

Méthodologie simplifiée d'évaluation comparative des performances d'un système d'eau aménagé confronté à la sécheresse: exemple de l'aménagement du Sassandra en Côte d'Ivoire

ERIC SERVAT

ORSTOM, Antenne Hydrologique, 06 BP 1203, CIDEX 1, Abidjan, Côte d'Ivoire

MAMADOU SAKHO

Direction de l'Eau, Ministère des Travaux Publics, BP V161, Abidjan, Côte d'Ivoire

Résumé La sécheresse observée depuis plus de vingt ans en Afrique de l'Ouest, et plus particulièrement en zone sahélienne, a également des répercussions plus au sud. On constate, en effet, dans les pays situés en bordure du golfe de Guinée une nette diminution de la pluviométrie et des écoulements depuis la fin des années 1960. Cette réduction des ressources en eau mobilisables peut avoir des résultats très dommageables quant aux performances des systèmes d'eau aménagés. Il a donc paru important de développer une méthodologie qui permette d'appréhender rapidement la nature des modifications enregistrées et des pertes subies par rapport aux conditions de fonctionnement nominales. L'exemple de l'aménagement du bassin versant du Sassandra a permis de développer et de tester une méthodologie simplifiée aboutissant à une évaluation rapide des performances et des défaillances du système d'eau.

INTRODUCTION

L'activité économique de la Côte d'Ivoire est principalement liée à l'agriculture, et à un degré moindre à une relative industrialisation dont l'énergie est tirée à 60% de l'hydro-électricité. C'est dire l'importance considérable que revêt la disponibilité des ressources en eau. Or, l'analyse des données climatologiques et hydrologiques (Hubert *et al.*, 1989; Sircoulon, 1990) montre qu'en Afrique de l'Ouest l'hypothèse de stationnarité des séries chronologiques pourrait ne plus être vérifiée; les effets tangibles en étant la persistance d'importants déficits pluviométriques. Une telle instabilité pose alors le problème de ses conséquences sur les performances des équipements, et conduit à envisager une nouvelle démarche en matière de planification des aménagements et de gestion de la ressource. L'exemple de l'aménagement du bassin du Sassandra à moyen terme a permis de développer et de tester une méthodologie simplifiée aboutissant à une évaluation rapide des performances et des défaillances du système d'eau. Il a ainsi été possible d'appréhender la nature des modifications enregistrées et des pertes subies par rapport aux conditions nominales établies avant la sécheresse.

SCHEMA D'AMENAGEMENT RETENU

Le bassin versant du Sassandra en amont de Buyo couvre près de 45 000 km². C'est une zone qui, aujourd'hui encore, est très faiblement aménagée et dont les données hydrométriques disponibles peuvent être considérées comme représentatives de l'état naturel. A partir des reconnaissances de sites de retenues qui avaient été effectuées par Electricité de France (EDF) dans les années 1970, et des projets de développement envisageables à moyen terme, un schéma réaliste d'aménagement hydraulique de cette région a pu être élaboré.

Le Nord du bassin, situé en zone de savane et pour lequel on observe une saison des pluies unique est une zone à vocation agro-pastorale. Les trois ouvrages que nous y avons situés sont donc de capacité relativement réduite et à utilisation principalement agricole. Le Sud du bassin est en zone de forêt et présente deux saisons des pluies dans l'année. Les aménagements retenus pour cette zone sont d'une dimension beaucoup plus importante, et à vocation hydroélectrique en priorité. Le Tableau 1 présente les différentes caractéristiques et contraintes de gestion de ces ouvrages. Un premier essai avait été effectué avec un barrage supplémentaire portant le numéro 4, mais cette hypothèse, peu réaliste, a été abandonnée. Par contre, la numérotation des retenues n'a pas été modifiée par la suite. Les relations fonctionnelles des ouvrages, entre eux, ont été représentées en Fig. 1.

ELABORATION DES DONNEES DE SIMULATION

Pour simuler le fonctionnement de ce système d'eau, nous avons choisi de générer deux séries de deux cents ans de données décennales de pluies et de débits en différents points du bassin versant, correspondant à cinq postes pluviométriques du réseau ivoirien et aux stations hydrométriques contrôlant les sites potentiellement aménagés. La génération de ces données a été précédée d'une étude, s'appuyant sur les travaux de Nicholson *et al.*

Tableau 1 Caractéristiques du système d'eau aménagé.

