

Record Number: 580
Author, Monographic: Villeneuve, J. P.//Couture, M.//Bobée, B.//Charbonneau, R.//Tessier, A.
Author Role:
Title, Monographic: Méthodologie d'aménagement de la ressource eau
Translated Title:
Reprint Status:
Edition:
Author, Subsidiary:
Author Role:
Place of Publication: Québec
Publisher Name: INRS-Eau
Date of Publication: 1975
Original Publication Date: Octobre 1975
Volume Identification:
Extent of Work: 149
Packaging Method: pages et 4 annexes
Series Editor:
Series Editor Role:
Series Title: INRS-Eau, Rapport de recherche
Series Volume ID: 58
Location/URL:
ISBN: 2-89146-059-6
Notes: Rapport annuel 1975-1976
Abstract: Rapport rédigé pour le ministère des Richesses naturelles du Québec
25.00\$
Call Number: R000058
Keywords: rapport/ ok/ dl

Ministère des Richesses naturelles
Direction de l'Aménagement

Méthodologie d'aménagement
de la ressource eau

Institut National de la Recherche Scientifique
INRS-Eau

Octobre 1975

pour R.D.

Méthodologie d'aménagement
de la
ressource eau

par

J.P. Villeneuve¹

M. Couture²

B. Bobée¹

R. Charbonneau¹

A. Tessier¹

¹ Professeur, INRS-Eau

² Ingénieur, Ministère des Richesses naturelles

Méthodologie d'aménagement de la
ressource eau

INRS-Eau
UNIVERSITE DU QUEBEC
C.P. 7500, Sainte-Foy
Québec G1V 4C7

RAPPORT SCIENTIFIQUE No 58
1975

Rapport rédigé pour
le ministère des Richesses naturelles, Québec

par

J.P. Villeneuve, M. Couture, B. Bobée, R. Charbonneau, A. Tessier

ISBN 2-89146-059-6

DEPOT LEGAL 1975

Tous droits de traduction, de reproduction et d'adaptation réservés

© 1975 - Institut national de la recherche scientifique

TABLE DES MATIERES

	<u>PAGE</u>
1. AVANT PROPOS	3
1.1 Etude pilote	3
1.2 Cadre de l'étude: la Saint-François	3
2. INTRODUCTION	4
2.1 Aménagement de la ressource eau	4
2.2 Plan d'aménagement	6
2.3 Plan d'affectation, donnée d'entrée pour le plan d'aménagement	9
3. LA METHODOLOGIE D'AMENAGEMENT	11
3.1 Approche générale	12
3.2 Outils mathématiques	13
3.3 Remarques sur les modèles	25
3.4 Analyse de sensibilité	26
3.5 Combinaisons de modèles	27
3.6 Modèles: entrées, contraintes et sorties	29
3.7 Procédure proposée	30
3.7.1 Les trois volets de la procédure d'aménagement	32
3.7.2 Les opérations de la procédure d'aménagement	36
3.7.2.1 Affectation	36
3.7.2.2 Modèles de sélection	36
3.7.2.3 Options d'ouvrages à planter	37
3.7.2.4 Modèle de simulation du système	37
3.7.2.5 Plan d'aménagement	38
3.7.2.6 Données	38
3.7.2.7 Décision	39
4. RECOMMANDATIONS POUR LA SAINT-FRANCOIS	42
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	45

TABLE DES MATIERES (suite)

	<u>PAGE</u>
ANNEXE A-1 : Descriptions de modèles de sélection	60
ANNEXE A-2 : Descriptions de modèles de simulation	85
ANNEXE A-3 : Combinaisons de modèles	104
ANNEXE A-4 : Données d'entrées, contraintes et données de sorties des modèles décrits aux annexes A-1 et A-2	142

LISTE DES FIGURES

	<u>PAGE</u>
FIGURE 1: Schéma du processus conduisant au plan d'aménagement	7
FIGURE 2: Les trois volets de la procédure d'aménagement	31
FIGURE 3: Opération données	40

METHODOLOGIE D'AMENAGEMENT

1. AVANT-PROPOS

1.1 Etude pilote

La planification des ressources en eau a connu un essor important dans les pays aux prises avec des pénuries d'eau (qualité ou quantité); toutefois, au Québec, en raison de l'abondance et de la qualité de la ressource, cet aspect a été relativement négligé. Compte tenu du développement rapide des régions et de l'accentuation des problèmes de pollution, il s'avère nécessaire d'établir la planification de l'utilisation de cette ressource et de prévoir les aménagements utiles à cette fin. C'est donc dans le contexte d'une étude pilote qu'est amorcé le développement d'une méthodologie d'aménagement adaptée aux conditions québécoises.

L'approche proposée tiendra compte du cadre institutionnel du Québec (plusieurs ministères impliqués dans le secteur eau), des données socio-économiques, du cadre géographique (nombreuses rivières tributaires du Saint-Laurent et analysées une à la fois) et des outils dont nous disposons, (modèles mathématiques) principalement ceux développés au Québec.

1.2 Cadre de l'étude: la Saint-François

La Direction de l'Aménagement du Ministère des Richesses naturelles du Québec a amorcé depuis l'automne 1974 des études en vue de la préparation d'un plan d'affectation des eaux du bassin de la rivière Saint-François.

Le programme de travail préparé en vue de ce plan (Delisle et al., 1975) prévoit trois phases principales: une première traitant de la connaissance du bassin, une deuxième portant sur les choix qui s'offrent aux utilisateurs en ce qui a trait à l'affectation de la ressource eau du bassin et enfin, une troisième suggérant des méthodes d'implantation des solutions retenues.

Ces trois phases font partie essentiellement du processus général de la gestion de la ressource eau qui comprend quatre étapes:

- connaissance
- affectation
- aménagement
- contrôle

C'est dans le cadre des études entreprises sur la rivière Saint-François qu'est établie une méthodologie d'aménagement et ce bassin servira de banc d'essai pour la méthodologie proposée.

2. INTRODUCTION

2.1 Aménagement de la ressource eau

Quand il s'agit de prendre une décision pour l'aménagement de la ressource eau dans le but de satisfaire les besoins des consommateurs, les contraintes à considérer ainsi que les possibilités d'aménagement sont extrêmement nombreuses. Dans ces conditions, il est fondamental d'établir une méthodologie qui permette d'effectuer les choix qui soient les plus raisonnables et qui, dans certaines conditions, seront pratiquement optimaux.

Dans l'établissement de cette méthodologie, il faut distinguer deux activités très complémentaires: celle de la planification et celle de l'analyse du système conçu par le planificateur. Le rôle du planificateur est de percevoir les problèmes, de les formuler, d'identifier et d'établir l'ensemble des solutions, de sélectionner les méthodes pour évaluer les différentes possibilités et de spécifier les données requises. De plus, celui-ci doit choisir ou se doter des instruments pour choisir à priori, parmi les différentes possibilités, les solutions qui semblent les meilleures ou les plus acceptables. Quant à l'analyste, il doit évaluer l'impact de ces choix et en faire connaître les résultats au planificateur. Son rôle se limite donc à fournir au planificateur les implications évaluées à partir de la simulation d'une combinaison résultant des choix effectués par le planificateur.

Ces principes, applicables à toute activité de planification, sont essentiels dans le cadre de la sélection des aménagements qui doivent satisfaire aux besoins en eau.

D'une part, la satisfaction de ces besoins implique de connaître:

- les besoins en eau sur toute la période considérée;
- la gamme des objectifs à rencontrer par les aménagements;
- les interactions entre les utilisations;
- les ressources disponibles et potentielles;
- les aménagements (barrages, usines d'épuration, puits) ou autres moyens qui permettraient d'établir l'adéquation entre les besoins et la disponibilité de la ressource eau.

D'autre part, pour étudier et choisir l'ensemble des aménagements, le planificateur, de concert avec les analystes, doit réaliser les différentes étapes suivantes et ce, de manière très explicite:

- établir les objectifs généraux à rencontrer par le plan qui sera recommandé;
- définir et décrire chaque problème;
- estimer les ressources disponibles et potentielles et fixer, d'une manière générale, les alternatives à évaluer dans le processus de planification pour la satisfaction de ces objectifs;
- définir les contraintes imposées sur chaque solution telles que la connaissances des débits minimaux et les limitations de qualité, etc...;
- définir la gamme des paramètres à mesurer;
- définir les informations qui lui sont nécessaires et fixer les fréquences auxquelles ces informations devront lui être fournies.

La connaissance des besoins, et des disponibilités, n'est pas suffisante pour en arriver aux choix et à la planification de l'implantation des aménagements. Ces choix ne peuvent être le fruit du hasard et, dans cette optique, il faut donc disposer d'une méthodologie qui soit applicable par tous, et qui, si les hypothèses sont les mêmes, doit conduire au même résultat.

2.2 Plan d'aménagement

L'objectif immédiat de la méthodologie d'aménagement est de formuler des plans d'aménagement en fonction de différentes hypothèses de développement. Au Québec, l'eau n'est ni un élément moteur, ni un élément limitant pour le développement régional. Comme ce dernier n'est pas défini à long terme, il faut étudier une certaine gamme de prévisions des besoins en eau pour différents horizons et formuler les plans d'aménagement qui en découlent afin de fournir les éléments nécessaires aux décisions qui orienteront le développement régional.

Certaines hypothèses de développement peuvent être envisagées*:

- projection des tendances passées;
- projection des tendances passées et projets identifiables;
- projection des tendances passées, avec accent sur les projets industriels;
- projection des tendances passées, avec accent sur les projets récréatifs.

Les hypothèses de développement doivent permettre de couvrir une gamme suffisante de possibilités de développement du bassin; toutefois, la "Futurologie" étant dans son essence même une science inexacte, il faut donc prévoir une méthodologie d'aménagement très flexible qui permettra de corriger le plan d'aménagement en cours de réalisation.

Le processus conduisant au plan d'aménagement est schématisé sur la figure 1.

* Descôteaux, Y. (1975). Ministère des Richesses naturelles, rapport interne.

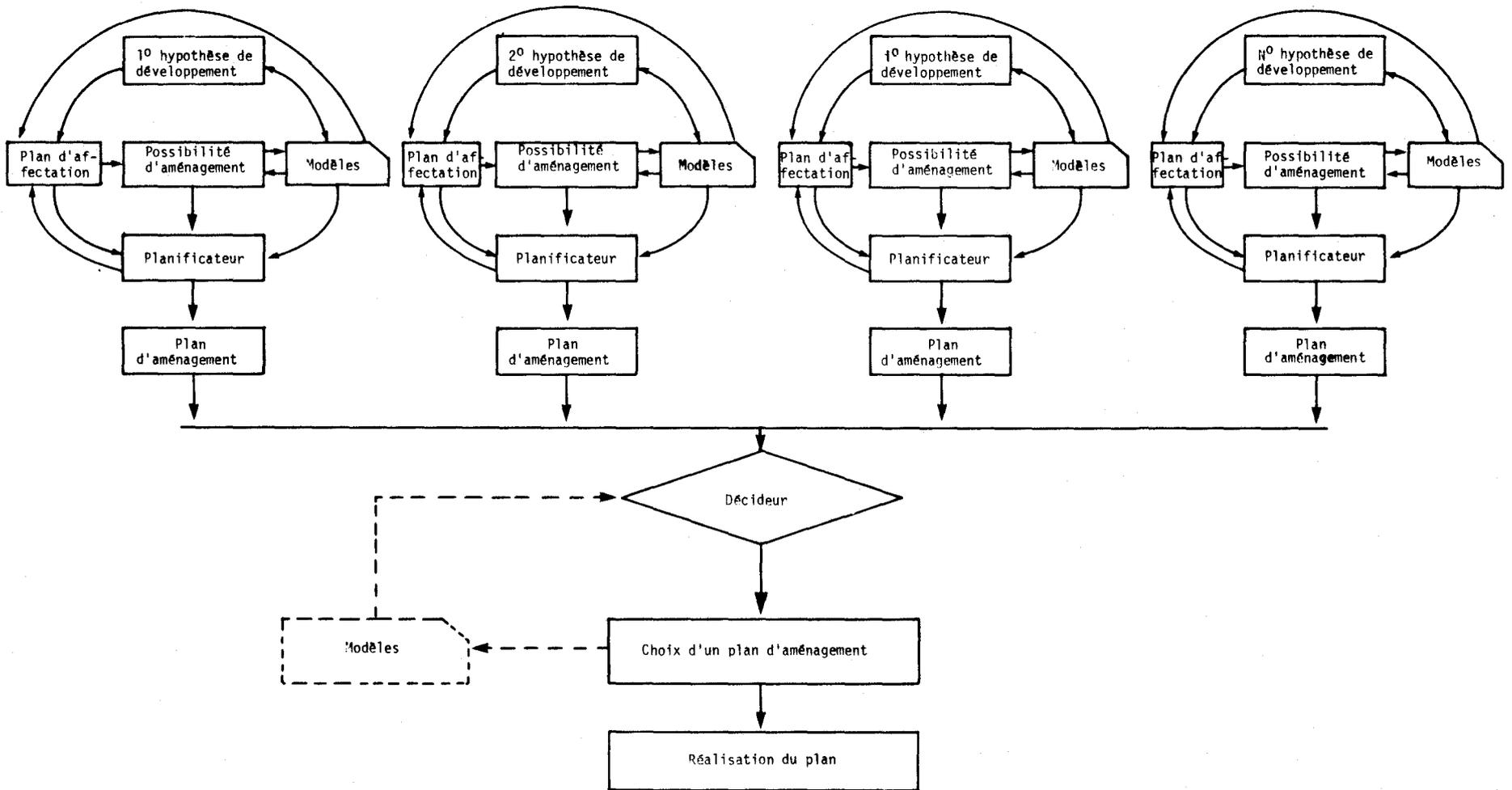


Fig. 1 - Schéma du processus conduisant au plan d'aménagement

Compte tenu de l'évolution du développement régional, il faut prévoir des changements d'orientation, donc des modifications importantes au plan d'aménagement intégré. Ce processus dynamique dans le temps implique le développement d'outils qui permettent de prévoir les conséquences des modifications au plan d'aménagement.

Le plan d'aménagement devra préciser les équipements à mettre en place (localisation, capacité, mode d'opération, échéancier de réalisation) pour satisfaire l'adéquation besoins-ressources durant toute la période prévue. Il faudra prévoir un processus de rétroaction entre l'aménagement et l'affectation qui permette d'apporter les modifications au plan d'affectation, suite à une étude plus détaillée.

Le plan d'aménagement doit tenir compte de besoins et de problèmes tels que:

<u>Besoins et problèmes</u>	<u>Facteurs à considérer</u>	
- alimentation en eau domestique et industrielle	Débit	Qualité
- irrigation	Débit	Qualité
- drainage	Débit	
- inondations	Débit	
- hydro-électricité	Débit	
- érosion	Débit	
- récréation	Niveau	Qualité
- conservation	Débit	Qualité
- dilution	Débit	Qualité
- érosion - sédimentation	Débit	Qualité
- disposition des eaux usées	Débit	Qualité

Ce plan est concrétisé par l'établissement d'ouvrages tels que:

- barrages - réservoirs;
- usines hydro-électriques;
- systèmes d'irrigation et réseau de drainage;
- usines de filtration;
- usines d'épuration;
- aménagements touristiques (sites);
- systèmes de restauration (oxygénation);
- réalimentation des nappes;
- reforestation;
- stabilisation du lit et des berges;
- système de contrôle des crues (canalisation, digues, système de prévision, zonage des plaines d'inondations);
- recyclage des eaux usées.

La préparation du plan d'aménagement constitue la dernière étape de planification avant la réalisation des ouvrages; elle exige donc des expertises poussées et devra fournir des données très précises pour permettre la préparation des projets.

2.3 Plan d'affectation, donnée d'entrée pour le plan d'aménagement

Le plan d'aménagement est la traduction en ouvrages de la solution à apporter aux problèmes causés par l'utilisation de la ressource eau; il faut donc connaître ces utilisations et leur interaction car elles sont en réalité le point de départ de l'aménagement. Dans l'établissement d'une méthodologie d'aménagement, ces utilisations ou besoins, selon leur priorité, sont considérés comme des données d'entrée et elles sont fournies par le plan d'affectation.

Le plan d'aménagement constitue l'étape qui concrétise les options d'affectation. Il traduit, en termes d'ouvrages hydrauliques et de travaux correcteurs, les alternatives de développement envisagées à l'étape du plan d'affectation.

Il est très difficile de définir une ligne de démarcation bien nette entre plan d'affectation et plan d'aménagement, car il existe une "zone gri-

se" à l'interface affectation-aménagement qu'il faudra éliminer pour tenter de définir des modalités de prise de décision et les mesures de mise en application des choix proposés" (Delisle et al., 1975).

Le plan d'affectation devrait permettre d'estimer les besoins en eau à un horizon donné, de fixer des normes minimales à respecter et de faire l'allocation globale des ressources disponibles aux différents utilisateurs. Par exemple, suite à l'inventaire des ressources en eau souterraine et des besoins des municipalités, le plan d'affectation pourra allouer cette ressource essentiellement à la consommation domestique. A l'étape du plan d'aménagement, il faudra donc déterminer les équipements (capacité, localisation, etc...) à mettre en place. En ce qui concerne la régularisation, par exemple, il sera possible dans le plan d'affectation de fixer un débit à garantir dans un secteur donné, mais les moyens pour y arriver (utilisation des lacs, construction de barrages, réservoirs) seront analysés à l'étape du plan d'aménagement. Toutefois, il est possible que le plan d'affectation préconise une autre utilisation des lacs existants, laquelle constituerait une contrainte dans l'élaboration du plan d'aménagement.

Il y a lieu ici de préciser très sommairement les résultats du plan d'affectation, c'est-à-dire d'indiquer les informations que celui-ci doit fournir pour réaliser la méthodologie d'aménagement proposée.

Pour chacune des hypothèses de développement d'un bassin, le plan d'affectation doit:

- préciser les besoins en eau pour différents horizons (1985-2000);
- faire l'allocation globale des ressources disponibles aux différents utilisateurs en établissant à quelles fins sera utilisée prioritairement la ressource;
- fixer les normes de qualité et de quantité à respecter, compte tenu de l'affectation.

Il est évident que l'affectation implique la connaissance des disponibilités en eau et des besoins (qualité et quantité). D'une manière précise,

les normes (qualité et quantité) seront indiquées pour tout le bassin et une liste des moyens à mettre en oeuvre par ordre de priorité pour répondre aux besoins et aux normes minimales sera suggérée.

3. LA METHODOLOGIE D'AMENAGEMENT

L'élaboration d'une méthodologie d'aménagement consiste à établir un mode d'utilisation des outils qui permettent de faire la sélection des aménagements nécessaires à la satisfaction des besoins en eau; cette sélection doit respecter les contraintes imposées par les diverses utilisations, tout en tenant compte d'objectifs tels que coûts minimaux, rapport bénéfices-coûts maximaux, ou encore, de critères physiques comme la minimisation des rejets en rivières, etc... En d'autres termes, il s'agit d'établir un processus d'aménagement intégré de la ressource eau qui permette de systématiser les différentes étapes d'implantation et d'analyser les solutions possibles et réalisables.

Pour développer cette méthodologie, on doit tenir compte des plus récentes techniques qui ont été développées et qui permettent à celui qui doit prendre la décision, de résoudre des problèmes qui seraient insolubles sans ces techniques.

Parmi ces outils et techniques, nous devons distinguer:

1. les banques de données avec système de gestion intégré;
2. les modèles de simulation;
3. les techniques d'optimisation.

De plus, il ne faut pas oublier que l'une des phases les plus importantes de la planification des aménagements consiste à évaluer l'ensemble des solutions et à choisir la solution quasi optimale, ce qui se fera entre autres en utilisant un modèle mathématique représentant le système d'une façon la plus réelle possible.

Ces modèles, quels qu'ils soient, s'ils sont utilisés avec soin, s'avèreront des outils indispensables pour la planification et la mise en place des aménagements permettant de répondre aux problèmes suscités par l'affectation de la ressource.

3.1 Approche générale

De nombreuses approches ont été utilisées pour résoudre les problèmes d'aménagement de la ressource eau. Bien que l'on connaisse la complexité du problème depuis fort longtemps, ce n'est qu'au début des années soixante que l'on a vraiment commencé à employer des techniques sophistiquées pour la solution de ces problèmes. Cette situation s'explique par la vulgarisation récente de l'emploi des calculateurs numériques de grande puissance, et ce avec les avantages et les inconvénients que de tels outils suscitent.

En 1962, un livre de base (Maas et al., 1962) sur la conception des systèmes de ressource en eau a été publié aux Presses de l'Université de Harvard. Cet ouvrage se distingue de ceux publiés auparavant et dont la seule préoccupation était le développement de la ressource, l'évaluation des projets, et la collection des données. Cet ouvrage présente une méthodologie générale de conception des systèmes en quatre étapes;

- identification des objectifs;
- traduction des objectifs en critères de choix;
- utilisation des critères dans l'établissement d'un système qui les satisfasse au mieux;
- évaluation des conséquences des plans qui ont été développés.

Les techniques qu'on y discute sont encore très actuelles et même si elles ont évolué, cette évolution se situe surtout au niveau de la philosophie de leur utilisation. En effet, au début, on a essayé de développer un outil ou une technique globale qui puisse résoudre le problème dans son ensemble, en examinant toutes les possibilités de solution. Cette approche aurait pu conduire à des monstres inutilisables ou à des simplifications irréalistes. Plus récemment, on a abordé le problème en le décomposant en différents éléments auxquels répondent d'une manière très explicite des techniques particulières. De toute façon, il est inconcevable actuellement de croire qu'un seul outil global puisse prendre en compte toutes les implications de l'aménagement en résolvant le système d'une façon analytique exacte.

3.2 Outils mathématiques

Pour fournir une solution au problème causé par l'aménagement de la ressource, on utilise des outils que l'on appelle modèles mathématiques. Bien que ce terme soit galvaudé dans la littérature, il est habituellement utilisé pour décrire un ensemble d'algorithmes et de techniques qui, combinés ensemble, permettent de représenter une situation sociale, économique ou physique; le modèle est l'image d'un processus et il répond comme lui et de la même façon aux sollicitations et contraintes auxquelles il est soumis.

Il y a plusieurs façon de classifier les modèles qui peuvent être utilisés dans un cheminement de planification; dans la littérature, la classification de McBean et Schaake (1972) semble la plus élaborée. Les types de modèles que l'on peut utiliser sont:

- modèle de projection (prevision);
- modèle de sélection (screening);
- modèle de simulation (simulation);
- modèle séquentiel (sequencing);
- modèle dynamique de stratégie (dynamic policy);
- modèle économique et comptable;
- modèle d'opération (operating policy);
- modèle de gestion et de coordination.

Cette liste n'est pas exhaustive, mais elle illustre bien le nombre important, et surtout les différents types de modèles qui peuvent être utilisés dans la planification.

Modèle de projection (prevision)

Ce type de modèle permet de fixer, pour différents horizons (2,000, 2,020,...), les besoins en eau industriels, agricoles, domestiques, etc... De tels modèles ont été mis au point entre autres par Delucia et Rogers (1972) et Dreyfus, Hubert et al. (1975).

En ce qui concerne la période de prédiction, par exemple, le Texas Water Development Board (1974) a évalué les besoins pour une période s'étendant jusqu'en 2,020. En général, les projections sont établies pour des périodes de 30 à 50 ans.

Modèle de sélection (screening)

Le modèle de sélection est un modèle mathématique utilisant des techniques d'optimisation et qui permet, pour un objectif fixé, de sélectionner la meilleure solution à partir de plusieurs alternatives. L'objectif de l'utilisation d'un tel modèle est d'éliminer les solutions qui sont de moindre importance, et de suggérer une configuration du système qui soit optimale sous certaines conditions.

Explicitement, le modèle de sélection est un outil mathématique à l'intérieur duquel:

- sont traduits mathématiquement, sous forme de fonctions objectifs, les choix préférentiels, établis en fonction de la pertinence des objectifs;
- est traduit mathématiquement, sous forme de contraintes, le comportement physique du système.

Les techniques mathématiques utilisées le plus couramment pour les modèles de sélection sont entre autres:

- programmation linéaire (linear programming);
- programmation dynamique (dynamic programming);
- programmation dynamique stochastique (stochastic dynamic programming);
- programmation non-linéaire (non-linear programming);
- programmation en nombres entiers (integer programming);
- programmation mixte (mixed integer programming);
- programmation quadratique (quadratic programming);
- programmation géométrique (geometric programming);
- programmation convexe (convex programming);
- programmation séparable (separable programming);
- algorithmes de graphe (network algorithms).

Une description de ces techniques apparaît dans les ouvrages cités ci-dessous.

- 1- WAGNER, H.M. (1969).
Principles of operations research with application to managerial decisions.
Prentice-Hall, Inc., N.J., 936 p.
- 2- GASS, S.I. (1969).
Linear programming. Methods and applications. 3rd Edition McGraw-Hill
Book Company, N.Y., 358 p.
- 3- LOOMBA, P.N. (1964).
Linear programming and introduction analysis. McGraw-Hill Book Company,
N.Y., 284 p.
- 4- BELLMAN, R.E. and DREYFUS, S.E. (1962).
Applied dynamic programming. Princeton University Press, Princeton, N.J.,
363 p.
- 5- WHITE, D., DONALDSON, W. and LAWRIE, N. (1969).
Operational research techniques, Vol. 1. Business Books Limited, London,
207p.
- 6- KAUFMANN, A. (1962).
Méthodes et modèles de la recherche opérationnelle. Dunod, Paris, Tome
1 (534 p.) et Tome 2 (544 p.).
- 7- FAURE, R. (1968).
Eléments de la recherche opérationnelle. Gauthier-Villars, Paris, 317 p.

