

Exemple d'application du modèle CEQUEAU-ONU: évaluation de l'impact des aménagements sur les écoulements de la rivière Nakambé, Burkina Faso

JEAN-CHRISTOPHE DESCONNETS

Consultant ONU-DAES, 48 Chemin de Peygros, Domaine de la Chesnaye, F-83440 Mons, France

e-mail: jc.desconnets@wanadoo.fr

AMADOU DIALLO

BETRAP, BP E740, Bamako, Mali

OUMAR TRAORE

Direction de l'Inventaire des Ressources Hydrauliques, BP 7025, Ouagadougou, Burkina Faso

JEAN-MICHEL CHENE

United Nations, DESA-DCI-834, New York 10017, USA

GUY MORIN

INRS-Eau, 2800 Rue Einstein, CP 7500, Sainte Foy, Québec, Canada G1V 4C7

Résumé Au Burkina Faso, pour faire face à la construction incontrôlée de petits réservoirs superficiels et leurs conséquences sur l'alimentation en eau des populations et l'agriculture, une politique de gestion intégrée des ressources en eau à l'échelle des grands bassins hydrographiques a été mise en œuvre. Dans ce cadre, une approche intégrée et quantitative, visant à évaluer et prévoir l'évolution de la disponibilité de la ressource en eau de surface en fonction des aménagements existants et projetés, a été menée. Elle avait, entre autre, pour objet la mise en œuvre du modèle CEQUEAU-ONU sur le bassin versant du Nakambé (35 000 km²) avec la modélisation des écoulements et du bilan hydrologique des principales retenues, soit 27 au total. Nous présentons son application à la partie Nord du bassin versant du Nakambé, à la station de Wayen (20 800 km²). Par la comparaison des résultats de simulation des écoulements actuels (influencés) et des écoulements "naturels" artificiellement reproduit par le modèle, nous apportons une estimation moyenne de l'impact des 15 retenues significatives situées en amont de la station de Wayen. Malgré les difficultés que présente la modélisation hydrologique en zone sahélienne, cette première approche est concluante. Elle offre la possibilité de quantifier avec une précision suffisante, et à des échelles de temps pertinentes, l'impact des aménagements sur les écoulements en aval du bassin.

INTRODUCTION

Les ressources en eau du Burkina Faso se caractérisent par la faiblesse des ressources en eau souterraine en zone de socle cristallin (80% du territoire) et par des écoulements de surface intermittents et relativement faibles. Si les ressources

en eau souterraine apparaissent suffisantes pour des besoins locaux limités (village et très petite ville), les besoins des villes et centres secondaires, en sus de ceux de la petite et moyenne irrigation, font appel de plus en plus à la mobilisation des eaux de surface, en zone de socle. Cela est particulièrement vrai sur le bassin versant de la rivière Nakambé (Fig. 1), ex. Volta blanche, qui contient plusieurs centres urbains du pays et qui supporte une importante activité agro-pastorale.

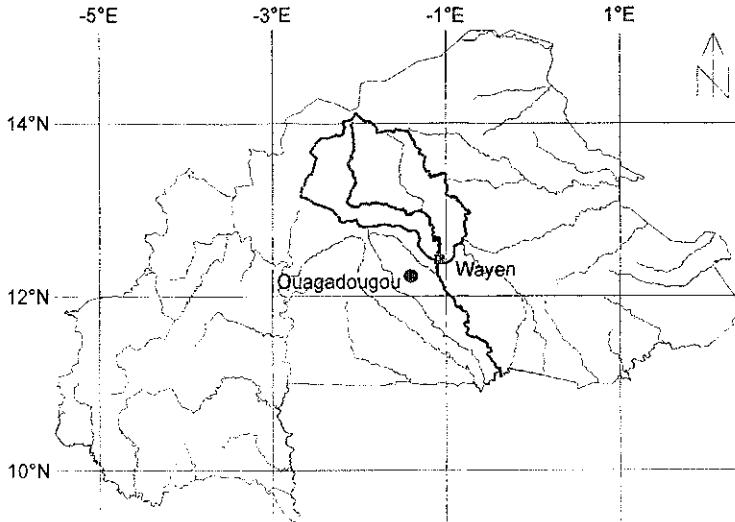


Fig. 1 Situation géographique du bassin de la rivière Nakambé à Wayen (20 800 km²).

