

IV – ANALYSE ET MODELISATION DES SYSTEMES D'EAU

Hubert DOSEUR (*), Raymond GRAS (**)

– ELECTRICITE DE FRANCE –

RESUME

De 1979 à 1982, l'analyse des systèmes d'eau s'est poursuivie dans une optique de compréhension des mécanismes physiques et s'est concrétisée par un grand développement des techniques de modélisation mathématique, tant sous l'aspect quantitatif que qualitatif.

En matière de quantité d'eau, cette période a été surtout marquée par la recherche d'une modélisation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains. Le domaine de la qualité des eaux a été très largement abordé avec plus spécialement la modélisation des écosystèmes aquatiques relatifs aux cours d'eau, lacs, réservoirs, estuaires et au milieu marin.

ABSTRACT

(Analysis and water system modelling)

From 1979 to 1982, the water systems analysis has continued with a view to the physical mechanism understanding and has been concluded by a great development of mathematical modelling both in water quantity and water quality aspects.

For water quantity, the outstanding point of this period consists in research of a jointly simulation, surface runoff and waterground flow. In the water quality field, many models has been developed relating to rivers, lakes, reservoirs, estuaries and sea.

1 – LES SYSTEMES D'EAU NATURELS

Analyses et synthèses régionales

De 1979 à 1982 l'étude des systèmes d'eau naturels s'est poursuivie tant sous l'aspect analytique de la compréhension des mécanismes hydrologiques que sous celui des grandes synthèses régionales.

Ainsi au cours de cette période l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer – ORSTOM – a poursuivi l'analyse des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles et sous pluies simulées [31]. Cette utilisation systématique du simulateur de pluie comme moyen d'investigation doit permettre de préciser les caractéristiques hydrodynamiques des sols tropicaux et de mettre en évidence les paramètres les plus représentatifs de leur comportement.

En vue d'établir des méthodes objectives d'estimation des paramètres hydrologiques sur des bassins non observés, le Ministère de l'Agriculture (Centre d'Expérimentation du Machinisme Agricole des Eaux et Forêts – CEMAGREF –, les Services Régionaux d'Aménagement des Eaux – SRAE – et le Service de l'Hydraulique) a réalisé une vaste synthèse

(*) ORSTOM, 70-74, route d'Aulnay, F-93140 BONDY (FRANCE).

(**) EDF, Direction des Etudes et Recherches, 6 Quai Watier F-78400 CHATOU (FRANCE).

nationale des crues portant sur plus de 600 bassins versants. Ce travail a conduit à la mise au point de 2 méthodes pratiques d'estimation des crues [47] :

- la méthode SOCOSE qui fournit l'hydrogramme de la crue décennale sur des bassins d'une superficie de 2 à 200 km².
- la méthode simplifiée CRUPEDIX qui fournit le débit instantané de crue de fréquence décennale pour les bassins non jaugés d'une superficie de 2 à 2 000 km².

Dans la même optique de synthèse, l'ORSTOM a terminé une étude entreprise dès 1977 à la demande du Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques – CIEH – afin d'améliorer la méthode d'estimation des crues décennales sur les petits bassins forestiers en Afrique tropicale [12].

Il faut enfin signaler les études synthétiques effectuées par le Bureau de la Recherche Géologique et Minière – BRGM – sur les relations entre les caractéristiques physiographiques de 17 bassins et les débits observés à l'exutoire [42, 55].

Modélisation

La simulation des systèmes d'eau naturels a pris un grand essor avec l'utilisation croissante des modèles hydrologiques pour la production des chroniques de débits nécessaires aux études d'aménagement des eaux ou pour la prévision et cela par une approche de type déterministe ou stochastique.

C'est surtout dans le domaine des modèles conceptuels de bassins versants que d'importants progrès ont été réalisés durant ces quatre années et le trait le plus marquant aura été la recherche d'une modélisation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains.

Cet objectif a été pleinement atteint par l'élaboration d'un modèle intégré pluie, eau de surface, eau souterraine (dit "modèle couplé") qui est le fruit d'une étroite collaboration entre le laboratoire d'hydrogéologie Mathématique de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, le service hydrologique de l'ORSTOM et l'Institut National de la Recherche Scientifique-Eau du Québec. Ce modèle consiste en l'association d'un modèle multicouche en mailles carrées enboîtées des écoulements souterrains et d'un modèle hydrologique à discrétisation spatiale [32, 40, 56].

Une recherche analogue a été entreprise par la Société Grenobloise d'Etudes et d'Applications hydrauliques – SOGREAH – en collaboration avec le Danish hydraulic Institute (Danemark) et l'Institute of hydrology of Wallingford (Grande Bretagne), pour réaliser en commun un modèle de simulation du processus pluie-ruissellement-écoulement souterrain dénommé "Système Hydrologique Européen".

En matière de planification des Eaux signalons une large utilisation des modèles déterministes existants, après adaptation aux particularités locales (BRGM, ORSTOM, SOGREAH, Compagnie Nationale d'Aménagement de la région du Bas Rhône et du Languedoc, Laboratoire d'Hydrologie Mathématique de l'Université de Montpellier, Société ARLAB). Cette modélisation s'est faite généralement dans une optique de valorisation de l'information climatologique disponible (modèles hydrologiques de transformation des pluies en débits) ou de simulation de la gestion des ressources (modèles hydrodynamiques de nappes).

En gestion opérationnelle (en temps réel) l'utilisation des modèles déterministes a surtout concerné l'annonce de crues avec en particulier l'emploi des modèles développés par la SOGREAH [22], soit par une méthode globale pour les petits bassins (modèle PRECRU), soit par une méthode de discrétisation temporelle selon le temps de concentration pour les bassins d'une superficie de 500 à 2 000 km² (modèle PREVICK).

En utilisant une démarche de type stochastique dans la recherche de la relation entre l'écoulement et les différents facteurs observés dont il dépend, la Division Technique Générale d'Electricité de France – DTG – a continué à améliorer ses méthodes de prévision des débits de crue pour les bassins versants de l'ordre de 1 000 km² [36]. La DTG a également poursuivi

de façon systématique l'élaboration de modèles stochastiques de prévision à court terme (quelques heures à 5 jours) sur le Rhône et ses affluents, la Loire et sur différents cours d'eau de l'Ouest du Massif Central.

Toujours dans ce domaine, on peut citer les modèles à base de régressions simples ou multiples mis au point par l'ORSTOM pour la prévision des crues de la Meurthe et de la Moselle [41] ainsi que les modèles probabilistes d'évolution des étiages établis par le laboratoire national d'hydraulique de Chatou (direction des Etudes et Recherches EDF) [48] et par le Laboratoire d'Hydrologie Mathématique de l'Université de Montpellier.

2 - LES SYSTEMES D'EAU AMENAGES

Les systèmes urbains

Le milieu urbain a fait l'objet de nombreuses recherches au cours de la période 1979-1982 en matière d'analyse et de simulation du ruissellement.

Le CIEH a entrepris une synthèse du ruissellement urbain en Afrique de l'Ouest en vue d'améliorer les méthodes de dimensionnement des ouvrages d'assainissement. C'est dans le cadre de cette synthèse que l'ORSTOM a effectué une étude du ruissellement sur la ville de OUAGADOUGOU [39] et que des études analogues sont en cours ou en projet sur d'autres grandes villes africaines.

En France l'expérimentation en hydrologie urbaine est entrée dans une phase active grâce aux actions menées par différents organismes dans ce domaine comme la SOGREAH, le Laboratoire d'Hydrologie Mathématique de l'Université de Montpellier [20], le Ministère de l'équipement et du cadre de vie [47].

Les résultats de l'analyse des systèmes d'eau urbains ont été concrétisés dans l'élaboration de nombreux modèles mathématiques spécifiques à l'hydrologie urbaine. Nous citerons en particulier le modèle RERAM mis au point par le Laboratoire d'hydrologie Mathématique, de Montpellier pour le compte du Ministère de l'Intérieur en vue d'une utilisation aussi vaste et aussi simple que possible par des Techniciens de l'Aménagement. Il s'agit d'une simulation mathématique pour les études d'assainissement à partir d'une analyse déterministe très poussée [21, 47].

De même le modèle HYDROG-LIGNEAU [8] établi par la Société Anonyme Française d'Etudes et de Gestion - SAFEGE - permet le calcul des écoulements dans un réseau ramifié sur un bassin versant urbanisé. Citons également le modèle UREP 13 [54] de la Société du Canal de Provence et d'Aménagement de la Région Provençale - SCP - qui simule la génération et la propagation d'hydrogrammes dans un réseau ramifié.

Aménagement des eaux

En ce qui concerne l'Aménagement des eaux la période de référence a été marquée par un effort de réflexion sur les aspects techniques mais aussi socio-économiques et écologiques de l'utilisation rationnelle des ressources en eau.

Un des points importants de cette réflexion a été la prise de conscience généralisée de la nécessité d'études coordonnées des ressources en eau superficielles et souterraines. L'importance et la complexité croissante des études entreprises dans ce domaine ont eu pour conséquence un grand développement des techniques de modélisation mathématique appliquées aux systèmes d'eau aménagés.

Ces "modèles d'Aménagement" se sont révélés être des outils très efficaces tant pour l'aide à la décision que pour la simulation du fonctionnement des systèmes d'eau au niveau de la planification ou du projet.

L'application des techniques de la Recherche opérationnelle et de l'Analyse des systèmes

a conduit à l'élaboration de "modèles d'optimisation" permettant d'orienter la prise de décision au stade de la planification.

Signalons en particulier le programme BBFOK établi par la SOGREAH [43] qui résulte de l'application de la théorie des flots dans les graphes développée par FORD et FULKERSON. Ce modèle permet la recherche d'une solution d'aménagement optimale d'un grand bassin avec allocation de la ressource en eau entre différents usages et détermination des caractéristiques optimales des équipements capables de mobiliser cette ressource pour satisfaire ces usages.

Nous citerons également le modèle SMECA mis au point par le Laboratoire d'Hydrologie Mathématique de Montpellier pour optimiser la répartition interannuelle de la ressource en avenir connu et qui utilise la technique de la programmation dynamique.

Les études de planification et de gestion des ressources en eau ont également nécessité le développement des modèles de simulation qui, à partir d'une description aussi détaillée que souhaitée, permettent de calculer les performances du système d'eau dans un état bien défini et selon un plan d'opération déterminé en utilisant la totalité de l'information hydrologique disponible (chroniques).

Ces techniques de simulation ont été largement développées à l'ORSTOM et à la Direction des Affaires Extérieures et de la Coopération d'EDF, pour l'étude de nombreux projets d'aménagements hydrauliques faisant intervenir des équipements complexes et des usages multiples. Nous citerons en particulier le modèle élaboré par l'ORSTOM dans le cadre des études du Plan Directeur des Eaux du Nord de la Tunisie [23].

De même de nombreux modèles hydrodynamiques de nappe ont été utilisés par le BRGM dans une optique de gestion optimale des ressources en eau souterraine. On peut citer comme exemple récent l'étude de la plaine d'Alsace [4].

3 - QUALITE DES EAUX

Durant ces quatre dernières années (1979-1982) un effort important a été porté sur la modélisation de la qualité des eaux et plus généralement sur celle des écosystèmes aquatiques. La France veut-elle rattraper le retard qu'elle a accumulée en ce domaine ? Certes la modélisation de la qualité de l'eau reste encore le fait d'équipes bien isolées, mais dans le domaine pratique les techniciens, de l'administration y compris, prennent de plus en plus conscience des possibilités qu'offre la modélisation en matière de gestion des ressources en eau. L'obligation d'établir pour tous les grands aménagements une étude d'impact sur l'environnement à caractère prévisionnel n'est sans doute pas étrangère à cette prise de conscience. Les hydrobiologistes commencent eux aussi à voir dans la modélisation une voie complémentaire utile aux travaux de laboratoire ou de terrain.

La plupart des travaux présentés ces dernières années concernent les rivières et les lacs, cependant quelques modèles ont été développés pour traiter des problèmes spécifiques que posent les estuaires et quelques tentatives sont faites en milieu marin. Pour passer en revue les travaux effectués nous avons donc choisi de les regrouper en fonction du milieu concerné.

Cours d'eau

La modélisation de la qualité des eaux des rivières a longtemps été limitée à l'étude des régimes thermiques (GRAS, GILBERT, POULIN) avec une description le long du cours d'eau de l'évolution temporelle des températures. Durant ces dernières années l'application de ce type de modèle s'est poursuivie pour traiter les problèmes liés à l'implantation de centrales thermiques ou à des aménagements hydrauliques : optimisation de la source froide et impact sur l'environnement. POULIN, ENDERLE, GILBERT, MOMAL. La fiabilité des modèles de simulation de régime thermique n'est plus à démontrer ; ils sont utilisables pour des études à caractère prévisionnel.

L'addition d'autres paramètres de qualité d'eau s'est faite progressivement avec l'application de modèles inspirés de celui de STREETER et PHELPS représentant l'évolution longitudinale du bilan d'oxygène dissous et de la DBO. C'est le cas par exemple des travaux de CHALON, MOMAL et SABATON sur le DOUBS, d'ENDERLE sur le RHONE. Les travaux de LEFORT appliqués à divers cours d'eau de l'Est de la France prennent en considération un nombre grandissant de paramètres.

Chalon introduit pour la Loire les termes de production photosynthétique, Cosse reprend ces travaux pour la Loire et le Doubs avec une description plus appropriée des termes de croissances et mortalités du phytoplancton, une prise en considération du cycle de l'azote, l'introduction du terme de demande benthique en oxygène. CAPBLANCQ, DAUTA, CAUSSADE et DECAMPS abordent la simulation de l'évolution du phytoplancton dans une rivière aménagée, le Lot, d'une manière analogue ; ils montrent la nécessité de représenter plus finement les processus biologiques en particulier le rôle des bactéries dans les cycles du phosphore et de l'azote. Ce travail constitue un excellent exemple de collaboration pluridisciplinaire. De la même équipe il faut citer les travaux de CAUSSADE, CHAUSSAVOINE et MASBERNAT.

Lacs et réservoirs

La modélisation de la qualité des eaux des lacs et retenues a fait aussi l'objet de nombreux travaux. Deux écoles peuvent être distinguées qui correspondent à des études ayant des finalités différentes et surtout concernant des milieux différents.

L'une aborde la représentation des mécanismes de transport internes par un terme de diffusion, méthode plus appropriée pour les lacs où le rôle des échanges entre l'eau et les sédiments peut devenir important. Il faut citer dans ce domaine les travaux de CHAHUNEAU, à qui l'on doit par ailleurs de remarquables synthèses sur les modèles de simulation en écologie lacustre, DES CLERS et MEYER. Ils présentent en particulier une modélisation détaillée du cycle du phosphore du lac du Bourget en prenant en compte la distribution spatiale.

L'autre école cherche à détailler les mécanismes responsables des mouvements internes des masses d'eau, en particulier ceux dus aux apports d'eau par le bassin versant et aux soutirages d'eau aux usines hydroélectriques. Cette méthode est plus appropriée pour représenter l'évolution de la qualité de l'eau d'une retenue où le renouvellement de l'eau joue un rôle primordial ; elle permet en outre de procéder à des études à caractère prévisionnel. GAILLARD présente une simulation de l'évolution de la qualité de l'eau de la retenue de GRANGENT en s'attachant aux paramètres températures et oxygène dissous ; toujours pour cette même retenue GARCON présente un modèle où l'accent est porté sur l'évolution de la biomasse algale et de plusieurs nutriments (phosphore, azote, silice). ENDERLE reprend ces travaux en présentant un modèle de simulation de la stratification thermique des retenues qu'elle applique à des cas particulièrement complexes comme ceux des aménagements de pompage où l'eau passe alternativement par pompage et turbinage entre une retenue haute et une retenue basse. Elle étend son modèle pour représenter l'évolution des paramètres de qualité d'eau, oxygène dissous, nutriments, biomasse algale.

Il faut citer enfin les travaux de BALLAND cherchant à modéliser les apports, phosphore en particulier, provenant du bassin versant amont ; ceux de FABRE qui applique la méthode de VOLLENWEIDER pour procéder à une classification de retenues de grandes dimensions. Enfin GENTIL, après avoir présenté un modèle du lac d'Aiguebelette où l'accent est porté sur la description de l'écosystème plus que sur les mécanismes hydrauliques, porte son attention sur les problèmes liés à la validation des modèles écologiques.

Estuaires

La modélisation de la qualité de l'eau des estuaires n'a suscité que très peu de travaux en France. Quelques études partielles ont porté sur l'estuaire de la Loire en particulier pour étudier les phénomènes de relargages en périodes estivales de faibles teneurs en oxygène dissous.

ALBIGNAT a adapté à la Gironde un modèle inspiré de STREETER et PHELPS pour étudier l'influence de rejets thermiques sur le bilan d'oxygène dissous ; il introduit des termes de demande benthique et étudie le rôle éventuel de la mortalité du phytoplancton d'eau douce. ROMANA a développé un modèle plus élaboré pour l'estuaire de la Seine où il met en évidence le rôle important du cycle de l'azote.