Retenue	Capacité (Mm ³)	Module interann. (m ³ s ⁻¹)	Objectif	Débit réservé (m ³ s ⁻¹)	Besoins en irrigation	Production hydroélec.
1	62	5	Agricole	0.32	12 000 ha soja en amont	-
2	32.5	35	Agricole	2.3	10 000 ha de canne à sucre en amont	-
3	30	65	Agri/Elec	3	500 ha de riz 2 cultures/an 250 ha vivrier	2 turbines $Q = 40 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
5	5000	247	Electricité	10	-	2 turbines $Q = 160 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ turbinage continu
6	1450	65	Agri/Elec	3.5	1000 ha de riz 200 ha vivrier	2 turbines $Q = 50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$

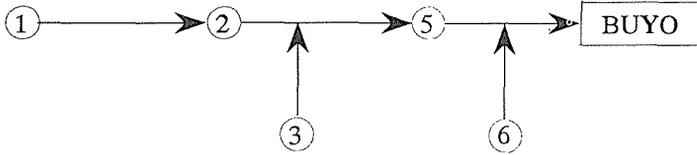


Fig. 1 Relations fonctionnelles des différents ouvrages composant le schéma d'aménagement retenu pour le bassin du Sassandra.

(1988), qui a confirmé l'instabilité des chroniques de précipitations de part et d'autre de l'année 1969 (Sakho, 1991). Nous avons alors cherché à générer une série de deux cents ans ayant, pour l'une, les caractéristiques observées avant 1969, et, pour l'autre, celles observées depuis lors.

Génération de la pluviométrie décadaire

Notre objectif n'était que de fabriquer des chroniques d'apports réalistes. Nous avons donc opté pour une procédure simplifiée dont les résultats se sont montrés suffisamment représentatifs.

Pour chacun des postes pluviométriques considérés, nous avons constaté l'indépendance des décades les unes par rapport aux autres (coefficients d'autocorrélation non significatifs). Une loi des fuites a alors été ajustée pour chaque décade et pour chacun des postes à partir des données observées. Ensuite, pour chaque année, 36 valeurs ont été tirées au hasard dans la loi uniforme. Par anamorphose dans les lois des fuites décadaires respectives, on obtient la valeur de la pluviométrie correspondante. De manière à conserver au système une certaine cohérence (années sèches et années pluvieuses sont ressenties comme telles sur l'ensemble de la région), ce sont les mêmes séries de nombres tirés au hasard qui ont été utilisées en chacun des postes pour générer les chroniques de données par tirage dans les lois des fuites. De même, pour respecter l'alternance des périodes sèches et humides et n'avoir à juger que de l'incidence de la diminution de la ressource, les mêmes séries ont été utilisées "avant 1969" et "après 1969". En procédant ainsi, nous avons obtenu des séries générées dont les caractéristiques sont très voisines des séries observées tout en offrant un éventail de situations variées. Le Tableau 2 présente les exemples des postes d'Odienné et de Vavoua.

Génération des apports naturels aux stations hydrométriques de référence

Le principal problème auquel nous avons été confrontés est que nous ne disposions que de données hydrométriques postérieures à 1969. Nous n'avons donc pu caler de relations pluie-débit que pour les séries observées après cette date, en faisant l'hypothèse que ces relations étaient identiques "avant" et "après 1969". Cette hypothèse est extrêmement simplificatrice; néanmoins, c'était la seule solution pour être à même de générer les apports décadaires relatifs aux séries de type "avant 1969". Nous avons choisi de représenter la relation pluie-débit à l'aide de modèles autorégressifs et corrélatifs, fonctionnant au pas de temps décadaire. Afin de préserver la cohérence des données générées,

Tableau 2 Caractéristiques des pluies observées et générées à Odienné et Vavoua (mm an⁻¹).

	Avant 1969		Après 1969	
	Observé	Généré	Observé	Généré
Odienné				
Moyenne	1610	1593	1418	1418
Ecart-type	215	190	245	168
Minimum	1203	1134	992	949
Maximum	2188	2266	1773	2007
Vavoua				
Moyenne	1311	1291	1118	1106
Ecart-type	243	196	197	189
Minimum	857	825	742	663
Maximum	1765	1968	1505	1804

dans le temps et dans l'espace (de l'amont vers l'aval), la relation pluie-débit calée a porté sur la différence entre le débit à la station considérée et la somme des débits des stations amont au pas de temps t . La forme générale des équations est donc la suivante:

$$Q(t) - \sum_{i=1}^n Q_{amont_i}(t) = F[Q(t-1), Q(t-2), P(t), P(t-1), Q_{amont_1}(t-1), \dots, Q_{amont_n}(t-1)] \quad (1)$$

avec: n = nombre de retenues amont, $Q(t)$ = débit au temps t , et $P(t)$ = pluie au temps t .

