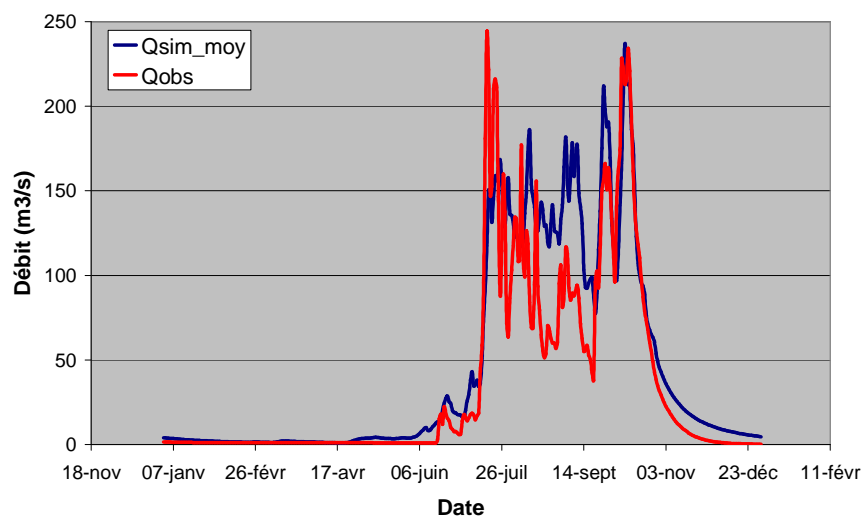


Figure 9-1 : Hydrogramme observé et simulé en 2005

D'abord, l'hydrogramme observé de 2005 possède deux pics nets de débit dont les valeurs sont très proches (près de $250 \text{ m}^3/\text{s}$). Par contre, ces deux pics sont très éloignés dans le temps : le premier très précoce arrive en tout début de saison (17 juillet), et le second très tardif arrive en fin de saison (11 octobre). Entre les deux pics ainsi identifiés, les débits baissent sérieusement (jusqu'en dessous de $50 \text{ m}^3/\text{s}$) au voisinage des dates pendant lesquelles ils sont couramment à leurs plus fortes valeurs de saison, si bien qu'on pourrait se dire qu'on est dans un contexte hydrologique à deux périodes de hautes eaux intercalées par une période basse. Or, cette idée est illusoire, car elle est bien contestée par le signal hydrologique observé sur les neuf autres années de simulation [cf. *Figure 8- 8* (page 208) à *Figure 8- 11* (page 211)] et est en contradiction flagrante avec le signal pluviométrique moyen de la zone d'étude, composé d'une unique saison pluvieuse intercalée entre deux périodes sèches au sein d'une même année calendaire (cf. *Figure 5- 4* à la page 138).

Cette faible concordance entre l'évolution des débits observés et le signal pluviométrique moyen mérite qu'on s'y attarde, dans la mesure où elle cache une réalité difficile à appréhender. C'est probablement cette inadéquation ou cette « vérité cachée » qui constituerait un handicap pour le modèle hydrologique, dans la mesure où, sur les neuf autres années, il rencontre des situations assez comparables, contrairement à 2005. La question fondamentale serait donc de vérifier si le signal pluviométrique 2005 est suffisamment compatible avec le signal moyen courant sur la zone d'étude.

A cet effet, on compare sur la *Figure 9- 2*, la dynamique temporelle intra-saisonnière des précipitations et des écoulements sur la période 1998-2004 telle qu'illustrée précédemment (Zannou A. B., 2006) et sur l'année 2005 à travers les pourcentages cumulés respectifs de chaque mois.

On constate une très grande similitude entre la période 1998-2004 et l'année 2005 pour les précipitations, tandis que pour les débits, il y a des différences plus fortes et facilement visibles. Ainsi, on peut conclure que l'inadéquation de l'hydrogramme observé en 2005 n'est pas due à la dynamique temporelle intra-saisonnière des précipitations de la même année.

Si la répartition temporelle des précipitations n'est pas la cause qui occasionne cette faiblesse du modèle, leur répartition spatiale peut, quant à elle, impacter sensiblement les simulations, dans la mesure où, le modèle Topamma ne prend pas en compte leur variabilité spatiale (cf. Section 6.3).

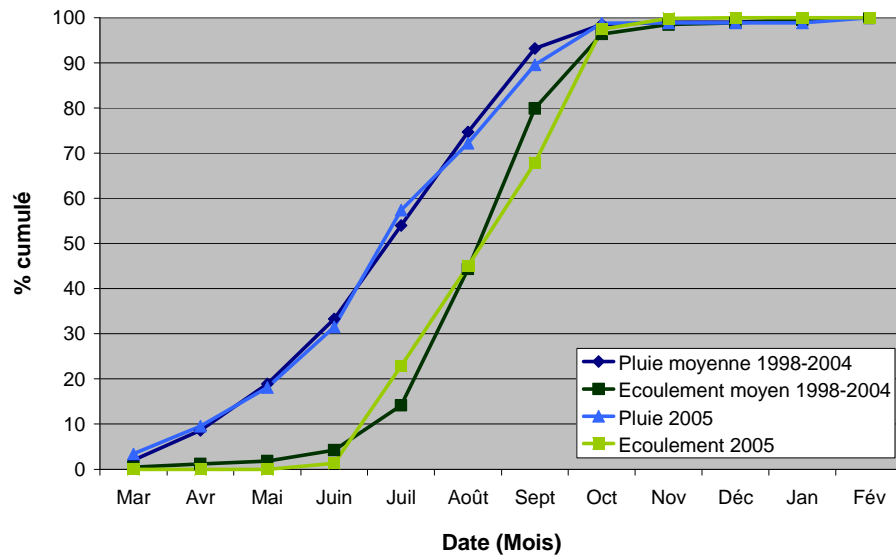


Figure 9- 2 : Pluie et écoulement observés sur 1998-2004 et 2005 en pourcentage cumulé de chaque mois dans l'année

Les investigations réalisées ici, au sujet d'une éventuelle répartition spatiale singulière des précipitations de l'année 2005, sont basées sur les cartes de pluie des années 2002 à 2007 (Figure 9- 3) sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou (Quenum M. and Lawin E., 2011).

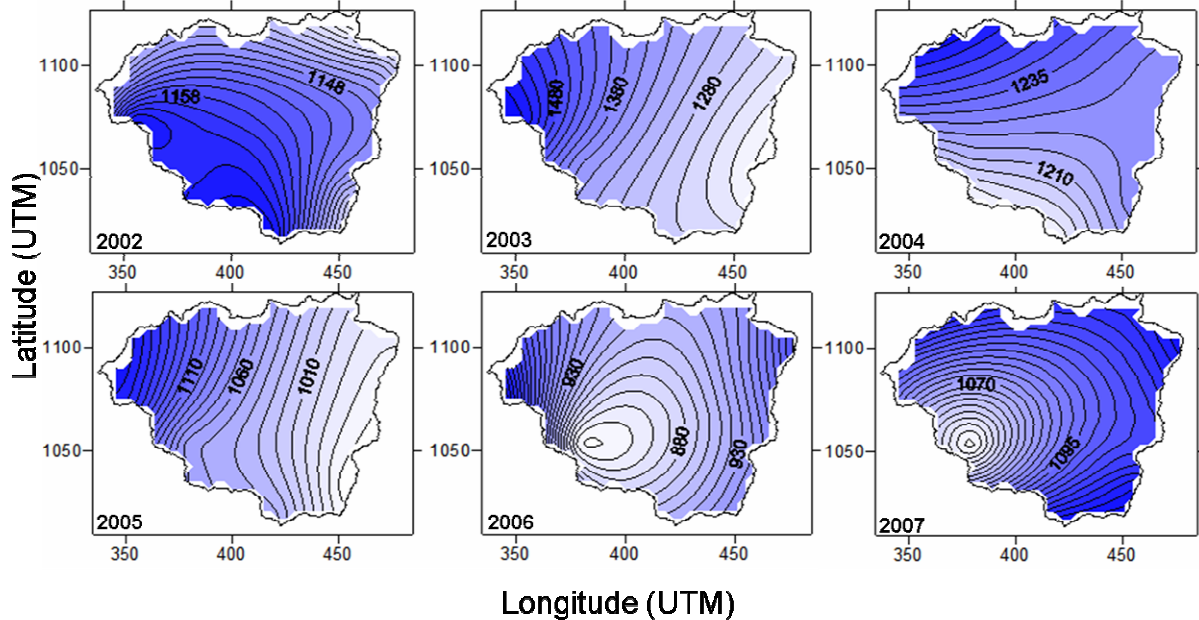


Figure 9- 3 : Champ pluviométrique annuel moyen de 2002 à 2007 sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou

L'observation de cette figure révèle que :

- la zone de forte pluviométrie se déplace selon les années et la répartition spatiale des pluies ne dépend pas du caractère excédentaire ou déficitaire de l'année ;
- l'année 2005 enregistre une variabilité spatiale très forte des précipitations annuelles, à l'instar des années 2003 et 2006, avec les plus grands écarts entre les valeurs extrêmes d'isoyètes ;
- cette forte variabilité spatiale est très bien illustrée par un gradient spatial ferme en sens unique (d'Est en Ouest) pour les années 2003 et 2005, tandis qu'il n'y a aucun gradient privilégié pour l'année 2006 ;
- les isohyètes semblent verticales et parallèles pour la saison 2005 avec une augmentation d'Est en Ouest (présence d'un gradient Est – Ouest bien marqué) sur l'ensemble du bassin pour cette saison ; de plus la direction de ce gradient pluviométrique apparaît particulièrement superposable au sens d'écoulement du bassin (sens topographique du Nord-Ouest à Sud-Est), contrairement aux autres saisons de la période 2002–2007 ;
- contrairement à l'année 2003 très humide, le cumul de l'année 2005 est plutôt moyen.

Ces renseignements dénotent de singularités au sein de l'année 2005, notamment en matière de répartition spatiale des précipitations. L'hypothèse émise ci-haut devient donc très plausible : il existerait une forte sensibilité du modèle hydrologique Topamma à la répartition spatiale des précipitations. Cette hypothèse retient donc notre attention et est testée ci-dessous pour l'année 2005.

9.1.2. Traitement appliqué et résultats

Compte tenu du diagnostic posé à la Section précédente, nous retenons de tester une version semi-spatialisée de Topamma sur l'Ouémé à Bétérou en 2005, afin d'en comparer les résultats avec ceux de la version globale.

9.1.2.1 Version semi-spatialisée de Topamma : n°Topamma

La version semi-distribuée de Topamma a été décrite au Chapitre 6. Récemment, une version semi-spatialisée du modèle, dénommée n°Topamma a été développée. Cette version semi-spatialisée s'appuie sur une discrétisation topographique du bassin en 28 mailles qui correspondent à des sous-bassins emboîtés et/ou adjacents, comme le montre la *Figure 9- 4*. Le

modèle n°Topamma reçoit en entrée les mêmes types et formats de données que Topamma, sauf en ce qui concerne la pluviométrie. En effet, la version de n°Topamma utilisée ici requiert la pluviométrie journalière spatialisée avec une résolution de 0,1° (tant en latitude qu'en longitude). n°Topamma prend donc en compte une pluie journalière différente sur chaque maille, mais l'évapotranspiration potentielle journalière reste la même sur tout le bassin (valeur moyenne du bassin appliquée à toutes les mailles) d'où le caractère semi-spatialisé du modèle hydrologique n°Topamma.

L'algorithme de n°Topamma consiste à appliquer Topamma sur chaque maille (pluie journalière moyenne par maille), puis à agréger les sorties par sous-bassin.

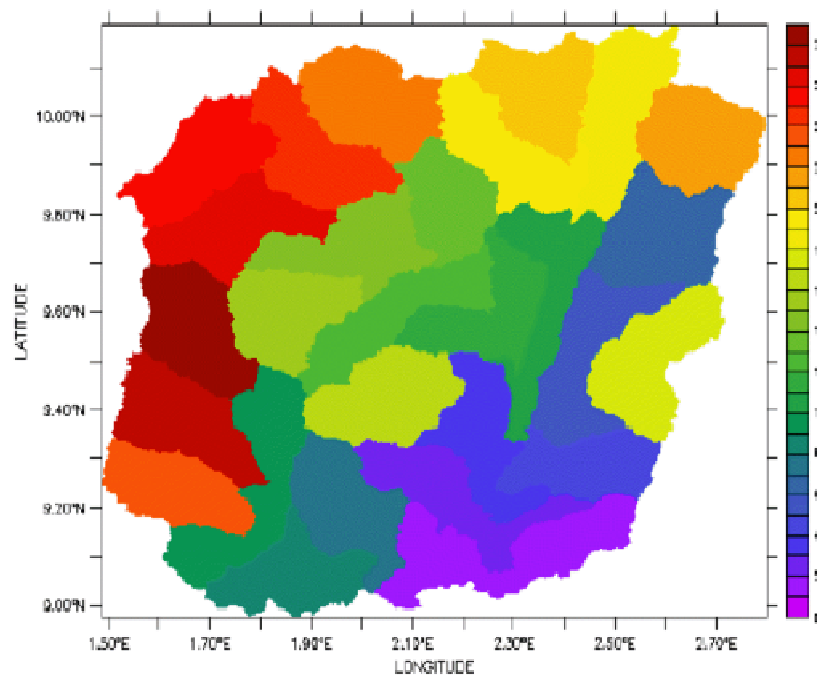


Figure 9- 4 : Maillage topographique de l'OHHVO utilisé dans le modèle hydrologique semi-spatialisé n°Topamma

9.1.2.2 Méthodologie utilisée et résultats obtenus

Le modèle hydrologique n°Topamma a été mis en œuvre à travers la même méthodologie que Topamma. Un calage sur l'année 2005 uniquement a été fait avec chacun des deux modèles (Topamma et n°Topamma) en utilisant deux critères comme suit : Vol compris entre $\pm 10\%$ et Nash $\geq 70\%$ (cette valeur seuil de Nash permet d'avoir comme précédemment un nombre de jeux finaux proche de 100).

Remarques :

- ❖ Le rapport d'anisotropie de la conductivité hydraulique du sol dans le modèle n'Topamma est $K_v/K_h=10^{-2}$, et comme il ne nous a pas été possible de le modifier, nous avons donc reconduit ici (c'est-à-dire pour la présente étude de sensibilité) cette même valeur pour Topamma.
- ❖ Compte tenu des temps de calcul exceptionnellement longs avec n'Topamma, l'effectif initial de l'espace des paramètres a été réduit de moitié (soit 8.722 jeux) en doublant les pas d'échantillonnage des paramètres mentionnés au **Tableau 7- 3** (cf. page 173) et en maintenant leurs valeurs limites respectives.
- ❖ Par soucis de simplicité, le critère Q_{max} (compris entre $\pm 25\%$) n'a pas été pris en compte ici en raison de sa faible contribution au calage (cf. Section 8.1.1).

Ainsi, les jeux finaux retenus sont au nombre de 118 pour Topamma et 144 pour n'Topamma. Ces jeux de paramètres ont été tous simulés sur l'année 2005. La **Figure 9- 5** présente 3 hydrogrammes : l'observé, la moyenne d'ensemble des 118 simulations de Topamma, et celle des 144 simulations de n'Topamma.

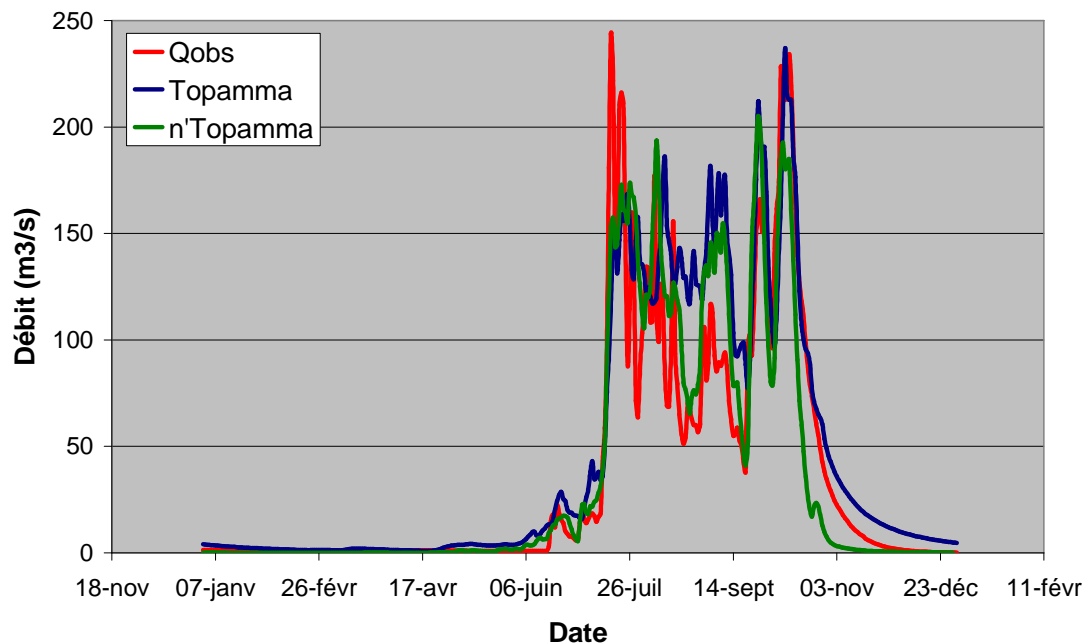


Figure 9- 5 : Hydrogrammes observé et simulés pour l'année 2005 par Topamma et n'Topamma sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou

On constate en effet que, les simulations de n'Topamma sont bien meilleures que celles de Topamma, dans la mesure où la valeur de critère Nash gagne 8% en évoluant de 75% (avec Topamma) à 83% (pour n'Topamma).

On en conclut évidemment que la prise en compte de la répartition spatiale des précipitations a beaucoup amélioré les résultats du modèle sur 2005, et qu'en conséquence les mauvaises simulations de l'année 2005 avec Topamma seraient principalement liées à une répartition spatiale singulière des précipitations au cours de cette année-là.

9.1.3. Conclusion et recommandations

Le modèle hydrologique global Topamma utilisé dans cette étude est donc bien sensible à une répartition spatiale singulière des précipitations, et ses performances seraient bien améliorées si la variabilité spatiale de la pluviométrie était prise en compte.

Il est donc à recommander l'utilisation préférentielle de la version semi-spatialisée du modèle (n'Topamma) lorsque les contraintes de temps de calcul et de disponibilité de données spatialisées sont levées. Cette préférence s'imposerait surtout dans les cas particuliers où les performances de la version globale (Topamma) s'avèreraient peu satisfaisantes.

9.2 Diagnostic de la production d'ETR par le modèle : sensibilité du modèle à l'ETP et à la transformation ETP-ETR

9.2.1 Eléments de diagnostic

Le bilan hydrologique précédemment calculé (cf. Section 8.4) a donné une valeur annuelle moyenne d'ETR de l'ordre de 53% des précipitations. De même, les ETR journalières simulées sont dans la même gamme que les ETR journalières observées sur la station de flux de Nalohou qui est une jachère (cf. Section 8.3.3.2). Or, le bon sens voudrait que l'ETR sur une jachère, soit peu représentative et inférieure à l'ETR moyenne sur notre bassin d'étude, qui est une zone à dominance forestière (cf. Section 4.3.2), où les mosaïques de jachère et de culture avoisinent seulement 21% (Atindogbé C., 2007, Abdoulaye D., 2010). En travaillant sur des périodes très courtes de 15 jours, une étude récente a d'ailleurs montré que le flux de chaleur latente (ETR) est plus grande à Bellefoungou sur un site forestier qu'à Nalohou sur la jachère (Mamadou O., 2009). Aussi, cette étude a-t-elle montré que la formulation empirique de la FAO (cf. Section 5.2.2) pour

les flux de chaleur à la surface du sol les sous-estime de presque 50% quand le sol est sec et chaud, c'est-à-dire une bonne partie de l'année.

L'évapotranspiration est généralement le terme majeur du bilan hydrologique (Servat E., 1993, Derive G., 2003) et peut atteindre, à l'échelle annuelle, 80% du bilan au Bénin selon les années (Derive G., 2003, Giertz S. *et al.*, 2010, Guyot A., 2010, Peugeot C. *et al.*, 2011). Il est donc réaliste de soupçonner, à défaut de preuve véritable, que Topamma sous-estime l'ETR comme tendent à le montrer aussi les résultats d'autres modèles (notamment les modèles GR) appliqués sur le même bassin (Le Lay M., 2006, Akognongbé A. *et al.*, 2008, Agbidinokoun A. S., 2011). Cette faiblesse du modèle mérite d'interpeller autant le modélisateur que l'utilisateur final des résultats.

La question qui se pose est donc la suivante : quelles peuvent être les causes de cette faiblesse du modèle et comment pourrait-on y remédier ?

9.2.2 Traitement par étude de sensibilité

L'inexistence d'une chronique longue d'ETR observée (comme référence) limite les moyens auxquels on peut recourir pour aborder le problème posé. Néanmoins, en l'absence de référence, on peut effectuer une analyse de sensibilité pour appréhender les proportions dans lesquelles seraient impactés les résultats du modèle, en fonction de la méconnaissance ou de l'incertitude sur la variable source (ETP) ou sur sa fonction de transformation en ETR.

En effet, la production d'ETR par le modèle est fonction de la pluie journalière et de la disponibilité d'eau dans la zone non saturée (cf. **éq. 6-2** à la page 161), donc de la disponibilité hydrologique tout court. Cette production d'ETR reste aussi proportionnelle à l'ETP, si bien qu'une plus forte demande évaporative doit être traduite par une plus forte ETR. En conséquence, la méconnaissance de l'ETP [dont le calcul demeure hautement théorique de nos jours (cf. Section 5.2.2)] avec des incertitudes non évaluées et probablement importantes (Mamadou O., 2009) pousse à s'intéresser aux proportions dans lesquelles les résultats du modèle peuvent être affectés si l'erreur sur l'ETP était plus ou moins grande.

Si ces proportions sont faibles, les causes de cette faiblesse du modèle seraient à rechercher ailleurs que dans la variable source (ETP) ou sa transformation mathématique.

9.2.2.1 Etude de sensibilité de Topamma à l'ETP

L'étude de sensibilité du modèle Topamma à l'ETP est suggérée car le modèle semble sous-estimer l'ETR dans le bilan hydrologique.

Cette étude de sensibilité a consisté dans un premier temps à la définition de 8 scénarios d'augmentation de l'ETP à partir des ETP observées de 1%, 2%, 5%, 10%, 20%, 50%, 75% et 100% respectivement. Chacun de ces scénarios est appliqué à travers 2 variantes :

- 1^{ère} variante « A » ou variante « constante » : chacune des valeurs journalières d'ETP observées sera augmentée d'une quantité constante ;
- 2^{ème} variante « B » ou variante « proportion » : chacune des valeurs journalières d'ETP observées sera augmentée proportionnellement à elle-même, c'est-à-dire aux taux respectifs indiqués.

On obtient ainsi 16 scénarios (8 pour la variante A et 8 pour la variante B).

Dans un second temps, les simulations de chacun de ces 16 scénarios (avec les mêmes chroniques de pluies journalières sur 1997-2006) avec les 94 jeux finaux obtenus en calage du modèle (cf. Annexe 6) sont réalisées.

Enfin, les biais (%) sur les valeurs moyennes et les variances des données journalières d'ETP, d'ETR et du débit Q sont respectivement calculés.

La *Figure 9- 6* présente l'évolution de la moyenne journalière d'ETR simulée des 16 scénarios en fonction de la moyenne journalière d'ETP sur la période d'étude.

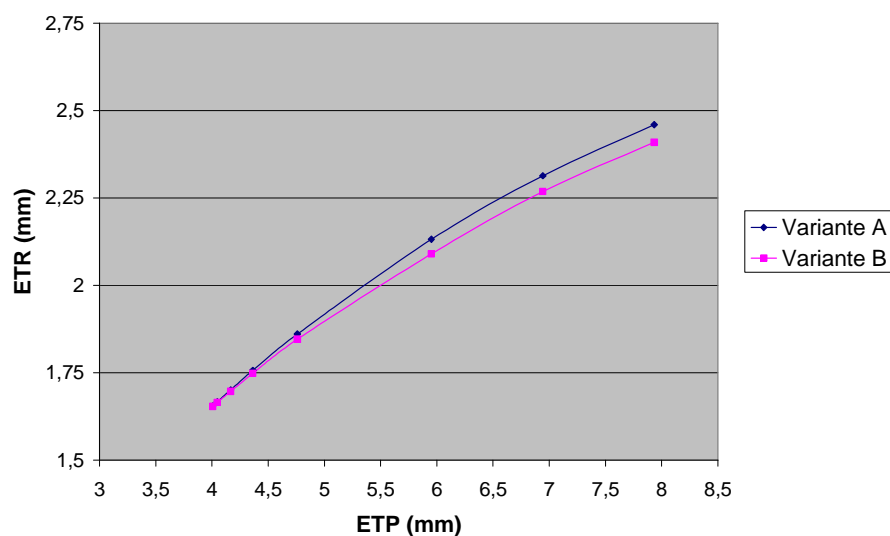


Figure 9- 6 : Evolution de la moyenne journalière d'ETR simulée sur la période 1997-2006 avec les 16 scénarios en fonction de la moyenne journalière d'ETP

Les relations obtenues à la *Figure 9- 6* ont une allure logarithmique parfaite d'équations :

$$ETR = 1,1875 \times LN(ETP) + 0,075 \text{ et } ETR = 1,1092 \times LN(ETP) + 0,1142 \quad (\text{éq. 9- 1})$$

respectivement pour la variante A et pour la variante B avec un coefficient de détermination $R^2=0,999$ pour les deux ajustements.

Une augmentation de l'ETP conduit à une augmentation de l'ETR. Toutefois, la courbe de l'ETR journalière moyenne de la variante « constante » est légèrement au-dessus de celle de la variante « proportion », autrement dit, la variante « constante » produit plus légèrement d'ETR que la variante « proportion ».

La **Figure 9- 7** présente la propagation des biais d'ETP dans les sorties cibles (Q et ETR).

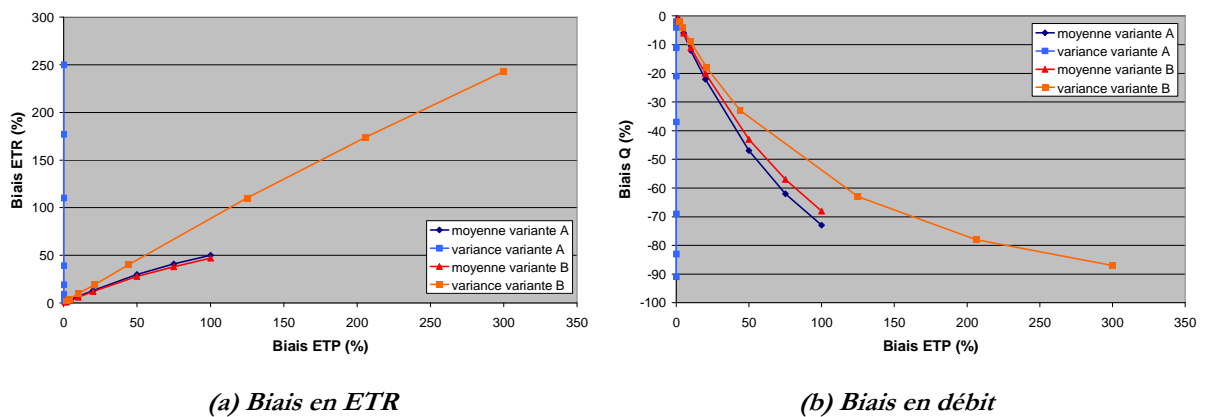


Figure 9- 7 : Propagation des biais d'ETP en moyenne et en variance dans les sorties cibles ETR et débit

On observe globalement qu'il n'y a pas d'amplification des biais d'ETP, mais plutôt une atténuation, plus forte pour les valeurs moyennes que pour les variances, sauf le cas particulier de la variance des ETP journalières de la variante A (constante) qui n'est pas biaisée selon la définition même de la variante. On résume comme suit ces résultats :

- les biais sur les moyennes d'ETP sont réduits de moitié à peu près dans les moyennes d'ETR simulées ; tandis que les biais sur les variances d'ETP sont presque conservés (très légèrement réduits de façon rigoureuse) dans les variances d'ETR simulées ; donc le modèle est plus sensible à la variance qu'à la moyenne des séries d'ETP journalières utilisées en entrée ;
- les biais positifs sur l'ETP sont traduits en biais négatifs assez prononcés dans les débits simulés ; plus prononcés sur la moyenne que sur la variance.

En particulier, l'analyse de la **Figure 9- 7** indique que pour des biais d'ETP de 100% en sus sur la valeur moyenne, on observe une augmentation de l'ETR de 50 %, soit une atténuation du

biais (facteur 0,5). En ce qui concerne l'évolution des biais sur les moyennes de débit en fonction de ceux de l'ETP, on observe une diminution de -70% du débit pour une augmentation d'ETP de 100 %.

Pour les biais calculés sur les variances, l'évolution est pratiquement la même mais en sens inverse sur les deux graphiques. Ainsi, les biais sur les variances d'ETP calculés avec la variante constante sont nuls [évidemment puisque $\text{variance}(X+a)=\text{variance}(X)$, X étant une variable aléatoire et a une constante] mais génèrent les biais les plus élevés sur la variable cible (ETR ou Q), tandis que ceux calculés avec la variante sur la proportion augmente en fonction de l'augmentation des ETP.

En effet, l'augmentation de l'ETP impacte la variabilité des éléments pris en compte et contribue ainsi à l'augmentation des valeurs moyennes d'ETR et à la diminution des valeurs de débits.

Dans le cadre d'une analyse réaliste pour corriger les résultats du modèle calé, si l'on considère qu'on a besoin d'augmenter l'ETR du bilan hydrologique de 50% en valeur relative, soit de 53% (cf. Section 8.4) à 77% par exemple, il faudrait doubler les valeurs d'ETP en entrée du modèle ; ce qui provoquerait une chute moyenne des débits de 70% (l'écoulement passerait de 14% à 4%), dégradant complètement et de façon inacceptable l'écoulement annuel (qui demeure la référence observée la plus sûre). La recharge des nappes serait alors en baisse de 42% et s'établirait à 19%.

Tout fonctionne comme si, en augmentant la demande évaporative (ETP), le modèle va satisfaire cette demande (par augmentation de l'ETR) en pompant principalement dans l'écoulement. Or, en phase calage, **le modèle est censé s'adapter au mieux aux écoulements (variable cible = débit) et maintenir au mieux la part des écoulements à 14%, et dans ce cas donc, il n'aura d'autres choix que de vider la recharge des nappes qui passerait de 33% à 9%. Aussi, la dynamique de la recharge des nappes profondes telle que simulée, n'est pas en adéquation avec celle des niveaux piézométriques observés (cf. Section 8.3.3.3), ce qui corrobore l'hypothèse d'une mauvaise simulation de l'ETR par le modèle.**

En résumé, cette faiblesse du modèle calé à sous-estimer l'ETR ne semble pas causée par une faible demande évaporative, l'augmentation de l'ETR simulée doit plutôt passer par une autre voie que celle de l'augmentation des valeurs d'ETP (augmentation de la demande évaporative). On envisage dans la suite d'étudier les incidences liées à une modification des équations de transformation de l'ETP en ETR, sur les termes du bilan hydrologique.

9.2.2.2 Etude de sensibilité à la paramétrisation mathématique de l'ETR dans Topamma

L'ETR est calculée dans Topamma comme somme de deux composantes (cf. Section 6.3.2.2) :

- la composante superficielle ETR_{surf} , obtenue par neutralisation de l'ETP par la pluie P ($ETR=ETR_{surf}=ETP$ si $ETP < Pluie$, sinon $ETR_{surf}=Pluie$) ;
- lorsque $ETP > P$, s'ajoute la composante de sub-surface ETR_{sub} (cf. éq. 6-2 à la page 161), obtenue par un prélèvement linéaire en fonction de la disponibilité en eau (caractérisée par D/d_0) dans la zone non saturée (en considérant $ETP-P$ comme la demande évaporatoire complémentaire à satisfaire), soit $ETR_{sub}=(ETP-P)*f(D/d_0)$.

Le profil linéaire permet de ne satisfaire qu'une partie de la demande évaporative non satisfaite par ETR_{surf} , exactement dans les mêmes proportions qu'il y a disponibilité d'eau dans la zone de subsurface. Il est possible de relaxer la linéarité de cette fonction f ; et d'autres paramétrisations ont été testées, notamment 3 autres formes de prélèvement dans la zone non saturée (ZNS) : exponentiel concave, exponentiel convexe, et sigmoïdal.

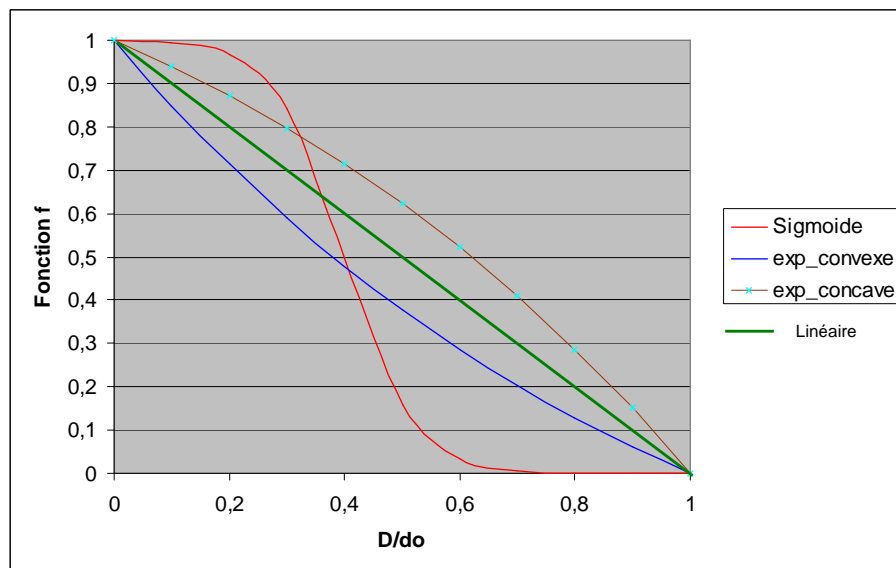


Figure 9- 8 : Représentation des paramétrisations mathématiques associées à la fonction de production de la composante de subsurface de l'ETR

Avec chaque paramétrisation, le calage du modèle a été repris pour assurer les mêmes conditions d'appréciation. Ce travail a été fait sur l'année 2005 et la sensibilité des simulations à ces différentes paramétrisations est résumée dans le tableau suivant.

Tableau 9- 1 : Impact de la paramétrisation de la composante de subsurface de l'ETR sur les résultats du modèle Topamma en 2005

Profil	Nash	Vol	Qmax
Linéaire	84%	5%	-26%
Exponentiel convexe	84%	12%	-22%
Exponentiel concave	83%	-2%	-30%
Sigmoïde_C	59%	-44%	-50%
Sigmoïde_R	67%	-36%	-41%

Les valeurs des critères obtenues avec les paramétrisations exponentielles ne présentent pas globalement de grandes différences par rapport au résultat du prélèvement linéaire. Toutefois, on a une certaine sensibilité en termes de débits, et surtout d'ETR.

L'impact de la paramétrisation exponentielle concave est de -7% sur le volume, et correspond à +7% sur l'ETR et -5% sur la percolation (les signes de ces taux sont opposés pour l'exponentielle convexe). Ce résultat confirme ce qui a été vu à la Section précédente, et qui est, qu'en voulant augmenter l'ETR, le modèle puise plus dans les écoulements que dans les nappes.

Mais les résultats de la sigmoïde (Sigmoïde_C) sont très mauvais (valeur de Nash très dégradée à 59%). La forme « un peu trop verticale » de la sigmoïde représentée sur la *Figure 9- 8* aurait pu être indexée comme responsable de ces mauvais résultats, mais les résultats obtenus avec une sigmoïde plus plate (« Sigmoïde_R ») qui s'insère parfaitement dans l'espace entre les 2 exponentielles ne sont toujours pas satisfaisants.

Le caractère mauvais des simulations de la sigmoïde prouve bien que le modèle est très sensible à la façon de prélever l'eau dans le sol, et cela peut énormément influencer ses résultats.

9.2.3 Conclusion et recommandations

En synthèse, le modèle n'a pu préserver la qualité des débits ciblés (moyenne et dynamique acceptable), qu'en jouant sur la paramétrisation de l'ETR ; et non en profitant d'une augmentation de la demande évaporative (ETP), car cette dernière provoque une dégradation inacceptable des débits.

Si, en définitive, l'hypothèse d'une sous-estimation de l'ETR par le modèle (faiblesse traitée ici) était avérée (en utilisant comme référence par exemple une série longue d'ETR des stations de flux, représentative de tout le bassin), on devrait chercher à y remédier en modifiant la paramétrisation mathématique de l'ETR. D'ailleurs on sait que les études de sensibilité des processus hydrologiques sont limitées par la qualité de la

représentation de la reprise évaporatoire (Richard A., 2010). A défaut de données de terrain qui conditionneraient cette paramétrisation, on pourra essayer plusieurs formes théoriques comme cela a été fait ici.

Néanmoins, une consultation entre les modélisateurs et utilisateurs de Topamma s'avèrerait utile pour fixer deux éléments :

- la forme de prélèvement dans la zone de subsurface à considérer : qui pourrait bénéficier d'investigations supplémentaires de terrain (par exemple : les mesures de flux de sève qui sont en cours sur le bassin de la Donga depuis 2009) pour mieux l'appréhender, ou alors, de l'expérience des hommes de terrain ;
- l'idée de relaxer « d_0 » qui gouverne la taille de la zone non saturée [variant ici de 39 à 50 cm dans les 94 jeux finaux (cf. Annexe 6)] et le rendre variable : en tenant compte du fait que les gros arbres (forêt) puisent plus loin pour leur transpiration, on pourrait considérer un d_0 variable dans l'espace mais statique dans le temps. A cet effet, les données de NDVI peuvent renseigner sur le type de couvert (forêt, savane, jachère...) qu'on paramétriserait à travers une fonction, par exemple $ETR_{sub}=f(\text{Pluie}, \text{Température}, \text{NDVI}, \text{etc...})$ ou la formule de *Priestley-Taylor* ! (Priestley C. H. B. and Taylor R. J., 1972, Riou C., 1975, OMM, 1994).

9.3 Impact de l'origine des forçages utilisés sur les simulations du modèle

9.3.1 Problématique, objectifs et forçages utilisés

L'application d'un modèle hydrologique, pour atteindre un but donné qu'il s'agisse de simulation de ressources en eau ou de prévision hydrologique (cf. Section 6.1), requiert l'utilisation de données d'entrée, encore appelées forçages. Dans la plupart des cas, y compris celui du modèle Topamma, ces forçages sont, au minimum, les précipitations et l'évapotranspiration.

Plusieurs sources de forçage existent aujourd'hui : les observations ou mesures réalisées au sol sur le terrain, directement ou indirectement ; les données satellitaires ou issues de la télédétection (radar) ; les données issues de modèles climatiques etc... Il existe également des données composites, qui combinent plusieurs sources.

Quels que soient leur caractère (unitaire ou composite) et leur type (observation directe ou indirecte), ces données de différentes origines n'ont évidemment pas les mêmes caractéristiques, ni en moyenne, ni en variabilité.

De même, en fonction des échelles spatio-temporelles sur lesquelles elles existent, et des éventuels traitements ou opérations préalables qu'on doit y faire avant utilisation, leurs caractéristiques statistiques d'origine ou de base (moyenne, variance, etc...) peuvent être conséquemment modifiées, et il devient important d'appréhender, dans quelles mesures ou proportions, les simulations du modèle hydrologique en sont impactées.

Nonobstant cette complication évidente liée à l'utilisation de ces types de forçage, notamment non-observés, ces données sont disponibles en grand nombre et leur accès est très facile, généralement gratuit et en ligne sur internet contrairement aux données sol qui nécessitent de gros moyens pour leur acquisition. Cette disponibilité large et cette facilité d'accès rendent ces forçages séduisants et nous voulons tester ici trois de ces produits, afin d'avoir une idée et savoir à quoi s'en tenir comme conséquences prévisibles sur les simulations, lorsqu'on est contraint à substituer les références observées.

Ainsi, l'objectif général poursuivi dans la présente Section est de mesurer l'impact de l'origine des données de forçage (observation, produits satellite ou sorties de modèles climatiques) sur l'estimation et la variabilité des ressources en eau simulée par le modèle hydrologique.

Spécifiquement, il s'agit de :

- évaluer la qualité des données de pluie issues de l'imagerie satellitaire par rapport à la référence observée ;
- mesurer l'écart entre débits observés et simulés à partir de forçages satellitaires par le modèle hydrologique ;
- quantifier l'amplification de la dégradation de l'information « pluie » par le modèle dans ses résultats simulés.

Pour conduire notre analyse et atteindre ces objectifs, 3 forçages pluviométriques d'origine satellitaire ont été ciblés ainsi que les observations au sol. Leurs descriptions respectives sont consignées dans le *Tableau 9-2* :

Tableau 9- 2 : Description des forçages utilisés

Origine du forçage	Description
Observations sol	<ul style="list-style-type: none"> - Réseau d'observations de 46 pluviographes dans le cadre du projet AMMA-CATCH - http://database.amma-international.org/ - Résolution 0,5 mm * 5 minutes - Données disponibles depuis 1997 - Champ de pluie interpolé à partir des points d'observation sur grille régulière
EPSAT-SGv3	<ul style="list-style-type: none"> - Projet EPSAT : Estimation des Pluies par SATellite – Seconde Generation - http://bddamma.ipsl.polytechnique.fr/ - Produit « recherche », développé dans le cadre du Programme AMMA - Combinaison d'images satellites (MSG, TRMM) et d'observations opérationnelles (GPCP) - Fenêtre : 25°W - 25°E, 5°S - 20°N, - Disponible à 0,1° de résolution et 30 minutes depuis 2004, - N'est pas un produit haute résolution : doit être agrégé par l'utilisateur à la résolution souhaitée
IMPETUS	<ul style="list-style-type: none"> - Projet IMPETUS « Integratives Management-Projekt für einen Effizienten und Tragfähigen Umgang mit Süßwasser in Westafrika » - ftp://ftp.meteo.uni-bonn.de/pub/malte/Daily_Satrain/ - Produit “recherche”, développé par Malte DIEDERICH dans le cadre de sa thèse de doctorat au sein du projet IMPETUS - Désagrégation spatio-temporelle de cumuls pluviométriques mensuels (BDMET et CATCH) observés au sol en utilisant les données ou images du satellite Meteosat 7 - Disponible au pas journalier et avec une résolution spatiale de 0.1° sur tout le Bénin
RFE 2	<ul style="list-style-type: none"> - RainFall Estimation version 2, NOAA, Climate Prediction Center (USA) - http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/fews/data.shtml#rfe2 - Données opérationnelles, libres et gratuites, générées automatiquement tous les jours et mises en ligne sur internet - Combinaison d'images satellite (AMSU, SSM/I, GPI) et d'observations de pluie télétransmises sur le réseau de la veille météo mondiale (GTS) - Pluie journalière (6h-6h UTC) depuis 1^{er} janvier 2001 - Fenêtre : 20W-55E, 40S-40N, grille à 0,1° de résolution 0,1° (~10 km)

9.3.2 Méthodes, résultats et discussion

La technique d'extraction des forçages est la suivante : pour chacune des séries, on procède à la création de champs journaliers (cumuls 6h-6h GMT) à 0,1°, puis on calcule la valeur moyenne spatiale sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou (*Figure 9- 9*).

Le modèle hydrologique Topamma calé et validé précédemment (cf. Chapitre 8) a été utilisé sur l'année 2005. Compte tenu des limites des résultats obtenus pour cette année à cause, entre autres des singularités spatiales de la saison pluviométrique 2005, la version semi-spatialisée du modèle n°Topamma (cf. Section 9.1.2.1) a été concomitamment utilisée, afin d'analyser les performances en tout avertissement (Zannou A. *et al.*, 2011).

Les hydrogrammes simulés par le modèle global Topamma avec les forçages EPSAT et RFE sont présentés ci-dessous à titre d'illustration (*Figure 9- 10*).

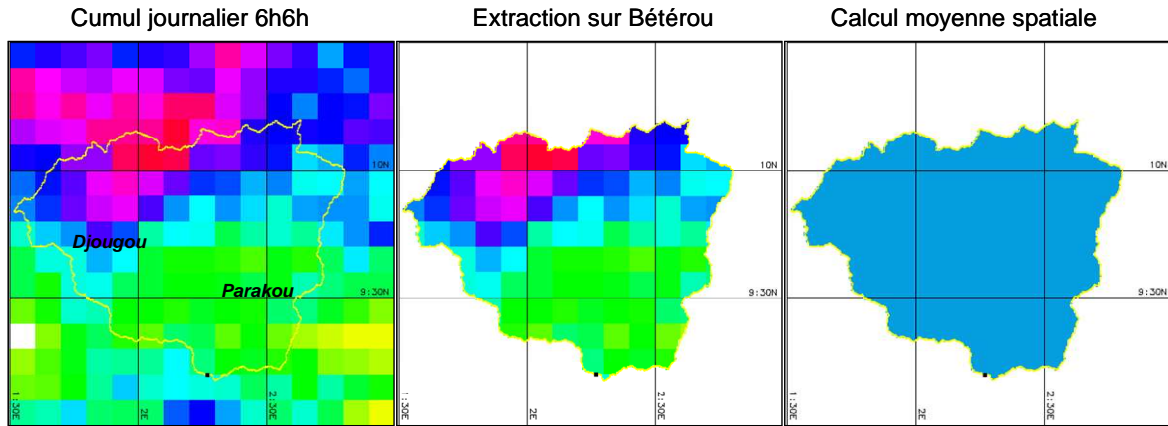


Figure 9- 9 : Technique d'extraction des forçages pluviométriques sur l'Ouémé à Bétérou

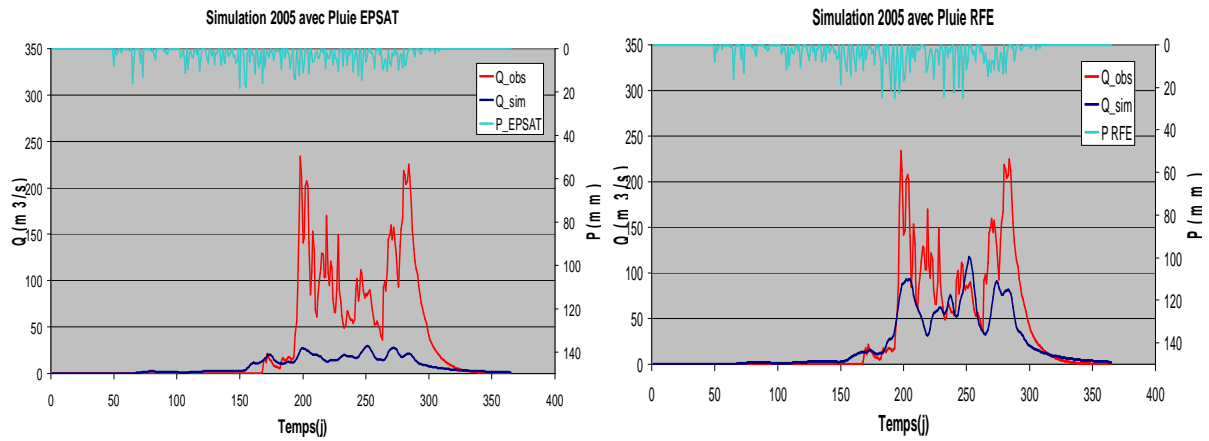


Figure 9- 10 : Hydrogrammes simulés en 2005 avec les forçages EPSAT et RFE

Pour pouvoir apprécier les forçages et leurs résultats hydrologiques associés, il est nécessaire de se donner des références, sur la base desquelles seront conduites toutes les évaluations. Ainsi, nous définissons les références suivantes :

Tableau 9- 3 : Définition des références pour l'évaluation des différents forçages et résultats

Produit à évaluer	Référence considérée	Critères utilisés
Forçages « Pluie » d'entrée au modèle	Observations au sol	Biais sur les moyennes et les variances des forçages à différents pas de temps
Débits simulés par le modèle	Débit simulé à partir des pluies observées au sol	- Biais sur le coefficient de Nash et le volume annuel - Biais sur les moyennes et les variances des débits simulés à différents pas de temps

9.3.2.1 Evaluation des forçages d'entrée et calculs des biais associés

On observe sur la figure suivante la représentation graphique des 3 forçages EPSAT, RFE, IMPETUS en fonction de la référence observée à 4 différents pas de temps (1, 5, 10 et 30 jours). On constate globalement une surestimation des faibles cumuls et une sous-estimation des forts cumuls.

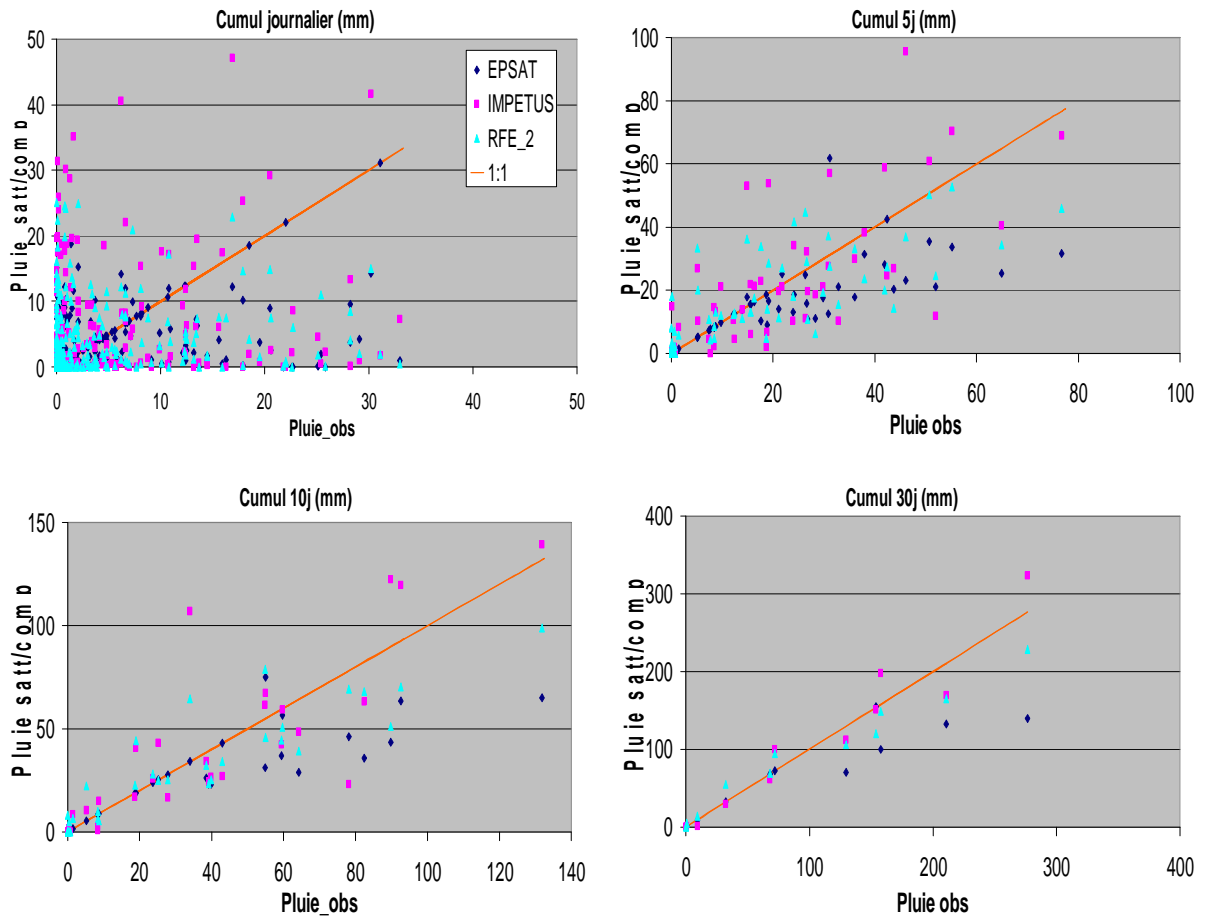
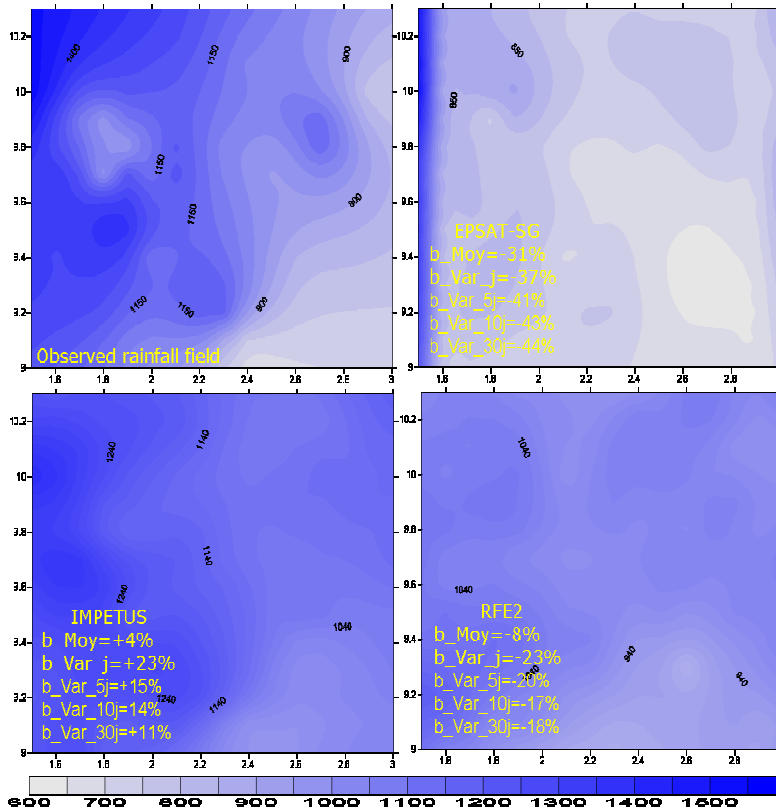


Figure 9- 11 : Relation entre forçages satellitaires et données observées à différents pas de temps

Globalement, on observe les champs de pluie de la **Figure 9- 12** pour l'année 2005.

Pour ces données de précipitation, le forçage IMPETUS apparaît comme le moins biaisé par rapport aux observations, relativement aux forçages EPSAT et RFE2. De plus, comme l'illustre la **Figure 9- 13**, il présente des biais positifs contrairement aux 2 autres champs qui donnent des biais négatifs.



Avec :

- * b_Moy = biais sur la moyenne spatiale du champ pluviométrique satellitaire par rapport au champ observé
- * b_Var_xj = biais sur la variance temporelle (données à pas de temps = x jours) du champ pluviométrique satellitaire par rapport au champ observé (signalons que le pas de temps jour est acceptable pour la prévision de crues, mais pour l'évaluation opérationnelle des ressources en eau, le pas de temps minimum recommandé est de 10 jours).

Figure 9- 12 : Champ pluviométrique annuel moyen (en mm) 2005 des différents forçages utilisés (coordonnées géographiques en degrés)

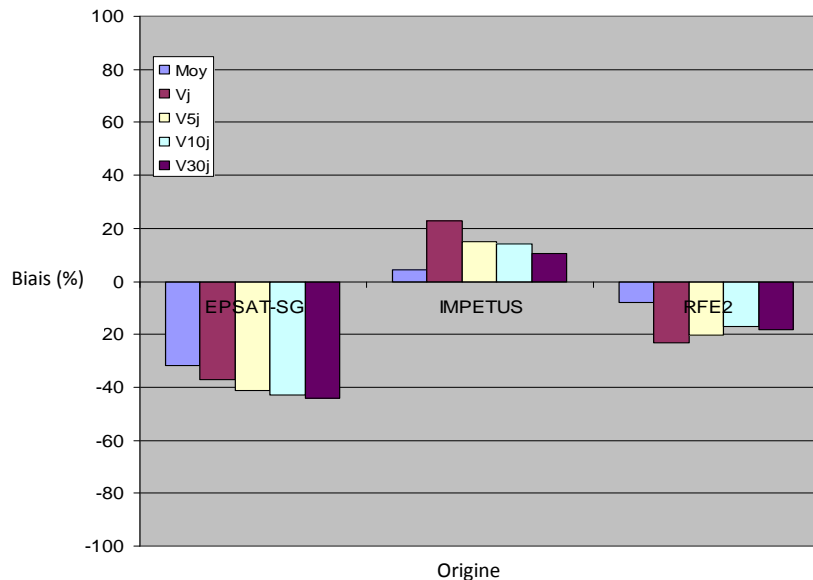


Figure 9- 13 : Biais sur la moyenne (Moy) et les variances (V_j) des forçages satellitaires en entrée du modèle hydrologique (V_{ij} =variance sur les données journalières cumulées au pas de i jours)

9.3.2.2 Evaluation des sorties du modèle et calculs des biais associés

Les débits journaliers simulés par le modèle hydrologique global Topamma avec les différents forçages en entrée se présente comme suit.

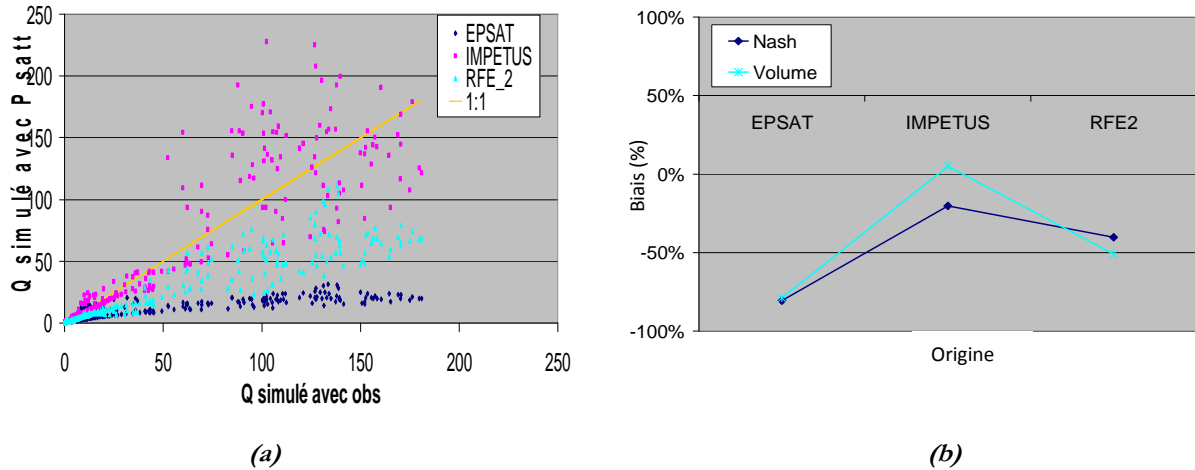


Figure 9- 14 : Confrontation entre débits journaliers simulés avec Topamma (a) et biais des critères Nash et Vol (b) obtenus avec les différents forçages pluviométriques

On note une sous-estimation systématique des débits sauf pour le forçage IMPETUS. A travers les biais sur les critères Nash et Vol, on note que les simulations avec le forçage IMPETUS sont plus proches des simulations avec les observations, que pour les 2 autres forçages. Globalement la dégradation des simulations obtenues avec les forçages EPSAT et RFE est importante.

La Figure 9- 15 est obtenue avec les simulations du modèle semi-spatialisé n'Topamma.

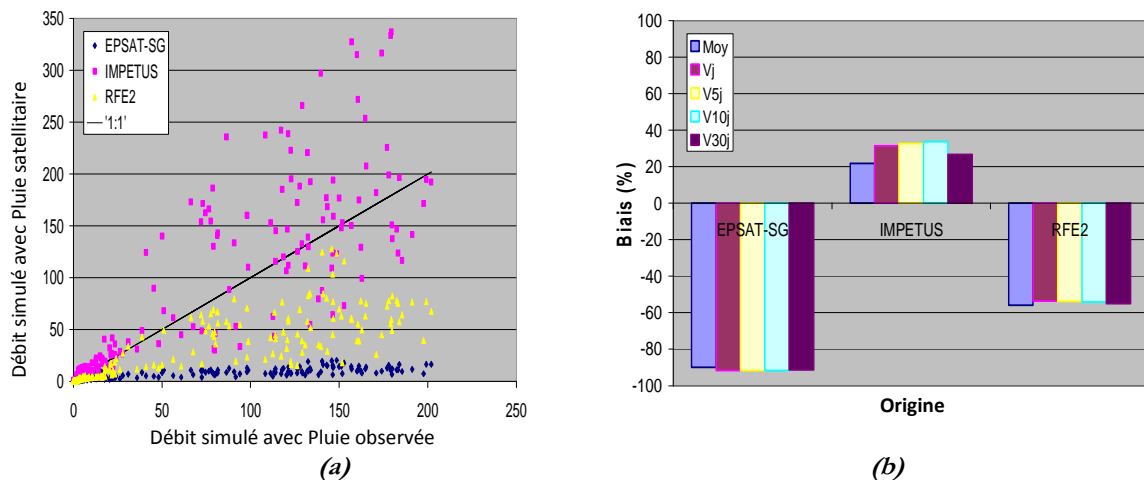


Figure 9- 15 : Confrontation entre débits journaliers simulés avec n'Topamma (a) et biais sur la moyenne (Moy) et les variances (Vij) des simulations [(b), Vij=variance sur les données journalières cumulées au pas de i jours]

Les conclusions avancées ci-dessus avec les résultats de Topamma sont valables pour ceux de n'Topamma. Le forçage IMPETUS fournit les meilleures simulations.

9.3.2.3 Analyse de la propagation du biais des forçages par le modèle

Sur la figure suivante, sont représentés en abscisse les biais sur les forçages d'entrée, et en ordonnée, respectivement les biais sur les débits issus des simulations de chaque forçage.

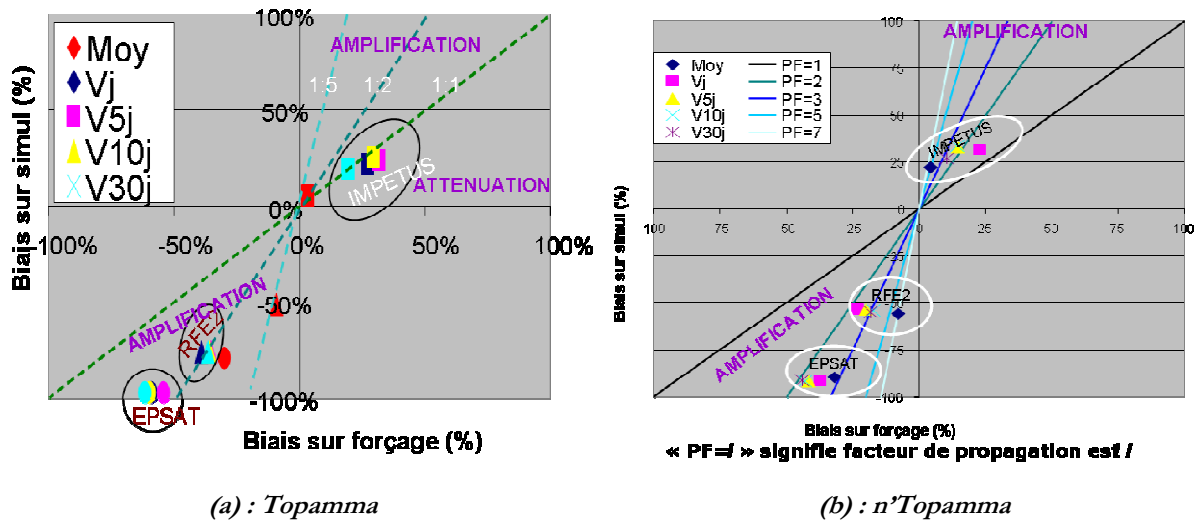


Figure 9- 16 : Propagation des biais des forçages pluviométriques par les modèles hydrologiques

On observe que, pour le modèle hydrologique global Topamma (Figure 9- 16a), il y a une conservation du biais pour le forçage IMPETUS, tandis qu'il se produit une amplification du biais pour les produits EPSAT et RFE.

L'amplification est plus forte pour le forçage RFE que pour le forçage EPSAT. Globalement, l'amplification des biais sur les moyennes est supérieure à l'amplification des biais sur les variances. Les facteurs d'amplification sont les suivants :

- 5,5 pour la moyenne et 2,1 pour la variance du forçage RFE ;
- 2,6 pour la moyenne et 1,6 pour la variance du forçage EPSAT ;
- environ 1 (conservation du biais) tant en moyenne qu'en variance pour le forçage IMPETUS.

Pour le modèle hydrologique n°Topamma (*Figure 9- 16b*), on observe qu'il y a une amplification du biais pour tous les forçages (y compris pour le forçage IMPETUS dont le biais n'est pas amplifié par Topamma).

L'amplification est plus forte pour le forçage RFE que pour les 2 autres, l'amplification des biais sur les moyennes est supérieure à l'amplification des biais sur les variances comme dans le cas de Topamma. Les facteurs d'amplification des biais par n°Topamma sont les suivants :

- 7 pour la moyenne et 2,3 pour la variance du forçage RFE ;
- 2,8 pour la moyenne et 2,5 pour la variance du forçage EPSAT ;
- 4,9 pour la moyenne et 1,4 pour la variance du forçage IMPETUS.

Ces facteurs d'amplification sont donc élevés, spécialement pour les biais sur les moyennes :

- entre 3 et 7 pour les biais sur la moyenne et entre 2 et 3 pour les biais sur la variance indépendamment des pas de temps d'agrégation des données, et les sous-estimations sont plus amplifiées que les surestimations ;
- le modèle semi-spatialisé n°Topamma intègre l'information spatiale contenue dans les données de précipitation en augmentant principalement l'amplification du biais sur la moyenne pluviométrique, et l'amplification du biais sur la variance temporelle de la pluie (indépendamment du pas de temps d'agrégation) reste mesurée.

9.3.3 Conclusion et perspectives

Globalement, en entrée des 2 modèles hydrologiques, les biais en moyenne sont inférieurs aux biais en variance. Mais les premiers sont plus amplifiés que les seconds par chaque modèle hydrologique.

Sur les résultats scientifiques obtenus ici, on peut retenir ce qui suit :

- Le produit composite IMPETUS semble meilleur par rapport aux produits EPSAT et RFE, en considérant comme référence l'observation au sol, ceci pourrait s'expliquer par le fait qu'il s'agisse d'une désagrégation de cumuls mensuels observés.
- Toutefois, l'information « pluie » qu'il contient est biaisée de 4% sur la moyenne et 23% sur la variance par rapport aux observations journalières ; ces biais sont presque conservés par le modèle hydrologique Topamma (calé sur les observations) dans les débits simulés

avec ce produit ; mais ils sont amplifiés presque par 5 (sur la moyenne) par la version semi-spatialisée n°Topamma du même modèle.

- Pour les deux autres forçages EPSAT et RFE, les biais par rapport aux observations sont systématiquement amplifiés dans les débits simulés surtout sur les moyennes et de façon moindre pour les variances quelque soit le pas de temps ; les facteurs d'amplification sont de l'ordre de 1,5 à 5 pour Topamma et de 1,5 à 7 pour n°Topamma.
- Globalement, les amplifications de biais sont supérieures avec la version semi-spatialisée n°Topamma du modèle, comparées à ce qu'on obtient avec la version globale Topamma ; ce qui indique que le modèle global sous-estime l'amplification du biais contenu dans les données pluviométriques satellitaires ;
- **Les modèles hydrologiques utilisés ici sont plus sensibles aux biais sur la moyenne pluviométrique que sur la variance temporelle ; ainsi, on peut conclure que ces modèles sont plus sensibles à la variabilité interannuelle (conditions sèches ou humides) qu'à la dynamique saisonnière des pluies.**

Quant à l'exploitation opérationnelle des résultats obtenus ici, on peut retenir ce qui suit :

- Les données satellitaires ne sont pas préférables aux données observées, mais elles peuvent aider à compenser des lacunes dans les observations au sol moyennant un éventuel recalibrage avec quelques données observées.
- Les résultats obtenus avec EPSAT doivent être pris avec réserve, puisqu'en fait ce produit a été développé et validé seulement en zone sahélienne sur une résolution de 0,5° et 10 jours (Roca *et al.*, 2010, Jobard I. *et al.*, 2011) tandis que le bassin de l'Ouémé à Bétérou sur lequel il est appliqué ici se situe en zone soudanienne.
- Le forçage RFE disponible et actualisé tous les jours peut être prudemment utilisé à des fins opérationnelles d'annonce de crue par exemple, moyennant une correction de biais avec des observations sur plusieurs années et un calage pertinent; ce qui peut favoriser une gestion en temps réel des crises ou risques par exemple.

En perspective, on peut envisager :

- ❖ d'élargir l'étude à une période plus longue pour vérifier et/ou améliorer les conclusions obtenues ;

- ❖ d'essayer avec d'autres modèles hydrologiques (GR4J, GR2M, SWAT etc...);
- ❖ de tester également d'autres forçages disponibles (GPCP, 3B43 ou TRMM etc...) et étendre la période de simulation à 5 ou 10 ans.

Le produit IMPETUS se présente comme attrayant surtout pour des bassins où les observations présentent beaucoup de lacunes et la densité du réseau faible ; cela ouvre des perspectives intéressantes, par exemple, sur la moyenne vallée de l'Ouémé où ces situations sont présentes.

Dans ce Chapitre 9, nous avons diagnostiqué au moyen d'analyse de sensibilité trois (3) faiblesses du modèle Topamma identifiées à travers ses résultats. En attendant que les recommandations émises ici soient appliquées pour améliorer le modèle, il sera utilisé au prochain Chapitre pour réaliser l'exercice d'application à la gestion intégrée des ressources en eau du bassin de l'Ouémé à Bétérou.

CHAPITRE 10 : Application pour la gestion intégrée des ressources en eau du bassin à l'horizon 2025

Depuis les anciennes civilisations persienne, égyptienne ou babylonienne, les ressources en eau et les technologies d'approvisionnement en eau ont joué un rôle fondamental dans le développement et l'organisation des sociétés. Cependant, à cause de la croissance de la demande en eau domestique, agricole, industrielle, à des fins récréatives ou autres, et d'une pollution croissante des eaux superficielles et souterraines, les ressources en eau sont devenues des ressources naturelles rares (Abbott M. B. and Refsgaard J. C., 1996) dont la gestion présente des enjeux différents selon les contextes géopolitiques spécifiques (Dézetter A., 1996). Ainsi, la croissance des problèmes liés aux ressources en eau impose une nouvelle approche de gestion (GIRE) basée entre autres sur des fondements scientifiques.

La gestion des ressources en eau est actuellement dans une phase de transition difficile, essayant de s'adapter aux grandes incertitudes liées au changement climatique, tout en luttant pour mettre en application un ensemble difficile de principes et de changements institutionnels liés à la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (Stakhiv E., 2010).

La gestion intégrée des ressources en eau (cf. Section 1.2.3) exprime « l'idée que celles-ci doivent être gérées de manière holistique, en coordonnant et en intégrant tous les aspects et les fonctions des prélèvements d'eau, de la maîtrise des eaux et la prestation de services liés à l'eau afin d'apporter un bénéfice durable et équitable à tous ceux qui dépendent de cette ressource » (CE/DGD/DGRECNS, 1999). Cette approche globale prend en compte les aspects naturels liés au cycle de l'eau, les utilisations de l'eau pour divers buts, l'armature institutionnelle de gouvernance, les stratégies et contraintes nationales, et enfin l'évolution spatio-temporelle des ressources et des demandes en eau (Azonsi F. and Dépraète C., 2001). Le présent Chapitre portera pour l'essentiel sur ce dernier aspect de la GIRE dans une démarche prospective sur la période 2011-2025 en intégrant des stratégies de mobilisation et de gestion des ressources en eau sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou.

En analysant les relations entre la population, les ressources, l'environnement et le développement, un auteur rappelle que « la théorie économique n'inclut généralement pas dans sa vision, l'idée de limite de ressources naturelles » (Collomb P., 1997). La nouvelle donne liée aux changements climatiques est largement bien démontrée mais n'est pas encore considérée dans les analyses prospectives, de même que la variabilité de la ressource en eau qui lui est associée. En

témoigne la « Vision Eau Bénin 2025 » (DGH/MMEH, 2000) qui ne fait aucune allusion à une péjoration éventuelle de la ressource à cette échéance. Ne pas considérer cette variabilité qui affecte pourtant toute la région ouest-africaine (cf. Section 4.1.1) revient à ignorer ou négliger un risque flagrant qui pourrait précariser davantage la vie des populations et compromettre le développement économique des pays concernés.

Il est utile de rappeler que l'exercice réalisé dans le présent Chapitre est le premier du genre aussi détaillé à l'échelle d'un bassin (ou sous-bassin) au Bénin. Dans la littérature, on retrouve une étude plus générale datant de 2001 (Azonsi F. and Dépraète C., 2001), fruit d'une collaboration internationale tripartite (DG-Eau/UAC/IRD) et qui témoigne déjà du rôle historique et pionnier que jouent ces trois partenaires institutionnels au profit des ressources en eau du Bénin. Cette étude prend en compte tout le Sud-Bénin (Bassin de l'Ouémé et du Mono-Couffo) et repose sur des considérations beaucoup plus sommaires et simplifiées pour l'estimation des ressources (transposition ou uniformité de coefficient d'écoulement d'eau de surface, de taux de recharge des nappes souterraines, corrélation entre ETR et pluviométrie etc...) et des besoins (besoins agricoles spatialement uniformes sur le pays, besoins industriels non pris en compte etc...). Ainsi, le présent Chapitre n'a point la prétention d'innover dans ce domaine ; néanmoins, il va au-delà de l'estimation simple des ressources et besoins et de leur confrontation (Azonsi F. and Dépraète C., 2001, Blinda M. and Thivet G., 2009), en abordant les stratégies d'aménagement et de gestion de l'eau à l'échelle du sous-bassin. A ce titre, il produit la masse d'informations et de connaissances nécessaire au développement d'outils opérationnels de gestion proprement dits.

Ce Chapitre a donc un caractère indicatif et n'a nullement l'intention d'être exhaustif et prendre en compte de tous les aspects requis. Il est structuré 4 sections relatives respectivement à la disponibilité des ressources en eau (Section 10.1), les besoins prévisionnels en eau (10.2), la gestion technique courante des ressources en eau (10.3) et les mesures générales préconisées (10.4).

10.1 Dynamique et disponibilité potentielle des ressources en eau du bassin de l'Ouémé à Bétérou

Avec le modèle hydrologique Topamma calé et validé aux chapitres précédents (cf. Chapitres 6, 7 et 8), nous avons quantifié les ressources en eau sur la période passée 1997-2006

(qui est la période d'étude), et les avons estimées sur la période future 2011-2025 (voire 2029 selon le cas). Toutefois, on rappelle que la simulation des eaux souterraines par Topamma est sujette à des interrogations et incertitudes (cf. Section 8.3.3.3) d'une part, et, d'autre part, le bassin de l'Ouémé à Bétérou se trouve sur une zone de socle où l'accès et la maîtrise des eaux souterraines, quoique répandu est néanmoins difficile (aquifères discontinus et peu productifs). En conséquence, l'absence d'un modèle hydrogéologique approuvé sur la base de résultats d'investigations hydrogéophysiques plus approfondies (cf. Section 8.3.3.3) nous contraint à nous contenter de réaliser le présent exercice sur les eaux de surface uniquement.

10.1.1. Données de scénario futur utilisées

Les données de précipitations (2011-2025) utilisées sont celles des scénarios élaborés par le projet IMPETUS sur le Bénin (Christoph M. *et al.*, 2010), avec la description suivante (traduction de la version anglaise originale) : « *Les scénarios climatiques à l'horizon 2025 montrent une réduction claire des précipitations moyennes annuelles. Les tendances vont vers un climat plus sec, qui se manifesterait spécialement par une réduction de l'intensité des événements pluvieux. En général, la saison pluvieuse se rétrécirait avec un démarrage tardif des pluies. La température connaîtrait une augmentation significative, avec plus de 2°C supplémentaire dans les 20 ans à venir. **Des modifications du cycle hydrologique apparaîtraient notamment en ce qui concerne la transformation locale des pluies, si bien qu'on noterait une réduction de l'évapotranspiration due à une faible disponibilité hydrologique** ».*

Toutefois, en raison des doutes sur la qualité de ces données de scénarios qui existent également sur le passé, nous avons vérifié au niveau de certaines stations, la corrélation entre les données observées et celles des scénarios, et conclu à des corrélations nulles au pas de temps journalier (Collot S. *et al.*, 2008). En effet, les concepteurs des scénarios avaient averti qu'il ne s'agit pas de prévision journalière, et les données des scénarios ne devraient pas être jugées au pas journalier. Elles sont plutôt réalistes lorsqu'elles sont agrégées à des pas de temps mensuel au minimum, de même que les résultats de modèle hydrologique associés à l'utilisation de ces scénarios.

Remarque: Les scénarios climatiques du projet IMPETUS ont été calculés à travers une approche combinant plusieurs modèles climatiques à des échelles spatio-temporelles différentes (des pas de temps allant du multi-centenaire au jour, et des pas d'espace allant de 200 km à 1 km) avec une

hiérarchisation donnée. Pour plus de détails, on trouvera d'abord une description succincte de cette approche en Annexe 7, puis on pourra se référer si nécessaire à plusieurs publications dans ce cadre (Jacob D., 2001, Roeckner E. *et al.*, 2003, Paeth H. *et al.*, 2009, Christoph M. *et al.*, 2010).

La figure suivante représente les précipitations moyennes annuelles observées sur la période passée 1997-2006 et celles du scénario IMPETUS sur 2011-2025. Elle indique une baisse probable de la moyenne pluviométrique annuelle de 1.147 mm à 1.044 mm soit environ 9% entre les 2 périodes.

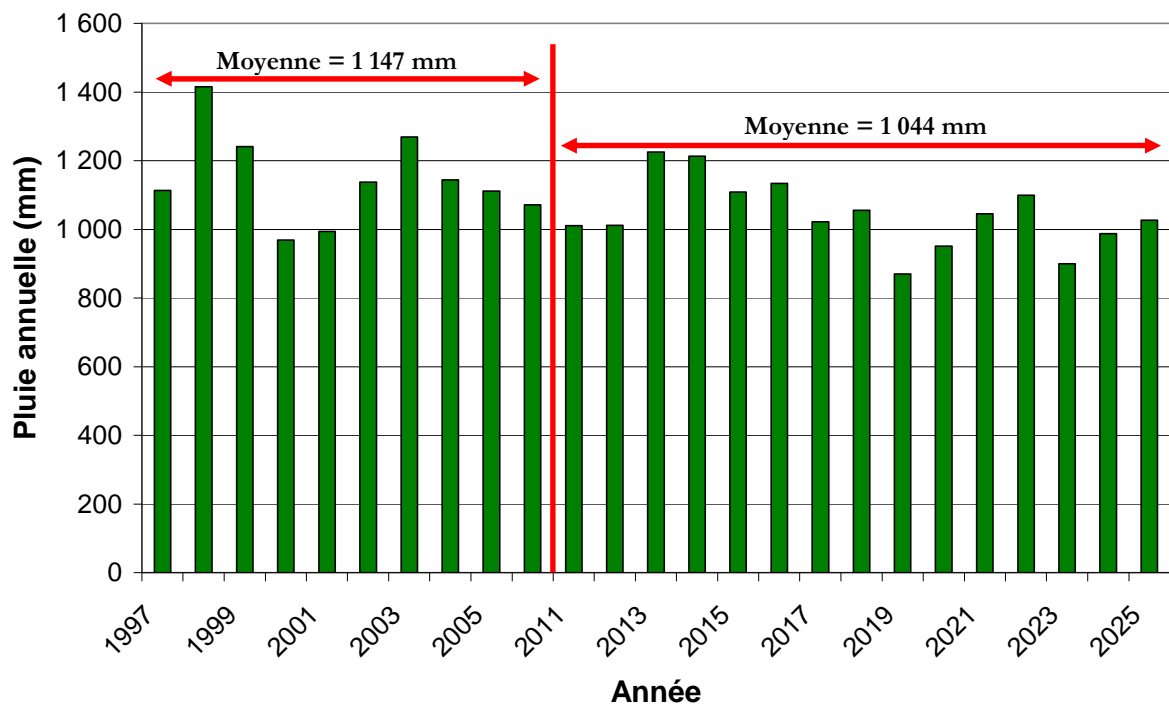


Figure 10- 1 : Pluviométrie annuelle observée (1997-2006) et scénario IMPETUS (2011-2025) sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou

Ainsi, nous retiendrons ici que les données pluviométriques du scénario IMPETUS sont caractérisées par une baisse probable de 9% de la moyenne entre les périodes 1997-2006 et 2011-2025 due essentiellement à une réduction de l'intensité des événements pluvieux.

Les données d'évapotranspiration potentielle (ETP) utilisées sont celles de la période 1997-2006. Ainsi, l'hypothèse sous-jacente est une demande évaporative future peu différente de celle de la période précédemment étudiée. Cette façon de faire, bien que critiquable, est acceptable, dans la mesure où, il s'agit d'ETP et non d'ETR, et en conséquence, il appartient au

modèle hydrologique comme vu aux Chapitres 6 et 9, d'adapter la satisfaction de la demande évaporative en fonction de la disponibilité hydrologique. En effet, si l'on prend en compte le fait que l'ETP moyenne annuelle a augmenté d'environ 4,6% sur 42 ans (entre 1965 et 2006) à la station synoptique de Parakou [cf. Section 4.1.1 (Roko F., 2007)], on peut être curieux de savoir ce qu'il en sera d'ici 2025. **L'hypothèse simpliste, qui consiste à envisager que cette même tendance serait maintenue, donnerait une augmentation de l'ETP de l'ordre de 2,3% entre 2006 et 2025, soit une hausse de l'ETR annuelle simulée par le modèle de l'ordre de 1,5% (cf. éq. 9-1 à la page 239), ce qui aurait un impact insignifiant sur le bilan hydrologique et l'estimation des ressources en eau.** Les résultats du diagnostic posé au sujet de l'évaporation (cf. Section 9.2.2.1) indiquent que, pour entraîner des modifications importantes de la disponibilité en ressources en eau simulée par le modèle Topamma, il faudrait une hausse « spectaculaire » de l'ETP, hypothèse qui peut être raisonnablement écartée d'ici 15-20 ans.

Remarques:

- La tendance pluviométrique moyenne à un horizon de 100 ans (entre 1980-1999 et 2080-2099) obtenue à partir de 21 modèles climatiques est une hausse d'au plus 5% sur l'ensemble du Bénin (GIEC, 2007) y compris le bassin de l'Ouémé à Bétérou. Toutefois, cette tendance globale à la hausse reste mitigée et doit être nuancée par le fait que sur les 21 modèles utilisés, près de la moitié prévoit une baisse et l'autre moitié une hausse sur le Bénin. Dans ce contexte, le scénario pluviométrique IMPETUS (Christoph M. *et al.*, 2010) qui indique une baisse probable d'environ 9% d'ici 2025 sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou peut-être considéré parmi les extrêmes les plus pessimistes. Dans le cas de la gestion prospective globale de la disponibilité en l'eau dont il est question dans ce Chapitre, il nous paraît raisonnablement indiqué de privilégier de tels scénarios à la baisse, qui représentent les situations les plus défavorables par rapport à l'objectif.
- Quant à l'évapotranspiration, on sait qu'elle est fortement dépendante de la température (Riou C., 1975, Roko F., 2007). Le quatrième rapport du GIEC prévoit une hausse de température de 3 à 3,5°C sur le bassin à un horizon de 100 ans (GIEC, 2007), avec une augmentation de 0,1 à 0,2°C par décennie d'ici 20 ans; tandis que le scénario IMPETUS indique qu'elle augmenterait de 2°C d'ici 20 ans (Christoph M. *et al.*, 2010). Là encore, il y a lieu de s'apercevoir que les projections du scénario climatique IMPETUS tendent à être plus extrêmes et plus pessimistes que celles du GIEC.

Actuellement, les estimations prospectives des ressources en eau de surface disponibles sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou sont celles issues des travaux du projet IMPETUS avec le modèle hydrologique UHP (Judex M. *et al.*, 2009, Giertz S. *et al.*, 2010), et celles d'un récent travail de Master avec le modèle GR4J (Agbidinokoun A. S., 2011). Dans ce qui suit, les résultats de Topamma obtenus dans la présente étude seront comparés à ces deux autres résultats disponibles selon deux horizons de projection respectifs (GWP/TAC, 2000, GWP/TEC, 2005, GWP/RIOB., 2009, Le Goulven P., 2009) définis comme suit :

- **l'horizon stratégique (5-10 ans) : les politiques et stratégies nationales de développement définissent généralement des dispositions à l'horizon de 5 à 10 ans et c'est avec les données de cet horizon qu'on doit envisager/planifier les ouvrages structurels de mobilisation à grande échelle de la ressource en eau; ainsi, ces horizons interannuels permettent au niveau géopolitique supérieur de décision (gouvernement, administration centrale à compétence nationale) d'anticiper sur les situations exceptionnelles ou critiques auxquelles il faudrait s'attendre ;**
- **l'horizon tactique (mois-année) : la mise en œuvre des politiques et stratégies déjà définies pour un horizon stratégique donné doit tenir compte des spécificités internes à chaque période traversée ; ainsi, les horizons mensuels et annuels permettent par exemple dans le cas d'une unité géographique inférieure au bassin considéré (commune par exemple dans le cas du bassin de l'Ouémé à Bétérou), de planifier judicieusement les interventions publiques relatives aux besoins en matière de gestion de la ressource mobilisée (restriction, maîtrise de l'augmentation incontrôlée des demandes par l'imposition de redevances par exemple, etc...).**

10.1.2. A l'horizon stratégique

La *Figure 10- 2a* présente les projections des volumes moyens annuels d'eau de surface sur les décennies 2010-2019 et 2020-2029.

Ainsi, comme le montrent ces histogrammes, on constate que les estimations ou projections annuelles moyennes d'eaux de surface à partir du modèle GR4J [plus de 1,6 milliards m³ (Agbidinokoun A. S., 2011)] sont supérieures à celles du modèle UHP [\approx 1,3 milliards m³ (Giertz S. *et al.*, 2010)], elles même supérieures à celles du modèle Topamma (moins de 1 milliard

m³). Aussi, la dynamique entre les deux décennies telles que simulée par ces deux derniers modèles est paradoxalement inversée par le premier. En effet, GR4J signale une légère augmentation des ressources en eau de surface disponible entre les deux décennies contrairement aux projections de Topamma et UHP, qui elles, sont plutôt en baisse.

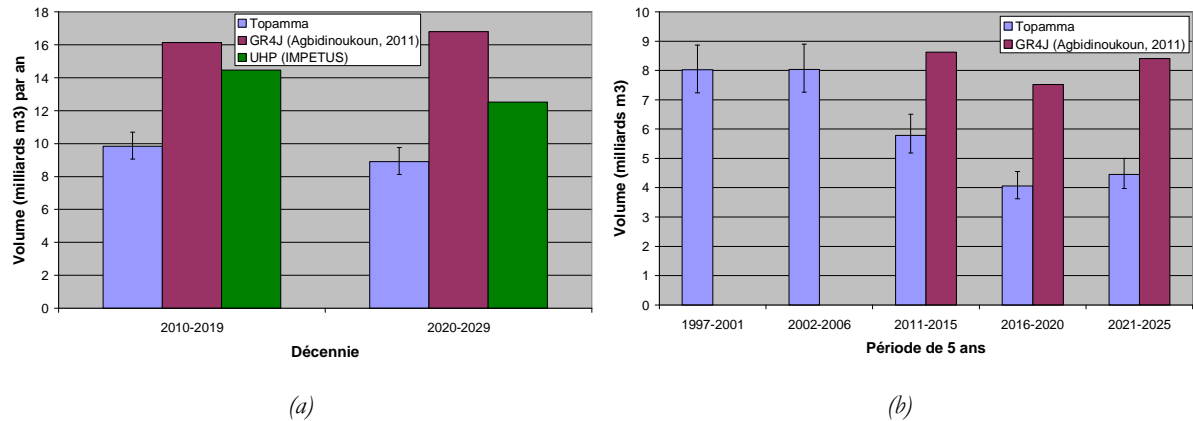


Figure 10- 2 : Volumens décennaux et quinquennaux d'eau de surface disponible à l'horizon 2025

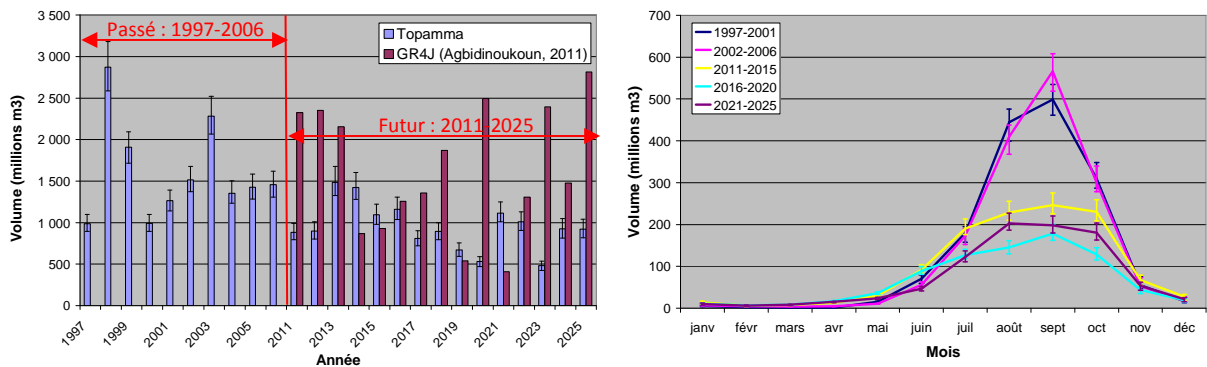
Lorsqu'on décline les agrégats décennaux en période de 5 ans (passé et futur), on obtient la Figure 10- 2b. Elle indique que la période 2016-2025 (≈ 4 milliards de m³) s'annonce hydrologiquement très sèche (réduction d'environ 50% des eaux de surface) par rapport à la période étudiée 1997-2006 (≈ 8 milliards de m³) avec 2011-2015 (≈ 6 milliards de m³) comme période intermédiaire ou de transition, enregistrant une réduction moindre de l'ordre de 25%. Ces chiffres sont comparables à ceux d'une autre étude réalisée dans la même zone sur le bassin voisin de la Téroù à Igbomakoro (Sintondji L. O., 2005), et qui annonce une baisse de 56% à l'horizon 2025 (cf. Section 4.2.3.1). Cela peut avoir des conséquences significatives, notamment pour la production agricole, dans la mesure où, la stratégie actuelle du développement de ce secteur [Plan Stratégique de Relance du Secteur Agricole, (MAEP, 2008)] repose sur la mécanisation agricole qui impliquerait une irrigation à grande échelle. Sur la même figure, la confrontation de ces chiffres avec ceux issus du modèle GR4J indique qu'entre 2011 et 2025, les tendances à long terme sont similaires avec celles de Topamma à savoir que la période 2016-2020 serait hydrologiquement plus sèche que les deux autres de cinq ans qui l'entourent. Mais, il est à noter que les projections du modèle GR4J sont largement supérieures à celles de Topamma avec des différences de l'ordre de 3 à 4 milliards de m³ au sein de la même période, signalant une hausse des écoulements d'environ 27% à l'horizon 2025 (Agbidinokoun A. S., 2011).

En synthèse, on peut retenir que **la tendance de la disponibilité des ressources en eau de surface est globalement à la baisse d'ici 2025-2030 avec des réductions pouvant atteindre les 50%**. Toutefois, la réduction significative ainsi annoncée, serait progressive avec comme période intermédiaire les 5 prochaines années.

Avec les résultats détaillés aussi mitigés des comparaisons entre différents modèles, **une planification stratégique raisonnable à l'échelle du bassin devrait se fonder sur les estimations scientifiques les plus basses (celles du modèle Topamma) auxquelles il faudrait préparer des réponses**, car on a tout de même une tendance à la baisse ; en considérant que les rares situations extrêmement hautes qui se produiraient dans le futur seraient d'ampleur moindre que ce qui a été vu récemment.

Remarque : Le quinquennat 2006-2011 est absent de la *Figure 10- 2b* parce qu'il n'a pas été possible d'y obtenir l'ensemble des données requises pour la modélisation hydrologique (précipitation, évapotranspiration et débit). Il aurait été utile d'avoir ces données, mais elles ne sont disponibles aujourd'hui que sur les 2 premières années seulement dudit quinquennat (2007-2008). Aussi, le propos principal du présent Chapitre étant le futur (horizon 2025), il ne nous a pas semblé nécessaire de disposer des résultats du modèle sur ce dernier quinquennat avant d'atteindre les objectifs fixés.

10.1.3. A l'horizon tactique



La figure suivante présente les volumes simulés par les modèles Topamma et GR4J.

(a) : *Volume annuels*

(b) : *Répartition mensuelle pour Topamma*

Figure 10- 3 : Volumes annuels et mensuels moyens d'eau de surface disponible à l'horizon 2025

Sur la

Figure 10- 3a, on aperçoit que la disponibilité moyenne annuelle en eau de surface sur la période passée 1997-2006 est largement supérieure à celle projetée pour la période future 2011-2025, avec une chute probable de la moyenne annuelle de 41% entre les deux périodes. Cette chute correspond à la baisse pluviométrique probable de 9%, soit un facteur d'amplification d'environ 4,5 compatible avec les valeurs précédemment obtenues (cf. Section 9.3). Cette baisse pluviométrique, essentiellement due à une réduction de l'intensité des événements pluvieux (cf. Section 10.1), est le scénario le plus préjudiciable pour le modèle hydrologique Topamma, comme l'a montré une étude antérieure sur le bassin (Le Lay M., 2006).

De même, la variabilité interannuelle observée au sein de la période passée est bien plus grande que celle de la période à venir, en témoigne une chute relative de l'écart-type interannuel de 53%. Par ailleurs, on constate que les années 2019-2020 et 2023 annoncent une sécheresse hydrologique extrême (seulement 500 millions de m³ d'eau de surface), contrairement aux années 2013 et 2014 (environ 1,5 milliards de m³), qui elles, simulent une situation excédentaire, qui reste tout de même plus faible que les excédents de la période récente. **Ainsi, ces situations excédentaires seraient moins inquiétantes que celles déficitaires des années 2019-2020 et 2023, car elles font suite à une période beaucoup plus critique (en termes d'excédent) qu'elles-mêmes avec seulement deux années de rupture (2011-2012), contrairement aux années 2019-2020 et 2023 qui, elles, arriveraient pour exacerber une situation déjà dégradante depuis environ 4 ans déjà (2015).** Dans ces conditions, il y a nécessité de concevoir et mettre en œuvre une politique optimale d'allocation des ressources en eau.

Contrairement à ce qu'on observe aux horizons stratégiques, la

Figure 10- 3a révèle que les biais entre Topamma et GR4J ne sont pas systématiquement dans un sens unique au pas annuel (GR4J ne surestime pas systématiquement Topamma). Néanmoins, on enregistre 11 années sur 15, pendant lesquelles les projections de GR4J sont supérieures à celles de Topamma, tandis que la situation est inversée le reste du temps (4 années). Le caractère hydrologique extrêmement sèche de l'année 2019, précédemment détecté par Topamma est confirmé par GR4J, de même que pour l'année 2013 qui est annoncée très humide par les 2 modèles. En amplitude, les valeurs annuelles de Topamma d'ici 2025 restent inférieures à 1,5 milliards m³, alors que celles de GR4J peuvent atteindre 2,5 milliards m³ voire dépasser ce chiffre (année 2025). On constate également que la variabilité interannuelle est sensiblement plus forte avec GR4J (écart-type interannuel = 763 millions m³) qu'avec Topamma (écart-type

interannuel = 281 millions m³). Les tendances interannuelles visualisées sont faiblement à la hausse pour GR4J (+4 millions m³ par an) et sensiblement à la baisse pour Topamma (-27 millions m³ par an). La période 2014-2020 est contradictoirement simulée par les 2 modèles. En effet, Topamma y signale une grande décroissance progressive des eaux de surface d'année en année allant de 1,5 milliards m³ à 500 millions m³, tandis que GR4J voit plutôt une forte croissance progressive allant de moins de 1 milliard m³ à 2,5 milliards de m³.

Au pas de temps mensuel, la dynamique saisonnière des ressources telle que simulée par Topamma (

Figure 10- 3b) sur le bassin fournit quelques précieuses informations pour une allocation tactique des ressources en eau.

- on y note **une baisse de plus de 50% (de 500 à 250 millions m³ environ par mois) des volumes d'eau de surface sur les mois d'août à octobre**, entre la période passée (1997-2006) et la période future (2011-2025), sans modification sensible pendant le reste de l'année ; globalement, **la dynamique saisonnière s'aplatirait par une réduction des écoulements au cœur de la saison ;**
- **la période 2016-2020 serait la plus sèche avec des totaux mensuels plus bas, par rapport à la période 2011-2015, tandis que la période 2021-2025 resterait intermédiaire et marquerait une légère reprise hydrologique** qui est néanmoins plus faible, car elle est loin des autres périodes hydrologiques.

Après ces estimations aux horizons stratégique et tactique, et compte tenu du fait que le modèle hydrologique Topamma est plus sensible à la variabilité interannuelle (conditions sèches ou humides) qu'à la dynamique saisonnière des pluies (cf. Section 9.3.3), il y a lieu de s'interroger, sur la validité des différents modèles, vu que la période récente dans laquelle ils ont été préparés est humide, contrairement à la période à venir, qui, quant à elle, serait sèche. Au-delà de cette question pertinente, il faut considérer qu'**un travail constant d'actualisation et d'adaptation des modèles devrait être réalisé, au moins par quinquennat, afin de s'assurer du maintien de leurs performances globales.** A cet effet, il serait indiqué d'utiliser la même méthodologie de collecte des données et d'estimation des ressources en eau pour ne pas introduire des biais importants dans les séries de données.

10.2 Besoins potentiels en eau sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou

L'eau disponible (cf. Section 10.1) représente un patrimoine commun à partager par l'ensemble des communes du bassin, et à considérer dans le cadre de l'intercommunalité. Nous avons signalé que le bassin de l'Ouémé à Bétérou regroupe 10 communes dont les territoires respectifs sont en partie ou en totalité concernés (cf. Section 3.2.1). Il est question, dans la présente Section, d'évaluer et d'analyser les besoins en eau à l'échelle de ces 10 communes.

10.2.1 Données de scénario futur utilisées

Pour ce faire, les seules données existantes actuellement sur la zone et élaborées par le projet IMPETUS (Judex M. *et al.*, 2009, Reichert B. and Jaeger A., 2010) ont été exploitées. Le scénario retenu ici porte sur la croissance économique et la décentralisation, et IMPETUS en donne la description suivante :

- *Les investissements directs étrangers augmentent et de nouvelles opportunités s'ouvrent dans le marché régional, les infrastructures de transport sont étendues ; le Bénin remplit son rôle de pays de transit. La continuité de l'adossement du FCFA à l'Euro (€) entraîne une forte stabilité monétaire. Le pays réussit à améliorer sa position compétitive sur les marchés internationaux. Les revenus d'exportation continuent d'être générés par le secteur agricole, qui maintient sa position clé dans l'économie du pays. Le partenariat public-privé est de plus en plus développé.*
- *Le secteur agricole se modernise²⁵, les taux d'innovation augmentent, les superficies emblavées s'étendent significativement, l'utilisation des fertilisants croît et la productivité agricole augmente. Les prix sur les marchés internationaux sont stabilisés.*
- *Les réformes administratives démarrées dans le contexte de la démocratie et de la décentralisation montrent des résultats prometteurs. En particulier, les mesures anti-corruption fonctionnent, un meilleur accès à l'information et un plus grand contrôle des décideurs politiques par le public sont assurés. Le financement des initiatives locales augmente. Le Bénin renforce sa coopération internationale pour son développement, les expansions en matière d'approvisionnement en eau et en énergie, d'infrastructures de transport et d'éducation sont stabilisées. La croissance démographique diminue un peu moins que prévu, et les femmes sont de plus en plus intégrées au marché du travail.*

²⁵ C'est-à-dire mécanisation, maîtrise de l'eau, meilleure organisation des filières etc...

- *La consommation d'eau potable par personne est déterminée sur la base des études réalisées. Pour l'année 2002, les mesures sont les suivantes : la consommation d'eau des personnes n'ayant pas d'accès garanti à une source d'eau potable était de 14 litres par jour et par personne ; la consommation des personnes ayant un accès facile à l'eau (par ex. fontaine, pompe) s'élève à 19 litres par jour et par personne et 40 à 80 litres pour celles ayant un accès à l'eau courante²⁶. Les données relatives à l'accès à une source d'eau des populations sont tirées du recensement de 2002. En raison du développement économique positif envisagé, l'accès à l'eau potable est amélioré dans ce scénario et la consommation d'eau par personne augmente. La croissance démographique s'accompagne d'une forte augmentation de la consommation d'eau domestique.*
- *La consommation d'eau industrielle est déterminée à partir des études régionales. Il est possible d'évaluer la hausse de la consommation d'eau annuelle à 3,375%. Lorsqu'un secteur consommateur ou utilisateur d'eau n'existe pas dans une commune, de nouvelles entreprises de ce secteur sont prises en compte à partir de 2015.*
- *Pour l'agriculture, on considère les besoins en eau pour l'irrigation et l'élevage. Les surfaces irriguées et les cultures de l'année de départ sont déduites des études d'IMPETUS. Pour le scénario, on a imaginé et pris en compte une surface plus grande correspondant à la croissance démographique et aux planifications étatiques. Dans ce scénario, le besoin en eau pour l'irrigation est calculé à l'aide du modèle FAO CropWat. La surface à arroser s'agrandit fortement dans ce scénario. Le besoin en eau des animaux est évalué à l'aide de l'outil d'aide à la décision BenIMPACT développé par IMPETUS.*

Remarques:

- Le projet OUEME-2025 a récemment lancé un travail sur l'estimation prospective des besoins en eau potable, agricole et industrielle à l'échelle des 50 communes du bassin de l'Ouémé à Bonou à l'horizon 2025. Ce travail est toujours en cours ; et plus tard, il serait utile d'en comparer les résultats à ceux d'IMPETUS qui sont utilisés ici.
- Aussi, faut-il prendre en compte le fait que l'irrigation au Bénin concerne généralement le riz et le maraîchage. Or ces filières agricoles ne sont pas encore organisées à l'instar par exemple de la filière coton. Si bien que le producteur n'est pas confiant et ne dispose pas

²⁶ Eau de la SONEB.

encore de garanties suffisantes quant au recouvrement de son investissement à grande échelle dans ces productions. En effet, investir à petite échelle dans de telles productions avec la mécanisation et l'irrigation induirait des coûts de production très élevés et des pertes pour le producteur, si bien que, la véritable façon de rentabiliser et de rendre ces productions efficaces, serait d'opérer à très grande échelle dans le cadre d'un programme national conséquent de promotion de grands périmètres irrigués. Dans ce cadre, l'État béninois devrait organiser ces filières agricoles et adopter une politique commerciale adaptée qui favorise le développement national de ces productions. Il faudrait s'attendre à un véritable lobbying de la part des opérateurs économiques importateurs de ces produits, qui, pour sécuriser leur intérêt éviteraient à tout prix le développement à grande échelle de ces productions au plan national.

10.2.2 A l'horizon stratégique

Les évaluations de besoins en eau issus des travaux d'IMPETUS porte sur 4 usages : l'eau potable, l'eau pour l'irrigation, l'eau pour l'élevage et l'eau industrielle. Ces évaluations n'ont pas pris en compte l'éventualité de l'aménagement d'un barrage hydroélectrique sur l'Ouémé à Bétérou. En effet, dans le cadre de l'aménagement optimal du fleuve Ouémé, deux sites distants de 10 km avaient été identifiés sur l'Ouémé à Bétérou (respectivement au droit et en aval de la station hydrométrique) pour accueillir des barrages hydroélectriques (CEB, 1990, MEE/DGE., 2009). Pour le site au droit de la station, son potentiel hydroélectrique est évalué à une puissance de 30 MW et un productible de 120 GWh avec les données de fonctionnement suivantes : un débit moyen turbiné de 65 m³/s et une durée annuelle moyenne de turbinage de 4.000 heures (fonctionnement à 47% du temps). Avec ces chiffres, le volume net turbiné serait de 936 millions m³, et nous proposons de considérer ici en première approche une hypothèse brute d'un besoin de 1 milliard de m³ par an pour la production hydroélectrique.

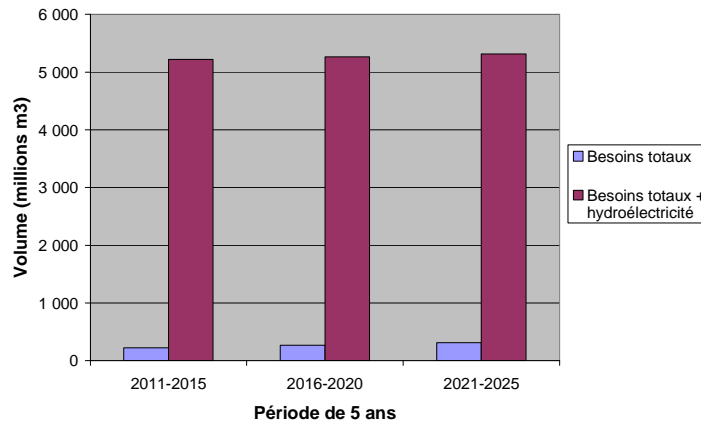


Figure 10- 4 : Besoins totaux (cumulés) estimés avec prise en compte de l'hydroélectricité d'ici 2025.

Les besoins totaux quinquennaux (AEP+irrigation+élevage+industrie) évolueraient de 221 à 312 millions m³ à l'échelle des 10 communes du bassin d'ici 2025, non compris les besoins hydroélectriques qui, ajoutés, porteraient les chiffres à près de 5,3 milliards m³.

Remarque: L'hydroélectricité est un utilisateur non consommateur d'eau, et ses volumes déjà turbinés peuvent servir aux autres besoins. Néanmoins, pour l'analyse réalisée ici, nous considérons bien distincts les volumes concernés et les additionnons pour les calculs.

10.2.3 A l'horizon tactique

A l'horizon tactique, l'évolution des besoins en eau entre 2011 et 2025 par commune du bassin se présente comme suit.

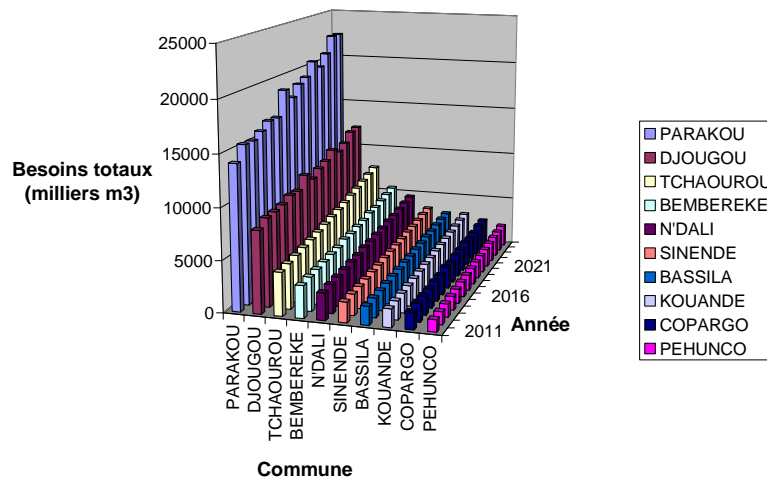


Figure 10- 5 : Evolution annuelle des besoins totaux en eau par commune d'ici 2025

Sur les *Figure 10- 5* et *Figure 10- 6*, on constate que Parakou, Djougou et Tchaourou auraient les plus grands besoins en eau largement supérieurs à 5 millions m³ par an, atteignant plus de 22 millions m³ pour Parakou seul à l'horizon 2025. Par contre, les besoins resteraient inférieurs au seuil de 5 millions m³ pour les autres communes même jusqu'en 2025 (à l'exception de Bembèrèkè).

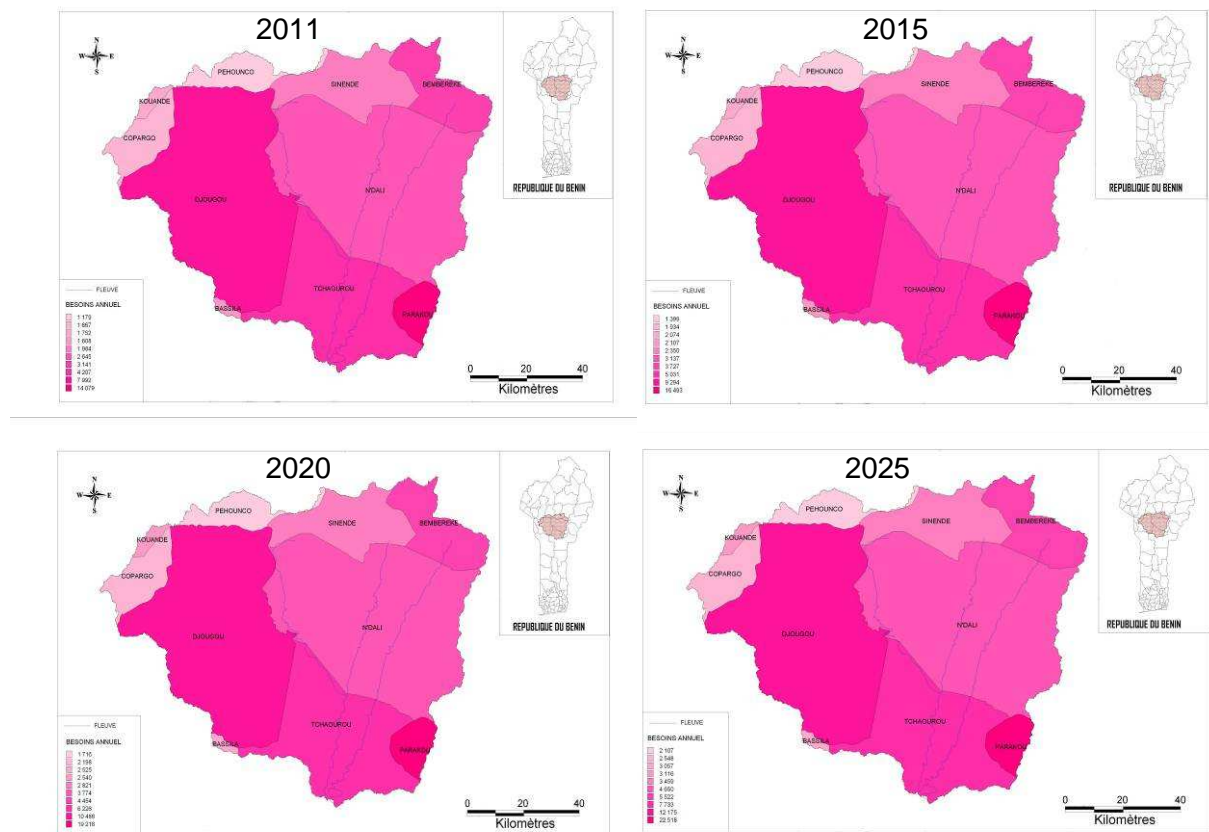


Figure 10- 6 : Cartes de répartition spatiale des besoins totaux en eau

Si on s'intéresse à la répartition de ces chiffres par type d'usage, on obtient les figures des 4 pages suivantes.

En ce qui concerne les besoins en eau potable (*Figure 10- 7* et *Figure 10- 8*), les communes de Parakou et Djougou affichent des besoins largement plus grands que les autres communes. Cela s'explique aisément, dans la mesure où ce sont les 2 plus grandes villes à l'échelle du bassin de l'Ouémé à Bétérou.

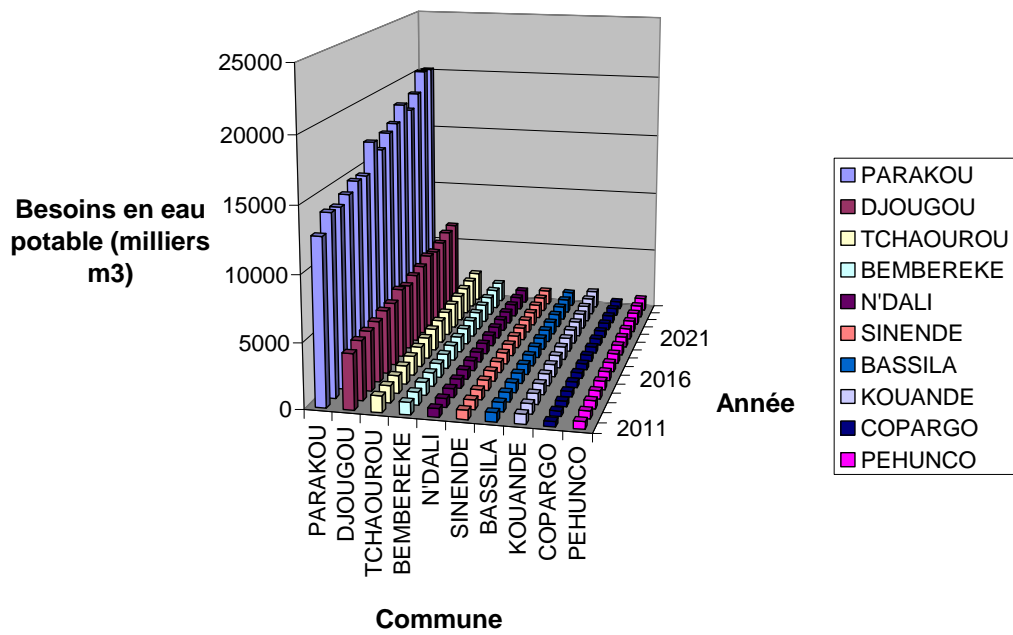


Figure 10- 7 : Evolution des besoins en eau potable par commune d'ici 2025

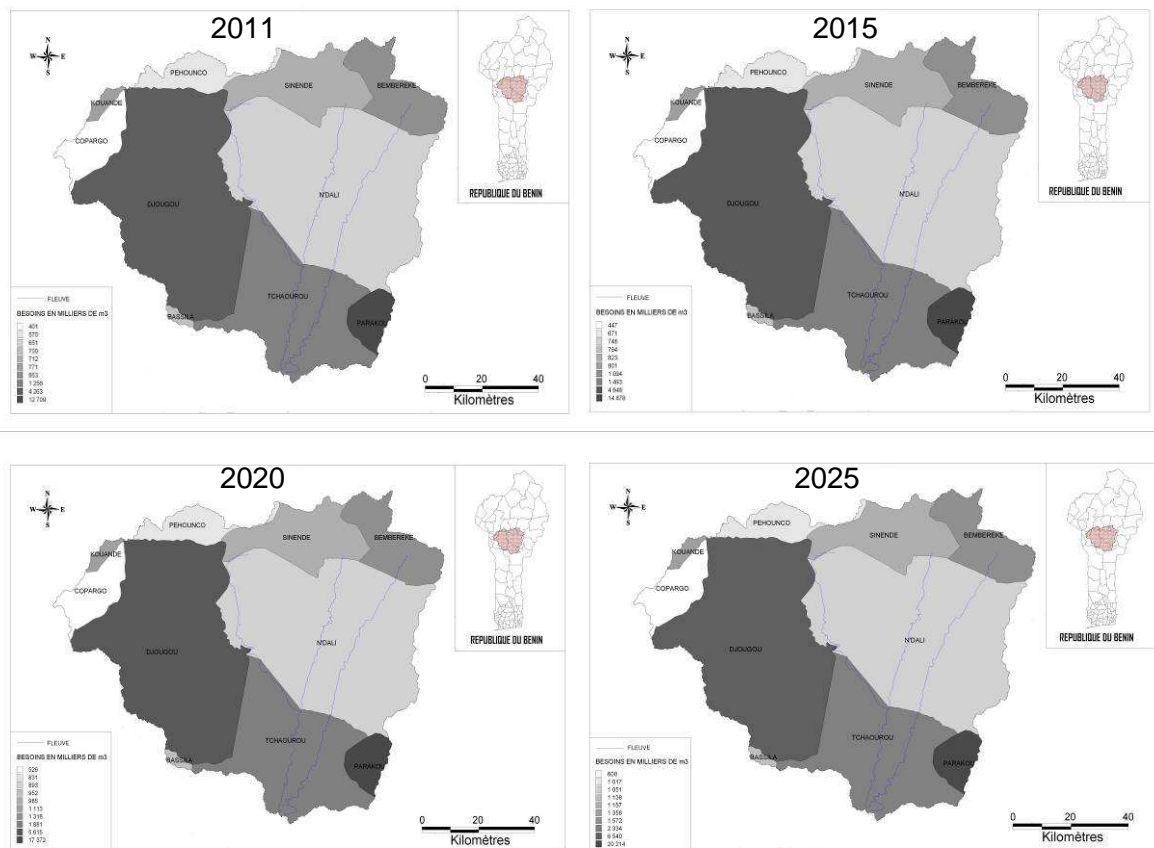


Figure 10- 8 : Cartes de répartition spatiale des besoins en eau potable

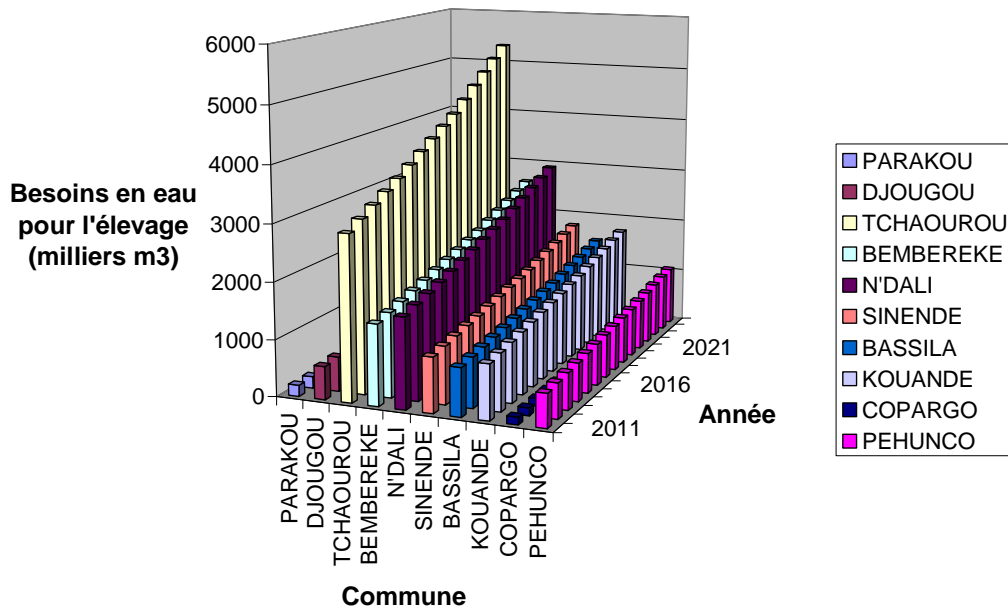


Figure 10- 9 : Evolution des besoins en eau pour l'élevage par commune d'ici 2025

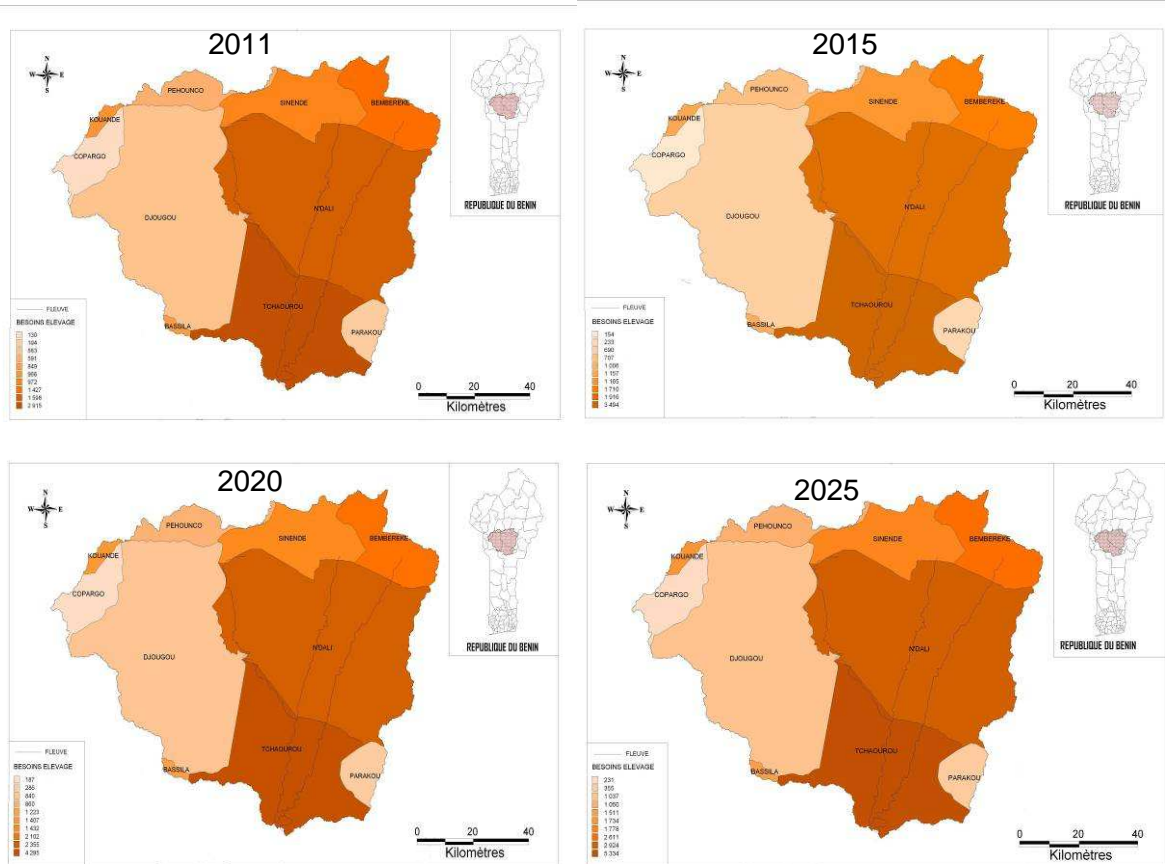


Figure 10- 10 : Cartes de répartition spatiale des besoins en eau pour l'élevage

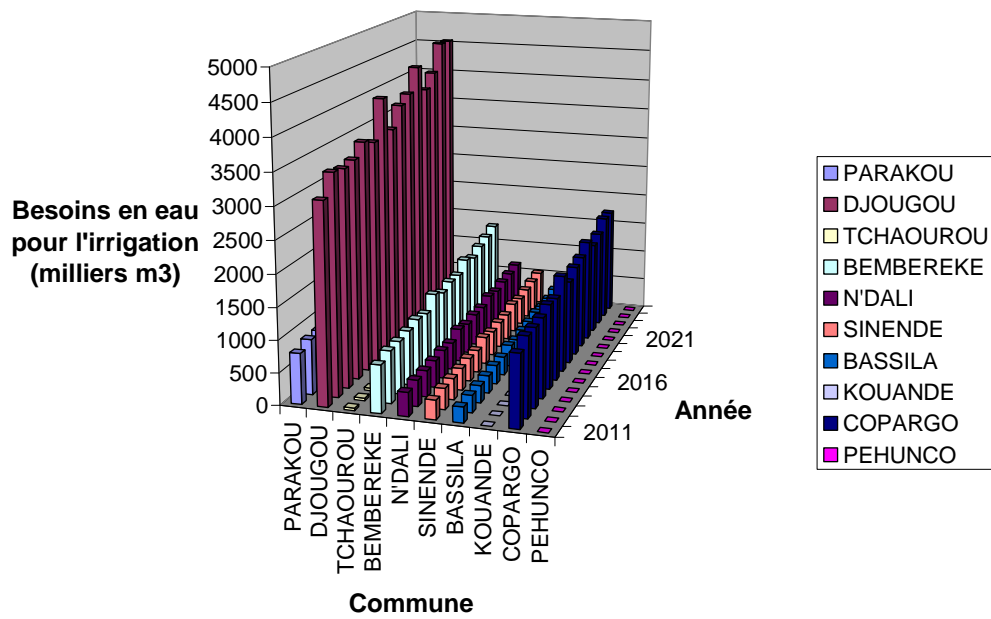


Figure 10- 11 : Evolution des besoins en eau pour l'irrigation par commune d'ici 2025

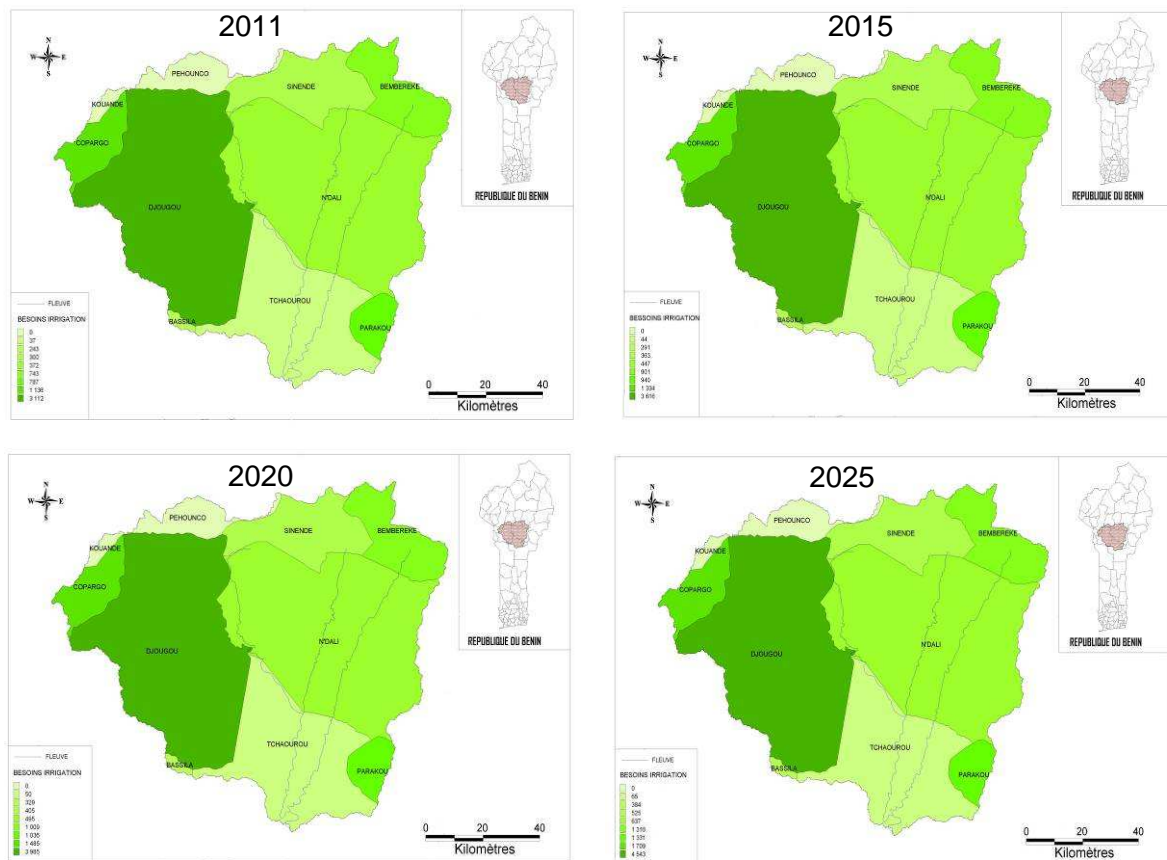


Figure 10- 12 : Cartes de répartition spatiale des besoins en eau pour l'irrigation

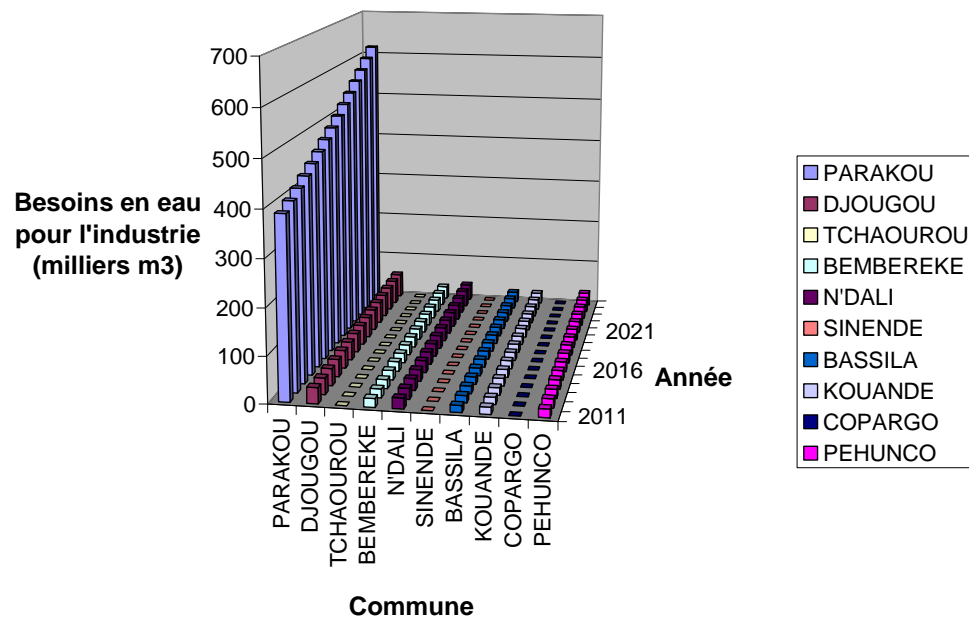


Figure 10- 13 : Evolution des besoins en eau industrielle par commune d'ici 2025

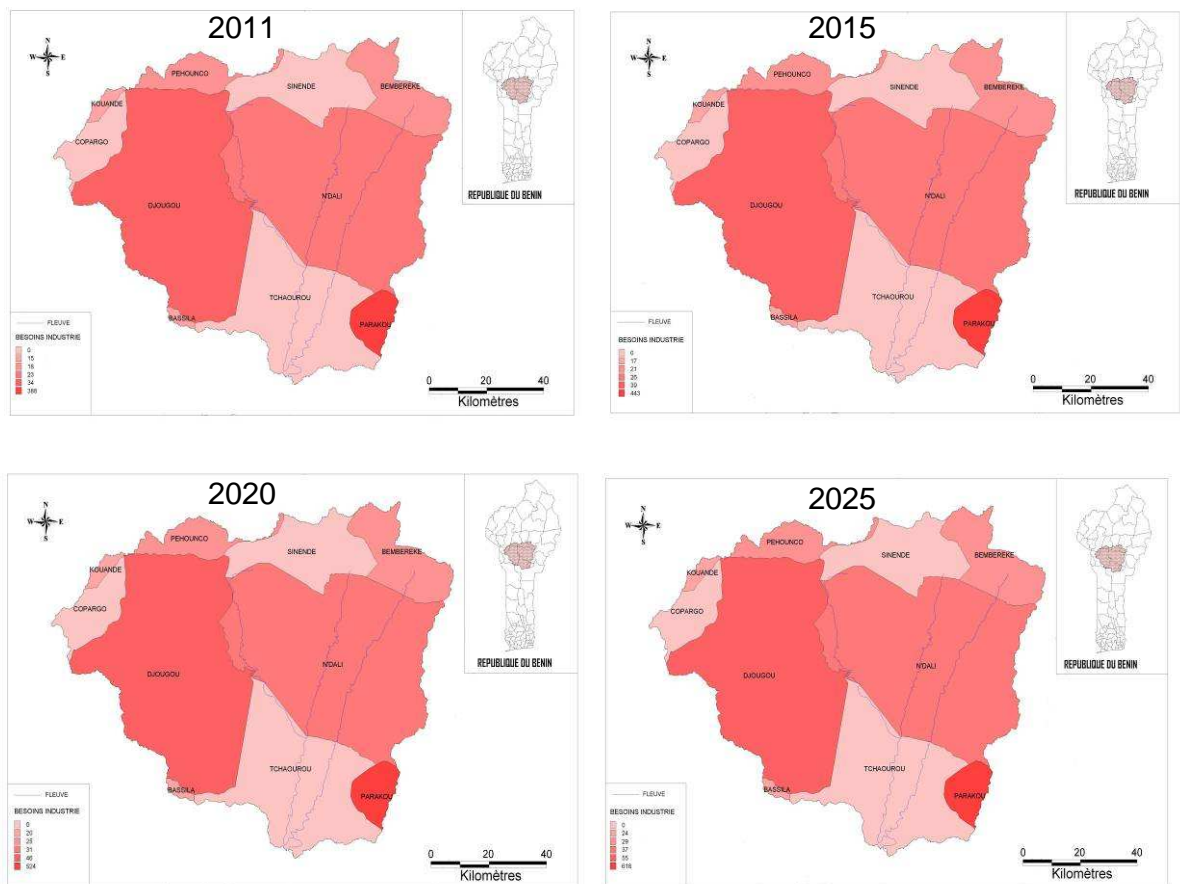


Figure 10- 14 : Cartes de répartition spatiale des besoins en eau industrielle

Pour les besoins en eau pour l'élevage (*Figure 10- 9* et *Figure 10- 10*), Tchaourou vient en tête suivie de N'Dali, Bembèrèkè, Sinendé et Kouandé ; tandis que Parakou et Copargo présentent les plus faibles besoins en eau pour l'élevage. Ces chiffres confirment le fait qu'au plan national, Tchaourou est considérée comme une commune à vocation essentiellement pastorale caractérisée par de nombreux flux migratoires et la transhumance associée à l'élevage des animaux (Afrique Conseil, 2006d).

Pour l'irrigation (*Figure 10- 11* et *Figure 10- 12*), Djougou (principalement) suivie de Copargo, Bembèrèkè et Parakou ont les besoins en eau les plus élevés à l'opposé de Péhunco, Kouandé et Tchaourou où les besoins sont quasi-négligeables.

Quant aux besoins industriels (*Figure 10- 13* et *Figure 10- 14*), Parakou arrive largement en tête, suivie timidement de Djougou, puis N'Dali, Pehunco où des usines d'égrenage de coton sont installées.

Globalement, lorsqu'on s'intéresse aux valeurs moyennes annuelles par type de besoin et par commune sur les 15 ans à venir (2011-2025), **c'est l'eau potable qui viendrait en tête avec près de 3 millions m³, soit 56%, suivi respectivement de l'élevage (1,4 millions m³, soit 26%), de l'irrigation (850 milles de m³, soit 16%) et de l'industrie (100 milles m³, soit 2%), soit en en moyenne 5,3 millions m³ par commune et par an, non compris évidemment l'hydroélectricité.**

10.3 Essai de gestion technique des ressources en eau sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou

La gestion technique, ou plutôt gestion courante (cf. Section 2.2.1) dont il est question ici repose sur (GWP/TAC, 2000, GWP/TEC, 2005, GWP/RIOB., 2009, Le Goulven P., 2009) :

- la confrontation des besoins aux disponibilités en eau afin de s'assurer de l'adéquation entre l'offre et la demande, ou encore entre les entrées et les sorties ;
- la définition d'une stratégie de mobilisation des ressources en eau, adaptée aux besoins à satisfaire dans le temps et dans l'espace ; et,
- la définition des règles de gestion stratégique et tactique, permettant de réaliser les allocations de ressources en eau conformément aux principes de la GIRE.

10.3.1 Confrontation des besoins aux disponibilités en eau et adéquation

10.3.1.1 A l'horizon stratégique

A l'échelle stratégique, la **Figure 10- 15** indique que les besoins totaux en eau (sauf pour l'hydroélectricité) sont très faibles (inférieurs à 350 millions m³) par rapport à la disponibilité en eau de surface (entre 4 et 6 milliards m³), soit un ratio de 6 à 9% environ.

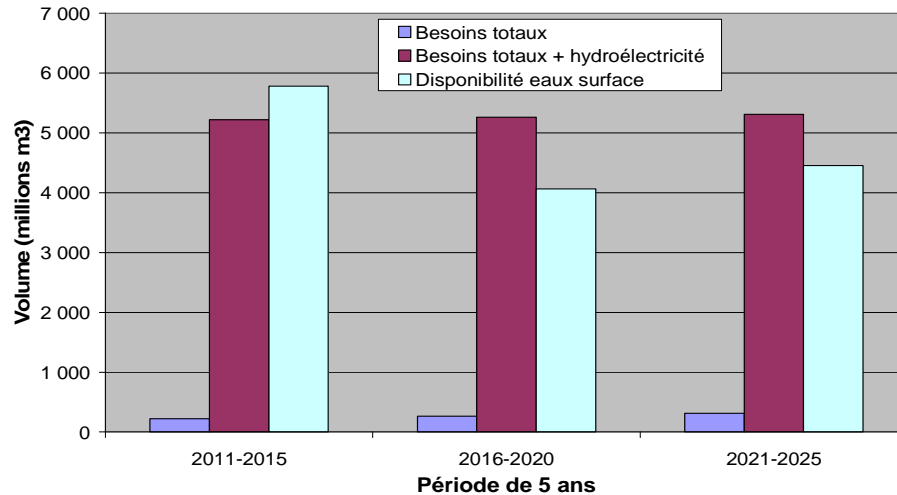


Figure 10- 15 : Confrontation des disponibilités aux besoins en eau (courbe de l'offre et de la demande) sur différentes périodes quinquennales d'ici 2025

Lorsqu'on prend en compte l'hydroélectricité, ce ratio serait de 89% sur la période 2011-2015, tandis que sur les 2 autres périodes de 5 ans, il y aurait déficit pour l'hydroélectricité car le fleuve ne drainerait qu'environ 4 milliards m³ (800 millions m³ par an) contre un besoin hydroélectrique de 5 milliards m³ (1 milliard m³ par an). On devrait à cet effet, envisager une réduction des besoins en eau pour l'hydroélectricité comme l'a déjà fait remarquer une autre étude (Azonsi F. and Dépraète C., 2001).

10.3.1.2 A l'horizon tactique

La **Figure 10- 16** présente la confrontation besoins/disponibilité au pas annuel en vue de la gestion tactique.

Globalement, on constate que **les besoins en eau (y compris l'hydroélectricité) sont supérieurs à la disponibilité en eau de surface sauf pendant 5 années (2013, 2014, 2015, 2016 et 2021)**. En effet, les volumes d'eau de surface drainés par le cours d'eau ne suffiraient pas pour satisfaire le besoin hydroélectrique pendant 9 années sur 15, avec des situations très critiques autour de l'année 2020. **Cette situation pousse alors à réduire la demande en eau pour l'hydroélectricité, pour l'établir à un chiffre compatible avec la satisfaction de**

l'ensemble des besoins à partir de la disponibilité ; ce qui est prise en compte dans la stratégie de mobilisation proposée ci-dessous. Ce choix doit s'accompagner de la prise en compte de l'efficacité économique et de la durabilité environnementale, en tant que critères fondamentaux de la GIRE.

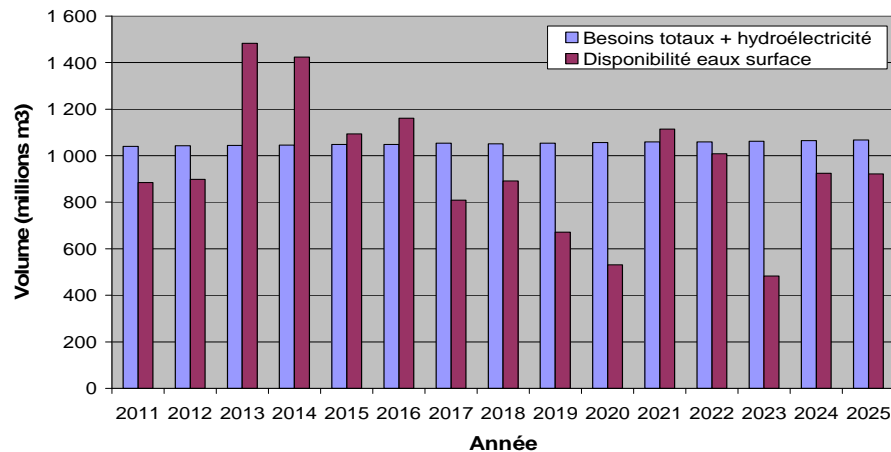


Figure 10- 16 : Confrontation des besoins en eau aux disponibilités de ressources en eau par an d'ici 2025

10.3.2 Indications pour une stratégie de mobilisation des ressources en eau

10.3.2.1 Aspects quantitatifs

D'entrée, l'hypothèse d'un barrage hydroélectrique qui requiert un besoin de 1 milliard m³ devrait être écartée, dans la mesure où l'on n'aura pas assez d'eau pour l'alimenter dans un horizon de 15 ans. Les besoins totaux annuels (à l'exclusion de l'hydroélectricité) auraient une valeur maximale de 67 millions de m³ pour l'ensemble des 10 communes. Or, l'année la plus déficitaire dans les 15 ans à venir (2023) apporterait seulement 483 millions m³ d'eau de surface en moyenne avec une estimation basse de 423 millions m³ (en tenant compte des incertitudes du modèle Topamma, il ne resterait alors que 423-67=356 millions m³ pour l'hydroélectricité en 2023. Ainsi, une planification limite sur l'horizon de 15 ans, sans prendre aucun risque, voudrait que l'on retienne un barrage hydroélectrique de capacité utile au plus égale à 356 millions m³. On pourrait prudemment dépasser ce seuil, en prévoyant conséquemment certaines mesures (voir Sections 10.3.3 et suivantes) destinées à faire respecter les priorités [en appliquant les dispositions légales et réglementaires de la récente loi portant gestion de l'eau en République du Bénin et de la Politique Nationale de l'Eau (République du Bénin, 2009)].

10.3.2.2 Aspects spatiaux

D'après la répartition spatiale des besoins en eau à l'horizon 2025 (*Figure 10- 6*), les communes de Parakou, Djougou et Tchaourou paraissent avoir les besoins les plus élevés. Ainsi, il serait judicieux de positionner un barrage multi-fonctions (AEP, Irrigation, Elevage, Industrie et hydroélectricité) dans ce triangle, et il se fait que le site hydroélectrique de l'Ouémé à Bétérou remplit bien ce critère. Mais, satisfaire les besoins en eau des communes périphériques du bassin situées à plus de 50 km de Bétérou, notamment Bembèrèkè, Sinendé, Pehunco, Kouandé et Copargo pourrait s'avérer économiquement non efficient. Sous réserve que des études appropriées ne confirment cette hypothèse dans le cadre d'un aménagement optimal des ressources en eau du bassin, on pourrait envisager, comme réponse anticipée à cette préoccupation, un ou deux autres plus petits barrages dans la zone des communes périphériques, en visant les secteurs où les besoins de base (AEP, irrigation, élevage et industrie) sont les plus élevés, c'est-à-dire à l'échelle des communes Bembèrèkè-Sinendé et au nord de Djougou (*Figure 10- 6*).

10.3.2.3 Synthèse des choix stratégiques préconisés

Au regard de toutes ces analyses, nous proposons le scénario suivant sur la base duquel seront définies les règles de gestion :

- Choix stratégique : satisfaction exclusive des besoins à partir des eaux de surface (l'incertitude qui existe aujourd'hui sur la connaissance des eaux souterraines, et les difficultés hydrogéologiques d'accès militent en faveur de cette option) ;
- Aménagements principaux :
 - **Un grand barrage multi-fonctions sur l'Ouémé à Bétérou (tous usages y compris hydro-électricité) de capacité utile de l'ordre de 300 millions de m³ destiné prioritairement aux besoins des cinq communes du sud du bassin (Parakou, Djougou, Tchaourou, N'Dali et Bassila) : on peut envisager de réserver 70 millions de m³ pour tous les usages de ces communes (contre une estimation réelle de 50 millions m³) et le reste (230 millions m³) pour l'hydro-électricité ; ce qui réduirait de presque 3 à 4 fois le potentiel hydroélectrique prévu pour être exploité sur le site (cf. Section 10.2.2) et correspondrait à un productible de l'ordre de 30 à 40 GWh. Cette réduction est compatible avec les conclusions**

d'une étude réalisée en 2001 (Azonsi F. and Dépraète C., 2001) et qui signale que la capacité des barrages prévus pour être construits sur l'Ouémé étaient surestimées par rapport à la récession probable des débits pendant la période de 2000 à 2050. Afin d'estimer la capacité brute de l'ouvrage, nous proposons de tenir compte d'un taux maximal de pertes globales (y compris évaporation) de l'ordre de 50% des volumes mobilisés [dans le cadre des travaux confortatifs des barrages du *Projet d'Hydraulique Pastorale et Agricole*, les études réalisées en 2010 par le bureau d'études CANAL-EAU avaient estimé les pertes par évaporation sur 2 sites à 21% et 26% respectivement des volumes mobilisés (MEE/PHPA, 2010b, a)], si bien que la capacité brute de l'ouvrage de mobilisation à considérer serait de 600 millions de m³. La gestion opérationnelle de ce barrage peut s'appuyer sur l'exemple des barrages de Gariep et Vanderkloof en Afrique du Sud, pour lesquels un système d'allocation multi-usages de l'eau mobilisée est mise en place pour maximiser la production hydroélectrique tout en respectant les niveaux de satisfaction requis pour chaque type d'usage (Bapela L. *et al.*, 2010).

- Un ou deux barrages de moindres capacités, cumulant 30 millions de m³ en volume utile, dans la zone des 5 communes périphériques nord (Bembèrèkè, Sinendé, Péhunco, Kouandé et Copargo) destinés à leurs besoins en eau (contre une estimation réelle de 17 millions); on retiendra donc une capacité brute de l'ordre de 60 millions de m³ à cet effet. Une analyse du réseau hydrographique laisse suggérer 2 sites respectivement dans les communes de Sinendé (sur un affluent rive droite de l'Alpouro) et de Djougou (en amont sur la rivière Affon) comme illustrés sur la **Figure 10- 17**.

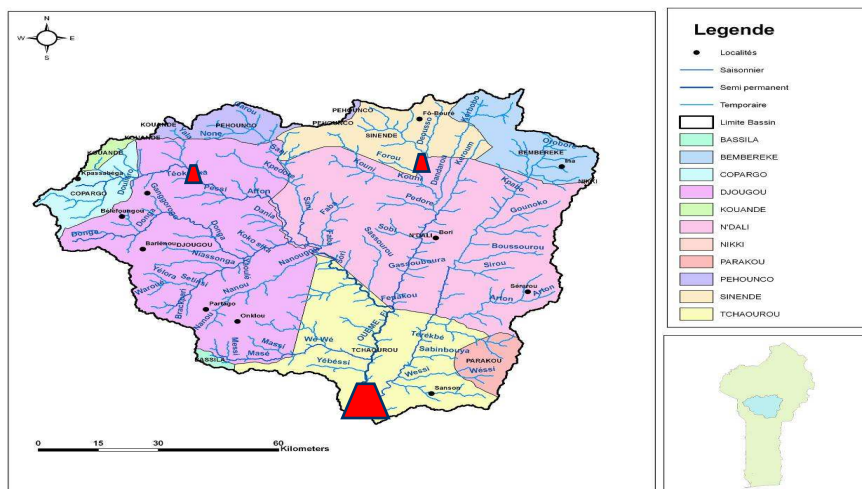


Figure 10- 17 : Les 3 sites de barrages préconisés dans le bassin de l'Ouémé à Bétérou (en rouge)

Sur la base de cette stratégie de mobilisation des ressources en eau, la nouvelle confrontation besoins-ressources à l'horizon 2025 aux échelles stratégique et tactique devient :

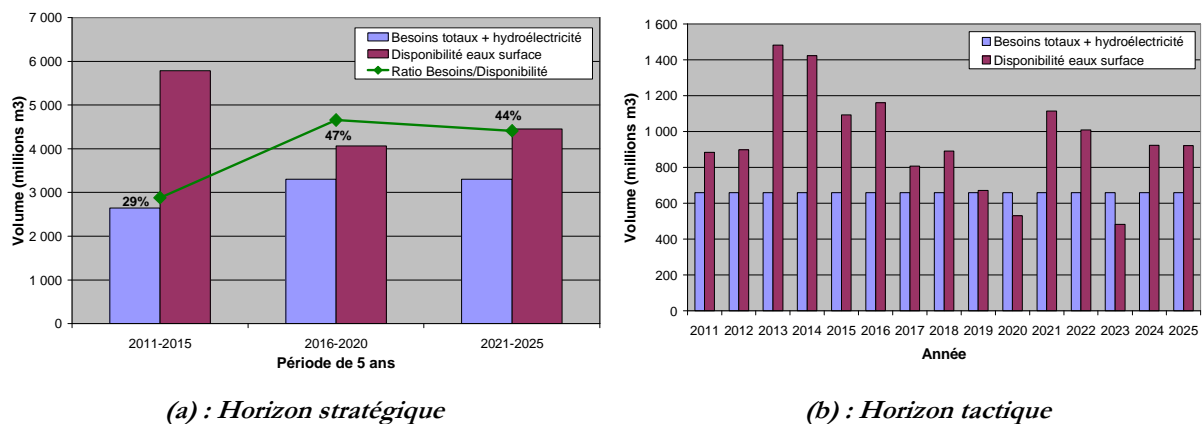


Figure 10- 18 : Nouvelle confrontation besoins-ressources en eau sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou

On remarque que :

- l'horizon stratégique (
- **Figure 10- 18a**) ne donne aucune alerte quant à la sécurité de la satisfaction de tous les besoins (y compris l'hydro-électricité) ; néanmoins, le ratio besoins/disponibilité ferait un bond significatif, passant de 29% au 1^{er} quinquennat à plus de 44% au cours des 2 derniers quinquennats ; **au cas où cette tendance se maintenait dans le temps, de graves problèmes de manque d'eau disponible naturellement pourraient se produire à l'issue d'une période d'égale durée, soit à partir de l'horizon 2040-2050** ; cette conclusion va dans le même sens que celles d'une étude réalisée en 2001 avec des hypothèses très souples et simplificatrices de la situation nationale, qui indiquait déjà que globalement le Bénin connaîtrait une situation de pénurie d'eau quasi-générale et permanente à l'horizon 2050 et qu'à l'horizon 2025, la situation serait une pénurie d'eau occasionnelle et locale (Azonsi F. and Dépraëtère C., 2001) ;
- l'horizon tactique (
- **Figure 10- 18b**) prévient que des situations limites ou d'insuffisances seraient à affronter en 2019, 2020 et 2023 ; à cet effet, il serait obligatoire d'anticiper, dès maintenant, les dispositions techniques et réglementaires qui permettraient de mieux gérer les crises annoncées (cf. Section suivante).

10.3.3 Gestion technique par allocation des ressources en eau

En matière de gestion des ressources en eau, on doit définir des critères ou des indicateurs, sur la base desquels seront orientées les décisions à prendre. Les éléments présentés dans la suite peuvent être intégrés ultérieurement dans un outil d'aide à la décision.

Pour le présent exercice, nous proposons un **indicateur qui révèle la confrontation besoins/disponibilité**. Il s'agit en fait d'un taux de sécurité, exprimé en % et défini comme suit :

$$\text{Taux de sécurité (\%)} = \frac{\text{Disponibilité} - \text{Besoins}}{\text{Besoins}} \times 100 \quad (\text{éq. 10- 1})$$

Ainsi, un taux de sécurité négatif indique que la disponibilité est inférieure aux besoins, et qu'on est, par conséquent, dans une situation d'insuffisance ; contrairement à un taux positif qui indique que la disponibilité est suffisante pour couvrir les besoins. Néanmoins, lorsqu'on a un taux positif, les règles de gestion ne devraient pas être les mêmes selon que ce taux soit fort (grande marge) ou faible (petite marge). De ce fait, le système d'alerte suivant, associé aux valeurs du taux de sécurité, peut être adopté :



Figure 10- 19 : Définition des niveaux d'alerte pour la gestion technique des ressources en eau

Dans la suite, les règles à établir et les dispositions à prendre seront préconisées en fonction du seuil d'alerte dans lequel se retrouve chaque période stratégique ou tactique.

10.3.3.1 Gestion stratégique

La gestion stratégique consiste à établir les mesures (règles ou dispositions) qui définissent les allocations quinquennales (ou décennales) des ressources en eau en vue de faire face aux besoins estimés (GWP/RIOB., 2009, Le Goulven P., 2009). Elle doit être centralisée (au niveau national) mais la participation des différents acteurs ou parties prenantes du bassin doit être garantie.

Le *Tableau 10- 1* résume les mesures de gestion stratégique préconisées. Pour appliquer ce tableau, le taux de sécurité stratégique sur la période 2011-2025 est présenté à la *Figure 10- 20*.

Tableau 10- 1 : Mesures de gestion stratégique préconisées en fonction du niveau d'alerte

Niveau d'alerte	Mesures à prendre
Vert (TSs*>25%)	Pas de mesures spéciales, sinon mesures conservatoires sous forme de sensibilisation
Jaune (10%<TSs<25%)	Js1- Mettre en place dès le quinquennat précédent, un Comité de veille climatique, chargé de surveiller de près l'évolution des données climatiques ; Js2- Réaliser dès le quinquennat précédent, des études approfondies des impacts de l'évolution des états de surface (utilisation des terres, couverture du sol) sur la disponibilité en eau ; Js3- Mettre en place les programmes appropriés pour « réguler/contrôler/maîtriser les utilisations des terres, et encourager les économies d'eau » au moins 2 ans avant le début du quinquennat classé « jaune » et pendant toute la durée de celui-ci.
Orange (0%<TSs<10%)	Os1- Appliquer/maintenir les mesures du niveau d'alerte jaune dès le quinquennat précédent; Os2- Promouvoir la restriction (non pas interdire) des usages non essentiels**, en utilisant les moyens légaux pacifiques appropriés (redevances, taxes etc...), et ce, dès la fin du quinquennat précédent et pendant le quinquennat classé « orange ».
Rouge (TSs<0%)	Rs1- Appliquer/maintenir les mesures du niveau d'alerte orange dès le quinquennat précédent ; Rs2- Interdire dès la fin du quinquennat précédent, les usages non essentiels, en utilisant les moyens légaux pacifiques et de force si nécessaire ; Rs3- Sécuriser les usages vitaux en eau potable en première priorité ; et, interdire/restreindre les usages productifs conséquemment le cas échéant ; Rs4- Restreindre (en utilisant les moyens légaux pacifiques et de force si nécessaire) les usages productifs proportionnellement à la disponibilité de l'eau à eux accordée, en imposant un coefficient maximum de satisfaction à respecter.
Mesure à long terme (25 à 50 ans)	Lorsque les niveaux d'alerte quinquennaux « orange » et « rouge » sont très fréquents dans une période de 25 à 50 ans, et que leur occurrence tend à devenir structurelle, il convient de décider de la réalisation d'ouvrages structurants de mobilisation (barrages) de grande capacité, supérieure au volume moyen annuel disponible, en vue de réaliser des stocks qui seraient utiles pour les années suivantes.

* : TSs= Taux de sécurité stratégique

** : Usages non essentiels = tout autre usage à l'exception des besoins vitaux en eau potable et pour la production (agriculture et industrie).

On aperçoit ainsi, l'occurrence d'une alerte jaune sur la période 2016-2020. En conséquence, **nous conseillerions aux autorités compétentes en matière des ressources en eau (Conseil National de l'Eau intégrant les représentants de tous les acteurs du secteur de l'eau et des secteurs connexes), en premier lieu, le Ministre en charge de l'Eau, de décider le déclenchement des mesures appropriées Js1 à Js3, telles que décrites dans le Tableau 10- 1.** Il n'y aurait donc pas de restriction ou d'interdiction d'usages à envisager d'ici 2025, sous réserve que la gestion tactique n'en impose.

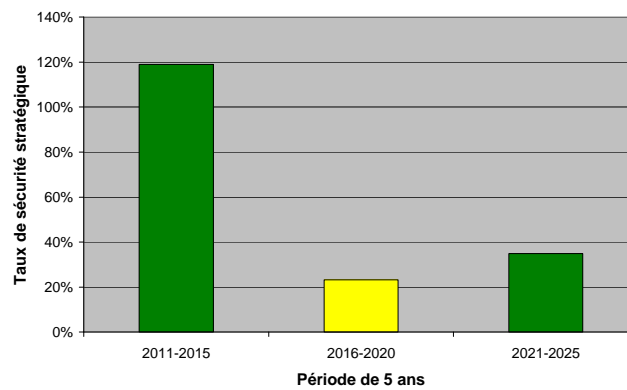


Figure 10- 20 : Taux quinquennaux de sécurité stratégique et niveaux d'alerte correspondants d'ici 2025 sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou

En matière de gestion stratégique, si tout se passait comme supposé, on devrait donc déclencher les mesures suivantes dès maintenant :

- **Js1 : la mise en place d'un Comité de veille climatique, chargé de surveiller de près l'évolution des données climatiques d'ici à 2020 au moins ;**
- **Js2 : la réalisation d'études approfondies des impacts de l'évolution des états de surface (utilisation des terres, couverture du sol) sur la disponibilité en eau avec divers scénarios à considérer ;**
- **Js3 : la mise en place de projets dès 2013, d'une part, pour promouvoir les méthodes d'utilisation des terres qui favorisent une plus grande disponibilité en eau (de surface notamment) dans le bassin ; et, d'autre part, pour sensibiliser les populations et promouvoir les économies d'eau au cours des différents usages sur le bassin.**

10.3.3.2 Gestion tactique

A l'image de la gestion stratégique, la gestion tactique consiste à établir les mesures (règles ou dispositions) qui définissent les allocations annuelles (ou mensuelles) des ressources en eau en vue de faire face aux besoins estimés (GWP/RIOB., 2009, Le Goulven P., 2009). Elle doit être décentralisée (au niveau du Comité de Bassin ou de toute autre instance compétente qui regroupe l'ensemble des acteurs du bassin).

En matière de gestion tactique, les règles ou mesures de gestion suivantes sont préconisées :

Tableau 10- 2 : Mesures de gestion tactique préconisées en fonction du niveau d'alerte

Niveau d'alerte	Mesures à prendre
Vert (TSt* > 25%)	Pas de mesures spéciales, sinon mesures conservatoires sous forme de sensibilisation
Jaune (10% < TSt < 25%)	Jt1- Mettre en place des actions de sensibilisation aux économies d'eau dès l'année précédente ; Jt2- Promouvoir la restriction (non pas interdire) des usages non essentiels, en utilisant les moyens légaux pacifiques appropriés (redevances, taxes etc...), et ce, dès l'année précédente et pendant l'année classée « Jaune ».
Orange (0% < TSt < 10%)	Ot1- Appliquer/maintenir les mesures du niveau d'alerte jaune dès l'année précédente ; Ot2- Interdire dès l'année précédente, les usages non essentiels, en utilisant les moyens légaux pacifiques et de force si nécessaire.
Rouge (TSt < 0%)	Rt1- Appliquer/maintenir les mesures du niveau d'alerte orange dès l'année précédente (notamment interdiction des usages non essentiels) ; Rt2- Sécuriser les usages vitaux en eau potable en première priorité ; et, interdire/restreindre les usages productifs conséquemment le cas échéant ; Rt3- Restreindre (en utilisant les moyens légaux pacifiques et de force si nécessaire) les usages productifs proportionnellement à la disponibilité de l'eau à eux accordée, en imposant un coefficient maximum de satisfaction à respecter (inférieur ou égal au coefficient équivalent fixé en gestion stratégique le cas échéant).
Mesure à moyen terme (5 à 10 ans)	Lorsque les niveaux d'alerte annuels « orange » et « rouge » sont très fréquents dans une période de 5 à 10 ans, et que leur occurrence tend à devenir structurelle, il convient de mettre en place des programmes d'économie d'eau basés une utilisation pluriannuelle des volumes mobilisés annuellement, en définissant des règles adéquates de fonctionnement et de gestion des ouvrages de mobilisation.

* : TSt= Taux de sécurité tactique

** : usages non essentiels = tout autre usage à l'exception des besoins vitaux en eau potable et productifs (agriculture et industrie)

Pour appliquer ce tableau, le taux de sécurité tactique sur la période 2011-2025 est présenté à la figure suivante :



Figure 10- 21 : Taux annuels de sécurité tactique et niveaux d'alerte correspondants d'ici 2025 sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou

On observe ainsi :

- 2 années en alerte rouge (2020 et 2023) ;
- 1 année en alerte orange (2019) ;
- 1 année en alerte jaune (2017) et ;
- les autres 11 années en alerte verte.

L'application du *Tableau 10- 2* permet de prendre les mesures suivantes, dont l'application ne requiert aucune urgence :

- **Jt1 : Mettre en place des actions de sensibilisation aux économies d'eau entre 2016 et 2023 ;**
- **Jt2 : Promouvoir la restriction des usages non essentiels, en utilisant les moyens légaux pacifiques appropriés (redevances, taxes etc...) entre 2016 et 2023 ;**
- **Ot2 : Interdire les usages non essentiels, en utilisant les moyens légaux pacifiques et de force si nécessaire entre 2018 et 2020, puis entre 2022 et 2023 ;**
- **Rt2 : Satisfaire en première priorité les usages vitaux en eau potable en 2020 et 2023;**
- **Rt3 : Satisfaire, une partie des besoins productifs en imposant un coefficient maximum de satisfaction de 76% (=rapport entre disponibilité hors eaux potables et besoins productifs) en 2020, et de 68% en 2023.**

A l'échelle mensuelle, nous avons précédemment constaté que la baisse globale de disponibilité des ressources en eau de surface à partir de 2016, serait essentiellement due à des réductions sensibles des apports du cours d'eau pendant les mois les plus productifs en eau, notamment entre août et octobre (cf.

Figure 10- 3 à la page 262). A cet effet, il conviendrait d'ajouter une mesure supplémentaire à celles envisagées, qui consisterait à **mettre en place des modèles de prévision saisonnière météorologique (notamment pluviométrique) et hydrologique couplés à des modèles de gestion des barrages en temps réel, afin de mieux équilibrer la satisfaction des besoins selon les apports au cours de la gestion opérationnelle (au pas hebdomadaire ou journalier).**

10.4 Mesures d'ordre général et recommandations

10.4.1 **Mesures d'accompagnement**

L'option « eaux de surface en exclusivité » impose de mettre en place certaines mesures destinées à préserver la qualité des eaux naturelles, voire leur quantité. Parmi celles-ci, il convient de mettre l'accent sur les aspects suivants :

- La **prise en compte des aspects environnementaux complémentaires**, notamment la mise en place de mesures de protection [périmètre de protection immédiat, rapproché et éloigné (MEE/DG-Eau, 2010)], de conservation et de restauration des eaux et des sols, la réglementation des pratiques agricoles en vue de limiter/réduire l'érosion sur le bassin [l'érosion moyenne sur le bassin de la Térou a été évaluée à 5 tonnes/ha/an (Sintondji L. O., 2005) et sur le bassin de l'Ouémé à Savè à 4 tonnes/ha/an (Ahouansou D. M. M., 2008)] et l'instauration de périmètres de protection des zones de captage (PEP., 2010).
- La **réglementation de l'utilisation à grande échelle des produits chimiques**, notamment les engrais agricoles et les pesticides (herbicides, fongicides etc...) en vue de préserver la qualité des eaux naturelles (CENAGREF, 2004).
- La **réutilisation progressive des eaux usées domestiques en agriculture**, en vue d'améliorer les coefficients de satisfaction des usages productifs dans les années de pointe ou d'insuffisance de l'eau naturelle.
- La **maîtrise de l'aménagement de leurs territoires respectifs par les autorités communales**, surtout en ce qui concerne l'assainissement et la protection de l'environnement en vue de garantir une eau de surface de bonne qualité pour être utilisée sans beaucoup de charges.

A coté de ces mesures d'accompagnement, il y a nécessité que **la mise en place et surtout le fonctionnement du nouveau cadre institutionnel réglementant la gestion de l'eau au Bénin soient effectifs, avec les moyens humains, matériels, techniques et financiers adéquats** ; car les aspects évoqués dans ce Chapitre interpellent des missions et attributions dévolues aux futurs organes ou structures prévus par la nouvelle loi sur la gestion de l'eau à savoir l'Agence Nationale de l'Eau, le Fonds National de l'Eau, le Conseil national de l'Eau et le Comité de Bassin (cf. Annexe 1) avec l'implication évidente des communes riveraines. Particulièrement, il faut insister sur la mise en place du Comité de Bassin de l'Ouémé, car à

l'intérieur du dispositif national prévu, c'est de ce Comité que relève logiquement la gestion et la mise en valeur des ressources en eau dudit bassin.

Aussi, est-il important de rappeler la **nécessité d'une volonté politique claire et ferme, pour une maîtrise des eaux à des fins agricoles et pour la mécanisation, assortie d'une politique commerciale subséquente et d'une organisation conséquente des filières agricoles ?**

10.4.2 Précautions à prendre

Au titre des précautions à prendre, il faut essentiellement veiller à ce que des études détaillées préalables précisent le coût économique des différentes mesures et/ou options de mobilisation et de gestion préconisées ici, afin de s'assurer de l'efficacité économique, sociale et environnementale des actions à entreprendre (équilibre entre l'investissement réalisé et la satisfaction recherchée), telle que prescrite par la GIRE au titre de ses critères fondamentaux.

A cet effet, une étude d'impact environnemental (EIE) devra être réalisée et ses recommandations traduites en réalité dans le cadre de l'aménagement global du bassin. Aussi, à côté du volet environnemental, les conséquences négatives de l'aménagement d'un barrage ne sont pas négligeables au plan social et des actions devront être conçues et menées aux fins d'obtenir l'acceptation sociale du projet par l'adhésion des riverains amont et aval.

10.4.3 Limites à considérer

L'étude réalisée dans le présent Chapitre n'est pas parfaite. C'est un exercice qui comporte des limites qu'il convient de rappeler :

- Il est connu que les barrages ont des impacts sur le régime hydrologique des cours d'eau (Sambou S. *et al.*, 2009), néanmoins **les débits écologiques requis en aval, ainsi que l'ensablement par érosion des barrages proposés ne sont pas pris en compte dans le présent Chapitre** ; ils doivent être pris en compte dans le dimensionnement et le fonctionnement de ces ouvrages de mobilisation au cours des études détaillées, et les résultats pourraient alors différer sensiblement de ceux obtenus ici ; de même, **la qualité de l'eau des barrages envisagés n'est pas étudiée ici**, et il serait indispensable que lesdites études détaillées prennent en compte cette question, notamment en modélisant les flux de solutés hydrochimiques liés aux engrais agricoles,

rejets industriels et autres fertilisants couramment utilisés dans le bassin ; dans tous les cas, les mesures mises en application doivent respecter un des critères fondamentaux de la GIRE qu'est la durabilité environnementale ;

- **l'horizon 2025 (dans 15 ans) est assez court pour une gestion stratégique et un schéma de mobilisation à long terme, généralement un horizon de 25 à 50 est requis ; de même, l'étendue spatiale n'est pas appropriée, car la gestion stratégique doit s'opérer à une échelle géopolitique double qui est celle de l'ensemble hydrographique entier et du pays (GWP/RIOB., 2009, Le Goulven P., 2009); la gestion stratégique doit normalement prendre en compte à la fois les eaux de surface et les eaux souterraines, dans la mesure où il est possible de les évaluer ;**
- la validité sur une période plus sèche (2016-2025) des évaluations de ressources en eau à partir d'un modèle hydrologique adapté en période plus humide 1997-2006 n'est pas assurée (Vodounnon J., 2008), si bien que les évaluations faites ici pourraient être sensiblement différentes lorsque le modèle serait repris sur la période actuellement en cours ;
- les incertitudes sur les évaluations sont généralement grandissantes lorsque l'horizon de projection s'éloigne, c'est-à-dire que les évaluations des années lointaines doivent être considérées avec moins de rigueur que celles des présentes années ;
- les estimations hydrologiques sont très dépendantes des estimations climatiques pour lesquelles, actuellement les scénarios (ou modèles) divergent (cf. Section 10.1), les uns vers une hausse et les autres vers une baisse des précipitations (GIEC, 2007) même si la tendance à l'augmentation des températures est unanimement prédite par les différents travaux (Azonsi F. and Dépraète C., 2001, Götzinger J. and Bardossy A., 2006, GIEC, 2007); et en l'occurrence on devrait travailler en multi-scénarios et en multi-modèles pour obtenir une idée plus sûre de la réalité future.

10.4.4 Recommandation particulière

Il est à recommander que les résultats du présent Chapitre, soient pris en compte dans l'élaboration en cours du Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) du bassin de l'Ouémé par le Groupement de Cabinets d'étude STUDI-International/SETEM-Bénin. A cet effet, l'étude du SDAGE devra être plus complète et

approfondie d'une part (en prenant en compte les mesures d'accompagnement identifiées et les précautions signalées ici), et d'autre part, elle devra aller au-delà des limites de l'exercice réalisé ici et qui peut, d'ores et déjà, être considéré comme une contribution directe à un Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) du sous-bassin de l'Ouémé à Bétérou.

CONCLUSION

Dans la troisième et dernière partie de ce document, nous avons analysé et discuté les résultats du modèle hydrologique Topamma mis en œuvre sur l'Ouémé à Bétérou sur la période 1997-2006. L'approche de modélisation utilisée a permis de retenir un lot final de 94 jeux sélectionnés dans l'espace des paramètres constitué de 17.745 jeux. Cette sélection s'est appuyée sur trois (3) critères dont deux de biais (Vol et Qmax) et un de dynamique (Nash). La pertinence de l'utilisation du critère Nash pour mieux discriminer les jeux finaux a été démontrée, mais il n'apparaît pas dans cette étude, une telle pertinence pour l'utilisation du critère Qmax. Si les valeurs idéales des critères de biais (biais nuls) ont été observées pour certaines simulations, les valeurs optimales du critère Nash sont restées entre 89 et 91% sur la période d'étude. Toutefois, comme le but de départ n'était pas la recherche d'une simulation ou d'un jeu de paramètre optimal, mais plutôt de simulations raisonnables, le seuil minimal admissible pour le critère Nash a été fixé à 87% en s'appuyant sur le nombre de jeux finaux désiré (une centaine). Au pas annuel, les valeurs de Nash évoluent tout de même de 74 à 95% et celles du critère de biais sur le volume de -23 à +47% en calage. Ces valeurs du critère Vol témoignent de la forte compensation qui existe entre les années tout en respectant un biais moyen compris entre -10 et +10%. En validation, ces valeurs sont respectivement de 88% et 93% pour le critère Nash, 25% et 2% pour le critère Vol.

S'agissant du réalisme des simulations du modèle, les coefficients d'exfiltration simulés par le modèle sont assez proches de ceux sur les observations. Mais, il n'a pas été évident de répondre en ce qui concerne le réalisme de simulation de l'ETR, dans la mesure où la seule série d'ETR observée dont on dispose est mesurée sur un couvert végétal particulier (jachère) non représentatif de la végétation du bassin. Néanmoins, il a été possible de conclure que la recharge des nappes d'altérite telle simulée par Topamma n'est pas réaliste au vu de la dynamique observée des niveaux piézométriques, à moins d'admettre une diminution de la valeur de porosité de drainage des nappes de 5% à 0,1% ; ce qui paraît peu vraisemblable.

De l'analyse approfondie des simulations, il ressort que le développement d'une nouvelle version du modèle Topamma, qui améliorerait les performances en début de saison, devrait s'appuyer sur une prise en compte de l'hydrodynamique et de l'occupation des sols, notamment leurs variations respectives dans le temps et l'espace. Ce qui rendrait plus complexe ou trop sophistiqué le modèle, qui deviendrait plus gourmand en données et en temps de calcul.

Le calcul du bilan hydrologique a montré que l'ETR représente 53% des précipitations, tandis que la recharge des nappes 33% et les écoulements 14% sur la décennie d'étude (1997-2006). Les chiffres varient d'une année à l'autre, mais sont compris entre 46 et 60% pour l'ETR, 29 et 36% pour la recharge, et 9 et 21% pour les écoulements.

L'analyse des relations pluie-débit et de la variabilité hydro-pluviométrique montre que le modèle reproduit de façon globalement satisfaisante, les dynamiques interannuelles observées ; mais les facteurs d'amplification des extrêmes pluviométriques (déficit ou excédent) par le système hydrologique sont généralement supérieurs par rapport aux valeurs observées.

Les analyses de sensibilité ont révélé que le modèle global Topamma est bien sensible à une répartition spatiale singulière des précipitations, et ses performances seraient bien améliorées si la variabilité spatiale de la pluviométrie y était prise en compte (n°Topamma). Aussi, a-t-il été diagnostiqué que le profil mathématique de prélèvement d'ETR dans la zone de sub-surface serait pour beaucoup dans la sous-estimation de l'ETR dans le bilan, et en conséquence, une consultation entre modélisateurs et utilisateurs s'impose pour fixer un profil convenable à tous. Il a été aussi montré que le modèle hydrologique Topamma est plus sensible à la variabilité interannuelle (conditions sèches ou humides) qu'à la dynamique saisonnière des pluies.

Dans l'exercice d'application à la GIRE sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou, on s'est aperçu que les besoins hydroélectriques initiaux sont surestimés par rapport à la récession des écoulements d'ici à 2025. Mais, il y a suffisamment de ressources pour satisfaire l'ensemble des autres besoins (eau domestique, irrigation, élevage et industrie). Le scénario d'aménagement préconisé est la construction d'un barrage hydroélectrique multi-fonctions sur l'Ouémé à Bétérou, et de deux (2) petits barrages sur des affluents au nord du bassin pour couvrir les besoins des communes périphériques. Avec les règles de gestion stratégique proposées, on anticipe sur une situation d'alerte jaune entre 2016-2020, c'est-à-dire que la disponibilité en eau sera supérieure aux besoins en eau seulement de 10 à 25% de ces derniers. Dans la gestion tactique, on aperçoit 2 années (2020 et 2023) en alerte rouge (disponibilité inférieure aux besoins), 1 année (2019) en alerte orange (disponibilité supérieure aux besoins de moins de 10% de ces derniers) et 1 année en alerte jaune (2017). A cet effet, des solutions ont été proposées pour anticiper convenablement ces situations critiques annoncées.

« Il y a toujours beaucoup à faire, mais jamais trop pour ne pouvoir être fait. »

24/07/2011

CONCLUSION GENERALE

« Tout est bien qui finit bien »

CONCLUSION GENERALE

Au Bénin, le secteur de l'eau est à l'heure de la GIRE avec l'adoption de deux instruments majeurs de planification (Politique Nationale de l'Eau et Loi portant gestion de l'eau en République du Bénin). En attendant l'adoption du Plan d'Actions National (PAN-GIRE) qui constitue la prochaine étape, ces éléments témoignent de l'importance croissante de l'eau dans les préoccupations nationales. La réussite de la GIRE n'est cependant possible que si l'on connaît la dynamique et la disponibilité des ressources en eau à toute échelle de temps et d'espace. Les projets internationaux OUEME-2025 et AMMA-CATCH intègrent cette question dans leurs préoccupations, et ont servi de cadre à la présente thèse.

La première partie du présent document a permis de caractériser physiquement le bassin d'étude et de décrire son milieu socio-économique.

La deuxième partie a permis de faire une synthèse bibliographique des principales connaissances disponibles sur notre bassin en matière de modélisation des ressources en eau. Les données observées montrent qu'il existe une forte variabilité spatio-temporelle des paramètres hydrométéorologiques tant à l'échelle saisonnière qu'à l'échelle interannuelle. Elles indiquent aussi une relation non linéaire entre pluviométrie et écoulement, et les situations pluviométriques extrêmes (déficitaires ou excédentaires) sont amplifiées par le système hydrologique du bassin. Ces réalités sont reproduites par le modèle hydrologique Topamma. La démarche méthodologique de modélisation spécialement développée dans le cadre de cette étude repose sur un nombre très réduit de décisions arbitraires, contrairement aux habitudes en la matière. Nous avons visé en fait une paramétrisation du modèle qui fournit des résultats acceptables pour de bonnes raisons, et non un modèle peu contraint qui donnerait les meilleurs résultats possibles sans raison connue.

Dans la troisième et dernière partie de ce document, les résultats du modèle hydrologique Topamma mis en œuvre sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou et sur la période 1997-2006 ont été présentés, analysés et discutés. L'approche de modélisation développée a conduit à un lot final de 94 jeux sélectionnés dans l'espace des paramètres constitué de 17.745 jeux. Cette sélection s'est appuyée sur trois (3) critères successifs dont deux de biais (sur le volume et le débit de pic) et un de dynamique (l'efficacité de Nash). La pertinence de l'utilisation du critère Nash en 3^{ème} niveau de sélection pour mieux discriminer les jeux finaux a été démontrée, mais il n'apparaît dans nos résultats, une telle pertinence pour l'utilisation du critère Qmax. Si les valeurs idéales des critères

de biais (biais nuls) ont été observées pour certaines simulations, les valeurs optimales du critère Nash sont restées entre 89 et 91% sur la période d'étude. Toutefois, comme le but de départ n'était pas la recherche d'une simulation ou d'un jeu de paramètre optimal, mais plutôt de simulations raisonnables, le seuil minimal admissible pour le critère Nash a été de 87% en fixant le nombre de jeux finaux désiré à une centaine dans notre cas. Au pas annuel, les valeurs du critère Nash évoluent tout de même de 74 à 95% et celles du critère de biais sur le volume de -23 à +47% en calage. Ces valeurs du critère Vol témoignent ainsi de la forte compensation qui existe entre les années dans la mesure où un biais interannuel moyen compris entre $\pm 10\%$ était imposé. En validation, ces valeurs sont respectivement de 88% et 93% pour le critère Nash, 25% et 2% pour le critère Vol.

S'agissant du réalisme des simulations du modèle, les coefficients d'exfiltration de débit de sub-surface simulés par le modèle sont assez proches de ceux calculés sur les observations. Mais, il n'a pas été évident de répondre en ce qui concerne le réalisme de simulation de l'ETR, dans la mesure où la seule série d'ETR observée dont on dispose est mesurée sur un couvert végétal particulier (jachère) non représentatif de la végétation du bassin. Cependant, il a été possible de conclure que la recharge des nappes d'altérite telle simulée par Topamma n'est pas réaliste au vu de la dynamique observée des niveaux piézométriques, sous réserve d'admettre la valeur de porosité de drainage des nappes à 5%. De l'analyse approfondie des simulations, il ressort que le développement d'une nouvelle version du modèle Topamma, qui améliorerait les performances en début de saison, devrait s'appuyer sur une prise en compte de l'hydrodynamique et de l'occupation des sols, notamment leurs variations respectives dans le temps et l'espace. Ce qui rendrait plus complexe ou trop sophistiqué et moins attrayant le modèle, car il deviendrait plus gourmand en données et en temps de calcul.

L'évaluation du bilan hydrologique a montré que l'ETR représente 53% des précipitations, tandis que la recharge des nappes 33% et les écoulements 14% sur la décennie d'étude (1997-2006). L'incertitude de modélisation sur chacun de ces termes du bilan hydrologique décennal ne dépassent pas ± 1 à 2% ; néanmoins, les termes varient sensiblement d'une année à l'autre, et sont compris entre 46 et 60% pour l'ETR, 29 et 36% pour la recharge, et 9 et 21% pour les écoulements. L'analyse des relations pluie-débit et de la variabilité hydro-pluviométrique montre que le modèle reproduit de façon globalement satisfaisante, les dynamiques interannuelles observées ; mais les facteurs d'amplification des extrêmes pluviométriques (déficit ou excédent) par le système hydrologique sont généralement supérieurs par rapport aux valeurs observées. Les analyses de sensibilité ont révélé que le modèle global

Topamma est bien sensible à une répartition spatiale singulière des précipitations, et ses performances seraient bien améliorées si la variabilité spatiale de la pluviométrie y était prise en compte (n°Topamma). Aussi, a-t-il été diagnostiqué que le profil mathématique de prélèvement d'ETR dans la zone de sub-surface serait pour beaucoup dans la sous-estimation de l'ETR dans le bilan, et en conséquence, une consultation entre modélisateurs et utilisateurs s'impose pour fixer un profil plus convenable. Il a été aussi montré que le modèle hydrologique Topamma est plus sensible à la variabilité interannuelle (conditions sèches ou humides) qu'à la dynamique saisonnière des pluies.

Dans l'exercice d'application à la GIRE sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou, on s'est aperçu que les besoins hydroélectriques initiaux étaient surestimés par rapport à la récession des écoulements d'ici 2025. Malgré la baisse annoncée de 41% de la disponibilité moyenne annuelle des ressources en eau d'ici 2025, il y aura suffisamment de ressources pour satisfaire l'ensemble des autres besoins (eau domestique, irrigation, élevage et industrie) estimés à 67 millions m³ par an pour les 10 communes du bassin. Le ratio besoins/disponibilité évoluerait de 29% actuellement à plus de 44% à l'horizon 2025. Le scénario d'aménagement préconisé est la construction d'un barrage hydroélectrique multi-fonctions sur l'Ouémé à Bétérou, et de deux (2) petits barrages sur des affluents au nord du bassin pour couvrir les besoins des communes périphériques. Avec les règles de gestion stratégique proposées, on anticipe sur une situation d'alerte jaune entre 2016-2020, c'est-à-dire que la disponibilité en eau sera supérieure aux besoins en eau seulement de 10 à 25% de ces derniers. Dans la gestion tactique, l'évolution du taux de sécurité proposé laisse entrevoir une alerte rouge en 2020 et 2023 (disponibilité inférieure aux besoins), une alerte orange en 2019 (disponibilité supérieure aux besoins de moins de 10% de ces derniers) et une alerte jaune en 2017. A cet effet, des solutions ont été proposées aux Autorités concernées pour anticiper convenablement dans la gestion de ces situations critiques annoncées.

Utilisée dans le cadre d'une prospective à long terme, la GIRE permet d'anticiper les problèmes globaux ce qui n'est pas le cas des approches sectorielles. En matière de prospective, l'agronome raisonne en terme de surfaces potentiellement irrigables, l'ingénieur en énergétique pense en terme de kWh pouvant être générés par les barrages hydroélectriques, l'urbaniste planifie les stratégies d'exploitation des eaux de surface et souterraine afin de parvenir à alimenter les villes, etc. Toutefois une telle démarche prospective globale suppose une connaissance des ressources en particulier en terme de variabilité. Ces préalables sont rarement atteints en Afrique de l'Ouest où les besoins sont pourtant considérable.

Ici, on retiendra qu'au terme de cette thèse, les objectifs scientifiques fixés au départ ont été atteints :

- le cycle hydrologique continental à l'échelle de l'Ouémé à Bétérou a été analysé et ses différentes composantes identifiées et quantifiées ; aussi la variabilité spatio-temporelle des écoulements en réponse à la variabilité pluviométrique observée a été appréciée ;
- le cycle hydrologique du bassin de l'Ouémé à Bétérou a été modélisé (Topamma) sur une période récente contrastée (présence d'années sèches et humides) de 10 ans (1997-2006), en prenant en compte les incertitudes connues sur les débits de référence dans l'évaluation globale des simulations et des performances du modèle ; le bilan hydrologique a également été évalué sur cette période décennale ;
- dans la mesure où cela s'avérait utile, des améliorations relatives à la formalisation des processus hydrologiques ont été proposées à l'issue de l'analyse de sensibilité qui a permis de diagnostiquer les faiblesses du modèle ; ce diagnostic a également permis d'en savoir plus sur la sensibilité du modèle à la variabilité spatiale et temporelle des précipitations ;
- les résultats scientifiques du modèle ont été appliqués pour la GIRE, notamment les scénarii de ressources produits par le modèle à l'horizon 2025 ; un schéma d'aménagement du bassin a été proposé, assorti des règles d'allocation et de gestion stratégique et tactique des ressources en eau.

Avec ces objectifs ainsi atteints, la question principale (cf. Introduction Générale) au cœur de notre thèse à savoir « **comment modéliser de façon raisonnable le cycle hydrologique du bassin en vue d'aboutir à une estimation cohérente des ressources en eau à planifier sur le long terme ?** » est donc résolue, du moins en ce qui concerne les eaux de surface. Mais en science, si l'on sait définir préalablement ce que l'on recherche, ce n'est qu'ultérieurement que l'on prend conscience de ce qu'on a trouvé, souvent bien différent de ce l'on recherchait. Il ne s'agit pas d'un égarement qui devrait decevoir, mais plutôt d'une réalité qui doit encourager à « toujours chercher » car on serait sûr de « toujours trouver ». D'ailleurs, avant la naissance de toutes les sciences contemporaines, n'était-il pas écrit²⁷ «...cherchez, vous trouverez... » ? A titre

²⁷ La Sainte Bible, Evangile Selon Saint Mathieu, Chapitre 7, Verset 7

d'illustration, en démarrant cette thèse, on avait fixé comme champ d'investigation « l'assimilation de données pour améliorer les performances du modèle » ; mais à l'arrivée il n'en a plus été question compte tenu des résultats du modèle et c'est plutôt le « diagnostic de ses résultats » qui a été privilégié. C'est dire qu'il reste encore à faire, tant pour nous-même que pour d'autres à qui nous proposons quelques recommandations.

« La force de vaincre se trouve dans la déception qu'on ressent là où on ne s'y attendait pas. »

13/08/2011

RECOMMANDATIONS

Au terme de ce travail de thèse, plusieurs recommandations peuvent être formulées.

D'abord, il convient de poursuivre la coopération technique au service de la pérennisation du suivi et de la connaissance des ressources en eau à travers les réseaux d'observation. L'expérience en cours sur la haute vallée de l'Ouémé au Bénin est historique, riche en enseignements et reproductible sur d'autres bassins du pays. Il serait utile que le partenariat DG-Eau/UAC/IRD soit pérennisé en faisant jouer à chaque partie son plein rôle eu égard à ses intérêts et missions. Aussi, importe-t-il d'insister sur le maintien du suivi à long terme des flux d'énergie à la surface afin de disposer de séries suffisamment longues de données réelles (ETR) pour mieux contraindre les modèles. De même, la conduite jusqu'au bout de l'expérimentation relative aux flux de sève est capitale pour apporter une meilleure connaissance de la dynamique souterraine difficilement accessible aux modèles. A ce sujet, un défi scientifique non encore relevé est le développement d'une modélisation hydrogéologique et géophysique des réservoirs souterrains sur l'OHVVO. Malgré que beaucoup de choses se font déjà et que d'autres manquent, le dispositif hydrométéorologique en place devrait être complété de façon bénéfique par un observatoire des données socio-économiques, car il n'y a point de GIRE sans connaissance et satisfaction des besoins sociaux et économiques en eau.

Ensuite, nous recommandons d'identifier pour chaque bassin du territoire national, un modèle approprié pour chaque type d'objectif (simulation de processus, prévision de crue et d'inondation, estimation de ressources etc...). Aussi, la mise en place d'un dispositif opérationnel fonctionnel qui permette d'actualiser idéalement tous les 5 ans les bases de données et modèles est recommandée. Elle permettra de toujours disposer d'outils actualisés et adaptés au contexte courant, et les scénarios de planification seraient alors plus précisés pour les horizons futurs les plus proches.

S'agissant de Topamma, il est à recommander l'utilisation préférentielle de la version semi-spatialisée du modèle (n°Topamma) lorsque les contraintes de temps de calcul et de disponibilité de données spatialisées sont levées. Cette préférence s'imposerait surtout dans les cas particuliers où les performances de la version globale actuelle (Topamma) s'avèrent peu satisfaisantes. Une consultation entre les modélisateurs et utilisateurs de Topamma serait bienvenue pour fixer la forme de prélèvement d'ETR à considérer dans la zone de subsurface.

L'exercice d'application à la GIRE réalisée dans cette étude sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou n'est pas parfait et doit être approfondi par des études spécifiques avant toute mise en oeuvre. L'horizon 2025 (dans 15 ans) est assez court pour une gestion stratégique et un schéma de mobilisation à long terme, généralement un horizon de 25 à 50 ans est requis. Mais, les incertitudes sur les évaluations sont généralement grandissantes lorsque l'horizon de projection s'éloigne, si bien que les évaluations des années lointaines doivent être considérées avec moins de rigueur que celles des présentes années. De même, l'étendue spatiale est peu appropriée, car la gestion stratégique devrait s'opérer à une échelle géopolitique double qui est celle de l'ensemble hydrographique entier et du pays. La gestion stratégique doit normalement prendre en compte à la fois les eaux de surface et les eaux souterraines, dans la mesure où il est possible de les évaluer.

Enfin, il est à recommander que les résultats obtenus ici soient pris en compte dans l'élaboration en cours du Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) du bassin de l'Ouémé.

PERSPECTIVES

Aucune œuvre humaine n'étant parfaite, ce travail souffre sans doute d'insuffisances sur lesquelles il convient de continuer à travailler.

Tout d'abord, pour tenter d'améliorer les simulations du modèle hydrologique Topamma tout en restant raisonnable, nous envisageons de relaxer la valeur du paramètre « d_0 » qui gouverne la taille de la zone non saturée et le rendre variable : en tenant compte du fait que les gros arbres (forêt) puisent plus loin pour leur transpiration, on peut considérer un d_0 variable dans l'espace mais statique dans le temps. Les données de NDVI peuvent alors renseigner sur le type de couvert (forêt, savane, jachère...) qu'on paramétriserait dans le modèle.

Nous envisageons également de tester l'approche de modélisation développée dans cette étude dans d'autres contextes (autres bassins/sous-bassins ou périodes). On pourrait aussi tester une variante de cette approche de modélisation qui consisterait à sélectionner les échantillons de période du calage sur la base des données d'ETP, ou encore prendre en compte tous les échantillons de période vraisemblables eu égard à l'incertitude sur les données observées.

Ensuite, l'analyse de sensibilité du modèle à la variabilité spatiale et temporelle des précipitations mérite d'être élargie à une période plus longue pour valider les conclusions obtenues ici. On envisage également de reprendre cette partie de l'étude avec d'autres modèles et d'autres forçages disponibles. Les estimations hydrologiques sont très dépendantes des estimations climatiques pour lesquelles, actuellement les scénarios (ou modèles) divergent, les uns vers une hausse et les autres vers une baisse des précipitations même si la tendance à l'augmentation des températures est unanimement prédite par les différents travaux ; et en l'occurrence, on pense à améliorer l'exercice d'application à la GIRE en travaillant en multi-scénarios/modèles.

Enfin, il est de notre devoir professionnel d'envisager la perspective très intéressante pour la DG-Eau, qui est de compiler et compléter les éléments d'application à la GIRE développés dans cette étude en outil d'aide à la décision.

« L'ambition légitime de l'élève, n'est-elle pas d'aller plus haut que son maître ? »

Et la satisfaction légitime du maître, n'est-elle pas de voir son élève plus haut que lui-même ? »

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [(Abbott M. B. and Refsgaard J. C., 1996)] Abbott M. B. and Refsgaard J. C. (1996), Distributed hydrological modelling; Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (Netherlands), 321p.
- [(Abdoulaye D., 2010)] Abdoulaye D. (2010), Impact de la dynamique des états de surface sur l'écoulement dans le sous-bassin de l'Ouémé à Bétérou; Mémoire de DEA, FLASH/UAC, Abomey-Calavi (Bénin), 88p.
- [(Adam K. S. and Boko M., 1993)] Adam K. S. and Boko M. (1993), Le Bénin; Les Editions du Flamboyant/EDICEF, ISBN: 2.850.69777.X, 96p.
- [(Adam S. I., 2005)] Adam S. I. (2005), Impact environnementaux de la gestion des aires de cultures dans la Commune de Banikoara; Mémoire de DEA, FLASH/UAC, Abomey-Calavi (Bénin), 86p.
- [(Afouda A. and Alamou E., 2009)] Afouda A. and Alamou E. (2009), Application de deux modèles hydrologiques au bassin de l'Ouémé à Bétérou : ModHyPMA et GR4J; Paper presented at the Conférence internationale IMPETUS « Concepts et outils pour une gestion durable des ressources en eau », 11-12 mars 2009, Cotonou (Bénin)
- [(Afouda A. et al., 2003)] Afouda A., Arjounin M., Boubkraoui S., Bouchez J-M., Depraète C., Le Barbé L. and Malinur F. (2003), OHHVO : Rapport de campagne Pluviométrie 2003; Projet AMMA-CATCH, ASECNA-DMN/DH/IRD/UNB, Bénin, 71p.
- [(Afouda A. et al., 2001a)] Afouda A., Arjounin M., Bouchez J-M., Boubkraoui S., Depraète C., Gohoungossou A., Malinur F. and Sacher W. (2001a), OHHVO : Rapport de campagne Pluviométrie 2001; Projet ORE AMMA-CATCH, ASECNA-DMN/DH/IRD/UNB, Bénin, 45p. + annexes.
- [(Afouda A. et al., 2002)] Afouda A., Arjounin M., Bouchez J-M., Boubkraoui S., Depraète C. and Malinur F. (2002), OHHVO : Rapport de campagne Pluviométrie 2002; Projet ORE AMMA-CATCH, ASECNA-DMN/DH/IRD/UNB, Bénin, 57p. + annexes.
- [(Afouda A. et al., 2001b)] Afouda A., Arjounin M., Bouchez J-M., Coste D., Depraète C., Dessouassi R., Gohoungossou A., Le Barbé L. and Sacher W. (2001b), OHHVO : Rapport de campagne 2000; Projet ORE AMMA-CATCH, ASECNA-DMN/DH/IRD/UNB, Bénin, 63p.
- [(Afouda E., 2006)] Afouda E. (2006), Evolution saisonnière des caractéristiques hydrodynamiques des horizons superficiels des sols en relation avec la végétation le long de trois toposéquences de végétations contrastées dans la Donga, Rapport de stage; OHHVO/Projet AMMA-CATCH, IRD, Cotonou (Bénin), 41p.
- [(Afrique Conseil, 2006a)] Afrique Conseil (2006a), Monographie de la Commune de Kouandé; Programme d'Appui au Démarrage des Communes, Mission de Décentralisation, Cotonou (Bénin), 50p.
- [(Afrique Conseil, 2006b)] Afrique Conseil (2006b), Monographie de la Commune de N'Dali; Programme d'Appui au Démarrage des Communes, Mission de Décentralisation, Cotonou (Bénin), 40p.
- [(Afrique Conseil, 2006c)] Afrique Conseil (2006c), Monographie de la Commune de Ouassa-Péhunco; Programme d'Appui au Démarrage des Communes, Mission de Décentralisation, Cotonou (Bénin), 48p.
- [(Afrique Conseil, 2006d)] Afrique Conseil (2006d), Monographie de la Commune de Tchaourou; Programme d'Appui au Démarrage des Communes, Mission de Décentralisation, Cotonou (Bénin), 45p.
- [(Agbidinoukoun A. S., 2011)] Agbidinoukoun A. S. (2011), Estimation des ressources en eaux superficielles à l'horizon 2025 dans l'Ouémé à Bétérou, Savè et le Zou à Atchéribé à l'aide des modèles GR2M et GR4J; Mémoire de Master, 2IE, Ouagadougou (Burkina Faso), 61p.

- [[Agbidinoukoun A. S. and Gbaguidi F., 2007]] Agbidinoukoun A. S. and Gbaguidi F. (2007), Gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) au Bénin : Apport quantitatif du bassin du Fleuve Ouémé; Mémoire d'Ingénieur, EPAC/UAC, Abomey-Calavi (Bénin), 80p.
- [[Ahouansou D. M. M., 2008]] Ahouansou D. M. M. (2008), Modélisation du bilan hydrologique du bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Savè : contribution à la gestion intégrée des ressources en eau; Thèse d'Ingénieur, FSA/UAC, Abomey-Calavi (Bénin), 112p.
- [[Akognongbé A., 2009]] Akognongbé A. (2009), Analyse hydrologique multi-échelle du bassin de l'Ouémé Supérieur : processus dominants à l'origine des écoulements; Mémoire de Master Recherche, HSM/UM2, Montpellier (France), 50p. + annexes.
- [[Akognongbé A. et al., 2008]] Akognongbé A., Vissin E., Zannou A. and Boko M. (2008), Vulnérabilité des ressources sur le bassin de l'Ouémé à Savè : étude climatique sur la période 1965-2002; in Proceedings of XXIème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC), Montpellier (France), pp. 79-85.
- [[Amoussou E., 2005]] Amoussou E. (2005), Variabilité hydroclimatique et dynamique des états de surface dans le bassin versant du Couffo; Mémoire de DEA, FLASH/UAC, Abomey-Calavi (Bénin), 105p.
- [[Assaba M., 2011]] Assaba M. (2011), Influence de la dynamique de l'occupation du sol sur les ressources en eau dans le sous-bassin de l'Ouémé à l'exutoire de Savè; Mémoire de DEA, FLASH/UAC, Abomey-Calavi (Bénin), 82p.
- [[Assouma K., 2009]] Assouma K. (2009), Etude de sécurisation de l'AEP de la ville de Parakou à partir des eaux de surface; Mémoire de DESS, CEFORP/UAC, Abomey-Calavi (Bénin), 64p.
- [[Assouma K. and Zannou A., 2011]] Assouma K. and Zannou A. (2011), Étude de sécurisation de l'AEP à partir des retenues d'eaux de surface de quelques villes sélectionnées dans le bassin de l'Ouémé; Rapport d'Etude du Projet OUEME-2025, DG-Eau/UAC/IRD, Cotonou (Bénin), 41p. + annexes.
- [[Atindogbé C., 2007]] Atindogbé C. (2007), Analyse de la composition chimique des eaux de surface sur les sous-bassins versants de l'Ouémé Supérieur : conséquences sur l'acquisition de la minéralisation et discrétisation de l'origine des eaux; Mémoire de DESS, FAST/UAC, Abomey-Calavi (Bénin), 96p.
- [[Avahounlin F., 2010]] Avahounlin F. (2010), Modélisation des étiages au Bénin; Mémoire de Master Recherche, Chaire UNESCO-CIPMA/FAST/UAC, Abomey-Calavi (Bénin), 46p. + annexes.
- [[Avahounlin F. and Fassinou E., 2007]] Avahounlin F. and Fassinou E. (2007), Contribution à l'élaboration d'une carte de faciès chimiques des eaux souterraines exploitées par la SONEB au Bénin; Mémoire de Maîtrise ès-sciences naturelles, FAST/UAC, Abomey-Calavi (Bénin), 64p. + annexes.
- [[Azonsi F. and Dépraète C., 2001]] Azonsi F. and Dépraète C. (2001), Aspects prospectifs généraux sur la gestion intégrée des ressources en eau au Bénin et quelques pays limitrophes; Paper presented at the Séminaire international PRELUDE (Programme de Recherche et de Liaisons Universitaires pour le Développement) sur « L'eau, patrimoine mondial commun : pratiques innovatrices locales et gouvernance, réalités statistiques, actions interculturelles et dynamiques socio-économiques », 15-19 Octobre 2001, Cotonou (Bénin)
- [[Ballouche A., 2004]] Ballouche A. (2004), L'« Aridification du paysage » en Afrique de l'Ouest à l'holocène récent. Changement climatique et/ou action anthropique?; in Proceedings of AIC Caen, pp. 113-115.
- [[Bapela L. et al., 2010]] Bapela L., Mwaka B., Cai R. and Maré H. G. (2010), Maximising hydro-power generation within a multi-user water supply system; in Proceedings of IAHS/UNESCO Kovacs Colloquium on Hydrocomplexity: New tools for solving wicked water problems, Paris (France), July 2010, pp. 226-227.

- [[Berne A. *et al.*, 2004]] Berne A., Delrieu G., Creutin J. D. and Obled C. (2004) Temporal and spatial resolution of rainfall measurements required for urban hydrology; *Journal of Hydrology* 299: 166-179.
- [[Bertrand-Krajewski J.-L. *et al.*, 2000]] Bertrand-Krajewski J.-L., Laplace D., Joannis C. and Chebbo G. (2000), *Mesures en hydrologie urbaine et assainissement*; TEC&DOC ed., Paris (France), ISBN: 2-7430-0380-4, 794p.
- [[Beven K., 1987]] Beven K. (1987) Towards the use of catchments geomorphology in flood frequency predictions; *Earth Surface processes and Landforms* 12: 69-82
- [[Beven K., 1989]] Beven K. (1989) Changing ideas in hydrology - The case of physically-based models; *Journal of Hydrology* 105,: 157-172
- [[Beven K., 1993]] Beven K. (1993) Prophecy, reality and uncertainties in distributed hydrological modelling; *Advances in Water Resources* 16: 41-51.
- [[Beven K. and Binley A. M., 1992]] Beven K. and Binley A. M. (1992) The future of distributed models : model calibration and uncertainty prediction; *Hydrological processes* 16: 189-206.
- [[Beven K. and Kirby M.J., 1979]] Beven K. and Kirby M.J. (1979) A physically-based variable contributing area model of basin hydrology; *Hydrological Science Bulletin* 24: 43-69.
- [[Beven K. *et al.*, 1984]] Beven K., Kirby M.J., Schofield N. and Tagg A. F. (1984) Testing a physically-based flood forecasting model (TopModel) for three U.K. catchments; *Journal of Hydrology* 69: 119-143
- [[Beven K. and Wood E. F., 1983]] Beven K. and Wood E. F. (1983) Catchment geomorphology and the dynamics of runoff contributing area; *Journal of Hydrology* 65: 139-158
- [[Bigot S. *et al.*, 2005]] Bigot S., Zin I. and Diedhiou A. (2005) Apport de données de HRV et de SPOT pour l'étude des variations phénologiques dans le bassin de l'Ouémé (Bénin); *Téledétection* 4: 339-353.
- [[Blaney H. F. and Criddle W. D., 1950]] Blaney H. F. and Criddle W. D. (1950), *Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data*; USDA (SCS), Washington DC (USA), vol 96, 48p.
- [[Blinda M. and Thivet G., 2009]] Blinda M. and Thivet G. (2009) Ressources et demandes en eau en Méditerranée : situation et perspectives; *Sécheresse* 20: 9-16 DOI: DOI: 10.1684/sec.2009.0162
- [[Bormann H. and Diekkrüger B., 2003]] Bormann H. and Diekkrüger B. (2003) Possibilities and limitations of regional hydrological models applied within an environmental change study in Benin (West Africa); *Phys Chem Earth* 28: 1323-1332
- [[Boubkraoui S. *et al.*, 2001]] Boubkraoui S., Bouchez J.-M., Coste D., Depaëtère C., Dessouassi R., Gohoungossou A., Le Barbé L. and Sacher W. (2001), OHHVO : Rapport de campagne 1999; *Projet CATCH, ASECNA-DMN/DH/IRD/UNB, Cotonou (Bénin)*, 51p.
- [[Bouchet R. J., 1963]] Bouchet R. J. (1963) Evaporation réelle et potentielle: signification climatique; *Proc Gen Assembly IASH, Berkeley (USA) Pub* 62: 134-142
- [[Bouchez J.-M. *et al.*, 2001a]] Bouchez J.-M., Depaëtère C., Dessouassi R., Durel F., Gohoungossou A., Le Barbé L., Onibon H. and Sacher W. (2001a), OHHVO: Rapport de campagne 1998; *Projet CATCH, ASECNA-DMN/DH/IRD/UNB, Cotonou (Bénin)*, 33p.
- [[Bouchez J.-M. *et al.*, 2001b]] Bouchez J.-M., Depaëtère C., Durel F., Gohoungossou A., Le Barbé L. and Onibon H. (2001b), OHHVO : Rapport de campagne 1997; *Projet CATCH, ASECNA-DMN/DH/IRD/UNB, Cotonou (Bénin)*, 44p.
- [[Bouchez J.-M. *et al.*, 2003]] Bouchez J.-M., Le Lay M., Arjounin M., Malinur F. and Galle S. (2003), OHHVO : Rapport de campagne Limnimétrie 2001; *Projet ORE AMMA-CATCH, DH/IRD, Cotonou/Bénin*, 40p.

- [[Brochet P. and Gerbier N., 1974]] Brochet P. and Gerbier N. (1974), L'évapotranspiration. Aspect agrométéorologique, évaluation pratique de l'évapotranspiration potentielle; Monographie de la Météorologie Nationale, Paris (France), Vol 65, 95p.
- [[Castaings W., 2007]] Castaings W. (2007), Analyses de sensibilité et estimation des paramètres pour la modélisation hydrologique distribuée; PhD, Université Joseph Fourier, 242p.
- [[CE/DGD/DGRECNS, 1999]] CE/DGD/DGRECNS (1999), Vers une gestion durable des ressources en eau : une approche stratégique; Commission Européenne, Direction Générale du Développement, Direction Générale des Relations Extérieures et de la Coopération Nord-Sud (CE/DGD/DGRECNS), office de publications officielles des communautés européennes, Luxembourg, -
- [[CEB, 1990]] CEB (1990), Etude de préféabilité du projet Kétou dans le cadre de l'aménagement optimal du fleuve Ouémé : Rapport d'Hydrologie ; réalisé par EDF/Coyne et Belier, 63p. + annexes.
- [[CENAGREF, 2004]] CENAGREF (2004), Etude de l'impact de l'utilisation des engrais chimiques et des pesticides par les populations riveraines sur les écosystèmes (eaux de surface, végétaux et faune) des Aires Protégées (Parcs Nationaux et Zones Cynégétiques) du Bénin; Rapport Final; réalisé par Soclo H., Azontondé H., Dovonon L., Djibril R., Sagbo A.; Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de la Pêche/Centre National de Gestion des Réserves de Faune, Cotonou (Bénin), 168p.
- [[Champeaux J. L. et al., 2000]] Champeaux J. L., Arcos D., Bazil E. and Girard D. (2000) AVHRR-derived vegetation mapping over western Europe for use in numerical weather prediction models; International of Remote Sensing 21: 1235-1249.
- [[Chevallier P., 1988]] Chevallier P. (1988) L'indice des précipitations antérieures : Evaluation de l'humectation des sols des bassins versants représentatifs; Cah ORSTOM, Ser Hydrol, Vol XX: 179-189
- [[Chevallier P., 1990]] Chevallier P. (1990), Complexité hydrologique du petit bassin versant. Exemple en savane humide, Booro Borotou (Côte d'Ivoire); ORSTOM Études et Thèses, Paris (France), 332p.
- [[Chevallier P. and Planchon O., 1993]] Chevallier P. and Planchon O. (1993) Hydrological processes in a small humid savanna basin (Ivory Coast); J Hydrol 151: 173-191.
- [[Christoph M. et al., 2010]] Christoph M., Fink A. H., Paeth H., Born K., Kerschgens M. and Piecha K. (2010) Climate scenarios. In: Speth P., Christoph M. and Dieckrüger B. (eds) Impacts of global change on the hydrological cycle in West and Northwest Africa:402-425.
- [[Collomb P., 1997]] Collomb P. (1997) La population, les ressources, l'environnement et le développement In: Chasteland J.-C. and Chesnais J.-C. (eds) La population du monde : enjeux et problèmes:--.
- [[Collot S. et al., 2008]] Collot S., Zannou A. B., Lawin. E. A. and Woumeni R. (2008), Veille hydrologique 2008 au Bénin : Essai de suivi et de modélisation destiné à l'annonce et au jaugeage de crues du bassin de l'Ouémé ; Rapport technique d'Étude; Projet OUEME-2025, DG-Eau/INPG, Cotonou (Bénin), 67p.
- [[Cooper H.H. et al., 1976]] Cooper H.H., Bredehoeft J.D. and Papadopoulos I.S. (1976) Response of a finite diameter well to an instantaneous charge of water; Water Resour Res 3: 263-269.
- [[Cosandey C. et al., 2003]] Cosandey C., Bigot S., Dacharry M., Gille E., Lagarnier R. and Salvoador P.-G. (2003), Les eaux courantes : Géographie et environnement; Berlin ed., Paris (France), 239p.
- [[Crosbie R.S. et al., 2005]] Crosbie R.S., Binning P. and Kalma J.D. (2005) A time series approach to inferring groundwater recharge using the water table fluctuation method. Water Resour Res Vol 41,10.1029/2004WR003077

- [[De Condappa D. and Soria Ugalde J., 2002]] De Condappa D. and Soria Ugalde J. (2002), Méthode Beerkan: Caractérisation des propriétés hydrodynamiques des sols non saturés: Etat d'avancement et bases théoriques d'utilisation de la méthode; Rapport interne: Hydrologie de la zone non saturée; LTHE/IRD, Grenoble (France),
- [[Derive G., 2003]] Derive G. (2003), Estimation de l'évapotranspiration en région sahélienne. Synthèse des connaissances et évaluation des modélisations (SISVAT, RITCHIE). Application à la zone d'HAPEX-SAHÉL (Niger); PhD, INPG, Grenoble (France), 189p.
- [[Descloitres M. *et al.*, 2011]] Descloitres M., Séguis L., Legchenko A., Wubda M., Guyot A. and Cohard J.M. (2011) The contribution of MRS and resistivity methods to the interpretation of Actual Evapo-Transpiration measurements: a case study in metamorphic context in north Bénin; Near Surface Geophysics, special issue on Magnetic Resonance Soundings 9: 187-200 DOI: 10.3997/1873-0604.2011003.
- [[Descloitres M. *et al.*, 2003]] Descloitres M., Wubda M. and Le Troquer Y. (2003), Prospections géophysiques sur le bassin versant d'Ara : électrique 2D et électromagnétisme EM34 ; Compte-rendu de mission du 5 au 14 mai 2003, Rapport technique IRD, Ouagadougou (Burkina Faso), 15p.
- [[Dézetter A., 1996]] Dézetter A. (1996), Les enjeux de la gestion des ressources en eau en milieu semi-aride; Paper presented at the Xèmes Journées Hydrologiques de l'ORSTOM Montpellier (France)
- [[DG-Eau, 2008]] DG-Eau (2008), Annales hydrologiques des années 2003 à 2007, Cotonou (Bénin), 198p.
- [[DG-Eau, 2011]] DG-Eau (2011), Rapport d'exécution du Budget-Programme par Objectif (BPO) 2010 de l'hydraulique rurale et semi-urbaine ; Rapport pour la Revue 2010 du secteur de l'eau, Version Provisoire; Cotonou (Bénin), 106p.
- [[DGH/MMEH, 2000]] DGH/MMEH (2000), Vision Eau 2025 Bénin; Cotonou (Bénin), 37p.
- [[Dovonon L., 2011]] Dovonon L. (2011), Etude de la qualité chimique des eaux souterraines dans le Département des Collines au Bénin: Cas des fluorures dans la Commune de Dassa-Zoumè, Impact sanitaire et essais de traitement à l'os calciné; Phd, FAST/UAC/Abomey-Calavi (Bénin), 200p. + annexes.
- [[Eagleman J. R., 1971]] Eagleman J. R. (1971) Experimentally derived model for actual evapotranspiration; Agric Meteorol 8: 385-394
- [[FAO, 1998]] FAO (1998) Crop Evaporation – Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage paper; Rome (Italy), 56, <http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm>.
- [[Faure P., 1977]] Faure P. (1977) Carte pédologique de reconnaissance au 1/200.000e, feuille de Djougou; ORSTOM, Paris (France)
- [[Faure P. and Volkoff B., 1998]] Faure P. and Volkoff B. (1998) Some factors affecting regional differentiation of the soils in the Republic of Benin (West Africa); Catena 32: 281-306.
- [[Favreau G., 2000]] Favreau G. (2000), Caractérisation et modélisation d'une nappe phréatique en hausse au sahel : dynamique et géochimie de la dépression piézométrique naturelle du kori de Dantiandou (sud-ouest du Niger); PhD, Université de Paris XI, Paris (France), 258p.
- [[Filippi C. *et al.*, 1990]] Filippi C., Milville F. and Thiery D. (1990) Évaluation de la recharge naturelle des aquifères en climat Soudano-Sahélien par modélisation hydrologique globale : application à 10 sites au Burkina-Faso; J Sci Hydrol 35: 29-48.
- [[Fournier J. *et al.*, 2000]] Fournier J., Serpenti G., Delhomme J.P. and Gathelier R. (2000) Rôle des jachères sur les écoulements de surface et l'érosion en zone soudanienne du Burkina : application à la gestion des terres cultivées; Sud Sci Technol EIER/ETSHER 5: 4-14.
- [[Gbaï I. *et al.*, 2011]] Gbaï I., Vodounou J-B. and Zannou A. (2011), Etude des aspects communautaires et sociopolitiques de la gestion de l'eau dans le bassin de l'Ouémé et test

- d'une gestion coordonnée autour de quelques retenues d'eau sélectionnées, Rapport d'étude; Projet OUEME-2025, DG-Eau/UAC/IRD, 60p.
- [[GIEC, 2007]] GIEC (2007), Bilan 2007 des changements climatiques: Rapport de synthèse. Contribution des groupes de travail I, II, III, au quatrième rapport du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat GIEC; Genève (Suisse), 103p., ISBN 192-9169-9222-9160
- [[Giertz S. and Diekkrüger B., 2003]] Giertz S. and Diekkrüger B. (2003) Analysis of the hydrological processes in a small headwater catchment in Benin (West Africa); *Phys Chem Earth* 28: 1333-1341
- [[Giertz S. *et al.*, 2010]] Giertz S., Hiepe C., Steup G., Sintondji L. and Diekkrüger B. (2010) Hydrological processes and soil degradation in Bénin. In: Speth P., Christoph M. and Diekkrüger B. (eds) *Impacts of global change on the hydrological cycle in West and Northwest Africa*:168-197.
- [[Gnouma R., 2006]] Gnouma R. (2006), Aide à la calibration d'un modèle hydrologique distribué au moyen d'une analyse des processus hydrologiques : Application au bassin versant de l'Yzeron; PhD, INSA, Lyon (France), 413p.
- [[Göttinger J. and Bardossy A., 2006]] Göttinger J. and Bardossy A. (2006) Adapted model for surface water resources in the Ouémé river basin ; RIVERTWIN Deliverable D26;
- [[Grayson R. and Blöschl G., 2001]] Grayson R. and Blöschl G. (2001), *Spatial patterns in catchment hydrology - Observations and Modelling*; Cambridge University Press, Cambridge (UK),
- [[Gregoire J-M. and Giovani F., 1990]] Gregoire J-M. and Giovani F. (1990) Suivi par télédétection des changements d'état de surface sur les bassins du Haut-Sénégal, de la Gambie et du Rio Corubal (novembre 1987- décembre 1988); *Télédétection et sécheresse*, AUPELF-UREF, John Libbey Eurotext, Paris: 81-93.
- [[Guillot P. and Duband D., 1980]] Guillot P. and Duband D. (1980) Fonction de transfert pluie-débit sur les bassins versants de l'ordre de 1000 km²; *La Houille Blanche* n° 4/5,: 279-290
- [[Gupta H. *et al.*, 2009]] Gupta H., Kling H., Yilmaz K. and Martinez G. (2009) Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: implications for improving hydrological modelling; *J Hydrol* 377: 80-91 DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.003
- [[Gupta V. K. *et al.*, 1980]] Gupta V. K., Waymire E. and Wang C. T. (1980) A representation of an instantaneous unit hydrograph from geomorphology; *Water Resour Res* 16: 855-862
- [[Guyot A., 2010]] Guyot A. (2010), Estimation de l'évapotranspiration sur un couvert complexe par utilisation de la scintillométrie infrarouge; PhD, UJF, Grenoble (France), 229p.
- [[GWP/RIOB., 2009]] GWP/RIOB. (2009), *Manuel de Gestion Intégrée des Ressources en Eau par Bassin*, Elanders (Suède), ISBN : 978-91-85321-73-5, 112p.
- [[GWP/TAC, 2000]] GWP/TAC (2000), *La gestion intégrée des ressources en eau*, TAC Background Papers, N°4; Partenariat Mondial de l'Eau/Comité Technique Consultatif, ISBN: 91-631-0289-7, 80p.
- [[GWP/TEC, 2005]] GWP/TEC (2005), *Catalyser le changement : manuel de développement de la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) et des stratégies d'efficience de l'eau*; Document élaboré par le Comité Technique du Global Water Partnership (GWP) avec le soutien du Ministère Norvégien des Affaires Etrangères, ISBN : 91-85321-57-5, 52p.
- [[Hadjer K. *et al.*, 2005]] Hadjer K., Klein T. and Schopp M. (2005) Water consumption embedded in its social context, north-western Benin; *Phys Chem Earth* 30: 357-364.
- [[Haverkamp *et al.*, 1998]] Haverkamp R., Bouraoui F., Angulo-Jaramillo R., Zammit C. and Delleur J. W. (1998) Soil properties and moisture movement in the unsaturated zone. In: Delleur J.W. (ed) invited chapter in the book "*CRC Groundwater Handbook*":120.

- [(Hornberger G. M. and Spear R. C., 1981)] Hornberger G. M. and Spear R. C. (1981) An approach to the preliminary analysis of environmental systems; *Journal of environmental Management* 12: 7-18.
- [(Houinato M. R. B., 2001)] Houinato M. R. B. (2001), *Phytosociologie, écologie, production et capacité de charge des formations végétales pâturées dans la région des Monts Kouffé (Benin)*; PhD, Laboratoire de Systématique et Phytosociologie/Faculté des Sciences/ULB, Bruxelles (Belgique), 241p.
- [(Houndénou C., 1992)] Houndénou C. (1992), *Variabilité pluviométrique et conséquences socio-économiques dans les plateaux du bas-Bénin (Afrique de l'Ouest)*; Mémoire de DEA "Climats et contraintes climatiques", URA 909 "Climatologie Tropicale" du CNRS /Université de Bourgogne, Dijon (France), 2 volumes, 90p.
- [(Hubert P., 1984)] Hubert P. (1984), *Eaupuscule. Une introduction à la gestion de l'eau*; Ellipses, Paris (France), 192p.
- [(Hubert P. *et al.*, 1989)] Hubert P., Carbonnel J.-P. and Chaouche A. (1989) *Segmentation de séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest*; *J Hydrol*, 110: 349-367.
- [(INSAE, 2003)] INSAE (2003), *Troisième Recensement Général de la Population et de l'Habitation, Février 2002, Synthèse des résultats*; Direction des Etudes Démographiques, Ministère du Plan, de la Prospective et du Développement, Cotonou (Bénin), 35p.
- [(Jacob D., 2001)] Jacob D. (2001) A note to the simulation of the annual and interannual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin; *Meteorol Atmos Phys* 77: 61-74
- [(Jacquin F. and Seygona Z.Y., 2004)] Jacquin F. and Seygona Z.Y. (2004), *Contribution à l'étude du fonctionnement hydrodynamique des aquifères du bassin versant de la Donga. Dossiers de forages ; Rapport technique*; DGH/IRD, Cotonou (Bénin), 35p.
- [(Janicot S. and Sultan B., 2001)] Janicot S. and Sultan B. (2001) Intra-seasonal modulation of convection in the west african monsoon; *Geophys Res Letts* 28: 523-526.
- [(Jobard I. *et al.*, 2011)] Jobard I., Chopin F., Berges J.-C. and Roca R. (2011) An intercomparison of 10-day satellite precipitation products during West African monsoon; *International Journal of Remote Sensing* 32: 2353-2376.
- [(Judex M. *et al.*, 2009)] Judex M., Rohrig J., Schulz O. and Thamm H.-P. (2009), *IMPETUS Atlas du Bénin. Résultats de recherche 2000–2007, Troisième édition*, Département de Géographie, Université de Bonn, Bonn (Allemagne), 128p.
- [(Kamagaté B., 2006)] Kamagaté B. (2006), *Fonctionnement hydrologique et origine des écoulements sur un bassin versant de milieu tropical de socle au Bénin : bassin versant de la Donga (Haute Vallée de l'Ouémé)*; PhD, UM II, Montpellier (France), 320p.
- [(Kamagaté B. *et al.*, 2003a)] Kamagaté B., Séguis L. and Jacquin F. (2003a), *Mission Nivellement–Géochimie, haut-bassin de l'Ouémé (Bénin) ; Rapport technique*; IRD, Montpellier (France), 9p.
- [(Kamagaté B. *et al.*, 2003b)] Kamagaté B., Seygona Z., Malinur F., Arjounin M., Jacquin F., Bouchez J., Depraetere C., Le Barbé L. and Séguis L. (2003b), *OHHVO : Données piézométriques sur le bassin de la Donga (Bénin). Période 1999-2002 ; Rapport Technique*; Projet ORE/AMMA-CATCH, IRD, 88p.
- [(Kirkby M., 1988)] Kirkby M. (1988) Hill slope runoff processes and models; *J Hydrol* 100: 315-339. Languedoc. 332p. f cartes.
- [(Kounouhewa B. *et al.*, 2007)] Kounouhewa B., Djikou S., Awanou C. N., Galle S. and Roko F. (2007), *Variabilité spatiale de l'ETP dans le bassin de la Donga*; Paper presented at the 1st Conference of UAC on Sciences, Cultures and Technologies, Abomey-Calavi (Bénin)
- [(L'Hôte Y. *et al.*, 2002)] L'Hôte Y., Mahé G., Some B. and Triboulet J.P. (2002) Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000 ; the drought continues; *J Sci Hydrol* 47: 563-572.

- [[Lamachère J. M., 1994]] Lamachère J. M. (1994), Variabilité spatio-temporelle des états de surface en zone sahélienne et soudanienne (Burkina Faso). Effet sur les ruissellements; in Proceedings of Xe journée hydrologique, ORSTOM, Montpellier (France), pp. 91-103.
- [[Latron J. and Gallart F., 2008]] Latron J. and Gallart F. (2008) Runoff generation processes in a small Mediterranean research catchment (Vallcebre, Eastern Pyrenees); Journal of Hydrology 358: 206–220.
- [[Lawin E. A., 2007]] Lawin E. A. (2007), Analyse climatologique et statistique du régime pluviométrique de la haute vallée de l'Ouémé à partir des données pluviographiques AMMA-CATCH Bénin; PhD Thesis, INPG/UAC, 211p.
- [[Lawin E. A. *et al.*, 2009]] Lawin E. A., Vissin E., Sintondji L., Gohoungossou A., Vodounou J-B., Zannou A., Akognongbé A., Vodounnon J., Ahouansou M. and Abdoulaye D. (2009), Contribution du Projet OUEME-2025 à l'étude de la dynamique et de la disponibilité des ressources du bassin de l'Ouémé : Résultats préliminaires; Paper presented at the 5èmes Journées Scientifiques du 21E, Ouagadougou (Burkina Faso)
- [[Le Barbé L. *et al.*, 1993]] Le Barbé L., Alé G., Millet B., Texier H., Borel Y. and Gualde R. (1993), Les ressources en eaux superficielles de la République du Bénin; ORSTOM/DH, ORSTOM ed., Collection Monographies Hydrologiques N°11, Paris (France), ISBN: 2-7099-1168-X, 540p.
- [[Le Barbé L. *et al.*, 2002]] Le Barbé L., Lebel T. and Tapsoba D. (2002) Rainfall variability in west Africa during the years 1950-1990; Journal of Climate 15: 187-202.
- [[Le Goulven P., 2009]] Le Goulven P. (2009), GIRE et allocation des ressources en eau: Mise en oeuvre. Méthodes et outils de simulation, Module de cours « Gestion intégrée de la ressource en eau et des bassins versants » des formations Master SEEC (R2E et GERE) et IDTR (GITE); UM2 et UM3, Montpellier (France), 104p.-
- [[Le Lay M., 2002]] Le Lay M. (2002), Caractérisation hydrologique et simulation numérique des écoulements sur le bassin de la Haute Vallée de l'Ouémé (Bénin). Rapport de DEA MMGE, LTHE/UJF/INPG, Grenoble (France), 44p. + annexes.
- [[Le Lay M., 2006]] Le Lay M. (2006), Modélisation hydrologique dans un contexte de variabilité hydroclimatique. Une approche comparative pour l'étude du cycle hydrologique à méso-échelle au Bénin; PhD, LTHE/UJF/INPG, Grenoble (France), 251p., http://tel.archives-ouvertes.fr/index.php?halsid=ou215et253vfaq256cc415tm258sndl256&view_this_doc=tel-00116912&version=00116911.
- [[Le Lay M. *et al.*, 2004]] Le Lay M., Bouchez J-M., Boubkraoui S., Gohoungossou A. and Galle S. (2004), OHHVO : Stations limnimétriques de la Haute Vallée de l'Ouémé, description et courbes de tarage; Projet ORE AMMA/CATCH, IRD/DGH, 81p.
- [[Le Lay M. and Galle S., 2005]] Le Lay M. and Galle S. (2005), How changing rainfall regimes may affect the water balance : a modelling approach in West Africa; in Proceedings of Symposium on Regional hydrological impacts of climatic changes - Hydroclimatic variability, 6th AISH Scientific Assembly, Foz do Iguaçu, Brazil, pp. 203-210.
- [[Lebel T. and Vischel T., 2005]] Lebel T. and Vischel T. (2005) Climat et cycle de l'eau en zone tropicale : un problème d'échelle; C R Geosci 337: 29-38.
- [[Legesse D. R. *et al.*, 2003]] Legesse D. R., Vallet-Coulomb C. and Gasse F. (2003) Hydrological response of catchment to climate and land use change in Tropical Africa: case study South Central Ethiopia; Journal of Hydrology 275: 67-85
- [[Linacre E. T., 1963]] Linacre E. T. (1963) Determining evapotranspiration rate; J Aust Inst Agric Sci 29: 165-177
- [[Linacre E. T., 1973]] Linacre E. T. (1973) A simpler empirical expression for evapotranspiration rates - a discussion; Agric Meteorol 11: 451-452
- [[MAEP, 2008]] MAEP (2008), Plan stratégique de relance du secteur agricole au Bénin; Ministère de l'Agriculture, de l'élevage et de la Pêche; Cotonou (Bénin), 130p.

- [[Mahé G. *et al.*, 2000]] Mahé G., Olivry J-C., Dessouassi R., Orange D., Bamba F. and Servat E. (2000) Relation eaux de surface – eaux souterraines d'une rivière tropicale au Mali; C R Acad Sci, Paris 330: 689-692.
- [[Mahé G. and Olivry J.C., 1999]] Mahé G. and Olivry J.C. (1999) Évaluation des apports en eau douce à l'Atlantique depuis les côtes de l'Afrique intertropicale (1951-1989); C R Acad Sci, Paris 328: 621-626.
- [[Mahé G. *et al.*, 2005]] Mahé G., Olivry J.C. and Servat E. (2005) Sensibilité des cours d'eau ouest-africains aux changements climatiques et environnementaux : extrêmes et paradoxes; IAHS Publication 296: 169-177.
- [[Mamadou O., 2009]] Mamadou O. (2009), Contribution à l'étude de l'évapotranspiration sur le bassin de la Donga (Bénin). Comparaison du bilan d'énergie de 3 périodes de 15 jours; Mémoire de DEA, FAST/UAC, Abomey-Calavi (Bénin), 75p.
- [[Mamadou O. *et al.*, 2009]] Mamadou O., Galle S., Cohard J.M. and Kounouhéwa B. (2009), Daily and seasonal energy budget variations of fallow and a clear forest in sudanian climate ; IRD/UAC; Paper presented at the 3rd International Conference of AMMA Project, July 2009, Ouagadougou (Burkina Faso).
- [[MECCAG-PDPE, 2000]] MECCAG-PDPE (2000), Document de politique et stratégies du secteur eau, ALAFIA 2025 ; Version finale; Ministère d'État Chargé de la Coordination de l'Action Gouvernementale, du Plan, du Développement et de la Promotion de l'Emploi, Cotonou (Bénin), -
- [[MEE/DG-Eau, 2010]] MEE/DG-Eau (2010), Mise en place d'un dispositif de protection des zones de captage d'eau potable : Guide méthodologique à l'usage des communes, Version finale; Ministère de l'Energie et de l'Eau/Direction générale de l'Eau, Cotonou (Bénin), 30p. + annexes
- [[MEE/DGE., 2009]] MEE/DGE. (2009), Plan stratégique du développement du secteur de l'énergie au Bénin; Ministère de l'Energie et de l'Eau/ Direction Générale de l'Energie, Cotonou (Bénin), 64p. + annexes.
- [[MEE/PHPA, 2010a]] MEE/PHPA (2010a), Etudes techniques relatives aux travaux complémentaires du site du barrage de Bouétééré dans la commune de Sinendé : Rapport définitif; réalisé par CANAL-EAU, Ministère de l'Energie et de l'Eau/Projet d'Hydraulique Pastorale et Agricole, Cotonou (Bénin), 36p. + annexes.
- [[MEE/PHPA, 2010b]] MEE/PHPA (2010b), Etudes techniques relatives aux travaux complémentaires du site du barrage de Nawari dans la commune de Gogounou : Rapport définitif; réalisé par CANAL-EAU, Ministère de l'Energie et de l'Eau/Projet d'Hydraulique Pastorale et Agricole, Cotonou (Bénin), 34p. + annexes.
- [[Métadier M., 2006]] Métadier M. (2006), Bilan hydrologique du bassin de la Donga (zone soudanienne centre-Bénin) et d'un de ses sous-bassins par modélisation (Topamma) : Etude du réalisme; Rapport de Master Recherche, ENSAM (Sup-Agro)/IRD/UM II, Montpellier (France), 89p.
- [[MMEE, 2007a]] MMEE (2007a), Arrêté N° 18/MMEE/DC/SGM/CTJ/CTREau/DG-Eau/SA du 19 février 2007, portant attributions, organisation et fonctionnement de la Direction Générale de l'Eau; Ministère des Mines, de l'Energie et de l'Eau; Cotonou (Bénin), 11p.
- [[MMEE, 2007b]] MMEE (2007b), Stratégie nationale de l'approvisionnement en eau potable en milieu urbain 2006-2015; Ministère des Mines, de l'Energie et de l'Eau; Cotonou (Bénin), 27p.
- [[MMEE/DGH, 2005]] MMEE/DGH (2005), Stratégie nationale de l'approvisionnement en eau potable en milieu rural du Bénin 2005-2015; Ministère des Mines, de l'Energie et de l'Eau/Direction Générale de l'Hydraulique; Cotonou (Bénin), 38p. + annexes.
- [[MMEE/LIFAD, 2006]] MMEE/LIFAD (2006), Etude des systèmes de gestion/Utilisation de l'eau et définition des actions prioritaires de valorisation locale des ressources dans une approche de

- GIRE au Bénin; Rapport d'étude; Ministère des Mines, de l'Energie et de l'Eau/Partenariat National de l'Eau, Cotonou (Bénin), 121p.
- [[Moussa R., 1991]] Moussa R. (1991), Variabilité spatio-temporelle et modélisation hydrologique : Application au bassin du Gardon d'Anduze; PhD, Université de Montpellier 2, Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier (France), 314p.
- [[Mulindabigwi V. and Janssens M.J.J., 2003]] Mulindabigwi V. and Janssens M.J.J. (2003), Land Use, Farming Systems and Carbon Sequestration in Ouémé Catchment in Benin; Paper presented at the Kassel-Witzenhausen: Challenges to Organic Farming and Sustainable Land Use in the Tropics and Subtropics, Kassel (Germany)
- [[Nash J.E., 1957]] Nash J.E. (1957) The form of the instantaneous unit hydrograph; Proc Gen Assembly IASH, Toronto (Canada), IASH Pub 45: 114-121
- [[Nash J.E. and Sutcliffe J.V., 1970]] Nash J.E. and Sutcliffe J.V. (1970) River flow forecasting through conceptual models. Part I-A Discussion of principles; Journal of hydrology 10: 282-290.
- [[Ndong J. B., 2003]] Ndong J. B. (2003) Caractérisation de la saison des pluies dans le Centre-Ouest du Sénégal; Publication de l'Association Internationale de Climatologie 15: 326-332
- [[Nicholson S. E., 1981]] Nicholson S. E. (1981) Rainfall and atmospheric circulation during drought periods and wetter years in West Africa; Mon Wea Rev 109: 2191-2208.
- [[OMM, 1994]] OMM (1994), Guide des pratiques hydrologiques : Application et traitement des données, analyses, prévision et autres applications; Organisation Mondiale de la Météorologie, OMM-N°168 ed. 5ème édition, ISBN: 92-63-25168-1, 793p.
- [[ORE AMMA-CATCH, 2004]] ORE AMMA-CATCH (2004), Rapport de campagne végétation; DGH/IRD, 77p.
- [[Ouédraogo M., 2001]] Ouédraogo M. (2001), Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest. Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante. Normes hydrologiques et modélisation régionale; PhD Thesis, UM II, Montpellier (France), 257p.
- [[OUEME-2025, 2008a]] OUEME-2025 (2008a), Etudes d'implantation et contrôle des travaux de deux (2) piézomètres dans le Département du Zou, Rapport d'implantation; élaboré par NOSTRA-LTD, DG-Eau/UAC/IRD, Cotonou (Bénin), 10p. + annexes
- [[OUEME-2025, 2008b]] OUEME-2025 (2008b), Rapport Général, Période du 1er juin au 30 novembre 2008, Version de séance à l'attention des membres du Comité de Pilotage, Réunion du 27 janvier 2009; Projet OUEME-2025, DG-Eau/UAC/IRD/ONG-GRDI, Cotonou (Bénin), 34p. + annexes.
- [[Paeth H. et al., 2009]] Paeth H., Born K., Girmes R., Podzun R. and Jacob D. (2009) Regional climate change in tropical Africa under greenhouse forcing and land-use changes; J Climate 22: 114-132
- [[Paturel E. et al., 1986]] Paturel E., Desbordes M. and Masson J.-M. (1986), Evaluation de l'influence de la densité des réseaux pluviographiques sur la détermination des lames précipitées; Paris (France), Plan Urbain, rapport LHM 14-86, novembre 1986
- [[Paturel J.-E. et al., 1995]] Paturel J.-E., Servat E. and Vassiliadis A. (1995) Sensitivity of conceptual rainfall-runoff algorithms to errors in input data : case of the GR2M model; J Hydrol 168: 111-125
- [[Penman H. L., 1948]] Penman H. L. (1948) Natural evaporation from open water, bare soil and grass; Proc Roy Soc, London(UK), Ser A 193: 120-145
- [[PEP., 2010]] PEP. (2010), Appui à la mise en place d'un dispositif de protection des zones de captages d'AEP par les communes: Guide méthodologique; Programme Eau Potable; élaboré par ASCONIT Consultants/SITRA.HM, DG-Eau/GTZ, Cotonou (Bénin), 27p. + annexes
- [[Périault A. et al., 2009]] Périault A., Mamadou O., Galle S., Cohard Jean-Martial. and Kounouhéwa B. (2009), Eddy correlation data from AMMA-CATCH Benin sites : daily and seasonal analysis

- of quality controlled data ; IRD/UAC; Paper presented at the 3rd International Conference of AMMA Project, July 2009, Ouagadougou (Burkina Faso).
- [[Perrin C., 2000]] Perrin C. (2000), Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative; PhD, INPG, Grenoble (France), 530p.
- [[Peugeot C., 1995]] Peugeot C. (1995), Influence de l'encroûtement superficiel du sol sur le fonctionnement hydrologique d'un bassin-versant sahélien (Niger). Expérimentation in situ et modélisation; PhD, Université de Grenoble 1, Grenoble (France), 305p. + annexes.
- [[Peugeot C. *et al.*, 2011]] Peugeot C., Guichard F., Bock O., Bouniol D., Chong M., Boone A., Cappelaere B., Gosset M., Besson L., Lemaître Y., Séguis L., Zannou A., Galle S. and Redelsperger J-L. (2011) Mesoscale water cycle within the West African Monsoon; Atmos Sci Let 12: 45-50 DOI: 10.1002/asl.309.
- [[Peugeot C. *et al.*, 2005]] Peugeot C., Le Lay M., Dépraète C., Le Barbé L., Séguis L., Galle S., Afouda S., Arjounin M., Boubkraoui S., Bouchez J-M., Jacquin F., Malinur F., Ouani T., Thévenot N. and Zannou A. (2005), Hydrological functioning and meso-scale water budget assessment on the Upper Ouémé Basin (Benin) ; HSM/LTHE, DGH/DRE/SH; Paper presented at the 1st International Conference of AMMA Project, November-Décembre 2005, Dakar (Sénégal)
- [[Présidence de la République, 2006]] Présidence de la République (2006), Décret N° 2006-461 du 07 septembre 2006, portant attributions, organisation et fonctionnement du Ministère des Mines, de l'Energie et de l'Eau; Cotonou (Bénin), 24p. + annexes.
- [[Priestley C. H. B. and Taylor R. J., 1972]] Priestley C. H. B. and Taylor R. J. (1972) On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters; Mon Weather Rev 100: 81-92
- [[Quenum M. and Lawin E., 2011]] Quenum M. and Lawin E. (2011), Caractérisation et spatialisation des données pluviométriques du bassin de l'Ouémé ; Rapport d'étude; Projet OUEME-2025, DG-Eau/UAC, Cotonou (Bénin), 52p.
- [[Reichert B. and Jaeger A., 2010]] Reichert B. and Jaeger A. (2010) Socio-economic scenarios. In: Speth P., Christoph M. and Diekkrüger B. (eds) Impacts of global change on the hydrological cycle in West and Northwest Africa:426-441.
- [[République du Bénin, 1990]] République du Bénin (1990), La Constitution de la République du Bénin; édité par AJEPAD (Association des Jeunes pour l'Avenir et le Développement), Cotonou (Bénin), 32p.
- [[République du Bénin, 2007]] République du Bénin (2007), Stratégie de croissance pour la réduction de la pauvreté (SCRIP), Version finale; Cotonou (Bénin), 117p.
- [[République du Bénin, 2009]] République du Bénin (2009), Politique Nationale de l'Eau; Cotonou (Bénin), 73p.
- [[Richard A., 2010]] Richard A. (2010), Modélisation simplifiée de la redistribution de l'eau sur un versant au Bénin : Sensibilité aux caractéristiques du sol et à la végétation; Mémoire de Master, LTHE/UJF, Grenoble (France), 32p. + annexes.
- [[Richard A. *et al.*, 2007]] Richard A., Zannou A. and Peugeot C. (2007), Rapport d'étude de la station limnimétrique de Bokpéro ; Rapport Technique; Projet AMMA-CATCH, IRD/DG-Eau, Cotonou (Bénin), 33p.
- [[Riou C., 1975]] Riou C. (1975), La détermination pratique de l'évapotranspiration: Application à l'Afrique Centrale; ORSTOM ed. Mémoire ORSTOM N°80, Paris (France), ISBN: 2-7099-0369-5, 236p.
- [[Robain H. and Wubda M., 2004]] Robain H. and Wubda M. (2004), Rapport de mission au Bénin du 12 octobre au 22 novembre ; Rapport technique; IRD, 31p.
- [[Roca *et al.*, 2010]] Roca R., Chambon P., Jobard I. and Kirstetter P. (2010) Comparing satellite and surface rainfall products over West Africa at meteorologically relevant scales during the

- AMMA Campaign using error estimates; *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 49: 715-731.
- [[Rodier J., 1964]] Rodier J. (1964), Régime hydrologique de l'Afrique noire à l'ouest du Congo; ORSTOM, Paris (France), 137p.
- [[Roeckner E. *et al.*, 2003]] Roeckner E., Bäuml G., Bonaventura L., Brokopf R., Esch M., Giorgetta M., Hagemann S., Kirchner I., Kornblüeh L., Manzini E., Rhodin A., Schlese U., Schultzweida U. and Tompkins A. (2003), The atmospheric general circulation model ECHAM5. Part I: Model description; Max-Planck-Inst. f. Meteor., Report N°349, Hamburg (Germany),
- [[Roko F., 2007]] Roko F. (2007), Evolution des variables météorologiques sur le haut bassin de l'Ouémé et leurs influences sur l'évapotranspiration de référence; Mémoire de Master, CIFRED/UAC, Abomey-Calavi (Bénin), 72p.
- [[Sambou S. *et al.*, 2009]] Sambou S., Diémé Y., Touré A. K., Malang Badji A. and Malanda-Nimy E. N. (2009) Effet du barrage de Manantali sur les modifications du régime hydrologique du fleuve Sénégal dans le bassin amont : une approche statistique; *Sécheresse* 20: 104-111 DOI: 10.1684/sec.2009.0176
- [[Saporta G., 1990]] Saporta G. (1990), Probabilités, Analyse des Données et Statistique; Technip ed., Paris (France), ISBN: 2-710 805 650, 493p.
- [[Saulnier G. M. *et al.*, 1997]] Saulnier G. M., Beven K. and Oblet C. (1997) Digital elevation analysis for distributed hydrological modelling: Reducing scale dependence in effective hydraulic conductivity values; *Water Resources Research* 33: 2097-2101.
- [[Schilling W., 1983]] Schilling W. (1983), Der Einfluss räumlich variabler Niederschläge auf Kanalisationsabflüsse; in Proceedings of 13^e Abwassertechnisches Seminar, Technische Universität München, München (Deutschland), , pp. 55-83.
- [[Schilling W., 1991]] Schilling W. (1991) Rainfall data for urban hydrology : what do we need?; *Atmospheric Research* 27: 5-21
- [[Séguis L. *et al.*, 2004]] Séguis L., Cappelaere B., Milesi G., Peugeot C., Massuel S. and Favreau G. (2004) Simulated impacts of climate change and land-clearing on runoff from a small Sahelian catchment; *Hydrological Process* 18: 3401-3413.
- [[Seibert J. and McDonnell J.J., 2002]] Seibert J. and McDonnell J.J. (2002) On the dialog between experimentalist and modeler in catchment hydrology : Use of soft data for multicriteria model calibration; *Water Resources Research* 38: 2311-2314 DOI: 1241, DOI:10.1029/2001WR000978.
- [[Servat E., 1993]] Servat E. (1993), Evaluation régionale des ressources en eau. Application à la Côte d'Ivoire; Rapport de synthèse du Programme ERREAU; Antenne Régionale ORSTOM, Abidjan (Côte d'Ivoire), 154p.
- [[Servat E. and Dézet A., 1988]] Servat E. and Dézet A. (1988) Modélisation globale de la relation pluie-débit : des outils au service de l'évaluation des ressources en eau; *Hydrological Journal*, 3: 117-129
- [[Servat E. and Dézet A., 1991]] Servat E. and Dézet A. (1991), Prise en compte du type d'occupation des sols dans une modélisation pluie-débit en savane soudanaise; Paper presented at the AISH Congress, Vienne (Autriche)
- [[Shuttleworth W. J., 2010]] Shuttleworth W. J. (2010), Back to the basics of understanding evapotranspiration; in Proceedings of IAHS/UNESCO Kovacs Colloquium on Hydrocomplexity: New tools for solving wicked water problems, Paris (France), July 2010, pp. 13-34.
- [[Sinsin B., 1985]] Sinsin B. (1985), Contribution à l'utilisation rationnelle des ressources naturelles: Impact des activités anthropiques (braconnage et activités agro-pastorales) sur la faune et la flore dans le Nord-Bénin, périmètre Kandi-Banikoara-Kérou; Mémoire d'Ingénieur Agronome, FSA/UNB, Abomey-Calavi (Bénin), 172p.

- [[Sintondji L. O., 2005]] Sintondji L. O. (2005), Modelling the rainfall-runoff process in the Upper Ouémé catchment (Térou in Bénin Republic) in a context of global change : extrapolation from the local to the regional scale; PhD, University of Bonn, Bonn (Allemagne), 205p.
- [[SONEB, 2011]] SONEB (2011), Bilan d'exécution du Plan Prévisionnel de Développement de l'Entreprise (PPDE) et du Contrat-Plan Etat-Soneb, Exercice 2010 ; Rapport pour la Revue 2010 du secteur de l'eau, Version Provisoire; Société Nationale des Eaux du Bénin, Cotonou (Bénin), 49p.
- [[Sounouvou E., 2007]] Sounouvou E. (2007), Comportement hydrogéologique de trois versants aux couverts végétaux contrastés en zone soudanienne (cas du Bénin); Mémoire d'Ingénieur, EPAC/UAC, Abomey-Calavi (Bénin), 94p.
- [[Stakhiv E., 2010]] Stakhiv E. (2010), Pratical approaches to water management under climate change uncertainty; in Proceedings of IAHS/UNESCO Kovacs Colloquium on Hydrocomplexity: New tools for solving wicked water problems, Paris (France), July 2010, pp. 62-69.
- [[Thévénat N. et al., 2004]] Thévénat N., Boubkraoui S., Arjounin M., Malinur F., Afouda S., Ouani T. and Peugeot C. (2004), OHHVO : Rapport de campagne Limnimétrie 2004; Projet ORE AMMA-CATCH, DH/IRD, Cotonou (Bénin), 47p.
- [[Thornwaite C. W., 1948]] Thornwaite C. W. (1948) An approach toward a rational classification of climate; Geog Rev 38: 55-94
- [[Tossa A. et al., 2010]] Tossa A., Azonsi F., Kpomassè M., Lanhoussi F. and Zannou A. (2010), Atlas hydrographique du Bénin, Un système d'information sur l'hydrographie ; Version provisoire; Direction Générale de l'Eau, 35p. + annexes.
- [[Tossa, 2005]] Tossa A. A. Y. (2005), Changements climatiques et dynamique hydrologique au Bénin; Mémoire DEA, FLASH/UAC, Abomey-Calavi (Bénin), 91p.
- [[Trimble G. R., 1959]] Trimble G. R. (1959) A problem analysis and program for watershed management research; US Forest Service, Northeast Forest, Expt Sta, : Paper n°16
- [[Turc L., 1961]] Turc L. (1961) Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle; Ann Agro 12: 13-49
- [[Vissin E. W., 2001]] Vissin E. W. (2001), Contribution à l'étude de la variabilité des précipitations et des écoulements dans le bassin béninois du fleuve Niger; Mémoire de DEA, Université de Bourgogne, Dijon (France), 53p.
- [[Vissin E. W., 2007]] Vissin E. W. (2007), Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger; PhD, Université de Bourgogne, Dijon (France), 310p.
- [[Vodounnon J., 2008]] Vodounnon J. (2008), Contribution à l'étude de la caractérisation hydro-pluviométrique du bassin de l'Ouémé avec le modèle GR2M; Mémoire de Maîtrise, FLASH/UAC, Abomey-Calavi (Bénin), 83p.
- [[Vodounou J-B., 2010]] Vodounou J-B. (2010), Les systèmes d'exploitation des ressources naturelles et leurs impacts sur les écosystèmes dans le bassin de la Sô au Bénin (Afrique de l'Ouest); PhD, FLSH-FLASH/UL/UAC, Lomé (Togo), 305p.
- [[Vodounou J-B. et al., 2011]] Vodounou J-B., Fiogbé E. D. and Zannou A. (2011) Comportement des populations face aux inondations et crues annuelles dans le bassin de la Sô au Bénin; AHOHO, Revue de Géographie du LARDYMES, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Université de Lomé (Togo) 7: 48-60
- [[Wagener T. et al., 2001]] Wagener T., Boyle D.P., Lees M.J., Wheather H.S., Gupta H.V. and Sorooshan S. (2001) A framework for development and application of hydrological models; Hydrology and Earth System Sciences 5: 13-36.
- [[Wagener T. et al., 2003]] Wagener T., McIntyre N., Lees M.J., Wheather H.S. and Gupta H.V. (2003) Towards reduced uncertainty in conceptual rainfall-runoff modelling : Dynamic identifiability analysis; Hydrological Processes 17: 455-476.

- [(Zannou A. *et al.*, 2011)] Zannou A., Peugeot C. and Diederich M. (2011) Impact de l'origine des forçages utilisés sur la simulation des ressources en eau; *European Journal of Scientific Research* 63: 73-83
- [(Zannou A. and Vodounou J-B., 2011)] Zannou A. and Vodounou J-B. (2011) Evolution des crues annuelles liées aux changements climatiques et adaptation des populations de la basse vallée de l'Ouémé. In: DGAT/FLACH/UAC (ed) *Mélanges MAC*:pp:232-244.
- [(Zannou A. *et al.*, 2009)] Zannou A., Vodounou J-B., Lawin A., Tossa A., Kounouhéwa B., Galle S., Gohoungossou A., Cohard J-M., Peugeot C., Sintondji L., Houssa C., Ahossi A., Alamou E., Adjomayi P., Agoua M., Abdoulaye A., Ahouansou M., Akognongbé A., Assaba M., Assouma K., Avahounlin F., Boko W., Da-Silveira M., Koto N'Gobi G., Mamadou O., Oyéniran R., Vodounnon J., Sogba-Goh J., Hounnou G., Gnancadja L., Dossou-Yovo A., Amoussouvi V., Vissoh S., Vigan E., Périault A., Doucouré M., Guyot A., Lanhoussi F., Séguis L., Amoussou E. and Vissin E. (2009), The OUEME-2025 project of FSP RIPIECSA : from targeted research on hydroclimatic functioning to application on integrated water resources management of Ouémé watershed in Benin, Synthetic results and impacts for a sustainable development; Paper presented at the International Conference of IMPETUS Project on "Global Change in Africa : Projections, Mitigation and Adaptation", Juin 2009, Cologne, Allemagne
- [(Zannou A. B., 2003)] Zannou A. B. (2003), Caractéristiques hydrodynamiques des sols de la plaine de Kairouan : élaboration d'une base de données de mesures pour la détermination de la conductivité hydraulique à saturation; Rapport de stage; Projet MERGUSIE, INAT/IRD, Tunis (Tunisie), 155p. + annexes
- [(Zannou A. B., 2004)] Zannou A. B. (2004), Avant projet détaillé du barrage collinaire Bardouga à Tillabéri (Niger) et de l'aménagement hydro-agricole en aval; Projet de fin d'études d'Ingénieur, INAT/STUDI, Tunis (Tunisie), 154p. + annexes.
- [(Zannou A. B., 2006)] Zannou A. B. (2006), Détermination des termes du bilan hydrologique sur le bassin de l'Ouémé supérieur (ORE AMMA-CATCH) : Approche annuelle et mensuelle avec calcul d'incertitudes associées; Rapport de Master Recherche, UM II, Montpellier (France), 82p.
- [(Zin I., 2002)] Zin I. (2002), Incertitudes et ambiguïté dans la modélisation hydrologique. Discussion, développements méthodologiques et application à l'hydrologie de crue en Ardèche; PhD, INPG, Grenoble (France), 200p.
- [(Zoumarou K. A. M., 1998)] Zoumarou K. A. M. (1998), Etude de la forme des versants à partir de modèle numérique de terrain: application à la vallée de l'Ouémé; Mémoire de Maîtrise, FLASH/UNB, Abomey-Calavi (Bénin), 73p.

ANNEXES

LISTE DES ANNEXES

<u>ANNEXE 1 :</u>	Aperçu sur le secteur de l'eau et la GIRE au Bénin.....	4
<u>ANNEXE 2 :</u>	Description des projets AMMA-CATCH et OUEME-2025	18
<u>ANNEXE 3 :</u>	Stations hydrométriques de l'OHHVO et superficie du bassin drainé ..	30
<u>ANNEXE 4 :</u>	Variante du test de Kolmogorov-Smirnov	32
<u>ANNEXE 5 :</u>	Méthode de décomposition hydrogéochimique du débit total	34
<u>ANNEXE 6 :</u>	Liste des 94 jeux finaux	36
<u>ANNEXE 7 :</u>	Approche IMPETUS pour la combinaison des modèles climatiques	38

ANNEXE 1: Aperçu sur le secteur de l'eau et la GIRE au Bénin

1.1. Secteur de l'eau au Bénin

Il est à noter d'entrée que le cadre national de gestion du secteur de l'eau est actuellement marqué par divers dysfonctionnements. L'analyse des principaux constats indique clairement qu'il s'agit bien d'une crise de gouvernance. Les insuffisances relevées appellent des réformes appropriées.

2.1.2. Synthèse du diagnostic sectoriel

Au Bénin, la problématique du secteur de l'eau revêt globalement un triple aspect, caractérisé par l'importance de l'approvisionnement en eau potable des populations, la progression des aménagements hydro-agro-pastoraux pour la valorisation de la ressource, et la faible connaissance des besoins en eau industriels et touristiques.

Avec cette triple problématique, ce secteur fait face à plusieurs faiblesses et contraintes dont les principales identifiées par le Document de Politique Nationale de l'Eau¹ sont les suivantes :

- la prédominance des institutions publiques qui ne reflète pas la très grande diversité des acteurs, malgré l'option du libéralisme économique et de la démocratisation ;
- la répartition peu judicieuse des responsabilités, avec comme conséquences l'éparpillement des centres de décision, les chevauchements de compétences, les redondances et la concurrence, voire des conflits entre acteurs et la faiblesse de la collaboration et de la concertation entre les acteurs ;
- l'augmentation de la pression démographique sur les ressources en eau et des situations de plus en plus conflictuelles à propos de leur partage ;
- la mauvaise répartition spatio-temporelle des ressources en eau et la dégradation des écosystèmes ;
- l'insuffisance du suivi de la ressource et, par conséquent, l'insuffisance des données disponibles et de la connaissance sur les ressources en eau ;

¹ [(République du Bénin, 2009)] République du Bénin (2009), Politique Nationale de l'Eau; Cotonou (Bénin), 73p.

- les faibles capacités des institutions publiques, notamment l'insuffisance des effectifs en ressources humaines ; et,
- l'insuffisance de ressources financières intérieures durables.

Le secteur dispose néanmoins de forces et opportunités parmi lesquelles on peut citer :

- l'existence d'une volonté politique affirmée de réformer le secteur de l'eau, de garantir l'accès à l'eau potable aux populations et d'assurer la disponibilité de l'eau pour les activités de production ;
- l'opportunité de la décentralisation et la responsabilisation des Communes dans la gestion de l'eau ; et,
- l'expérience technique et méthodologique en matière de gestion et de mobilisation des ressources, accumulée depuis l'indépendance du pays en 1960.

Malgré les avancées non négligeables de ces dernières années, les principaux problèmes recensés dans le secteur de l'eau peuvent être synthétisés comme suit :

- l'eau est une ressource relativement abondante mais avec un faible niveau de connaissance et de valorisation ;
- le système national de formation/recherche est peu adapté aux besoins du secteur de l'eau ;
- l'inexistence d'un cadre approprié de planification et de coordination de la recherche-développement pénalise le secteur ;
- l'approvisionnement en eau potable et l'assainissement sont considérés et traités comme des volets indépendants ; et,
- la variabilité et les changements climatiques ne sont pas pris en compte dans les prévisions et la gestion.

Les défis actuels du secteur peuvent être énumérés comme suit :

- Evaluer les besoins en ressources humaines en nombre et en qualification, et disposer d'un système de formation et de recyclage approprié ;
- Mieux connaître les ressources en eau disponibles par l'organisation du suivi permanent de leur évolution qualitative et quantitative dans l'espace et dans le temps ;
- Mieux utiliser et mieux valoriser l'eau pour soutenir le développement socio-économique du pays ;

- Mettre en place une gouvernance de l'eau reposant sur la coordination des actions, une implication judicieuse des acteurs non étatiques, une large concertation entre ces derniers et un recours aux outils modernes qu'implique la gestion par masse d'eau (bassin hydrographique) ;
- Satisfaire, de façon durable, les différentes demandes en eau en tenant compte de la disponibilité de la ressource ;
- Assurer la durabilité des écosystèmes ; et,
- Se prémunir contre les effets négatifs de l'eau, aussi bien physiques (inondations) que sanitaires (maladies liées à l'eau).

2.1.2. Ressources en eau : disponibilité, variabilité, usages et besoins

Pour relever ces défis, le Bénin dispose d'un certain potentiel en matière de ressources en eau. Sous l'influence de trois types de climat (le climat subéquatorial au Sud, le type soudanien au Nord avec une zone de transition), le Bénin reçoit une pluviométrie moyenne annuelle qui varie entre 800 et 1200 mm de pluie. Cette pluviométrie alimente le potentiel hydrologique naturel du pays à travers les 4 ensembles hydrographiques : le Niger (3 affluents béninois), la Volta (Pendjari), l'Ouémé-Yéwa et le Mono-Couffo. Cette hydrographie constitue le socle pour les ressources en eau aussi bien de surface que souterraine. En effet, les ressources en eau de surface du Bénin sont évaluées à plus de 13 milliards de mètres cubes² et les capacités de recharge des aquifères sont estimées à un peu moins de 2 milliards de mètres cubes par an³. Ces ressources sont inégalement réparties sur l'ensemble du territoire national.

Le Bénin dispose également d'une grande diversité de zones humides dont la superficie est estimée à environ 15.000 hectares.

Par ailleurs, le Bénin dispose de plus de 300.000 ha de terres irrigables dont 117.000 ha de plaines d'inondation et de vallées et de 205.000 ha de bas-fonds. Ainsi en 2010, le Bénin comptait plus de 300 ouvrages de retenues d'eau à but agropastoral dont une centaine est en bon état⁴. La

² [(Le Barbé L. et al., 1993)] Le Barbé L., Alé G., Millet B., Texier H., Borel Y., and Gualde R. (1993), *Les ressources en eaux superficielles de la République du Bénin*; ORSTOM/DH, ORSTOM ed., Collection Monographies Hydrologiques N°11, Paris (France), ISBN: 2-7099-1168-X, 540p.

³ [(MECCAG-PDPE, 2000)] MECCAG-PDPE (2000), Document de politique et stratégies du secteur eau, ALAFIA 2025 ; Version finale; Ministère d'État Chargé de la Coordination de l'Action Gouvernementale, du Plan, du Développement et de la Promotion de l'Emploi, Cotonou (Bénin), -.

⁴ [(Tossa A. et al., 2010)] Tossa A., Azonsi F., Kpomassè M., Lanhoussi F., and Zannou A. (2010), Atlas hydrographique du Bénin, Un système d'information sur l'hydrographie ; Version provisoire; Direction Générale de l'Eau, 35p. + annexes.,

quasi-totalité de ces points d'eau se trouve dans les départements de l'Alibori, du Borgou et des Collines. Le volume d'eau stocké à l'aide de ces ouvrages est estimé à environ 40 millions de m³ d'eau dont 24 millions de m³ d'eau pour le seul barrage hydro-agricole du périmètre irrigué de la SUCOBE (ex Société Sucrière de Savè). En dehors de ce barrage, il s'agit en général de très petits ouvrages permettant de stocker en moyenne entre 30.000 et 100.000 m³ d'eau. Le faible niveau de mobilisation des eaux de surface ne permet pas une utilisation optimale du potentiel pour la production hydroélectrique.

En réalité, il n'existe pratiquement pas de document accessible sur l'utilisation réelle faite des ressources en eau du Bénin. On ne dispose pas à ce jour de données chiffrées résultant d'un système de suivi et de mesures des prélèvements opérés dans les différents secteurs de consommation. Les chiffres figurant dans les divers rapports d'étude proviennent des estimations grossières faites à partir des hypothèses très discutables⁵. La seule évidence est que, le niveau de développement des différentes branches d'activités économiques du pays et les observations quotidiennes permettent de soutenir que les ressources en eau disponibles sont faiblement mobilisées.

L'utilisation actuelle des eaux de surface est très peu significative et ne concerne que l'alimentation en eau potable de 4 villes, l'abreuvement du bétail et l'irrigation d'environ 9.000 hectares de cultures diverses. Toutefois, les projections de développement de l'irrigation au Bénin prévoient un accroissement de la demande en eau pour les prochaines années. En effet, à long terme, l'aménagement des terres irrigables recensées sur l'ensemble du territoire national et estimées à 300.000 hectares nécessitera de mobiliser la presque totalité du potentiel en eaux de surface du pays sans tenir compte des autres besoins à satisfaire à partir des eaux de surface. Il pourrait se poser des difficultés dans la satisfaction des autres besoins et une allocation judicieuse des ressources en eau s'imposera dans le futur.

S'agissant des eaux souterraines, elles sont essentiellement utilisées pour l'alimentation en eau potable des villes et des campagnes. Les prélèvements annuels sont de l'ordre de 30 millions de mètres cubes par an. Ce qui représente à peine 2% de la recharge annuelle des aquifères. Même à long terme, la satisfaction des besoins nécessitera un prélèvement global d'environ 250 millions de mètres cubes par an, soit environ 14% de la recharge annuelle des aquifères du pays⁶.

⁵ [(MME/LIFAD, 2006)] MME/LIFAD (2006), Etude des systèmes de gestion/Utilisation de l'eau et définition des actions prioritaires de valorisation locale des ressources dans une approche de GIRE au Bénin; Rapport d'étude; Ministère des Mines, de l'Energie et de l'Eau/Partenariat National de l'Eau, Cotonou (Bénin), 121p.,

⁶ [(MME/LIFAD, 2006)] Ibid.;

Mais cette abondance des eaux souterraines n'est que relative car dans les régions de socle (80% du territoire national, au Centre et au Nord du pays), le potentiel en eau souterraine ne suffira pas à couvrir les besoins à long terme. Il faudra alors recourir aux eaux de surface pour suppléer ce déficit relatif.

Par ailleurs, la faiblesse actuelle de la surveillance de la qualité de nos ressources en eau ne permet pas aux services techniques concernés d'organiser comme il se doit les actions préventives de lutte contre la pollution de l'eau.

La situation ainsi présentée amène à penser que les ressources en eau du Bénin pourraient satisfaire globalement les besoins à long terme de notre économie à condition que ces ressources soient correctement maîtrisées et qualitativement préservées. Mais actuellement, un pourcentage très insignifiant des ressources connues est effectivement utilisé. **Pour le Bénin, le problème de l'adéquation ressources/besoins à long terme se pose donc, non pas en terme de déficit de la ressource, mais en terme de maîtrise des ressources existantes.** Plus de 97% des ressources en eau internes du pays sont donc présentement perdus par évaporation ou se déversent dans l'océan par ruissellement⁷. Les ressources en eau sont donc disponibles et les problèmes rencontrés dans ce secteur sont liés à leur inégale répartition et à la faible mobilisation.

L'émergence du pays, dont les autorités et les populations béninoises rêvent, n'est possible que par le développement et la promotion des différentes branches d'activités socio-économiques en s'appuyant sur une mise en valeur conséquente des ressources en eau. Cette perspective explique et justifie la nécessité de définir une approche reposant sur la cohérence et la synergie des actions. C'est précisément l'une des raisons d'être de la politique nationale de l'eau.

2.1.2. Politique et stratégie actuelle du développement du secteur

Au plan stratégique, depuis l'adoption de la GIRE comme approche de développement des ressources en eau en 1998, les actions conduites par le Bénin se sont inscrites dans les principes du développement durable. Une "*Vision Eau Bénin 2025*" a été élaborée⁸. En réalité, les différentes perspectives de l'évolution démographique rapportées au potentiel en eau et aux besoins socio-économiques à l'horizon 2025 ont amené l'Etat béninois à se fixer une vision nationale de l'eau pour 2025 qui définit l'eau comme la ressource essentielle à partir de laquelle l'on peut satisfaire les besoins sociaux et produire des richesses. Comme telle, elle est considérée

⁷ [(MME/LIFAD, 2006)] Ibid.;

⁸ [(DGH/MMEH, 2000)] DGH/MMEH (2000), Vision Eau 2025 Bénin, Cotonou (Bénin), 37p.,

comme l'une des bases de la stratégie de croissance pour la réduction de la pauvreté et comme facteur d'intégration régionale⁹.

Parmi les causes de l'extrême pauvreté et de la vulnérabilité des communautés, la difficulté d'accès à l'eau potable et aux services adéquats d'assainissement, ainsi que la dégradation des ressources naturelles – y compris les ressources en eau – peuvent être indexées. Ce constat a conduit à faire du développement de la ressource eau et de sa gestion une priorité nationale. Au 31 décembre 2010, le taux de desserte en eau potable était de 57,2% en milieu rural¹⁰ et de 58,5% en milieu urbain¹¹.

Le Gouvernement du Bénin a retenu cinq (05) axes stratégiques pour accélérer la croissance économique et réduire durablement la pauvreté, dont deux à savoir le « développement des infrastructures » et le « développement équilibré et durable de l'espace national », supposent des interventions directes et spécifiques dans le secteur de l'eau, notamment les domaines de l'hydraulique, de l'assainissement, de la valorisation socio-économique et de la gestion des ressources en eau¹².

Conscient de l'importance de l'eau en tant que besoin essentiel de tout individu, le gouvernement accorde une place de choix à l'accès à l'eau potable pour les populations et compte promouvoir la maîtrise de l'eau à des fins productives. Il entend également favoriser le développement d'un système de transport navigable permettant de tirer avantage des nombreux plans et cours d'eau du pays pour faciliter l'accès à des zones enclavées, promouvoir le tourisme en zones rurales, et assurer le transport public dans les conditions de sécurité requises.

Les objectifs visés par la Politique Nationale de l'Eau¹³ sont de 2 ordres :

- Assurer un accès équitable à l'eau et une exploitation durable des ressources en eau ; et,
- Assurer une utilisation efficiente de l'eau pour en optimiser le bénéfice social et économique.

Quatre orientations stratégiques ont été définies comme suit :

⁹ [(République du Bénin, 2007)] République du Bénin (2007), Stratégie de croissance pour la réduction de la pauvreté (SCRIP), Version finale; Cotonou (Bénin), 117p.

¹⁰ [(DG-Eau, 2011)] DG-Eau (2011), Rapport d'exécution du Budget-Programme par Objectif (BPO) 2010 de l'hydraulique rurale et semi-urbaine ; Rapport pour la Revue 2010 du secteur de l'eau, Version Provisoire, Cotonou (Bénin), 106p.,

¹¹ [(SONEB, 2011)] SONEB (2011), Bilan d'exécution du Plan Prévisionnel de Développement de l'Entreprise (PPDE) et du Contrat-Plan Etat-Soneb, Exercice 2010 ; Rapport pour la Revue 2010 du secteur de l'eau, Version Provisoire; Société Nationale des Eaux du Bénin, Cotonou (Bénin), 49p.,

¹² [(République du Bénin, 2007)] République du Bénin (2007), Stratégie de croissance pour la réduction de la pauvreté (SCRIP), Version finale; Cotonou (Bénin), 117p.

¹³ [(République du Bénin, 2009)] République du Bénin (2009), Politique Nationale de l'Eau; Cotonou (Bénin), 73p.

- ❖ Réformer le cadre de gestion pour une bonne gouvernance de l'eau ;
- ❖ Assurer un accès équitable et durable à l'eau potable et à l'assainissement pour les populations ;
- ❖ Garantir et assurer la disponibilité de l'eau en quantité et en qualité pour les activités de production ; et,
- ❖ Assurer la santé, la sécurité publique et la conservation des écosystèmes.

Ces orientations ont été déclinées en 11 axes stratégiques et 39 sous-axes à travers la politique nationale de l'eau. Dans ce cadre stratégique, 10 axes apparaissent comme prioritaires pour le redressement du secteur dans les 5 cinq années à venir. Il s'agit de :

- promouvoir la formation des spécialistes et la connaissance des ressources en eau ;
- mettre en place un cadre propice à la bonne gouvernance de l'eau ;
- reformer et rendre opérationnel le cadre institutionnel et assurer le renforcement des capacités ;
- développer, appliquer et améliorer les instruments et les mécanismes de gestion ;
- garantir les services d'AEP et d'assainissement aux populations ;
- faire jouer aux différentes catégories d'acteurs leurs rôles ;
- développer et moderniser les différentes branches d'activités économiques ;
- planifier, arbitrer et satisfaire judicieusement les demandes en eau des différentes branches d'activités ;
- assurer la protection de la santé publique ; et
- assurer la prévention des risques naturels.

S'agissant de la mobilisation des ressources pour le financement du secteur de l'eau, outre la contribution directe de l'Etat, des Partenaires Techniques et Financiers (PTFs) et des bénéficiaires, plusieurs nouvelles dispositions peuvent être mises à profit afin d'atteindre le niveau de financement escompté. La plus importante est sans doute l'article 46 et suivants de la nouvelle loi (loi n°2010-44 du 24 novembre 2010) portant gestion de l'eau en République du Bénin, qui crée un établissement public appelé Fonds National de l'Eau (FNE). Au titre de l'article 47 de cette de loi, les ressources du FNE sont constituées par :

- des dotations du budget général de l'Etat ;
- le produit des redevances prévues aux articles 50 et 52 de la même loi ;

- le produit des taxes instituées au titre de la gestion de l'eau ;
- le produit des amendes prononcées en application de la présente loi ;
- les subventions, dons et legs ;
- toutes autres ressources autorisées par la loi.

Cette loi instaure un certain nombre de principes. Les principaux dont l'application peut contribuer à l'auto-financement du secteur de l'eau sont :

- le principe « utilisateur-payeur » : en application du principe « utilisateur-payeur » énoncé aux articles 6 et 7 de la loi, les personnes physiques ou morales qui utilisent l'eau à des fins autres que domestiques peuvent être assujetties au versement d'une contribution financière calculée sur la base du volume d'eau prélevé, consommé ou mobilisé ; cette contribution doit en priorité servir au financement du secteur de l'eau ;
- le principe « pollueur-payeur » : lorsque l'activité des personnes physiques ou morales est de nature à provoquer ou aggraver la pollution de l'eau ou la dégradation du milieu aquatique, elles contribuent au financement des mesures que l'Etat et les collectivités territoriales doivent prendre pour lutter contre cette pollution, en compenser les effets, et pour assurer la conservation des écosystèmes aquatiques.

Il est ainsi institué certains types de redevances (taxe, redevance pour service rendu, amende). Ces types de redevances découlent des principes préleveur-payeur, pollueur-payeur, et de protection des usagers. D'autres redevances peuvent être instituées au fur et à mesure de l'évolution de la gestion des ressources en eau et du niveau de vie de la population ainsi que de sa propension à consommer ou à faire usage de l'eau. On peut citer à titre d'exemple : redevance pour modernisation des réseaux de collecte des eaux usées avec un volet pollution domestique et un volet pollution industrielle, redevance pour stockage d'eau en période d'étiage, redevance pour obstacle sur les cours d'eau, redevance pour protection du milieu aquatique etc...

Au titre de cette nouvelle loi, le cadre institutionnel approprié pour le secteur de l'eau est composé de : l'Etat, les collectivités territoriales décentralisées, l'administration centrale, le conseil national de l'eau, les comités de bassin et les organes de gestion locale de l'eau. L'Etat et les collectivités territoriales décentralisées assurent, dans le cadre de leurs missions respectives et en recherchant la participation des acteurs concernés, la gestion durable de l'eau. Le ministre en charge de l'eau est responsable de la gestion du secteur au plan national. Les ministres dont les

compétences se rapportent à l'exploitation ou à la préservation des ressources en eau sont chargés de contribuer à la bonne gestion des ressources en eau. Au plan technique et opérationnel, il est recommandé la création d'une Agence Nationale de Gestion de l'Eau, établissement public à caractère scientifique, doté de la personnalité juridique, qui exerce des missions scientifiques, techniques et administratives dans le domaine de l'eau. Cette agence doit assurer entre autres, la production et la gestion de l'information sur l'eau, l'assistance pour la préparation des outils de gestion de l'eau, et l'appui aux comités de bassin et aux collectivités territoriales. Aussi, la prise en compte de l'approche participative implique la mise en place d'un conseil national de l'eau, qui apporte son concours à la définition des objectifs généraux et des orientations de la politique nationale et de la planification de l'eau et, d'une manière générale, formule toutes propositions de nature à améliorer ou à faciliter la gestion de l'eau. Le conseil national de l'eau rassemble les différents groupes d'intérêts du domaine de l'eau, tant du secteur public, que du secteur privé et de la société civile.

Les dispositions de la loi portant gestion de l'eau au Bénin, requiert une gestion par ensemble hydrographique. Ainsi, dans chaque ensemble hydrographique, il est envisagé la création d'un comité de bassin regroupant des représentants de l'Etat, des collectivités territoriales et des groupes socio-professionnels concernés par la gestion de l'eau ainsi que des personnalités qualifiées. Ce comité de bassin délibère sur les projets de schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux, les programmes d'intervention de l'Etat et des collectivités territoriales concernant l'eau, ainsi que sur le taux des redevances éventuelles. Au niveau local, les conseils d'arrondissement et les conseils de village ou de quartier de ville doivent être consultés sur les questions relatives à l'eau qui relèvent des compétences de la commune.

1.2. Avancement du processus d'instauration de la Gestion Intégrée des Ressources en Eau

2.1.2. Avancement du processus d'instauration de la GIRE

La Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE) est une approche qui consiste à prendre en considération ensemble et à concilier les différentes utilisations et fonctions

physiologiques, socioculturelles, économiques, environnementales de l'eau, ainsi que ses éventuels effets négatifs sur les personnes, les biens ou l'environnement¹⁴.

Elle repose sur les trois critères fondamentaux qui sont :

- l'efficacité économique de l'utilisation de l'eau compte tenu de la rareté et du caractère épuisable de la ressource ;
- l'équité pour la reconnaissance du droit fondamental de chacun, pour son bien-être ;
- la durabilité environnementale et écologique : les utilisations actuelles des ressources en eau devraient être gérées de façon à ne pas affaiblir les systèmes vitaux et mettre en danger l'utilisation de cette ressource pour les générations futures.

La réussite de la transition vers la gestion intégrée des ressources en eau nécessite une implication des décideurs et des techniciens de l'eau mais également des opérateurs du secteur et des bénéficiaires à la base. Au niveau de la recherche appliquée, la sous-région offre des opportunités aux acteurs pour leur formation supérieure dans les métiers de l'eau grâce à l'existence des structures à caractère sous-régional qui interviennent dans le secteur de l'eau (CREPA, groupe 2iE, Centre AGRHYMET, Universités etc).

L'atteinte d'une bonne gouvernance de l'eau est soumise à un certain nombre d'actions stratégiques telles que la volonté et l'engagement politique ; l'adoption d'une approche transparente, cohérente et équitable ; la mise en œuvre d'actions concrètes sur le terrain ; le renforcement des capacités des institutions et des acteurs ; l'utilisation des canaux de relais de l'information et de suivi.

En résumé, bien que reconnaissant l'impossibilité d'une standardisation du processus GIRE, les milieux spécialisés estiment que ce processus devrait comprendre au moins les dix (10) étapes clés suivantes indépendamment des lieux ou des pays de sa mise en œuvre :

- prise de conscience et volonté politique ;
- création d'un cadre favorable à la participation de l'ensemble des acteurs ;
- connaissance des activités passées et en cours ;
- identification des problèmes de gestion ;

¹⁴ [(GWP/TAC, 2000)] GWP/TAC (2000), *La gestion intégrée des ressources en eau, TAC Background Papers, N°4*, Partenariat Mondial de l'Eau/Comité Technique Consultatif, ISBN: 91-631-0289-7, 80p.

[(GWP/TEC, 2005)] GWP/TEC (2005), *Catalyser le changement : manuel de développement de la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) et des stratégies d'efficacité de l'eau; Document élaboré par le Comité Technique du Global Water Partnership (GWP) avec le soutien du Ministère Norvégien des Affaires Etrangères*, ISBN : 91-85321-57-5, 52p.

- identification des fonctions de gestion ;
- identification des opportunités et des contraintes ;
- élaboration du plan d'action et de la stratégie GIRE ;
- approbation du plan d'action et de la stratégie GIRE ;
- initiation des actions de renforcement des capacités ;
- élaboration du portefeuille de projets et de la stratégie de financement.

1.2.1.1. De la gestion sectorielle à l'idée de gestion intégrée

La gestion intégrée des ressources en eau est un processus qui favorise le développement et la gestion coordonnée de l'eau, des terres et des ressources connexes, en vue de maximiser, de manière équitable, le bien-être économique et social, sans pour autant compromettre la pérennité d'écosystèmes vitaux¹⁵ (GMP/TAC, 2000; GMP/TEC, 2005).

Pour être efficace, la gestion des ressources en eau devrait ainsi prendre en compte trois perspectives :

- la perspective politique de planification socio-économique globale (e.g. Etats, collectivités territoriales) ;
- la perspective de la «mobilisation» de la ressource en eau (e.g. administrations de l'eau) ;
- la perspective des «secteurs utilisateurs» de la ressource en eau (e.g. agriculture, énergie, AEP, environnement ...).

Cette gestion déclinée selon trois perspectives se déploie à toutes les échelles d'organisation géopolitique territoriale (e.g. régional, national, bassin, décentralisé).

1.2.1.2. Des avancées significatives

Le document de politique nationale de l'eau a précisément pour but de fixer les orientations pour surmonter les défis et agir en matière de connaissance, de planification, de mobilisation et de mise en valeur durable des ressources en eau, pour faire du secteur de l'eau un

¹⁵ [(GWP/TAC, 2000)] GWP/TAC (2000), *La gestion intégrée des ressources en eau, TAC Background Papers, N°4*, Partenariat Mondial de l'Eau/Comité Technique Consultatif, ISBN: 91-631-0289-7, 80p.
[(GWP/TEC, 2005)] GWP/TEC (2005), *Catalyser le changement : manuel de développement de la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) et des stratégies d'efficience de l'eau; Document élaboré par le Comité Technique du Global Water Partnership (GWP) avec le soutien du Ministère Norvégien des Affaires Etrangères*, ISBN : 91-85321-57-5, 52p.

véritable levier de développement durable. Elle intervient surtout pour apporter des solutions à la gestion sectorielle et morcelée de l'eau, et répondre à une volonté des citoyens de s'impliquer dans la gestion de l'eau.

La Politique nationale de l'eau est fondée sur l'approche GIRE, et sa mise en œuvre sera réalisée à travers le Plan d'action national de gestion intégrée des ressources en eau (PAN-GIRE).

La loi n°87-016 du 21 Septembre 1987 portant Code de l'eau, restée inappliquée a été révisée afin d'adapter le cadre législatif au contexte de la démocratie, de la décentralisation et aux principes de la GIRE. Ce succès est consacré par la promulgation de la nouvelle loi n°2010-44 du 24 novembre 2010 portant gestion de l'eau en République du Bénin.

Le document de Plan d'Action National de Gestion Intégrée des Ressources en Eau (PANGIRE) est élaboré et attend son adoption par le Gouvernement. Il est la pièce maîtresse du processus de transition vers la GIRE. Il définit le cadre national approprié de gestion de l'eau pour la mise en œuvre de la politique nationale de l'eau, ainsi que les modalités et le calendrier de sa mise en place progressive. Il identifie les actions spécifiques à entreprendre à cet effet, ainsi que les ressources à mobiliser pour leur mise en œuvre et leur suivi. Il s'inspire des principes de gestion de l'eau internationalement reconnus, en les adaptant aux conditions nationales. Son adoption marquera la fin de la phase de transition du Bénin vers la GIRE. Des actions coordonnées pourront ensuite être menées pour l'effectivité de la GIRE dans le pays.

1.2.1.3. Des perspectives

Au titre des perspectives actuelles de la GIRE au Bénin, il y a lieu d'insister sur l'élaboration et la mise en œuvre des schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) et des schémas d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE) tels que fixées par la nouvelle loi en vigueur dans le secteur.

Le SDAGE fixe, pour chaque bassin, les orientations fondamentales d'une gestion équilibrée de la ressource en eau. Il est préparé par le Comité de bassin appuyé par l'Agence Nationale de Gestion de l'Eau, et approuvé par le ministre chargé de l'eau après avis du Conseil National de l'Eau. Le SDAGE prend en compte les principaux programmes arrêtés par les collectivités publiques et définit de manière générale et harmonisée les objectifs de quantité et de qualité des eaux ainsi que les aménagements à réaliser pour les atteindre. Il est complété, en tant que de besoin, par des Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) élaborés par des commissions locales de l'eau pour guider à court et moyen terme la gestion opérationnelle de

masses d'eau superficielles ou souterraines à l'échelle des sous bassins qui constituent des périmètres avec une certaine cohérence physique et technique. Il fixe, au niveau d'un sous-bassin ou d'un groupement de sous-bassins de l'ensemble hydrographique, les objectifs généraux d'utilisation, de mise en valeur et de protection quantitative et qualitative des ressources en eau superficielle et souterraine et des écosystèmes aquatiques ainsi que de préservation des zones humides.

Le SDAGE et le SAGE sont donc des outils de planification dont la mise en place fait cristalliser des besoins émergents en matière de connaissance scientifique du potentiel de ressources en eau et donc, de modélisation du cycle de l'eau et de ses variations. Et c'est en cela que la présente thèse constitue une contribution au contexte national de GIRE au Bénin.

ANNEXE 2: Description des projets AMMA-CATCH et OUEME-2025

2.1. Description du programme AMMA

2.1.1 Rappel des objectifs scientifiques

Depuis les années 70, le Bénin comme les autres pays de l'Afrique de l'Ouest est soumis à des perturbations climatiques dont les conséquences sont la sécheresse de 1970 et 1980¹⁶ accompagnée d'une réduction de la disponibilité des ressources en eau¹⁷, le développement des maladies tels que le paludisme, la méningite, le choléra. C'est dans ce contexte d'impacts socio-économiques et démographiques forts, auxquels s'ajoute la perspective de changement global lié à l'augmentation des gaz à effet de serre, qu'il est apparu essentiel à la communauté scientifique de décrire et de comprendre les modes de variabilité du climat en Afrique de l'Ouest pour en améliorer les prévisions¹⁸.

La mousson d'Afrique de l'Ouest est caractérisée par une très forte variabilité interannuelle et décennale, dont les conséquences pour les populations sont énormes. Une pluviométrie capricieuse, de faibles capacités de prédiction et les modifications rapides de

¹⁶ [(Bokonon-Ganta E. B., 1987)] Bokonon-Ganta E. B. (1987), Les climats de la région du Golfe du Bénin; Thèse de Doctorat de 3ème cycle, Institut de Géographie/Université de Paris-Sorbonne, Paris (France), 248p. + annexes.

[(Le Barbé L. and Lebel T., 1997)] Le Barbé L., and Lebel T. (1997), Rainfall climatology of the Hapex-Sahel region during the years 1950–1990; *J. Hydrol.*, 188/189 pp. 43–73.

[(Houndénou C., 1999)] Houndénou C. (1999), Variabilité climatique et maïsiculture en milieu tropical humide, l'exemple du Bénin, diagnostic et modélisation; PhD thesis, Université de Bourgogne, Dijon (France), 390p.

[(Yabi I., 2002)] Yabi I. (2002), Particularités de la variabilité pluviométrique entre 7° et 8° de latitude nord au Bénin; Mémoire de Maîtrise, FLASH/UAC, Abomey-Calavi (Bénin), 29p.

¹⁷ [(Vissin E. W., 2001)] Vissin E. W. (2001), Contribution à l'étude de la variabilité des précipitations et des écoulements dans le bassin béninois du fleuve Niger; Mémoire de DEA, Université de Bourgogne, Dijon (France), 53p.

[(Tossa, A. A. Y., 2005)] Tossa A. A. Y. (2005), Changements climatiques et dynamique hydrologique au Bénin; Mémoire DEA, FLASH/UAC, Abomey-Calavi (Bénin), 91p.

¹⁸ [(Nicholson S. E., 1979)] Nicholson S. E. (1979), Revised rainfall series for the West African subtropics; *MWR*, 107 pp. 620-623.

[(Nicholson S.E., 1986)] Nicholson S.E. (1986), The spatial coherence of African rainfall anomalies, interhemispheric teleconnexions; *Journal of Climate and applied Meteo*, 25 pp. 1365-1381.

[(Boko M., 1988)] Boko M. (1988), Climats et communautés rurales du Bénin, Rythmes climatiques et rythmes de développement; Thèse d'Etat, CRC/UB, Dijon (France), 2 volumes, 608p.

[(Moron V., 1994)] Moron V. (1994), Variabilité des précipitations en Afrique tropicale au nord de l'équateur (1933-1990) et relations avec les températures de surface océanique et la dynamique de l'atmosphère; PhD thesis, CRC/UB, Dijon (France), 219p. + annexes.

[(Houndénou C. and Hernandez K., 1998)] Houndénou C., and Hernandez K. (1998), Modification de la saison pluvieuse dans l'Atacora (1961-1990). Un exemple de sécheresse au Nord-Ouest du Bénin (Afrique Occidentale); *Sécheresse*, 9(1) pp. 23-34.

[(Le Barbé L. et al., 2002)] Le Barbé L., Lebel T., and Tapsoba D. (2002), Rainfall variability in west Africa during the years 1950-1990; *Journal of Climate*, 15(2) pp. 187-202.

l'environnement conduisent à des conditions particulièrement sévères qui menacent le succès des politiques de développement. Partant de ce constat, les trois objectifs principaux du programme AMMA¹⁹ sont les suivants :

- (1) Améliorer la compréhension de la mousson ouest-africaine et de son influence sur l'environnement physique, chimique et la biosphère aux échelles régionale et globale;
- (2) Produire les connaissances qui permettront de relier la variabilité du climat aux problèmes de santé, de ressources en eau et de sécurité alimentaire pour les nations d'Afrique de l'Ouest et définir les stratégies de surveillance appropriées;
- (3) Faire en sorte que la recherche multidisciplinaire mise en place soit effectivement relayée par une activité dans les domaines de la prévision et de la prise de décision.

La complexité inhérente à un tel projet multidisciplinaire, qui affiche des ambitions aussi bien dans l'étude des processus que dans celles de leurs interactions, a nécessité la mise en place d'un programme d'observation spécifique couvrant une large gamme d'échelles, allant du régional au local. Pierre-Etienne Bisch, Directeur de Publication du magazine « Atmosphériques » de Météo-France écrit dans son éditorial²⁰ : « Le dispositif expérimental mis en œuvre montre une volonté d'intégration multidisciplinaire unique : AMMA a ainsi mobilisé six avions instrumentés – ce furent les premières missions de l'ATR42 de Météo-France et du Falcon20 du CNRS, gérés par SAFIRE -, trois navires océanographiques et plusieurs dispositifs expérimentaux exceptionnels. Certains systèmes mis en œuvre sont des premières mondiales : les driftsondes sur le Sahel et l'Atlantique, les mesures aéroportées radar/lidar sous la trace de Cloudsat/Calipso ». Quant au magazine de la recherche européenne RD'T'info²¹ publié par l'unité Information et Communication de la Direction Générale de la Recherche de la Commission Européenne, « c'est donc une spectaculaire armada scientifique qui s'est déployée, ...AMMA aura, au final, mobilisé près de 500 chercheurs issus d'une trentaine de pays (des Etats-Unis au Tchad en passant par l'Union²² pour un coût total qui dépassera sans doute les 50 millions € ».

2.1.2. Un programme d'observation multi-échelles

2.1.2.1. Echelles spatiales et zones d'étude

¹⁹ <http://www.amma-international.org>

²⁰ N°32, Novembre 2006

²¹ N°51 de Décembre 2006

²² Union Européenne

Quatre échelles spatiales principales sont à distinguer :

- (i) L'échelle globale : c'est l'échelle à laquelle la mousson d'Afrique de l'Ouest interagit avec le reste du globe, interactions déterminantes pour sa variabilité saisonnière à décennale. L'océan pris dans sa globalité est un vecteur essentiel du forçage exercé de l'extérieur sur le système climatique régional et, réciproquement, les aérosols émis et transportés par la mousson ont un impact sur le climat de la planète dans son ensemble.
- (ii) L'échelle régionale : c'est l'échelle à laquelle on doit étudier les interactions au sein du système couplé Afrique de l'Ouest- proche Océan Atlantique - atmosphère Atlantique (spécialement le Golfe de Guinée). Les structures atmosphériques telles que les jets et les ondes d'est, d'une part, les effets mémoires liés à la végétation et aux températures de l'océan, d'autre part, sont des objets d'étude privilégiés à cette échelle (*Figure 2- 1*).
- (iii) La méso échelle : c'est l'échelle des systèmes convectifs organisés qui sont à l'origine de l'essentiel des précipitations et dont la dynamique est influencée par les rétroactions de la surface : les bassins versants étudiés dans AMMA, tels que celui de l'Ouémé montré à la *Figure 2- 1* sont des objets d'étude privilégiés à cette échelle.
- (iv) L'échelle locale : c'est l'échelle de la convection locale qui joue un grand rôle dans la variabilité interne aux champs de pluie et dans le forçage des systèmes hydrologiques, et est donc déterminante pour comprendre la variabilité des rendements agricoles et de la répartition des ressources en eau.

AMMA cherche à améliorer notre compréhension de la manière dont ces différentes échelles interagissent et se combinent pour mieux appréhender et modéliser la variabilité du système de mousson, y compris pour ce qui a trait aux sources et au transport de vapeur d'eau, d'aérosols et de certains composés chimiques clés, et ceci que ce soit régionalement ou à l'échelle planétaire.

2.1.2.2. Echelles de temps et périodes d'étude

Trois périodes d'étude sont définies pour échantillonner la variabilité interannuelle et la variabilité intra-saisonnière, ainsi que pour documenter correctement le cycle saisonnier moyen

et, éventuellement, donner des indications sur les tendances à plus long terme. Ces trois périodes sont la LOP (2001-2010), l'EOP (2005-2007) et la SOP (2006) :

- la période d'observations à long terme (LOP), destinée à documenter les variations interannuelles. La LOP est soutenue par différents observatoires de recherche en environnement (ORE), dont AMMA-CATCH, qui regroupe les observations (hydrologie-végétation) à long terme sur les trois sites de l'expérience (Bénin, Niger, Mali) ;
- la période d'observations renforcées (EOP, 2005-2007) est conçue pour documenter sur un transect climatique, le cycle annuel des processus atmosphériques et de surface, et les mémoires interannuelles ; et enfin,
- la période d'observations spéciales (SOP, 2006) est dédiée aux observations détaillées des processus spécifiques aux 3 phases principales de la saison des pluies : (i) début de mousson, (ii) maximum de mousson (iii) retrait de la mousson, et a connu un déploiement de moyens de recherche lourds (avions, bateaux, radars, ...).

2.1.3 Volet hydrologique et observatoire AMMA-CATCH

La compréhension du cycle hydrologique continental et de ses interactions avec l'atmosphère est un volet important du programme. Le support de ces études est l'Observatoire de Recherche en Environnement (ORE), ou « Service d'Observation » AMMA-CATCH, qui vise à maintenir sur 10 ans (2001-2010) ou plus, des observations hydro-météorologiques coordonnées sur les 3 sites du Bénin, Niger et Mali. Financé par le Ministère français de la recherche et par l'IRD avec la contribution de l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU-France), cet observatoire fonctionne sur le terrain grâce à un partenariat avec les services opérationnels des pays d'accueil, notamment les directions chargées de la météorologie et des ressources en eau.

L'année 2011 est la 15^{ème} année de fonctionnement de l'Observatoire Hydro-météorologique de la Haute Vallée de l'Ouémé (OHHVO), instrumenté dans le cadre du programme AMMA-CATCH depuis 1997.

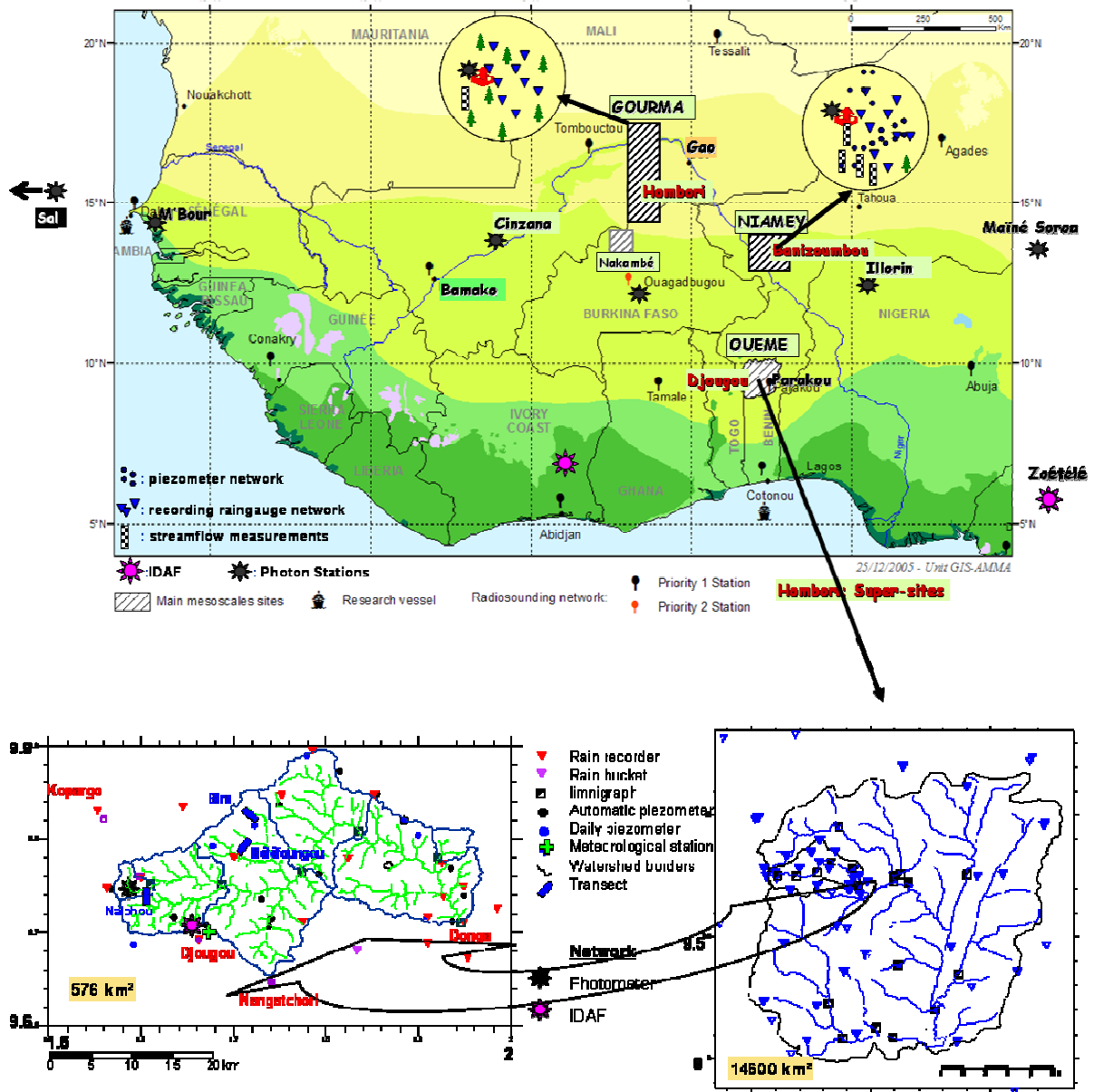


Figure 2-1 : Observations de long terme sur le continent

Sur le continent, l'échelle régionale est prise en compte à la fois par les réseaux opérationnels et par des réseaux spécifiques. Les trois sites de méso-échelle (Gourma, Niamey, Ouémé) incluent des « super-sites » et des sites locaux intensifs. Cette stratégie est illustrée de manière détaillée ci-dessus sur le bassin de l'Ouémé.

2.2. Description du projet OUEME-2025

2.2.1 Contexte, Motivations et Justifications

Le bassin de l'Ouémé se divise en deux parties : une première partie du bassin appelée « Ouémé Supérieur », est l'objet du projet « OUEME-2025 » et se trouve sur le socle Dahomeyen tandis que la seconde partie appelée « Ouémé Inférieur » se trouve sur les formations sédimentaires du bassin côtier.

Le fleuve Ouémé dans son cours supérieur en amont de la station hydrométrique de Bonou est long de 523 km²³ et son bassin couvre une superficie de 46.500 km². C'est sa Haute vallée d'environ 14.600 km² qui est instrumentée dans le cadre du projet AMMA-CATCH et suivie depuis 1997.

La variabilité climatique observée au niveau de la sous-région, couplée à la différence de régime pluviométrique observée à l'échelle du bassin a dégradé significativement le régime hydrologique du cours d'eau. En effet, la sahéliisation progressive et généralisée du climat ouest africain observée pendant les 30-40 dernières années, et marquée par un déficit pluviométrique persistant, s'est accompagnée d'une modification hydrologique du fleuve Ouémé et de ses affluents avec des valeurs moyennes de débits de crue et d'étiage de plus en plus faibles.

Au Bénin, le bassin de l'Ouémé représente à lui seul, environ 65% des eaux de surface et 60% des eaux souterraines. Il représente ainsi un bassin stratégique pour le développement du Bénin, et la mise en place concrète d'une GIRE à son échelle constitue une nécessité qui s'impose à tous. La GIRE requiert, comme base technique de sa fondation, le suivi scientifique et la connaissance de la ressource en eau, des besoins et des usages à l'échelle du bassin considéré, de leur évolution quantitative et qualitative prenant en compte les variabilités et changements globaux (climatiques et anthropiques) actuels. C'est au développement de cette base technique de la GIRE à l'échelle du bassin de l'Ouémé que s'est attelé le projet OUEME-2025 depuis son démarrage en juin 2007. Elle implique ainsi un suivi scientifique de la ressource et de son évolution dans un contexte de variabilité et changement climatique. Pour ce faire, il apparaît indispensable que les réseaux d'observation soient pertinemment densifiés, suivis et maintenus avec une qualité constante sur le plus long terme possible.

La haute vallée de l'Ouémé instrumentée progressivement depuis 1997 (ORE/SO AMMA-CATCH) fait l'objet d'un suivi renforcé des processus hydrologiques et des interactions

²³ [(Le Barbé L. et al., 1993)] Le Barbé L., Alé G., Millet B., Texier H., Borel Y., and Gualde R. (1993), *Les ressources en eaux superficielles de la République du Bénin*; ORSTOM/DH, ORSTOM ed., Collection Monographies Hydrologiques N°11, Paris (France), ISBN: 2-7099-1168-X, 540p.

surface-atmosphère. Ce réseau dense se situe en tête du bassin et en couvre près du 1/3 de la superficie, les 2/3 en aval restants (32400 km²) étant très peu suivis compte tenu des moyens nationaux limités. Cet état de choses a motivé la DG-Eau à initier en 2007, en collaboration avec l'Université d'Abomey-Calavi, le projet « OUEME-2025 » en partenariat avec d'autres équipes de recherche nationales et étrangères.

Au milieu des années 2000, le manque de moyens financiers explique en partie l'abandon de la plupart des stations nationales de suivi hydrologique et la qualité peu satisfaisante du réseau hydrométrique sur les 2/3 en aval du bassin qui draine pourtant 65% des eaux de surface et 60% des eaux souterraines du pays ; et regorge de 65% de la population sur 42% du territoire national. Ce déficit de données freine la résolution d'un certain nombre de problèmes spécifiques de développement à l'échelle du Bénin en général, et du bassin en particulier.

2.2.2 Objectifs

Le projet OUEME-2025 vise le triple objectif général suivant :

- i) Comprendre les processus hydrologiques à l'échelle du bassin de l'Ouémé dans un contexte de changement climatique,
- ii) Identifier la contribution opérationnelle de cette compréhension aux stratégies d'adaptation du socio-écosystème (systèmes d'approvisionnement en eau potable, politique d'aménagement du territoire, de développement rural, de développement économique...), et
- iii) Former et renforcer les capacités des jeunes chercheurs de la sous-région à produire la science nécessaire pour répondre aux enjeux du développement, notamment dans le secteur de l'eau.

Ce triple objectif est précisé en termes d'objectifs scientifiques comme suit :

- (i) Caractériser la variabilité climatique interannuelle, surtout celles des précipitations et les estimer quantitativement à des échelles compatibles aux applications hydrologiques ;
- (ii) Documenter la variabilité saisonnière des flux verticaux à la surface terrestre (évapotranspiration et CO₂) en relation avec le bilan d'énergie pour deux types de végétation naturelle et anthropisée (jachère herbeuse et arbustive, forêt claire) afin de permettre une quantification plus fiable de la composante majeure du cycle hydrologique qu'est l'évapotranspiration;

- (iii) Comprendre et modéliser le fonctionnement hydrologique du bassin (et de ses sous-bassins) et des communications éventuelles entre les différents réservoirs (souterrain et superficiel) pour reproduire la dynamique saisonnière des ressources en eau et évaluer leur disponibilité quantitative d'ici 2025 selon différents scénarios climatiques; évaluer l'impact hydrologique de la variabilité climatique sur le régime du cours d'eau et la disponibilité de ses ressources en eau superficielles et souterraines.

2.2.3 Aspects technico-scientifiques

Le projet OUEME-2025 a réalisé l'ambition de renforcer les acquis du projet AMMA-CATCH, en réhabilitant et en complétant le réseau d'observations existant sur l'Ouémé Supérieur (OHHVO exclue) avec de nouveaux équipements de suivi des eaux continentales [5 limnigraphes et 2 piézomètres²⁴ (OUEME-2025, 2008a)], et en améliorant le suivi des stations pour la collecte et le traitement des données. Sur l'OHHVO suffisamment densifié et en cours de suivi dans le cadre du programme AMMA-CATCH, OUEME-2025 a installé une nouvelle station de mesure de flux verticaux (acquisition Campbell, mesures météorologiques de bases, bilan radiatif CNR1, anémomètre sonique, LICOR 7500) en vue de compléter le dispositif d'acquisition de données de flux surface-atmosphère à une échelle plus fine.

L'exploitation scientifique des données ainsi acquises, avec celles anciennes et récentes par le biais d'une recherche pluridisciplinaire sur le cycle de l'eau a permis de fournir des réponses relativement aux volets suivants :

- (i) la quantification et l'étude de la climatologie des précipitations orientée vers l'impact de la variabilité climatique interannuelle sur la disponibilité des ressources en eau du bassin ;
- (ii) l'évaluation et la caractérisation saisonnière des flux verticaux (surface-atmosphère) pour 2 types de végétation ;
- (iii) la modélisation du fonctionnement hydrologique du bassin pour évaluer la disponibilité des ressources en eau du bassin ; l'approche utilisée complète le dispositif multi-échelle d'AMMA constitué de deux sites imbriqués (super-site Donga hautement instrumenté sur 586 km² et OHHVO sur 14.600 km²), tous contenus dans le bassin de l'Ouémé Supérieur (46.500 km²) ;

²⁴ [(OUEME-2025, 2008a)] OUEME-2025 (2008a), Etudes d'implantation et contrôle des travaux de deux (2) piézomètres dans le Département du Zou, Rapport d'implantation; élaboré par NOSTRA-LTD, DG-Eau/UAC/IRD, Cotonou (Bénin), 10p. + annexes

2.2.4 Orientations de la phase 2 du projet

Dans le cadre du projet OUEME-2025 phase 1, les aspects scientifiques de la GIRE à l'échelle du bassin de l'Ouémé Supérieur sont développés. Il s'agit notamment d'évaluer la disponibilité quantitative des ressources en eau (superficielles et souterraines) du bassin à l'horizon 2025 aux moyens des données/modèles physiques, climatologiques, hydrologiques... Le projet laisse ainsi entrevoir l'existence d'une base solide en matière de connaissance et de données sur les ressources en eau du bassin. De plus, il vient consolider les acquis et résultats d'autres initiatives ayant œuvré dans le sens d'un approfondissement des connaissances disponibles et d'une élaboration d'outils ou systèmes d'aide à la gestion de l'eau.

Les résultats de la phase 1 du projet ont permis de dégager les perspectives suivantes :

- ➔ l'évaluation prospective à l'horizon 2025 des ressources en eau superficielles et souterraines, des pertes de terre sur les 6 sous-bassins prioritaires (l'Ouémé à Bétérou, à Savè, à Zangnanado, à Bonou, la Térou à Cote 238 et le Zou à Atchérigbé) avec les modèles mensuels utilisés (GR2M et SWAT)²⁵, en tenant compte des scénarii climatiques et anthropiques les plus plausibles ;
- ➔ l'anticipation de l'étude en vue de l'installation des périmètres de protection pour des zones de captage existants ou en cours de développement à l'échelle de l'Ouémé Supérieur, en s'inspirant de l'étude de vulnérabilité du site de Godomey²⁶; cette perspective a été concrétisée par l'élaboration et la mise en place d'un guide des périmètres de protection des captages²⁷;

²⁵ [(Sintondji L. O., 2005)] Sintondji L. O. (2005), Modelling the rainfall-runoff process in the Upper Ouémé catchment (Térou in Bénin Republic) in a context of global change : extrapolation from the local to the regional scale; PhD thesis, University of Bonn, Bonn (Allemagne), 205p.

[(Ahouansou D. M. M., 2008)] Ahouansou D. M. M. (2008), Modélisation du bilan hydrologique du bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Savè : contribution à la gestion intégrée des ressources en eau; Thèse d'Ingénieur, FSA/UAC, Abomey-Calavi (Bénin), 112p.

[(Vodounnon J., 2008)] Vodounnon J. (2008), Contribution à l'étude de la caractérisation hydro-pluviométrique du bassin de l'Ouémé avec le modèle GR2M; Mémoire de Maîtrise, FLASH/UAC, Abomey-Calavi (Bénin), 83p.

²⁶ [(Da-Silveira M. and Tossa A., 2009)] Da-Silveira M., and Tossa A. (2009), Evaluation de la vulnérabilité des périmètres de protection des aquifères du bassin côtier du Bénin aux occupations anthropiques : cas de Godomey ; Rapport d'étude; Projet OUEME-2025, DG-Eau, Cotonou (Bénin), 91p. + annexes.

²⁷ [(MEE/DG-Eau, 2010)] MEE/DG-Eau (2010), Mise en place d'un dispositif de protection des zones de captage d'eau potable : Guide méthodologique à l'usage des communes, Version finale; Ministère de l'Energie et de l'Eau/Direction générale de l'Eau, Cotonou (Bénin), 30p. + annexes.

- ➔ l'extension de l'étude de sécurisation de l'AEP de Parakou²⁸ aux autres villes en expansion, notamment celles alimentées à partir des eaux de surface (Djougou, Savalou, Savè) en intégrant la recherche de solutions appropriées (aménagement de nouveaux sites de mobilisation, mesures de gestion de bassin, gestion coordonnée des retenues...);
- ➔ l'évaluation des usages et besoins en eaux à des fins industrielles ;
- ➔ l'extension de l'étude relative à la gestion communautaire des ressources en eau et les conflits d'usage à l'Ouémé Supérieur²⁹.

L'importance de ces perspectives justifie la formulation d'une phase 2 dudit projet afin de satisfaire le besoin de valorisation opérationnelle des données et résultats scientifiques déjà acquis. De plus, l'ensemble des travaux déjà réalisés a débouché sur un certain nombre de recommandations³⁰ à l'endroit de plusieurs acteurs (des secteurs de l'eau, de la météorologie, de l'environnement, de l'agriculture, de l'élevage, de la santé publique et des communes) qu'il convient de diffuser, vulgariser et appliquer.

Actuellement au Bénin, la mise en place du cadre réglementaire pour l'instauration et l'opérationnalisation de la GIRE est en cours. Elle annonce des perspectives qui motivent l'anticipation en matière de dimension technique de la GIRE. Avec les données et le degré de connaissance des ressources dont on dispose sur le bassin de l'Ouémé, il apparaît aujourd'hui possible, d'y tester un mécanisme de GIRE plus ou moins complet. Cette gestion, dont le schéma reste à concevoir, doit prendre en compte des aspects socio-économiques et politiques liés au secteur de l'eau au Bénin en général, et aux spécificités du bassin de l'Ouémé en particulier. Par exemple, la décentralisation en marche au Bénin depuis bientôt 10 ans confère aux communes une compétence légale en matière de satisfaction des besoins en eau sur leur territoire de compétence. Mais, force est de constater que l'exercice de cette compétence est confronté à des difficultés techniques, organisationnelles et financières au risque de compromettre une gestion décentralisée efficace de l'eau.

²⁸ [(Assouma K., 2009)] Assouma K. (2009), Etude de sécurisation de l'AEP de la ville de Parakou à partir des eaux de surface; Mémoire de DESS, CEFORP/UAC, Abomey-Calavi (Bénin), 64p.

²⁹ [(BOKO W. Y., 2008)] BOKO W. Y. (2008), Gestion communautaire des ressources en eau et conflits d'usage dans la basse vallée de l'Ouémé; DESS thesis, CIFRED/UAC, Cotonou (Bénin), 63p.

³⁰ [(OUEME-2025, 2008b)] OUEME-2025 (2008b), Rapport Général, Période du 1er juin au 30 novembre 2008, Version de séance à l'attention des membres du Comité de Pilotage, Réunion du 27 janvier 2009; Projet OUEME-2025, DG-Eau/UAC/IRD/ONG-GRDI, Cotonou (Bénin), 34p. + annexes.,

La phase 2 intégrant des aspects techniques et socio-politiques de la GIRE est une suite logique du travail d'approfondissement des aspects scientifiques de cette gestion. Son objectif global est de développer et de tester un mécanisme de GIRE à l'échelle du bassin de l'Ouémé Supérieur. Cet objectif global peut être précisé en 3 objectifs spécifiques comme suit :

- i. concevoir et réaliser des actions pilotes pour la GIRE à partir des résultats déjà disponibles : études relatives à la mobilisation/exploitation des ressources en eau et test d'un système de GIRE ;
- ii. finaliser le socle technique indispensable pour la GIRE : amélioration/extension du suivi du cycle de l'eau aux aspects qualitatifs et poursuite de la recherche sur les ressources en eau dans le cadre des perspectives initialement dégagées ;
- iii. favoriser/contribuer à l'insertion des jeunes compétences formées dans le domaine de la GIRE.

ANNEXE 3: Stations hydrométriques de l'OHHVO et superficie du bassin drainé

Nom Rivière	Station hydrométrique				Superficie contrôlée (km ²)	Observations
	Nom	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)		
Térou	Cote 238 (Wanou)	9,088	2,092	265	3.133	Réseau National
Ouémé	Affon	9,751	2,095	329	1.165	
Yérou-Marou	Barerou	9,350	2,367	292	2.162	
Ouémé	Bétérou	9,199	2,267	273	10.080	
Alpouro	Bori (Gourou)	9,755	2,399	306	1.607	
Wé-Wé	Wéwé	9,385	2,116	323	293	
Aguimo	Aguimo	9,127	2,022	291	402	
Donga	Ara	9,752	1,610	453	12	
Ouémé	Aval Sani	9,723	2,154	322	3.283	
Donga	Bokpérou	9,780	1,921	365	17	
Donga	Donga-Affon	9,727	2,095	327	1.330	
Donga	Donga-Pont	9,711	1,945	349	586	
Térou	Igbomakoro	9,082	1,881	310	2.334	
Donga	Kolokondé	9,752	1,687	410	105	
Donga	Koua	9,764	1,774	390	292	
Donga	Nékété	9,809	1,835	373	409	
Sani	Sani	9,756	2,123	325	745	
Térou	Sarmanga	9,230	1,819	366	1.378	
Ouémé-Affon	Tébou	9,954	1,865	376	515	

ANNEXE 4 : Variante du test de Kolmogorov-Smirnov

Le test statistique utilisé dans ce travail, pour comparer les distributions statistiques expérimentales est une variante du test de Kolmogorov-Smirnov³¹ pour deux échantillons indépendants, avec comme hypothèse zéro ou nulle : le critère Vol (resp. Qmax) suit la même loi dans les 2 lots de jeux LQi et LNi.

En théorie, tester si deux variables aléatoires X_i et Y_i obéissent à la même loi revient à comparer les fonctions de répartition empiriques suivantes :

$$FX_{n_1}(x) = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} 1_{\{X_i \leq x\}} \quad \text{et} \quad FY_{n_2}(x) = \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} 1_{\{Y_i \leq x\}}$$

On définit alors la statistique du test comme suit :

$$\zeta_{n_1, n_2} = \sqrt{\frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2}} \sup_{x \in \mathbb{R}} |FX_{n_1}(x) - FY_{n_2}(x)|$$

Si l'hypothèse nulle $H_0 = \{Loi(X_i) = Loi(Y_i)\}$ est vraie alors ζ_{n_1, n_2} tend en loi vers une variable aléatoire S dont la loi est indépendante de celles de X et Y. De plus, on connaît sa fonction de répartition :

$$K(s) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} (-1)^k e^{-2k^2 s^2} \quad s > 0$$

Si l'hypothèse nulle est fautive alors ζ_{n_1, n_2} diverge presque sûrement.

En pratique, on utilise ce résultat à travers les 5 étapes suivantes :

- on dispose de l'observation des échantillons $X_1 = x_1, \dots, X_{n_1} = x_{n_1}$ et $Y_1 = y_1, \dots, Y_{n_2} = y_{n_2}$ et,
- on calcule les fonctions de répartition empiriques FX_{n_1} et FY_{n_2} à partir des échantillons,
- on calcule la valeur de $\zeta_{n_1, n_2} = z_{n_1, n_2}$,
- on calcule la p-valeur $\alpha_{n_1, n_2} = P(S \geq z_{n_1, n_2})$,

³¹ [(Saporta G., 1990)] Saporta G. (1990), *Probabilités, Analyse des Données et Statistique*; Technip ed., Paris (France), ISBN: 2-710 805 650, 493p.

- si α_{n_1, n_2} prend des valeurs faibles inférieures à $\alpha = 5\%$, alors on rejette l'hypothèse H_0 sinon on l'accepte (α représente le niveau de confiance du test).

ANNEXE 5: Méthode de décomposition hydrogéochimique du débit total

Le débit total à l'exutoire (Q_t) est la somme du ruissellement direct en surface (Q_r) et de l'exfiltration de sub-surface (Q_s) :

$$Q_t = Q_r + Q_s$$

Ces 3 termes peuvent aussi être reliés par la relation suivante basée sur le bilan de masse chimique d'un traceur donné³², par exemple la conductivité électrique :

$$Q_t * C_t = Q_r * C_r + Q_s * C_s$$

où C_t est la conductivité électrique de l'eau écoulée à l'exutoire ; C_r la conductivité électrique de l'eau ruisselée et C_s la conductivité électrique de l'eau exfiltrée.

Cette relation, valable à chaque instant, l'est aussi à l'échelle annuelle, dans la mesure où C_r et C_s peuvent être considérées comme constantes et égales à une valeur moyenne : pour l'Ouémé à Bétérou, les valeurs suivantes³³ ont été proposées et retenues dans le cadre de la présente étude : $C_r=10 \mu\text{S}/\text{cm}$ et $C_s=90 \mu\text{S}/\text{cm}$.

En considérant le système d'équations linéaires à 2 inconnues (Q_r et Q_s) formés par les équations ci-dessus, et avec des valeurs moyennes annuelles de C_t et de Q_t mesurées à l'exutoire, il est possible de calculer le coefficient d'exfiltration (rapport de l'eau exfiltrée à l'écoulement total) comme suit :

$$Q_s/Q_t = (C_t - C_r)/(C_s - C_r)$$

Ce coefficient d'écoulement traduit ainsi la part de l'écoulement total à l'exutoire, due à

³² [(Kamagaté B., 2006)] Kamagaté B. (2006), Fonctionnement hydrologique et origine des écoulements sur un bassin versant de milieu tropical de socle au Bénin : bassin versant de la Donga (Haute Vallée de l'Ouémé); PhD thesis, UM II, Montpellier (France), 320p.

³³ [(Kamagaté B., 2006)] Ibid.,

[(Atindogbé C., 2007)] Atindogbé C. (2007), Analyse de la composition chimique des eaux de surface sur les sous-bassins versants de l'Ouémé Supérieur : conséquences sur l'acquisition de la minéralisation et discrétisation de l'origine des eaux; Mémoire de DESS, FAST/UAC, Abomey-Calavi (Bénin), 96p.

[(Peugeot C. et al., 2007)] Peugeot C., Séguis L., Zannou A., Afouda S., Arjounin M., Boubkraoui S., Bouchez J-M., Dépraète C., Galle S., Gosset M., Le Barbé L., Le Lay M., Malinur F., Ouani T., Van Exter S., and Wubda M. (2007), Hydrological functioning and meso-scale water budget on the Upper Ouémé Basin (Benin): new results and perspectives ; IRD/DG-Eau; paper presented at 2nd International Conference of AMMA Project, Karlsruhe (Allemagne), Genau I., Van Den Akker E. and Redelsperger J.-L. éd, November 2007, -

[(Akognongbé A., 2009)] Akognongbé A. (2009), Analyse hydrologique multi-échelle du bassin de l'Ouémé Supérieur : processus dominants à l'origine des écoulements; Mémoire de Master Recherche, HSM/UM2, Montpellier (France), 50p. + annexes.

[(Séguis, L. et al., 2011)] Séguis L., Kamagaté B., Favreau G., Descloitres M., Seidel J., Galle S., Peugeot C., Gosset M., Le Barbé L., Malinur F., Van Exter S., Arjounin M., Boubkraoui S., and Wubda M. (2011), Origins of streamflow in a crystalline basement catchment in a sub-humid Sudanian zone: The Donga basin (Benin, West Africa): Inter-annual variability of water budget; *Journal of Hydrology*, 402(1-2) pp. 1-13.

l'exfiltration de la zone non saturée. Il traduit l'impact des propriétés hydrodynamiques du sol³⁴ sur le processus de génération des écoulements par le bassin, et doit être considéré comme caractéristique du bassin.

³⁴ [(Zannou A. B., 2003)] Zannou A. B. (2003), Caractéristiques hydrodynamiques des sols de la plaine de Kairouan : élaboration d'une base de données de mesures pour la détermination de la conductivité hydraulique à saturation; Rapport de stage; Projet MERGUSIE, INAT/IRD, Tunis (Tunisie), 155p. + annexes

ANNEXE 6: Liste des 94 jeux finaux

Le tableau suivant comporte la liste des 94 jeux finaux retenus sur la période 1997-2006 avec le modèle hydrologique Topamma.

NB: N° jeu indique le numéro du jeu dans la série des 17.745 jeux de l'espace des paramètres.

N° jeu	Paramètres du modèle				Valeurs des critères sur 1997-2006				
	M (m)	To (m ² /h)	doRatio	Vr (m3/s)	Nash	NashRac	R ²	Vol	Qmax
4722	0,0700	13,0	6,0	0,275	0,8612	0,8812	0,8645	0,0999	0,2138
4723	0,0700	13,2	6,0	0,275	0,8615	0,8816	0,8642	0,0932	0,2038
4762	0,0725	13,2	6,0	0,275	0,8630	0,8801	0,8664	0,1037	0,2083
4763	0,0725	13,4	6,0	0,275	0,8633	0,8805	0,8661	0,0973	0,1987
4764	0,0725	13,6	6,0	0,275	0,8635	0,8809	0,8658	0,0910	0,1894
4802	0,0750	13,4	6,0	0,275	0,8641	0,8783	0,8675	0,1064	0,2013
4803	0,0750	13,6	6,0	0,275	0,8644	0,8788	0,8673	0,1004	0,1922
4804	0,0750	13,8	6,0	0,275	0,8646	0,8792	0,8672	0,0945	0,1831
4842	0,0775	13,6	6,0	0,275	0,8646	0,8759	0,8680	0,1083	0,1927
4843	0,0775	13,8	6,0	0,275	0,8649	0,8764	0,8679	0,1027	0,1840
4844	0,0775	14,0	6,0	0,275	0,8651	0,8768	0,8678	0,0971	0,1754
4882	0,0800	13,8	6,0	0,275	0,8644	0,8728	0,8678	0,1095	0,1826
5122	0,0625	15,0	6,2	0,275	0,8574	0,8843	0,8615	0,0964	0,2255
5123	0,0625	15,2	6,2	0,275	0,8578	0,8846	0,8610	0,0898	0,2166
5163	0,0650	15,4	6,2	0,275	0,8611	0,8849	0,8648	0,0988	0,2174
5164	0,0650	15,6	6,2	0,275	0,8614	0,8852	0,8644	0,0926	0,2087
5165	0,0650	15,8	6,2	0,275	0,8616	0,8854	0,8641	0,0865	0,2003
5204	0,0675	15,8	6,2	0,275	0,8639	0,8847	0,8674	0,1004	0,2080
5205	0,0675	16,0	6,2	0,275	0,8642	0,8850	0,8671	0,0946	0,1999
5206	0,0675	16,2	6,2	0,275	0,8643	0,8852	0,8668	0,0888	0,1918
5207	0,0675	16,4	6,2	0,275	0,8644	0,8855	0,8664	0,0831	0,1839
5208	0,0675	16,6	6,2	0,275	0,8644	0,8856	0,8661	0,0775	0,1761
5245	0,0700	16,2	6,2	0,275	0,8660	0,8838	0,8692	0,1013	0,1979
5246	0,0700	16,4	6,2	0,275	0,8662	0,8841	0,8690	0,0959	0,1901
5247	0,0700	16,6	6,2	0,275	0,8663	0,8843	0,8687	0,0904	0,1824
5248	0,0700	16,8	6,2	0,275	0,8664	0,8846	0,8685	0,0850	0,1749
5249	0,0700	17,0	6,2	0,275	0,8664	0,8848	0,8682	0,0797	0,1674
5286	0,0725	16,6	6,2	0,275	0,8673	0,8822	0,8704	0,1016	0,1866
5287	0,0725	16,8	6,2	0,275	0,8675	0,8825	0,8702	0,0965	0,1793
5288	0,0725	17,0	6,2	0,275	0,8676	0,8828	0,8700	0,0914	0,1719
5289	0,0725	17,2	6,2	0,275	0,8677	0,8831	0,8698	0,0863	0,1649
5290	0,0725	17,4	6,2	0,275	0,8676	0,8833	0,8696	0,0813	0,1576
5326	0,0750	16,8	6,2	0,275	0,8678	0,8796	0,8710	0,1062	0,1813
5327	0,0750	17,0	6,2	0,275	0,8680	0,8799	0,8709	0,1014	0,1744
5328	0,0750	17,2	6,2	0,275	0,8681	0,8803	0,8708	0,0965	0,1674
5329	0,0750	17,4	6,2	0,275	0,8682	0,8806	0,8706	0,0917	0,1606
5330	0,0750	17,6	6,2	0,275	0,8682	0,8809	0,8705	0,0870	0,1537
5331	0,0750	17,8	6,2	0,275	0,8682	0,8812	0,8703	0,0823	0,1470
5367	0,0775	17,2	6,2	0,275	0,8678	0,8767	0,8709	0,1052	0,1679
5368	0,0775	17,4	6,2	0,275	0,8680	0,8771	0,8708	0,1007	0,1613
5369	0,0775	17,6	6,2	0,275	0,8681	0,8774	0,8708	0,0961	0,1546
5370	0,0775	17,8	6,2	0,275	0,8682	0,8778	0,8707	0,0916	0,1481
5371	0,0775	18,0	6,2	0,275	0,8682	0,8781	0,8706	0,0872	0,1418
5407	0,0800	17,4	6,2	0,275	0,8669	0,8728	0,8702	0,1082	0,1598
5408	0,0800	17,6	6,2	0,275	0,8671	0,8733	0,8703	0,1039	0,1534

N° jeu	Paramètres du modèle				Valeurs des critères sur 1997-2006				
	M (m)	To (m ² /h)	doRatio	Vr (m3/s)	Nash	NashRac	R ²	Vol	Qmax
5409	0,0800	17,8	6,2	0,275	0,8673	0,8736	0,8702	0,0996	0,1472
5648	0,0625	18,8	6,4	0,275	0,8625	0,8877	0,8660	0,0954	0,2094
5649	0,0625	19,0	6,4	0,275	0,8627	0,8879	0,8657	0,0900	0,2024
5650	0,0625	19,2	6,4	0,275	0,8629	0,8881	0,8654	0,0847	0,1954
5651	0,0625	19,4	6,4	0,275	0,8630	0,8882	0,8651	0,0794	0,1886
5652	0,0625	19,6	6,4	0,275	0,8630	0,8884	0,8647	0,0742	0,1817
5689	0,0650	19,2	6,4	0,275	0,8654	0,8874	0,8691	0,1009	0,2045
5690	0,0650	19,4	6,4	0,275	0,8656	0,8877	0,8688	0,0958	0,1978
5691	0,0650	19,6	6,4	0,275	0,8658	0,8879	0,8685	0,0908	0,1912
5692	0,0650	19,8	6,4	0,275	0,8659	0,8881	0,8682	0,0858	0,1846
5693	0,0650	20,0	6,4	0,275	0,8660	0,8882	0,8679	0,0809	0,1781
5731	0,0675	19,8	6,4	0,275	0,8677	0,8867	0,8710	0,1005	0,1919
5732	0,0675	20,0	6,4	0,275	0,8679	0,8869	0,8708	0,0957	0,1856
8351	0,0750	13,4	6,0	0,300	0,8604	0,8769	0,8640	0,1064	0,2169
8712	0,0650	15,4	6,2	0,300	0,8574	0,8832	0,8614	0,0988	0,2293
8753	0,0675	15,8	6,2	0,300	0,8605	0,8832	0,8642	0,1004	0,2198
8754	0,0675	16,0	6,2	0,300	0,8608	0,8835	0,8639	0,0946	0,2116
8755	0,0675	16,2	6,2	0,300	0,8611	0,8838	0,8636	0,0888	0,2033
8794	0,0700	16,2	6,2	0,300	0,8629	0,8825	0,8663	0,1013	0,2097
8795	0,0700	16,4	6,2	0,300	0,8632	0,8828	0,8661	0,0959	0,2017
8796	0,0700	16,6	6,2	0,300	0,8634	0,8831	0,8658	0,0904	0,1939
8797	0,0700	16,8	6,2	0,300	0,8635	0,8833	0,8656	0,0850	0,1862
8835	0,0725	16,6	6,2	0,300	0,8646	0,8811	0,8677	0,1016	0,1983
8836	0,0725	16,8	6,2	0,300	0,8648	0,8814	0,8675	0,0965	0,1909
8837	0,0725	17,0	6,2	0,300	0,8650	0,8817	0,8674	0,0914	0,1833
8838	0,0725	17,2	6,2	0,300	0,8651	0,8820	0,8672	0,0863	0,1761
8875	0,0750	16,8	6,2	0,300	0,8653	0,8787	0,8686	0,1062	0,1931
8876	0,0750	17,0	6,2	0,300	0,8655	0,8791	0,8685	0,1014	0,1861
8877	0,0750	17,2	6,2	0,300	0,8657	0,8794	0,8684	0,0965	0,1789
8878	0,0750	17,4	6,2	0,300	0,8659	0,8797	0,8683	0,0918	0,1719
8916	0,0775	17,2	6,2	0,300	0,8656	0,8760	0,8688	0,1053	0,1796
8917	0,0775	17,4	6,2	0,300	0,8658	0,8764	0,8687	0,1007	0,1728
8918	0,0775	17,6	6,2	0,300	0,8660	0,8767	0,8686	0,0962	0,1660
8956	0,0800	17,4	6,2	0,300	0,8650	0,8723	0,8683	0,1082	0,1714
8957	0,0800	17,6	6,2	0,300	0,8653	0,8727	0,8684	0,1039	0,1649
9197	0,0625	18,8	6,4	0,300	0,8596	0,8863	0,8634	0,0954	0,2174
9198	0,0625	19,0	6,4	0,300	0,8599	0,8865	0,8631	0,0900	0,2103
9199	0,0625	19,2	6,4	0,300	0,8601	0,8867	0,8628	0,0847	0,2032
9238	0,0650	19,2	6,4	0,300	0,8628	0,8863	0,8667	0,1009	0,2126
9239	0,0650	19,4	6,4	0,300	0,8631	0,8865	0,8664	0,0958	0,2058
9240	0,0650	19,6	6,4	0,300	0,8633	0,8867	0,8661	0,0908	0,1991
9241	0,0650	19,8	6,4	0,300	0,8635	0,8869	0,8659	0,0858	0,1923
9242	0,0650	20,0	6,4	0,300	0,8636	0,8871	0,8656	0,0809	0,1857
9280	0,0675	19,8	6,4	0,300	0,8655	0,8857	0,8689	0,1005	0,2000
9281	0,0675	20,0	6,4	0,300	0,8657	0,8860	0,8687	0,0958	0,1935
12787	0,0650	19,2	6,4	0,325	0,8565	0,8840	0,8609	0,1009	0,2424
12788	0,0650	19,4	6,4	0,325	0,8569	0,8842	0,8606	0,0958	0,2354
12829	0,0675	19,8	6,4	0,325	0,8596	0,8836	0,8633	0,1005	0,2288
12830	0,0675	20,0	6,4	0,325	0,8599	0,8839	0,8631	0,0958	0,2222

ANNEXE 7: Approche IMPETUS pour la combinaison des modèles climatiques

Les scénarios climatiques du projet IMPETUS ont été calculés à travers une approche couplant plusieurs modèles d'échelles spatio-temporelles différentes avec une hiérarchisation donnée (voir figure page suivante). En effet, selon le quatrième rapport du GIEC³⁵, les scénarios climatiques à haute résolution, ou plus précisément les projections de changement climatique à l'échelle régionale doivent être idéalement basés sur des informations de quatre sources potentielles : (1) des simulations de modèle climatique global ; (2) une désaggrégation des données simulées par ces modèles climatiques globaux en utilisant des techniques pour augmenter les détails régionaux ; (3) une compréhension des processus physiques qui contrôlent les réponses régionales ; et (4) le changement climatique historique récent³⁶. Ainsi, pour appliquer cette approche, IMPETUS utilise en tête de chaîne, le modèle atmosphérique de circulation générale ECHAM5 (European Centre Hamburg Model Version 5)³⁷ couplé avec le modèle MPI-OM (Max-Planck-Institute dynamical Ocean Model) sur une résolution spatiale horizontale d'environ 200 km avec une intégration multi-centenaire. Ces modèles globaux sont forcés avec des concentrations croissantes des gaz à effet de serre et des aérosols sulfatés comme observées historiquement et en accord avec le rapport spécial du GIEC sur les scénarios d'émission A1B et B1 à l'horizon 2100. Les changements d'utilisation des terres ne sont pas pris en compte à ce niveau. Le modèle climatique régional REMO (Regional Model)³⁸ s'intéresse aux processus synoptiques à l'échelle continentale : il a une résolution horizontale de 0,5° (environ 55 km). Il est annexé au modèle de circulation générale et produit des simulations multi-décennales à l'horizon

³⁵ [(GIEC, 2007)] GIEC (2007), Bilan 2007 des changements climatiques: Rapport de synthèse. Contribution des groupes de travail I, II, III, au quatrième rapport du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat GIEC, Genève (Suisse), 103p., ISBN 192-9169-9222-9160, www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_fr.pdf

³⁶ [(Christensen J. H. et al., 2007)] Christensen J. H., Hewitson B., Busuioc A., Chen A., Gao X., Held I., Jones R., Kolli R. K., Kwon W.-T., Laprise R., Magana Rueda V., Mearns L., Menéndez C. G., Räisänen J., Rinke A., Sarr A., and Whetton P. (2007), Regional climate projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K. B., Tignor M., Miller H. L. (eds); Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 847-940,

³⁷ [(Roeckner E. et al., 2003)] Roeckner E., Bäuml G., Bonaventura L., Brokopf R., Esch M., Giorgetta M., Hagemann S., Kirchner I., Kornbluh L., Manzini E., Rhodin A., Schlese U., Schultzweida U., and Tompkins A. (2003), The atmospheric general circulation model ECHAM5. Part I: Model description, Max-Planck-Inst. f. Meteor., Report N°349, Hamburg (Germany)

³⁸ [(Jacob D., 2001)] Jacob D. (2001), A note to the simulation of the annual and interannual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin; *Meteorol. Atmos. Phys.*, 77 pp. 61-74

2050. Les pertes futures en végétation et la dégradation des sols ont été prises en compte selon les estimations de la FAO³⁹. A l'échelle régionale, le modèle non-hydrostatique LM (LokalModell) du Service météorologique allemand (DWD) est annexé au REMO. Sa résolution spatiale est 7-28 km et sa résolution temporelle est annuelle. En bas de chaîne, IMPETUS utilise à une échelle très locale, le modèle non-hydrostatique FOOT3DK (Flow Over Orographically Structured terrain, 3-dimensional, Köln Version) à une résolution spatiale de 1-7 km et une résolution temporelle de 1 à 3 jours.

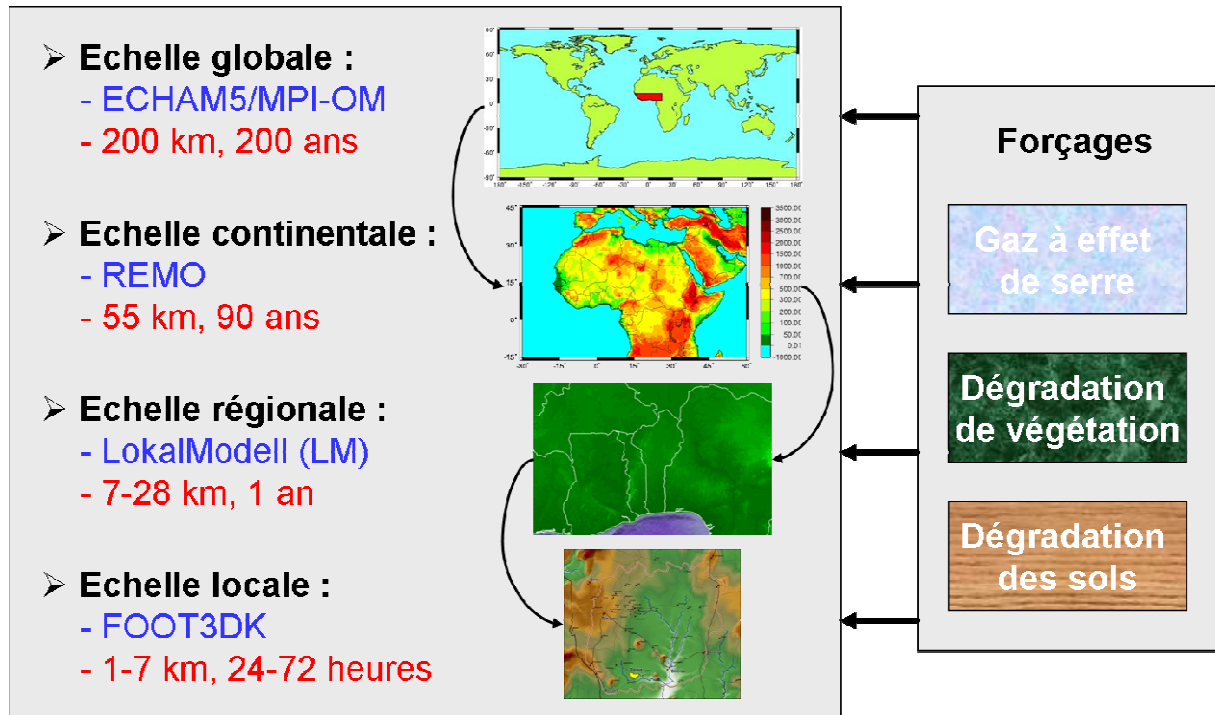


Figure : Schéma de l'hiérarchisation des modèles climatiques et des forçages associés dans l'approche IMPETUS (Christoph M. et al., 2010)

³⁹ [(Paeth H. et al., 2009)] Paeth H., Born K., Girmes R., Podzun R., and Jacob D. (2009), Regional climate change in tropical Africa under greenhouse forcing and land-use changes; *J. Climate*, 22 pp. 114-132

RESUME

La modélisation du cycle hydrologique du bassin de l'Ouémé à Bétérou a été conduite avec le modèle Topamma sur la période 1997-2006 à travers une approche spécialement développée. Cette approche repose sur un nombre très réduit de décisions arbitraires, contrairement aux habitudes en la matière. Nous avons visé en fait une paramétrisation du modèle qui fournit des résultats acceptables pour de bonnes raisons, et non un modèle peu contraint qui donnerait les meilleurs résultats possibles sans raison connue.

Un lot final de 94 jeux a été sélectionné dans l'espace des paramètres constitué de 17.745 jeux. Cette sélection s'est appuyée sur trois (3) critères successifs dont deux de biais (sur le volume et le débit de pic) et un de dynamique (l'efficacité de Nash). La pertinence de l'utilisation du critère Nash en 3^{ème} niveau de sélection pour mieux discriminer les jeux finaux a été démontrée, mais la contribution du critère de biais sur le débit de pic semble négligeable. Les valeurs idéales des critères de biais (biais nuls) ont été observées pour certaines simulations, et les valeurs optimales du critère Nash sont restées entre 89 et 91% en calage, et entre 88 et 93% en validation. Cependant, il a été possible de conclure que la recharge des nappes d'altérite telle que simulée par Topamma n'est pas réaliste au vu de la dynamique observée des niveaux piézométriques. Quelques analyses de sensibilité ont permis de diagnostiquer certaines faiblesses du modèle identifiées à travers ses résultats. En somme, le développement d'une nouvelle version du modèle Topamma, qui améliorerait ses performances actuelles, devrait s'appuyer sur une prise en compte de l'hydrodynamique et de l'occupation des sols, notamment leurs variations respectives dans le temps et l'espace. Ce qui rendrait plus complexe ou trop sophistiqué et moins attrayant le modèle, car il deviendrait plus gourmand en données et en temps de calcul.

L'évaluation du bilan hydrologique a montré que l'ETR représente 53% des précipitations, tandis que la recharge des nappes 33% et les écoulements 14% sur la décennie d'étude (1997-2006). L'incertitude de modélisation sur chacun de ces termes du bilan hydrologique décennal ne dépassent pas ± 1 à 2% ; néanmoins, les termes varient sensiblement d'une année à l'autre, et sont compris entre 46 et 60% pour l'ETR, 29 et 36% pour la recharge, et 9 et 21% pour les écoulements. L'analyse des relations pluie-débit et de la variabilité hydro-pluviométrique montre que le modèle reproduit de façon globalement satisfaisante les dynamiques interannuelles observées ; mais les facteurs d'amplification des extrêmes pluviométriques (déficit ou excédent) par le système hydrologique sont généralement supérieurs par rapport aux valeurs observées.

Un exercice d'application à la GIRE sur le bassin de l'Ouémé à Bétérou a pu être réalisé. Malgré la baisse annoncée de 41% de la disponibilité moyenne annuelle des ressources en eau d'ici 2025, il y aura suffisamment de ressources pour satisfaire l'ensemble des besoins (eau domestique, irrigation, élevage et industrie) estimés à 67 millions m³ par an pour les 10 communes du bassin ; à l'exception du besoin hydroélectrique qui, pour le moment absent, pourrait toutefois s'adapter à cette réalité le cas échéant. Le ratio besoins/disponibilité évoluerait de 29% actuellement à plus de 44% à l'horizon 2025. Le scénario d'aménagement préconisé est la construction d'un barrage hydroélectrique multifonctions sur l'Ouémé à Bétérou, et de deux (2) petits barrages sur des affluents au nord du bassin pour couvrir les besoins des communes périphériques. Avec les règles de gestion stratégique proposées, on anticipe sur une situation d'alerte jaune entre 2016-2020, c'est-à-dire que la disponibilité en eau sera supérieure aux besoins en eau seulement de 10 à 25% de ces derniers. Dans la gestion tactique, l'évolution du taux de sécurité proposé laisse entrevoir une alerte rouge en 2020 et 2023 (disponibilité inférieure aux besoins), une alerte orange en 2019 (disponibilité supérieure aux besoins de moins de 10% de ces derniers) et une alerte jaune en 2017. A cet effet, des solutions ont été proposées aux Autorités concernées pour anticiper convenablement dans la gestion de ces situations critiques annoncées.

Mots clefs : modélisation et bilan hydrologique, relation pluie-débit, variabilité spatio-temporelle, gestion intégrée des ressources en eau, haute vallée de l'Ouémé.

ABSTRACT

The hydrological cycle modeling of Ouémé watershed at Bétérou outlet was carried out with Topamma model over 1997-2006 period through a specific approach developed here. This approach consists in a very low number of arbitrary decisions, in opposition with the current practices. We aimed a model parameterization which provides acceptable results for good reasons, and rejected a less constrained model which would give the best results with unknown reasons.

94 final sets were selected in the parameter space of 17,745 sets. This selection was based on three (3) successive criteria including two of bias (on volume and peak flow) and one of dynamics (the well-known Nash efficiency). The relevance of Nash criterion used in 3rd selection level for a better discrimination of final parameter sets was shown, but the contribution of bias on peak flow criterion seems negligible. The ideal values of bias criteria (zero biases) were noticed with certain simulations, and the optimal values of Nash criterion remained between 89 and 91% in model calibration, and between 88 and 93% in validation. However, it was possible to conclude that the groundwater recharge simulated by Topamma is not realistic within observed piezometric dynamics. Some sensitivity analyses helped us to diagnose some model weaknesses identified through its results. The development of new version of Topamma model, which would improve its present performances, should be made by taking into account the soil hydrodynamics and land cover, especially their respective time and space variations. This would transform the model into a more complex or too sophisticated one, and therefore less attractive one, because it would require more data and time for computing.

The hydrological assessment of water budget showed that the real evapotranspiration represents 53% of precipitations, while groundwater recharge is 33% and river flows 14% over the decade period of this study (1997-2006). The modeling uncertainty on each of these decennial water budget terms does not exceed ± 1 to 2%; nevertheless, the terms move significantly between different years, from 46 to 60% for the real evapotranspiration, 29 to 36% for the groundwater recharge, and 9 to 21% for the river flows. The analysis of rainfall-runoff relation and hydro-pluviometric variability shows that the model reproduces in suitable way the observed interannual dynamic; but the amplification factors of pluviometric extremes (deficit or excess) according to the hydrological system are generally higher than observed values.

An application exercise of integrated water resources management (IWRM) on the Ouémé basin at Bétérou outlet was carried out. Despite the 41% announced fall of the annual average water resources availability at 2025 horizon, there will be sufficient resources for satisfying the whole requirements (domestic water, irrigation, livestock and industry), which is estimated yearly at 67 million m³ for the 10 Communes of the basin; except for the hydroelectric requirement which is actually absent and could nevertheless adapt to this reality if necessary. The ratio requirements/availability would move from 29% currently to more than 44% at 2025 horizon. The recommended management scenario is the building of an hydroelectric and multifunction dam on Ouémé at Bétérou, and two (2) small dams on the streams in the north of basin for peripheric Commune's requirements. With the strategic management suggested rules, we anticipate on a yellow alert between 2016-2020, i.e. the water availability will be 10 to 25% higher than the water requirements. In tactical management, the evolution of proposed security rate shows a red alert occurrence in 2020 and 2023 (availability lower than requirements), an orange alert in 2019 (availability 10% maximum higher than requirements) and a yellow alert in 2017. Facing those future situations, some solutions were proposed to the concerned Authorities for a suitable anticipation in the management of these announced critical situations.

Key words : hydrological modeling, water budget, rainfall-runoff relation, spatio-temporal variability, integrated water resources management, upper Ouémé watershed.