Milieu marin

La modélisation en milieu marin concerne des études locales d'émissaires, pour lesquelles on ne peut guère parler de modèles de qualité d'eau. Quelques travaux se sont cependant développés qui concernent les régimes thermiques : KLEIN s'est intéressé à la formation de la stratification thermique, à une échelle de temps très fine, AGOUMI et ENDERLE au contraire ont développé un modèle de simulation du régime thermique de la Manche lui permettant de reconstituer l'évolution des températures au cours des années.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] AGOUMI A. (1982). — Modélisation du régime thermique de la Manche (Modèle de la Manche-Est). Rapport EDF E 31-82 n° 6.
- [2] AGOUMI A., SABATON C. (1982). — Application du Modèle thermique Manche-Est en vue de l'étude de la Faune benthique. Rapport EDF/DER HE/31-82, n° 15.
- [3] ALBIGNAT J.P. (1981). — Modèle de simulation d'oxygène dissous dans l'estuaire de La Gironde. Rapport EDF HE/31-81 19.
- [4] BABOT Y., VANCON J.P. (1982). — Gestion des Ressources en Eau Souterraine par modèles hydrodynamiques, hydrochimiques et hydrothermiques. Exemple de la Plaine d'Alsace. CEMPE n° Conférence Internationale sur la planification et la gestion des Eaux. Marseille, mai 1982.
- [5] BALLAND P. (1975). — Charges en fertilisants des principaux tributaires du lac du Bourget. Fasc. 5 : Essai d'établissement d'un modèle de prévision ; conséquences opérationnelles ; bibliographie sur les modèles. Rapport de la Station d'Etudes Hydrobiologiques d'Aix-les-Bains, 7 fascicules.
- [6] BALLAND P. (1980). — Le lac du Bourget. Condensé des études antérieures 1973-1977. Rapport CTGREF, Groupement de Grenoble, Section Qualité des Eaux.
- [7] BLAKE G., GENTIL S. (1979). — A discrete lake model and its sensitivity study, in Jorgensen S.E. (ed.), State of the art in ecological modelling, Pergamon Press.
- [8] BOS M., TEILLOT J.P., CHARTON S., PAUMIER J.P. (1980). — Exemple d'utilisation du modèle mathématique Hydrog-Ligneau sur les bassins, versants urbains et semi-ruraux. *La Houille-blanche*, n° 4-5, 1980.
- [9] BRUNEL-DELCLAUX L., GUERRI M.M. (1980). — Cinétiques d'assimilation et de croissance de *Scenedesmus crassus*. Etude expérimentale et modélisation. Thèse doctorat de 3^e cycle, Université Paul Sabatier de Toulouse.
- [10] CAPBLANCA J., DAUTA A., CAUSSADE B., DECAMPS H. (1982). — Variations journalières de la production du phytoplancton en rivière : modélisation d'un bief du Lot. *Annales Limnol.*, 18 (2), 101-102.
- [11] CASANOVA-BATUT Th. (1977). — Etude préliminaire en vue de la modélisation de l'écosystème Lot. Thèse Doctorat de 3^e cycle, Université Paul Sabatier de Toulouse.
- [12] CASENAVE A. (1981). — Etude des crues décennales des petits bassins forestiers en Afrique tropicale CIEH, ORSTOM, centre d'Adiopodoumé.
- [13] CAUSSADE B., CHAUSSAVOINE C., DALMAYRAC S., MASBERNAT L. (1978). — Modélisation d'écosystèmes rivières : application à un bief au Lot. *Ann. Limnol.*, 14 (1-2)
- [14] CAUSSADE B., CHAUSSAVOINE C., MASBERNAT L. (1979). — Primary production in a thermally stratified flow, IIIrd World Congress on Water Resources, Mexico, 1979.
- [15] CHAHUNEAU F., DES CLERS S., MEYER J.A. (1980 a). — Les modèles de simulation en écologie lacustre, Présentation des différentes approches et analyse des modèles existants. *Acta ecologica/ecologica Generalis*, 1 (1), 27-50.
- [16] CHAHUNEAU F., DES CLERS S., MEYER J.A. (1980 b). — Simulation du cycle de phosphore dans le lac de Nantua. *Océanis*, 6 (1), 99-108,
- [17] CHAHUNEAU F., DES CLERS S., MEYER J.A. (1982). — Analysis of prediction uncertainty by Monte Carlo simulation in a non linear least squares estimation on a vertical transport sub-model for lake Nantua. in BECK M.B. et VAN STRATEN G., Uncertainty and Forecasting of Water quality. IASA/Pergamon Press (à paraître).
- [18] CHAUSSAVOINE C. (1979). — Contribution à la modélisation d'écosystèmes aquatiques. Thèse de Docteur-Ingénieur soutenue le 11 juillet 1979, INP, Toulouse.

- [19] CHAUSSAVOINE C., DELCLAUX F., MASBERNAT L. (1980). — Primary production in a thermally stratified reach of river, 2nd Int. Symposium on Stratified Flows, the Norwegian Institute of Technology, Trondheim 24-27 June 1980 (Norvège).
- [20] DESBORDES M. (1980). — Expérimentation récente sur bassins urbains. *La Houille blanche*, n° 4-5, 1980.
- [21] DESBORDES M. (1980). — Application des modèles aux études de ruissellement urbain. Le programme RERAM. *La Houille blanche*, n° 4-5, 1980.
- [22] DUJARDIN J.M. (1980). — Exemples concrets d'annonce de crues dans des petits bassins versants. *La Houille-blanche*, n° 4-5, 1980.
- [23] DOSSEUR H. (1980). — Etudes des Ressources en eau du bassin de la Mejerdah, de l'Ichkeul et de leur utilisation optimale. Méthode et données de base. ORSTOM, Paris, ministère de l'Agriculture DEGTH, Tunis, septembre 1980.
- [24] ENDERLE M.J. (1980). — Détermination du profil vertical de température d'une retenue de barrage. Rapport EDF/DER HE 31-80, n° 33.
- [25] GAILLARD J. (1981). — A predictive model for water quality in reservoirs and its application to selective withdrawal. Ph. D Thesis, Colorado State University, Dept. of Civil Engineering, Fort Collins, Colorado.
- [26] GARCON V. (1981). — Modélisation numérique d'un écosystème aquatique : application au réservoir de Grangent sur la Loire. Thèse de Doctorat de 3^e cycle, Université de Paris VII.
- [27] GENTIL S. (1979). — A discrete model for the study of a lake. *Appl. Math. Modelling*, 3, 193-198.
- [28] GENTIL S. (1980). — Identification of a lake ecosystem (Aiguebelette, France). IFAC Symposium on water and related land resources. Cleveland, Ohio, May 1980.
- [29] GENTIL S. (1981 a). — Validation of complex ecosystems models. *Ecological Modelling*, 14, 21-38.
- [30] GENTIL S. (1981 b). — Modélisation d'un écosystème lacustre, in Landau I.D. (ed.) Outils et modèles mathématiques pour l'automatique, l'analyse des systèmes et le traitement du signal, Editions de CNRS.
- [31] GERAEDTS J.M., CASENAVE A., SIMON J.M. (1981). — Etude des caractéristiques hydrodynamiques de sols tropicaux à l'aide d'un simulateur de pluie. ORSTOM, Adiopodoumé.
- [32] GIRARD G., LEDOUX E., VILLENEUVE J.P. (1981). — Le modèle couplé, simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un système hydrologique. *Cahiers de l'ORSTOM*, série Hydrologie, vol. XVIII, n° 4, 1981.
- [33] GOSSE P. (1981). — Water quality modelling in the middle reaches of the Loire river. ISEM Conference Energy and Ecological Modelling, Louisville, Kentucky, April 1981 et également : Rapport EDF HE 31-81, n° 14.
- [34] GRAS R. (1969). — Simulation du comportement thermique d'une rivière à partir des données fournies par un réseau classique d'observations météorologiques, *Proc. Int. Assoc. Hydraul. Res.*, 1, Kyoto, 31 août-5 septembre 1969, 491-502.
- [35] GRAS R., GILBERT A. (1978). — Etude de l'impact du site de Belleville sur le régime thermique de la Loire. Rapport EDF/DER-E31-78, n° 7.
- [36] GUILLOT P., DUBAND D., (1980). — Fonction de transfert pluie-débit sur les bassins versants de l'ordre de 1 000 km². UGGI, colloque d'Oxford, avril 1980, *bulletin AISH*, n° 129, p. 177-185 et la *Houille blanche*, n° 4-5, p. 297-304, 1980.
- [37] KLEIN P. (1980). — Modélisation des mécanismes turbulents dans les couches marines superficielles. Thèse Doct. Etat, Univ. Aix-Marseille III.
- [38] KLEIN P., BONNAUD E. (1977). — Détermination du profil vertical de température d'une masse d'eau à partir de données météorologiques. Rapport EDF E 31-77, n° 19.
- [39] LE BARBE L. (1981). — Etude du ruissellement sur la ville de Ouagadougou. CIEH-ORSTOM, Centre de Ouagadougou.
- [40] LEDOUX E. (1980). — Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique — Thèse de Docteur Ingénieur, Ecole des Mines de Paris — Université P. et M. Curie.
- [41] L'HÔTE Y. (1980). — Préviation des crues de la Meurthe et de la Moselle par des modèles stochastiques à base de régressions simples ou multiples. *Cahiers ORSTOM*, série Hydrologie, vol. XVII, n° 3-4, 1980.
- [42] MAZENC B. (1981). — Etude des relations entre les paramètres d'un modèle global pluie-débit et les caractéristiques physiques du bassin versant correspondant. Application à 17 bassins versants bretons. Thèse de Docteur-Ingénieur, USTL Montpellier. Rapport BRGM 81 SGN 525 Eau.
- [43] MECHIN Y., DARNIGE J., NORMAND D. (1979). — Utilisation d'un programme d'allocation optimale dans les études de schéma d'aménagement des ressources hydrauliques. *La Houille blanche*, n° 4/5, 1979.
- [44] MENESGUEN A. (1982). — Plancton I : Modèle d'évolution saisonnière d'un écosystème planctonique marin côtier, janvier 1982, CNEXO-COB.
- [45] MEYER J.A. (1982). — Les modèles de simulation de la dynamique du plancton : nature, utilisation et limites, in POURRIOT R., Ecologie du plancton des Eaux continentales, Masson, pub.
- [46] MINISTERE DE L'AGRICULTURE (1980). — Synthèse Nationale sur les crues des petits bassins versant : Fascicule 1 : Eléments de pluviométrie ; Fascicule 2 : La méthode Socose ; Fascicule 3 : La méthode Crupedix. SRAE, Service de l'Hydraulique, CTGREF.
- [47] MINISTERE DE L'EQUIPEMENT ET DU CADRE DE VIE (1979). — Calcul des réseaux d'assainissement des agglomérations STU. Le programme RERAM. Notice d'analyse et Notice d'utilisation, juillet 1979.



- [48] MIQUEL J. (1980). – Gestion d'un réservoir de soutien d'été, application à CHAMBONCHARD sur le Cher. EDF, Direction des Etudes et Recherches. LNH Chatou, janvier 1980.
- [49] NIVAL P. – Relations phytoplancton-zooplancton ; essai de modélisation. Thèse de Doctorat d'état, Université Pierre et Marie Curie.
- [50] POULIN M. (1980). – Modélisation du comportement thermique des cours d'eau. Application au Rhin. Thèse Docteur-Ingénieur, Université Paris VII.
- [51] POULIN M., HUBERT P. (1982). – Une méthode de calcul de l'échauffement des rivières. Application à la gestion des rejets thermiques au Rhin. *Journal of Hydrology*, 55 195-211.
- [52] POULIN M. (1981). – Etude des échanges thermiques nappe-rivière. Rapport EDF/LMM/RD/81/55.
- [53] ROMANA (1982). – Un modèle mathématique de nitrification en Basse-Seine. L'assainissement de demain 17^e Journées de l'Hydraulique. Nantes, 14-16 septembre 1982.
- [54] ROUSSET P., PLAISANT G., MICHEL C. (1982). – Bassins d'orage de la ville de Vitrolles. Journées "Assainissement de l'An 2000" de la SHF, Nantes, septembre 1982.
- [55] SANCHEZ M., THIERY D. (1981). – Détermination des débits d'un cours d'eau par analyse typologique du bassin versant. Application à 17 bassins versants bretons. Rapport BRGM 81 SGN 892 Eau.
- [56] VILLENEUVE J.P., GIRARD G., LEDOUX E. (1982). – Modélisation et simulation intégrée eau de surface-eau souterraine. *Eau du Québec*, vol. 15, n° 1, 1982.