La prise en compte des débits amont a été limitée au pas de temps $t - 1$ car les temps de transfert entre deux stations hydrométriques successives n'excédaient pas un pas de temps. Les coefficients de corrélation des différentes équations établies sont tous supérieurs à 0.80, voire à 0.90 pour les stations aval du Sassandra, ce qui est tout à fait acceptable.

L'ensemble des hypothèses effectuées, tant pour la génération des pluies que des débits n'a pas eu pour effet de "dénaturer" le régime des eaux au point de lisser les écarts ou au contraire de créer des différences fictives. Elles ont permis de reconstituer des chroniques "plausibles", compatibles avec la rare information pluie-débit concomitante disponible.

ORGANISATION GENERALE DU MODELE DE SIMULATION DE FONCTIONNEMENT

Le modèle de simulation de fonctionnement du système d'eau aménagé doit prendre en compte, essentiellement, deux types de besoins, tout en tenant compte d'un débit garanti aval: l'irrigation amont et/ou aval et l'hydroélectricité.

En établissant un bilan complet sur chacune des retenues, le modèle peut fournir, à chaque pas de temps (donc à chaque décennie), l'état de chacun des ouvrages et les niveaux de satisfaction des différentes contraintes de gestion. Il est alors possible de mettre en évidence et de mesurer l'incidence de ressources en eau moins abondantes sur

les performances de ces ouvrages en établissant, par exemple, des comparaisons en terme de défaillances.

A chaque pas de temps, les six retenues sont traitées successivement, de l'amont vers l'aval. Pour un ouvrage donné, le modèle effectue un bilan des entrées-sorties de la retenue. Il détermine, selon les cas, les volumes fournis à l'agriculture amont, la lâchure (débit garanti et volume fourni pour l'agriculture aval), les éventuels débordements et la production électrique. A l'issue de cet ensemble de calculs, on connaît l'état de la retenue (c'est à dire la cote du plan d'eau) à la fin du pas de temps. Cette détermination de la cote du plan d'eau se fait à l'aide d'un processus itératif. Le calcul de plusieurs termes du bilan nécessite, en effet, de connaître la cote moyenne de l'ouvrage durant le pas de temps considéré. Au premier passage dans la procédure, la cote moyenne est prise égale à la cote initiale de la retenue au début du pas de temps, ce qui permet de calculer une cote finale. On peut alors calculer une nouvelle cote moyenne, reprendre les termes du bilan et recalculer la cote finale. Le processus est ainsi répété jusqu'à obtenir une cote finale stable au centimètre près. C'est généralement le cas en deux ou trois itérations.

FONCTIONNEMENT DU MODELE DE SIMULATION

La Fig. 2 présente le schéma de fonctionnement d'une retenue du système étudié. En fonction des objectifs assignés à chaque réservoir, certaines tâches sont, ou non, exécutées.

Les entrées principales de la retenue sont les apports amont et les précipitations sur le plan d'eau auxquels il convient d'ajouter les débits de colature. Les sorties consistent en des pertes par évaporation et dans les biefs en aval des retenues, ainsi qu'en des volumes fournis pour satisfaire les différentes contraintes. Si les pertes dans les biefs sont négligeables lorsque les volumes qui transitent sont importants, ce n'est plus le cas avec de faibles volumes. Dès que le volume qui transite dans le bief durant un pas de temps est inférieur à q (fixé à 5% du module annuel), les pertes sont comptabilisées. Le volume des pertes durant le pas de temps t , $Perte(t)$, est alors calculé par différence entre q et le volume de sortie de la retenue $Q(t)$, soit:

$$\begin{aligned} Perte(t) &= q - Q(t) && \text{si } Q(t) < q \\ Perte(t) &= 0 && \text{si } Q(t) \geq q \end{aligned} \quad (2)$$

Les pertes sur le bief considéré sont alors retranchées au volume lâché par la retenue pour obtenir le volume réel de sortie transitant effectivement dans le bief.