Pour faire face au développement, et aux impacts, plus ou moins contrôlés, d'un très grand nombre de petits réservoirs construits essentiellement dans un but agro-pastoral, une politique de gestion intégrée des ressources en eau à l'échelle des grands bassins hydrographiques du Burkina Faso a été définie. Dans ce cadre, il devient indispensable d'évaluer et prévoir l'évolution des ressources en eau de surface restant disponibles en fonction des aménagements existants et projetés, des besoins assurés par les eaux souterraines et de surface, et des contraintes climatiques. Une telle approche intégrée et quantitative a été menée au sein du Ministère de l'Environnement et de l'Eau du Burkina Faso de 1994 à 1997 avec l'appui financier du PNUD et l'appui scientifique et opérationnel du Secrétariat des Nations Unies (ONU-DAES). Elle a consisté, notamment, à mettre en œuvre le modèle CEQUEAU-ONU sur le bassin versant du Nakambé (35 000 km²) avec une modélisation du bilan hydrologique des sous-bassins et du transfert des écoulements à travers les retenues significatives du bassin (27 au total actuellement). Nous présentons ici cette application à la partie Nord du bassin versant du Nakambé, à l'amont de la station de Wayen (20 800 km²), sans entrer dans le détail de la collecte et du traitement des données sur les ressources en eau comme sur leurs différentes utilisations.

PROBLEMATIQUE DE L'EAU DANS LE BASSIN DU NAKAMBE

Le bassin versant du Nakambé, rivière internationale, a une superficie de 35 000 km² à la frontière entre le Ghana et le Burkina Faso. Il concentre une grande partie de la population du Burkina Faso: la capitale Ouagadougou y est localisée et une partie notable des activités agricoles du pays y est menée. En effet, il compte plusieurs barrages d'intérêt national dont le réservoir de Bagré (proche de la frontière ghanéenne), d'une capacité de 1.7 milliards de m³, qui a une double vocation hydro-électrique et hydro-agricole, le réservoir de Loumbila, d'une capacité de 36 millions de m³, qui fournit actuellement plus de 70% de l'eau de boisson à la capitale et enfin le réservoir de Ziga (projet en cours), d'une capacité de 200 millions de m³, qui sera nécessaire, à très court terme, pour supporter l'augmentation de la consommation domestique de la capitale. Outre ces ouvrages, on dénombre sur l'ensemble du bassin plus de 500 retenues agro-pastorales, d'intérêt local et de faible capacité dont une quarantaine concentrent 90% du volume total stocké (hors barrage de Bagré) évalué à 200 millions de m³.

Face à la faiblesse des ressources en eau souterraines, les eaux de surface déjà mobilisées font déjà, et feront de plus en plus dans les années à venir, l'objet de conflits entre la satisfaction des besoins de l'agriculture (allocations actuelles) et celle, prioritaire, des besoins en eau potable des villes et des centres secondaires.

C'est dans ce contexte de sollicitation croissante des ressources en eau souterraine et de surface, de mobilisation incontrôlée de l'eau de surface, et de persistance de la sécheresse depuis 25 ans qu'il est apparu nécessaire, pour guider les décisions d'aménagement et d'allocation des eaux (planification intégrée à long terme), de mettre en place un outil de simulation des écoulements pouvant prendre en compte la variabilité et les incertitudes climatiques, les principaux aménagements et la diversité des usages et besoins en eau sur le bassin.

METHODE ET OUTILS

Méthode

La calibration d'un modèle conceptuel sur un grand bassin versant supérieur à 10 000 km² vise à une description vraisemblable des flux hydrologiques, compte tenu des observations disponibles, pour le calage des paramètres. Une fois calibré, l'outil de simulation permet d'examiner et d'évaluer les performances des ouvrages et les risques d'insatisfaction des usages prioritaires en fonction de divers scénarios testés.

L'analyse des flux hydrologiques d'un grand bassin versant est pertinente à l'échelle mensuelle. Par contre, la reproduction spatio-temporelle du bilan hydrologique nécessite une approche journalière. Le modèle fonctionne donc au pas de temps journalier.

CEQUEAU-ONU: un modèle pour les grands bassins versants aménagés

Le modèle hydrologique CEQUEAU-ONU est une adaptation du modèle CEQUEAU développé à l'INRS-Eau (Morin *et al.*, 1981). Par sa robustesse et la convivialité de

l'interface Windows qui est construit autour des différents modules (calculs de préparation des simulations et de visualisation des résultats), CEQUEAU présente d'indéniables avantages pour une utilisation opérationnelle. Il en est de même pour ce qui concerne ses performances en matière de modélisation des écoulements de surface qui ont été évaluées par l'OMM (WMO, 1986). Afin de répondre aux besoins de gestion de l'eau des grands bassins aménagés en zone semi-aride, le modèle CEQUEAU a été modifié à la demande de l'ONU-DAES et testé conjointement par l'INRS-Eau et l'équipe du projet "Eau et Développement Régional" au sein de la DIRH (Direction de l'Inventaire des Ressources Hydrauliques).

CEQUEAU-ONU est un modèle conceptuel à réservoir spatialement distribué qui effectue le calcul de production et du transfert de l'écoulement au pas de temps journalier (Morin & Couillard, 1990). En plus des données physiographiques décrivant le bassin, le modèle requiert, pour les simulations, les données journalières des précipitations ainsi que les températures maximales et minimales pour le calcul de l'ETP.

Les modifications apportées dans CEQUEAU-ONU (Morin *et al.*, 1998) concernent l'extension de la discrétisation spatiale à plus de 1000 mailles et 2500 sous-mailles, la possibilité de simuler les débits et les niveaux sur un maximum de 150 stations de contrôle réelles (50) ou fictives (100), la simulation journalière des principaux termes du bilan des retenues avec des prélèvements journaliers différenciés pour les fins agricoles ou domestiques, et réglés respectivement par des seuils en niveau. En outre, le modèle offre la possibilité de déterminer les valeurs des paramètres de la fonction de production par zones homogènes dans le bassin versant. Ces modifications élargissent le domaine d'application et permettent ainsi de décrire de manière plus réaliste les régimes hydrologiques influencés par les ouvrages en rivière. Enfin, la possibilité de prendre en compte désormais la forte variabilité spatio-temporelle des précipitations et des processus de redistribution de surface par le modèle CEQUEAU-ONU est un élément essentiel pour viser une bonne description des processus hydrologiques dans la zone intertropicale. Cet objectif dépendra toujours de la qualité, mais aussi de la densité et du nombre d'années d'observations de terrain.

Application du modèle CEQUEAU-ONU au bassin versant du Nakambé

L'application du modèle CEQUEAU-ONU que nous présentons ici concerne la partie sahélienne du bassin versant de la rivière Nakambé qui draine une superficie de 20 800 km² à la station de Wayen (Fig. 1). Le réseau de postes climatologiques utilisé comprend 22 stations dont trois synoptiques. Le réseau hydrométrique a été complété temporairement (3 années de mesures) avec un réseau secondaire de 20 stations automatiques installées par le projet "Eau et Développement Régional", et doublées d'un observateur. A l'amont de Wayen, le réseau comprend quatre stations de contrôle en rivière dont celle de Wayen et 15 stations hydrométriques sur retenue d'eau. Il permet de contrôler plus de 72% du stockage superficiel sur le bassin versant dont 85% des aménagements significatifs (supérieur à 1 million de m³). La discrétisation du bassin versant est obtenu par un maillage principal de 10 km de coté.

La calibration du modèle a été effectuée sur la période 1985–1996 qui recoupe la plus longue série chronologique disponible à la fois aux stations de contrôle en rivière et aux stations sur retenues. Si l'on se réfère à la Fig. 2 qui présente les variations de la pluviométrie annuelle en écart type de la moyenne inter annuelle, on constate que la période de calibration a aussi l'intérêt de présenter une variabilité annuelle représentative de l'ensemble de la série incluant, par ailleurs, des années pluviométriques extrêmes, 1985 ou 1987 pour ce qui concerne la pluviométrie déficitaire et 1994 pour la pluviométrie excédentaire.

RESULTATS DES CALIBRATIONS ET DISCUSSIONS

Les résultats de simulation sont analysés à l'échelle mensuelle et annuelle. La calibration du modèle à la station de Wayen s'est déroulée en deux étapes: d'abord la calibration des sous-bassins contrôlés, généralement "naturels" et comprenant une retenue à leur exutoire, et ensuite, la calibration des débits au niveau des stations de contrôle. La durée de la série chronologique ayant servie à la calibration des sous-bassins varie de deux années pour les stations récentes à 4 et 11 années pour les stations en rivière.

Pour l'ensemble des sous-bassins contrôlés, d'une superficie totale de 9455 km², la comparaison des apports annuels observés et calculés, toutes simulations confondues, montre une différence de -0.4%. Toutefois, des disparités sont à noter en ce qui concerne la qualité des calibrations. Nous constatons, soit en raison de la disponibilité d'observations de courte durée, soit de la faible couverture du réseau pluviométrique, que les simulations des retenues alimentées par des bassins de faible superficie (<100 km²) ne permettent pas de décrire de manière satisfaisante la forte variabilité des apports. Ceci est d'autant plus vrai dans la frange sahélienne du Nakambé où la part du ruissellement annuel est souvent inférieure à 5% des

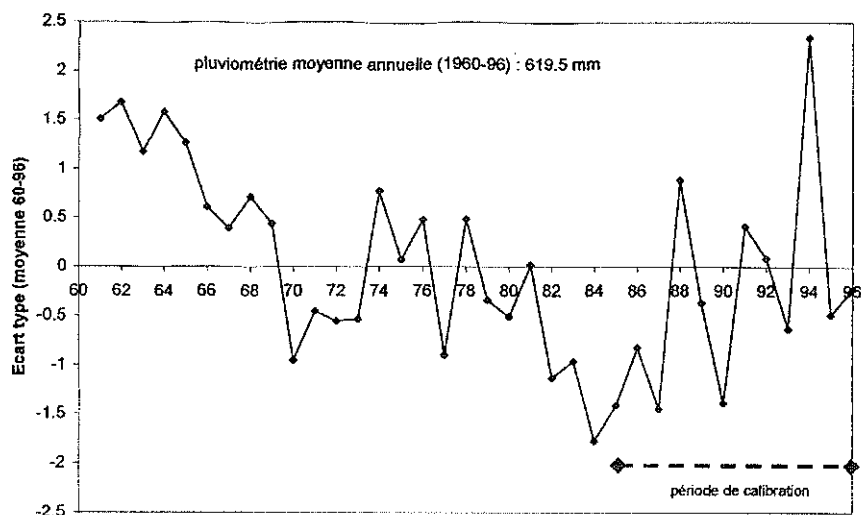


Fig. 2 Ecart type de la pluviométrie moyenne annuelle sur le bassin versant à la station de Wayen sur la période 1960–1996.

précipitations. De plus le choix d'une discrétisation par maille de 100 km² pour étudier des phénomènes à une échelle de plus de 10 000 km² apporte une description peu précise sur les petits bassins.

Les Figs 3 et 4 montrent respectivement la comparaison des apports moyens mensuels observés et calculés au lac de Bam (bassin versant de 2576 km²) et à la station en rivière de Ramsa (bassin versant de 3650 km²), et nous donnent une analyse plus détaillée sur les deux sous-bassins apportant la plus forte contribution en

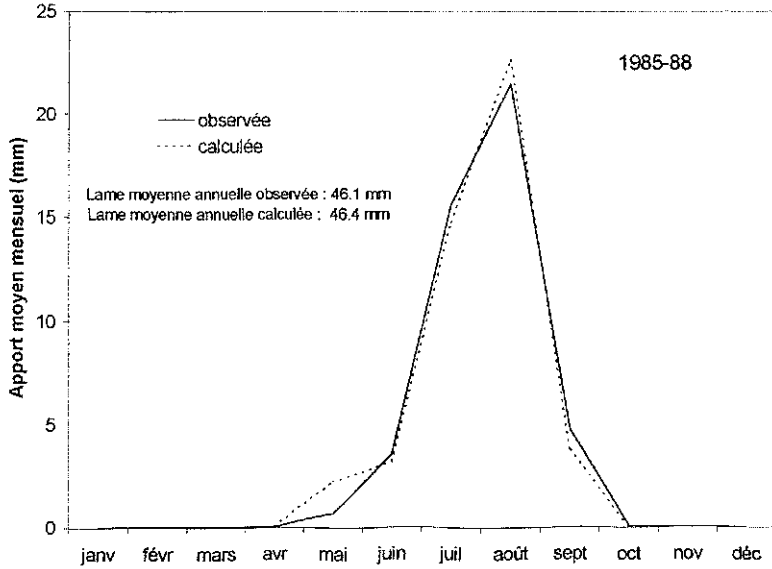


Fig. 3 Comparaison des apports moyens mensuels observés et calculés au lac de Bam (2576 km²) pour la période 1985-1988.

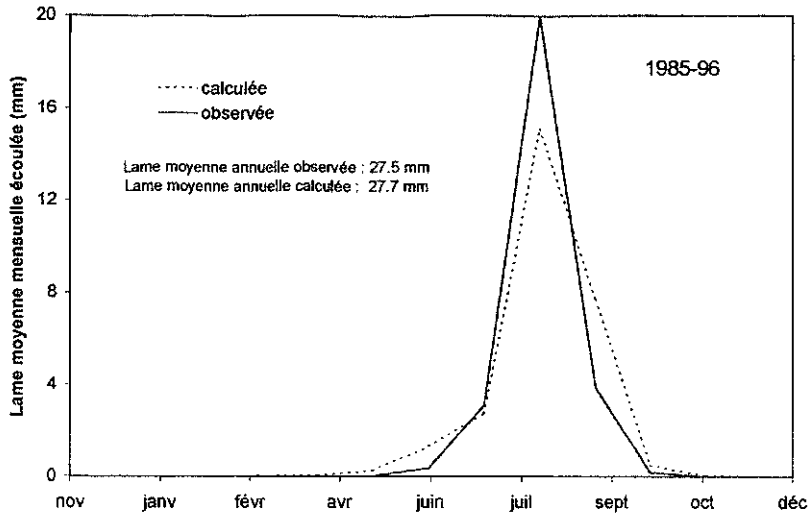


Fig. 4 Comparaison des lames moyennes mensuelles écoulées observées et calculées à la station de Ramsa (3650 km²) pour la période 1985-1996.

terme de production d'écoulement. Dans les deux cas, les apports ou lames moyens mensuels calculés reproduisent les variations saisonnières de manière assez satisfaisante sur l'échantillon de calibrage. Les écarts aux apports observés entre le mois de juillet et septembre (90% des apports) sont de -1.7% au lac de Bam. A la station de Ramsa, la lame écoulee est sous-estimée en août, -24.5% mais compensée en fin de saison. Dans les deux cas, les apports moyens annuels sont estimés à plus ou moins 1% .

Les résultats de la calibration à la station de Wayen pour la période de 1985–1996 sont illustrés dans la Fig. 5. A l'échelle annuelle, les lames écoulées observées sont bien corrélées aux lames calculées sans erreurs systématiques. Seules deux années déficitaires 1985 et 1986 et l'année excédentaire de 1994 (voir en Fig. 2) présentent une forte déviation. Ces résultats pourraient s'expliquer en grande partie, par la mauvaise simulation de la fin de saison des pluies qui, dans le cas des années déficitaires, est fortement sous-estimée. Elle est cependant très fortement surestimée pour l'année 1994 où la réponse à la forte concentration pluviométrique en fin de saison est ici encore mal reproduite par le modèle.

Sur l'ensemble de la période, la lame moyenne annuelle écoulee est estimée à 1.8% de celle observée. A l'échelle mensuelle (Fig. 6), on constate que les lames moyennes calculées reproduisent assez correctement les variations saisonnières observées avec un écart relatif de -10.6% en août compensé au mois de septembre (16.1%).

SIMULATION DES ECOULEMENTS A WAYEN SANS LES RETENUES

En prenant, pour la même période 1985–1996, les paramètres ajustés lors de la calibration du modèle sur les sous-bassins et à la station de Wayen, nous avons

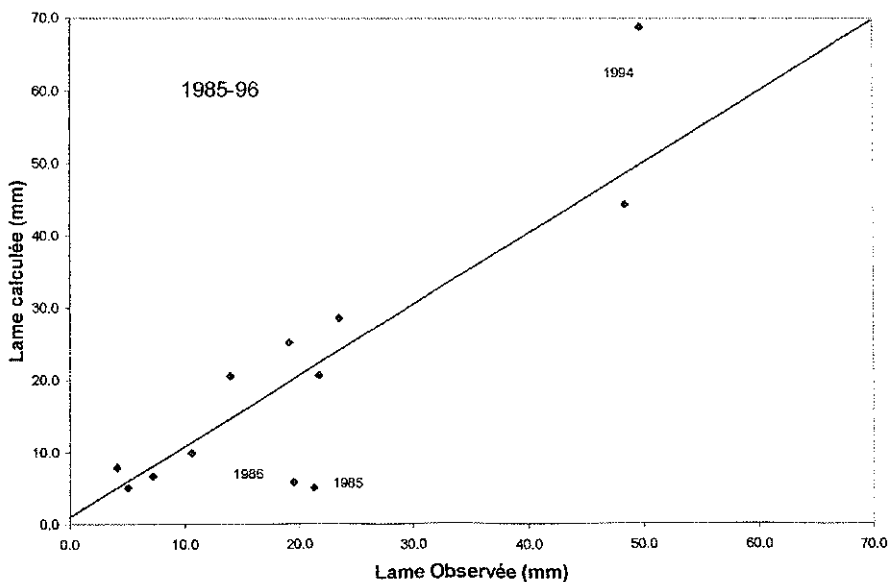


Fig. 5 Comparaison des lames annuelles observées et calculées à la station de Wayen.

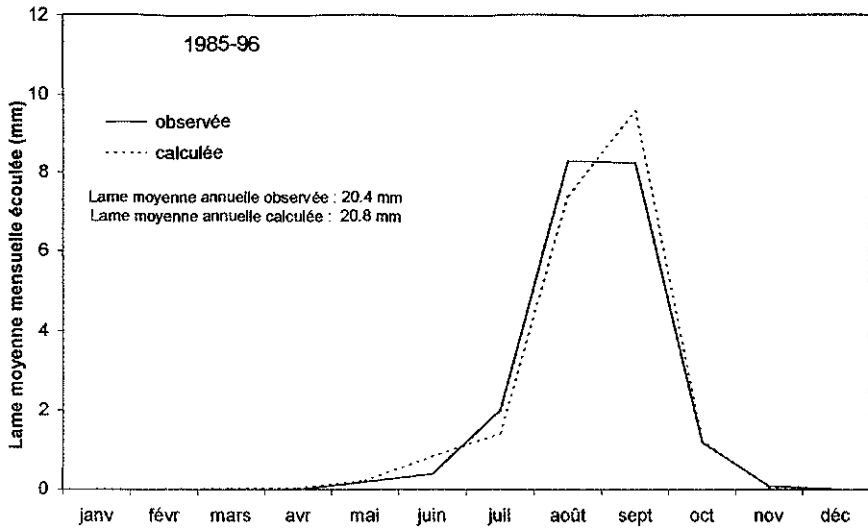


Fig. 6 Comparaison des lames moyennes mensuelles observées et calculées à la station de Wayen pour la période de 1985-1996.

procédé à une seconde simulation avec un bassin où les 15 retenues significatives ont été enlevées. Ainsi, les apports actuellement retenus dans les principaux ouvrages du bassin sont artificiellement écoulés en rivière, simulant de ce fait des conditions naturelles d'écoulement en rivière pour les conditions climatiques de la période considérée. L'influence des principaux ouvrages en rivière est évaluée par la comparaison des lames calculées lors de la calibration du modèle et les lames simulées après enlèvement des aménagements.

A l'échelle annuelle, on constate que la lame écoulée moyenne serait de 531 millions de m³ (25.5 mm) au lieu de 432 millions de m³ (20.8 mm) observés. La

Tableau 1 Lame moyenne mensuelle simulée* (conditions d'aménagements actuelles) et simulée† (sans les aménagements) pour la période 1985-1996 à la station de Wayen.

| Mois | Lame simulée* (mm) | Lame simulée† (mm) | Différence (mm) | Différence (%) | Lame annuelle (%) |
|-----------|--------------------|--------------------|-----------------|----------------|-------------------|
| Janvier | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0 | 0.0 |
| Février | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0 | 0.0 |
| Mars | 0.02 | 0.02 | 0.00 | 1.7 | 0.1 |
| Avril | 0.04 | 0.05 | 0.01 | 33.9 | 0.2 |
| Mai | 0.22 | 0.44 | 0.22 | 98.1 | 1.1 |
| Juin | 0.83 | 1.33 | 0.50 | 60.1 | 4.0 |
| Juillet | 1.41 | 2.31 | 0.90 | 64.1 | 6.8 |
| Août | 7.38 | 9.32 | 1.93 | 26.2 | 35.6 |
| Septembre | 9.57 | 10.50 | 0.93 | 9.7 | 46.1 |
| Octobre | 1.25 | 1.49 | 0.24 | 19.0 | 6.0 |
| Novembre | 0.04 | 0.06 | 0.01 | 32.4 | 0.2 |
| Décembre | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.0 | 0.0 |
| Année | 20.76 | 25.51 | 4.75 | 22.86 | |

* Simulation originale avec la prise en compte des ouvrages de retenues.

† Simulation sans les retenues.

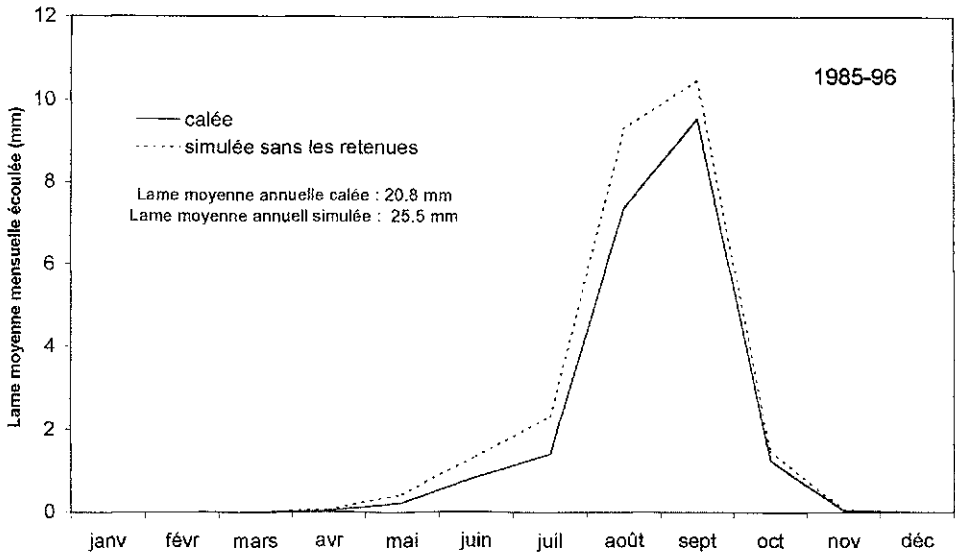


Fig. 7 Comparaison des lames moyennes mensuelles calculées (conditions actuelles) et simulées (sans les aménagements) à la station de Wayen pour la période de 1985-1996.

présence des ouvrages de retenues actuels entraînerait donc une diminution moyenne de 23% des écoulements naturels à la station de Wayen. Le Tableau 1 donne la comparaison des lames moyennes mensuelles et annuelles calculées et simulées à la station de Wayen. A l'échelle mensuelle (Fig. 7), on constate que l'influence des barrages est particulièrement significative pour les premiers mois de la saison des pluies +60% en juin et +64% en juillet. Pour les maxima saisonniers, août et septembre, la lame écoulée serait supérieure de 26.2% en août et 9.7% en septembre. Globalement, le régime hydrologique est peu affecté. Les coefficients de variabilité des débits moyens et maximums sur la période restent élevés et supérieurs à 75% dans tous les cas.

L'influence des ouvrages de retenues est cependant nettement plus significative en année déficitaire. Comme le montre le Tableau 2, qui présente les lames annuelles des années déficitaires correctement simulées, le déficit d'apport annuel est d'autant plus marqué que l'apport est faible. Par exemple pour l'année 1990, on constate que la lame écoulée serait supérieure de 75% sans les retenues. En moyenne, les années

Tableau 2 Lame annuelle simulée* (conditions d'aménagements actuelles) et simulée† (sans les aménagements) pour les années sèches correctement calibrés à la station de Wayen.

| Année | Lame simulée* (mm) | Lame simulée† (mm) | Différence (%) |
|---------|--------------------|--------------------|----------------|
| 1987 | 6.7 | 10.9 | 62 |
| 1990 | 5.1 | 8.9 | 75 |
| 1993 | 9.9 | 14.0 | 41 |
| 1995 | 7.9 | 11.2 | 42 |
| Moyenne | 7.4 | 11.3 | 53 |

* Simulation originale avec la prise en compte des ouvrages de retenues.

† Simulation sans les retenues.

déficitaires simulées avec les retenues présentent un apport de 53% inférieur à celui simulé sans retenues.

Avec l'accentuation de l'occurrence de périodes à fort déficit pluviométrique, ces constatations mettent en lumière la nécessité de se préoccuper rapidement des conséquences de la construction de nouvelles retenues en amont du bassin versant ainsi que des performances et des risques de pénuries que risquent de rencontrer celles situées en aval.

Par ailleurs l'outil n'a cependant pas été conçu, car non précis à cette échelle, pour répondre à des questions de ressources en eau exploitables pour un petit barrage d'intérêt local alimenté par un bassin de faible superficie. Le cadre logique d'utilisation de l'outil CEQUEAU-ONU sera celui du Schéma Intégré d'Aménagement et de Gestion du Bassin de l'ensemble du Nakambé.

CONCLUSIONS-PERSPECTIVES

Malgré les difficultés bien connues que présente la modélisation hydrologique en zone sahélienne, notamment en raisons de la faible part de ruissellement (moins d'1/20 des précipitations) sur lequel repose le calibrage de la fonction de production, de la forte variabilité spatio-temporelle des précipitations et de la faible disponibilité des observations (densité et fiabilité), cette première approche est concluante. Elle offre la possibilité de quantifier avec un niveau de précision suffisant, et à des échelles de temps pertinentes, l'impact des aménagements sur les écoulements en aval du bassin.

L'outil de simulation conceptuel pluie-débit pourrait devenir, dans les années à venir, un outil indispensable à la gestion intégrée des ressources en eau des bassins aménagés au Sahel. La mise en œuvre de ces outils devrait commencer en priorité dans les pays qui connaissent déjà des situations de pénurie de ressources en eau et de conflits d'allocation des eaux.

La mise en œuvre de CEQUEAU-ONU sur le bassin du Nakambé a permis de montrer l'intérêt économique à disposer de données fiables et d'outils d'aide à la décision pour mieux gérer l'eau pour les besoins actuels et pour commencer à planifier la mobilisation optimum de ressources en eau limitées pour les besoins des générations futures. On ne peut plus désormais étudier isolément un aménagement hydraulique sans regarder dans le détail, à long terme, ses impacts à l'aval et l'influence des aménagements projetés à l'amont sur son bassin. Dans un cadre de concertation adapté, la présentation des résultats de simulation de scénarios, devrait permettre aux cadres nationaux de mesurer les enjeux et défis à relever, de promouvoir le financement de la pérennisation des réseaux de mesure et, de définir les besoins correspondants en formation.

La gestion des stocks d'eau pendant les sécheresses pour assurer les besoins prioritaires nécessitera également de prendre en compte une approche par bassin avec des informations et outils appropriés. Enfin, il n'est peut-être pas inutile de rappeler qu'un modèle pluie-débit pourra aussi servir, en cas de besoin, à simuler les conséquences de scénarios climatiques.

Le développement durable des zones à déficit hydrique passe par une appropriation nationale des moyens de gestion, conditionnée par une volonté

politique donnant à la gestion intégrée des ressources en eau, et à la planification à long terme des allocations, une priorité d'ordre stratégique. Pour cela l'outil de simulation, avant d'être un outil d'aide à la décision, peut donc devenir un outil démonstratif de prise de conscience et de formation des décideurs politiques, et des grands groupes d'acteurs. Ils seront très vite, et de plus en plus souvent dans les décades à venir, confrontés à des choix difficile d'allocation de l'eau, et de gestion parcimonieuse de la demande en eau.

Remerciements Les auteurs tiennent à remercier tout particulièrement, la Direction de la Météorologie Nationale du Burkina Faso pour la mise à disposition des données pluviométriques journalières ainsi que la DIRH et le projet "Eau et Développement Régional" pour la mise à disposition des données hydrométriques. La réalisation de CEQUEAU-ONU a été financée par le PNUD et a été appuyée scientifiquement et techniquement par le Secrétariat des Nations Unies (DAES-ONU) avec l'INRS-Eau.

REFERENCES

- Morin, G., Sochanski, W. & Paquet, P. (1998) Modèle CEQUEAU-ONU *Modèle Conceptuel pluie-débit pour la simulation de bassins aménagés: Manuel de références et Guide de l'Utilisateur*. ONU-DESA: INRS-Eau Rapport de Recherche no. 519, Québec, Canada.
- Morin, G. & Couillard, D. (1990). *Predicting River Temperatures with a Hydrological Model*. *Encyclopedia of Fluid Mechanics*, vol. 10: *Surface and Groundwater Flow Phenomena*. Gulf Publishing Company, Houston, Texas, USA.
- WMO (1986). *Intercomparison of Models Snowmelt-Runoff*. Operational Hydrology Report no. 23, WMO, Publ. no. 646. WMO, Geneva, Switzerland.