La technique la plus utilisée jusqu'ici pour des problèmes à grande échelle, comme celui de l'aménagement des ressources, est la programmation linéaire ou des variantes de cette technique; les raisons que l'on invoque sont que:

- a) l'on dispose déjà, sur ordinateurs, de nombreux programmes très efficaces;
- b) la plupart des contraintes sont linéaires et, lorsqu'elles ne le sont pas, certains programmes permettent de tenir compte d'équations non-linéaires en les linéarisant par parties;
- c) même si la solution d'un système linéaire n'est pas tout à fait optimale, il reste qu'elle est plus satisfaisante que d'autres obtenues différemment;
- d) dans les études de sensibilité, la programmation linéaire offre de plus grandes possibilités.

Si les techniques mentionnées ci-dessus présentent des avantages, elles présentent aussi des désavantages qui sont principalement dus:

- à la difficulté de tenir compte adéquatement de l'incertitude et de la variabilité des phénomènes hydrologiques;
- à la difficulté de représenter des relations non-linéaires, complexes, par de simples inégalités mathématiques.

Peu importe les techniques, il faut donc admettre que le résultat obtenu avec un modèle de sélection est généralement global et qu'en raison des difficultés énumérées ci-haut, ce n'est pas obligatoirement "La Solution Optimale". On peut citer quelques exemples d'utilisation de tels modèles. (Quelques descriptions de modèle de sélection sont données dans l'Annexe A-1).

TEXAS WATER DEVELOPMENT BOARD. (1973).

A completion report on techniques for identifying and evaluating market and non-market benefits and costs of water resources systems, 227 p.

TEXAS WATER DEVELOPMENT BOARD. (1974).

Analytical techniques for planning complex water resources systems. A summary report, report 183, 59 p.

HALL, W.A. and DRACUP, J.A. (1970).

Water resources systems engineering. McGraw-Hill Inc., N.Y., 372 p.

VIESSMAN, W., Jr., LEWIS, G.L. et al. (1975).

A screening model for water resource planning. Water Res. Bull., 11 (2): 245-255.

REVELLE, C.S., LOUCKS, D.P. et al. (1968).

Linear programming applied to water quality management. Water Res. Res., 4(1): 1-9.

SIGVALDASON, O.T., De LUCIA, R.J. et al. (1972).

The Saint John study: an example of complementary usage of optimization and simulation modelling in water resources planning. International symposium on modelling techniques in water resources systems. Proceedings, vol. 3, p. 576-604. (Environment Canada, Ottawa, Canada).

DREYFUS, A., HUBERT, P. et al. (1975).

"PROLO": modèle de prévision pour l'aménagement et la gestion intégrée d'un grand bassin hydrographique. La Houille Blanche, (1): 17-36.

De LUCIA, R.J. and ROGERS, P. (1972).

North Atlantic regional supply model. Water Res. Res., 8(3): 762-765.

MARKS, D.H., COHON, J.L. et al. (1971).

Screening models for investment in regional water resources development. M.I.T., Water Research and hydrodynamics Division, Cambridge, Massachusetts, 33 p.

LOTTIS, C. et GRASSETTI, B. (1970).

Une application de la programmation linéaire pour le plan d'un aménagement hydraulique intégré. Société Hydrotechnique de France. XI^{ème} Journée de l'Hydraulique, Question VI, rapport 8, p. 1-9.

O'NEIL, P.V. (1971).
A mathematical programming model for planning a
regional water resource system. Journal I.W.E.,
26 (1), 47-71.

Puisque la solution n'est pas nécessairement la solution optimale, il est donc nécessaire d'évaluer si la solution que l'on a obtenue est satisfaisante, ce qui peut être fait à l'aide de modèles de simulation qui sont généralement assez élaborés.

Modèle de simulation

Le modèle de simulation est un ensemble de relations mathématiques qui permet de simuler le comportement et/ou l'évolution d'un système. Il permet, puisqu'il est à l'image du système qu'il simule, d'évaluer dans le temps et dans l'espace l'impact de modifications sur le système.

Etant donné cette aptitude, il s'inscrit donc dans la suite logique de l'utilisation du modèle de sélection, puisqu'il permet d'évaluer l'impact de l'application des résultats obtenus par celui-ci. Il peut aussi servir pour vérifier les paramètres et coefficients utilisés dans le modèle de sélection.

Bien que le modèle de simulation puisse être utilisé pour vérifier ou affiner un choix, il n'a vraiment de sens que lorsqu'il permet, pour une politique d'opération et pour une configuration donnée, de vérifier les conséquences physiques, économiques, sociales ou politiques de ce choix.

Il n'existe pas de modèle global de simulation de la ressource eau; même s'il en existait un, il serait en pratique peu utilisable, en raison du trop grand nombre de processus à simuler, des nombreuses échelles de temps et d'espaces possibles, et enfin des nombreux buts pour lesquels on voudrait l'utiliser.

Actuellement, dans le domaine des ressources en eau, les principaux modèles de simulation qui existent touchent les processus hydrologiques; on en trouve aussi quelques-uns qui traitent des aspects qualitatifs. Ce sont de tels types de modèles qui doivent être considérés pour vérifier les hypothèses qualitatives ou quantitatives qui ont été utilisées dans le modèle de sélection.

Il existe une quantité importante de simulateurs. Quelques exemples d'utilisation sont cités ci-dessous et quelques-uns sont décrits dans l'annexe A-2.

GRANTHAM, G.R., SCHAAKE, J.C. et al. (1971).
Water quality simulation model. Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, 97 (SA5): 569-585.

PISANO, W.C. (1968).
River basin simulation program. U.S. Dept. of Interior. Federal Water Pollution Control Administration, Sanitary Engineer Division of Technical Control, 210 p.

COUILLARD, D., CLUIS, D. et DUROCHER, H. (1975).
Etude des apports des substances nutritives (N,P) dans les bassins versants des rivières Yamaska et Saint-François. Rapport d'avancement des travaux. INRS-Eau, rapport scientifique No 53, 19 p.

HOLTAN, H.N. and LOPEZ, N.C. (1971).
USDAHL-70: Model of watershed hydrology. U.S. Dept. of Agriculture, Agricultural Research Service, Technical Bulletin No. 411, 57 p.

U.S. ARMY ENGINEER DIVISION, NORTH PACIFIC. (1971).
Runoff evaluation and stream flow simulation by computer. U.S. Army, Corps of Engineers, Portland, Oregon, 88 p.

HYDROCOMP INTERNATIONAL INC. (1972).
Hydrocomp simulation programming operations manual. Palo Alto, California, 84 p.

GIRARD, G., CHARBONNEAU, R. et al. (1972).
 Modèle hydrophysiographique. Symposium international
 sur les techniques de modèles mathématiques appliquées aux
 systèmes de ressources en eau. Proceedings, vol. 1, p.
 190-204. (Environnement Canada, Ottawa, Canada).

TEXAS WATER DEVELOPMENT BOARD. (1974).
 Analytical techniques for planning complex water resources
 systems. A summary report. Report 183, 59 p.

Modèle séquentiel

Ce type de modèle est utilisé pour programmer l'implantation des projets
 d'aménagement d'une façon optimale.

On minimise l'investissement en capital, les coûts d'opération et de
 maintenance tout en satisfaisant les demandes anticipées ou projetées.

Les techniques utilisées en général sont:

- la programmation linéaire;
- la programmation dynamique;
- la simulation.

A titre d'exemples, on peut citer:

BUTCHER, W.S., HAIMES, Y.Y. et al. (1969).
 Dynamic programming for the optimal sequencing of water
 supply projects. Water Res. Res., 5 (6): 1196-1204.

STEPHENSON, D. (1970).
 Optimum design of complex water resources projects.
 Journal of Hydraulics Division ASCE., 96 (HY6): 1229-1246.

MOSELEY, J.C. and EVENSON, D.E. (1970).
 Time sequencing of element construction in a multi-reservoir
 system. Water Res. Bull., 6(4): 528-541.

MECHIN, Y., FLEURY, J.M. et al. (1970).
 Recherche du programme optimum de construction d'un ensemble de barrages pour le soutien des étiages dans un bassin. Société Hydrotechnique de France, XI Journée de l'Hydraulique, Question VI, rapport 10, p. 1-5.

Modèle dynamique de stratégie

Ce type de modèle permet de modifier, en cours de réalisation, les politiques d'implantation. Il optimise le système en tenant compte de son évolution de changements dans les orientations politiques, etc...

Ces modèles d'optimisation peuvent être du même type que certains utilisés comme modèles de sélection.

Les techniques utilisées sont:

- la programmation linéaire;
- la programmation dynamique;
- la programmation dynamique avec horizon non limité;
- la programmation linéaire équivalente.

A titre d'exemples, on peut citer:

LOTTIS, C. et GRASETTI, B. (1970).
 Une application de la programmation linéaire pour le plan d'un aménagement hydraulique intégré. Société Hydrotechnique de France, XI Journée de l'Hydraulique, Question VI, rapport 8, p. 1-9.

DREYFUS, A., HUBERT, P. et al. (1975).
 "PROLO": Modèle de prévision pour l'aménagement et la gestion intégré d'un grand bassin hydrographique. La Houille Blanche, (1): 17-36.

Modèle économique

Ces types de modèles sont utilisés pour optimiser les bénéfices en définissant la bonne programmation d'investissement, pour simuler les coûts de différents aménagements ou encore pour établir une politique de redevance.

Les techniques utilisées sont:

- la programmation linéaire;
- la programmation dynamique;
- la simulation.

A titre d'exemples, on peut citer:

HASS, J.E. (1970).

Optimal taxing for the abatement of water pollution. Water Res. Res., 6(2): 353-365.

HAIMES, Y.Y., KAPLAN, M.A. et al. (1972).

A multi-level approach to determine optimal taxation for the abatement of water pollution. Water Res. Res., 8(4); 851-860.

PEREZ, A.I., SCHAAKE, J.C. et al. (1970).

Simulation model for flow augmentation costs. Journal of Hydraulics Division, ASCE., 96 (HY1): 131-142.

UPTON, C. (1968).

Optimal taxing of water pollution. Water Res. Res., 4(5): 865-875.

CLOUGH, D.J. (1969).

A multi-agency decision model framework for benefit-cost analysis. Journal of the Canadian Operational Research Society, 7(3): 193-203.

CLOUGH, D.J. and BAYER, M.B. (1968).

Optimal waste treatment and pollution abatement benefit on a closed river system. Journal of the Canadian Operational Research Society, 6(3): 153-170.

KERRI, K.D. (1966).

An economic approach to water quality control. Journal of the Water Pollution Control Federation, 38(12): 1883-1897.

Modèle d'opération

Ces types de modèles sont utilisés pour déterminer les règles d'opération optimales des ouvrages.

Les techniques utilisées sont:

- la programmation dynamique;
- la programmation linéaire;
- la programmation non-linéaire;
- le modèle de simulation.

A titre d'exemples, on peut citer:

BURAS, N. (1963).

Conjunctive operation of dams and aquifers. Journal of Hydraulics Division, ASCE, 89(HY6): 111-131.

BURAS, N. (1964).

Conjunctive operation of a surface reservoir and a ground water aquifer. IASH, Publication No. 63, p. 492-501.

HALL, W.A., ASKEW, A.J. et al. (1969).

Use of the critical period in reservoir analysis. Water Res. Res., 5(6): 1205-1215.

HALL, W.A., BUTCHER, W.S. et al. (1968).

Optimization of the operation of a multiple purpose reservoir by dynamic programming. Water Res. Res., 4(3): 471-473.

HALL, W.A., TAUXE, G.W. et al. (1969).

An alternate procedure for the optimization of operations for planning with multiple river, multiple purpose systems. Water Res. Res., 5(6): 1367-1372.

HARBOE, R.C., MOBASHERIE, F. et al. (1970).

Policy for reservoir operation. Journal of Hydraulics Division, ASCE, 96(HY11): 2297-2308.

LARSON, R.E. and KECKLER, W.G. (1967).

Applications of dynamic programming to the control of water resource systems. Stanford Research Institute, Menlo Park, California, 52 p.

LOUCKS, D.P. et al. (1969).

Stochastic methods for analysing river basin systems. Cornell University, Water Resource and Marine Sciences Center, Technical Report 16, 306 p.

- MOBASHERI, F. and HARBOE, R.C. (1970).
A two-stage optimization model for design of a multi-purpose reservoirs. *Water Res. Res.*, 6(1): 22-31.
- NAYAK, S.C. and ARORA, S.R. (1971).
Optimal capacities for a multi-reservoir system using the linear decision rule. *Water Res. Res.*, 9(3): 485-498.
- RUSSELL, S.O. and CASELTON, W.F. (1971).
Reservoir operation with imperfect flow forecasts. *Journal of Hydraulics Division ASCE*, 97(HY2): 323-331.
- SCHWEIG, Z. and COLE, J.A. (1968).
Optimal control of linked reservoirs. *Water Res. Res.*, 4(3): 479-497.
- YEH, W.W-G. and TROTT, W.J. (1972).
Optimization of water resources development: Optimization of capacity specifications for components of regional, complex integrated, multipurpose water resources systems. A Report submitted to the Office of Water Resources Research. U.S. Dept. of the Interior. Report group, School of Engineering of Applied Sciences. 34 p.
- YOUNG, G.K. (1967).
Finding reservoirs operating rules. *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, 93(HY6): 297-322.
- YOUNG, G.K. (1968).
Reservoir management: the tradeoff between flow regulation and flood control. *Water Res. Res.*, 4(3): 507-511.
- YOUNG, G.K. (1969).
An approach to finding reservoir rules for power optimization. 8th Environmental Conference Proceedings. Vanderbilt University. Nashville, Technical Report No 20.

Modèle de coordination

Le but de ces modèles est de déterminer la meilleure solution ou un ensemble de bonnes solutions, tel que défini par la fonction "objectif" appliquée au problème global.

Cette procédure est appliquée après avoir optimisé le système à l'aide de modèles classiques basés sur les coûts (ex.: Supply Model NAR) et

sur les revenus du système (Demand Model). La coordination (Overall Planning Problem) consiste à rechercher une solution commune aux deux modèles, conduisant à un optimum pour un objectif global. Dans le cas du projet NAR (North Atlantic Region), la fonction objectif globale consiste à maximiser les bénéfices nets actualisés.

HAIMES, Y.Y. et NAINIS, W.S. (1974).

Coordination of regional water resource supply and demand planning models. Water Res. Res., 10(6): 1051-1059.

3.3 Remarques sur les modèles

Les modèles cités précédemment, d'après une classification qui pourrait être plus diversifiée, représentent une vue d'ensemble des modèles utilisés pour la planification et l'aménagement. Cette liste n'est pas exhaustive et il aurait certainement été possible de présenter d'autres modèles, tout aussi importants que ceux décrits.

De cette revue, on peut cependant dégager les points saillants suivants:

- l'action réciproque entre décisions d'affectation et décisions d'aménagement et de gestion est au coeur de la plupart des modèles;
- les modèles sont le plus souvent globaux (même si les techniques mathématiques utilisées sont très fines);
- le pas de temps est mensuel et même annuel;
- la programmation linéaire et la programmation dynamique sont avec certaines variantes les techniques les plus couramment employées;
- sauf rare exception, la fonction objectif est basée sur les coûts;
- il existe de nombreux modèles hydrologiques de bonne performance;
- il existe relativement, peu de modèles concernant la qualité de l'eau et la plupart de ceux qui existent sont très partiels puisqu'ils traitent seulement certains paramètres tels que la DBO, l'oxygène dissous et quelquefois la DCO parce ces paramètres en intègrent plusieurs autres;
- si l'on en croit certains auteurs, les modèles de qualité pourraient traiter beaucoup plus de paramètres conservatifs ou non;

- la grande difficulté des modèles de qualité pour les paramètres non conservatifs est le calage, en raison de la mauvaise connaissance des phénomènes complexes impliqués.

3.4 Analyse de sensibilité

La conceptualisation d'un modèle qui représente un système fait appel à de nombreux facteurs, paramètres, données, dont les variations peuvent avoir une importance plus ou moins grande sur les données de sortie et sur les fonctions objectifs.

Les variables qui sont souvent prises en compte dans une analyse de sensibilité sont:

- les demandes spécifiques à satisfaire;
- les distributions temporelles des demandes;
- la quantité d'eau disponible par adduction;
- les débits;
- les capacités de stockage;
- les coûts;
- le taux d'intérêt;
- certains paramètres de qualité (OD, température, etc...);
- des données hydrologiques (évaporation, précipitation, etc...).

L'analyse de sensibilité consiste à évaluer l'effet de petites perturbations des données d'entrée et/ou des coefficients sur les données de sortie et/ou sur la fonction objectif.

L'analyse de sensibilité aura pour résultat de mettre en relief les paramètres qui devront être connus avec une plus grande précision.

Pour les systèmes que l'on peut représenter d'une façon linéaire, on peut effectuer l'analyse d'une façon très systématique.

Pour des systèmes complexes, non-linéaires, combinés ou autres, l'analyse de sensibilité est beaucoup plus compliquée, car il existe une infinité de combinaisons de perturbations, et le calcul de leurs effets requiert un temps énorme d'ordinateurs. On se limite alors à l'étude des données d'entrée qui sont les plus susceptibles d'être modifiées.

3.5 Combinaisons de modèles

Lors de la classification des modèles selon un type plutôt qu'un autre, il apparaît que ce qu'on appelle modèle est souvent en réalité le résultat d'une combinaison de plusieurs modèles. Ceci est d'autant plus évident lorsque l'on traite d'aménagements de la ressource où de nombreux aspects (politiques, sociaux, économiques, hydrologiques, écologiques, etc...) doivent être pris en compte. Dans la littérature, on trouve de nombreux exemples de combinaisons de modèles utilisées pour l'aménagement de la ressource eau, dont on peut citer les suivants:

FOX, I.K. (1973).

Integrating all aspects of regional water systems. Journal of hydraulics division, ASCE, 99(HY4): 599-604.

CHATURVEDI, M.C. (1973).

Planning methodology and first stage model of a large river basin. 15th Congress of the IAHR, Proceedings, 4: 165-174.

ORLOB, G.T. et DENDY, B.B. (1973).

Systems approach to water quality management. Journal of Hydraulics Division, ASCE, 99(HY4): 573-587.

VISSMAN, W. Jr. et al. (1971).

Optimal analysis of water resources systems. Nebraska Water Resources Research Institute, University of Nebraska, 269 p.

O'RIORDAN, J. (1972).

An approach to evaluation in multiple objective river basin planning. An analysis of selected water quantity alternatives in the Okanagan Valley, B.C., Canada. Symposium international sur la planification des ressources hydrauliques. Vol. III, Ponencias final paper exposes. Secretaria de Recursos Hidraulicos, Mexico, 50 p.

GABLINGER, M. et al. (1972).

Use of systems approaches in planning Israel's water resources management. Symp. Int. sur la Planification hydrologique. Vol. III. Ponencias final papers exposes. Secretaria de Recursos Hidraulico. Mexico, pp. 15-28.

DELISLE, A. (1974).

Gestion de l'eau: Optimisation technique et socio-politique de l'utilisation de la ressource eau d'un bassin. Thèse de Maîtrise, INRS-Eau, Université du Québec, 149 p.

TOEBES, G.H. and CHANG, T.J.

Simulation model for the Upper Wabash surface water system. Purdue University, Water Resources Research Center, Technical report No 27, 100 p.

SCHAAKE, J.C. Jr., FACET, T.B. and LEYTAN, K.M. (1974).

Systematic approach to water resources plan formulation. M.I.T., Ralph M. Parsons Laboratory for Water Resources and Hydrodynamics. Report No. 187, 268 p.

De LUCIA, R.J. and HARRINGTON, J.J. (1972).

Systems analysis in water resources planning: some perspectives. International Symposium on Modelling techniques in water resources systems. Proceedings, vol. 3, p. 410-422. (Environment Canada, Ottawa, Canada).

TEXAS WATER DEVELOPMENT BOARD. (1973).

Stochastic optimization and simulation techniques for management of regional water resource system, a completion report. Report 131, 129 p.

Ces exemples sont traités à l'annexe A-3.

Il ressort de l'étude de ces combinaisons que l'on utilise des modèles très spécifiques en fonction des problèmes rencontrés sur le bassin qui fait l'objet d'un plan d'aménagement. Par exemple, si l'eau souterraine est d'une grande importance dans la région étudiée, on utilise alors un modèle de simulation des aquifères et un modèle d'opération des puits (Gablinger et al., 1972). Il est donc très important, avant d'entreprendre les études pour établir un plan d'aménagement, de mettre en évidence les problèmes prioritaires, ce qui permet de développer les outils nécessaires à la définition de ce plan.

3.6 Modèles: entrées, contraintes et sorties

Il est difficile d'établir à priori les données d'entrée ou de sortie reliées à l'utilisation des modèles, de même que les contraintes auxquelles ils sont soumis. Cependant, les différents travaux effectués dans le domaine fournissent des exemples des éléments que l'on risque d'utiliser. Dans cette optique, une liste résumant les données d'entrées et de sorties ainsi que les contraintes employées dans les modèles décrits en annexes A-1 et A-2, peut donner une bonne idée des éléments qui sont susceptibles d'être nécessaires. Cette liste est donnée en Annexe A-4. Dans un cas précis, certains éléments de cette liste pourront être éliminés.

3.7 Procédure proposée

Le but d'une méthodologie d'aménagement est de fournir au planificateur un outil qui lui permette d'étayer ses décisions sur une procédure qui est à la fois technique et objective. Si cette procédure est simple, sa mise en oeuvre le sera et les résultats seront vite connus; plus elle sera complexe, plus elle sera difficile à mettre en oeuvre et plus l'obtention des résultats sera longue.

Il existe cependant une relation proportionnelle entre l'augmentation de la précision, ou de la finesse des résultats, et l'augmentation de la complexité des outils à mettre en oeuvre. Les quelques exemples de combinaison de modèles qui sont cités précédemment en sont la preuve.

C'est en essayant d'établir un compromis entre la volonté du planificateur, les contraintes auxquelles il est soumis (urgence des dossiers, budget, etc.) et la précision des résultats, que l'on a établi une procédure en trois volets dont la complexité augmente d'un volet à l'autre. Ces trois volets, bien qu'ils soient liés entre eux puisque le passage au deuxième ou au troisième fait appel à l'exécution du premier, sont en quelque sorte indépendants car ils fournissent chacun une réponse; la différence réside dans la précision des réponses.

Quel que soit le problème étudié, ou les outils utilisés, le cheminement établi à l'intérieur de chaque volet reste toujours le même. Cependant, le choix des outils est lié à la nature du problème, et/ou à la précision que l'on désire.

La procédure qui a été établie comprend, pour chaque volet, six types d'opérations reliées entre elles et ayant, pour certaines, une interaction essentielle.

Ces différentes opérations peuvent être facilement visualisées si l'on se réfère à la figure 2.

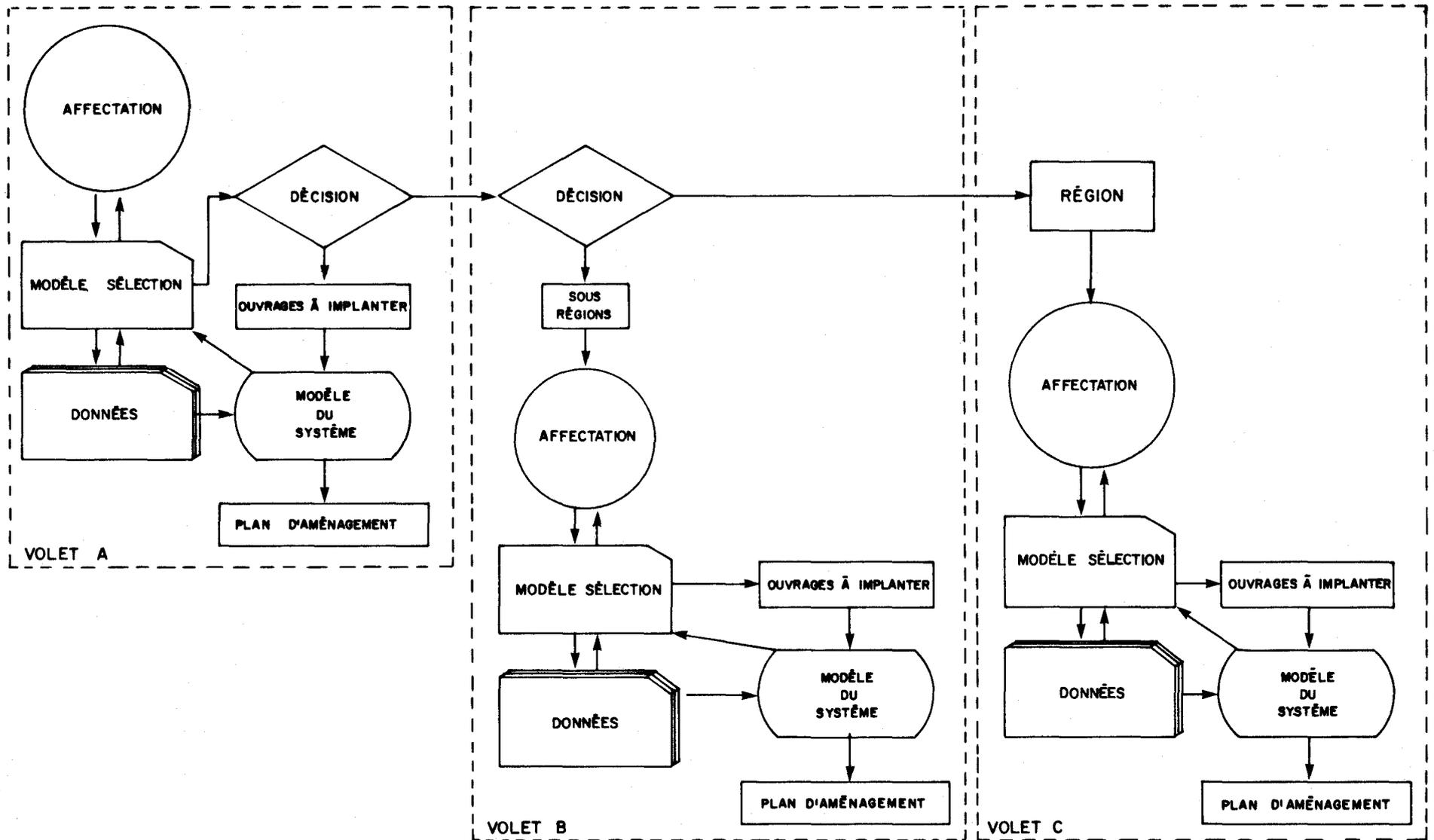


Fig. 2. Les trois volets de la procédure d'aménagement

A l'intérieur de chaque volet, on retrouve les opérations suivantes:

1. affectation;
2. modèle sélection (rétroaction sur affectation 1);
3. système d'ouvrages à implanter;
4. modèle de simulation du système (rétroaction sur modèle de sélection 2);
5. plan d'aménagement;
6. données (historiques, reconstituées, simulées, etc..);
7. opération de décision avant de passer aux volets B ou C.

Cette procédure est aussi conçue de telle sorte que l'on peut affiner le plan d'aménagement par itération successive étant donné que les opérations 2, 3 et 4 sont bouclées, et que l'on peut revenir à volonté sur l'une ou sur l'autre.

3.7.1 Les trois volets de la procédure d'aménagement

A) Le volet A

Le premier volet (A) dont la sortie, comme les deux autres, constitue un plan d'aménagement, établit d'une manière optimale l'adéquation globale entre les disponibilités et la satisfaction des besoins. A la différence des deux autres volets, cependant, l'optimisation est basée sur les besoins et les points d'utilisation en fonction des disponibilités plutôt que sur les ouvrages.

Ce volet constitue l'opération minimale sans laquelle il ne peut être question d'espérer réaliser un aménagement qui tende au moins vers une certaine optimalité.

Ce volet à l'avantage d'être facilement accessible aux planificateurs, de fournir une réponse rapide et globale qui permette d'éliminer

rapidement une hypothèse donnée qui pourrait s'avérer irréalisable. L'application de ce volet peut se faire sur un bassin de grande importance puisqu'il fait appel à des outils mathématiques qui sont généralement assez simples et qui ne comprennent pas de grandes quantités de calcul.

Les données utilisées dans ce volet sont habituellement des données historiques moyennes, ou encore celles obtenues par des simulateurs très élémentaires.

Un inconvénient à noter de ce volet est la précision des résultats qui s'avère parfois insuffisante lorsque que l'on veut passer à la réalisation des aménagements.

En résumé, ce volet:

- permet de vérifier si une option d'affectation ou de développement est réalisable;
- établit l'équilibre, si possible, entre les disponibilités à aménager et les besoins;
- fournit aux planificateurs et aux décideurs une vue d'ensemble leur permettant d'orienter les décisions politiques concernant le développement régional.

Si le premier volet ne s'avère pas satisfaisant au niveau de la précision des résultats, soit pour le bassin entier, soit pour un sous-bassin, on peut alors passer, selon le cas, à l'un ou l'autre des deux autres volets.

B) Le volet B

Le but de ce volet est d'affiner l'analyse au niveau d'un sous-bassin (région) où la précision des résultats obtenus au volet A s'avère insuffisante.

Dans ce volet, le modèle de sélection est appliqué au niveau des ouvrages, ce qui permet de déterminer pour la région une solution optimale basée sur les points de consommation et les ouvrages à réaliser pour établir l'adéquation disponibilités-besoins.

Le plan d'aménagement résultant de ce volet est une solution optimale pour la zone considérée; il ne faut cependant pas oublier qu'une somme de solutions optimales au niveau des sous-bassins ne conduit généralement pas à une solution optimale pour l'ensemble du bassin sauf si les sous-bassins sont indépendants.

Les avantages de ce volet sont similaires à ceux du volet A; en plus, la précision concernant le choix des ouvrages est plus grande car les ouvrages sont traités à la fois dans le modèle de sélection et dans le modèle de simulation ce qui n'était pas le cas dans le volet A alors que les ouvrages n'intervenaient que dans le modèle de simulation.

Le principal intérêt du volet B est de permettre d'approfondir l'étude de sous-bassins qui présentent des particularités. A titre d'exemple, l'existence d'une nappe souterraine importante dans un sous-bassin pourrait justifier l'application d'un modèle de simulation des aquifères pour cette zone seulement. D'autre part, si le développement s'effectue dans un sous-bassin indépendant, il n'y a pas lieu de raffiner l'étude à l'échelle du bassin global en prenant pour suffisamment précis les résultats obtenus avec l'application du volet A. Il ne faut pas oublier que le nombre de fois que l'on exécutera la procédure B sera égal au nombre de sous-bassins que l'on aura décidé de traiter.

Comme désavantage, en dehors de l'optimalité par zone, on doit mentionner que, bien souvent, l'on devra utiliser des données plus fines et plus précises, à la fois dans le modèle de sélection et de simulation du système, ce qui implique des séries historiques plus détaillées et plus complètes ou des simulateurs de données plus sophistiqués.

C) Le volet C

Ce volet a pour objectif de fournir une solution optimale au niveau des ouvrages à réaliser pour l'ensemble du bassin (région) que l'on a décidé d'aménager d'une façon intégrée. Cette procédure ne devrait être appliquée que lorsque la région considérée présente une unité qui est à la fois politique, sociale et économique, car les interactions entre sous-bassins pourraient être modifiées si l'ensemble ne possède pas cette unité.

En raison de l'interaction entre sous-bassins, le volet C a les avantages suivants qui lui sont propres:

- Une rétroaction sur le plan d'affectation qui tient compte des possibilités d'échange entre sous-bassin;
- une plus grande souplesse dans les règles d'opération des ouvrages;
- une combinaison plus favorable des aménagements;
- probablement une programmation de l'implantation d'aménagements plus souple.

Dans l'utilisation de ce volet, sans parler de désavantages on peut citer les inconvénients suivants:

- mise en oeuvre, assez longue;
- quantité de calcul très importante;
- techniques élaborées;
- données précises, ce qui implique des simulateurs sophistiqués.

Il n'existe pas a priori de préférence pour l'un ou l'autre des volets B et C; ce choix, qui vient après l'exécution du volet A, devra justement être fait en tenant compte des informations fournies par ce dernier, et demeure la décision du planificateur.

3.7.2 Les opérations de la procédure d'aménagement

3.7.2.1 Affectation

Le plan d'affectation est en quelque sorte un schéma global d'aménagement qu'il faut préciser. Le plan d'affectation doit fournir les besoins, les normes, les priorités d'aménagement et établir à priori l'adéquation entre les besoins et les disponibilités.

1A) Le plan d'affectation tel que fourni par les planificateurs est utilisé comme donnée d'entrée au modèle de sélection. Le plan est corrigé s'il y a lieu par rétroaction.

1B) Le plan d'affectation résultant de l'étape 1A est adapté pour être utilisé sur le sous-bassin considéré et sera modifié si nécessaire par rétroaction à l'intérieur du processus d'aménagement.

1C) Le plan d'affectation résultant de l'étape 1A sera directement utilisé comme donnée d'entrée au modèle de sélection et sera corrigé s'il y a lieu par rétroaction.

3.7.2.2 Modèles de sélection

Le modèle de sélection est un outil qui fait appel à des techniques d'optimisation telles que la programmation linéaire. Ce modèle permet de déterminer de manière optimale un ensemble d'options d'aménagement qui satisfont au plan d'affectation; s'il est impossible de satisfaire, au plan d'affectation, ou si une modification de ce plan peut s'avérer plus rentable, c'est au niveau du modèle de sélection que s'effectue une rétroaction sur le plan d'affectation.

2A) Modèle de sélection basé sur l'adéquation entre disponibilités et satisfaction du plan d'affectation. Cette adéquation optimale définit au mieux pour le planificateur les types d'ouvrages qu'il doit choisir et elle sera vérifiée par le modèle de simulation.

2B) Modèle de sélection établissant l'adéquation optimale ouvrages et satisfaction des besoins des utilisateurs. La réponse de ce modèle donne pour la région considérée, les ouvrages, leur localisation et leur capacité de manière à satisfaire de manière optimale le plan d'affectation. Si certaines solutions s'avèrent trop onéreuses, ou irréalisables, le plan d'affectation peut être modifié en conséquence.

2C) Cette opération est identique à celle du paragraphe précédent (2B), sauf que le modèle est appliqué à tout le bassin.

3.7.2.3 Systèmes d'ouvrages à implanter

L'opération 3 est la même dans les trois volets. C'est la sortie de l'opération "2" qui est traduite en termes d'ouvrages à réaliser pour satisfaire d'une manière optimale au plan d'affectation.

3A) La sortie de 2A doit être traduite par le planificateur qui détermine les ouvrages à réaliser, ainsi que leur localisation et leur capacité. Cette opération doit satisfaire aux critères d'optimalité qui découlent de l'opération 2A.

3B et C) La sortie de 2B et 2C est un choix optimal d'ouvrages; le planificateur n'intervient dans ce choix que si la solution ou une partie de la solution ne lui plaît pas. S'il intervient, il doit revenir en arrière sur le modèle de sélection et peut-être aussi sur le plan d'affectation.

3.7.2.4 Modèle de simulation du système

Le modèle de simulation doit être un modèle qui représente l'ensemble des ouvrages que l'on retrouve sur le bassin avec les mêmes lois, les mêmes règles d'opérations, les mêmes contraintes, etc.

Ce modèle doit être un modèle de bilan qui chemine l'eau de point en point. Les bilans doivent être effectués à la fois sur la qualité et la quantité de la ressource.

Aucun simulateur de quantité ou de qualité ne doit être introduit dans ce simulateur du système; ceux-ci doivent être considérés comme des fournisseurs de données au système.

Par exemple, si l'on veut simuler l'évolution de la qualité de l'eau dans un réservoir, un modèle simulateur de qualité sera utilisé en parallèle, et fournira l'état de la qualité au pas de temps du simulateur du système.

Le simulateur du système est du même type pour chaque volet.

3.7.2.5 Plan d'aménagement

C'est le résultat, qui donne les ouvrages à implanter, après simulation, optimisation, et vérification du respect des normes, des contraintes et des priorités issues du plan d'affectation.

Dans les trois volets, c'est la sortie, le but à atteindre pour satisfaire les objectifs. Il va de soi que les plans seront différents d'un volet à l'autre, mais tous les trois respecteront les hypothèses qui les sous-tendent, et auront l'optimalité de l'effort et du budget investis pour l'obtenir.

3.7.2.6 Données

L'identification, la cueillette des données et/ou la simulation des données sont parmi les éléments les plus importants pour l'établissement du plan d'aménagement. La liste des données utilisées, citée précédemment, montre à elle seule la quantité énorme de données à traiter, et à utiliser à la fois pour le modèle de sélection, pour le modèle de simulation du système et pour le plan d'affectation.

Si les données historiques s'avèrent insuffisantes, on utilise alors des simulateurs et des générateurs dont certains sont très complexes et difficiles à manipuler.

On considère aussi comme faisant partie des données, les résultats issus des modèles d'opération, de gestion, séquentiel, de qualité, de quantité, etc. Sur la figure 3, on explicite ce que constitue l'opération données.

6A) Les données observées devraient être suffisantes pour l'ensemble de ce volet. En effet, ce sont plutôt des valeurs moyennes qui sont utilisées dans ce volet et ces valeurs sont estimables assez facilement aux points non jaugés. Il faut être prudent, cependant, lors de la simulation du système car il peut arriver que l'on ait besoin de données plus précises.

6B et C) Les données disponibles aux sites jaugés doivent être transposées aux sites non jaugés, au moins pour la simulation du système. On doit utiliser des techniques de simulation qui sont d'autant plus élaborées, que la précision désirée est grande, et que la variable fluctue dans le temps et dans l'espace.

3.7.2.7 Décision

Le planificateur doit décider après chaque passage à 2A, s'il doit ou non augmenter la précision et affiner l'analyse, soit au niveau d'une région, soit au niveau du bassin.

En effet, la réalisation du volet A aura permis de mettre en évidence les problèmes prioritaires dans le bassin et indiquer une orientation des solutions à envisager. Après cette étape, le planificateur doit décider s'il doit ou non augmenter la précision et affiner l'analyse, soit au niveau d'une sous-région, soit au niveau du bassin.

Les études d'aménagement intégré sur différents bassins (voir annexe A-3) font ressortir que des modèles très spécifiques sont utilisés en fonction des problèmes rencontrés sur le bassin qui fait l'objet d'un plan

- 6A - Données historiques (valeurs moyennes)
- Analyse statistique des données
- Transposition aux sites d'ouvrages et aux points de consommation

- 6B-6C - Données historiques
- Analyse statistique des données
- Simulation de débits à différents points du bassin (Modèles déterministes ou stochastiques)
- Simulation des apports
- Simulation de la qualité dans un sous-système (lac, tronçon de rivière)
- Simulation des aquifères (1)

- 6C - Génération de données (informations) en fonction d'objectifs particuliers
- Modalités d'opération optimales des barrages-réservoirs (modèle d'opération)
- Séquence de réalisation optimale des ouvrages (modèle séquentiel) (1)

(1) Cette liste n'est pas exhaustive et pourrait être complétée en fonction des problèmes rencontrés

Fig. 3 - Opération données

d'aménagement. La connaissance des principaux problèmes, fruit de l'application du volet A, permettra donc de préciser les zones qui devront faire l'objet d'analyse plus poussée (choix entre volet B et C) et d'identifier les outils mathématiques nécessaires à la définition du plan d'aménagement intégré.

4. RECOMMANDATIONS POUR LA SAINT-FRANCOIS

A la suite de la revue bibliographique imposante qui a été réalisée dans le cadre de cette étude, il est possible d'établir une méthodologie générale d'aménagement qui peut être appliquée sur un bassin (une région). Cette méthodologie doit être éprouvée dans le cadre d'une étude pilote; c'est d'ailleurs dans cet optique que la présente étude a été entreprise.

Pour le projet de la Saint-François, il est recommandé une étude en deux phases; la première phase consiste en la mise en oeuvre du volet A tandis que la deuxième est liée à la décision du choix entre les volets B et C de la procédure d'aménagement (voir figure 2).

1^o PHASE

Dans cette phase, il est conseillé de mettre en application le volet A de la procédure d'aménagement.

a) Plan d'affectation

Le plan d'affectation est celui qui est réalisé par le Ministère des Richesses naturelles. Ce plan doit être finalisé à l'aide du modèle de sélection.

b) Modèle de sélection

Pour effectuer l'optimisation de l'aménagement, on doit utiliser, dans cette première phase, la programmation linéaire; les équations de bilan, d'équilibre et de contraintes, devraient être établies en considérant en différents noeuds les disponibilités et les utilisations plutôt que les ouvrages.

Le type de modèle qui est le plus près du modèle de sélection et qui pourrait être adapté pour la Saint-François est le modèle "PROLO" de Dreyfus, Hubert et al. (1975).

c) Système d'ouvrage

Ce système doit être établi par les spécialistes en aménagement du Ministère des Richesses naturelles, qui possèdent l'expérience et une connaissance suffisante du bassin de la Saint-François pour déterminer à priori un système d'ouvrages qui puisse satisfaire les résultats optimaux issus du modèle de sélection.

d) Modèle de simulation du système

On devra construire un modèle représentant l'ensemble des ouvrages que l'on retrouve sur le bassin en plus de ceux que l'on projette d'y établir.

Ce modèle sera du type bilan. L'échelle de temps sera la même que celle utilisée dans le modèle de sélection.

Il faut noter que ce modèle est uniquement celui représentant le système; les modèles d'implantation, ou d'opération, n'interviennent dans ce modèle que comme fournisseurs de données; ils doivent donc être utilisés à l'étape donnée.

e) Données

Dans cette phase, les données à utiliser seront celles issues de campagnes, de mesures, c'est-à-dire des données historiques (qualité, quantité).

S'il est besoin de transposer des données d'un site jaugé à un site non jaugé, on utilisera des méthodes classiques (regressions simples en particulier).

Quant aux données d'opération et de gestion, les planificateurs fourniront des règles à priori qui seront utilisées comme entrées au modèle de simulation.

Quant au programme d'implantation, il devrait être aussi établi à priori et vérifié par le modèle de simulation.

2^o PHASE

Le volet utilisé dans la deuxième phase devra faire l'objet d'une décision basée sur une réflexion qui ne peut être faite qu'à partir des résultats du volet A. (Voir 3.7.2.7)

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AGARD, J. et al. (1968).
Les méthodes de simulation. Dunod, Paris, 154 p.
- AUGER, J. (1973).
Programmation linéaire, une application dans le domaine de la récréation de plein air. Gouvernement du Québec, rapport technique No. 1, 37 p.
- BARABE, G. et TREMBLAY, A.R. (1975).
Etude hydrologique du bassin de la rivière Saint-François. Plan de travail. Ministère des Richesses naturelles, Direction générale des eaux, 24 p.
- BEARD, L.R. (1967).
Functional evaluation of a water resources system. U.S. Army, Corps of Engineers, technical paper No. 4, 26 p.
- BEARD, L.R. (1968).
Economic evaluation of reservoir system accomplishments. U.S. Army, Corps of Engineers, technical paper No. 9, 24 p.
- BELGIQUE. COMMISSION INTERMINISTERIELLE DE LA POLITIQUE SCIENTIFIQUE. (1973).
Modèle mathématique de pollution d'eaux intérieures. Rapport de synthèse, journées d'étude des 27-28 novembre 1972, 392 p.
- BELLMAN, R.E. and DREYFUS, S.E. (1962).
Applied dynamic programming. Princeton University Press, Princeton, N.J., 363 p.
- BISWAS, A.K. (1972).
Symposium international sur les techniques de modèles mathématiques appliquées aux systèmes de ressource en eau. Proceedings, Vol. 1-3, 777 p. (Environnement Canada, Ottawa, Canada).
- BISHOP, S.L. and VITTANDS, J.L. (1971).
Computer methodology and water resource development. American Water Works Association Journal, 63 (9): 589-595.
- BURAS, N. (1963).
Conjunctive operation of dams and aquifers. Journal of Hydraulics Division, ASCE, 89 (HY6): 111-131.
- BURAS, N. (1964).
Conjunctive operation of a surface reservoir and a ground water aquifer. IASH, Publication No. 63, p. 492-501.
- BURAS, N. (1972).
A heuristic approach to scheduling water resources development projects. Symposium International sur la planification des ressources hydrauliques. Ponencias final papers exposes. Secretaria de Recursos Hidraulicos, Mexico, Vol. 3, p. 1-18.

- BURLEIGH, H.P. (1970).
Stochastic optimization and simulation techniques for management of regional water resource systems. Vol. IIA, Sim III Program Description. Texas Water Development Board, 117 p.
- BURLEIGH, H.P. (1970).
Stochastic optimization and simulation techniques for management of regional water resource systems. Vol. IIB - Fillen Program Description. Texas water development board, 129 p.
- BURLEIGH, H.P. (1970).
A completion report on stochastic optimization and simulation techniques for management of regional water resource systems. Vol. IIC - A1-11. Program Description. Texas Water Development Board, 99 p.
- BURLEIGH, H.P. (1970).
A completion report on stochastic optimization and simulation techniques for management of regional water resource systems. Vol. IID- Demand II. Program Description. Texas Water Development Board, 53 p.
- BURLEIGH, H.P. (1970).
A completion report on stochastic optimization and simulation techniques for management of regional water resource systems. Vol. IIE - Sequen I. Program Description. Texas Water Development Board, 100 p.
- BURLEIGH, H.P. (1970).
A completion report on stochastic optimization and simulation techniques for management of regional water resource systems. Vol. IIF - Capex I - Program Description. Texas Water Development Board, 44 p.
- BURLEIGH, H.P. (1970).
A completion report on stochastic optimization and simulation techniques for management of regional water resource systems. Vol. III - Data Management and Analysis Program Description. Texas Water Development Board, 147 p.
- BUTCHER, W.S.; HAIMES, Y.Y. et al. (1969).
Dynamic programming for the optimal sequencing of water supply projects. Water Res. Res., 5(6): 1196-1204.
- CHATURVEDI, M.C. (1973).
Planning methodology and first stage model of a large river basin. 15th Congress of the IAHR, Proceedings, 4: 165-174.
- CHOW, V.T. and MEREDITH, D.D. (1969).
Water resources systems analysis. Part II. Annotated bibliography on programmings techniques. University of Illinois, Dept. of Civil Engineer, Hydraulic Engineering Series, No. 20, p. 1-45.

- CHOW, V.T. and MEREDITH, D.D. (1969).
Water resources systems analysis. Part III, Review of Stochastic Processes. University of Illinois, Dept. of Civil Engineer, Hydraulic Engineering Series, No. 20, p. 45-99.
- CLEMSON UNIVERSITY. (1970).
Hydrologic models in water resources management. Clemson University, Water Resource Research Institute, Report No. 17, 145 p.
- CLOUGH, D.J. (1969).
A multi-agency decision model framework for benefit-cost analysis. Journal of the Canadian Operational Research Society, 7(3): 193-203.
- CLOUGH, D.J. and BEYER, M.B. (1968).
Optimal waste treatment and pollution abatement benefit on a closed river system. Journal of the Canadian Operational Research Society, 6(3): 153-170.
- COUILLARD, D., CLUIS, D. et DUROCHER, H. (1975).
Etude des apports des substances nutritives (N,P) dans les bassins versants des rivières Yamaska et Saint-François, rapport d'avancement des travaux. INRS-Eau, rapport scientifique No. 53, 19 p.
- COUTURE, M. (1975).
Note préliminaire concernant la méthodologie d'aménagement. Ministère des Richesses naturelles, p. 1-10.
- CUENOD, M.A. and KAHNE, S. (1973).
Systems approaches to developing countries. Instrument Society of America, Pittsburgh, Pennsylvania, 515 p.
- DALMAYRAC, M., KENNON, M.M. et al. (1973).
Simulation de la qualité sur un grand bassin. Etude du D.G.R.S.T., France, 14 p.
- DAVINPORT, S., ARVANITIDIS, N.V. et al. (1972).
Planning and evaluation of multiple purpose water resource projects in a multiobjective environment: an overview and post-audit analyses. INTASA (Sally Davenport). Prepared for: Office of Water Resource Research, U.S. Dept. of Interior, 137 p.
- De DONNEA, F.X., De MERODE, L. et al. (1974).
Un modèle d'implantation de stations d'épuration urbaines: application à la région de Marcinella. Programme Nationale sur l'Environnement Physique et Biologique. Analyse Economique de la lutte contre la pollution des eaux. Rapport de synthèse. Université catholique de Louvain, Vol. 1, 389 p.
- DELISLE, A. (1973).
Optimisation de l'utilisation de la ressource eau. 11e congrès de l'AQTE, Conséquences socio-économiques de l'utilisation de l'eau, 14 p.

DELISLE, A. (1974).

Gestion de l'eau: optimisation technique et socio-politique de l'utilisation de la ressource eau d'un bassin. Thèse de maîtrise, INRS-Eau, Université du Québec, 149 p.

DELISLE, A., LOUCHARD, L. et al. (1975).

Plan d'affectation des eaux d'un bassin hydrologique. Programme de travail. Bassin de la Saint-François. Ministère des Richesses naturelles, Direction générale des eaux, 50 p.

DE LUCIA, R.J. and HARRINGTON, J.J. (1972).

Systems analysis in water resources planning: some perspectives. International symposium on modelling techniques in water resources systems. Proceedings, Vol. 3, p. 410-422. (Environment Canada, Ottawa, Canada).

DE LUCIA, R.J. and ROGERS, P. (1972).

North atlantic regional supply model. Water Res. Res., 8(3): 762-765.

D.G.R.S.T. (1971-73).

Evolution des besoins en eaux:

- propositions méthodologiques pour le découpage de l'espace;
- agrégation des utilisateurs et choix des critères d'évaluations des besoins;
- hypothèses de développement régional;
- conclusion.

D.G.R.S.T., France. Rapport interne, 20 p.

D.G.R.S.T. (1971-73).

Gestion des eaux. Modèle de prévision (modèle Prolo). D.G.R.S.T., France. Rapport interne, 9 p.

D.G.R.S.T. (1971-73).

Evolution des besoins:

- construction des hypothèses de développement (programme prophète);
- typologie des utilisateurs.

D.G.R.S.T., France. Rapport interne, 28 p.

D.G.R.S.T. (1971-73).

Modélisation du système physique de l'eau. D.G.R.S.T., France. Rapport interne, 19 p.

D.G.R.S.T. (1973).

Paramètres numériques et non numériques de la gestion des ressources en eau: rapport final. D.G.R.S.T., France. Rapport interne, 30 p.

DRACUP, J.A., BUDHRAJA, V.S. et al. (1972).

Applications of systems analysis techniques to water resources. Environmental Dynamics Inc., 197 p.

DREYFUS, A. et HUBERT, P. (1975).

Aménagement et gestion des ressources en eau du bassin Adour-Garonne. 1er résultats numériques. D.G.R.S.T., France. Rapport interne, 8 p.

- DREYFUS, A., HUBERT, P. et al. (1975).
 "PROLO": Modèle de prévision pour l'aménagement et la gestion intégrée d'un grand bassin hydrographique. La Houille Blanche, (1): 17-36.
- DYSART III, B.C. (1972).
 Use of advanced water resources planning techniques in the development of regional water quality management programs. Clemson University, Water Resources Research Institute, Report No. 34, 319 p.
- ELSAKRAGTY, M.M. and LOUCKS, P. (1974).
 Planning and operation of urban water quality management systems. Cornell University, Water Resources and Marine Sciences Center, 166 p.
- ENGLAND, C.B. (1973).
 Watershed models: tools in planning land management for water and pollution control. Journal of Soil and Water Conservation, 28(1): 36-38.
- ENVIRONMETRICS INC. (1971).
 The basin model: Economic sector. Water Pollution Control Research Series, U.S. Environmental Protection Agency, 151 p.
- ENVIRONMETRICS INC. (1971).
 The basin model: Chairman and council. Water Pollution Control Research Series, U.S. Environmental Protection Agency, 80 p.
- ENVIRONMETRICS INC. (1971).
 The river basin model: Assessment department. Water Pollution Control Research Series, U.S. Environmental Protection Agency, 83 p.
- ENVIRONMETRICS INC. (1971).
 The river basin model: The social science laboratory. Water Pollution Control Research Series, U.S. Environmental Protection Agency, 269 p.
- ENVIRONMETRICS INC. (1971).
 The river basin model: Utility department. Water Pollution Control Research Series, U.S. Environmental Protection Agency, 129 p.
- ENVIRONMETRICS INC. (1971).
 The river basin model: Highway department. Water Pollution Control Research Series, U.S. Environmental Protection Agency, 104 p.
- ENVIRONMETRICS INC. (1971).
 The river basin model: The transportation sector. Water Pollution Control Research Series, U.S. Environmental Protection Agency, 94 p.
- ENVIRONMETRICS INC. (1971).
 The river basin model: School department. Water Pollution Control Research Series, U.S. Environmental Protection Agency, 94 p.
- ENVIRONMETRICS INC. (1971).
 The river basin model: Computer output. Water Pollution Control Research Series, U.S. Environmental Protection Agency, 246 p.

- ENVIRONMETRICS INC. (1971).
The river basin model: Planning and zoning department. Water Pollution Control Research Series, U.S. Environmental Protection Agency, 81 p.
- HUBERT, P. (1973).
Modèle de prévision superprolo (note préliminaire). D.G.R.S.T., France, Rapport interne, 10 p.
- EQUIPE DE RECHERCHE EAU. (1973).
Gestion des eaux. Modèle de prévision. Etude D.G.R.S.T., Université des Sciences Sociales de Grenoble et Centre d'Informatique Géologique, 32 p.
- EQUIPE DE RECHERCHE DU C.N.R.S. (1971).
Gestion des eaux. Programme de travail. Université des Sciences Sociales de Grenoble. Institut de Recherche Economique et de Planification, 26 p.
- ESPINASSE, V.M. et CARAQUEL, V. (1971-73).
Quantification du besoin. Fascicule No II - Modèle de répartition spatiale de l'activité économique. Etude D.G.R.S.T., Institut d'étude de l'emploi de Toulouse, pp. II. 12 - II. 17.
- FAURE, R. (1968).
Elément de la recherche opérationnelle. Gauthier-Villars, Paris, 317 p.
- FERGUSON, J.R. and LOUCKS, D.P. (1972).
Model for managing metropolitan surface water systems. Cornell University, Water Resources and Marine Sciences Center, Technical report No 40, 219 p.
- FIERING, M.B., HARRINGTON, J.J. et al. (1971).
Water resources systems analysis. Dept. of Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canada. Resource Paper No. 3, 47 p.
- FOX, I.K. (1973).
Integrating all aspects of regional water systems. Journal of Hydraulics Division, ASCE, 99(HY4): 599-604.
- FREDRICH, A.J. and HAWKING, E.F. (1969).
Hydrologic engineering techniques for regional water resources planning. U.S. Army, Corps of Engineer, Technical paper. No. 17, 26 p.
- GABLINGER, M. et al. (1972).
Extrait de: Use of systems approaches in planning Israel's water resources management. Symposium International sur la Planification des Ressources hydrologiques. Vol. III. Ponencias final papers exposes. Secretaria de Recursos Hidraulicos, Mexico, p. 15-28.
- GASS, S.I. (1969).
Linear programming. Methods and applications. 3rd Edition, McGraw Hill Book Company, N.Y., 358 p.

- GIRARD, G., CHARBONNEAU, R. et al. (1972).
Modèle hydrophysiographique. Symposium international sur les techniques de modèles mathématiques appliqués aux systèmes de ressources en eau. Proceedings, Vol. 1, p. 190-204. (Environnement Canada, Ottawa, Canada).
- GIRARD, G., MORIN, G. et al. (1973).
Utilisation d'un modèle de fonte de neige à mailles physiographiques. Bulletin des Sciences Hydrologiques, 18(1): 27-32.
- GRANTHAM, G.R. SCHAAKE, J.C. et al. (1971).
Water quality simulation model. Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, 97(SA5): 569-585.
- HAIMES, Y.Y. (1974).
Lecture notes for the third annual. One week short course on hierarchical approach in the planning operation management of water resources systems. International Water Resources Association. American Geophysical Union, 648 p.
- HAIMES, Y.Y., HALL, W.A. and FREEDMAN, H. (1975).
Developments in water sciences. 3. Multiobjective optimization in water resources systems. Elsevier Scientific Publishing Company, 200 p.
- HAIMES, Y.Y., KAPLAN, M.A. et al. (1972).
A multilevel approach to determining optimal taxation for the abatement of water pollution. Water Res. Res., 8(4): 851-860.
- HAIMES, Y.Y. and NAINIS, W.S. (1974).
Coordination of regional water resource supply and demand planning models. Water Res. Res., 10(6): 1051-1059.
- HAITH, D.A. and LOUCKS, D.P. (1971).
The political evaluation of alternative metropolitan water resources plans. Cornell University, Water Resources and Marine Sciences Center, Technical report No 31, 187 p.
- HALL, W.A., ASKEW, A.J. et al. (1969).
Use of the critical period in reservoir analysis. Water Res. Res., 5(6): 1205-1215.
- HALL, W.A., BUTCHER, W.S. et al. (1968).
Optimization of the operation of a multiple purpose reservoir by dynamic programming. Water Res. Res., 4(3): 471-473.
- HALL, W.A. and DRACUP, J.A. (1970).
Water resources systems engineerings. McGraw-Hill Inc., N.Y., 372 p.
- HALL, W.A., TAUXE, G.W. et al. (1969).
An alternate procedure for the optimization of operations for planning with multiple river, multiple purpose systems. Water Res. Res., 5(6): 1367-1372.

- HARBOE, R.C., MOBASHERI, F. et al. (1970).
Policy for reservoir operation. Journal of Hydraulics Division, ASCE, 96(HY11): 2297-2308.
- HASS, J.E. (1970).
Optimal taxing for the abatement of water pollution. Water Res. Res., 6(2): 353-365.
- HOLTAN, H.N. and LOPEZ, N.C. (1971).
USDAHL-70: Model of watershed hydrology. U.S. Dept. of Agriculture, Agriculture Research Service, Technical Bulletin No 411, 57 p.
- HOPPEL, S.K. and VIESSEMAN, W., Jr. (1972).
A linear analysis of an urban water supply system. Water Res. Bull., 8(2): 304-311.
- HUFSCHMIDT, M.F. and FIERING, M.B. (1966).
Simulation techniques for design of water resource systems. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 212 p.
- HUFSCHMIDT, M.F. (1965).
Field level planning of water resource systems. Water Res. Res., 1(2): 147-163.
- HYDROCOMP INTERNATIONAL INC. (1972).
Hydrocomp simulation programming operations manual. Palo Alto, California, 84 p.
- JACOBY, H.D. and LOUCKS, D.P. (1972).
Combined use of optimization and simulation models in river basin planning. Water Res. Res., 8(6): 1401-1414.
- JAMIESON, D.G. (1972).
River Dresearch program. 1. Operating multipurpose reservoir systems for water supply and flood alleviation. Water Res. Res., 8(4): 899-920.
- JEDRYSIK, M., LARSHI, A. et al. (1971).
General description of the Vistula river project and basic planning data. Symposium international sur les modèles mathématiques en hydrologie. Varsovie, Juillet 1971, p. 1-26.
- KACZMAREK, Z., KRAJEWKI, K. et al. (1971).
The multiple-step method for simulation and optimization of vistula river planning alternatives. Symposium international sur les modèles mathématiques en hydrologie. Varsovie, Juillet 1971, pp. 1-10.
- KANE, J. (1972).
Intuition, policy and mathematical simulation. International symposium on uncertainties in hydraulics and water resources system. Tucson, Arizona, Vol. 3, p. 1146-1166.
- KAUFMANN, A. (1962).
Méthodes et modèles de la recherche opérationnelle. Dunod, Paris, Tome I (534 p.) et Tome II (544 p.).

KERRI, K.D. (1966).

An economic approach to water quality control. Journal of the Water Pollution Control Federation, 38(12): 1883-1897.

KERRI, K.D. (1967).

A dynamic model for water quality control. Journal of the Water Pollution Control Federation, 39(5): 772-786.

KING, I.P., FILIMOWSKI, J. et al. (1971).

The out-of-kilter algorithm as a single-step-method for simulation and optimization of vistula river planning alternatives. Symposium international sur les modèles mathématiques en hydrologie, Varsovie, Juillet 1971, pp. 1-16.

LARSON, R.E. and KECKLER, W.G. (1967).

Applications of dynamic programming to the control of water resources systems. Stanford Research Institute, Menlo Park, California, 52 p.

LAURENT, E.A. and HITE, J.C. (1971).

Economic ecologic analysis in the Charleston metropolitan region: an unput output study. Clemson University, Water Resources Research Institute, 102 p.

LAVIGNE, J. (1975).

Projet Saint-François, programme de travail. Groupe - utilisations. Ministère des Richesses naturelles, Direction générale des eaux, 20 p.

LEYTHAN, K.M. (1974).

A search technique for formulating improved water resources configuration. In: Systematic approach to water resources plan formulation. M.I.T., Report 187, part II, 132 p.

LOFTING, E.M. and McGAUHEY, P.H. (1968).

Economic evaluation of water. Part IV: An input ouput and linear programming analysis of California water requirements. University of California, Water Resources Center, Contribution No 116, 187 p.

LOOMBA, P.N. (1964).

Linear programming. McGraw-Hill Book Company, N.Y., 284 p.

LOTTIS, C. et GRASSETTI, B. (1970).

Une application de la programmation linéaire pour la plan d'un aménagement hydraulique intégré. Société Hydrotechnique de France, XIe journée de l'Hydraulique, Question VI, rapport 8, p. 12^{*}.

LOUCHARD, L., TREMBLAY, A.R. et al. (1975).

Projet Saint-François, suggestion de livre bleu de bassin. Ministère des Richesses naturelles, Direction générale des eaux, 13 p.

LOUCKS, D.P. et al. (1969).

Stochastic methods for analysing river basin systems. Cornell University, Water Resources and Marine Sciences Center, Technical report 16, 306 p.

- LOUCKS, D.P., GYPSI, M. et al. (1972).
A selected annotated bibliography on the analysis of water resource systems.
U.S. Dept of the Interior, Office of Water Resources Research, Water Resources Scientific Information Center, 402 p.
- MAJOR, D.C. (1972).
Impact of the systems techniques on the planning process. *Water Res. Res.*, 8(3): 766-768.
- MARKS, D.H., COHON, J.L. et al. (1971).
Screening models for investment in regional water resources developments.
M.I.T., Water Research and Hydrodynamics Division, Cambridge, Massachusetts, 33 p.
- MASS, A., HUFSCHMIDT, M.F. et al. (1962).
Design of water resource systems. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 620 p.
- McBEAN, E.A. (1974).
Screening model in water resource planning. Part III. in: Systematic approach to water resources plan formulation, M.I.T., Ralph M. Parsons Laboratory, Report No 187, p. 1-23.
- McBEAN, E.A. and SCHAAKE, J.C., Jr. (1972).
Joint use of screening and simulation models in multiobjective. Plan formulation. Symposium International sur la planification des ressources hydrauliques, Vol II. Ponencias final papers exposes. Secretaria de Recursos Hidraulicos, Mexico, 46 p.
- McGREW, D.R. and HAIMES, Y.Y. (1974).
Parametric solution to the joint system identification and optimization problem. *J. Optimization Theory Applications*, 13(5): 582-604.
- MECHIN, Y., FLEURY, J.M. et al. (1970).
Recherche du programme optimum de construction d'un ensemble de barrages pour le soutien des étiages dans un bassin. Société Hydrotechnique de France, XIième journée de l'Hydraulique, Question VI, rapport 10, p. 1-5.
- MEIER, W.L., Jr. and BEIGHTLER, C.S. (1967).
An optimization method for branching multistage water resource systems. *Water Res. Res.*, 3(3): 645-652.
- MEIER, W.L., Jr. and SHIH, C.S. (1970).
Application of specialized optimization techniques in water quantity and quality management with respect to planning for the Trinity river basin. Texas A and M University, Water Resources Institute, Technical Report No 30, 106 p.

- MOBASHERI, F. and HARBOE, R.C. (1970).
A two-stage optimization model for design of multi-purpose reservoir. *Water Res. Res.*, 6(1): 22-31.
- MORSE, P.M. (1969).
Library effectiveness: a systems approach. M.I.T., Press, Cambridge, Massachusetts, 207 p.
- MOSELY, J.C. and EVENSON, D.E. (1970).
Time sequencing of element construction in a multi-reservoir system. *Water Res. Bull.* 6(4): 528-541.
- M.R.N. (QUEBEC). (1974).
Programme de connaissances intégrées "Eau Souterraine". Définition et schéma d'évolution. Ministère des Richesses naturelles, Service des eaux souterraines, 7 p.
- NAYAK, S.C. and ARORA, S.R. (1971).
Optimal capacities for a multi-reservoir system using the linear decision rule. *Water Res. Res.*, 7(3): 485-498.
- NEMHAUSER, G.L. (1967).
Dynamic programming. John Wiley and Sons, Inc. 286 p.
- NOVOTNY, V. (1970).
Mathematical modelling of water quality changes in a river basin. Proceedings 5th International Conference Water Pollution Research, Advances in Water Pollution Research, pp I-5/1 - I-5/7.
- O'LAOGHAIRE, D.T. and HIMMELBLAU, D.M. (1972).
Modeling and sensitivity analysis for planning decisions in water resources expansion. *Water Res. Bull.* 8(4): 653-668.
- OLIVIER, A.L. (1967).
Recherche opérationnelle. Vocabulaire français-anglais. Dunod, Paris, 148 p.
- O'NEIL, P.G. (1972).
A mathematical programming model for planning a regional water resource system. *Journal I.W.E.*, 26(1): 47-71.
- O'RIORDAN, J. (1972).
An approach to evaluation in multiple objective river basin planning. An analysis of selected water quantity alternatives in the Okanagan Valley, B.C., Canada. Symposium international sur la planification des ressources hydrauliques. Vol. III, Ponencias final paper exposes. Secretaria de Recursos Hidraulicos, Mexico, 50 p.
- ORLOB, G.T. and DENDY, B.B. (1973).
Systems approach to water quality management. *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, 99(HY4): 573-587.
- ORLOB, G.T., KING, I.P. et al. (1972).
Optimal allocation of limited water resources. Symposium International sur la planification des ressources hydrauliques, Vol II. Ponencias final paper expose. Secretaria de Recursos Hidraulicos, Mexico, 34 p.

- PACKER, M.R., RILEY, P.J. et al. (1969).
Simulation of the hydrologic-economic flow system in an agricultural area. Utah State University, College of Engineering, Water Research Laboratory, PRWG Report, 91 p.
- PEREZ, A.I., SCHAAKE, J.C. et al. (1970).
Simulation model for flow augmentation costs. Journal of Hydraulics Division, ASCE, 96(HY1): 131-142.
- PISANO, W.C. (1968).
River basin simulation program. U.S. Dept. of Interior. Federal Water Pollution Control Administration, Sanitary Engineer Division of Technical Control, 210 p.
- PRICKETT, T.A. and LONNQUIST, C.G. (1971).
Selected digital computer techniques for groundwater resource evaluation. Illinois State Water Survey, Urbana. Illinois Water Survey Bulletin 55, 62 p.
- QASHU, H.K. and BENASSINI, O.V. (1972).
Ideality and reality in water resource planning. Symposium international sur la planification des ressources hydrauliques, Vol. III, Ponencias final papers exposes. Secretaria de Recursos Hidraulicos, Mexico, 10 p.
- REVELLE, C.S., LOUCKS, D.P. et al. (1968).
Linear programming applied to water quality management. Water Res. Res., 4(1): 1-9.
- RUSSELL, S.O. and CASELTON, W.F. (1971).
Reservoir operation with imperfect flow forecasts. Journal of Hydraulics Division, ASCE, 97(HY2): 323-331.
- SAVOUYAUD, L. (1975).
Cotation technique. Ministère des Richesses naturelles, 16 p.
- SCHAAKE, J.C., Jr., FACET, T.B. and LEYTAN, K.M. (1974).
Systematic approach to water resources plan formulation. M.I.T., Ralph M. Parsons Laboratory for Water Resources and Hydrodynamics, Report No. 187, 268 p.
- SCHAAKE, J.C., Jr. and MAJOR, D.C. (1972).
Model for estimating regional water needs. Water Res. Res., 8(3): 755-759.
- SCHWARZ, H.E. (1972).
Water resources systems symposium introduction. Water Res. Res., 8(3): 750.
- SCHWARZ, H.E. (1972).
The NAR study: a case study in systems analysis. Water Res. Res., 8(3): 751-754.
- SCHWEIG, Z. and COLE, J.A. (1968).
Optimal control of linked reservoirs. Water Res. Res., 4(3): 479-497.

- SHIH, C.S. and De FILIPPI, J.A. (1968).
Optimization models for river basin water quality management and waste treatment plan design. American Water Resources Conference, Proceeding Series No 6, p. 754-779.
- SIGVALDASON, O.T., De LUCIA, R.J. et al. (1972).
The Saint John study: an example of complementary usage of optimization and simulation modelling in water resources planning. International Symposium on Modelling Techniques in Water Resources Systems, Proceedings, Vol. 3, p. 576-604. (Environment Canada, Ottawa, Canada).
- STEPHENSON, D. (1970).
Optimum design of complex water resource projects. Journal of Hydraulics Division, ASCE, 96(HY6): 1229-1246.
- STOCHASTICS INCORPORATED. (1971).
Stochastic modeling for water quality management. Environmental Protection Agency, Water Quality Office, Water Pollut. Contr. Res. Series., 397 p.
- TENIERE-BUCHOT, P.F. et OERLEMANS, J.J. (1973).
Le modèle "POPOLE". Analyse et prévision, 15: 155-333.
- TEXAS WATER DEVELOPMENT BOARD. (1973).
A completion report on techniques for identifying and evaluating market and non-market benefits and costs of water resources systems, 227 p.
- TEXAS WATER DEVELOPMENT BOARD. (1973).
Stochastic optimization and simulation techniques for management of regional water resource system, a completion report 131, 129 p.
- TEXAS WATER DEVELOPMENT BOARD. (1974).
Analytical techniques for planning complex water resources systems. A summary report, report 183, 59 p.
- THOMAS, H.A., Jr. et al. (1963).
Operations research in water quality management. Harvard University, Cambridge, 208 p.
- TOEBES, G.H. and CHANG, T.P. (1972).
Simulation model for the Upper Wabash surface water system. Purdue University, Water Resources Research Center, Technical Report No 27, 100 p.
- TROTTIER, R. (1975).
Méthodologie de la planification des systèmes de distribution d'eau. Eau du Québec, 8(2): 59-65.
- UPTON, C. (1968).
Optimal taxing of water pollution. Water Res. Res., 4(5): 865-875.
- UPTON, C. (1971).
Applications of user charges to water quality management. Water Res. Res., 7(2): 264-272.

- U.S. ARMY ENGINEER DIVISION, NORTH PACIFIC. (1971).
Runoff evaluation and streamflow simulation by computer. U.S. Army, Corps of Engineers, Portland, Oregon, 88 p.
- VIESSMAN, W., Jr. et al. (1971).
Optimal analysis of water resources systems. University of Nebraska, Nebraska Water Resource Research Institute, 269 p.
- VIESSMAN, W., Jr., LEWIS, G.L. et al. (1975).
A screening model for water resources planning. Water Res. Bull., 11(2): 245-255.
- WAGNER, H.M. (1969).
Principles of operations research with applications to managerial decisions. Prentice-Hall Inc., N.J., 936 p.
- WATT, K.E.F. (1968).
Ecology and resource management. McGraw-Hill Book Company, 450 p.
- WHINSTON, A.B. (1972).
Economic analysis of optimal water quality management. Purdue University, Water Resources Research Center, Technical report No. 25, 275 p.
- WHITE, D., DONALDSON, W. and LAWRIE, N. (1969).
Operational research techniques, Vol I. Business Books Limited, London, 207 p.
- WILDE, D.J. and BEIGHTLER, C.S. (1967).
Foundations of optimization. Prentice-Hall Inc., N.J. 480 p.
- WILKINSON, J.M. (1970).
Research on data and analytical systems for preparing national water assessments (Final Report). National Technical Information Service, 339 p.
- YEH, W. W-G. and TROTT, W.J. (1972).
Optimization of water resources development: optimization of capacity specifications for components of regional, complex integrated, multipurposed water resources systems. A Report Submitted to the Office of Water Resource Research. U.S. Dept. of Interior. Report Group, School of Engineering of a Applied Sciences, 34 p.
- YOUNG, G.K. (1967).
Finding reservoir operating rules. Journal of hydraulics division, ASCE, 93(HY6): 297-322.
- YOUNG, G.K. (1968).
Reservoir management: the tradeoff between flow regulation and flood control. Water Res. Res., 4(3): 507-511.
- YOUNG, G.K. (1969).
An approach to finding reservoir rules for power optimization. 8th environmental conference proceeding. Technical Report No. 20, Vanderbilt University, Nashville, p. 87-98.

ANNEXE A-1

Descriptions de modèles de sélection

Modèle de O'NEIL

O'Neil, P.G. "A Mathematical-programming model for planning a regional water resource system". Journal I.W.E., 26 (1): 47-71, (1972).

BUT

Planification régionale basée sur la minimisation des coûts de construction et d'opération du système global qui comprend les sources de production d'eau et les éléments de traitement et de transfert.

Le modèle permet de répartir les débits pour satisfaire les demandes résidentielles, commerciales et industrielles. Il indique de plus l'échéancier des investissements pour la solution retenue.

TECHNIQUE

La minimisation de la fonction objectif (valeur totale des coûts de construction et d'opération jusqu'à l'année 2001) est effectuée par programmation linéaire.

Cette méthode est adaptée (Mixed-integer programming) au fait que certaines variables ne sont pas continues (si le réservoir donné est construit, on a la valeur 1, autrement, la valeur 0).

EQUATIONS DE CONTRAINTES

- La demande en chaque point doit être satisfaite;
- la fourniture d'eau à une source ne peut dépasser la capacité de cette source;
- l'eau transitée dans un organe de transfert ne peut dépasser sa capacité;

- l'eau ne peut être utilisée à une source que si celle-ci est développée.

DONNEES D'ENTREE

- Coûts de construction et d'opération des ouvrages de stockage, de transfert et de traitement;
- sources de production d'eau superficielle et souterraine.

Modèle de Sigvaldason

SIGVALDASON, O.T., DeLUCIA, R.J. et BISWAS, A.K. "The Saint-John study; an example of complementary usage of optimization and simulation in water resources planning". International Symposium of Modelling Techniques in Water Resources Systems, Proceedings, Vol. 3, p. 576-604. (Environment Canada, Ottawa, Canada).

APERCU GENERAL

Couplage modèle d'optimisation, modèle de simulation.

- 1) modèle de sélection: relativement simple, sert à sélectionner les alternatives de développement les plus intéressantes;
- 2) modèle de simulation: permet une étude détaillée et complète des alternatives retenues.

1) Modèle de sélection

BUT

Minimisation des coûts dus à l'opération et à la construction des ouvrages de traitement, pour respecter des niveaux de qualité donnés (DBO).
Maximisation de la qualité de l'eau (OD) pour un coût fixé.

TECHNIQUE

Programmation linéaire; nécessite la linéarisation par segment des fonctions coûts-niveau de DBO qui sont en général non linéaires.

CONTRAINTES

- La valeur minimum requise pour OD en chaque point;
- niveaux minima et maxima de traitement pour une partie ou l'ensemble du bassin;
- investissement maximum possible pour une partie ou l'ensemble du bassin;
- coût total de traitement admissible pour une partie ou l'ensemble du bassin.

DONNEES D'ENTREE

- Données caractérisant la charge de DBO, le déficit en OD en tout point j;
- coefficient de transfert qui permet de calculer le déficit en OD en un point j à la suite d'une pollution en i;
- normes requises de OD.

2) Modèle de simulation

BUT

A partir des niveaux de traitement retenus dans le modèle de sélection le modèle de simulation évalue les effets des traitements sur la qualité de l'eau, en considérant des débits journaliers simulés, et permet une évaluation plus précise des traitements effectivement requis.

Le modèle de simulation a aussi comme but de fournir l'information concernant la fréquence, la persistance de certains dépassements des normes de qualité.

TECHNIQUE

- Génération synthétique de débits saisonniers en conservant les caractéristiques principales de l'écoulement;

- génération de débits journaliers par désagrégation des débits saisonniers;
- à partir de la connaissance des effluents et des débits, détermination des concentrations de polluants.

Modèle PROLO

DREYFUS, A., HUBERT, P. et al., "PROLO": modèle de prévision pour l'aménagement et la gestion intégrée d'un grand bassin hydrographique. La Houille Blanche, (1): 17-36, (1975).

BUT

Le modèle de prévision détermine des combinaisons de fonctions hydrauliques permettant de satisfaire les besoins exprimés, compte tenu des ressources aménagées ou aménageables. Il élabore en quelque sorte des schémas directeurs d'aménagement hydraulique du bassin pour un horizon donné (ex.: 1985) et un niveau d'étiage donné (débit mensuel).

On a reconnu six usages de l'eau, trois types de ressources et quatre paramètres de qualité pour l'eau.

Le bassin est divisé en zones constituant des entités économiques et hydrologiques. On a adopté un modèle du système physique de l'eau en termes de modules hydrauliques développant une ou plusieurs fonctions hydrauliques (transport, stockage, mélange, consommation).

TECHNIQUE: Programmation linéaire

Ce modèle du bassin a été traduit en équations et inéquations linéaires. Les inconnues de ces équations et inéquations mesurent les fonctions hydrauliques mises en jeu par les différents modules hydrauliques.

DONNEES NECESSAIRES

- Description du graphe des zones élémentaires, normes de qualité et de quantité, aménagement existant;

- typologie des utilisateurs;
- historique hydrologique mensuel des zones élémentaires à l'horizon de l'étude.

RESULTATS OBTENUS

Localisation et dimensionnement des différents ouvrages (pompage, stockage, épuration). Plan d'alimentation des utilisateurs et ventilations des eaux usées (recyclage ou rejets). Détection d'éventuels déficits.

CONTRAINTES

Dans chaque zone, on définit:

- un bilan au niveau de la quantité et une contrainte de débit minimal acceptable;
- un bilan au niveau de la qualité intégrant une contrainte de qualité minimale acceptable (ceci pour chaque paramètre qualitatif retenu);
- une limite supérieure à la fonction stockage;
- une limite supérieure à la fonction prise en eau souterraine;
- un bilan pour chaque ressource;
- pour chaque usage, un bilan à l'entrée, un bilan à la sortie et des contraintes de satisfaction qualitative.

FONCTIONS OBJECTIFS

Toute fonction linéaire des inconnues (débits, dimension des ouvrages, etc...) peut être retenue. Pratiquement, les fonctions utilisées jusqu'alors mesurent le recyclage et la protection des eaux souterraines.

Modèle de Delucia et Rogers

DELUCIA, R.J., ROGERS, P. "North Atlantic regional supply model". Wat. Res. Res., 8 (3):, 762-765, (1972).

BUT

Formuler un plan d'aménagement qui permette d'évaluer les sites (sources) et le coût des aménagements nécessaires pour répondre aux besoins régionaux en eau (50 régions pour un bassin de 167,000 km²).

TECHNIQUE

Le modèle utilise la programmation mathématique en considérant une fonction objectif non linéaire, mais toutes les contraintes sont linéaires. La formulation du modèle est déterministique et l'analyse se fait pour des périodes critiques (ex.: débits, étiages). Les hypothèses suivantes ont été faites au départ:

- les utilisateurs et les points d'alimentation (water-supplying) sont situés en un point dans chacun des sous-bassins. Le système est composé de 50 noeuds (sous-bassins) reliés par le réseau de drainage (rivières, canaux);
- les lâchures des réservoirs sont présentées en valeurs annuelles;
- le recyclage est considéré;
- les transferts inter-bassins des eaux souterraines sont ignorés.

Le modèle considère deux qualités d'eau: l'eau potable et l'eau non potable mais utilisable directement pour d'autres fins.

DONNEES NECESSAIRES

- Adduction d'eau (débit) pour chaque zone;
- dérivations (débit) pour chaque zone;
- consommation nette pour chaque zone;
- demande en eau souterraine à des fins d'irrigation et d'alimentation domestique;
- données concernant les ouvrages d'alimentation et de régularisation;

- régularisation possible avec les réservoirs potentiels;
- potentiel en eaux souterraines;
- dérivations entre sous-bassins;
- coûts des aménagements;
- les modes d'opération des ouvrages hydrauliques, les taux d'intérêts, la durée des aménagements, la probabilité d'occurrence des périodes critiques (risk levels) sont des pré-requis.

RESULTATS OBTENUS

Pour chacun des sous-bassins, le modèle fournit les résultats suivants:

- emmagasinement sur les tributaires (upstream storage yield);
- emmagasinement sur la rivière principale;
- eaux souterraines (quantité);
- eaux souterraines allouées à des fins définies;
- eaux souterraines disponibles à d'autres fins;
- adduction d'eau (withdrawals from stream);
- débit inter-bassins;
- débit entrant dans le sous-bassin;
- débit sortant du sous-bassin;
- dérivations.

CONTRAINTES

- Limites supérieures pour eaux souterraines du:
 - . volume d'emmagasinement sur les tributaires;
 - . volume d'emmagasinement sur la rivière principale;
- débit disponible dans le bassin;
- débit minimum à garantir à la sortie du sous-bassin et dans le sous-bassin;
- principe de conservation (bilan) pour chaque sous-bassin;
- contraintes garantissant l'alimentation en eau potable et non potable pour d'autres usages;

- égalité des transferts d'eau;
- limite supérieure pour la capacité des équipements de désalement;
- limite inférieure pour la capacité des canaux;
- relation entre l'utilisation des eaux souterraines et de surface du sous-bassin en fixant une limite supérieure aux quantités d'eau de surface disponible;
- contraintes sur la circulation d'eau entre les bassins (principe de conservation).

FONCTION OBJECTIF

- Minimiser le coût annuel.

Modèle MOSES (Model for Operating a Strategy Evolution System)

LOTTI, C. et GRASSETTI, B. "Une application de la programmation linéaire pour le plan d'un aménagement hydraulique intégré". Société Hydrotechnique de France, XI^e journée de l'hydraulique, Paris, Question VI, Rapport 8, pp. 1-9, (1970).

BUT

Définir une stratégie d'aménagement (Plan d'aménagement intégré).

TECHNIQUE: Programmation linéaire

DONNEES NECESSAIRES ET RESULTATS OBTENUS

Localisation et dimensionnement, dans leurs grandes lignes, des ouvrages existants, lors de l'utilisation du modèle. La réponse du modèle sera la dimension optimale des divers ouvrages, en relation avec certains "inputs" hydrologiques et certains besoins se référant à l'année de gestion. L'utilisation du modèle est donc annuelle mais elle est répétée sur une période de plusieurs années afin d'étudier l'espace de temps pour lequel on veut établir la stratégie.

Le modèle utilise des données mensuelles et les résultats obtenus sont:

- dimensionnement optimal des réservoirs et volume stocké au début de chaque mois, en tenant compte de la disponibilité d'eau considérée et, si c'est le cas, du contrôle des crues;
- production mensuelle d'énergie électrique pour chaque ouvrage;
- dimension optimale des ouvrages d'irrigation;
- probabilité de respect des contraintes minimales pour l'adduction d'eau, la navigation et le contrôle qualitatif;
- valeur nette du bénéfice global annuel en ayant supposé existants les ouvrages considérés.

CONTRAINTES

- contraintes de disponibilité:
 - . eau de surface + eau souterraine > besoins;
 - . débit en rivière > débit minimum pour navigation;
 - . débit en rivière > débit minimum pour la qualité de l'eau.

- contraintes de besoin:
 - . besoin en irrigation;
 - . besoins urbains et industriels.

- contraintes de capacité:
 - . volume d'emménagement minimal (tient compte du volume nécessaire pour le laminage de crue);
 - . volume d'emménagement maximal;
 - . production électrique minimale;
 - . production électrique maximale;
 - . surface d'irrigation minimale;
 - . surface d'irrigation maximale (potentiel).

FONCTIONS OBJECTIFS

$$\text{Max } p = \sum_{i=1}^n b_i - \sum_{j=1}^m c_j$$

où:

b_i = les bénéfices nets unitaires des n utilisations;

c_j = les coûts unitaires des m interventions prévues.

Modèle de Hall

HALL, W.A. and DRACUP, J.A. (1970). "Water Resources Systems Engineering". McGraw-Hill Inc., N.Y., pp. 1-372.

BUTS

- 1) Garantir un débit suffisant pour l'alimentation en eau municipale, industrielle, d'irrigation, ainsi que pour les pertes, la récréation et les autres utilisations;
- 2) améliorer la navigation;
- 3) améliorer ou maintenir une qualité acceptable;
- 4) contrôler les inondations;
- 5) optimiser la production hydro-électrique.

TECHNIQUE

Ce modèle global consiste en une utilisation combinée (multi-level optimization) de la programmation linéaire, dans un premier temps, pour maximiser les revenus provenant du système pour chacune des 120 périodes analysées, et, par la suite, de la programmation dynamique, appliquée à chaque réservoir séparément, pour en déterminer l'opération optimale.

DONNEES D'ENTREE

Ces techniques sont utilisées avec des données hydrologiques mensuelles, mesurées durant une période d'étiage sévère de 10 ans (1925-1934). Ces modèles exigent également comme données d'entrée les limites de capacité des réservoirs, conduites, centrales, la localisation des aménagements et des points d'utilisation, les besoins en eau des utilisateurs, le prix de l'énergie hydro-électrique et de l'eau disponible suivant les saisons ainsi que les coûts.

RESULTATS OBTENUS

- Production hydro-électrique à chaque période;
- quantité d'eau fournie aux utilisateurs;
- les lâchures à chaque réservoir.

CONTRAINTES

- Débit minimal pour la vie aquatique et la navigation;
- débit maximal possible avant inondation;
- évaporation.

FONCTION OBJECTIF

Maximiser les revenus pour chacune des 120 périodes.

Modèle de Marks

MARKS, D.H., COHON, J.L., FACET, T., HAON, A. and KOPEL, J. "Screening models for investment in regional water resources development". Water Research and hydrodynamics Division, M.I.T., Cambridge, Massachusetts, 33 p. (1971).

BUT

Analyser un grand nombre de possibilités de développement du bassin de la Rio-Colorado.

Les hypothèses suivantes ont été faites au départ:

1. Il est déterministique, des valeurs moyennes de débit étant utilisées;
2. Le modèle est appliqué sur une base annuelle;
3. Le pas de temps considéré est de 6 mois (2 périodes);
4. Seulement deux utilisations sont considérées: irrigation et hydro-électricité.

TECHNIQUE

Ce modèle utilise la technique de programmation linéaire.

DONNEES NECESSAIRES

- La charge à une centrale donnée durant une saison;
- dérivation maximale à un site pour une année;
- débit moyen à un site durant une saison;
- puissance hydro-électrique;
- adduction maximale à un site;
- superficie des terres irriguées à un site durant une saison;
- superficie des terres irriguées à un site durant toute l'année;
- volume d'emmagasinement maximal;
- coûts unitaires (emmagasinement, centrale, canaux);
- revenus unitaires (irrigation et hydro-électricité).

RESULTATS OBTENUS

- Les lâchures;
- dérivation et adduction d'eau;
- débit moyen dérivé dans une saison;
- volume d'eau pour l'irrigation à un site;
- énergie hydro-électrique produite à un site durant une saison;
- volume d'emmagasinement à un site;
- bénéfices nets.

CONTRAINTES

- Continuité:
 - . maintenue en rivière (bilan);
 - . maintenue dans les réservoirs (bilan du réservoir);
 - . maintenue sur une base annuelle (bilan annuel).
- hydro-électricité:
 - . production < potentiel;
 - . capacité de la centrale > production.
- irrigation:
 - . bilan des dérivations (conservation);
 - . bilan de production;
 - . superficies maximales irriguables;
 - . bilan de drainage (return flow).

FONCTION OBJECTIF

Maximisation des revenus nets (Net National Income Benefit).

Modèle de Viessman

VISSMAN, W. Jr., LEWIS, G.L. et al., " A screening model for water resource planning". Water Res. Bull., 11 (2), 245-255, (1975).

BUT

Le modèle a pour but de permettre le choix (screening) de la meilleure solution répondant à des objectifs de planification donnés. Chaque alternative est évaluée par optimisation d'une fonction objectif (minimisation des coûts ou maximisation des bénéfices nets associés à divers usages de l'eau) soumise à des contraintes physiques ou institutionnelles. Le modèle permet d'indiquer si un ouvrage doit ou non être construit et effectuer une répartition des capacités de stockage de l'ensemble du système.

TECHNIQUE

L'optimisation est effectuée par programmation linéaire. Certaines fonctions (telles que relation coût-stockage...) non linéaires sont linéarisées par segments.

EQUATIONS DE CONTRAINTES

Les équations de contraintes relient les variables de décision (niveau requis d'un réservoir, demande pour un usage donné, etc...) aux usages disponibles, en tenant compte de l'hydrologie du système. Ces contraintes sont établies pour les différents usages (récréation, irrigation, contrôle des inondations,...).

DONNEES D'ENTREE

Chaque alternative étudiée avec le modèle de sélection nécessite, pour l'établissement des équations de contraintes, la connaissance de données hydrologiques qui sont obtenues à partir d'un modèle de simulation de débit et/ou de précipitation.

PARTICULARITES

- Pour les usages auxquels on ne peut associer de fonction coût ou bénéfice, les contraintes indiquent la répartition minimum acceptable (annuelle ou saisonnière) des quantités d'eau;
- les usages municipaux et industriels assurés par les réserves souterraines ne sont pas incorporés dans le modèle.

Modèle de Shih et De Filippi

SHIH, C.S. and De FILIPPI, J.A. "Optimization models for river basin water quality management and waste treatment plant design". American Water Resources Conference Proceedings Series No. 6: 754-779, (1968).

TECHNIQUE

Les deux modèles utilisent la programmation dynamique, basée sur le principe d'optimalité de Bellman.

CRITERE D'OPTIMISATION

Minimiser les coûts de traitement (prises d'eau et eaux résiduaires) et maximiser les bénéfices.

DESCRIPTION

Les fonctions peuvent être non linéaires. Les modèles s'appliquent pour des polluants conservatifs ou non conservatifs. Le modèle de traitement des eaux vise à identifier la combinaison optimum et les efficacités des usines qui mènent à un coût minimum tout en rencontrant les objectifs.

DONNEES D'ENTREE

Fonctions coût-capacité de traitement, efficacité de traitement; normes pour l'eau de la rivière; localisation, débit et caractéristiques physico-chimiques des rejets bruts et des prises d'eau brute; débits en rivière; etc...

Modèle de Revelle

REVELLE, C.S., LOUCKS, D.P. et al. "Linear programming applied to water quality management". Wat. Res. Res, 4 (1): 1-9, (1968).

BUT

Sélectionner les efficacités de traitement de DBO qui permettent de rencontrer les normes d'OD en rivière à un coût minimum.

TECHNIQUE: Programmation linéaire

DESCRIPTION

Basé sur l'équation de Streeter-Phelps. Ne tient pas compte (mais le pourrait éventuellement) des tributaires. Pas de pertes d'eau (volume retiré = volume rejeté).

DONNEES D'ENTREE

Temps de parcours; constantes de biooxydation et coefficients de réaération; coûts de traitement de la DBO; déficits en oxygène des eaux résiduaires; déficit en oxygène permissible dans la rivière; DBO dans les effluents avant traitement; débits dans les effluents et en rivière; coefficients de sédimentation-érosion dans les tronçons; demande benthique en oxygène et production photosynthétique d'oxygène dans les tronçons.

DONNEES DE SORTIE

Efficacités de traitement et coûts; informations sur le changement de coût total en fonction de la norme fixée pour l'OD dans les tronçons.

CONTRAINTES

Rencontrer les normes d'OD dans la rivière. L'efficacité du traitement de la DBO doit se situer entre 35 et 90%.

Modèle SIMYLD-II

TEXAS WATER DEVELOPMENT BOARD, "Analytical techniques for planning complex water resource systems", Texas Water Development Board, Report No 183, 22-23, (1974).

BUTS

- 1) Simulation d'un système soumis à des séquences spécifiques de demande et de conditions météorologiques;
- 2) détermination du débit garanti par un réservoir intégré dans un système à plusieurs réservoirs.

TECHNIQUE

Représentation du système physique en un réseau de noeuds et de mailles, que l'on traite ensuite comme un problème d'écoulement. Ce problème est résolu en utilisant la technique connue comme l'algorithme "out-of-kilter". Cet algorithme permet d'optimiser le transfert de l'eau dans le réseau, en utilisant comme base les coûts de transfert.

DONNEES NECESSAIRES

Situations et descriptions des réservoirs, des sites, des besoins, des tronçons de la rivière, des canaux, des conduites.

Connaissance des capacités initiales des réservoirs, des courbes surface-capacité, des niveaux minimaux et maximaux, des débits d'entrée aux réservoirs, des taux d'évaporation, et des coefficients de demande mensuelle.

RESULTATS OBTENUS

- 1) L'opération optimale, dans le temps, du système d'eau de surface incluant les stockages dans les réservoirs, les déversements, les transferts;
- 2) les demandes satisfaites ou non satisfaites pendant le période de simulation.

CONTRAINTES

- Satisfaction des restrictions de capacité sur les arcs;
- conservation des conditions d'écoulement à chaque noeud.

Modèle SIM-IV

TEXAS WATER DEVELOPMENT BOARD. "Analytical techniques for planning complex water resource systems", Texas Water Development Board, Report No. 183, 23-27, (1974).

BUT

Simulation d'un système complexe de stockage et de transfert d'eaux de surface. La fonction de ce modèle est de satisfaire la demande et les besoins de stockage tout en minimisant les coûts de transport de l'eau à l'intérieur du système.

TECHNIQUE

Similaire à SIMYLD-II, sauf que ce modèle minimise les coûts d'opération pour un réseau ayant une capacité donnée.

DONNEES D'ENTREE

Mêmes que SIMYLD-II.

RESULTATS

- a) La capacité optimale de tous les éléments (réservoirs, canaux, etc...);
- b) L'opération optimale de ce système pour minimiser les coûts et les déficits en eau;
- c) Les coûts de capital, d'opération, de maintenance de chaque élément pour la période d'analyse et pour la séquence hydrologique et de demandes.

N.B. : La solution est fonction de la séquence hydrologique.

ANNEXE A-2

Descriptions de modèles de simulation

Modèle CEQUEAU

GIRARD, G., CHARBONNEAU, R. et al. "Modèle hydrophysiographique". Symposium international sur les techniques de modèles mathématiques appliqués aux systèmes de ressources en eau, Proceedings, Vol. 1: 190-204, (Environment Canada, Ottawa, Canada), (1972).

Ce modèle, d'abord conçu comme un instrument de recherche, devient graduellement un outil d'analyse et de gestion de la ressource-eau.

Basé sur un double morcellement (carreaux entiers et partiels) des bassins étudiés, le modèle est, de ce fait, fortement automatisé. Cette caractéristique bien distinctive du modèle CEQUEAU facilite, de plus, la prise en compte de toute modification naturelle ou artificielle des bassins versants et de leur réseau de drainage.

BUTS

- 1) Générer, fournir, prolonger des séries de données hydrométriques;
- 2) fournir les débits en un point quelconque du bassin versant;
- 3) analyser l'influence, sur l'écoulement en rivière, de modification des caractéristiques physiques du bassin;
- 4) analyser l'influence de l'implantation d'ouvrages sur le réseau de drainage (déversoirs, barrages);
- 5) fournir des indices de l'état de saturation des bassins et de la recharge des nappes;
- 6) générer des données pour la conception (design) de travaux hydro-électriques;
- 7) faire la prévision des débits (étape prochaine).

DONNEES D'ENTREE

- Hydrométriques pour fins de calage et de vérification;
- températures (max. et min.) et précipitations (pluie, neige);

- caractéristiques du bassin:
 - . altitude des carreaux entiers;
 - . couverture végétale;
 - . lacs et marais;
 - . sens d'écoulement des carreaux partiels;
- informations concernant les barrages, déversoirs, prises d'eau, etc...

DONNEES DE SORTIE

- Les débits naturels ou influencés des points quelconques du bassin;
- l'état de saturation y compris l'épaisseur du manteau neigeux;
- la recharge des nappes;
- les cotes aux emplacements des réservoirs ou lacs;
- cotes des plans d'eau, des zones d'inondation pour les probabilités désirées.

Modèle SSARR

U.S. Army Engineer Division, North Pacific Corps of Engineers. "Runoff evaluation and streamflow simulation by computer". U.S. Army Engineer Division, North Pacific Corps of Engineers, U.S. Army, Portland, Oregon, (1971).

Ce modèle a d'abord été conçu pour utilisation à des fins de régularisation et de prévision des débits d'une rivière.

BUTS

On l'utilise pour:

- le prolongement de séries de données hydrométriques;
- des études de régularisation des cours d'eau;
- des études hydrologiques pour déterminer les caractéristiques de l'écoulement en un point quelconque;
- la prévision des débits utiles dans les problèmes d'hydro-électricité, d'irrigation, de contrôle d'inondations, etc...

DONNEES D'ENTREE

- Données hydrométriques pour fins de calage et de vérification;
- données de température et précipitations;
- caractéristiques du bassin:
 - . altitude des parcelles;
 - . couvert végétal;
- données d'évapotranspiration potentielle;
- section en travers aux stations de jaugeage;
- information concernant les barrages.

DONNEES DE SORTIE

- Les débits:
- l'état de saturation y compris l'épaisseur du manteau neigeux.

Modèle USDAHL-70

HOLTAN, H.N. and LOPEZ, N.C. "USDAHL-70: Model of watershed hydrology". Agriculture Res. Service, U.S. Depart. of Agriculture, Technical Bulletin No 411, 57 p. (1971).

Ce modèle est orienté vers la solution de problèmes concernant les bassins agricoles. Les auteurs ont concentré leurs efforts sur l'élaboration d'une fonction de production aussi près que possible de la réalité; cette option, nécessaire à l'agriculture, rend le modèle peu utilisable à d'autres fins.

BUTS

- 1) Fournir les débits à différents points du bassin;
- 2) calculer l'état de saturation et les mouvements de l'eau libre dans chacune des zones (données utiles aux problèmes de drainage);
- 3) calculer la recharge des nappes.

DONNEES D'ENTREE

- Données hydrométriques pour fin de calage et de vérification du modèle;
- données météorologiques de température et de précipitations;
- l'évapotranspiration potentielle;
- type d'utilisation du sol et état de maturité de la végétation;
- caractéristiques des sols;
 - . altitude;
 - . capacité d'infiltration et ses variations en fonction de la maturité de la végétation;
 - . capacité d'infiltration à saturation;
 - . coefficient de rugosité au ruissellement de surface.

DONNEES DE SORTIE

L'impression journalière des résultats inclut:

- les débits;
- les pertes par infiltration en profondeur;
- l'état de saturation du profil pour chaque unité de surface (zone);
- l'évapotranspiration réelle.

Remarque: Ce modèle se prête beaucoup mieux aux simulations sur des bassins de surface inférieures à 100 mi².

Modèle de Grantham

GRANTHAM, G.R. et al. "Water quality simulation model". Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, 97 (SA5): 569-585, (1971).

BUTS

- 1) Fournir des données utiles à la gestion ou à une optimisation d'aménagement d'un bassin;
- 2) déterminer où et quand on ne respecte pas un niveau minimum d'oxygène dissous.

DESCRIPTION

Le modèle simule, sur une base hebdomadaire, l'hydrologie des eaux de surface d'un bassin ramifié ainsi que les concentrations d'oxygène dissous. Il tient compte des structures d'emménagement ou de régulation, des déversements d'eaux usées, des dérivations, des tributaires. Développé pour l'OD, il pourrait être utilisé pour d'autres paramètres de qualité, conservatifs ou non.

DONNEES D'ENTREE

Données de jaugeage générées par un modèle; localisation des tronçons, surface et longueur des tributaires; localisation des jauges et surfaces amont; constantes hydrauliques ou données sur les propriétés hydrauliques des tronçons; types de réservoirs, constantes de surface et de volume, paramètres pour la vidange et la dérivation; constantes pour l'évaporation et pour l'équation de la température; DBO initiale et déficit initial en OD pour les réservoirs; constante de vitesse de réaération, facteur pour la perte de DBO dans un réservoir, termes d'erreur pour la désoxygénation et pour la réaération; valeur minimum pour l'OD; débit, DBO, OD, constante de désoxygénation et localisation des déversements d'eaux usées.

DONNEES DE SORTIE

Matrice de transformation des données aux points jaugés; séquence des calculs et données calculées dans chaque tronçon; débits influencés ou non influencés; dérivations, pertes par évaporation, température; constantes de vitesse de désoxygénation et de réaération; vitesses et temps de parcours dans les tronçons; charge des eaux résiduaires; DBO et déficit en OD dans et à la sortie des tronçons; endroits où on ne respecte pas le niveau minimum d'OD.

Modèle d'apports

COUILLARD, D., CLUIS, D. DUROCHER, H. "Etude des apports des substances nutritives (N,P) dans les bassins versants des rivières Yamaska et Saint-François. Rapport d'avancement des travaux". INRS-Eau, Rapport Scientifique No 53, 19 p. (1975).

BUT

- évaluer l'influence des diverses utilisations du sol (artificielles ou naturelles) sur la qualité de l'eau;
- prévoir l'influence de nouvelles installations sur la qualité de l'eau.

TECHNIQUE

Dans un premier temps, on découpe le bassin versant en carreaux entiers de 100 km², qu'on subdivise en carreaux partiels qui respectent le schéma d'écoulement des eaux. Puis, on simule le cheminement des différentes substances chimiques (N et P) du point où elles sont produites jusqu'au cours d'eau. Ainsi, deux types de coefficients servent à caler les charges calculées par le modèle et les charges mesurées (concentration mesurée x débit): un premier coefficient détermine la fraction des apports potentiels des sources diffuses qui se rendra au cours d'eau; un deuxième coefficient tiendra compte des pertes qui auront lieu lors du trajet dans les cours d'eau (assimilation par les plantes, sédimentation, etc). Essentiellement, il s'agit de faire un bilan des substances chimiques pour chaque parcelle du bassin versant.

DONNEES D'ENTREE (Input)

- Données d'utilisation du sol (populations humaines, populations animales, agricultures, forêts, industries, schéma de drainage, etc).
- Données de production de substances chimiques de chaque utilisation du sol.

- Données de qualité mesurées en rivière (concentration des substances étudiées).
- Données de quantité (débit mesuré ou évalué aux stations de qualité).
- * Données relatives aux hypothèses de changement d'utilisation du sol sur le bassin.

DONNEES DE SORTIE (Output)

- Bilan des substances étudiées aux différentes stations de qualité du bassin.
- Coefficients de perte ou de transfert et leurs variations spatio-temporelles.
- Apports des différentes utilisations du sol pour les différentes substances étudiées.
- * Concentrations prévues aux différents endroits et à des périodes différentes selon les diverses hypothèses de changement dans le bassin.

Modèle DOSAG-1 et QUAL-1

TEXAS WATER DEVELOPMENT BOARD. "Analytical techniques for planning complex water resource systems". Texas Water Development Board, Report No. 183, 36-38, (1974).

BUT

- Simuler plusieurs paramètres physico-chimiques dans des cours d'eau ou réservoirs.

DOSAG-1

C'est un modèle basé sur une équation du type Streeter-Phelps, qui permet de simuler les moyennes mensuelles de DBO pour le carbone ainsi que pour l'azote. C'est un modèle utilisé pour sélectionner les alternatives intéressantes.

QUAL-1

C'est un modèle qui opère par différences finies. Il comprend trois modèles de qualité interreliés qui permettent une simulation horaire de la température, des DBO pour le carbone et l'azote, de l'oxygène dissous et de trois paramètres de minéralisation conservatifs. Le modèle accepte des entrées multiples d'eaux usées, des prises d'eau et des apports en ruissellement. Le modèle peut servir à évaluer les inputs d'eaux usées.

Les deux modèles peuvent servir à calculer les niveaux de traitement à effectuer de même que l'augmentation de débit nécessaire pour maintenir un niveau d'oxygène dissous spécifié, n'importe où dans le système.

Les données typiques d'entrée pour les modèles comprennent:

- a) Des données géométriques-hydrauliques
 - nombre et longueur des tributaires;
 - longueur des tronçons de la rivière entre les embouchures des tributaires;
 - relations vitesse-débit et niveau-débit pour les tributaires et le cours d'eau principal;
 - débit moyen amont de chaque tributaire durant la période de simulation;
 - coefficient de rugosité de Manning, pour chaque tronçon.

- b) Des données pour la simulation de température
 - latitude, longitude, méridien central et élévation moyenne du bassin;
 - coefficient pour relier l'évaporation à la vitesse du vent;
 - ennuagement, température mesurée aux thermomètres sec et humide, pression barométrique et vitesse du vent.

- c) Des données d'entrées-sorties
 - température et concentration des espèces minérales des eaux usées introduites dans le système;
 - localisation, débit moyen et DBO totale de ces eaux usées;
 - localisation et débit moyen des prises d'eau.

- d) Des données chimiques et biochimiques
 - DBO totale moyenne, OD moyen, température moyenne et concentration des paramètres de minéralisation pour l'amont de chaque tronçon et pour les apports en ruissellement à chaque tronçon.

Pour calibrer le modèle, il est souhaitable que les données prises dans le cours d'eau (DBO, OD, etc...) ou dans les entrées-sorties (qualité et quantité des déversements ou prises d'eau) soient disponibles pour différents débits de la rivière ou pour différentes conditions météorologiques. Les données mesurées dans les entrées-sorties sont utilisées comme "input" au modèle et celui-ci est alors calibré pour reproduire les données mesurées en rivière.

Modèle HSP (Hydrocomp Simulation Programming)

HYDROCOMP INTERNATIONAL INC. "Hydrocomp simulation programming operations manual". Palo Alto, California, 84 p. (1972).

Hydrocomp International Inc. tire des revenus importants des applications de ce modèle; en conséquence, ils ont développé un instrument offrant une gamme importante d'applications.

BUTS

- a) Simulation sur bassins naturels
 - Extension des données hydrométriques;
 - débits en des points non-jaugés;
 - transport de sédiments en rivière (version Negev);
 - évaluation de la recharge des nappes;
 - évaluation de l'état de saturation du sol;
 - évaluation de l'évapotranspiration réelle.
- b) Evaluation des conséquences de l'action de l'homme sur son environnement.
 - Modification des caractéristiques du bassin;
 - modification du réseaux de drainage.
- c) Génération de données pour la conception (design) de travaux hydro-électriques
- d) Gestion d'aménagements hydro-électriques (version HSP/POWER)
- e) Simulation de l'écoulement en milieu urbain
- f) Simulation de l'évolution en rivière de 18 paramètres de qualité (en fonction de l'oxygène dissous)

DONNEES NECESSAIRES

- Données hydrométriques pour fin d'ajustement et vérification
- Données météorologiques
 - Précipitation journalière ou horaire selon le problème;
 - température journalière maximale et minimale;
 - évapotranspiration potentielle
- Données physiographiques
 - Couvert forestier (étendue et densité);
 - capacité de rétention en eau du sol (3 grades);
 - longueur et pente du ruissellement de surface;
 - le coefficient "n" de Manning;
 - altitude des segments.
- Données sur le réseau
 - Largeur des tronçons;
 - profondeur;
 - pente des berges;
 - "n" de Manning dans le lit;
 - "n" de Manning sur les berges;
 - selon l'application, le modèle utilise les données qui concernent le dimensionnement des barrages et déversoirs, les cotes et règles d'opérations, les surfaces urbanisées dans le cas d'un projet d'urbanisation, etc...

RESULTATS OBTENUS

- Les débits en m^3/sec ;

- les niveaux de barrages ou déversoirs;
- états de saturation des sols, recharge des nappes et évapotranspiration réelle;
- qualité de l'eau;
- connaissances sur le transport des sédiments.

Modèle de PISANO

PISANO, W.C. "River basin simulation program". Sanitary Engineer, Division of Technical Control, Federal Water Pollution Control Administration, U.S. Department of the Interior, 85 p. (1968).

BUT

Détermination des conséquences probables, sur les plans quantitatif et qualitatif, de l'application d'un plan d'aménagement d'un bassin, plan comprenant localisation, dimensionnement et consignes d'exploitation des réservoirs, politique de rejets, transferts hors bassin, etc... Les conséquences d'un plan d'aménagement sont abordées sur le seul plan physique, à l'exclusion de toute considération économique.

TECHNIQUE: Echantillonnage de Monte Carlo

DONNEES NECESSAIRES

- Historique des débits;
- localisation géographique des réservoirs, des rejets d'eaux usées, des utilisateurs d'eau;
- comportement des polluants;
- évaporation;
- mesure de l'utilisation de l'eau, des rejets, des volumes de réservoirs;
- traitement des eaux usées et consignes d'exploitation des barrages.

On peut effectuer un calage dans les conditions initiales et simuler différents plans d'aménagement pour un même bassin.

RESULTATS OBTENUS

Le modèle fournit, sous forme statistique, des résultats portant sur:

- la concentration de polluants à différentes stations spécifiées;
- le niveau de remplissage des réservoirs;
- les débits.

Modèle Simulation - Quantité

PRICKETT, T.A. and LONNGUIST, C.G. "Selected Digital Computer Techniques for Ground Water Resource Evaluation". Illinois State Water Survey, Urbana Illinois Water Survey Bulletin 55, 62 p., 1971.

BUT

- Simuler le comportement hydraulique de la nappe

TECHNIQUE

- Différence finie

DONNEES D'ENTREE

Le modèle requiert trois types de données pour chaque élément:

- a) Géométrique: coordonnées du centre de gravité;
- b) Caractéristiques de l'aquifère: perméabilité, capacité de stockage, élévation des couches;
- c) Hydrologique: niveau initial de la nappe, pompage et taux de recharge pour chaque période de temps.

RESULTATS

Elévation de la nappe ou niveau piézométrique sous différents types de recharge ou de vidange.

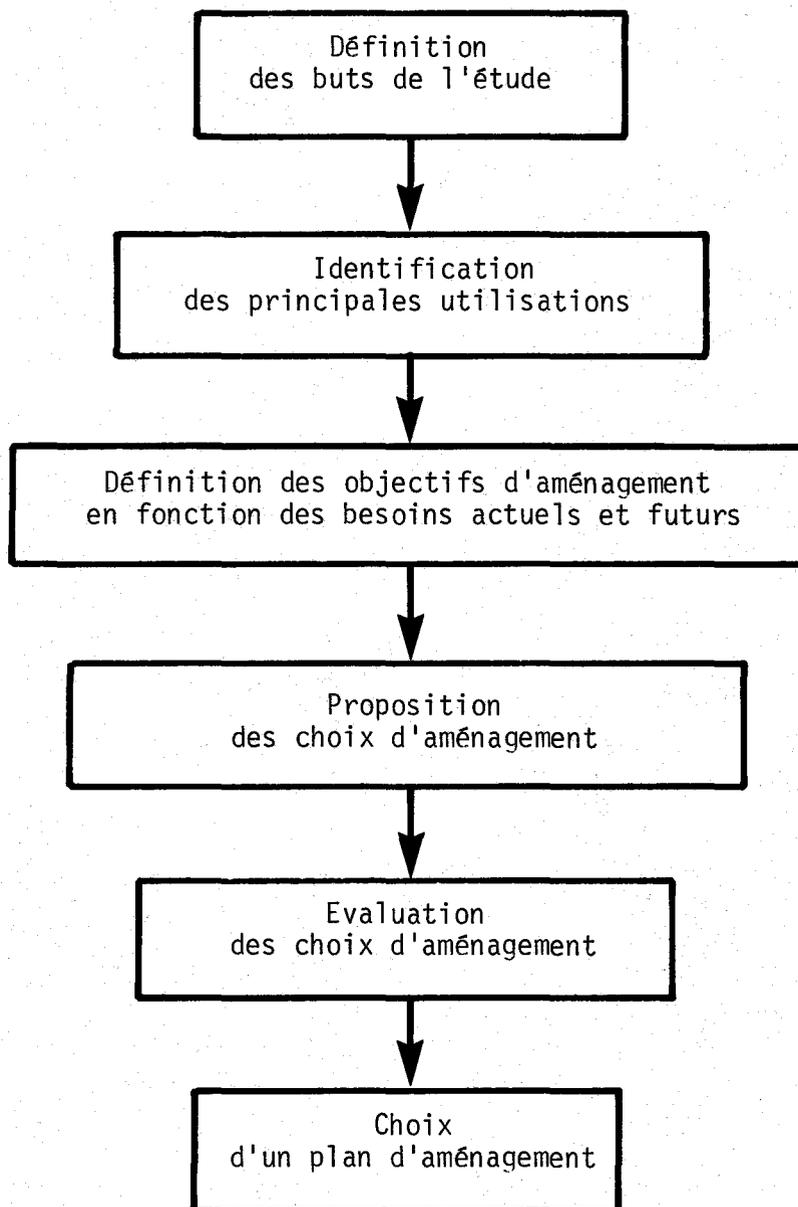
ANNEXE A-3

Combinaisons de modèles

PROCEDURE D'AMENAGEMENT

Extrait de: O'RIORDAN, J. (1972).

An approach to evaluation in multiple objective river basin planning. - An analysis of selected water quantity alternatives in the Okanagan Valley, B.C., Canada. Symposium international sur la planification des ressources hydrauliques. Vol. III. Ponencias final paper exposes. Secretaria de Recursos Hydraulicos, Mexico, 50 p.



ETUDES ET MODELES REQUIS POUR LA GESTION DE L'EAU

Extrait de: CHATURVEDI, M.C. (1973).
Planning methodology and first stage model of a large river basin. Indian Institute of technology, International Association for Hydraulic Research, 15e Congrès, Istambul, Vol. 4: 165-174.

Etudes Socio-EconomiquesEtudes de la ressourceEtudes générales et reliées à la planification de l'eauAnalyse de systèmes appliqués à l'eauAnalyse du système physique

1. Stratégie de développement
2. Ressources disponibles
3. Evaluation sociale des ressources de base
4. Critères de choix des projets

1. Allocation optimale de l'eau au niveau de la région
2. Développement optimal compte tenu des contraintes économiques et physiques
3. Evaluation et choix des projets

1. Description des phénomènes physiques
2. Analyse et simulation des phénomènes physiques

OUTILS:

1. Modèle d'allocation des ressources par secteurs
2. Etudes de la population
3. Modèle de la demande de nourriture
4. Modèle de projection agricole

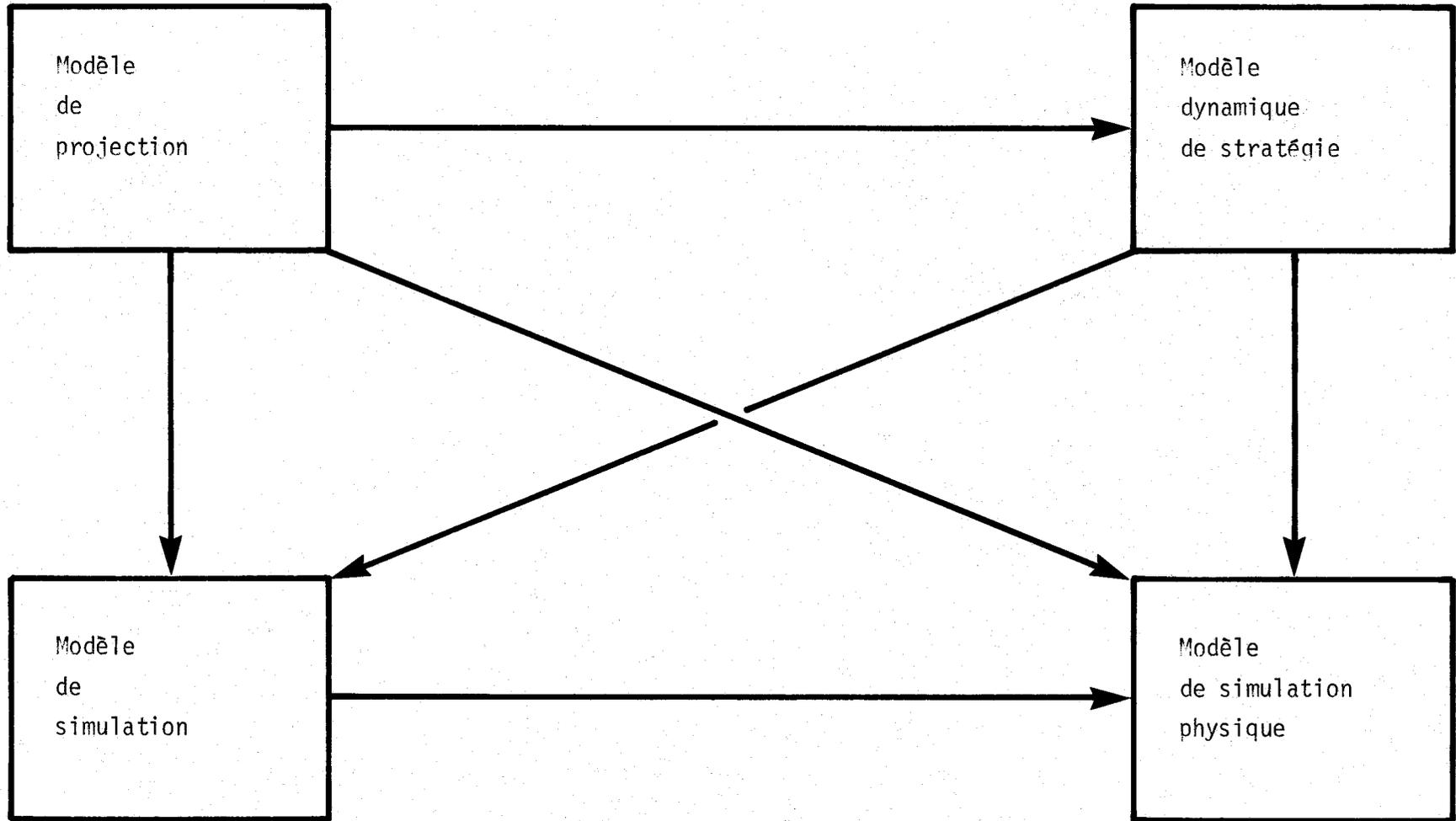
1. Modèle de sélection préliminaire
2. Modèle analytique déterministique
3. Modèle analytique stochastique
4. Modèle de simulation du système
5. Simulation des activités agricoles
6. Evaluation des fonctions de déficits et critères de risque
7. Modèle pour la production hydro-électrique

1. Modèle hydrologique
2. Modèle de recherche hydro-géologique
3. Modèle de simulation des eaux souterraines
4. Modèle de recharge des aquifères
5. Modèle de simulation de la qualité de l'eau

INTERACTION ENTRE LES DIFFERENTS
TYPES DE MODELES

Extrait de: VIESSMAN, W., Jr. et al. (1971).
Optimal analysis of water resources systems. University
of Nebraska, Nebraska Water Resources Research Institute,
269 p.

Interaction entre les différents modèles



PROCEDURE DE PLANIFICATION D'UN SYSTEME D'EAU

Extrait de: DE LUCIA, R.J. and HARRINGTON, J.J. (1972).
Systems analysis in water resources planning: some
perspectives. International symposium on modelling
techniques in water resources systems. Proceedings,
Vol. 3, p. 410-422. (Environment Canada, Ottawa, Canada).

Une utilisation rationnelle de l'analyse de système pour la planification de l'eau comprend généralement différents modèles pour répondre à différentes questions. Par exemple, il est souvent utile pour certains modèles d'analyser l'opération du système en assumant les capacités comme des variables exogènes prédéterminées alors que d'autres modèles détermineront les variables de capacités du système en considérant un mode d'opération défini d'avance. L'analyse systématique est itérative et continue; c'est pourquoi les modèles doivent être améliorées jusqu'à l'obtention de résultats satisfaisants.

Avant de décrire les différents outils indiqués sur le schéma ci-joint, il y a lieu de mentionner que les points d'utilisation sont considérés séparément puisqu'ils sont souvent analysés comme un sous-système à l'aide des modèles mathématiques développés pour l'ensemble du bassin. Les autres secteurs de l'économie sont aussi exclus du système analysé sauf qu'un processus de rétroaction est prévu.

La première étape du processus de planification, après que des données aient été compilées, consiste à faire une sélection préliminaire des aménagements habituellement effectués par une simple analyse de l'adéquation besoins-ressources.

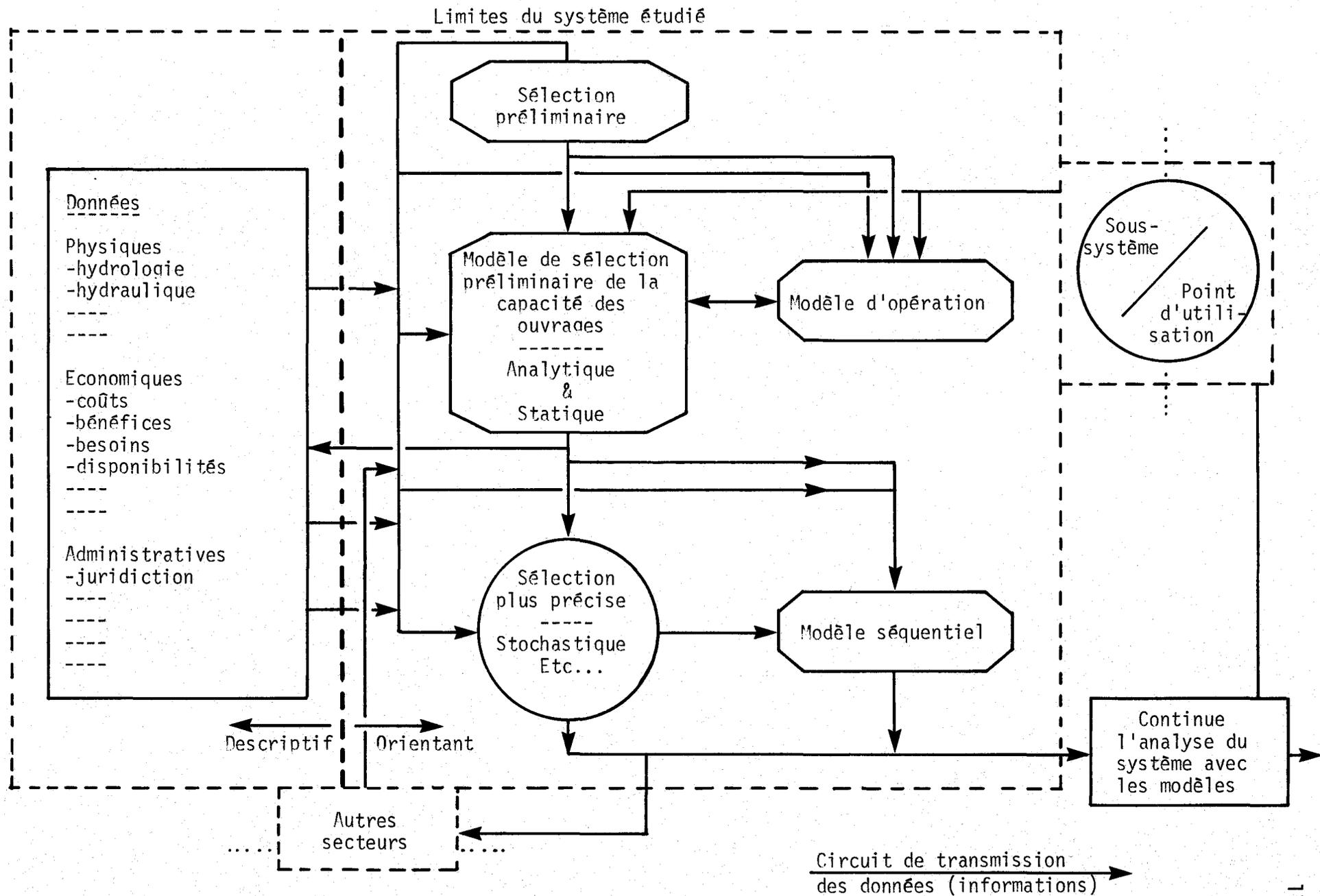
Dans un deuxième temps, un modèle de sélection préliminaire est utilisé pour raffiner l'analyse du système. C'est généralement un modèle analytique et statique (le temps n'est pas considéré) qui détermine les meilleures alternatives d'aménagements, compte tenu des simplifications du système.

A l'étape suivante, les modèles de simulation sont utilisés pour finaliser le choix des aménagements. Ces outils permettent d'analyser des fonctions non linéaires et les variables stochastiques représentent mieux le système réel. L'inconvénient majeur de la simulation est dû au fait qu'elle permet d'analyser une série de variables à la fois ce qui implique souvent un grand nombre d'essais pour obtenir une solution optimale. C'est pourquoi la tendance actuelle est à l'utilisation de technique de recherche (research technique) d'échantillonnage combiné avec les modèles de simulation

afin d'améliorer l'efficacité de la méthode d'analyse.

Les modèles d'opération et de "capacités" sont utilisés dans un processus d'itération, les solutions de l'un fournissant les données d'entrée à l'autre modèle. Ces modèles généralement de type statique peuvent être utilisés pour analyser le système à différent horizon (dans le temps). Les modèles séquentiels, dynamiques par nature, tirent leurs données autant des solutions provenant du modèle de sélection préliminaire que des simulations du système.

Le processus de décision est itératif. Les modèles permettent de modifier les variables du système et d'en faire l'analyse afin de trouver le choix des aménagements qui répondra aux désirs du décideur.

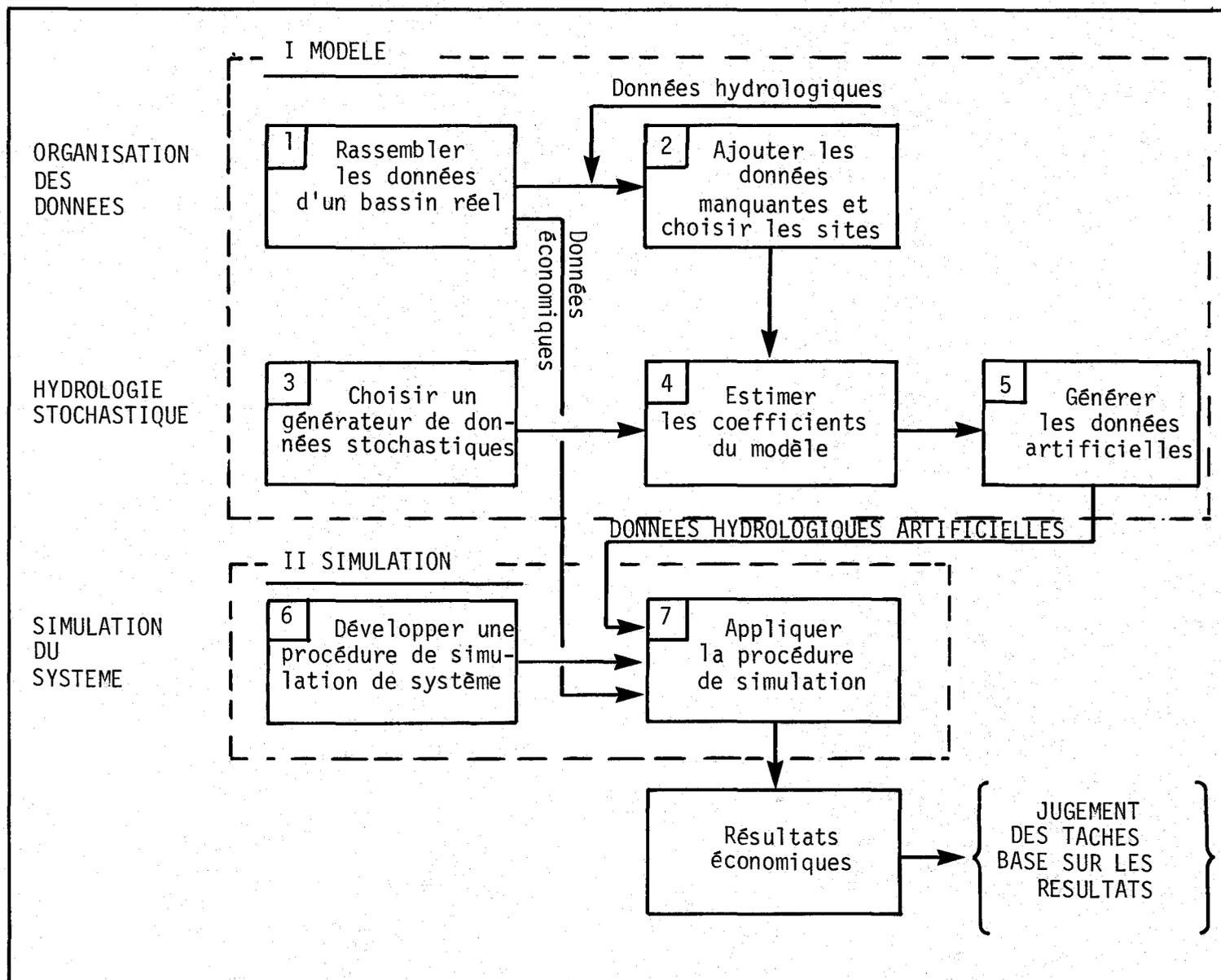


Schématisation d'une procédure de planification d'un système eau

MODELE DE PLANIFICATION

Extrait de: DELISLE, A. (1974).

Gestion de l'Eau: optimisation technique et socio-politique de l'utilisation de la ressource eau d'un bassin.
Thèse de Maîtrise, INRS-Eau, Université du Québec, 149 p.



Modèle de planification

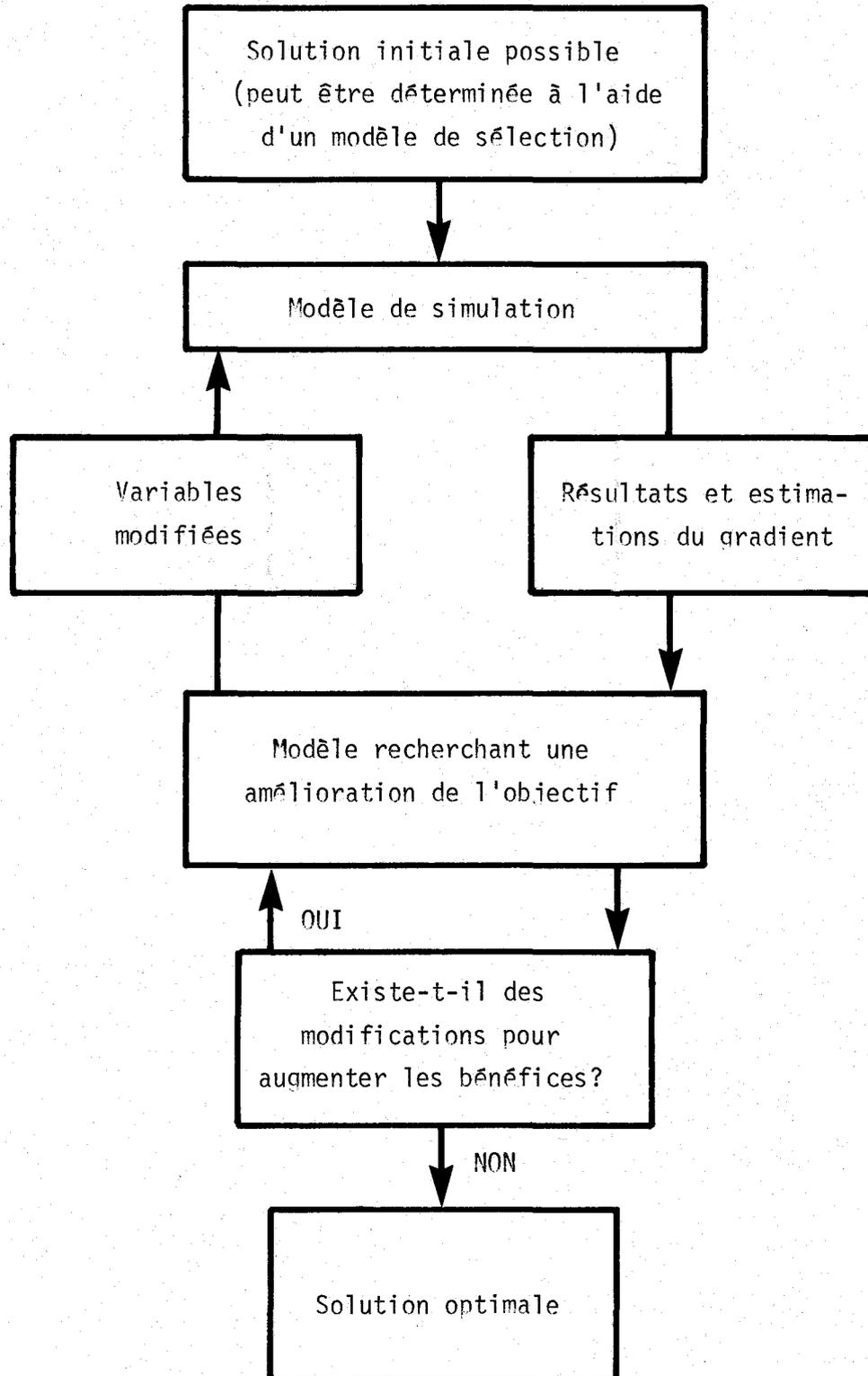
Extrait de: SCHAAKE, J.C. Jr., FACET, T.B. and LEYTAN, K.M. (1974).
Systematic approach to water resources plan formulation.
M.I.T., Ralph M. Parsons Laboratory for Water Resources
and Hydrodynamics, Report No. 187, 268 p.

Note explicative

L'application de la programmation linéaire avec des données déterministiques permet tout au plus de faire un choix préliminaire des aménagements qui devront être analysés plus en détail par la suite. McBean et Schaake (1973) ont développé un modèle de simulation qui non seulement traite des fonctions non linéaires et utilise les données stochastiques mais évalue les bénéfices marginaux dus à de faibles changements des valeurs des variables de décision. L'évaluation de la valeur marginale constitue une estimation du gradient partiel de la fonction objectif. Il indique le changement de la variable de décision qui conduirait à un projet amélioré en combinant le modèle de recherche d'une meilleure solution (search model) avec un modèle de simulation qui fournit une réponse aux inputs et une estimation du gradient; il est donc possible d'optimiser un système non linéaire comprenant des données stochastiques.

La procédure pourrait être résumée comme suit:

- 1) Plan d'aménagement initial (Initial solution);
- 2) simuler, pour un nombre de périodes données, le comportement hydrologique du bassin. Estimer la meilleure direction basée sur les conditions physiques et économiques, pour orienter la recherche d'une solution améliorée;
- 3) la direction de la recherche étant fixée, elle a le pas pour rechercher une meilleure solution à l'aide d'un modèle de sélection. Si une amélioration est possible, les nouvelles valeurs des variables sont utilisées pour une simulation supplémentaire.



PROCEDURES D'AMENAGEMENT

Extrait de: Texas Water Development Board, (1973).
Stochastic optimisation and simulation techniques
for management of regional water resource system,
a completion report. Report no. 131, 129 p.

PROJET 1

But

Développer des techniques d'optimisation et de simulation déterministique afin de déterminer les aménagements optimaux (coût minimal), le système et leur mode d'opération afin qu'ils répondent à des besoins définis pour des conditions hydrologiques données.

La procédure générale utilisée dans le projet 1 comprend 4 phases.

Phase I : Dimensionnement des ouvrages et mode d'opération des barrages-réservoirs

Les inputs hydrologiques étant donné, les besoins en eau et la configuration préliminaire du système global étant connus, une série de modalités d'opération des barrages-réservoirs est établie grâce au modèle d'allocation (Allocation Program).

Phase II : Sélection préliminaire (Initial Screening)

Les modalités d'opération étant connues, et la configuration du système simplifiée en vue d'un modèle d'optimisation, des cédules de réalisation (choisies au hasard) sont étudiées pour déterminer des solutions faisables et leurs coûts. Les meilleures solutions sont analysées en modifiant l'échéancier de réalisation des ouvrages prévus afin d'obtenir un nombre limité de cédules quasi optimales qui seront étudiées plus en détail à la phase III.

Phase III : Deuxième sélection (Secondary Screening)

Les cédules de réalisation déterminées à la phase précédente sont analysées dans un premier temps sans considérer de limites (physiques) et, par la suite, elles sont étudiées avec des contraintes pour

les limites de capacité des ouvrages. L'objectif du coût quasi minimal est atteint, optimisant successivement les différentes options. Des cédules de réalisation et les dimensions des ouvrages sont donc déterminés à un niveau plus précis.

Phase IV : Sélection finale (Final Screening)

Les options définies à l'étape précédente sont analysées à nouveau avec le modèle d'allocation pour déterminer les règles d'opérations optimales et le coût minimal correspondant. La meilleure option sera examinée en détail par les planificateurs, améliorée s'il y a lieu et si nécessaire analysée de nouveau à l'aide du Modèle Sim II et du Modèle d'allocation.

PROJET II

But

Développer des procédures et des techniques permettant de quantifier l'effet des variables aléatoires tant au niveau de l'organisation que de la réalisation de l'opération du système physique de l'eau et ce, au moindre coût.

Etape I : Définition des buts et objectifs

Cette étape permet d'identifier les problèmes à résoudre, précise les points de consommation (quantité et localisation) et les besoins par ordre de priorité, détermine les ressources potentielles et définit les critères de choix à utiliser lors de l'optimisation du système.

Etape 2 : Mise sur pieds d'une banque de données

Cette étape consiste à collecter et réunir un ensemble de données physiques, économiques et hydrologiques qui caractérisent le

système à l'étude. La banque de données comprend des données de débits historiques et des données stochastiques.

Etape 3 : Elaboration de plans d'aménagements

Compte tenu des données compilées à l'étape précédente, dans la phase 3, on analyse chacun des sous-bassins pour déterminer les caractéristiques des débits garantis et la localisation des points d'adduction ou de dérivation potentiels. A cette étape, les surplus ou déficits sont donc définis.

Etape 4 : Amélioration de plans d'aménagements

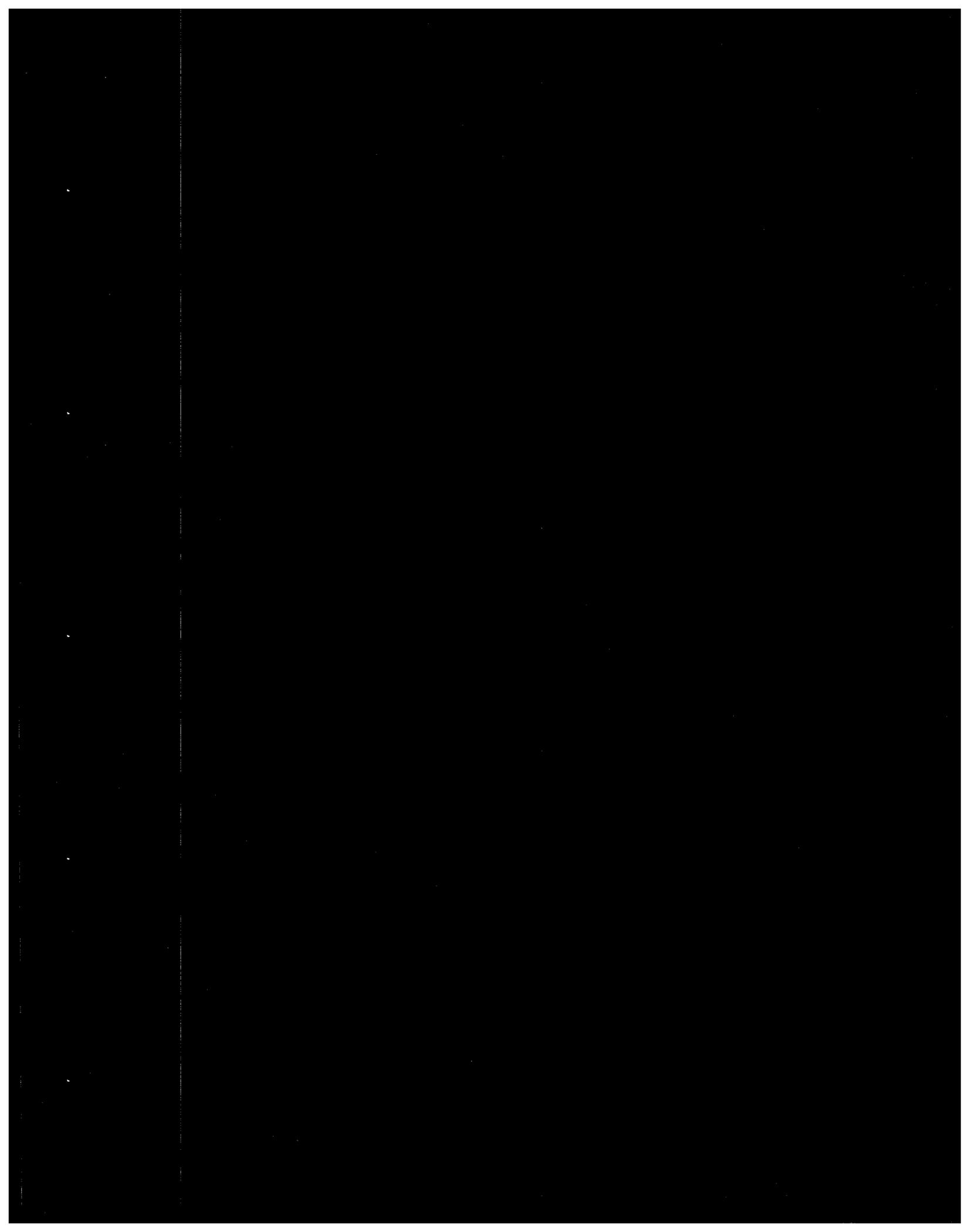
A partir des données historiques et des plans définis à l'étape précédente, cette 4ième phase permet d'améliorer les plans d'aménagements de telle sorte que leurs coûts soient minimaux compte tenu de différents points spécifiés sur la courbe de demande (besoins en eau). Cette étape constitue le noyau "central" de la procédure d'aménagement.

Etape 5 : Optimisation du plan d'aménagement

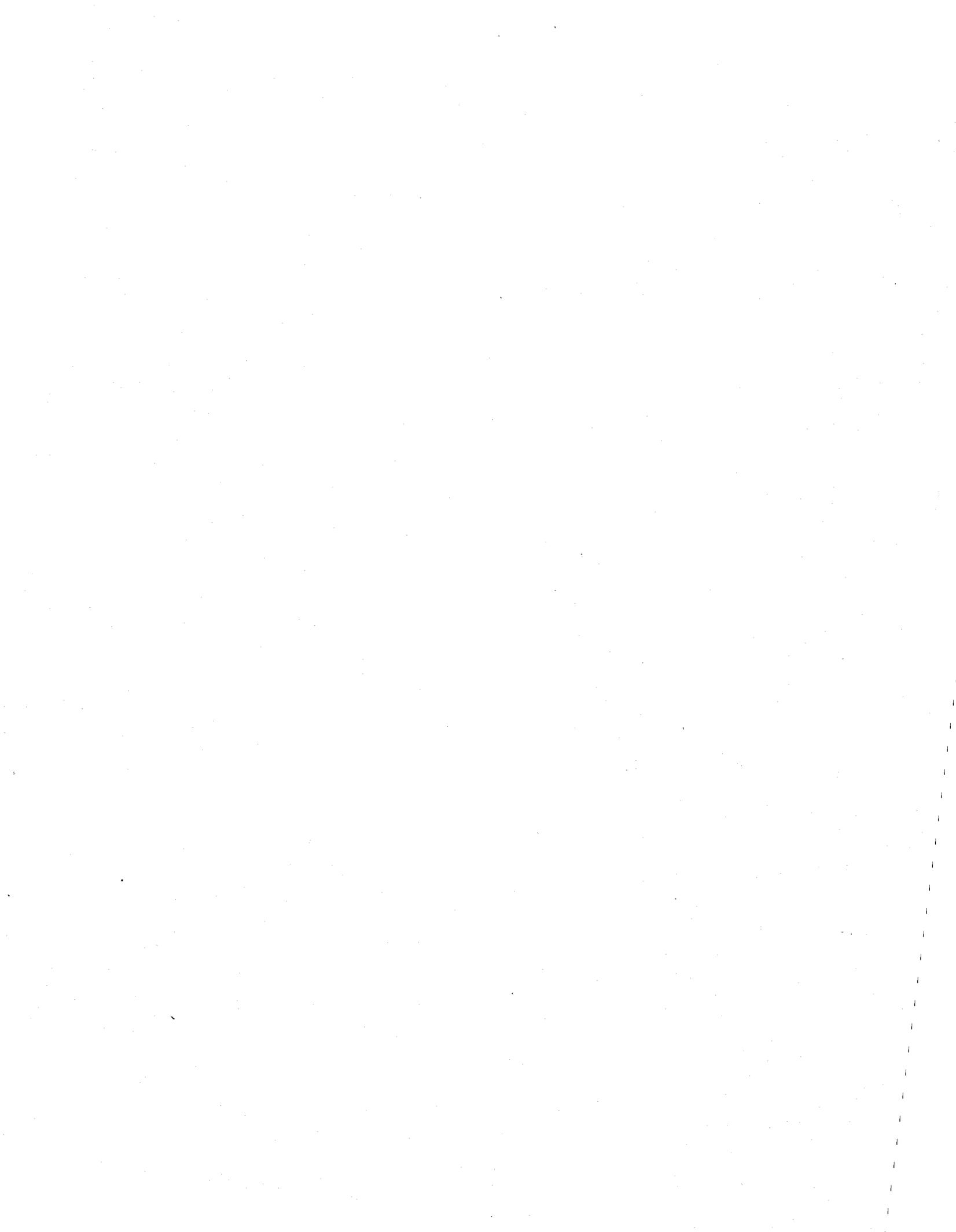
A l'aide des données historiques et stochastiques, l'étape 5 permet d'optimiser les plans d'aménagements sur une période de temps, compte tenu de l'augmentation des besoins en eau. Dans la procédure actuelle, ceci implique la recherche du plan de moindre coût qui répond aux besoins, compte tenu d'un risque de pénurie donné (optimal).

Etape 6 : Choix du plan d'aménagement final

C'est la dernière étape de la procédure d'aménagement. Elle consiste en l'analyse de la sensibilité, du coût et des variables physiques du système simulé, aux variations de tous les paramètres d'entrées utilisés dans les modèles. L'analyse de sensibilité inclut la mesure de l'impact causé par l'introduction d'apports et de consommation aléatoires sur le coût minimal du plan d'aménagement. A partir des informations fournies précédemment et des analyses du risque (ex.: risque de pénurie), le plan choisi peut être différent du plan d'aménagement à coût minimal si ce dernier présente des risques trop élevés.







INTERRELATIONS ENTRE LES DIFFERENTS MODELES

Extrait de: GABLINGER, M. et al. (1972).

Use of systems approaches in planning Israël's water resources management. Symposium international sur la planification des ressources hydrologiques. Ponencias final papers exposes, Secretaria de Recursos Hydraulicos, Mexico, p. 15-28.

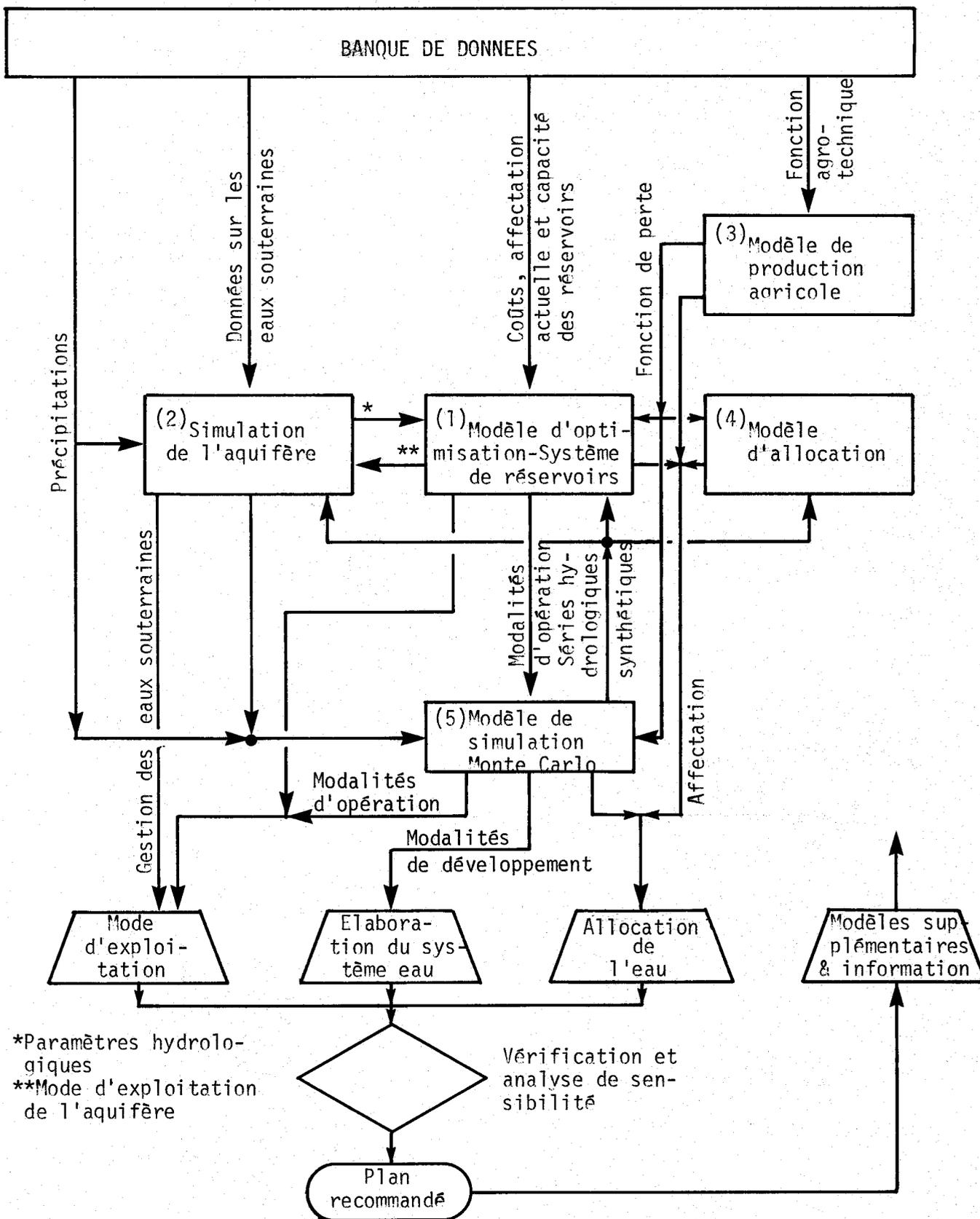
Idéalement, un modèle global devrait être construit pour considérer tous les éléments du système incluant suffisamment de détails quant à l'espace et au pas de temps. En principe, il est possible de construire ce type de modèle mais en pratique les ordinateurs actuels ne permettraient pas de le traiter adéquatement. Pour contourner ce problème, il est possible de développer une série de petits modèles comprenant des outils mathématiques permettant de traiter le système eau d'un bassin globalement mais, avec plus de précision, de canaliser avec des modèles plus fins pour analyser en détail des éléments particuliers du système.

Le schéma ci-annexé comprend cinq (5) de ces modèles:

- 1) Un modèle déterministique utilisant la technique de programmation linéaire pour déterminer les modalités d'opération optimale d'un système d'adduction, de transport et de distribution incluant l'emmagasinement des eaux de surface (réservoirs) et souterraines.
- 2) Un modèle de simulation des aquifères permettant d'analyser le comportement (niveau-débit) des nappes souterraines et un modèle d'optimisation utilisant la programmation linéaire, basé sur les coûts des aménagements et la valeur de la production agricole. Le but de ce modèle est de planifier les restrictions de la consommation en eau à des fins agricoles afin d'en réduire au minimum l'impact négatif sur l'économie régionale.
- 4) Un modèle d'allocations des ressources en eau en fonction des ressources disponibles à chaque période. C'est un modèle séquentiel basé sur la programmation linéaire combiné avec un modèle de simulation.
- 5) Un modèle de simulation (basé sur la méthode Monte Carlo) pour générer la distribution statistique de certains états et variables de décisions du système et permettre de contrôler les modalités d'opération et l'allocation des ressources compte tenu de variables stochastiques.

Les simplifications du système nécessitées par la modélisation entraînent inévitablement des différences marquées avec la situation réelle. Dans le but de réduire les écarts (système simulé et système réel), un processus de rétroaction est prévu pour reviser constamment les résultats obtenus dans un premier temps.

Interrelations entre les modèles utilisés pour la gestion de l'eau



UN MODELE DE SIMULATION GLOBALE

Extrait de: TOEBES, G.H. and CHANG, T.P. (1972).
Simulation model for the Upper Wabash surface water
system. Purdue University, Water Resources Research
Center, Technical Report No 27, 100 p.

Le modèle présenté ici simule essentiellement des choix d'aménagement relatifs aux eaux de surface. Les données socio-économiques sont considérées exogènes au système analysé.

Un modèle de simulation du système physique de l'eau consiste principalement en une chaîne de programmes mécanographiques. Le bloc central (22) comprend une série de programmes intégrés qui permettent d'analyser le comportement des différentes composantes du système eau. Ces composantes sont les réservoirs, les ouvrages d'adduction, les tronçons de rivière, les stations de jaugeage, les digues, les usines d'épuration et d'autres aménagements hydrauliques. Dans ce modèle, les dimensions des ouvrages appelées variables de "design" ou variables de décision sont considérées, dans le cas actuel, comme des variables d'entrée. Seulement la réalisation ou non des ouvrages constitue une variable du système. Conséquemment, le modèle est développé dans le but de définir les modalités d'opérations optimales (Blocs 23 et 30).

Ce modèle de simulation est de type séquentiel. Ceci implique que le système est simulé pour des intervalles de temps régulier et de plus un mécanisme de rétroaction est prévu pour tenir compte des interactions entre des intervalles proches. Le pas de temps choisi est la journée (24 heures) pour tenir compte des inondations et des données disponibles et les résultats de la simulation consiste à fournir les niveaux des réservoirs, les niveaux en rivière, les débits, etc... (Bloc 24).

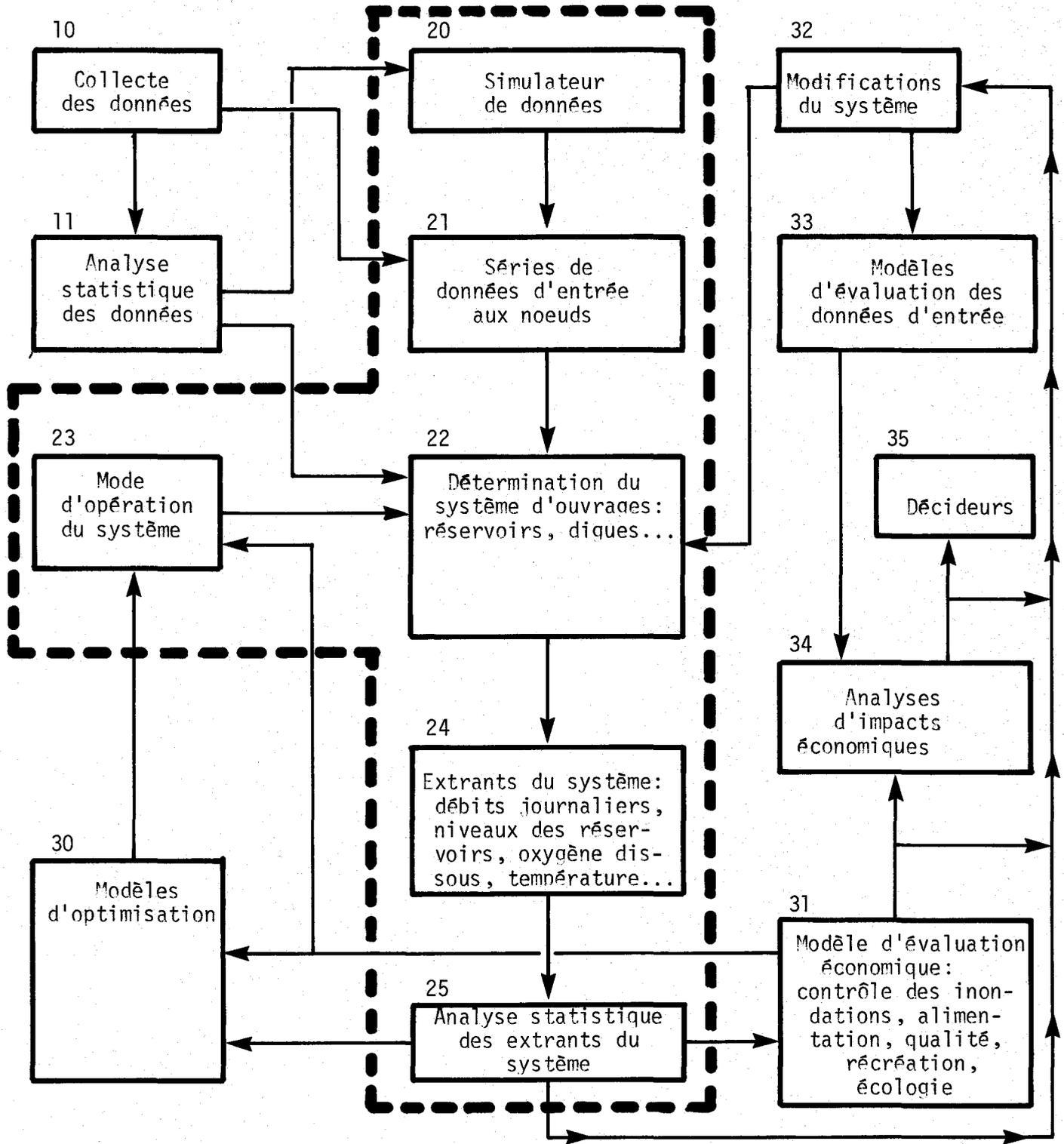
Les extrants du système simulé étant très volumineux (plusieurs variables et valeurs journalières), il est nécessaire d'effectuer une analyse statistique afin de retenir seulement les résultats caractéristiques (Bloc 31).

Les données du système (variables exogènes) sont simulées à l'aide d'un programme principal (Bloc 21). Ces séries de données (ex.: débits d'input

des réservoirs, débits des bassins intermédiaires, etc...) sont produites par un générateur de données basées sur les relevés (Bloc 20-11-10). Il est également possible d'utiliser directement les données historiques (Bloc 10) ou des séries particulières compte tenu de leur fréquence (Bloc 11-22).

Le système physique de l'eau fait partie d'un ensemble écologique et socio-économique. Les entrants et les extrants du système physique doivent donc être exprimés de façon à répondre aux objectifs socio-économiques et écologiques. Cette transposition requiert donc des mécanismes d'évaluation (evaluation program) (Blocs 31, 32). L'analyse des extrants du modèle d'évaluation (Bloc 34) peut être utilisée pour modifier le système physique, mais sert surtout au "décideur".

La simulation de la qualité (BOD-DO) est incluse dans le bloc 22, mais elle touche également aux blocs 10, 11, 21 et 23.



OUTILS NECESSAIRES POUR LA GESTION

DE LA QUALITE DE L'EAU

Extrait de: FOX, I.K. (1973).

Integrating all aspects of regional water systems.
Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 99(HY4);
599-604.

Objectifs de l'étude

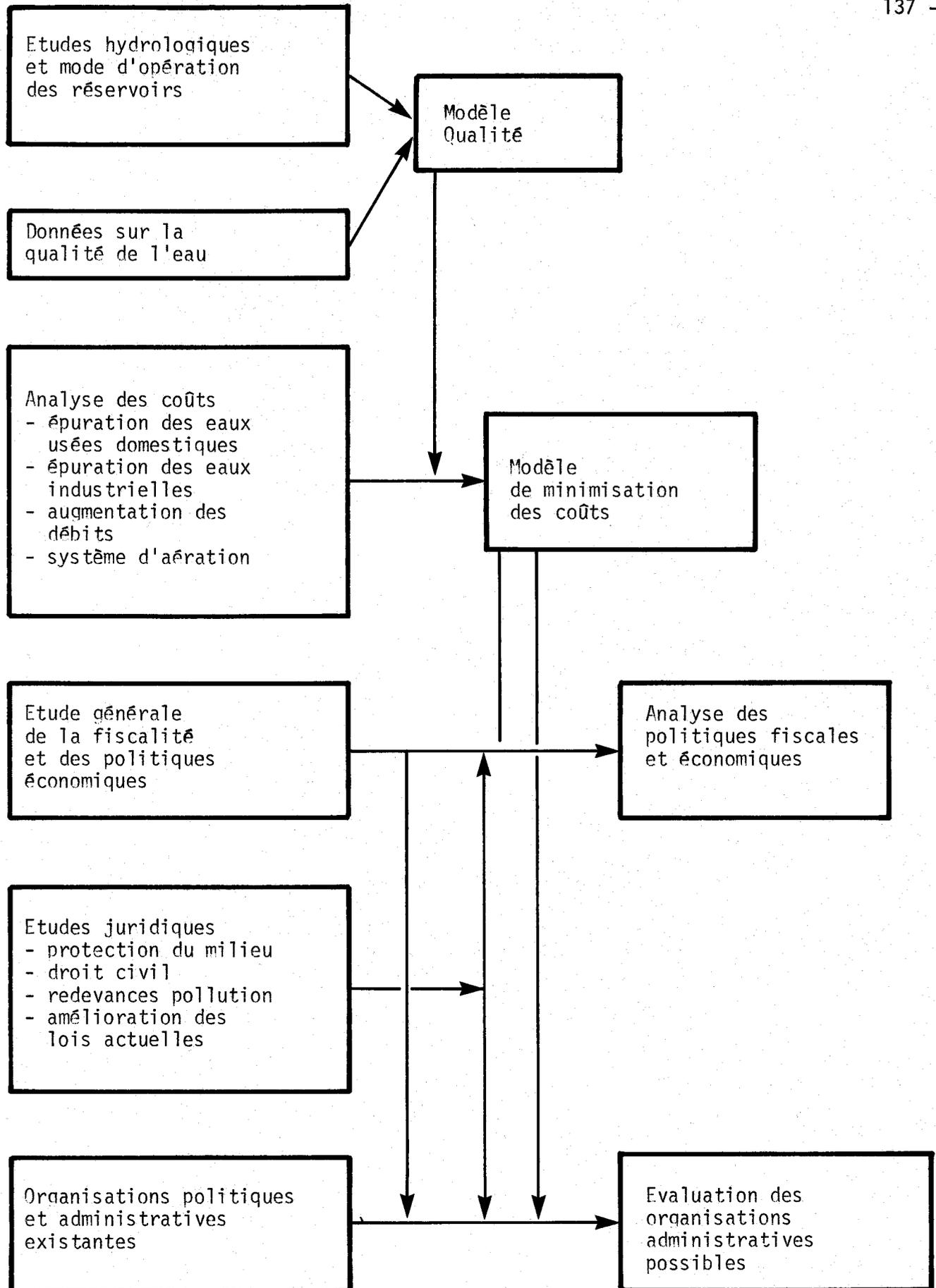
- 1) Déterminer une méthode basée sur l'analyse des systèmes avec comme critère de choix la minimisation des coûts en fonction de différents niveaux de qualité d'eau du bassin de la rivière Wisconsin; comparer par la suite les coûts du système analysé avec les coûts payés en fonction des politiques actuelles.
- 2) Identifier les moyens techniques que doit posséder l'organisation administrative qui devra utiliser la méthodologie préconisée à l'étape précédente et comparer ces moyens avec ceux des organisations existantes qui assument la gestion de la qualité de l'eau.
- 3) Analyser différents types d'organisations administratives qui pourraient être mises sur pied pour assumer la gestion de la qualité de l'eau dans le bassin de la rivière Wisconsin.

La méthodologie proposée est schématisée sur la figure suivante et comprend les éléments suivants:

Un modèle de qualité de l'eau permettant de prédire la qualité de l'eau dans le bassin connaissant les rejets (waste loadings), le débit et la température. Ce modèle a été utilisé pour déterminer la configuration du système physique qui répondrait aux critères de qualité fixés au coût minima.

L'étude des institutions (organisations) qui comprend deux volets:

- a) Etude de l'influence des politiques fiscales et économiques sur le comportement des pollueurs;
- b) Etude des organisations administratives possibles pour définir des normes de qualité, les appliquer et assurer la gestion de la qualité de l'eau à l'aide des outils (mathématiques) développés.



Conception d'une organisation pour assumer la gestion de la qualité de l'eau

PROCEDURE POUR EVALUER DES PLANS

D'AMENAGEMENTS DE LA QUALITE DE L'EAU

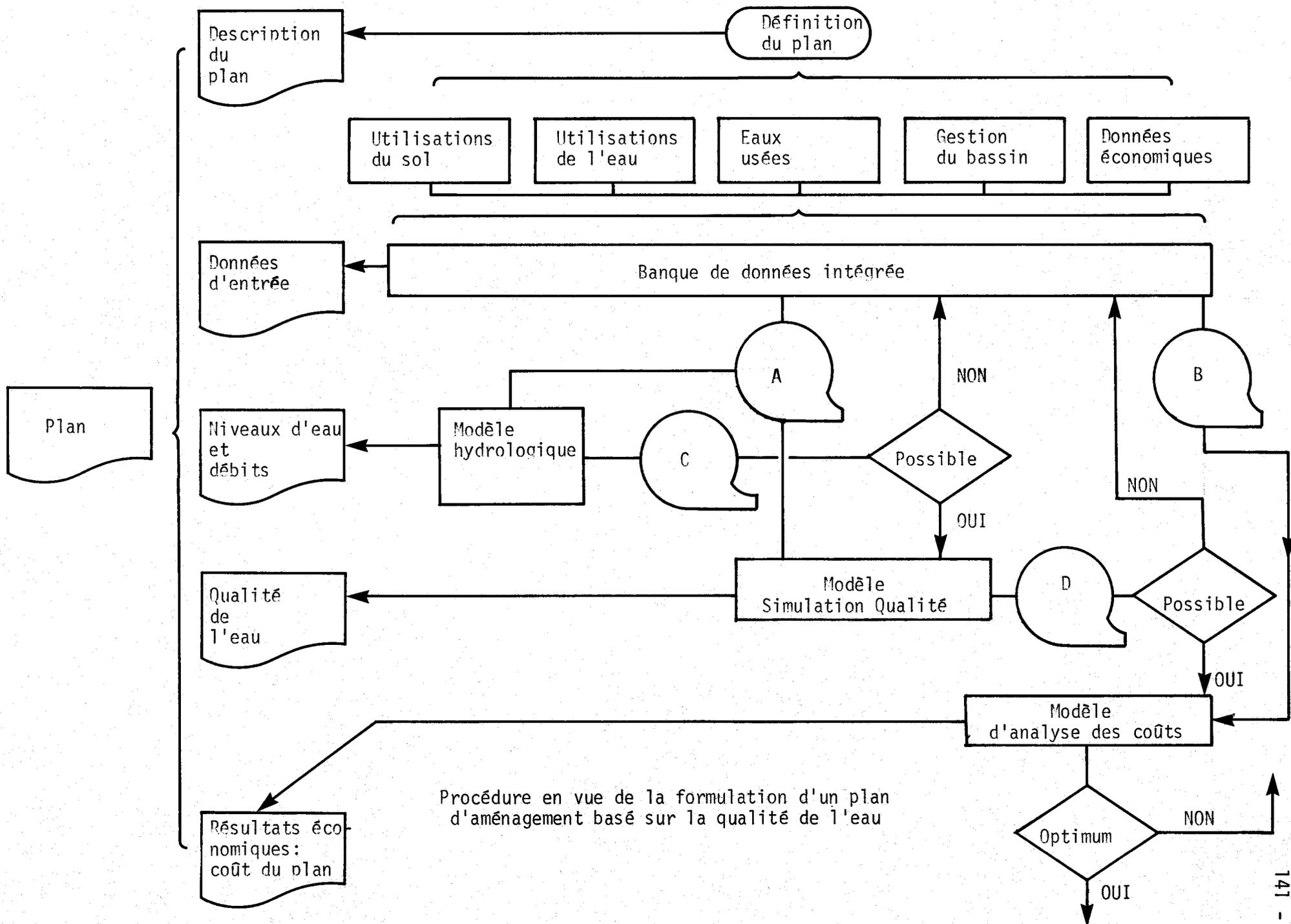
Extrait de: ORLOB, G.T. and DENDY, B.B. (1973).
Systems approach to water quality management. Journal
of Hydraulics Division, ASCE, 99(HY4): 573-587.

DESCRIPTION SOMMAIRE DE LA PROCEDURE D'AMENAGEMENT

1. Un plan d'aménagement est clairement défini en termes d'ouvrages (canaux, réservoirs, usines d'épuration, usines de filtration, etc...).
2. Toutes les données nécessaires aux modèles sont intégrées dans une banque de données. Cette banque comprend les données suivantes:
 - a) Projection des utilisations du sol pour chacune des 44 zones;
 - b) Projections des besoins en eau et données concernant les sources potentielles;
 - c) Projection des rejets (quantité et qualité);
 - d) Modalités d'opération des aménagements prévus (localisation, quantité, qualité des adductions d'eau, limites de pompages, localisations des émissaires d'égouts, etc...);
 - e) Coûts unitaires de l'adduction d'eau, des rejets du transport (canal) et du traitement. La banque de données génère deux groupes de données:
 - A. Débits et qualité de l'eau;
 - B. Données socio-économiques.
3. Le modèle hydrologique permet de déterminer les niveaux d'eau et les débits. Ces résultats sont vérifiés pour répondre aux besoins et, si tel est le cas, ils sont enregistrés sur un ruban:
 - C. Pour servir d'intrant au modèle de simulation qualité. Dans le cas contraire, les modes d'opérations et les ouvrages sont modifiés (par itération) afin de trouver une solution acceptable.

4. Le modèle de simulation qualité utilise les données hydrologiques (Ruban C) et les informations fournies directement par la banque de données pour simuler la qualité de l'eau, compte tenu du plan d'aménagement proposé. Les résultats sont comparés aux normes et besoins fixés d'avance et, s'ils n'y répondent pas, le plan est modifié (ex.: degré d'épuration) ou tout simplement un rapport est soumis indiquant les problèmes rencontrés.

5. Le plan d'aménagement choisi est maintenant vérifié à l'aide d'un modèle économique basé sur l'analyse des coûts minimaux pour atteindre les objectifs de qualité fixés. Une rétroaction jusqu'au plan préliminaire défini au début permettra de déterminer le plan d'aménagement optimal.



ANNEXE A-4

Données d'entrées, contraintes et données de sorties
des modèles décrits aux annexes A-1 et A-2.

On peut regrouper les données ou contraintes sous cinq aspects: géographiques, besoins-disponibilité, hydrologiques, qualitatifs, économiques.

A-4-1 Données d'entrées

a) Aspects géographiques

- altitude, longitude, méridien central et élévation moyenne du bassin;
- % lacs et marais;
- largeur des tronçons (fond et haut);
- localisation des déversements des eaux usées;
- localisation des points de mesure;
- localisation et débit moyen des prises d'eau;
- longueur et pente du réseau de drainage;
- longueur des tronçons de la rivière entre les embouchures des tributaires;
- nombre et longueur des tributaires;
- pente des berges;
- profondeur;
- situation des aménagements et des points d'utilisation;
- superficie des terres irriguées à un site durant toute l'année;
- superficie des terres irriguées à un site durant une saison;
- surfaces urbanisées;

b) Besoins

- besoins en eau des utilisateurs;
- demande en eau souterraine à des fins d'irrigation et d'alimentation domestique;

c) Aspects hydrologiques

- capacité d'infiltration;
- capacité de rétention en eau du sol;
- capacité de stockage;

- coefficient pour relier l'évaporation à la vitesse du vent;
- courbes surfaces-capacité;
- couvert forestier (étendue et densité);
- débit moyen à un site durant une saison;
- débit moyen amont de chaque tributaire durant la période de simulation;
- dérivations entre sous-bassins;
- dimensionnement des barrages;
- données hydrologiques mensuelles, mesurées durant une période d'étiage sévère de 10 ans;
- données hydrologiques obtenues à partir d'un modèle de simulation de débit et/ou de précipitation;
- élévation des couches d'aquifères;
- ennuagement, température mesurée aux thermomètres sec et humide, pression barométrique et vitesse du vent;
- état de maturité de la végétation;
- évapotranspiration potentielle;
- historique des débits;
- coefficient de rugosité de Manning pour chaque tronçon;
- niveau initial de la nappe;
- niveaux minimaux et maximaux;
- perméabilité;
- pompage et taux de recharge pour chaque période de temps;
- précipitations journalières ou horaires (selon le problème);
- probabilité d'occurrence des périodes critiques (risk levels);
- puissance hydro-électrique;
- règles d'opération;
- régulation possible avec les réservoirs potentiels;
- taux d'évaporation;
- température journalière maximale et minimale;
- temps de parcours.

d) Aspects de la qualité

- apports en C, N et P venant de la population, de l'agriculture, de l'élevage, etc...;
- caractéristiques physico-chimiques des rejets bruts et des prises d'eau brutes;
- coefficients de sédimentation-érosion dans les tronçons;
- comportement des polluants;
- concentration de polluants à différentes stations spécifiées;
- constantes de biooxydation;
- constante de désoxygénation;
- constante de vitesse de réaération, facteur pour la perte de DBO dans un réservoir, termes d'erreurs pour la désoxygénation et pour la réaération;
- débit moyen et DBO totale des eaux usées;
- DBO et déficit en OD dans et à la sortie des tronçons;
- DBO initiale et déficit initial en OD pour les réservoirs;
- DBO totale moyenne, OD moyen, température moyenne et concentration des paramètres de minéralisation pour l'amont;
- déficit en OD en tout point;
- demande benthique en oxygène ou production photosynthétique en oxygène dans le tronçon;
- données caractérisant la charge de DBO;
- température et concentration des espèces minérales des eaux usées introduites dans le système;
- traitement des eaux usées (consignes d'exploitation des barrages);
- transport des sédiments.

e) Aspects économiques

- coût de traitement;
- coûts unitaires (emmagasinement, centrale, canaux);
- période d'aménagement;
- revenus unitaires (irrigation et hydro-électricité);
- coûts de transport de l'eau.

A-4-2 Contraintes

- a) Aspects géographiques
 - superficie irrigable maximale
- b) Besoins-disponibilité
 - capacité de la centrale > production;
 - contraintes de besoins urbains et industriels;
 - production < potentiel.
- c) Aspects hydrologiques
 - adduction maximale à un site;
 - pour chaque usage, on décrit un bilan à l'entrée et un bilan à la sortie;
 - contraintes sur la circulation de l'eau entre les bassins (principe de conservation);
 - contraintes de disponibilité;
 - débit minimum à garantir à la sortie du sous-bassin et dans le sous-bassin;
 - égalité des transferts d'eau;
 - évaporation;
 - limite inférieure pour la capacité des canaux;
 - limites supérieures pour eaux souterraines du:
 - . volume d'emmagasinement sur les tributaires;
 - . volume d'emmagasinement sur la rivière principale;
 - débit disponible dans le bassin;
 - relation vitesse-débit et niveau-débit pour les tributaires et le cours d'eau principal;
 - relation entre l'utilisation des eaux souterraines et de surface du sous-bassin en fixant une limite supérieure aux quantités d'eau de surface disponible;
 - volume d'emmagasinement maximal.

d) Aspects de la qualité

- bilan qualitatif intégrant une contrainte de qualité minimale acceptable (pour chaque paramètre qualitatif retenu);
- coefficients de transfert que définit le déficit en OD en un point à la suite d'une pollution en un autre;
- contraintes garantissant l'alimentation en eau potable et l'utilisation pour d'autres usages;
- pour chaque usage, des contraintes de satisfaction qualitative;
- débit minimal pour la vie aquatique et la navigation;
- déficit en oxygène permmissible dans la rivière;
- l'efficacité du traitement de la DBO doit se situer entre certaines limites;
- niveaux minimaux et maximaux de traitement pour une partie ou l'ensemble du bassin;
- normes requises de OD;
- valeurs minimums pour l'OD;
- la valeur minimum requise pour OD en chaque point.

e) Aspects économiques

- investissement maximal possible pour une partie ou l'ensemble du bassin.

A-4-3 Données de sorties (résultats)

a) Aspects géographiques

- localisation des différents ouvrages (pompage, stockage, épuration).

b) Besoins-disponibilité

- les demandes satisfaites ou non satisfaites pendant la période de simulation;
- eaux souterraines disponibles pour d'autres fins;
- énergie hydro-électrique produite à un site pendant une période donnée;
- plan d'alimentation des utilisateurs;
- quantité d'eau souterraine;
- eau superficielle disponible.

c) Aspects hydrologiques

- contrôle des crues;
- cotes des plans d'eau, des zones d'inondations pour les probabilités désirées;
- débit entrant dans le sous-bassin;
- débits influencés ou non influencés;
- débit inter-bassins;
- débit moyen dérivé dans une saison;
- débit moyen des prises d'eau;
- débit sortant du sous-bassin;
- dérivation et adduction d'eau;
- dérivations, pertes par évaporation, température;
- dimensionnement optimal des ouvrages d'irrigation;
- dimensionnement optimal des réservoirs;
- données calculées dans chaque tronçon;
- eaux souterraines allouées à des fins définies;
- emmagasinement sur la rivière principale;
- emmagasinement sur les tributaires;
- état de saturation;
- l'état de saturation, y compris l'épaisseur de l'enneigement;
- évapotranspiration potentielle;
- les lâchures;
- le niveau de remplissage des réservoirs;
- la recharge des nappes;

- vitesse et temps de parcours dans les tronçons;
- volume d'eau pour l'irrigation à un site;
- volume d'emmagasinement à un site.

d) Aspects de la qualité

- charge des eaux résiduaires;
- concentrations de polluants;
- constantes de vitesses, de désoxygénation et de réaération;
- débit moyen des eaux usées;
- efficacités de traitement;
- endroits où on ne respecte pas le niveau minimum d'OD;
- plan de ventilation des eaux usées (recyclage ou rejets);
- température et concentration des espèces minérales des eaux usées introduites dans le système.

e) Aspects économiques

- bénéfices nets;
- les coûts de capital, d'opération, de maintenance de chaque élément pour la période d'analyse et pour la séquence hydrologique et de demandes;
- détection d'éventuels déficits;
- l'échéancier des investissements pour la solution retenue;
- information sur le changement de coût total en fonction de la norme fixée pour l'OD dans les tronçons;
- maximisation de la qualité de l'eau pour un niveau de dépense fixé en considérant OD;
- minimisation des coûts dus à l'opération et la construction des ouvrages de traitement pour respecter des niveau de qualité données (DBO);
- valeur nette du bénéfice global annuel en ayant supposé existant les ouvrages considérés.