Si l'on prend en compte ces différents éléments et le fait que l'on connaisse les débits en l'état naturel, c'est à dire hors aménagements, l'équation générale du volume entrant dans une retenue située en aval de plusieurs barrages s'écrit (Sakho, 1991):

$$QE(B,t) = Q(B,t) - \sum_{i=1}^n Qti(Am,t) + \sum_{i=1}^n QSTi(Am,t) + Colature\ amont(B,t-1) \quad (3)$$

avec: n = nombre de retenues amont; $QE(B,t)$ = volume entrant dans la retenue B au pas de temps t ; $Q(B,t)$ = volume s'écoulant en l'état naturel au site B au pas de temps t ; $Qti(Am,t)$ = débit transféré de la retenue amont i vers l'aval à l'état naturel au pas de

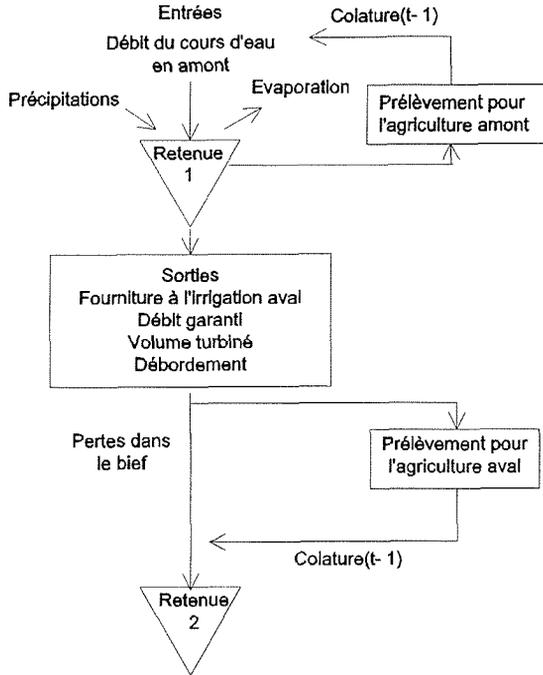


Fig. 2 Schéma de fonctionnement d'une retenue type.

temps t ; $QSTi(Am,t)$ = débit transféré de la retenue amont i vers l'aval à l'état aménagé au pas de temps t ; $Colature\ amont(B, t - 1)$ = débit de colature issu de $t - 1$ et ré-entrant dans B au pas de temps t .

Cette formulation issue de l'écriture des bilans en l'état naturel et aménagé permet d'éliminer la variable "Apports intermédiaires" dont la valeur est inconnue.

Le volume entrant étant défini, il est possible de calculer à chaque pas de temps le volume utile destiné à satisfaire les différentes contraintes:

$$\text{Volume utile } (t) = QE(t) - \text{Evaporation} + \text{Volume initial} - \text{Volume minimal} \quad (4)$$

La satisfaction des différentes contraintes prend en compte des coefficients de priorité destinés à permettre la gestion d'une éventuelle pénurie d'eau.

Ce modèle de fonctionnement simplifié permet la mise en oeuvre rapide de simulations pour divers scénarios d'aménagements ou de chroniques de ressources en eau. Associé à une procédure simplifiée, mais robuste et vraisemblable, de génération de données, cet algorithme a fourni des résultats de bonne qualité analysés à plusieurs niveaux.

ANALYSE DES SIMULATIONS DE FONCTIONNEMENT

Le fonctionnement du système d'eau aménagé a été simulé au pas de temps décadaire durant deux cents années dans les conditions de type "avant 1969" et après "1969".

L'analyse des résultats s'est effectuée selon des niveaux de complexité et de détails croissants:

- (a) analyse globale des réactions du système dans chacun des cas;
- (b) analyse globale par ouvrage; et
- (c) analyse de quelques cas particuliers de défaillances.

Nous ne présentons ici que les grandes lignes de cette analyse exposée plus en détails par Sakho (1991) et Servat & Sakho (1994).

Analyse globale des réactions

Le modèle de simulation permet de calculer les apports à chaque retenue en l'état aménagé du système d'eau pour chacun des scénarios. Les différences sont très marquées et, bien entendu, à l'avantage de la série "avant 1969". Elles s'accroissent en valeur absolue avec la superficie des bassins, et du Nord vers le Sud. Sur les barrages 5 et 6, ces écarts entre apports "avant 1969" et "après 1969" peuvent atteindre jusqu'à plusieurs centaines de millions de m³ par an. Les volumes annuels de déversement s'inscrivent également dans la logique de la diminution de la ressource "après 1969", puisque systématiquement plus faibles après cette date.

Analyse des défaillances au regard des contraintes

Satisfaction de la demande agricole L'évaluation des performances du système par rapport à cette contrainte s'est faite à partir des moyennes décennales des 200 années de simulation. Nous avons choisi de l'exprimer en pourcentage de satisfaction. Les ouvrages du Nord du bassin (1, 2 et 3), dont la vocation est hydro-agricole, présentent des défaillances fin Mars/début Avril, en fin de saison sèche. Ces défaillances sont plus sévères pour la série des apports "après 1969" (Sakho, 1991).

Débit garanti La satisfaction de cette contrainte est liée à celle des besoins agricoles. Cependant, le niveau de défaillance est moindre (seuls les barrages 1 et 2 montrent des défaillances) dans la mesure où, dans le modèle de simulation, une priorité a été affectée au débit garanti par rapport aux besoins hydro-agricoles.

Production hydro-électrique La production d'hydroélectricité est grande consommatrice des ressources en eau. Par comparaison avec l'agriculture, on pouvait donc s'attendre à une plus grande sensibilité du système face à la diminution des ressources. Sur les trois barrages équipés de turbines (3, 5 et 6), des déficits de production apparaissent de façon beaucoup plus accentués dans la période "après 1969". Le barrage 6 illustre le cas le plus criant de contre-performance due à la diminution de la ressource (cf. Fig. 3). "Avant 1969", la production est plus ou moins constante et se situe autour de 90% de satisfaction de la contrainte hydro-électrique. "Après 1969", en fin de la saison sèche, on se trouve, en moyenne, à environ 55% de satisfaction de la production décennale nominale, ce qui représente un déficit de l'ordre de 30% par rapport à la série "avant 1969". En outre, la courbe de production de la série "après 1969" ne dépasse que très rarement les 80% de la production nominale.

Etude de quelques défaillances particulières

Nous avons tenté de mieux appréhender les situations pouvant conduire à des défaillances du système. Pour ce faire, certaines années ont été choisies parmi celles qui présentent le plus grand nombre de décades défaillantes consécutives. Cette étude était possible dans la mesure où la méthodologie mise en place offre "avant 1969" et "après 1969" les mêmes successions d'années sèches et humides, du fait de la génération des données à partir des mêmes séries de nombres au hasard. Cette analyse a montré (Sakho, 1991) que pour les barrages à faible capacité, a contrario des retenues à volumes stockés plus importants, la différence est très minime qui fait passer d'une situation satisfaisante à une défaillance. Généralement la chute est brutale, les retenues ne pouvant jouer un rôle de tampon. En cas d'apports déficitaires prolongés, la situation persiste, occasionnant principalement de sérieuses difficultés à l'agriculture irriguée. Cependant, aucun seuil d'apports minimum, sur une durée donnée, en dessous duquel se produirait une défaillance, n'a pu être mis en évidence.

CONCLUSION

L'élaboration de ce modèle de simulation de fonctionnement du bassin du Sassandra s'est effectuée selon une méthodologie simplifiée. En ce qui concerne la génération des données pluviométriques et hydrométriques, les procédures retenues se sont révélées rapides à mettre en oeuvre et fiables quant à la qualité des résultats fournis. Elles permettent, en outre, une comparaison très précise des performances pour plusieurs scénarios de ressources puisqu'elles s'appuient sur une alternance "périodes sèches -

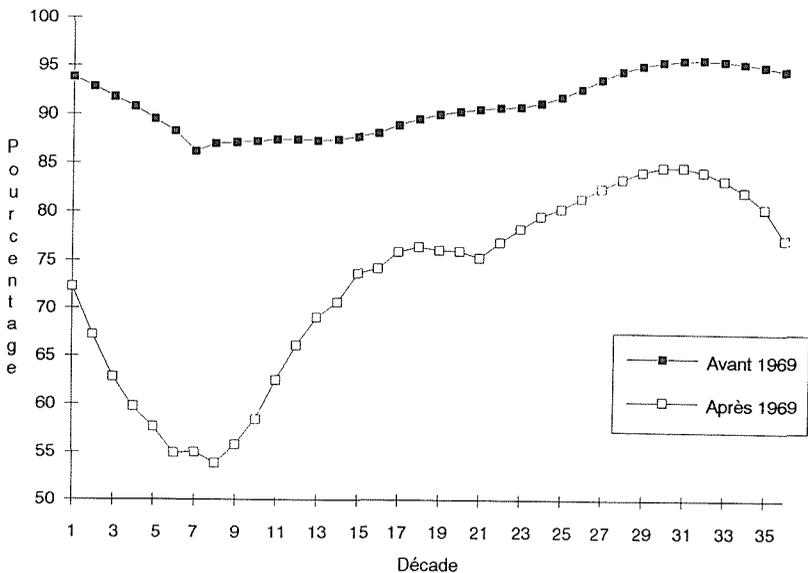


Fig. 3 Niveau moyen décadaire de satisfaction de la production électrique pour le barrage 6 (niveau nominal 100%).

périodes humides" identique dans tous les cas. Le modèle de simulation proprement dit permet de s'affranchir de la connaissance des apports intermédiaires généralement non disponibles. Sa structure modulaire permet de modifier très simplement les caractéristiques d'un ouvrage et de tester rapidement l'impact de ces modifications. Enfin, basé sur une procédure itérative rapidement convergente, il s'est montré suffisamment général pour être appliqué tel quel dans les différents cas envisagés.

On a alors pu montrer que, bien que la pluviométrie soit plus abondante et mieux répartie qu'en région sahélienne, la zone forestière humide présente, elle aussi, des situations critiques vis-à-vis de ressources en baisse, reflet de la tendance climatique générale observée aujourd'hui dans toute la région. Si la situation actuelle devait se prolonger en Afrique de l'Ouest, les ressources en eau de surface ne seraient plus en correspondance avec des besoins déterminés et planifiés à partir de chroniques de données présentant des caractéristiques différentes de celles observées aujourd'hui. Les fréquences de défaillances seraient alors beaucoup plus élevées provoquant d'importantes chutes de production des aménagements réalisés. Dans le cas particulier du Sassandra, cette étude a permis d'attirer l'attention des autorités sur les conséquences de la sécheresse et de ses manifestations au sud du Sahel.

REFERENCES

- Hubert, P., Carbonnel, J. P. & Chaouche, A. (1989) Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *J. Hydrol.* **110**, 349-367.
- Nicholson, S. E., Kim, J. & Hoppingarner, J. (1988) *Atlas of African Rainfall and Its Interannual Variability*. Dept. of Meteorology, Florida State Univ.
- Sakho, M. (1991) Incidences de l'instabilité des ressources en eau de surface sur les performances simulées d'un système d'eau. Exemple du Sassandra en Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, Nov.
- Servat, E. & Sakho, M. (1994) Instability of water resources and management of a planned water system in non-Sahelian West Africa. The case of the Sassandra catchment basin in Ivory Coast. *Hydrol. Sci. J.* (A paraître).
- Sircoulon, J. (1990) Impact possible des changements climatiques sur les ressources en eau des régions arides et semi-arides. *WMO/TD* 380.



Modelling and Management of Sustainable Basin-Scale Water Resource Systems

Edited by

SLOBODAN P. SIMONOVIC

*Department of Civil and Geological Engineering,
The University of Manitoba, 324 Engineering Building,
15 Gillson Street, Winnipeg, Manitoba, Canada R3T 5V6*

ZBIGNIEW KUNDZEWICZ

*Department of Hydrology and Water Resources,
World Meteorological Organization, CP No. 5,
CH-1211 Geneva 20, Switzerland*

DAN ROSBJERG

*Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering,
Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark*

KUNIYOSHI TAKEUCHI

*Department of Civil and Environmental Engineering,
Yamanashi University, Kofu, Japan*

Proceedings of an international symposium held at Boulder, Colorado, USA during the XXI Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, 1-14 July 1995. The Symposium was organized by the International Commission on Water Resources Systems of the International Association of Hydrological Sciences.

**Published by the International Association of
Hydrological Sciences 1995**

IAHS Press, Institute of Hydrology, Wallingford, Oxfordshire
OX10 8BB, UK.

IAHS Publication No. 231.

ISBN 0-947571-59-0

British Library Cataloguing-in-Publication Data.

A catalogue record for this book is available from the British Library.

IAHS is indebted to the Department of Civil and Geological Engineering, The University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada, for the support and services provided that enabled the Editor-in-chief to function effectively and efficiently. IAHS is similarly indebted to the employers of the co-editors for the support they provided.

The designations employed and the presentation of material throughout the publication do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of IAHS concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries.

The use of trade, firm, or corporate names in the publication is for the information and convenience of the reader. Such use does not constitute an official endorsement or approval by IAHS of any product or service to the exclusion of others that may be suitable.

The work of Mrs Ingrid Trestrail on editing and preparing camera ready copy of the manuscripts is gratefully acknowledged.

The final camera-ready copy for the papers was finished, printed out, and assembled by Sarah Cage (freelance Editor, Birmingham, UK); using edited files in WordPerfect 5.1 produced at the Department of Civil and Geological Engineering, The University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada.