

Numéro d'identification

ACADEMIE DE MONTPELLIER
UNIVERSITE MONTPELLIER II
- SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC -

T H E S E

présentée à l'université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc
pour obtenir le DIPLOME DE DOCTORAT

Spécialité : Mécanique, génie mécanique, génie civil
Formation doctorale : Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental
École doctorale : Sciences de la Terre et de l'Eau

**Modélisation de la dynamique de l'hydrosystème
du bassin du Mae Klong (Thaïlande)**

**Une esquisse de système interactif d'aide à la décision
pour la gestion de l'eau**

par

Ekasit KOSITSAKULCHAI

Soutenue le 30 janvier 2001 devant le jury composé de :

MM.	Michel	DESBORDES	Professeur, Univ. Montpellier II	Président
	Philippe	BOIS	Professeur, INPG Grenoble	Rapporteur
	Eric	PARENT	Professeur, ENGREF Paris	Rapporteur
	François	MOLLE	Chargé de Recherche, IRD	Examineur
	François	VALETTE	Ingénieur de Recherche, CNRS	Examineur
	Pierre	CHEVALLIER	Directeur de Recherche, IRD	Directeur de Thèse

REMERCIEMENTS

Je remercie vivement :

Monsieur le Professeur Michel DESBORDES qui a bien voulu juger de ce travail et a fait honneur de présider ce jury.

Messieurs les Professeurs Philippe BOIS et Eric PARENT d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Monsieur Pierre CHEVALLIER pour le temps consacré à la direction de ces recherches et l'accueil au sein du Laboratoire d'Hydrologie de l'IRD à Montpellier.

Messieurs François MOLLE et François VALETTE, qui ont aidé à initier cette thèse et participé à ce jury.

Monsieur Patrick LE GOULVEN d'avoir encadré le travail préliminaire en DEA et aidé à démarrer cette thèse.

Messieurs Eric CADIER et Alain DEZETTER pour leur participation au comité de pilotage de thèse et leur contribution à cette thèse sur l'aspect de la modélisation hydrologique.

Monsieur le Professeur Varawoot VUDHIWANICH, étant mon premier professeur en hydrologie, pour ses encouragements et suggestions.

Monsieur le Professeur Yasuyuki KONO pour m'avoir initié à la recherche pendant la préparation de thèse de Master à l'AIT.

Messieurs Alain DELACOURT, Michel GUINAUDEAU et Claud MILLIER de l'ENGREF pour m'avoir accueilli et soutenu pendant ma formation de DEA.

Le Ministère Français des Affaires Etrangères, l'Ambassade de France à Bangkok et le Projet DORAS pour le soutien financier.

Le Service d'accueil des étudiants étrangers du CNOUS et du CROUS de Montpellier, particulièrement Madame Marie-Claire PIGIERE, pour m'avoir accueilli chaleureusement lors d'un long séjour en France.

Mesdames Nadine MUTHER et Monique Oï qui ont géré mon dossier pour l'administration de l'IRD.

Ainsi, toutes les autres personnes qui à l'EGAT, à l'IRD, au RID, à l'Université Kasetsart et à l'Université Montpellier II, ont apporté une aide essentielle dans la réalisation de ce travail.

RESUME

KOSITSAKULCHAI, Ekasit, 2001, *Modélisation de la dynamique de l'hydrosystème du bassin du Mae Klong (Thaïlande) : une esquisse de système interactif d'aide à la décision pour la gestion de l'eau*. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc (USTL).

La modélisation de la gestion intégrée de la ressource en eau dans le bassin versant du Mae Klong (31 000 km²) s'appuie sur l'approche systémique. La variabilité de la ressource et l'intensification des usages (production hydroélectrique, irrigation, alimentation en eau potable, protection contre les intrusions salines, tourisme écologique) incitent à une gestion prudente des hydrosystèmes aménagés. Pour aborder des conditions dynamiques complexes, les modèles de simulation qui prennent en compte des règles de gestion parfaitement définies jouent un rôle crucial. L'analyse systémique, d'une part, et l'outil de modélisation Vensim®, basé sur les méthodes de Dynamique des Systèmes, d'autre part, constituent des moyens d'analyse et de représentation des systèmes complexes. Deux types de modèles sont mis en œuvre : un modèle pluie-débit pour estimer les ressources en eau en plusieurs points de contrôle du bassin versant et un modèle de décision intégrant la conduite opérationnelle des ouvrages, les contraintes réglementaires et l'évaluation économique.

Mots clés : Gestion intégrée de l'eau – Modélisation du bassin versant – Analyse systémique – Dynamique des Systèmes – Simulation

ABSTRACT

KOSITSAKULCHAI, Ekasit, 2001, Modeling of hydrosystem dynamics of Mae Klong river basin, Thailand: a prototype of decision support system for water management. University of Montpellier II - Sciences and Techniques of Languedoc.

Modeling of integrated water resources management of Mae Klong river basin (31 000 km²) is based on the system approach. The variability of water resource and the increasing competition of water uses (irrigation, hydropower, urban water supply, seawater intrusion protection, and recreation) entail a cautious water management in highly developed hydrosystems. In order to tackle such a complex dynamical situation, simulation models that take into consideration existing management rules play a crucial role. The system thinking coupling with System Dynamics modeling tool, Vensim®, offer double advantages in helping to learn and to represent complex systems. Firstly, a lumped rainfall-runoff model was developed in order to evaluate inflows at various control points in the basin. Moreover, a water management decision model was elaborated. The latter model incorporates technical aspects of multi-purpose multi-reservoir operation, governing rules and economic evaluation.

Keywords : Integrated water resources management – River basin modeling – System Analysis – System Dynamics – Simulation

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	III
RESUME	V
ABSTRACT.....	VI
SOMMAIRE.....	VII
SIGLES ET ABREVIATION	VIII
INTRODUCTION	1
PREMIERE PARTIE :	
LE CADRE DE L'ETUDE BASSIN DU MAE KLONG.....	7
I. MILIEU NATUREL.....	9
II. AMENAGEMENTS HYDRAULIQUES ET HYDROAGRIQUES.....	19
III. LE ROLE DE LA SOCIETE	37
IV. GESTION DE L'EAU.....	57
CONCLUSIONS DE LA PREMIERE PARTIE	85
DEUXIEME PARTIE :	
MODELISATION DE L'HYDROSYSTEME DU MAE KLONG	87
V. CONSTRUCTION DES MODELES	89
VI. MODELISATION HYDROLOGIQUE.....	93
VII. REPRESENTATION DES COMPOSANTES DE FONCTIONNEMENT.....	101
VIII. EVALUATION DE LA PERFORMANCE DE L'HYDROSYSTEME.....	127
CONCLUSIONS DE LA DEUXIEME PARTIE	145
TROISIEME PARTIE :	
APPLICATIONS DES MODELES	147
IX. RECONSTITUTION DES ECOULEMENTS NATURELS	149
X. VARIABILITES DES PARAMETRES DU MODELE DE FONCTIONNEMENT.....	175
XI. STRATEGIES DE LA GESTION DE L'EAU	205
CONCLUSIONS DE LA TROISIEME PARTIE.....	237
CONCLUSIONS GENERALES	239
BIBLIOGRAPHIE.....	243
TABLE DES MATIERES.....	269
LISTE DES TABLEAUX.....	273
LISTE DES FIGURES	275

SIGLES ET ABBREVIATIONS

AIT	Asian Institute of Technology
ADB	Asian Development Bank
BMA	Bangkok Metropolitan Administration
CNFSH	Comité National Français des Sciences Hydrologiques
CNUED	Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement (Rio de Janeiro, Brésil, 1992). Appelée aussi Sommet de la Terre (voir aussi WCED)
DORAS	Development-Oriented Research on Agrarian Systems
EGAT	Electricity Generating Authority of Thailand
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations (voir aussi OAA)
GMKIP	The Greater Mae Klong Irrigation Project
ICID	International Commission for Irrigation and Drainage
ICWE	International Conference on Water and the Environment (Conférence internationale sur l'eau et l'environnement), à laquelle ont participé plus de 500 personnes venues de plus de 80 organisations gouvernementales internationales et ONGs, et qui s'est tenue à Dublin en Irlande du 26 au 31 janvier 1992.
IRD	Institut de Recherche pour le Développement (ex ORSTOM)
IRI	International Research Institute for climate prediction (http://iri.ldeo.columbia.edu)
IWRA	International Water Resources Association
JICA	Japan International Cooperation Agency
KU	Kasetsart University
MEA	Metropolitan Electricity Authority
MWA	Metropolitan Waterworks Authority
NEPO	National Energy Policy Board
NESDB	National Economic and Social Development Board
NGO	non-governmental organization
NWRC	National Water Resources Committee
OAA	Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (voir aussi FAO)
OIEAU	Office International de l'Eau
ONG	Organisation non gouvernementale
ONU	Organisation des Nations Unies (voir aussi UN)
PEA	Provincial Electricity Authority
PWA	Provincial Waterworks Authority
RFD	Royal Forestry Department
RID	Royal Irrigation Department
RTSD	Royal Thai Survey Department
TDRI	Thailand Development Research Institute
TMD	Thai Meteorology Department
UN	The United Nations (voir aussi ONU)

UNCED	United Nations Conference on Environment and Development (voir aussi CNUED)
UNDP	United Nations Development Programme
UNEP	United Nations Environment Programme
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
WASAM	Water Allocation Scheduling and Monitoring Model
WCED	World Commission on Environment and Development
WMO	World Meteorological Organization

Baht	Unité monétaire thaï (1 Franc ~ 6 Baht)
cms	mètre cube par seconde (m^3/s)
E&E	Exploitation et Entretien(voir aussi O&M)
MCM	million de mètre cube (Mm^3)
MSL	Mean Sea Level (voir aussi SNM)
O&M	Operation and Maintenance (voir aussi E&E)
SNM	Sur Niveau de la Mer (voir aussi MSL)

rai = 0,16 hectare = 1600 m^2

hectare = 6,25 rai

« Les scientifiques seront de plus en plus sollicités pour formuler des avis permettant aux "décideurs" de se prononcer en connaissance de cause, au point que cette activité spécifique d'expertise est désormais reconnue comme l'une des tâches constitutives du métier de chercheur. »

*In : Entre savoir et décision, l'expertise
scientifique
Ph. Roqueplo (1997)*

INTRODUCTION

Contexte et problématique

L'étude présentée ici est réalisée dans le cadre du Projet DORAS (*Development Oriented Research on Agrarian Systems*), menée en partenariat entre l'Université Kasetsart (Thaïlande) et deux instituts français de recherche : le CIRAD (Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement) et l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement).

Le CIRAD et l'Université Kasetsart coopèrent pour l'exécution d'un programme de recherche « *Mise en valeur des cotons* » depuis 1991. La convention entre l'IRD et l'université Kasetsart est plus récente (1994) sur un programme de recherche intitulé : « *Dynamique agricole et gestion de l'eau dans la Plaine Centrale de Thaïlande* ».

Le bassin du Mae Klong est situé à l'ouest de la région Centrale de Thaïlande ; sa partie basse comprend une zone irriguée qui complète le delta du Chao Phraya pour former la Plaine Centrale (Figure 1).

Actuellement, les ressources en eau disponibles dans le bassin du Mae Klong sont suffisantes et ne posent pas de problème majeur pour leur gestion. Cependant avec l'intensification des usages de l'eau dans les secteurs urbains aussi bien que dans les secteurs ruraux, les ressources en eau de la Plaine Centrale sont déficitaires et des projets de transferts d'eau depuis le bassin du Mae Klong sont projetés. Avec une augmentation d'usages en compétition, le bassin du Mae Klong risque d'être à court terme dans une situation de pénurie semblable aux autres grands bassins de Thaïlande.

Il devient donc urgent d'examiner les pratiques de gestion actuelles et d'évaluer l'impact de l'augmentation programmée des demandes, afin de proposer des solutions pour une gestion équitable et durable.

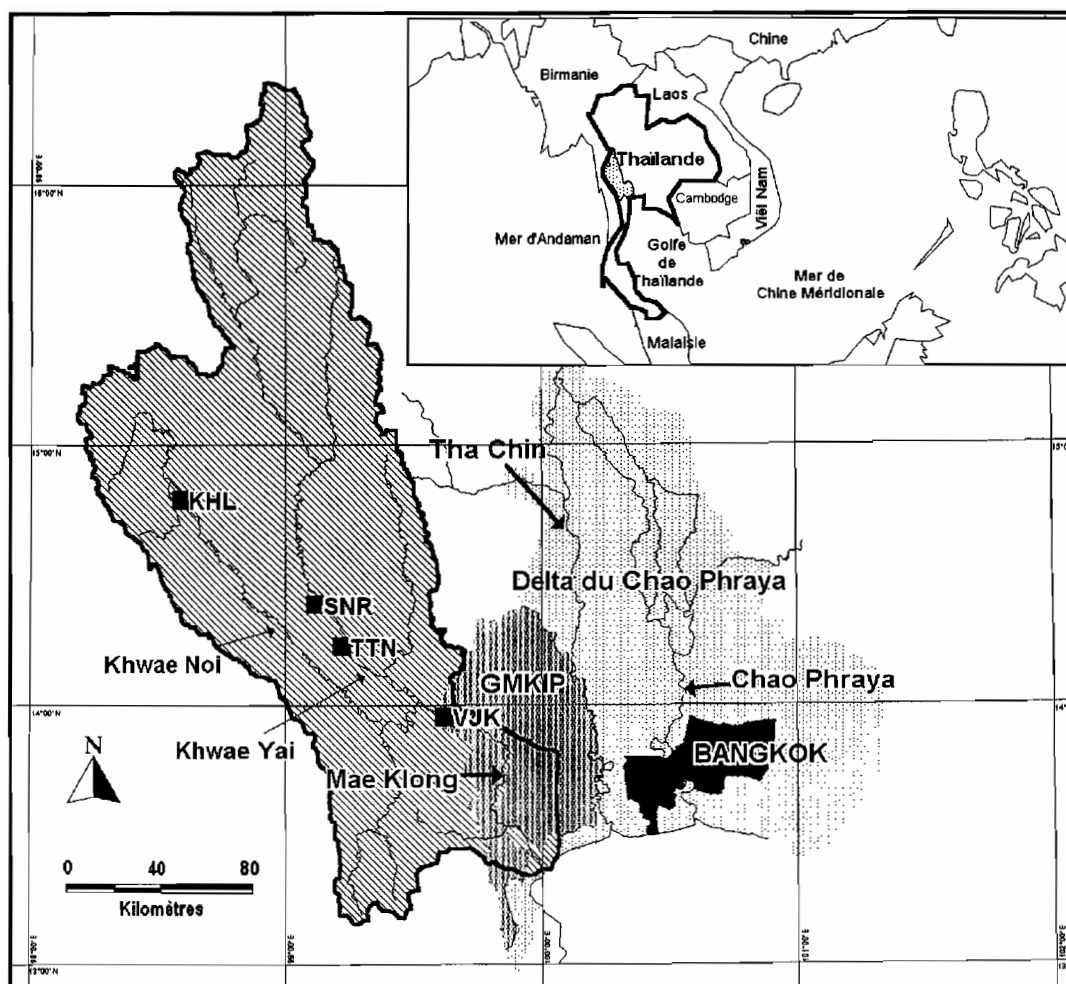


Figure 1 : Bassin du fleuve Mae Klong

GMKIP :	Le Grand Projet d'Irrigation du Mae Klong (The Greater Mae Klong Irrigation Project)
KHL :	Barrage-réservoir Khao Laem
SNR :	Barrage-réservoir Srinagarind
TTN :	Barrage de régulation journalière Tha Thung Na
VJK :	Barrage de dérivation Vajiralongkorn

Pour éviter les conflits et pour proposer des choix rationnels, les gestionnaires doivent être conscients des conséquences de leurs décisions. Pour trouver des solutions à des questions complexes de la gestion on doit donc s'appuyer sur des outils d'aide à la décision capables de représenter toute la complexité des dynamiques entre ressources et usages en tenant compte toutes les contraintes réglementaires qui sont actuellement pratiquées.

Bien que le développement récent des technologies informatiques permette de créer des outils performants et très conviviaux, les modèles génériques de simulation des systèmes d'eau pré-configurés ne sont pas capables de représenter parfaitement toutes les particularités des composantes du système. De plus, dans le contexte des processus de décision, il n'est guère possible d'y introduire à l'avance et de manière exhaustive l'ensemble des spécificités auxquelles chaque système de gestion est susceptible d'accéder. La simulation des systèmes d'eau avec des règles génériques prédéfinies conduit souvent à des résultats qui ne sont pas fidèles.

La Dynamique des Systèmes aborde d'une manière différente les méthodes de modélisation en permettant d'intégrer différents flux (eau, énergie, information) dans le modèle de simulation. Cette méthode se fonde principalement sur l'approche systémique, en mettant l'accent sur la notion de l'évolution dans le temps (la dynamique) ; elle offre à la fois un moyen d'analyse et de représentation des systèmes complexes.

Bien que conçue il y a déjà quelques dizaines d'années, la méthode de la Dynamique des Systèmes est peu connue en France, en particulier dans le domaine de l'eau. Mais les résultats d'applications dans d'autres domaines, aussi complexes par exemple que le management d'entreprises, sont très convaincants.

Objectifs de l'étude

Notre étude tente de comprendre, puis de représenter la circulation complexe dynamique des flux d'eau dans l'hydrosystème aménagé. Cette thèse s'intéresse aux démarches suivantes :

- Développement de méthodes d'analyse et de représentation des systèmes de gestion de l'eau dans les hydrosystèmes aménagés ;
- Modélisation d'un cas spécifique d'aménagements, celui du bassin du Mae Klong, et simulation de la circulation de l'eau dans ce bassin en tenant compte des règles de gestion en vigueur ;
- Proposition de recommandations pour une gestion rationnelle du bassin aménagé étudié.

Cadre méthodologique

Le bassin du Mae Klong est choisi comme un cas d'étude spécifique d'aménagements. Comprendre et représenter les problèmes implicites de la situation réelle de la gestion de l'eau constitue l'enjeu principal de cette étude.

Un diagramme causal (Figure 2) présente ci-dessous le processus d'accumulation et d'organisation des connaissances sur les phénomènes étudiés. La connaissance s'accumule en fonction des informations (utiles) obtenues. Les trois catégories de sources d'informations sont les études bibliographiques, l'observation du monde réel et la compréhension plus profonde lors de la modélisation et la simulation.

Les études bibliographiques sont généralement un bon point de départ ; elles apportent une base conceptuelle, ainsi que méthodologique. Les rapports d'études existants donnent les premiers renseignements sur le milieu étudié.

L'observation du monde réel apporte la connaissance indispensable de la situation réelle du milieu. La collecte des données, l'entretien et l'étude de terrain constituent les trois démarches employées. Cette approche s'inspire beaucoup, par ailleurs, des méthodes utilisées en sciences sociales, car les informations apparaissent souvent comme non-quantifiables et basées sur la subjectivité humaine.

Lors de la phase de modélisation, les connaissances s'organisent ; la compréhension des questions posées s'approfondit. La réalisation de maquettes de modèles aide à identifier les données nécessaires, ainsi qu'à expliciter de quelques questions. La simulation, même par un modèle imparfait, est susceptible de montrer des conséquences inattendues issues de phénomènes complexes, parfois inobservables.

Bien que dotée d'une structure de rétroaction positive (plus d'information, plus de connaissance), l'accumulation des connaissances est limitée par le temps disponible et par la capacité de traitement de l'information. Optimiser le temps et l'information traitée est également l'un des aspects qui nous ont préoccupé tout au long de cette étude.

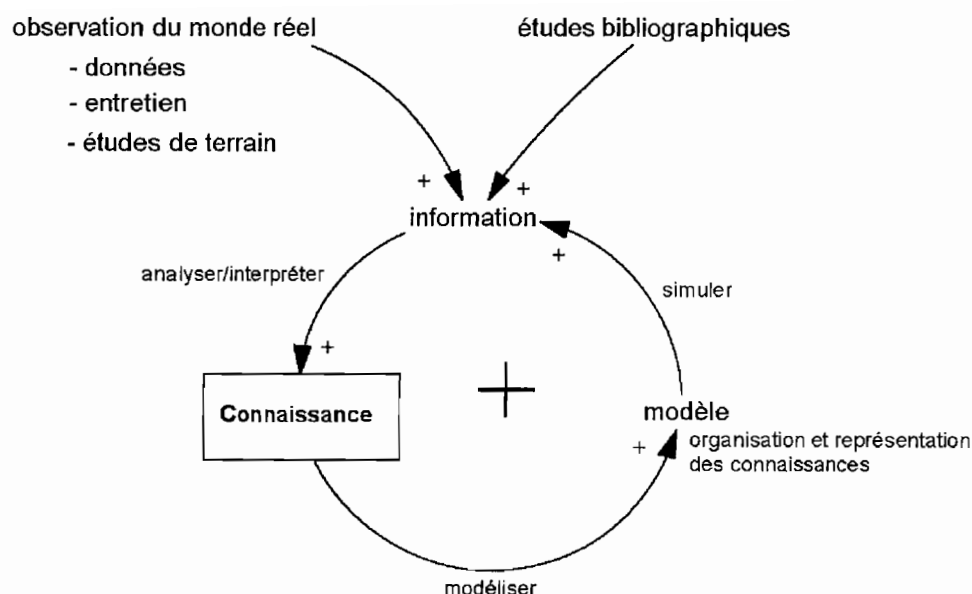


Figure 2 : Schéma causal de l'accumulation et de l'organisation des connaissances

Finalement, cette thèse s'organise autour des trois parties suivantes :

Première partie - Le cadre de l'étude. Quatre chapitres de la deuxième partie présentent une vue d'ensemble du bassin du Mae Klong. Toutes les informations obtenues sur ce bassin sont rassemblées et analysées ; elles concernent le milieu naturel (Chapitre I), les aménagements (Chapitre II), les usages de l'eau par la société (Chapitre III) et enfin l'organisation du système de gestion de l'eau (Chapitre IV).

Deuxième partie - Modélisation de l'hydrosystème du bassin du Mae Klong. La troisième partie se compose de quatre chapitres illustrant méthodiquement la modélisation de l'hydrosystème du Mae Klong. Le premier chapitre introductif présente l'architecture des modèles réalisés (Chapitre V). Le chapitre suivant s'intéresse au développement du modèle hydrologique (Chapitre VI). Les deux derniers chapitres sont consacrés à la représentation des composantes du fonctionnement de l'hydrosystème du Mae Klong (Chapitre VII), puis à la mise en œuvre et à la validation des critères d'évaluation de la performance de fonctionnement (Chapitre VIII).

Troisième partie – Applications des modèles : Une mise en application des modèles du système du Mae Klong est proposée dans la quatrième partie. Les trois chapitres de cette partie concernent : la reconstitution des apports naturels aux ouvrages hydrauliques dans le bassin du Mae Klong par un modèle hydrologique (Chapitre IX), des études de variabilité des ressources et des demandes et leurs conséquences sur les résultats par une analyse de sensibilité (Chapitre X) et une analyse synthétique de la situation actuelle et à venir en recommandant quelques stratégies nouvelles de gestion (Chapitre XI).

PREMIERE PARTIE

LE CADRE DE L'ETUDE

BASSIN DU MAE KLONG

I. MILIEU NATUREL

I-1 SITUATION DU BASSIN VERSANT DU MAE KLONG

Le bassin du Mae Klong, situé dans l'ouest de Thaïlande, est l'un des plus grands bassins de ce pays. Sa superficie de 30 836 km² s'inscrit entre les parallèles 13°10' et 16°23' N et les méridiens 98°15' et 100°17' E. La limite ouest du bassin borde la Birmanie. La partie aval est essentiellement constituée par des périmètres irrigués qui couvrent 400 000 ha et complète le delta du Chao Phraya pour former la Plaine Centrale de Thaïlande.

Le fleuve Mae Klong, de longueur de 143 kilomètres, prend son origine à la confluence de Khwae Yai et Khwae Noi¹ dans les environs de la ville de Kanchanaburi. Il atteint le golfe de Thaïlande à Samut Songkhram.

Les rivières Khwae Yai et Khwae Noi sont les deux affluents principaux du Mae Klong. La Khwae Yai, dont le bassin versant couvre une surface de 14 207 km², est issue du sud de la chaîne montagneuse Thanon Thong Chai qui constitue la frontière nord-ouest de la Thaïlande avec la Birmanie ; c'est une zone de forêt tropicale dense. La longueur du cours d'eau est de l'ordre de 380 km. Les rivières Huai Kha Khaeng et Lam Taphoen² sont les principaux affluents de la Khwae Yai.

La montagne Tanao Sri, frontière ouest de la Thaïlande avec la Birmanie, donne naissance à la Khwae Noi, l'autre affluent du Mae Klong. La longueur du cours d'eau est de 320 km ; la surface du bassin versant, 12 829 km². La rivière Lam Pachi est le principal affluent de la Khwae Noi.

¹ Le mot 'Khwae' signifie cours d'eau ou rivière ; 'Yai', grand ; 'Noi', petit.

² 'Huai' et 'Lam' signifient aussi « cours d'eau ».

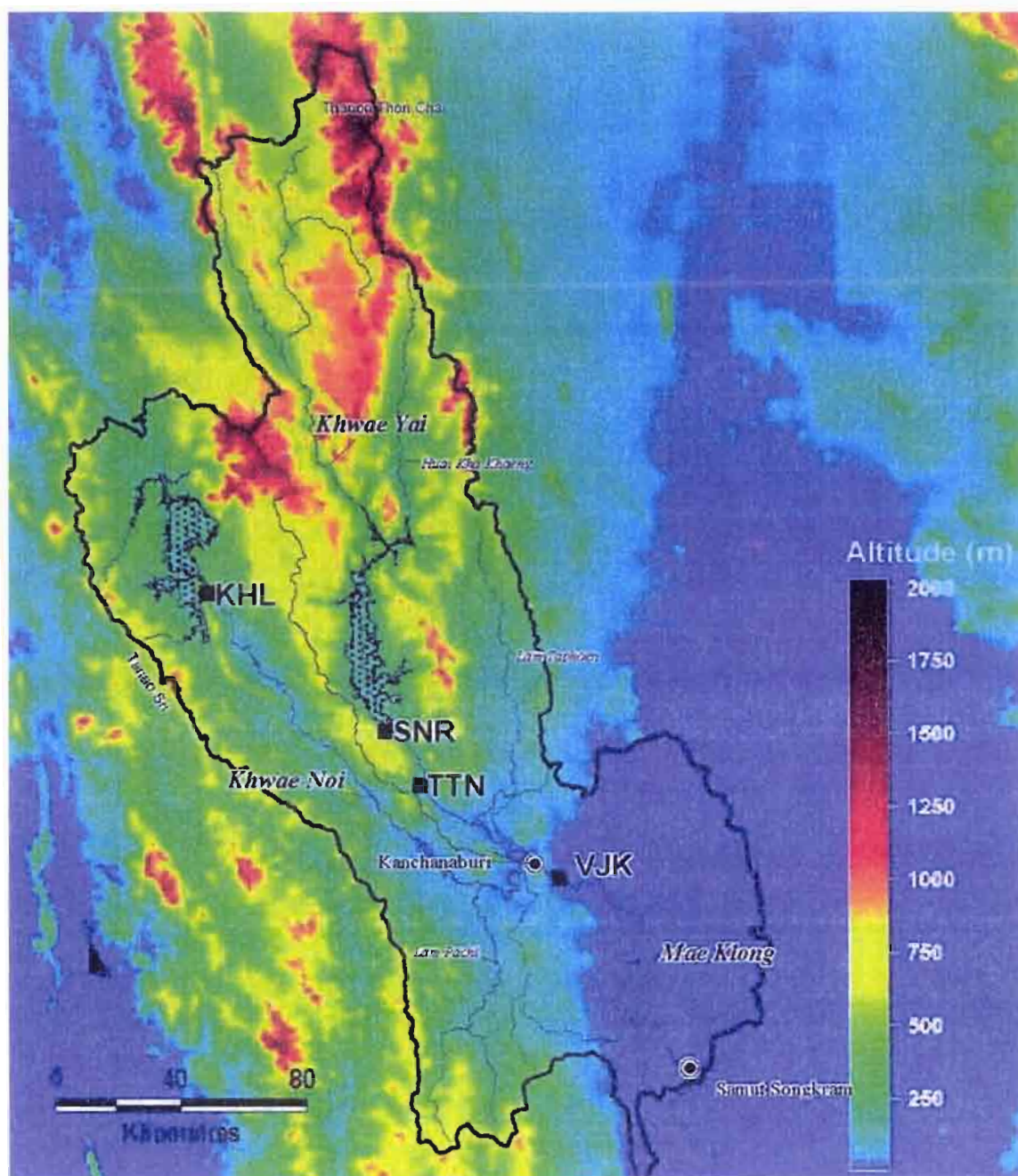


Figure I-1 : Topographie du bassin du Mae Klong

I-2 CLIMAT ET SAISONS

Le bassin du Mae Klong se localise dans la zone de savane tropicale. La mousson de sud-ouest provenant de la mer d'Andaman et la mousson de nord-est du continent chinois influencent considérablement le climat du bassin. La saison humide se produit lorsque la mousson de sud-ouest s'établit entre mai et octobre. La saison sèche et fraîche dure du mois de novembre au mois de janvier ; la saison sèche et chaude, du mois de février au mois d'avril.

Quatre stations météorologiques (Figure I-2) ont été choisies pour représenter le climat sur le bassin. Les stations de Umphang et de Thong Pha Phum se situent dans la partie amont du bassin. Les stations de Kanchanaburi et de Suphanburi, localisées à proximité des zones de projet d'irrigation, représentent le climat de l'aval du bassin

Température. La température moyenne annuelle est d'environ 28°C. Les mois de mars et d'avril sont les plus chauds ; des températures maximales supérieures à 40°C sont enregistrées pendant cette période, alors que la température est légèrement plus basse entre décembre et janvier.

Evaporation. De fortes évaporations, plus de 100 mm par mois, sont relevées sur les bacs de type « Classe A », toute l'année. Les stations météorologiques situées dans la plaine inondable au bas du bassin, Kanchanaburi et Suphanburi montrent un taux d'évaporation plus élevé que celles situées dans les zones montagneuses du haut du bassin, Thong Pha Phum et Umphang. Pendant la saison sèche-chaude, les évaporations s'élèvent remarquablement. Elles dépassent la valeur de 150 mm/mois pour les parties hautes du bassin, et atteignent 200 mm/mois dans les parties basses.

Précipitation. Environ 85% des précipitations s'observent en saison humide entre mai et octobre. Elles présentent une distribution bimodale. Le premier pic de pluviométrie est observé en mai lors du passage sud-nord de la zone intertropicale de convergence (ZITC). Le second pic, plus élevé, en septembre est aussi engendré par le passage de la ZITC dans le sens inverse et renforcé par les apports d'humidité amenés de l'océan Pacifique par des tempêtes tropicales qui peuvent prendre les formes d'intense dépression tropicale jusqu'à celle de typhon.

Les gradients pluviométriques sont considérables et varient sensiblement sur les deux affluents amont (voir carte des isohyètes en Figure I-2). Une pluviométrie annuelle de 4 600 mm est enregistrée par une station près du barrage Khao Laem à l'extrémité ouest du bassin Mae Klong, où le régime pluviométrique se différencie très nettement.

Dans les parties amont du bassin de Khwae Yai, on observe la hauteur de précipitation de 1 400 mm. Mais seulement 1 000 mm de pluviométrie sont reçus dans les parties aval de la Khwae Yai près de Kanchanaburi. Sur la plaine inondable, la pluviométrie annuelle se situe aux 1 000 mm. Elle est légèrement supérieure en zone côtière par rapport à la partie nord des périmètres irrigués.

I-3 ECOULEMENTS SUPERFICIELS ET EAU SOUTERRAINE

Les bilans mensuels d'écoulements dans les cours d'eau principaux du bassin du Mae Klong sont présentés en Figure I-3. Six stations hydrométriques ont été sélectionnées. Le régime d'écoulements avant la mise en eau de tous les barrages en 1985, est représenté en barre, sauf pour la station KE08 située en amont de Srinagarind (SNR) et qui n'est pas perturbée par les aménagements. Les écoulements à partir de l'année 1985 sont représentés en ligne.

Un écoulement moyen du Mae Klong de 11 milliards de m³ par an est mesuré à la station K11 près du barrage Vajiralongkorn (VJK) avec une superficie du bassin versant contrôlé de 26 441 km². Presque 90% des écoulements surviennent entre juin et novembre, tandis que les écoulements durant les six autres mois ne représentent que 10% du volume écoulé.

Grâce aux précipitations plus abondantes, la rivière Khwae Noi contribue de façon plus importante aux écoulements du Mae Klong. Malgré une superficie de bassin versant inférieure à celle de la Khwae Yai, un volume annuel moyen de l'ordre de 6,5 milliards de m³ de la Khwae Noi dépasse la moitié de l'écoulement annuel du Mae Klong.

De plus les écoulements maximaux de la Khwae Noi se produisent environ un mois plus tôt que ceux de la Khwae Yai. Les mois de juillet, août et septembre sont la période où les écoulements sont les plus importants pour la Khwae Noi (voir les stations K13 ou K10 en Figure I-3), alors qu'on ne les observe pas avant le mois d'août pour la Khwae Yai (voir les stations KE08 ou K06 dans la même Figure).

Le bassin du Mae Klong possède aussi des ressources en eau souterraine considérables, en particulier le long du fleuve Mae Klong en aval de Kanchanaburi. Dans les zones inondables à l'aval du bassin, trois couches d'aquifères sédimentaires sont identifiées à des profondeurs de 80 m, 120 m et 150 m. Des débits compris entre 50 et 150 m³/h sont exploitables (Ramnarong et Wongsawat, 1998).

L'alimentation des nappes souterraines est estimée à partir d'une approche de type bilan hydrique par AIT et DMR (1980). Environ 10% (151 mm/an) des pluies annuelles sur le bassin (1 487 mm/an) alimentent les nappes entre les mois de juillet et d'octobre.

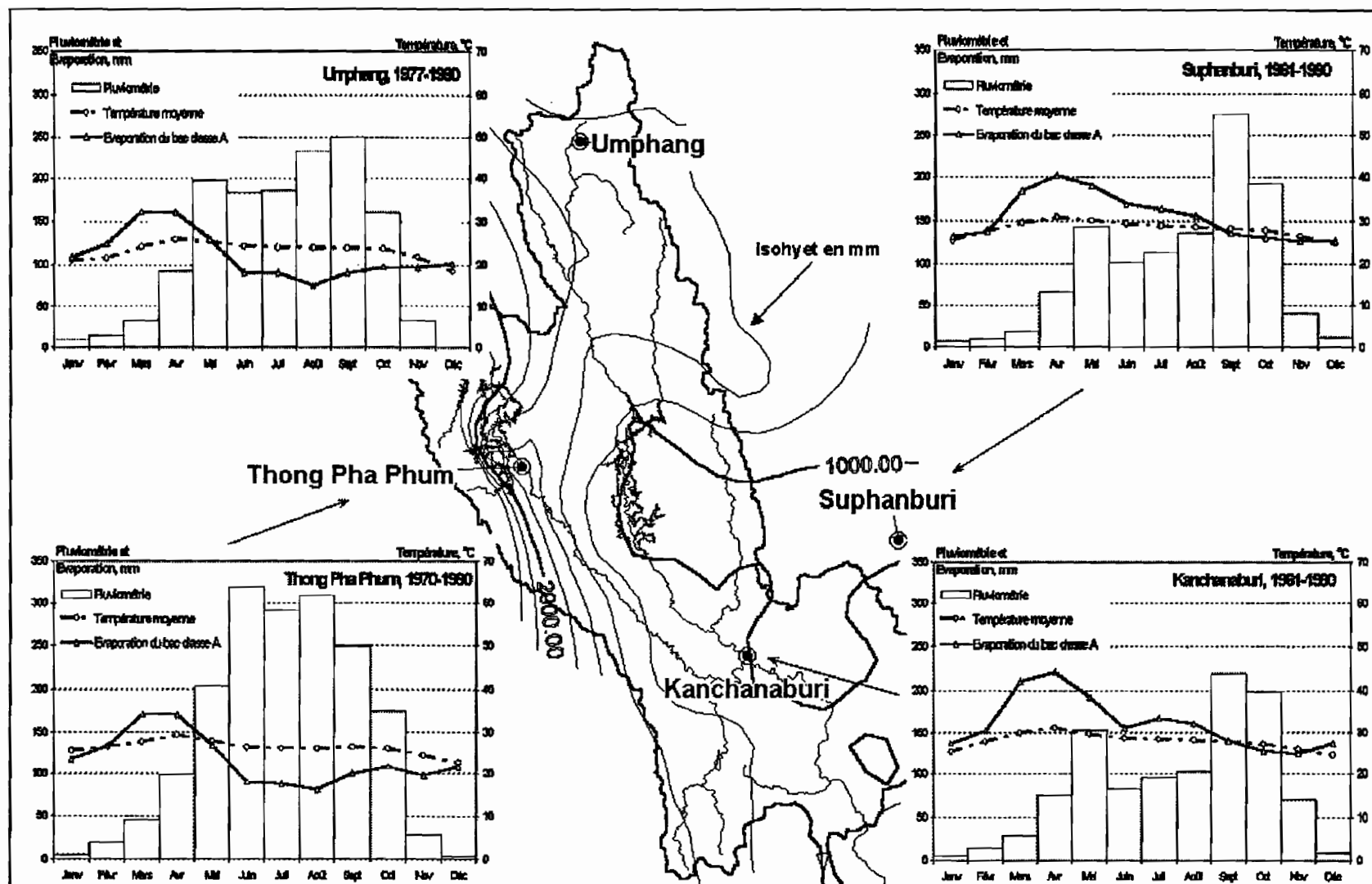


Figure I-2 : Pluviométries, températures et évaporations en moyenne mensuelle des stations météorologiques du Mae Klong

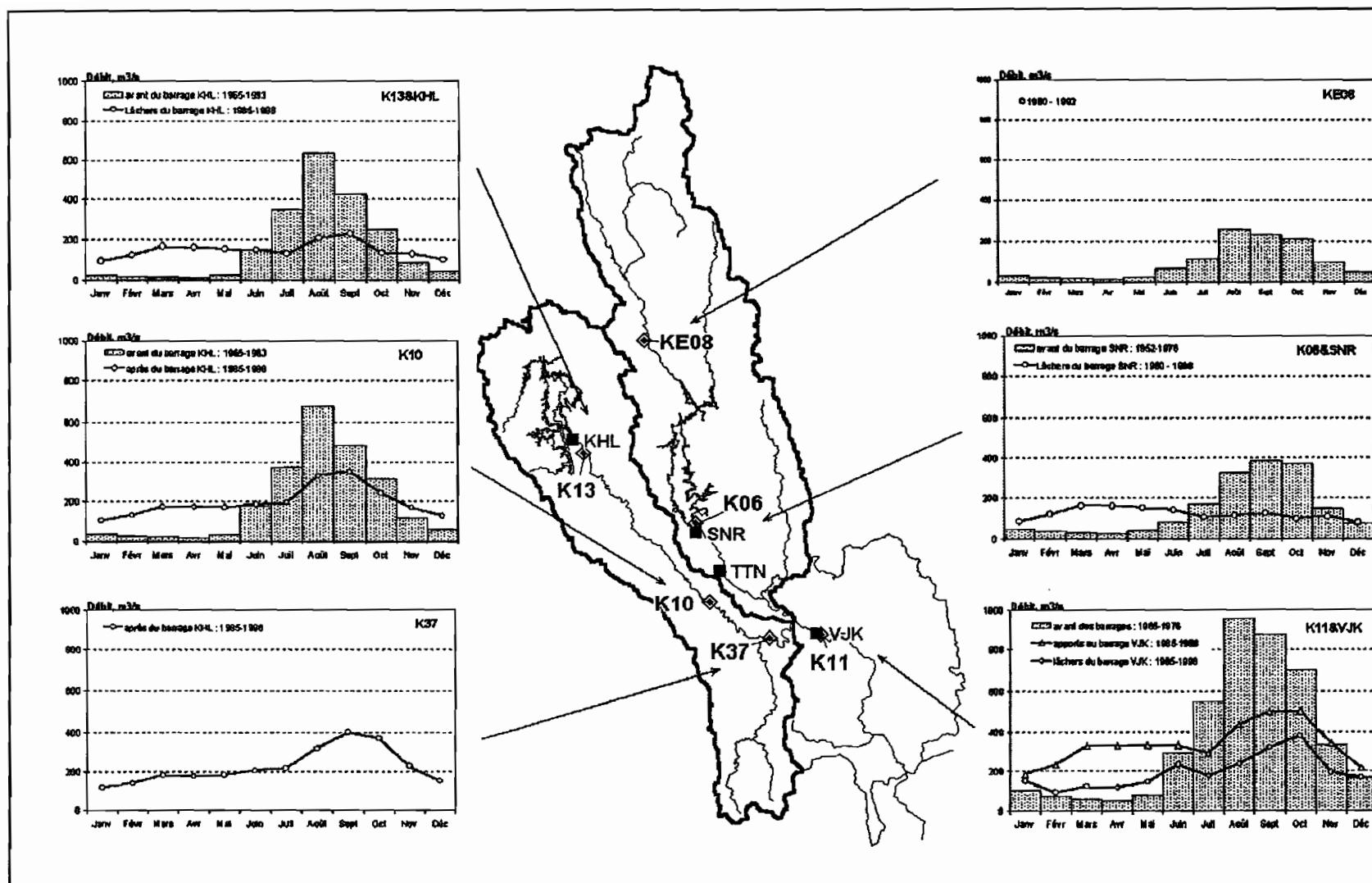


Figure I-3 : Ecoulements moyens mensuels des cours d'eau principaux du bassin du Mae Klong

I-4 VEGETATION

Trois types principaux d'occupation des sols s'observent dans le bassin du Mae Klong : la forêt, l'agriculture et les plans d'eau.

Plus de 64% de la surface du bassin est couverte par la forêt notamment dans les parties amont du bassin. Une autre portion importante est l'agriculture qui occupe environs 33%. Les plans d'eau des deux barrages-réservoirs occupent environ 2% du bassin.

Quant à l'occupation des sols par les cultures, la moitié de la surface agricole est constituée par des champs de canne à sucre ; la plupart d'entre eux se trouvent en dehors des périmètres irrigués. Environ 10% de la superficie du bassin sont des rizières qui se trouvent principalement au sein des périmètres irrigués. Les vergers occupent aussi une partie notable du bassin à l'aval, ainsi que le long de la rivière Khwae Noi. Les cultures de manioc et de maïs, ainsi que l'aquaculture sont les activités agricoles non négligeables.

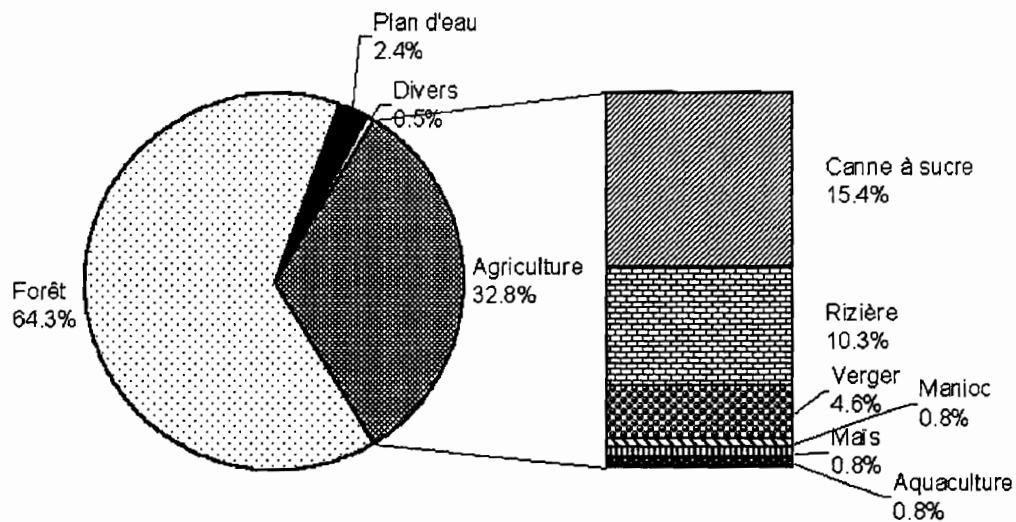


Figure I-4 : Pourcentage des différentes occupations des sols

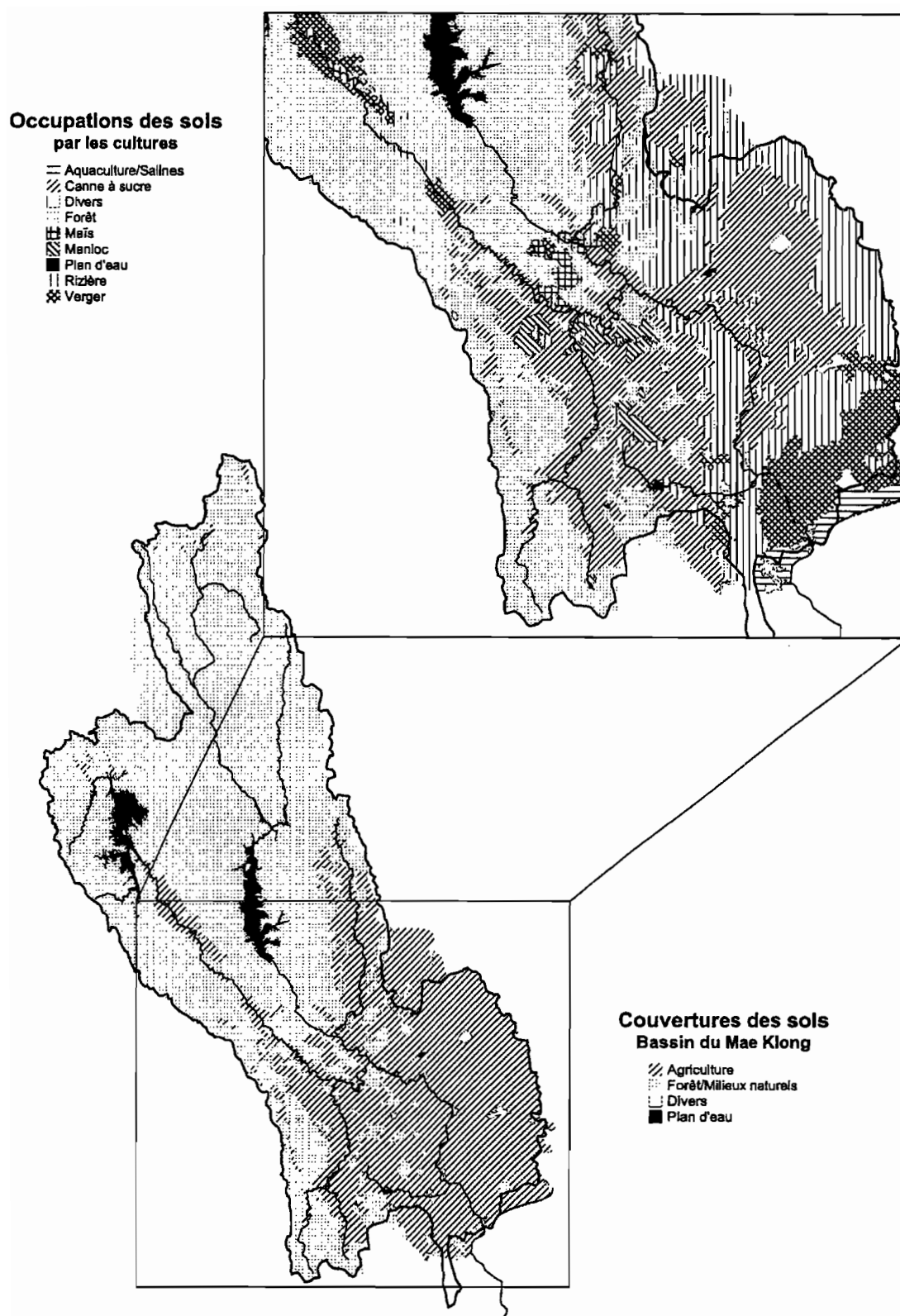


Figure I-5 : L'occupation des sols du bassin du Mae Klong

II. AMENAGEMENTS HYDRAULIQUES ET HYDROAGRIQUES

II-1 HISTOIRE DES ETUDES ET DES AMENAGEMENTS DANS LE BASSIN DU MAE KLONG

Le concept moderne d'aménagements hydrauliques en Thaïlande prend son origine il y a une centaine d'années à l'époque du roi Rama V (1868-1910). Le Département des Canaux a été créé en 1899 et il est devenu Département Royal d'Irrigation (RID) dès 1904. Homan van der Heide, d'origine néerlandaise, a inscrit son nom dans l'histoire de l'aménagement moderne de la Thaïlande comme le premier Directeur Général du RID.

En ce qui concerne le bassin du Mae Klong, le creusement du canal Damnoen Saduak s'est fait en 1867/68 afin de relier les fleuves Mae Klong et Tha Chin. Pour dériver de l'eau du fleuve Mae Klong vers les zones basses du bassin entre les fleuves Mae Klong et Tha Chin, le canal Tha Pha au sein du Projet Nakhon Pathom a été creusé en 1909, après un dragage du canal Damnoen Saduak entre 1903 et 1909. Le canal Tha Pha se prolonge jusqu'au canal Damnoen Saduak.

Plusieurs mesures ont été prises avant la réalisation du *Greater Mae Klong Irrigation Project* (GMKIP). Les aménagements des rives le long du Mae Klong et du Tha Chin entre 1938 et 1960 ont compris la construction des régulateurs et des digues de protection contre les intrusions salines, le creusement et le dragage des canaux. Ainsi à Tambon Tha Lo, une zone aride surélevée située au nord-est du GMKIP, l'installation de pompes et le creusement du canal ont été réalisés entre 1955-1960.

Depuis 1962, les études de grands projets d'aménagements hydrauliques, hydroélectrique et hydroagricole ont été effectuées principalement par RID et EGAT (Agence Nationale de Production d'Electricité de Thaïlande). Le Tableau II-1 est un inventaire des études réalisées sur le bassin du Mae Klong. On ne prétend pas avoir un inventaire exhaustif du fait des nombreux projets proposés sur ce bassin fluvial. Il nous permet toutefois d'observer les phases d'aménagements du bassin du Mae Klong.

Pendant les années 1960-70, plusieurs projets d'aménagement ont été mis à l'étude, tels que le barrage de dérivation Vajiralongkorn et le réseau de canaux

d'irrigation de la 1^{ère} phase en 1962, le barrage-réservoir Srinagarind en 1968 et le barrage-réservoir Khao Laem en 1977. Les études d'aménagements hydroagricoles (en particulier la 2^e phase du GMKIP) ont été faites principalement par la compagnie ILACO, y comprises études de faisabilité, conception, et mis en œuvre des outils opérationnels.

Une pause s'observe pendant les années 80. Elle est probablement due à une certaine saturation : tous les sites aménageables sont déjà mis à l'étude. C'est la phase de réalisation des projets étudiés pendant la vingtaine d'années antérieures.

On note une préoccupation des problèmes de gestion de l'eau à partir des années 90 les apparitions croissantes de nouveaux rapports d'études. La complexité de la gestion de l'eau du Mae Klong augmente à cause des transferts d'eau aux bassins voisins déficitaires.

Dès 1978, la gestion de l'eau des bassins du Chao Phraye et du Mae Klong a été étudiée par Acres (1978). Ce dernier a mis au point un modèle de simulation du système Chao Phraya-Mae Klong. Dans la même année, l'AIT (1978) a défini les débits minimums des fleuves Chao Phraya et Mae Klong dans le but de protéger les milieux côtiers contre les intrusions salines. Les études des bassins Chao Phraya-Mae Klong ont été approfondies dans une phase 2, et ensuite dans une phase 3 qui a été conclue en 1982.

Au début des années 90 deux projets de transferts d'eau du bassin du Mae Klong ont été proposés : Lower Chao Phraya West Bank Development Project (Team *et al.*, 1991) et Master Plan for Water Supply and Distribution of Metropolitan Bangkok (Thai DCI, 1990a ;1990b ;1990c). A cause des volumes prélevés importants, ils entraînent des impacts considérables sur la gestion de l'eau du Mae Klong. En conséquence, des études sont effectuées par les agences concernées (EGAT, 1992 ; Mahidol University, 1994 (à la demande de MWA) ; RID,1995), elles conduisent néanmoins à des conclusions contradictoires.

La gestion de l'eau est devenue un sujet préoccupant, du fait que les événements extrêmes tels que les inondations ou les pénuries d'eau, apparaissent de plus en plus fréquemment. Le Comité national de développement social et économique (NESDB) a lancé en 1994 une série d'étude sur 25 bassins principaux de Thaïlande ; elles étaient conduites par des bureaux d'études et des universités. Leurs résultats ne sont que les inventaires des données de chaque bassin.

La pertinence de ces études est handicapée par un choix pas toujours judicieux de la division de ces bassins. Par exemple, le bassin hydrographique du Chao Phraya est divisé en 8 sous-bassins : Ping, Wang, Yom, Nan, Chao Phraya (la partie aval), Sekae Krang, Pasak, et Tha Chin. Il a ultérieurement été nécessaire de mettre en place une étude complémentaire (BINNIE *et al.*, 1997) pour prendre en considération l'ensemble du bassin hydrographique. Malgré une forte interaction sur les parties basses du Chao Phraya et du Mae Klong, le bassin du Mae Klong n'a pas été inclus dans cette étude.

Pour suivre les concepts de la communauté internationale sur les questions de gestion de l'eau, le gouvernement thaïlandais a été encouragé au moment de la crise économique de 1997, par les agences financières internationales telles que la Banque Mondiale et la Banque de Développement Asiatique (ADB), à introduire une nouvelle politique qui considère l'eau comme un bien économique. Cette politique est fort contestée par les organisations non-gouvernementales (ONG), les agriculteurs ou même le pouvoir politique du pays.

**Tableau II-1 : Inventaire des études d'aménagements et de gestion
concernant le bassin du Mae Klong**

Année	Tâches
1962	Etude de la faisabilité de la première phase d'aménagement : irrigation et protection des crues (RID, 1962)
1964-1977	Construction du Barrage Vajiralongkorn (achevée en 1970) et du réseau de canaux d'irrigation (phase 1) avec l'aide financière de la Banque Mondiale
1968	Etude de la faisabilité de la deuxième phase d'aménagement : irrigation, protection des crues et hydroélectricité (RID, 1968)
1968	Quae Yai No. 1 Hydroelectric Project (EPDC, 1968) - Barrage Srinagarind
1970-1980	Construction du Barrage Srinagarind (ou Ban Chao Nen) par EGAT
1970-1989	Construction du système d'irrigation en rive droite du Mae Klong (phase 2) par RID
1973	Ban Chao Nen Hydroelectric Project Implementation Report (EGAT, 1973)
1974	Greater Meklong Irrigation Project (ILACO, 1974) - Etude de l'aménagement hydroagricole
1974	Baseline Survey Report of Mae Klong Integrated Rural Development Program Area, 1974 (Kasetsart University <i>et al.</i> , 1978)
1976	Feasibility Report on Lower Quae Yai Regulation Dam Project (JICA, 1976) - Barrage Tha Thung Na
1977	Khao Laem Project Feasibility Report (SMEC, 1977) - Barrage Khao Laem
1977-1981	Construction du Barrage Tha Thung Na par EGAT
1978	Chao Phraya-Meklong Basin Study (Phase I report) (Acres, 1978)
1978	Salinity Intrusion in the Chao Phraya and Mae Klong Rivers (AIT, 1978)
1978	Mae Klong River Basin Flood Forecasting System, Thailand (JICA, 1978)
1979	Navigation Channel Improvement for the Development of Samut Songkram, Thailand (Vongvisessomjai & Thimakorn, 1979)
Dès 1980	Construction du système d'irrigation en zone Malaiman (phase 2 – part haute en rive droite du Mae Klong)
1980	Master plan study for the Greater Mae Klong River Basin Development Project (JICA, 1980a) -Schéma directeur de l'aménagement global du bassin et de l'aménagement agricole
1980	Upper Quae Yai Hydroelectric Development Project (JICA, 1980b) - Barrage-réservoir Nam Chon, un autre aménagement hydroélectrique en projet situé en amont de Srinagarind

Année	Tâches
1980-1984	Construction du Barrage Khao Laem par EGAT
1989	Master Plan Study on The Water Management System and Monitoring Program in the Chao Phraya River Basin (JICA, 1989)
1990	Master Plan for Water Supply and Distribution of Metropolitan Bangkok (Thai DCI <i>et al.</i> , 1990a ; Thai DCI <i>et al.</i> , 1990b ; Thai DCI <i>et al.</i> , 1990c)
1991	Lower Chao Phraya West Bank Area Development Project (TEAM <i>et al.</i> , 1991)
1991	U-Thong Irrigation Project : Pre-Feasibility Study (TEAM, 1991)
1992	Criteria for Water Release from Reservoirs in Mae Klong River Basin (EGAT, 1992)
1994	Etudes du potentiel des 25 bassins principaux de Thaïlande : Mae Klong (AIT, 1994), Tha Chin (REC, 1994), Chao Phraya (REC, 1994)
1994	Water Resources Management of the Tha Chin and Mae Klong Basins (Mahidol University, 1994)
1995	Study of Water Use in the Mae Klong River Basin (RID, 1995)
1997	Etude de la gestion stratégique de l'eau du bassin fluvial du Chao Phraya (BINNIE <i>et al.</i> , 1997)

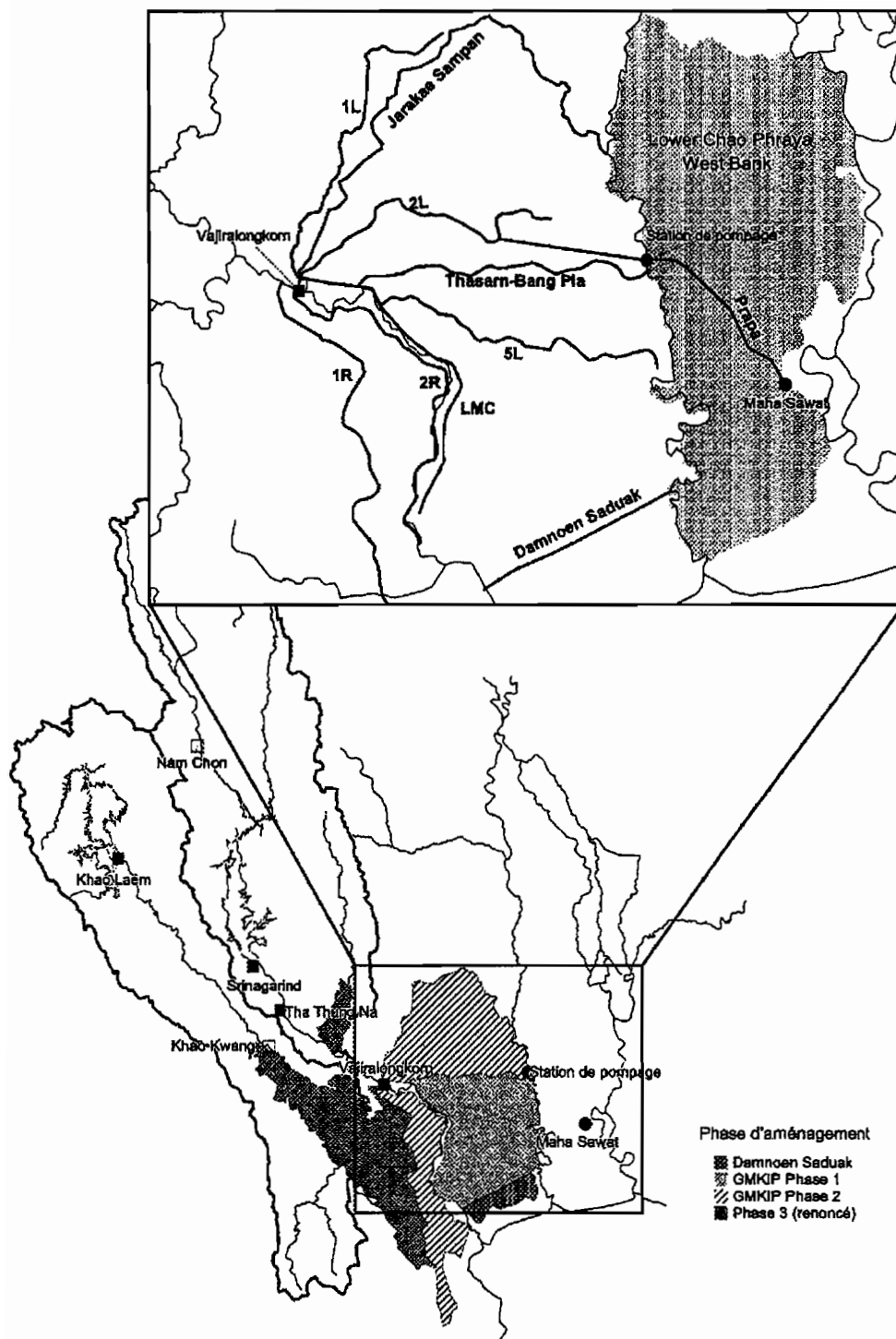


Figure II-1 : Barrages et réseaux de canaux du Mae Klong

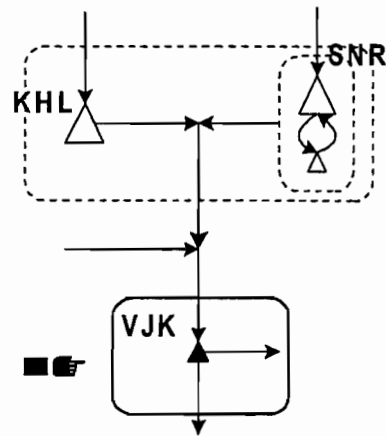
II-2 OUVRAGES HYDRAULIQUES

Les grands ouvrages hydrauliques du bassin du Mae Klong sont présentés sur la Figure II-1. Les quatre barrages principaux du bassin sont en carré foncé ; les barrages en projet, auxquels on a actuellement renoncé, en carré clair. Les nouveaux sites d'aménagement de la MWA sont représentés en rond foncés, y compris la station de pompage au bord du fleuve Tha Chin et l'usine de traitement de l'eau potable Maha Sawat. La localisation des canaux principaux se trouve dans le cadre élargi.

II-2.1 Grand projet d'irrigation du Mae Klong (GMKIP)

Le Grand projet d'irrigation du Mae Klong (*The Greater Mae Klong Irrigation Project*, GMKIP) est mis en place par RID avec l'assistance financière de la Banque Mondiale. Il comprend le barrage de dérivation Vajiralongkorn (VJK) considéré comme son noyau, les réseaux des canaux d'irrigation et de drainage, et les zones d'aménagement parcellaire.

Les objectifs principaux sont de soutenir et d'augmenter les productions agricoles sur les périmètres irrigués d'environ 400 000 hectares situés sur les deux rives du fleuve Mae Klong.



Le barrage de dérivation Vajiralongkorn, qui porte le nom du prince héritier, a été construit entre 1964 et 1970 sur le coude du fleuve Mae Klong à District Tha Muang, environ 14 km au sud de la ville de Kanchanaburi. C'est avant tout un barrage de dérivation sans gestion de stock d'eau. Le niveau maximum du plan d'eau est de l'ordre de 22,50 m (snm).

Les réseaux de canaux d'irrigation qui s'étendent sur une longueur de plus de 1 700 km ont été progressivement mis en place principalement pendant la deuxième phase d'aménagement du GMKIP depuis 1970. La construction des réseaux d'irrigation et de drainage a été initialement programmée en trois phases. Mais la réalisation de la troisième phase est restée inachevée en raison des contraintes économiques et financières ainsi que de la limitation des ressources disponibles.

Plusieurs prises d'eau sont implantées en amont du barrage Vajiralongkorn. Sur la rive droite les canaux 1R et 2R prennent de l'eau directement du fleuve. Tandis que le canal d'amenée (*Feeder Canal*) prélève de l'eau pour les réseaux de canaux de rive

gauche, y compris le LMC (*Left Main Canal* : Canal principal de rive gauche), les canaux 1L et 2L (Figure II-2).

Les canaux Jarakae Sampan et Thasarn-Bangpla ont été conçus dès l'origine comme les drains principaux du GMKIP. Une prise d'eau en amont du barrage VJK et le canal d'amenée a été construite afin d'amener de l'eau du Mae Klong au canal Jarakae Sampan. Quant au canal Thasarn-Bangpla, une prise d'eau sur le LMC permet de transférer de l'eau à ce dernier.

Le canal d'amenée de l'eau potable (Canal Prapa) pour la métropole urbaine de Bangkok, d'une capacité de $45 \text{ m}^3/\text{s}$, est en cours de la construction (en 2000). Une prise d'eau en amont de VJK sera réalisée. Le canal d'amenée s'allonge parallèlement au Canal 2L et traverse le fleuve Tha Chin à l'aide d'un siphon jusqu'à la station de pompage au bord de Tha Chin, puis il atteint l'usine de traitement de l'eau potable Maha Sawat située au nord-ouest de Bangkok.

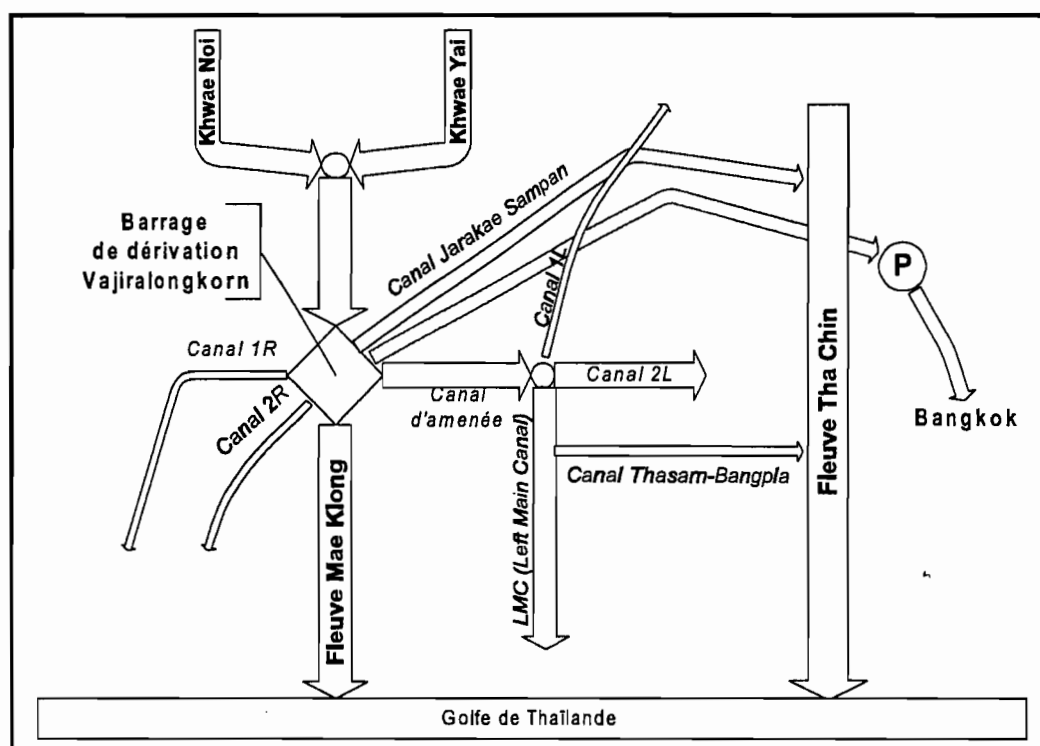


Figure II-2 : Schéma de représentation des canaux du GMKIP
(modifié d'après Vudhivanich *et al.*, 1998)

L'aménagement parcellaire (on-farm development). Du fait de contraintes budgétaires, l'aménagement hydraulique du GMKIP ne se fait que jusqu'au niveau des canaux tertiaires. Les parcelles situées au sein même des périmètres irrigués ne bénéficient pas toujours d'un aménagement. Grâce aux appuis techniques et financiers du gouvernement japonais, les aménagements parcellaires du GMKIP ont toutefois été entrepris. Les zones d'aménagement parcellaire peuvent se classer, selon des critères d'accessibilités routière et hydrique (cf. Tableau II-2), en cinq types : (1) intensif, (2) extensif, (3) Ditch&Dike³ aligné, (4) Ditch&Dike tortueux, et (5) canal enterré.

Le niveau de perfectionnement dépend directement du coût d'aménagement. Les deux premiers sont les plus perfectionnés, et aussi les plus coûteux. Grâce à la réalisation des réseaux de transport, et de canaux d'irrigation et de drainage jusqu'au niveau parcellaire, une accessibilité routière et hydrique est possible pour toutes les parcelles. La seule différence entre les deux est que le remembrement parcellaire, qui facilite les travaux mécanisés, se fait uniquement pour le type intensif. En raison du lourd investissement, le type intensif ne représente que 0,1% de la superficie totale de GMKIP. Tandis que le type extensif occupe plus de 13% de la superficie totale (cf. Figure II-3).

Pour les aménagements des autres trois types, on ne réalise que des canaux d'amenée de l'eau aux parcelles. Le troisième type d'aménagement parcellaire '*Ditch&Dike aligné*', étant le plus répandu parmi les cinq types (23% de la superficie totale de GMKIP) se caractérise par une configuration des canaux en ligne droite et le niveau d'eau du canal supérieur à celui de parcelle. Le quatrième type '*Ditch&Dike tortueux*' qui se différencie du 3^e type par le délinéament de canal représente 5% de la superficie totale. Les canaux enterrés dans les zones du 5^e type d'aménagement, occasionnellement appelé '*Klong Pracha-a-sa*' (Canal de volontaires publics) sont creusés par les paysans. Ce type d'aménagement représente 8% de la superficie.

Il est remarquable que les aménagements parcellaires ne se fassent que 53% de la superficie totale du GMKIP. Cela signifie que presque la moitié des parcelles au sein du GMKIP ne possède pas d'accès direct à l'eau de canal d'irrigation.

³ Ditch&Dike : système de canaux et de digues permettant à l'eau d'arriver à un niveau supérieur à celui des terres.

Tableau II-2 : Classement des types d'aménagement parcellaire

Type d'aménagement parcellaire	Remembrement parcellaire	Accessibilité routière	Accessibilité hydrique	Condition de canal d'amenée de l'eau aux parcelles
(1) Intensif	☒	☒	☒	
(2) Extensif	☐	☒	☒	
(3) Ditch&Dike aligné	☐	☐	☒	élevée/alignée
(4) Ditch&Dike contourné	☐	☐	☒	élevée/tortueuse
(5) Canal enterré	☐	☐	☒	enterrée

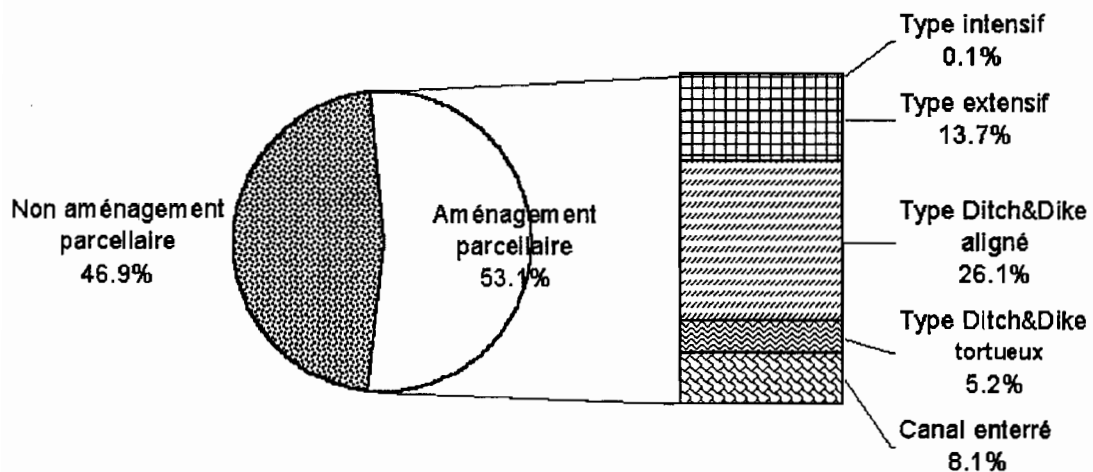


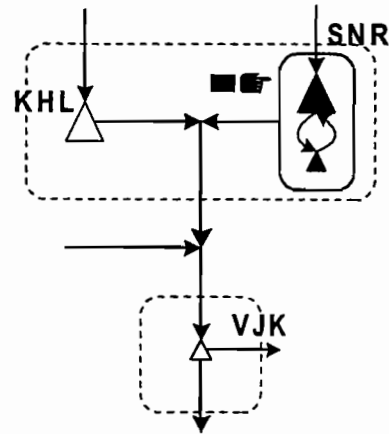
Figure II-3 : Types d'aménagements parcellaires du GMKIP en pourcentage de la superficie totale

II-2.2 Système de Srinagarind

Le système de Srinagarind est composé de deux barrages en série situés au long de la rivière Khwae Yai :

- Barrage-réservoir Srinagarind (SNR) ;
- Barrage de régulation journalière Tha Thung Na (TTN).

Le fonctionnement de Srinagarind est étroitement lié à celui de Tha Thung Na. Les lâchers de Srinagarind deviennent apports à Tha Thung Na ; les apports latéraux issus de bassins intermédiaires sont quasiment nuls, en particulier pendant les périodes sèches. On considère donc les deux en tant qu'un seul système, intitulé '*système de Srinagarind*'.



Le barrage-réservoir Srinagarind, qui porte le nom de la mère du roi Bhumipol (Rama IX), est situé à Ban Chao Nen, District de Si Sawat, d'environ 64 km nord-ouest de la ville de Kanchanaburi. Il est le premier barrage-réservoir à usages multiples (hydroélectricité, irrigation, soutien d'étiage, protection contre des crues) proposé dans le schéma directeur d'aménagement du bassin du Mae Klong, construit entre 1973 et 1980 par l'EGAT.

C'est un barrage en enrochements à noyau en terre compactée ayant 140 m de hauteur, 610 m de longueur en crête. Le volume de la retenue de 17 745 millions de m³, dont 7 470 millions de m³ sont mobilisables ; elle s'étend sur une surface maximale de 419 km².

Trois turbines hydroélectriques (unités 1, 2 et 3) de 120 MW ont été mises en service en février 1980 ; deux turbines réversibles de capacité de 180 MW (unité 4 et 5), en janvier 1986 et en mars 1991 respectivement. La mise en eau de la retenue a duré trois ans depuis 1977 jusqu'à la mise en marche des groupes hydroélectriques en 1980.

Différents niveaux du plan d'eau sont définis afin caractériser toutes les composantes du fonctionnement de ce système. Ces niveaux sont rapportés au niveau moyen de la mer (snm). Le premier groupe concerne les contraintes physiques du barrage (Figure II-5).

- niveau maximum de la retenue : 182,4 m.
- niveau de prise des conduites forcées : 139 m pour les turbines 1, 2, et 3 et 151 m pour les turbines 4 et 5.
- niveau minimum de sollicitation : 55 m. C'est le niveau d'une conduite de dérivation d'eau pendant la construction. Elle est ultérieurement utilisée comme vidange (vanne de fond).

Le second groupe concerne les règles de gestion définies par l'exploitant sur des critères empiriques souvent basés sur l'expérience.

- niveau supérieur de fonctionnement : 180 m pour la sécurité du barrage en cas de crues.
- niveau supérieur intra-annuel de fonctionnement (Upper Rule Curve, URC), égal au niveau supérieur de fonctionnement en novembre, abaissé en saison sèche et avant la saison des pluies avec un objectif de protection contre les crues en aval (Figure II-6).
- niveaux de fonctionnement optimal des groupes hydroélectriques, à partir duquel on a l'efficacité maximale prévue. : Les turbines 1, 2 et 3 requièrent un niveau de la retenue de l'ordre de 160,5 m ; les turbines 4 et 5, 168 m. En pratique le dernier est préférable.
- niveaux minimaux de fonctionnement des groupes, en dessous desquels ils ne fonctionnent plus à cause de la trop faible charge hydraulique. Les turbines 1, 2 et 3 se limitent au niveau de 152,2 m ; les turbines 4 et 5, de 162 m.
- niveau inférieur intra-annuel de fonctionnement (Lower Rule Curve, LRC), relevé en fin de la saison humide pour assurer l'approvisionnement en eau durant les périodes sèches (Figure II-6).
- Le niveau inférieur de fonctionnement de 159 m donné par EGAT. Mais en exploitation, les règles en vigueur fixe ce niveau à 165 m en années normales et à 162 m en années sèches.

Le barrage de régulation journalière Tha Thung Na, d'une retenue de taille plus modeste de 54,8 millions de m³, est situé sur la même rivière à 25 km en aval du barrage Srinagarind. Il est construit pour assurer une rétention journalière. La construction a commencé au cours de la mise en eau de la retenue de Srinagarind en fin de l'année 1977 et s'est terminée en décembre 1981. Le barrage a commencé à fonctionner après la mise en place de deux turbines de 19 MW chacune (en décembre 1981 et en février 1982).

Malgré la retenue minuscule par rapport aux deux gros barrages-réservoirs, les règles/contraintes de gestion sont essentiellement définies par :

- Le niveau maximum de la retenue : 59,7 m.
- Le niveau supérieur de fonctionnement égal au niveau maximum de la retenue du fait que les apports naturels sont contrôlés par barrage Srinagarind.
- Le niveau de fonctionnement optimal des groupes hydroélectriques : 55,5 m.
- Le niveau des conduites forcées : 46,5 m.

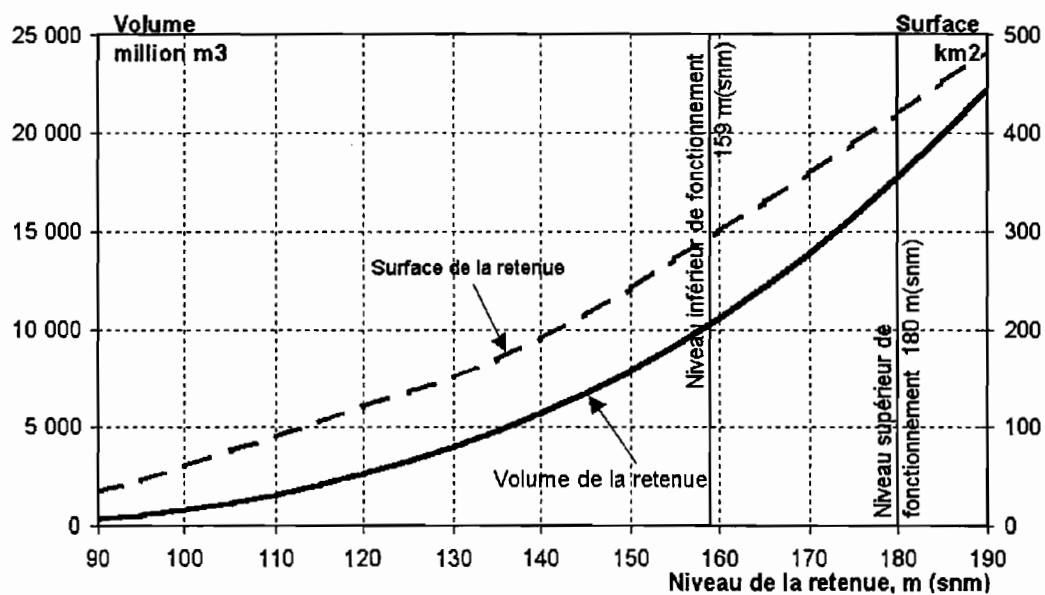


Figure II-4 : Courbes caractéristiques du Barrage Srinagarind :
Hauteur-Volume et Hauteur-Surface

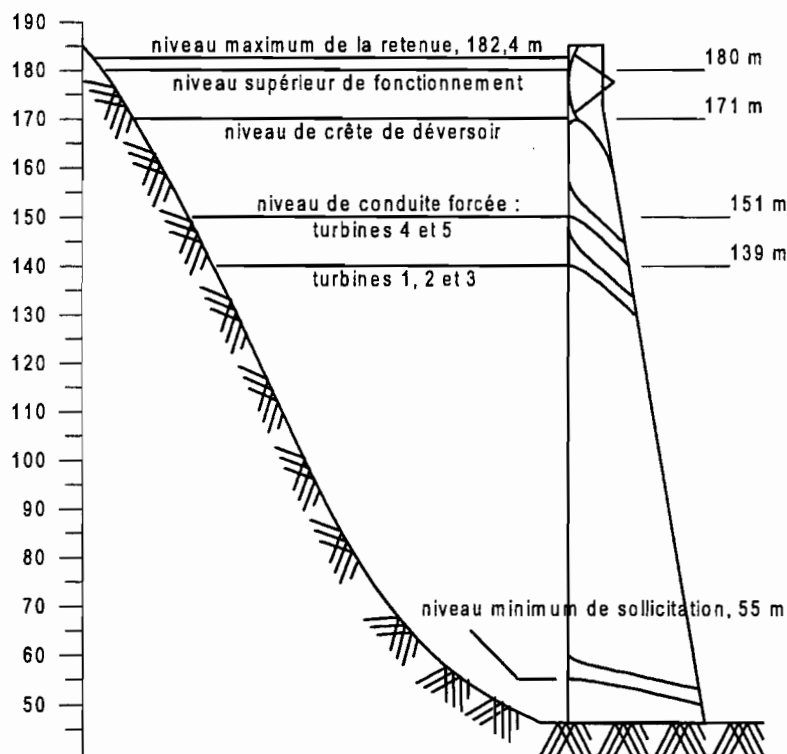


Figure II-5 : Contraintes physiques de gestion du barrage Srinagarind

Les courbes-enveloppes d'opération intra-annuelle de Srinagarind.

	Janv.	Févr.	Mar.	Avril	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
URC	179,4	178,6	177,6	176,6	175,8	175,2	175,3	176,5	178,2	179,5	180,0	179,8
LRC	162,65	162,0	161,1	160,2	159,6	159,0	159,25	160,4	162,6	163,1	163,35	163,2

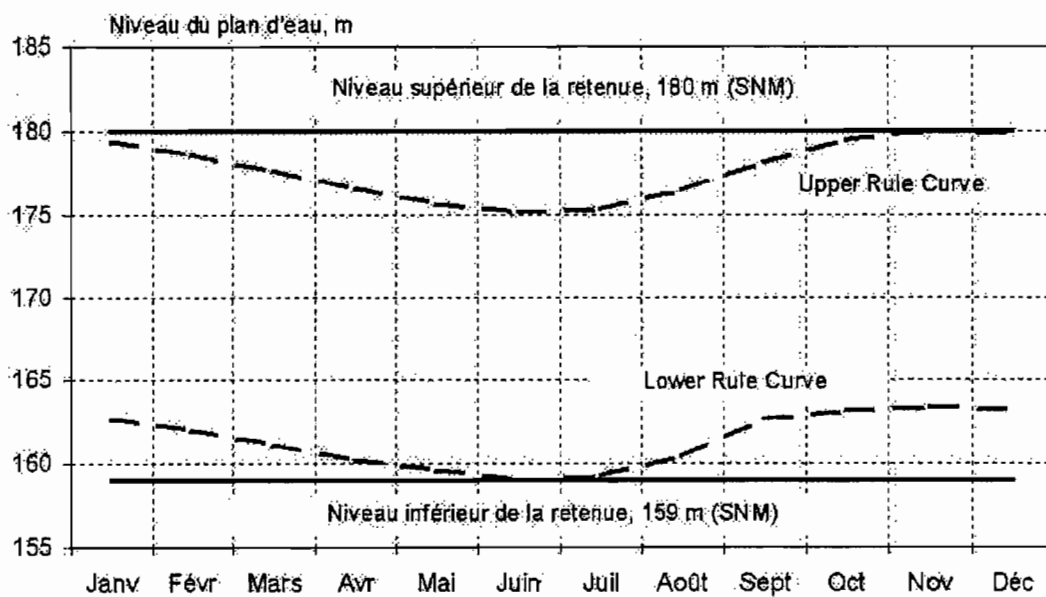


Figure II-6 : Règles en vigueur de gestion du barrage-réservoir Srinagarind

II-2.3 Barrage de Khao Laem

Le barrage-réservoir Khao Laem (KHL) est situé au nord-ouest du bassin du Mae Klong, à 6 km de la ville de Thong Pha Phum, sur la rivière Khwae Noi qui est un des deux affluents principaux du Mae Klong.

C'est un barrage réalisé en vue d'usages multiples (irrigation, hydro-électricité, soutien d'étiage, protection contre des crues), construit par l'EGAT.

Ce barrage en enrochement à couche de béton mesure 1 019 m de longueur de crête, et 92 m de hauteur. Le volume total de la retenue de 8 860 millions de m³ couvre une surface maximale de 388 km². Le volume mobilisable est de l'ordre de 5 849 millions de m³.

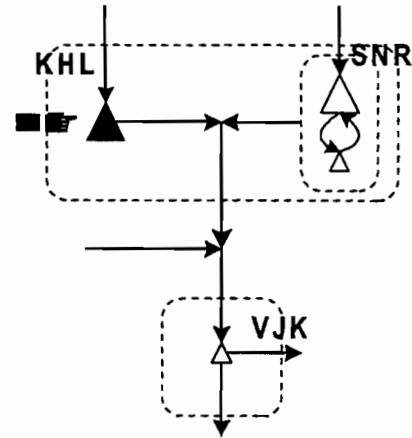
La mise en eau de la retenue était terminée en octobre 1984, mais l'exploitation hydroélectrique du barrage n'a débuté qu'en avril 1985 après l'installation de 3 unités de turbines (janvier, mars et avril 85) de 100 MW chacune.

Les divers niveaux du plan d'eau sont définis de même façon que ceux du barrage Srinagarind. Les règles et les contraintes de Khao Laem apparaissent moins compliquées, du fait que les trois groupes hydroélectriques de Khao Laem sont identiques. Les contraintes physiques du barrage sont illustrées dans la Figure II-8.

- niveau maximum de la retenue : 160,5 m.
- niveau de crête de déversoir : 146 m.
- niveau minimum de sollicitation : 120 m.

Les règles de gestion de la retenue sont les suivants.

- niveau supérieur de fonctionnement : 155 m.
- niveau supérieur intra-annuel de fonctionnement ou URC (Figure II-9).
- niveau de fonctionnement optimal des groupes hydroélectriques : 147 m.
- niveau inférieur intra-annuel de fonctionnement ou LRC (Figure II-9).
- niveau minimum de fonctionnement des centrales hydroélectriques : 135 m.
- niveau inférieur de fonctionnement de 135 m, égal au niveau minimum de fonctionnement des turbines



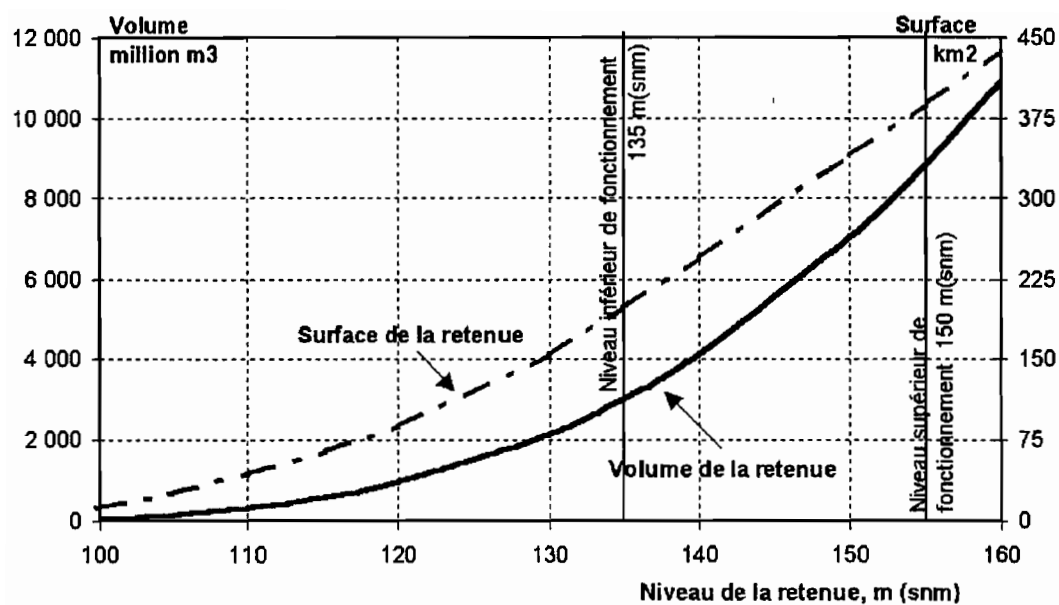


Figure II-7 : Courbes caractéristiques du Barrage Khao Laem : Hauteur-Volume et Hauteur-Surface

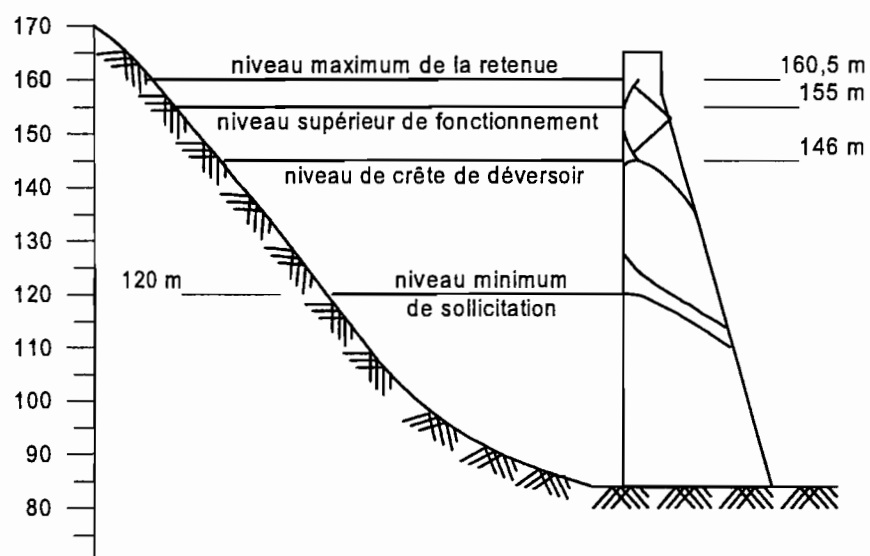


Figure II-8 : Contraintes physiques de gestion du barrage Khao Laem

Les courbes-enveloppes d'opération intra-annuelle de Khao Laem

	Janv.	Févr.	Mar	Avril	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
URC	154,0	153,0	152,0	151,0	150,0	150,0	151,0	152,0	154,0	155,0	155,0	155,0
LRC	142,2	141,2	140,2	138,5	137,0	137,0	138,5	140,0	142,0	142,95	143,1	143,0

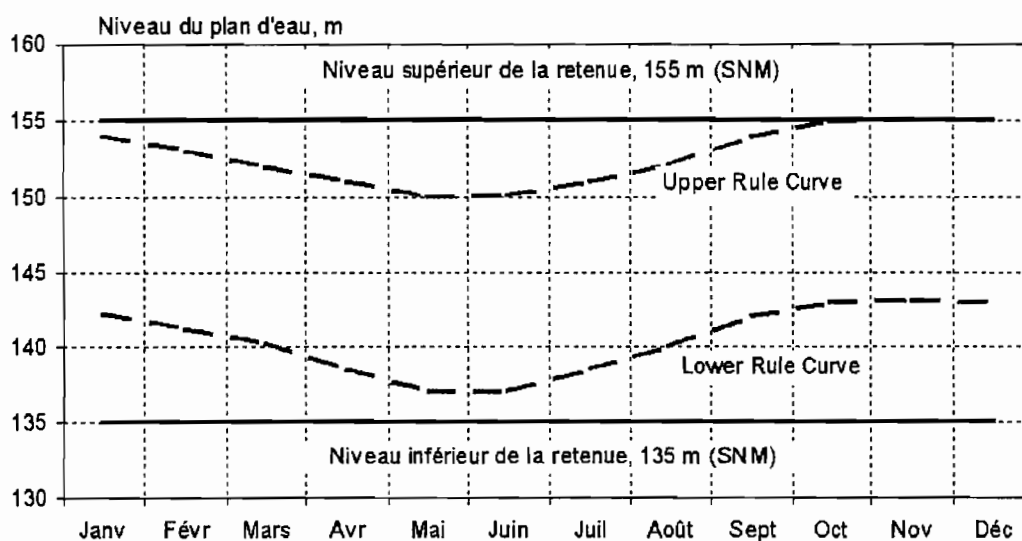


Figure II-9 : Règles en vigueur de gestion du barrage Khao Laem

III. LE ROLE DE LA SOCIETE

III-1 PRESSION DEMOGRAPHIQUE

L'étude démographique dans un bassin hydrographique pose un problème de zonage, car les données sont collectées dans la plupart des cas selon les limites administratives. Le bassin du Mae Klong ne fait pas exception ; nous avons obtenu les données de population par provinces, d'une part, du Département d'Administration Local (DoLA), et, d'autre part, de l'Office National de Statistique (NSO). Les provinces retenues dans ce chapitre sont celles qui se situent non seulement dans les limites du bassin et mais aussi dans les sites d'usages de l'eau représentés en foncée sur la Figure III-1, Cadres (a) et (b).

Si nous retenons la limite du bassin définie par le Comité National d'Hydrologie en découpant la zone du GMKIP en deux parties (voir Figure 1), seulement 3 provinces sont prises en compte dans l'analyse : Kanchanaburi, Ratchaburi, et Samut Songkhram. En considérant la totalité de la zone du GMKIP, il faut rajouter les provinces de Nakhon Pathom et Samut Sakhon. Les données de population de la partie amont de la Khwae Yai, appartenant à un district de la province Tak, ne sont pas incluses parce que la majorité de Tak se localise à l'extérieur de la limite du bassin.

En premier lieu, nous observons que la population de Thaïlande a dépassé, dans le courant de l'année 1996, 60 millions d'habitants avec un faible taux d'accroissement (inférieur à 1% par an durant 1993-1997). La capitale Bangkok accueille près de 10% de la population du pays. Si nous rajoutons les arrondissements périphériques (provinces de Nonthaburi et Samut Prakarn), les services publics de la Région Métropolitaine de Bangkok doivent se préoccuper d'un total de 7,3 millions d'habitants (données de 1996). On note cependant que les données de population provenant de la statistique du DoLA sont inférieures à celles prévues par Thai DCI *et al.* (1990) qui a évalué la population de la Région Métropolitaine en 1997 à environ 9,6 millions d'habitants. Dans le même rapport, Thai DCI estime que la population de la Région Métropolitaine pourrait atteindre 15,5 millions d'habitants en 2017.

Dans le cas du bassin du Mae Klong, au cours des 30 années (1966-1996), la population des 3 provinces dans les limites du bassin s'accroît de 0,93 millions à 1,77 millions, soit 90%. En incluant les zones d'usage de l'eau (5 provinces), le taux de croissance est comparable, avec une valeur de 87% : la population augmente de 1,56 millions à 2,91 millions durant cette période de 30 années. Malgré tout, la population

totale du bassin, y compris celle des zones d'usages de l'eau agricole ne dépasse pas la moitié de la capitale.

En outre, la répartition de population est très inégale. Nous retrouvons une forte densité dans les zones urbaines et dans la plaine (Figure III-1, Cadre c). La densité de population dans la capitale est supérieure à 3 000 habitants/km², tandis que les arrondissements intérieurs tels que Nonthaburi et Samut Prakarn disposent d'une densité qui avoisine 1 000 habitants/km². Les provinces Pathum Thani, Nakhon Pathom, Samut Sakhon et Samut Songkhram, qui peuvent être considérées comme les arrondissements extérieurs, possèdent une densité de population comprises entre 300 et 500 habitants/km².

Dans les régions montagneuses, les densités de population des provinces intérieures du bassin du Mae Klong telles que Ratchaburi et Kanchanaburi, s'avèrent nettement plus faibles (176 et 36 habitants/km², respectivement). De plus, les habitants s'installent généralement dans la plaine ou le long des cours d'eau. Cela rend les zones montagneuses dans les hauts du bassin très peu peuplées.

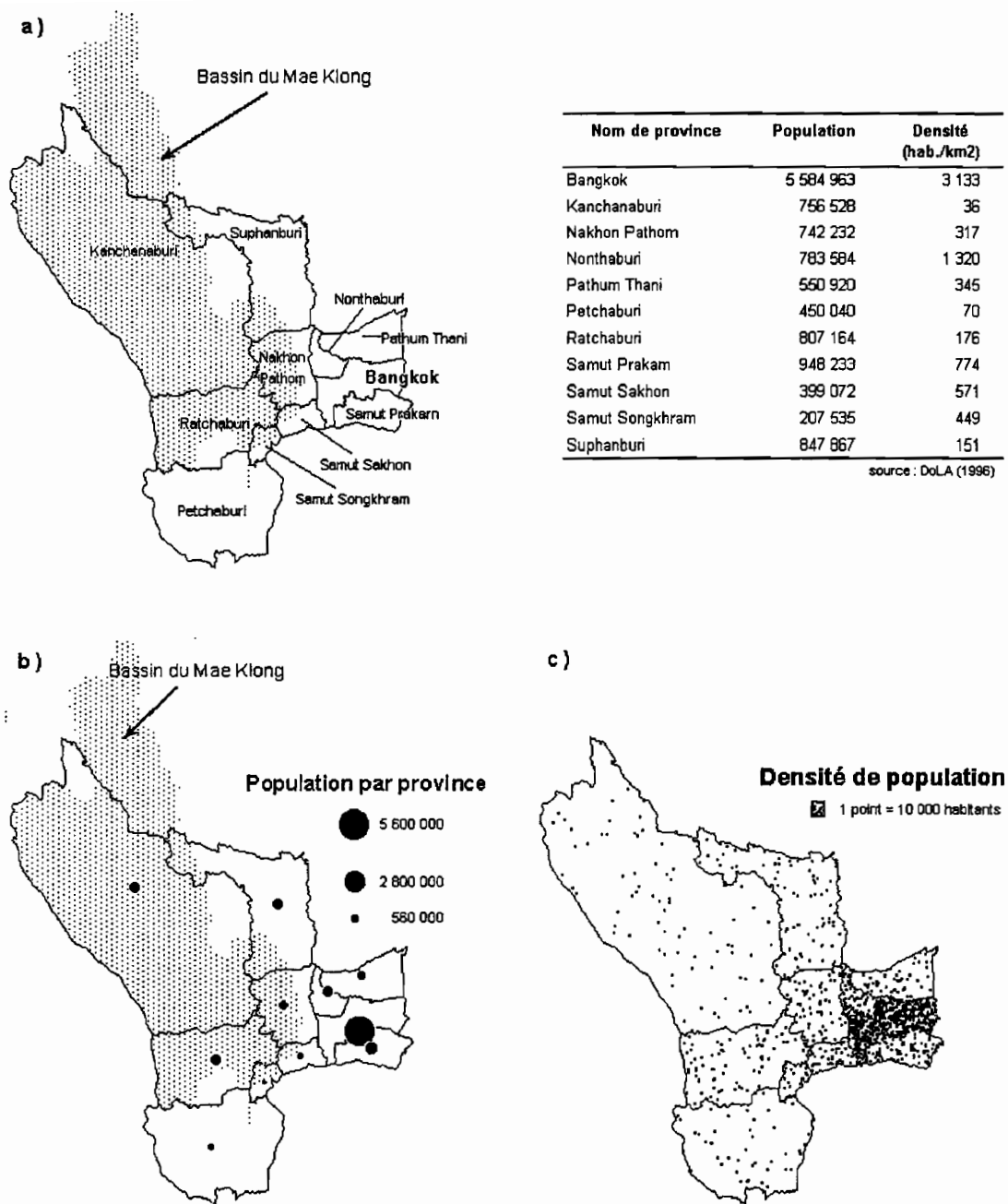


Figure III-1 : Population dans les provinces du bassin du Mae Klong et des zones d'usages de l'eau en 1996 (source : DoLA)

III-2 EAU POUR L'AGRICULTURE

Le secteur agricole de Thaïlande s'avère d'emblée important, car il concerne la l'activité principale de la majorité de la population du pays. C'est une des priorités de la politique du gouvernement.

a) *Cultures dans les périmètres irrigués*

Les surfaces cultivées desservies par le GMKIP s'accroissent à la suite de l'avancement de la mise en place de réseaux d'irrigation. Un saut important a été franchi à la mise en service du réseau d'irrigation de la 2^e phase d'aménagement en 1988. La surface cultivée en saison humide est passée d'environ 200 000 hectares à plus de 300 000 hectares (précisément, 325 000 hectares en moyenne sur les années 1993-1998) ; elle tend toutefois à légèrement diminuer au cours des dernières années.

En revanche la surface cultivée en saison sèche ne cesse pas s'étendre, elle est presque égale à celle de la saison humide en 1998. En moyenne sur les six dernières années elle représente d'environ 82% de la surface cultivée en saison humide.

En vue de la gestion opérationnelle du GMKIP, les surfaces cultivées sont divisées en 5 groupes principaux (cf. Figure III-3) : rizière, champs de canne à sucre, vergers fruitiers, jardins maraîchers, et aquaculture.

Les rizières dominent avec 44% de la surface cultivée du GMKIP. Bien qu'étant la culture la plus étendue dans le bassin hydrographique, zones irriguées et pluviales confondues, la canne à sucre n'occupe que 26% au sein des périmètres irrigués. Les vergers fruitiers, les jardins maraîchers et l'aquaculture occupent respectivement 18%, 9% et 3%.

Les variations saisonnières de surface cultivée sont essentiellement dues à la pratique de riziculture. La surface cultivée de riz en saison sèche ne représente que 62% de la surface de saison humide, alors que la variation est quasiment nulle pour les autres cultures.

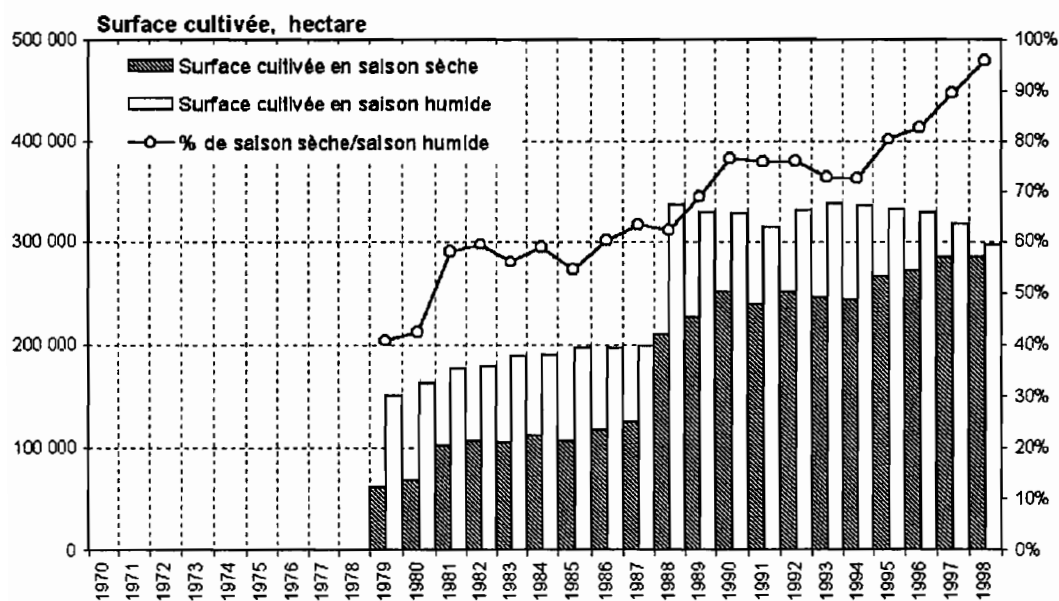


Figure III-2 : Surfaces cultivées au sein du GMKIP en saison sèche et en saison humide

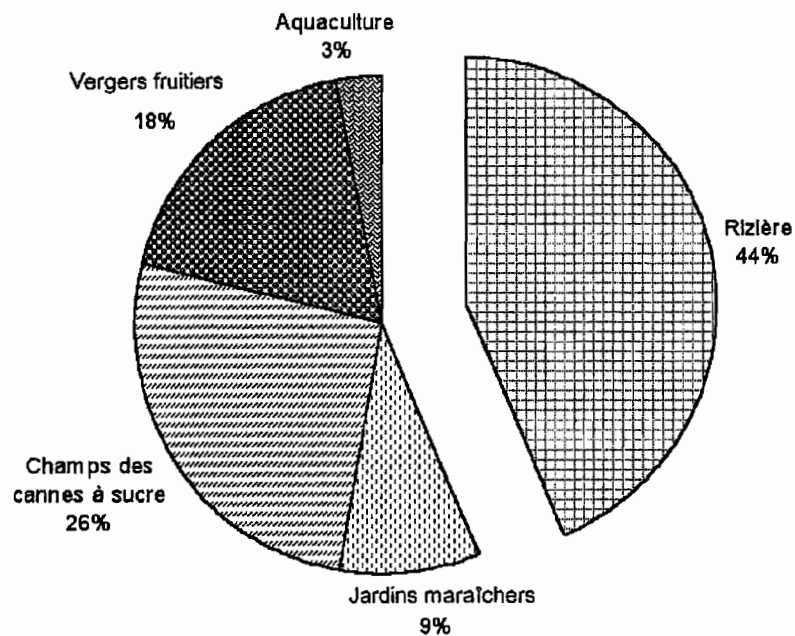


Figure III-3 : Les cinq principaux groupes de cultures au sein du GMKIP

b) *Prélèvement d'eau dans le système du Mae Klong*

Les prélèvements d'eau pour les périmètres irrigués au sein du GMKIP ont progressivement augmenté après l'achèvement du barrage de dérivation Vajiralongkorn et du réseau d'irrigation en 1970. L'augmentation du prélèvement est considérable, dès lors que le réseau d'irrigation de la deuxième phase d'aménagement est mis en service en 1988.

Le volume d'eau prélevé est doublé, passant d'environ 2,5 milliards de m³/an à 5 milliards de m³/an. Depuis 1988, le volume prélevé en saison sèche devient plus important que celui capté en saison humide. Toutefois on observe des différences selon les années : le volume maximum atteint 5,9 milliards de m³ en 1997, tandis que nous observons un prélèvement minimum de 4,3 milliards de m³ en 1996.

La variation saisonnière de prélèvement dépend des demandes agricoles qui se caractérisent par deux pics de volume d'eau prélevé (Figure III-5). La saison sèche occupe la première moitié d'année (janvier à juin) ; la saison humide, la dernière moitié (juillet à décembre). Le volume d'eau prélevé en saison humide est légèrement inférieur à celui en saison sèche (2,3 milliards de m³ contre 2,7), tandis que la variation inter-annuelle est moins sensible en saison sèche.

Une limitation des ressources en eau disponibles (précipitations et lâchers des barrages) a conduit à une restriction de l'usage de l'eau au cours des dernières années sèches consécutives (1989-1993). En conséquence, plusieurs grands projets d'aménagement hydro-agricole dans le bassin ont été abandonnés. La variabilité des prélèvements d'eau pour le système du Mae Klong dépend désormais des situations climatique et économique.

La demande varie d'une année à l'autre, d'une part, parce que la variation pluviométrique conditionne la demande en eau des plantes, car l'insuffisance des précipitations engendre une augmentation de prélèvement d'eau d'irrigation, particulièrement en saison humide pendant laquelle les cultures dépendent beaucoup du volume et de la distribution des pluies. D'autre part, parce que la surface de riziculture en saison sèche peut s'étendre de façon incontrôlable, quand le prix de vente du riz était en hausse l'année précédente.

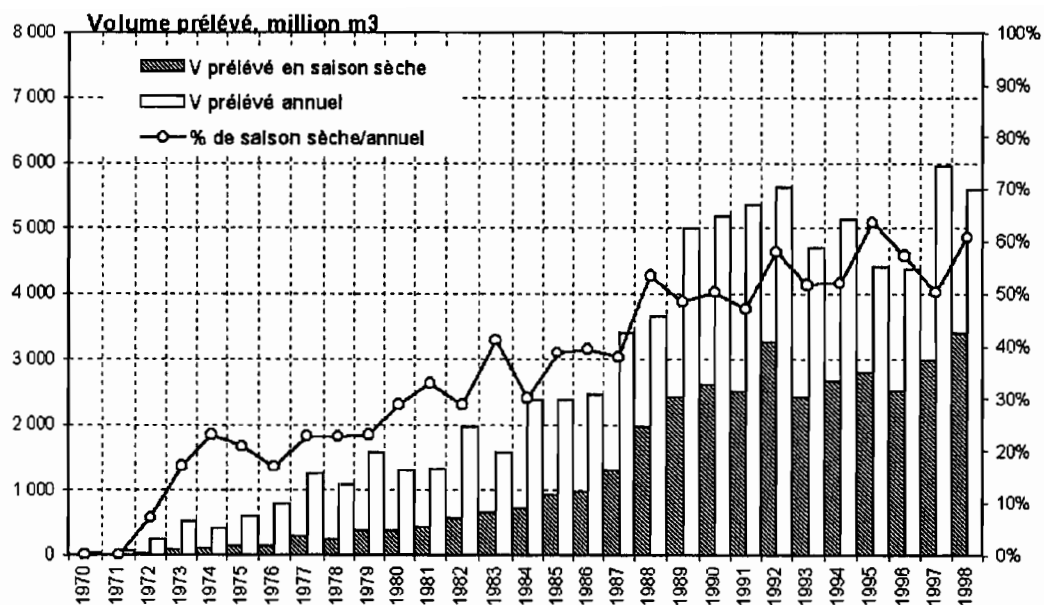


Figure III-4 : Volume d'eau prélevé au barrage Vajiralongkorn depuis 1970

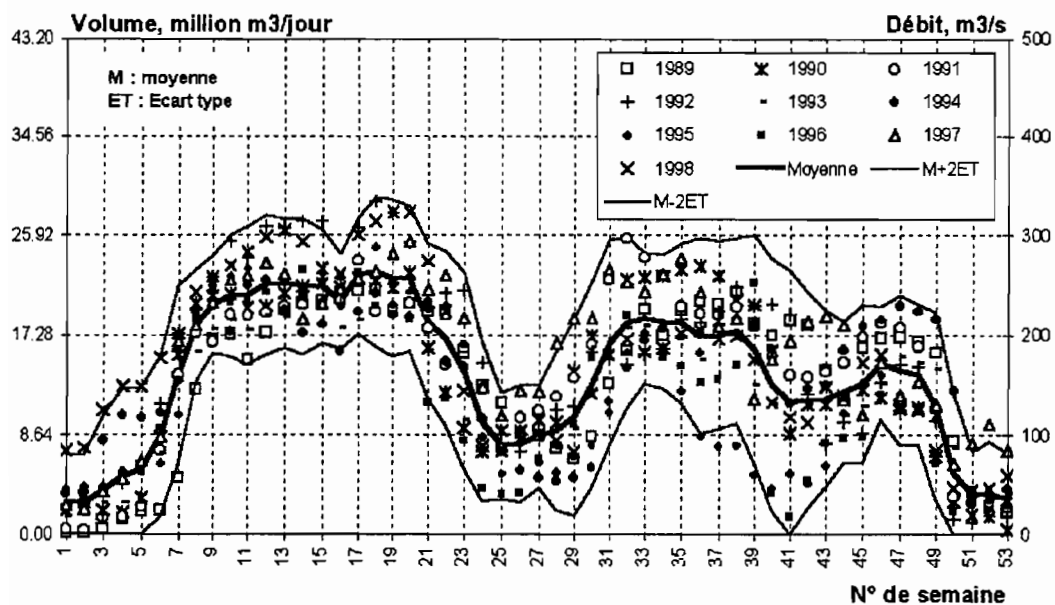


Figure III-5 : Variation saisonnière du volume d'eau prélevé au barrage Vajiralongkorn entre 1989-1998 (en moyenne hebdomadaire)

c) *Prélèvement d'eau pour le fleuve Tha Chin*

Les transferts d'eau du bassin du Mae Klong vers le bassin du Tha Chin contribuent considérablement aux écoulements de ce dernier qui traverse des villes et des zones agricoles intensives de la Plaine Centrale de Thaïlande.

Deux canaux principaux du système d'irrigation du Mae Klong sont dévolus à cette tâche. Le canal Jarakae Samphan prélève directement dans le fleuve Mae Klong. Le canal Thasarn-Bang Pla se branche sur le canal d'irrigation principal de rive gauche (LMC). Depuis 1989, le volume d'eau transféré au moyen des deux canaux est en moyenne d'un milliard de m³ par an (Figure III-6). Le volume écoulé par le canal Thasarn-Bangpla est deux fois supérieure à celle venant du canal Jarakae Samphan (770 et 350 millions de m³, respectivement).

Les débits prélevés pour le Tha Chin sont les plus importants au milieu de la période sèche (cf. Figure III-7 et Figure III-8). Par contre, l'eau écoulee dans ces canaux pendant les périodes humides serait plutôt de l'eau de drainage en provenance du système du Mae Klong que de l'eau demandée pour le Tha Chin.

En examinant la possibilité d'augmenter ce transfert d'eau dans l'avenir, on note que le volume d'eau transférable est limité par la capacité des canaux, à environ 40 à 50 m³/s pour chacun. Si le transfert d'eau s'effectuait pendant les six mois de la période sèche à la capacité maximum des canaux de 50 m³/s, le prélèvement pour le fleuve Tha Chin serait de 1,5 milliards de m³.

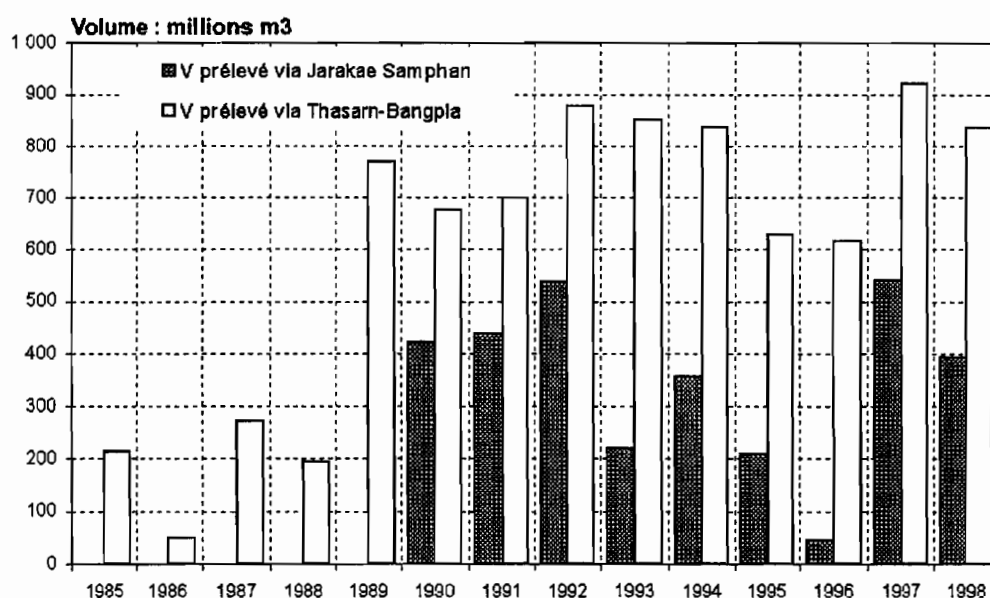


Figure III-6 : Volumes annuels d'eau prélevés vers le fleuve Tha Chin par les canaux Jarakae Samphan et Thasarn-Bangpla (1985-1998).

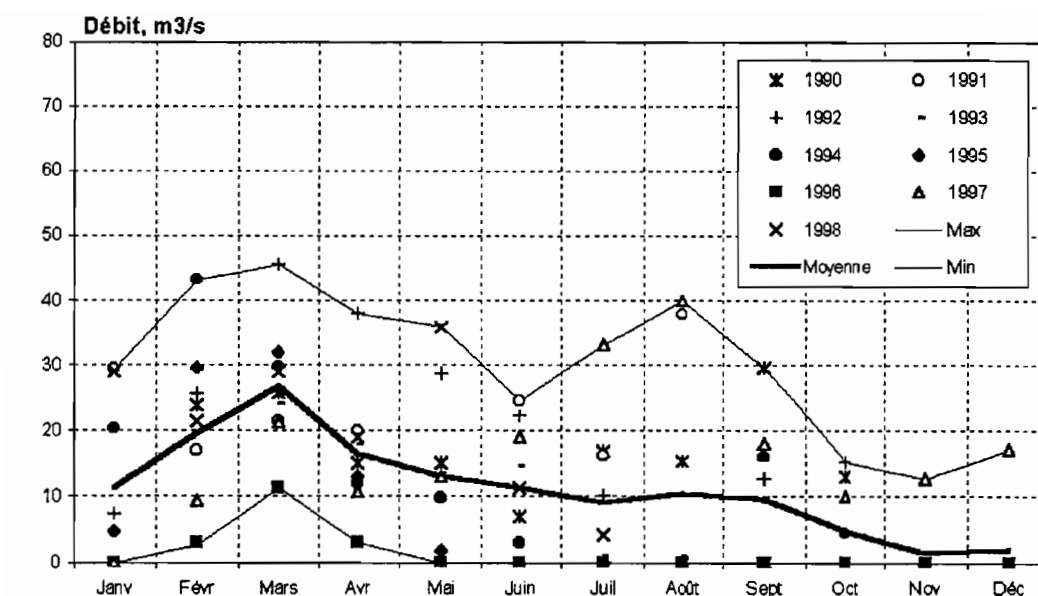


Figure III-7 : Variation saisonnière des débits prélevés du canal Jarakae Samphan (pas de temps mensuel)

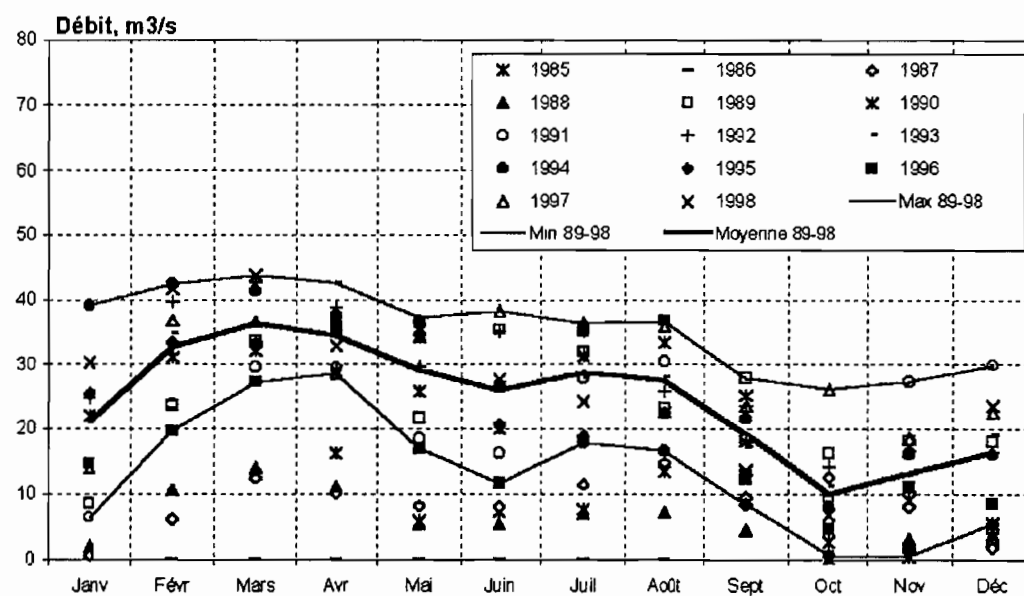


Figure III-8 : Variation saisonnière des débits prélevés du canal Thasarn-Bang Pla (pas de temps mensuel)

III-3 HYDROELECTRICITE

a) *Production nationale d'électricité*

La courbe de la production d'énergie électrique de Thaïlande présente une croissance exponentielle (Figure III-9). On note cependant un frein à cette croissance en 1998 qui fait suite à la crise économique du milieu de l'année 1997. Une proportion importante de la production électrique vient des usines thermiques classiques (charbon, diesel, etc.), ou des usines à turbines à gaz, notamment au cours des dernières années. Les productions d'entreprises privées/semi-privées sont encouragées par une politique libérale de l'Etat.

La production hydroélectrique jouait un rôle primordial pendant des années 60. La part de la production hydroélectrique diminue au fur et à mesure au fil du temps (Figure III-9) ; Ces dernières années elle avoisine 5% de la production totale.

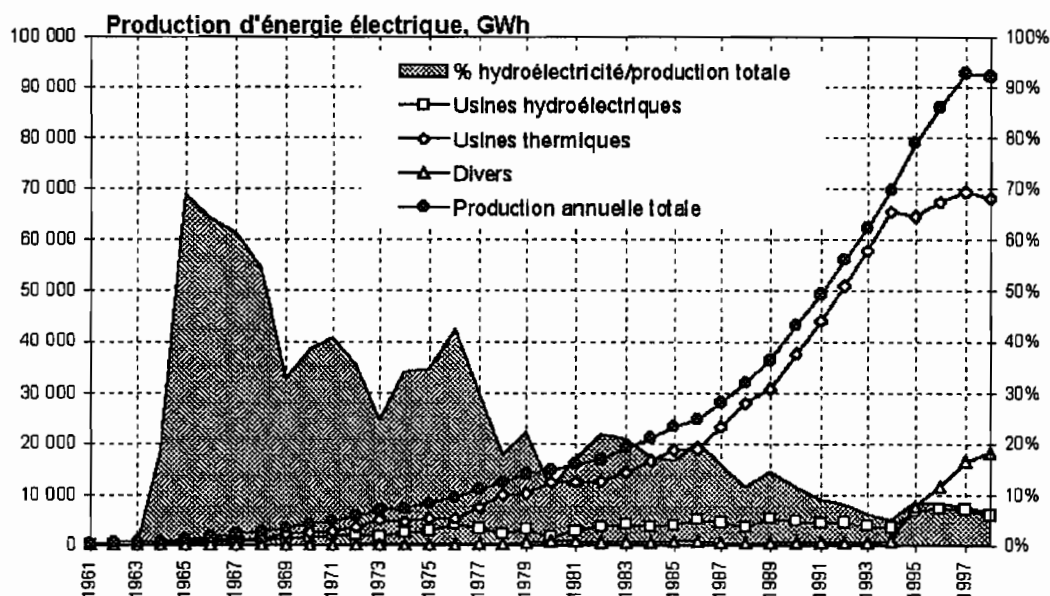


Figure III-9 : Evolution des diverses sources de production électrique au niveau national

b) Production hydroélectrique du système du Mae Klong

Dans le système de production hydroélectrique national, les barrages Bhumibol, Srinagarind, Sirikit, Khao Leam et Ratchaprapa constituent les 5 principaux barrages-réservoirs équipés de turbines. Les quatre premiers barrages, dont deux appartiennent au bassin du Mae Klong fournissent environ 80% de la capacité hydroélectrique installée du pays.

Entre 1995 et 1997, période d'abondance de ressource en eau, la production hydroélectrique annuelle a atteint 7 000 GWh, tandis que la moyenne de la production durant les années sèches antérieures se situe autour de 4 000 GWh.

Le système du Mae Klong (Srinagarind et Khao Laem) contribue à environ 45% de la production hydroélectrique totale. Or, nous remarquons, sur la Figure III-10, que la production du système du Mae Klong est moins sensible à la sécheresse que le reste de la production nationale. Au cours de la période sèche 1991-1994 et malgré une baisse globale de la production, le système du Mae Klong a produit plus de 50% de la production totale.

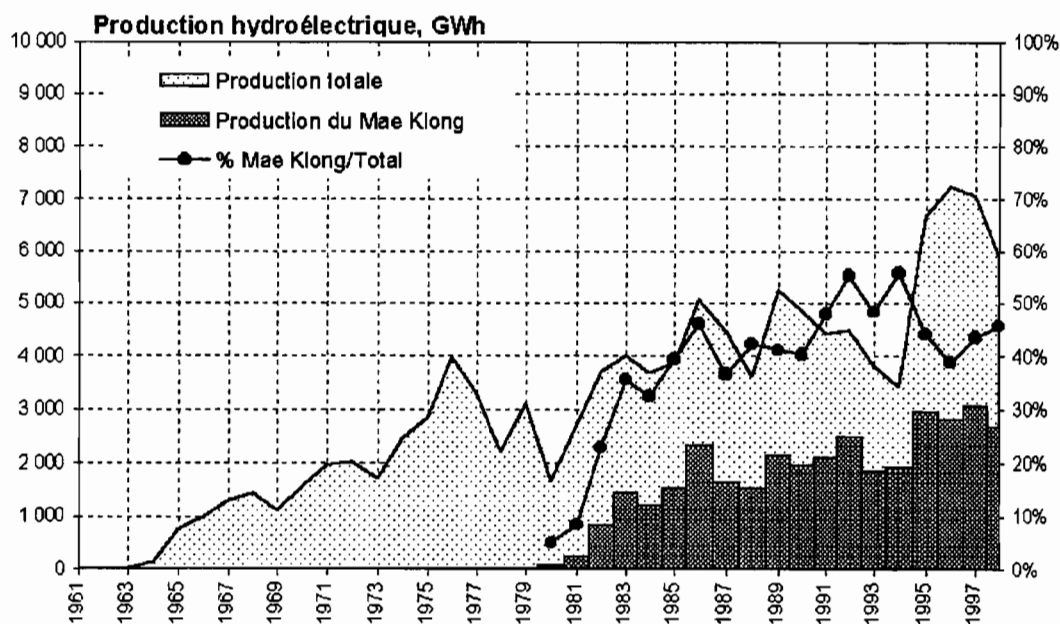


Figure III-10 : Part de la production hydroélectrique du Mae Klong dans la production nationale

c) *Variation saisonnière de la production hydroélectrique*

En examinant la variation de la consommation d'électricité au niveau national sur la Figure III-11, nous percevons une faible variation saisonnière. Un léger abaissement de la consommation est toutefois observé durant la période fraîche de l'année aux mois de décembre, janvier et février. C'est le contraire de qui se passe en France. La baisse saisonnière de température entraîne une diminution de la consommation électrique consécutive à une économie d'utilisation de la climatisation.

La production hydroélectrique n'est pas conditionnée par la consommation électrique parce qu'elle est utilisée en appoint à la production thermique et qu'elle assure surtout les demandes de pointes qui ne varient guère d'une saison à l'autre.

Elle dépend en revanche de la disponibilité des ressources en eau et des autres usages de l'eau. La Figure III-12 montre une forme de variation saisonnière pour la production hydroélectrique qui diffère de celle de la production totale. Deux pics caractéristiques apparaissent correspondants au milieu des deux saisons agricoles. Le pic de saison sèche est dû aux lâchers qui sont turbinés pour satisfaire la demande agricole.

Le second pic en saison humide se produit lors de la période d'abondance en eau. La production hydroélectrique, correspondant aux lâchers turbinés, est fonction de l'état du stock d'eau et des apports entrant dans les retenues. Les lâchers augmentent, d'une part, pour assurer le fonctionnement du barrage comme ouvrage de protection contre les crues des basses vallées, et, d'autre part, pour remplir les objectifs programmés de production hydroélectrique.

Dans le cas du système de production d'hydroélectricité du Mae Klong, la variation en saison humide de l'une année sur l'autre est amplifiée en comparaison avec la variation constatée au niveau national (Figure III-12 et Figure III-13). Par rapport au système du Chao Phraya (barrages Bhumipol et Sirikit), les pluies sont plus abondantes et l'usage de l'eau moins intensif dans les aménagements à l'aval du bassin ; les lâchers d'eau turbinés du système du Mae Klong sont donc supérieurs à la demande aval afin de mieux valoriser la production électrique.

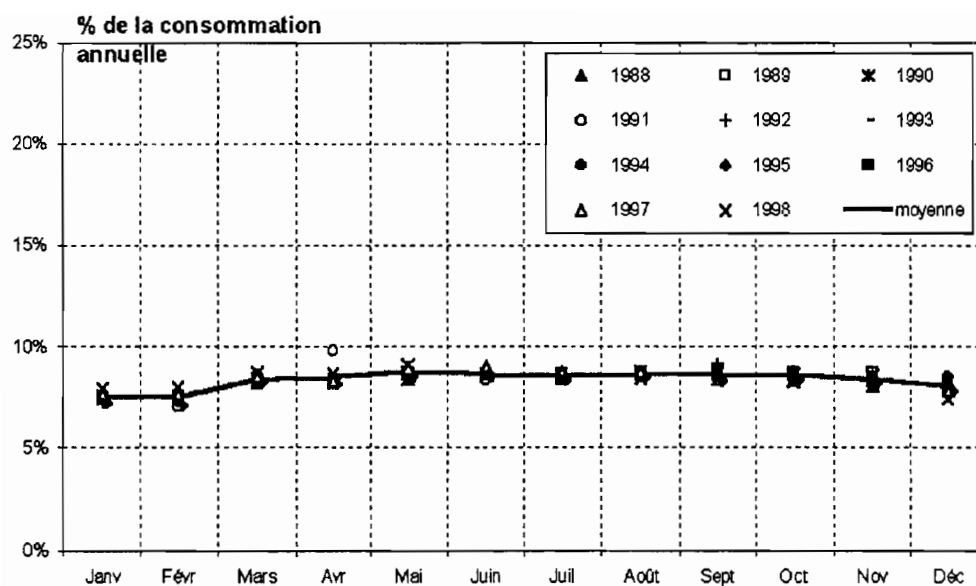


Figure III-11 : Variation saisonnière de la consommation électrique totale au niveau national

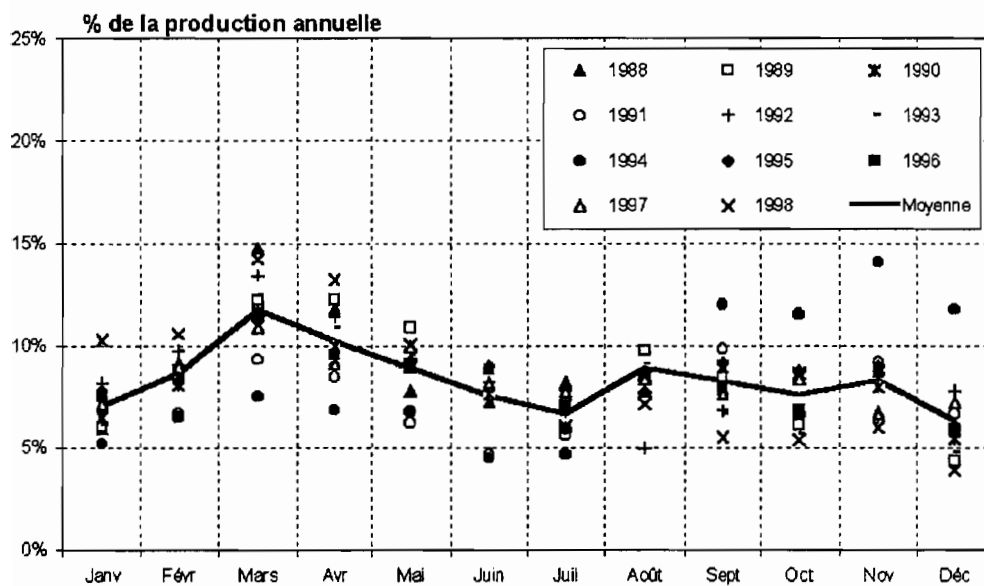


Figure III-12 : Variation saisonnière de la production hydroélectrique au niveau national

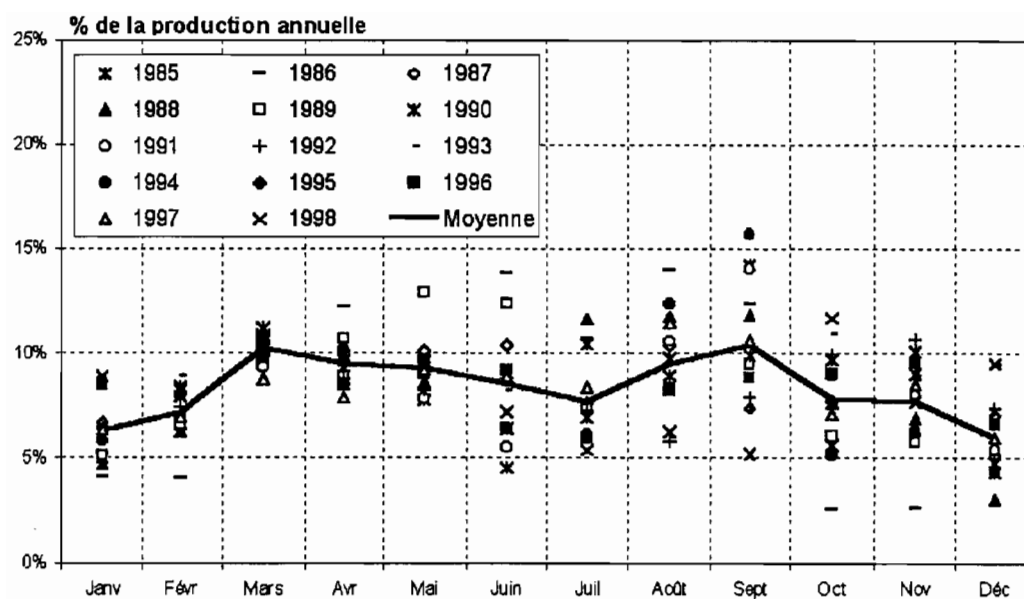


Figure III-13 : Variation saisonnière de la production hydroélectrique du système de Mae Klong

d) *Demande en eau pour la production hydroélectrique*

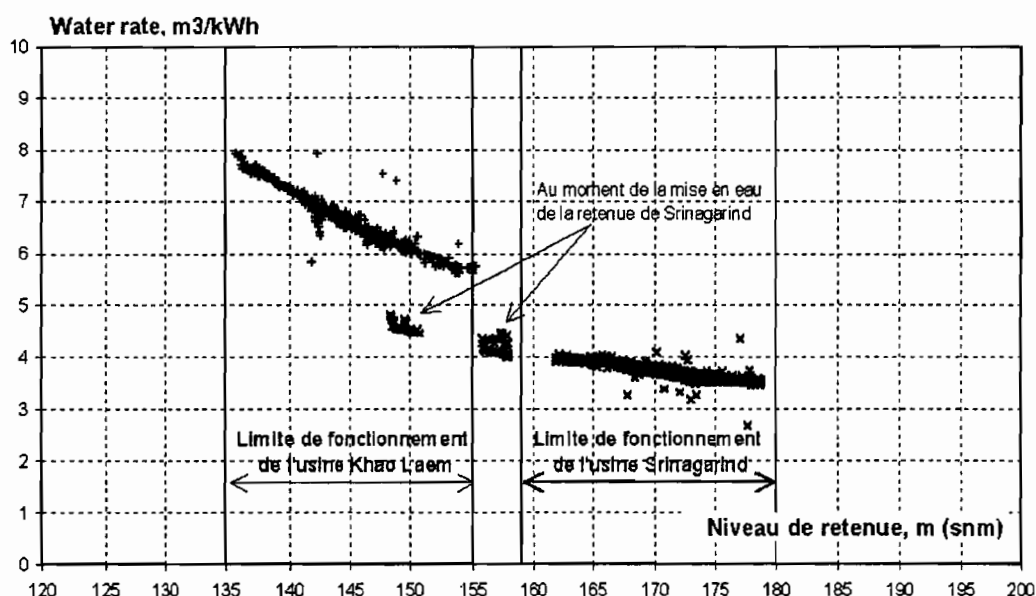
Contrairement à d'autres usages de l'eau, la demande pour la production hydroélectrique n'est pas exprimée en volume d'eau. Pourtant le volume d'eau utilisé pour la production hydroélectrique peut être estimé lors de la programmation annuelle de l'exploitation de retenues. Cette estimation se base sur des données enregistrées en utilisant le « *Water Rate* », nombre de mètre cube d'eau pour produire une unité d'électricité (kWh).

Ce rapport, varie d'une usine hydroélectrique à l'autre, est en fonction de la hauteur de charge hydraulique, c'est-à-dire la différence entre le niveau de retenue et le niveau de turbines. La Figure III-14 présente les *Water Rates* des usines de Srinagarind et de Khao Laem en fonction de la hauteur des retenues. Les moyennes des trois usines du Mae Klong sont aussi résumées dans le Tableau III-1 au-dessous.

Tableau III-1 : Les « *Water rates* » des usines hydroélectriques du Mae Klong

Barrage	Water Rate (m ³ /kWh)
Srinagarind	3,7
Tha Thung Na	22,5
Khao Laem	6,4

Source : EGAT



**Figure III-14 : Nombre de m³ d'eau pour produire un kWh d'énergie électrique
Barrages Srinagarind et Khao Laem**

III-4 BESOINS EN EAU DES VILLES

III-4.1 Usages de l'eau le long du fleuve Mae Klong

Dans les zones urbaines, c'est le PWA (*Provincial Waterworks Authority*) qui assure l'approvisionnement en eau potable ; des usines de traitement de l'eau potable ont été mises en place dans toutes les grandes villes provinciales. Dans les villes moins peuplées où la mise en place d'usines de traitement de l'eau potable n'est pas rentable du point de vue économique, l'eau potable est fournie par des organismes publics tels que le Département « *Civil Works* » ou le Département « *Public Health* ».

L'usage domestique de l'eau par les villes localisées le long du fleuve Mae Klong est difficilement quantifié, en raison de nombreux points de prélèvements à des emplacements non identifiés. De plus l'eau fluviale n'est pas la seule source, des prélèvements par forage dans les nappes souterraines étant fréquents.

On trouve malgré tout des estimations du volume d'eau consommé pour l'usage domestique dans le bassin du Mae Klong dans des rapports d'études de l'AIT (1994), ainsi que de l'université Mahidol (1995).

L'AIT a estimé un débit de l'ordre de 0,559 m³/s, soit 17,64 millions de m³ par an, pour assurer l'alimentation en eau potable du bassin du Mae Klong en 1996, et de l'ordre de 0,974 m³/s, soit 30,74 millions de m³ par an, en 2021. L'université Mahidol fournit un chiffre comparable de 27,74 millions de m³ par an pour 5 provinces situées dans les zones aval du fleuve Mae Klong et du fleuve Tha Chin.

Même si l'alimentation en eau potable est considérée comme prioritaire, le volume prélevé s'avère négligeable par rapport au prélèvement pour irrigation de l'ordre de plusieurs milliards de m³ par an. Dans la pratique de la gestion opérationnelle, la demande en eau pour l'usage domestique dans le bassin est incorporée dans le débit minimum réservé du barrage Vajiralongkorn.

III-4.2 Alimentation en eau de la Région Métropolitaine de Bangkok

La MWA (*Metropolitan Waterworks Authority*) est responsable de l'alimentation en eau potable de Bangkok et ses environs. Un volume d'eau potable de 2,5 millions de m³/jour a été fourni pour les habitants de Bangkok en 1987. La MWA devra approvisionner jusqu'à 5,8 millions de m³/jour en 2017 selon la prévision de Thai DCI *et al.* (1990). Le fleuve Chao Phraya est la source principale de la production de l'eau potable de MWA. Du fait de tous les usages intensifs de ce fleuve, la MWA arrive actuellement au débit maximum prélevable dans le Chao Phraya.

En réponse à cette forte demande de la capitale, une nouvelle usine de traitement de l'eau potable a été construite à Maha Sawat sur la rive ouest du Chao Phraya. Le prélèvement vient en premier lieu du fleuve Tha Chin (voir Figure III-15). Comme le Tha Chin est un défluent du Chao Phraya qui s'écoule à travers des zones agricoles intensives, cette ressource n'est pas pertinente tant du point de vue quantitatif, que qualitatif.

Un canal d'amenée d'eau depuis le fleuve Mae Klong est en cours de construction. Dès l'achèvement de ce canal, le prélèvement à partir du Mae Klong augmentera progressivement ; il atteindra le débit maximum programmé en 2017, avec un débit de l'ordre de 45 m³/s, soit 1 420 millions de m³ par an. Cela représente un volume considérable : plus de 10% de l'écoulement annuel du Mae Klong. On peut en attendre des impacts importants sur les autres usages de la ressource en eau dans le bassin du Mae Klong.

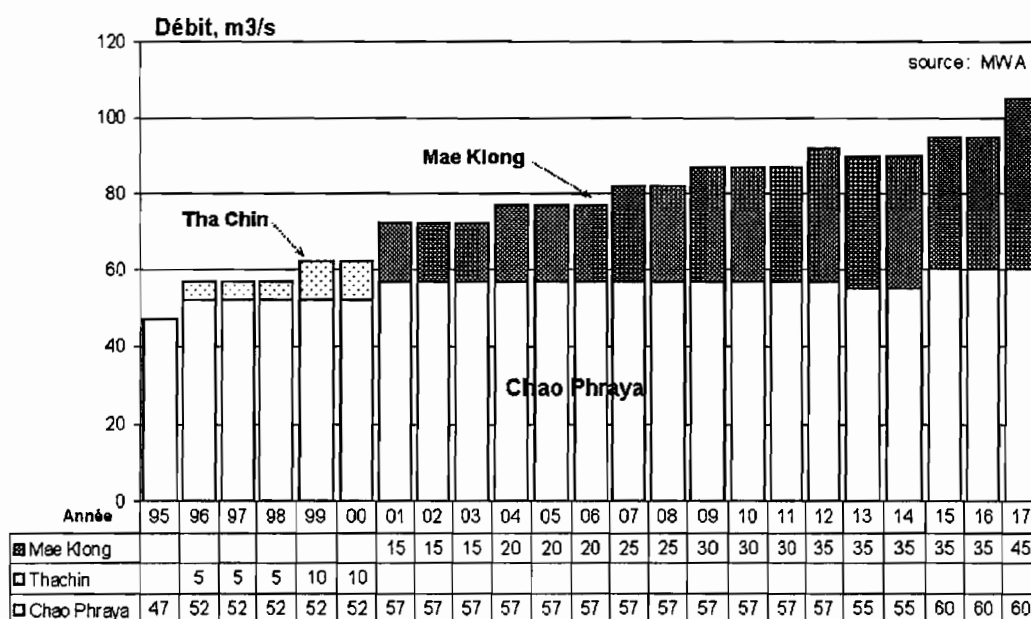


Figure III-15 : Programmation des prélèvements dans les fleuves Chao Phraya, Tha Chin et Mae Klong pour l'alimentation en eau potable de la Région Métropolitaine de Bangkok

III-5 USAGES LOCAUX

III-5.1 Protection contre les intrusions salines

Une étude de l'AIT en 1978 concernant les intrusions salines dans les fleuves Chao Phraya et Mae Klong a contribué considérablement à l'amélioration de la gestion des barrages situés dans les deux bassins hydrographiques.

Pour le fleuve Mae Klong, un débit minimum de 40 m³/s est recommandé pour que la salinité ne soit pas supérieure à 2 g/litre dans le canal Damnoen Saduak, à environ 30 km de l'embouchure de Mae Klong. Ce débit correspond à une valeur nécessaire lors des plus fortes marées ; un débit inférieur à ce dernier est suffisant pour les conditions moyennes.

Comme nous ne pouvons pas précisément prévoir le comportement hydrodynamique du fleuve, un débit réservé de l'ordre de 50 m³/s, soit 1 577 millions de m³ par an, est adopté en gestion opérationnelle.

Ce débit permet d'inclure les usages mineurs non pris en compte par les deux opérateurs principaux (RID et EGAT) le long du fleuve Mae Klong (par exemple les prélèvements destinés à l'usage domestique).

III-5.2 Activités récréatives et écotourisme

Plusieurs sites touristiques existent au sein du bassin du Mae Klong. Certains d'entre eux peuvent être cités ici.

Les retenues d'eau de Srinagarind et de Khao Laem accueillent plusieurs dizaines de milliers de visiteurs par an. Les hébergements et les activités sportives se trouvent principalement le long du cours d'eau de Khwae Noi. Des hôtels/restaurants flottants se développent à la confluence du Khwae Yai et Khwae Noi à proximité de Kanchanaburi. Ainsi, l'écotourisme se développe sur les rives des deux rivières à l'aval des barrages et sur leurs petits affluents qui comportent des cascades spectaculaires. De nombreuses agences de voyage incluent dans les voyages en Thaïlande des visites au Pont de la Rivière Kwaï qui se trouve dans la périphérie nord de la ville de Kanchanaburi, ainsi qu'au marché flottant du canal Damnoen Saduak.

Les activités récréatives et touristiques ne consomment pas vraiment d'eau, elles en ont toutefois besoin. Le manque d'eau détériore leur utilité esthétique, elle diminue par conséquent le nombre des touristes.

III-5.3 Qualité de l'eau

Lorsque des pollutions importantes issues des activités industrielles et/ou agricoles sont rejetées dans les cours d'eau, elles causent des dommages aux milieux riverains. Cela n'est heureusement pas fréquent, mais lorsque cela se produit, il faut un délai considérable pour retrouver les conditions initiales des milieux affectés.

Plus récemment (en 2000), un accident a eu lieu sur le fleuve Tha Chin suite à des averses importantes pendant la fin de la saison sèche. L'origine de ce dernier est méconnue ; un drainage rapide de l'eau stagnante dans les rizières, issue des apports importants de précipitations, est une hypothèse fort probable.

Dans le cas du Tha Chin, le problème a été résolu en délivrant immédiatement un volume d'eau supplémentaire du fleuve Mae Klong via les canaux Thasarn-Bang Pla et Jarakae Samphan pour diluer l'eau polluée et la repousser vers la mer.

Dans un but préventif, la qualité des eaux dans les retenues de Srinagarind et de Khao Laem, ainsi que dans les cours d'eau du bassin du Mae Klong est régulièrement surveillée.

Les rapports d'étude (Silapakorn University, 1994 ; EGAT, 1995) indiquent que la qualité de l'eau du Mae Klong est conforme aux normes nationales pour la production de l'eau potable.

IV. GESTION DE L'EAU

Avant de se recommander de : « *De quelles façons peut-on gérer au mieux l'eau dans le bassin du Mae Klong* », il est en premier lieu essentiel de se poser les questions suivantes. « *Qui sont les acteurs principaux dans le système ?* » « *Comment gèrent-ils l'eau actuellement ?* »

Les réponses à ces deux questions fournissent une description complète de la gestion de l'eau à l'échelle régionale du bassin du Mae Klong, et font référence à l'organisation de la gestion de l'eau à l'échelle nationale. Cette analyse peut être considérée comme un préalable pour mieux comprendre cet hydrosystème complexe.

IV-1 ORGANISATION DE LA GESTION DE L'EAU

IV-1.1 Les acteurs

La résolution des problèmes dans le domaine de l'eau de Thaïlande s'avère complexe du fait des nombreuses agences concernées. D'après, le Comité National des Ressources en eau, il existe 9 comités nationaux et 38 agences de l'Etat au niveau opérationnel, rattachées aux 9 ministères qui interviennent dans le domaine de l'eau.

Bien que plusieurs organismes soient impliqués, seuls quelques uns jouent un rôle primordial en gestion de l'eau. Les autres ne sont véritablement importants que lors des événements extrêmes qu'il s'agisse de sécheresses ou d'inondations.

Dans le bassin du Mae Klong, le *Royal Irrigation Department* (RID) et l'*Electricity Generating Authority of Thailand* (EGAT) sont les acteurs principaux.

Le RID est une organisation publique, chargée de l'aménagement et de la gestion des ressources en eau principalement pour les usages agricoles. Comme les volumes d'eau prélevés pour ce secteur sont prédominants, le RID occupe une place cruciale dans le système de gestion de l'eau.

L'EGAT est une entreprise d'Etat, responsable au niveau national de la production et du transport de l'électricité. Tous les grands barrages-réservoirs équipés d'usines hydroélectriques sont gérés par EGAT.

En raison de l'augmentation du transfert d'eau du bassin du Mae Klong pour l'alimentation en eau potable de Bangkok et de ses environs, la *Metropolitan Waterworks Authority* (MWA) jouera dans l'avenir un rôle aussi important que les deux agences précédentes.

La MWA est aussi une entreprise d'Etat, assurant la production et la distribution de l'eau potable pour la Région Métropolitaine de Bangkok. Les liens entre les trois acteurs pour la gestion de l'eau existent aussi dans le cas du bassin du Chao Phraya. On doit cependant noter que malgré la priorité des besoins, le rôle propre de MWA en gestion de l'eau n'est pas identifié directement, car sa demande en eau est exprimée via l'intermédiaire de RID.

Le Comité National des Ressources en Eau (*National Water Resources Committee*, NWRC) est responsable des politiques générales de gestion de l'eau au niveau national. Dans le cas du Mae Klong, l'intervention du NWRC est essentielle, car la résolution de la situation conflictuelle entre les agences d'Etat dépasse les cadres de responsabilité de EGAT/RID.

IV-1.2 Organisation des principales agences de gestion de l'eau

Les structures des principales agences sont explicitées dans cette section. Les descriptions mettent l'accent sur le domaine de la gestion de l'eau. Comme le RID est directement chargé de cette tâche, son organisation sera plus particulièrement détaillée. Pour l'EGAT, nous ne nous limiterons qu'au domaine de l'eau.

a) Organisation du RID

Le Département Royal d'Irrigation (RID) dépend du Ministère de l'Agriculture et des Coopératives. Sa structure administrative se divise hiérarchiquement depuis le niveau le plus haut « Département » dirigé par Directeur Général, puis « Office », « Division », « Section », jusqu'à « Branche » (cf. Figure IV-1).

La gestion de l'eau est sous la direction du Directeur Général adjoint-Exploitation et Entretien (*Operation and Maintenance*, O&M). Il dirige douze offices régionaux d'irrigation et un office de l'hydrologie et de la gestion de l'eau, que nous désignerons par l'expression « Office Central ».

Dans le schéma de gestion de l'eau, l'Office Central est chargée de la planification et de la coordination inter-agence. C'est la Section « *Water Allocation* », appartenant à la Division Exploitation et Entretien de l'Office Central qui est responsable.

Tandis que les Offices régionaux assurent de la mise en œuvre de programmes (implémentation et exploitation) et de l'entretien des systèmes d'irrigation. L'Office Régional d'Irrigation se compose d'un bureau central d'administration et des projets d'irrigation. La structure du bureau central pour la gestion de l'eau est analogue à celle de l'Office Central au niveau supérieur ; la Branche « *Water Allocation* » appartenant à la Section Exploitation et Entretien est chargée de la coordination entre les projets d'irrigation, et l'Office Central.

On distingue deux types de projets d'irrigation : les projets d'irrigation provinciaux et les projets d'exploitation et d'entretien de systèmes d'irrigation (Projet O&M⁴). Les projets d'irrigation provinciaux sont délimités par les limites administratives locales, voire par provinces ; les projets O&M, par unités hydrauliques.

Les différentes zones peuvent se chevaucher, mais les responsabilités des deux types de projets sont distinctes. Les projets d'irrigation provinciaux sont responsables de l'aménagement et de la gestion de périmètres aux échelles moyennes et petites, situés en dehors des zones de grands projets d'irrigation. Ils prennent aussi en charge la coordination avec les autres agences locales d'administration.

Les projets O&M, ont pour charges principales la construction, l'exploitation et l'entretien de systèmes d'irrigation au sein de l'unité hydraulique qui leur correspond.

Le bassin du Mae Klong et le GMKIP se situe dans la zone attachée à l'Office Régional 10-Kanchanaburi. Le bureau central d'administration de l'Office Régional 10 se trouve près du barrage de Vajiralongkorn.

Le GMKIP est divisé en 10 unités hydrauliques d'une superficie d'environ 50 000 hectares chacune. En ajoutant le Projet O&M du barrage de Vajiralongkorn qui ne possède pas de périmètre irrigué rattaché, l'Office Régional d'Irrigation 10 opère sur 11 Projets O&M.

⁴ O&M Project : Operation and Maintenance Project

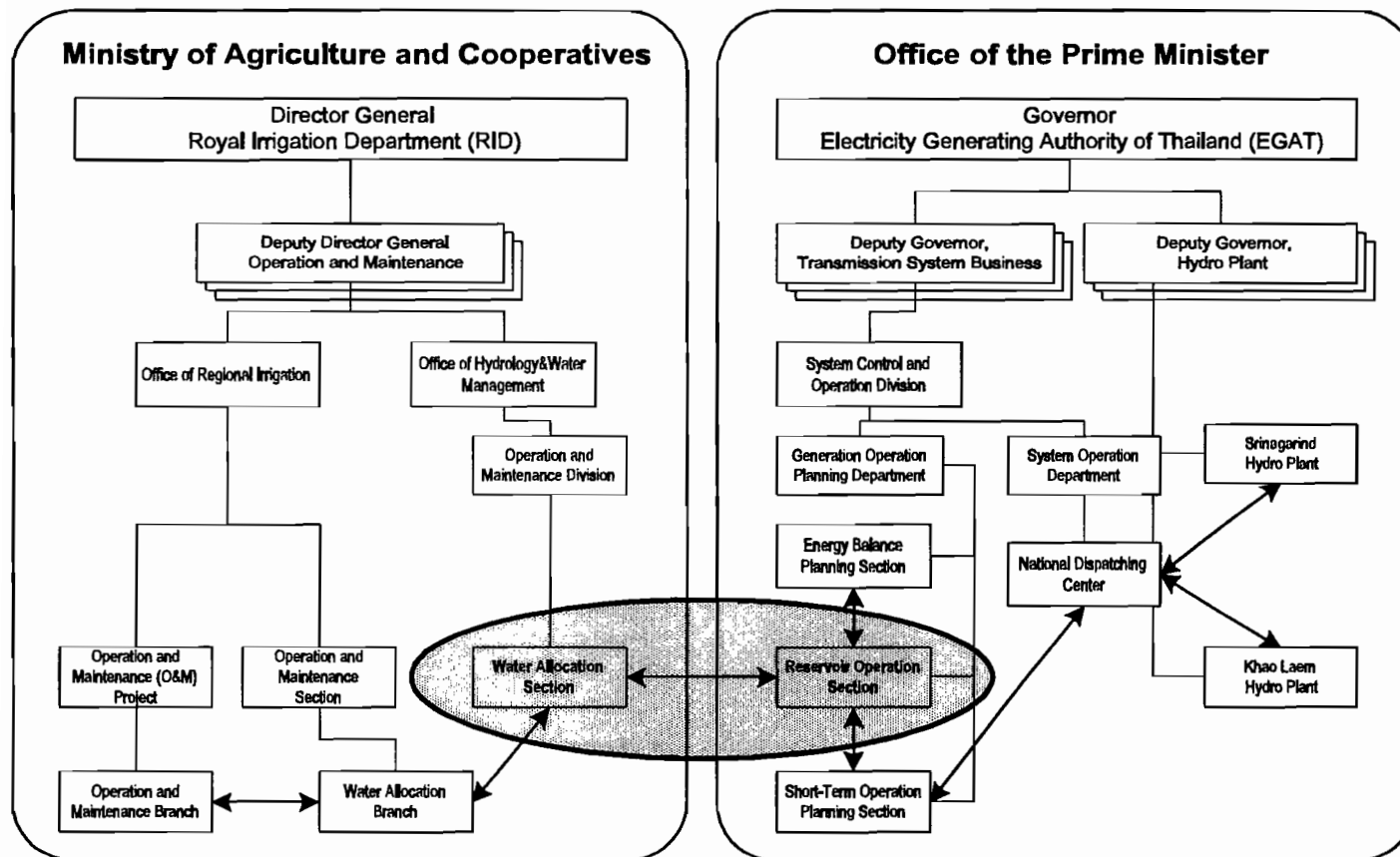


Figure IV-1 : Structures du RID et de l'EGAT, organisées pour la gestion de l'eau.

b) Organisation de l'EGAT

L'EGAT est dirigée par un Gouverneur (*Governor*), sous la supervision d'un Ministre attaché à l'Office de Premier Ministre. Au sommet de la structure administrative, les Gouverneurs Adjointes (*Deputy Governors*) sont responsables des Unités (*Units*), classées en deux catégories : Unités Commerciales (*Business Unit*) et Unités d'Exploitation (*Operative Unit*). Chaque Unité est subdivisée en « Divisions », puis « Départements » et « Sections » (cf. Figure IV-1).

La dénomination des structures hiérarchiques au sein de l'EGAT diffère de celles généralement adoptées par les établissements publics tels que le RID. Il faut se méfier car on retrouve les mêmes appellations pour certaines structures qui ne sont pas situées au même échelon administratif.

La planification de la production électrique se fait au sein du Département *Generation Operation Planning*, appartenant à la Division *System Control and Operation*. Cette Division est dirigée par un Gouverneur Adjoint – *Transmission System Business*. Quant à la planification de production hydroélectrique, trois sections relevant de ce Département sont concernées : la Section *Energy Balance Planning*, la Section *Reservoir Operation* et la Section *Short-term Operation Planning*.

Le commandement du fonctionnement de toutes les usines électriques de l'EGAT sont effectué par le Centre National de Distribution (*National Dispatching Center*), appartenant au Département *System Operation* dans la même Division.

L'Unité d'Administration des usines hydroélectriques (*Hydro Plant*), se trouve à l'échelon de l'Unité d'exploitation, sous la responsabilité du Gouverneur Adjoint-*Hydro Plant*. Une unité *Hydro Plant* peut se composer d'une grande usine hydroélectrique et/ou de plusieurs usines de moindre importance.

Deux *Hydro Plant* se trouvent au sein du bassin du Mae Klong : ***Hydro Plant Srinagarind*** et ***Hydro Plant Khao Laem***. Le barrage de Tha Thung Na est intégré dans l'*Hydro Plant Srinagarind*.

IV-1.3 Interrelation RID/EGAT

La gestion de l'eau, particulièrement dans la Plaine Centrale de Thaïlande, nécessite une collaboration étroite entre le RID et l'EGAT. Le RID définit les demandes en eau et sollicite les lâchers des barrages-réservoirs gérés par l'EGAT. De plus, le RID et l'EGAT ont des relations avec d'autres agences dans leurs systèmes propres. Et enfin dans un but de gestion opérationnelle de l'eau une liaison entre les deux organismes s'établit à travers un système eau-énergie (Figure IV-2).

IV-2 PROCESSUS DE LA GESTION DE L'EAU

Comme plusieurs agences interagissent, la complexité dans les processus de décision pour la gestion de l'eau du système du Mae Klong est multipliée. Cette section met en évidence les processus de la gestion de l'eau dans le bassin du Mae Klong, tout en faisant référence aux processus au niveau national.

Pour commencer, nous distinguons, d'après Terry et Franklin (1985), la planification stratégique à long terme et la planification tactique.

Alors que la planification à long terme répond aux questions : « *où en sommes-nous aujourd'hui ?* » et « *où voulons-nous aller ?* », la planification tactique répond à la question « *comment allons-nous y aller ?* »

Cette distinction est conforme aux processus de décision en gestion de système des barrages-réservoirs décrits par Adigüzel et Coskunoglu (1984). Ils représentent les processus de décision par une structure hiérarchique à multi-échelon et à multicouche. Le modèle de décision se compose de trois volets :

- Décision stratégique - planification à long terme.
- Décision tactique - planification à moyen terme.
- Décision opérationnelle - programmation à court terme (*scheduling*).

Adigüzel et Coskunoglu ont également identifié deux types d'agents : le gestionnaire et l'opérateur. L'agent gestionnaire est en charge de la planification des usages d'eau correspondant au premier volet de décision, et de la coordination opérationnelle (deuxième volet). Tandis que l'agent opérateur n'est concerné que par la mise en œuvre (troisième volet).

IV-2.1 Programmation de la gestion de l'eau

a) *Politique de gestion de l'eau en vigueur*

Acres et Sindhu (1982) décrivent la politique de gestion de l'eau entre RID et EGAT comme suit :

« Le RID est responsable de la détermination des quantités d'eau nécessaires pour satisfaire tous les besoins en aval des barrages-réservoirs, ... »

L'EGAT est responsable de la fourniture d'eau en quantité demandée mais elle a la liberté de dépasser le débit stipulé dans la mesure où il est nécessaire de répondre aux besoins minimaux pour le fonctionnement et pour maintenance de fiabilité du système électrique. »

Selon la politique de gestion de l'eau décrite plus haut, cinq programmations concernant la gestion de l'eau au niveau national sont préparés par les deux acteurs principaux (Figure IV-3) :

1. Programmation annuelle de production électrique,
2. Programmation annuelle de production hydroélectrique,
3. Programmation des cultures en saison sèche,
4. Programmation de l'allocation en eau en saison sèche,
5. Programmation de l'exploitation des retenues.

Le premier et le deuxième programmes sont des tâches annuelles de l'EGAT, tandis que le RID est en charge du troisième et du quatrième. Le dernier est préparé en collaboration entre les deux agences.

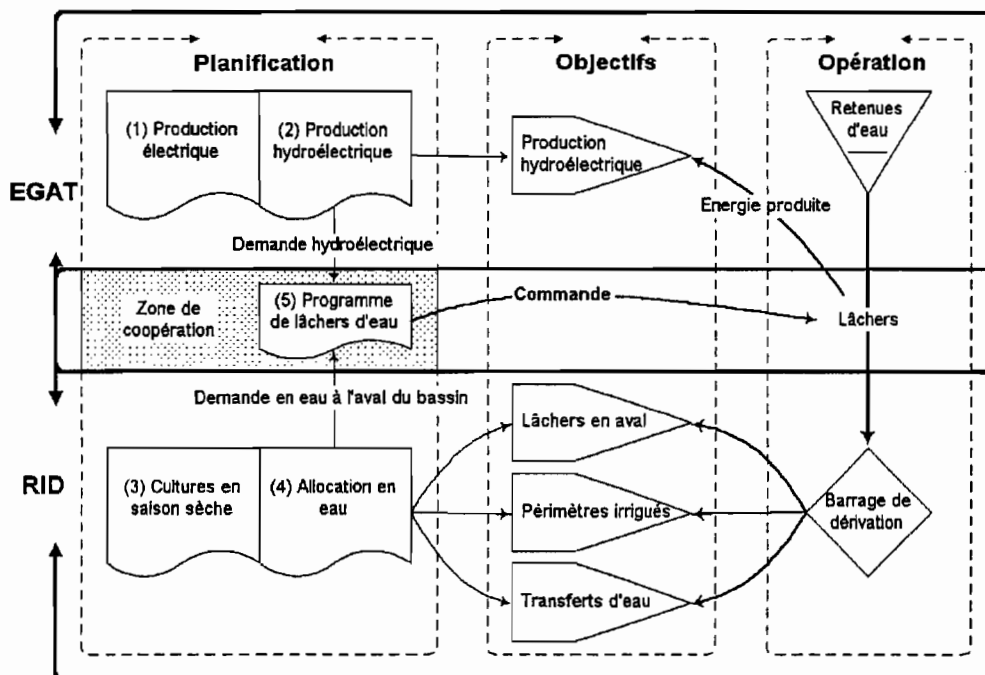


Figure IV-3 : Programmes en gestion de l'eau par RID/EGAT

b) *Programmation de la production électrique*

La préparation du programme annuel de production électrique est commencée avant la fin de l'année fiscale¹ en août/septembre. La production annuelle est estimée sur la base de la consommation d'énergie électrique prévue par le *Thailand Load Forecast Subcommittee* pour un horizon de 3 à 5 années. La révision annuelle de la prévision repose sur la situation de la consommation en cours.

Le comité se compose de plusieurs organismes gouvernementaux et privés :

- *Business & Economic Research Associates Company* (BERA),
- *National Energy Policy Board* (NEPO),
- *Metropolitan Electricity Authority* (MEA),
- *Provincial Electricity Authority* (PEA),
- *Electricity Generating Authority of Thailand* (EGAT),
- *Thailand Development Research Institute* (TDRI).

La Section *Energy Balance Planning* de l'EGAT est responsable de la préparation du programme annuel de production électrique. L'objectif de la planification est de sélectionner les sources de production électrique. Autrement dit, cette tâche définit la fraction d'électricité à produire parmi les différentes sources énergétiques telles que le gaz naturel, le diesel, le charbon (lignite), les soutes (*bunker oil*), l'hydroélectricité, l'achat d'électricité à l'Etranger, etc. La quantité d'électricité qui doit être produite par les usines hydroélectriques est approximativement fixée à cette étape.

Plusieurs critères de choix sont pris en considération. Le critère économique (les coûts de production et de transmission) est sans doute un facteur principal, mais pas le seul. D'autres éléments, tels que les contraintes prévues par les conventions entre l'EGAT et les centrales électriques régionales, jouent ainsi un rôle important. La limitation de la pollution est également prise en compte ; elle implique de limiter la production électrique à partir de lignite du point de vue environnemental.

Il est en effet indispensable de préparer le programme de production hydroélectrique en collaboration étroite avec la Section *Energy Balance Planning*. La Section *Reservoir Operation* de l'EGAT exécute cette tâche par un processus itératif, décrit par quatre étapes :

- *Evaluation de l'état de disponibilité d'eau dans les retenues.* Toutes les centrales hydroélectriques dans le système de production électrique sont évaluées.
- *Estimation de la production électrique de chaque centrale hydroélectrique.* En général, le planificateur expérimenté peut rapidement évaluer la production hydroélectrique de chaque centrale sur la base de l'état de stock d'eau dans les retenues, défini qualitativement par « états secs », « légèrement secs », « normaux », « légèrement abondants » ou « abondants ». La production totale d'hydroélectricité doit être à peu près égale à celle de la programmation provisoire. Cependant si

¹ L'année fiscale débute en octobre et se termine en septembre de l'année suivante

l'année est plus abondante que prévu, la production d'hydroélectricité pourra dépasser la programmation en se substituant à une production thermique plus coûteuse.

- *Vérification de l'estimation de la production hydroélectrique par simulation.* La vérification se fait à l'aide d'un tableur avec un pas de temps de simulation d'un mois. Les données mensuelles enregistrées de la production hydroélectrique sont utilisées pour calculer la variation mensuelle de la demande hydroélectrique. La simulation tient compte également les autres usages de l'eau des retenues.
- *Ajustement final du programme de production hydroélectrique.* La fraction de la production de chaque centrale hydroélectrique peut être réajustée selon la disponibilité d'eau de la retenue au début et à la fin de l'horizon de planification. En conséquence, la programmation de production hydroélectrique peut être modifiée et contrôlée jusqu'à l'obtention d'une production électrique satisfaisante sans entraîner de risque inacceptable de défaillance tout au long de l'horizon de programmation.

Enfin, la production annuelle d'hydroélectricité est décidée en tant qu'objectif opérationnel. Aussi les états des stocks d'eau du système pendant les phases critiques sont relevés, par exemple au début et à la fin de saison sèche, et en fin d'année fiscale.

c) *Allocation saisonnière de la ressource*

La période sèche se caractérise par une faible hauteur des précipitations dès la fin de la saison humide (octobre/novembre) jusqu'à la fin de la saison sèche (avril), ainsi que par une période de forte variabilité des pluies au début de la saison humide (mai/juin). La planification doit garantir l'approvisionnement en eau pour les différents usages tels que les cultures irriguées, l'alimentation en eau des villes et le soutien d'étiage.

La planification pendant ces périodes comprend, d'une part, *la programmation des cultures* (ou la programmation de l'usage de l'eau agricole) et, d'autre part, *la programmation de l'allocation en eau*. La programmation de l'allocation en eau tient compte tous les usages de l'eau du bassin sauf de la production hydroélectrique, qui est considérée comme un usage de non-consommation.

Les programmes sont préparés par les agents du RID à la fin de la période humide (octobre/novembre). L'approvisionnement en eau pour la culture en saison sèche du GMKIP s'effectue à partir du début du mois de février jusqu'au milieu du mois de juin (de la 6^e à la 22^e semaines de l'année).

Le processus de la planification de l'usage de l'eau agricole se déroule à partir du niveau local de gestion des périmètres irrigués. Chaque Projet O&M estime la superficie de périmètres irrigués desservie pendant la période sèche. L'estimation se base sur les données enregistrées des années précédentes. Les périmètres irrigués sont divisés en 5 groupes principaux : (1) la riziculture, (2) le maraîchage, (3) la culture de canne à sucre, (4) l'arboriculture fruitière et (5) l'aquaculture (poissons, crevettes).

Les Projets O&M transmettent la superficie totale des périmètres irrigués asservis à la Branche *Water Allocation* auprès de l'Office Régional d'Irrigation 10. Du fait que les ressources en eau du bassin du Mae Klong sont encore suffisantes, il est encore possible d'approvisionner totalement en eau des périmètres irrigués dans le GMKIP.

La Branche *Water Allocation* réunit les données fournies par les Projets O&M. Ensuite, les demandes en eau d'irrigation sont estimées sur la base, d'une part, des besoins en eau des plantes calculés et, d'autre part, des données enregistrées. Deux usages d'eau sont rajoutés au programme d'allocation en eau :

- le transfert d'eau vers le Fleuve Tha Chin pendant 4 mois à partir du mois de janvier ;
- les lâchers minimaux réservés du barrage Vajiralongkorn (protection contre l'intrusion saline maritime).

La demande en eau hebdomadaire pendant la période sèche (du mois de janvier au mois de juin) est soumise à la Section *Water Allocation*, de l'Office Central. Les demandes en eau des autres grands systèmes irrigués y sont aussi collectées.

A cette étape, la superficie totale de périmètres irrigués desservis en période sèche est déterminée. La demande en eau totale du bassin est également connue. Après réajustement selon les états des stocks d'eau disponibles signalés, la Section *Water Allocation* du RID adresse les demandes en eau sur des intervalles hebdomadaires pour toute la période sèche à la Section *Reservoir Operation* de l'EGAT.

Cette demande est prise en compte pour la programmation de l'exploitation des retenues. L'EGAT prépare enfin un rapport du programme d'exploitation des retenues en période sèche.

d) Révision des programmations d'usages de l'eau

Avant la mise en œuvre des programmations des usages de l'eau, une révision basée sur les informations actualisées est nécessaire. Les réajustements des programmations aux étapes successives de préparation sont surtout liés à la variabilité des précipitations pendant la fin de la saison humide entre octobre et décembre.

Cette variabilité affecte les apports dans les retenues qui définit l'état de la ressource en eau disponible. Ainsi des lâchers peuvent être effectués pendant cette période en cas d'insuffisance de précipitations dans la partie aval du bassin.

IV-3 DE LA PLANIFICATION A LA MISE EN ŒUVRE

Dès que les objectifs de gestion sont établis, l'étape suivante est de répondre à la question : *comment peut-on les atteindre ?* Nous pouvons considérer la planification à cette étape comme un lien entre les objectifs fixés et la mise en œuvre (voir le deuxième volet du modèle de décision du gestionnaire, section IV-2). Cette section se divise en deux parties selon les acteurs principaux. L'EGAT est responsable de l'exploitation de l'eau des barrages-réservoirs, tandis qu le RID assure le fonctionnement du barrage de dérivation.

IV-3.1 Stratégie de l'exploitation des retenues

Les processus de la planification de l'exploitation d'eau des retenues du point de vue de l'EGAT sont décrits sur la Figure IV-4. Ces processus peuvent se classer en quatre groupes :

1. L'estimation des demandes en eau.
2. Les règles et les contraintes de gestion de barrages-réservoirs.
3. L'évaluation de l'état de disponibilité d'eau.
4. La décision des lâchers d'eau des retenues.

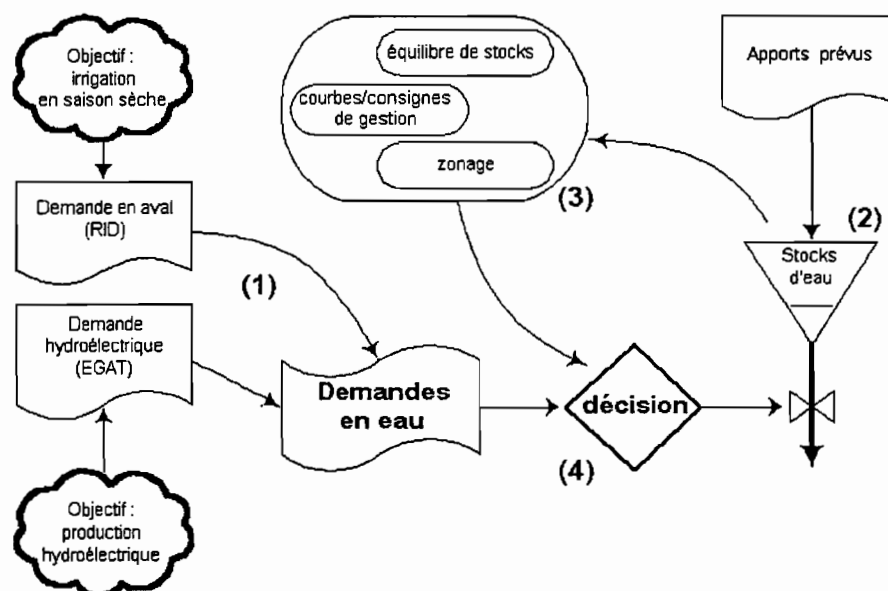


Figure IV-4 : Décision de lâchers des barrages-réservoirs

a) *Demandes en eau*

Les divers usages de l'eau du bassin du Mae Klong sont décrits en détail dans le chapitre III - *Le rôle de la société*. Cette section présente les usages concernés par la gestion des barrages-réservoirs. Pour l'EGAT, il n'existe que deux types de demandes en eau à satisfaire : (1) les demandes en eau en aval des barrages-réservoirs et (2) la demande de production hydroélectrique.

Les demandes en eau en aval du bassin. Les utilisations de l'eau dans le bassin du Mae Klong peuvent être divisées en deux types : *utilisation interne* et *utilisation externe*.

A l'amont du bassin, les utilisations *internes* à partir des rivières Khwae Yai et Khwae Noi n'ont été prises en considération que récemment. Des débits réservés sont exigés pour les activités touristiques en aval des barrages-réservoirs, particulièrement le long du Khwae Noi. Deux millions de m³/jour sont définis comme seuil minimum de lâchers pour chacune des deux rivières.

En aval du barrage Vajiralongkorn, les utilisations *internes* de l'eau sont multiples : navigation fluviale, alimentation en eau potable des villes riveraines et protection contre les intrusions salines. Un débit minimum de 50 m³/s est fixé. On doit cependant noter que l'Office Régional 10 se donne un débit de l'ordre de 60 m³/s lors de l'étape de planification.

L'utilisation *externe* des ressources en eau du bassin du Mae Klong concerne : le prélèvement pour le système d'irrigation du GMKIP ; le transfert d'eau pour le projet *Lower Chao Phraya West Bank* ; le transfert d'eau pour l'usine de production de l'eau potable Maha Sawat.

Les demandes en eau de saison sèche sont moins sujettes à variation que celles de saison humide, du fait que les précipitations et les apports latéraux des bassins intermédiaires sont très faibles, voire négligeables. Le planificateur peut estimer sans risque les demandes pour toute la période sèche. En revanche, les demandes pendant la saison humide ne peuvent être prévues avec fiabilité que quelques semaines à l'avance.

La demande de production hydroélectrique. Cette demande est définie au cours de la programmation annuelle de production au pas de temps mensuel.

Il est possible de décomposer cette demande à des pas de temps plus courts pour une gestion opérationnelle. La décomposition se base sur les données enregistrées de consommation. Cependant, les demandes hydroélectriques aux pas de temps mensuel et hebdomadaire servent à la programmation de production.

En outre, l'EGAT organise une réunion tous les jeudis pour réviser le programme de production électrique. Il est réajusté sur la base des informations actualisées. Le

programme de production hydroélectrique n'intervient que comme cadre de référence, la production devant s'adapter à la consommation en temps réel. C'est le *Moving Plan* (programme adaptable) qui évolue sans cesse au cours de l'opération.

b) *Règles et contraintes de gestion de réservoir*

Le barrage-réservoir et ses organes annexes est un ouvrage technique complexe, mis en place pour mieux maîtriser une ressource en eau défaillante dans l'espace et dans le temps. Afin d'optimiser ses performances, de nombreuses techniques de gestion ont été mises au point. Dans cette section on ne s'intéressera qu'aux techniques opérationnelles actuellement employées par l'EGAT pour gérer ses systèmes de barrages-réservoirs.

Contraintes de gestion d'un barrage-réservoir. Ces contraintes de gestion correspondent à différents niveaux de retenue. Nous les divisons ici en deux types : les contraintes physiques et les contraintes logiques.

- *Les contraintes physiques* concernent les caractéristiques du barrage ou de ses organes annexes qui sont peu modifiables, par exemple le niveau maximum de fonctionnement, le niveau de la vanne de fond, le niveau de prise d'eau, le niveau de crête de déversoir, etc.
- *Les contraintes logiques* sont définies par le gestionnaire afin d'optimiser le fonctionnement ou d'aider à la gestion opérationnelle du réservoir. Des exemples de ce type de contraintes sont les limites inférieures ou supérieures admissibles pour la retenue ou les courbes objectives de remplissage, ainsi que les niveaux requis pour le fonctionnement optimal des turbines.

Zonage de réservoir. Un concept de zonage de réservoir est généralement admis dans la pratique. Le volume d'eau dans un barrage-réservoir à but multiple est réparti entre quatre zones (Figure IV-5) :

- *Une zone de fonctionnement normal* (que l'on suppose satisfaire le meilleur compromis de régulation) où se situe l'état idéal du réservoir qui permet une certaine marge due aux aléas hydrologiques autour de cet état idéal.
- *Une zone d'écrêtement des crues* qui permet de faire face à des crues en augmentant le volume de stockage des débits entrant dans la retenue. Au-dessus de cette zone, il y a débordement.
- *Une zone de restriction* : si l'on entre dans cette zone, c'est un signal d'alarme pour réduire les lâchers au minimum nécessaire, entraînant des restrictions dans les usages.
- *Une zone inactive* sous le niveau de la prise d'eau accessible ou non par pompage, à utiliser en ultime recours et conservée généralement pour des raisons écologiques.

L'équilibre du stock d'eau. Le concept de la maintenance en équilibre du stock d'eau dans les retenues est introduit dans d'une gestion concertée de plusieurs barrages-retenues. Le gestionnaire doit maintenir chaque retenue du système au même état de disponibilité. Le volume d'eau mobilisable (volume actif) de chacune des retenues est maintenu entre les limites supérieures et inférieures de la retenue.

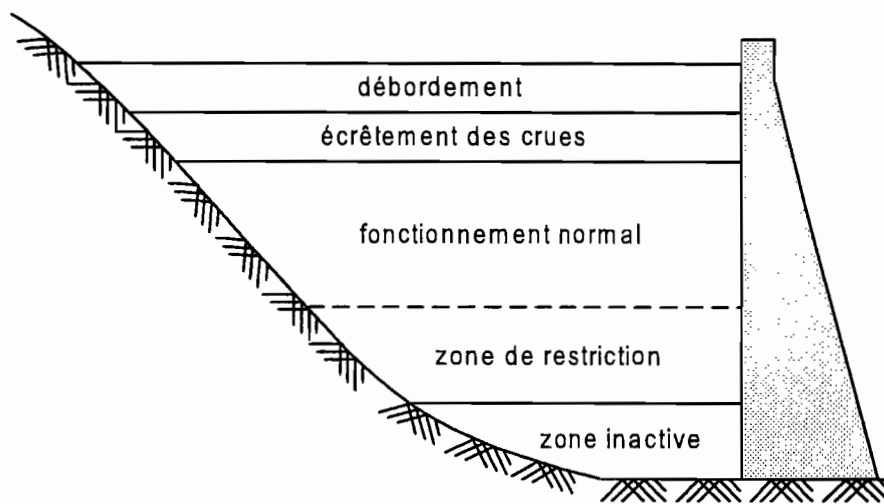


Figure IV-5 : Concept de zonage d'un barrage-réservoir

Ces trois concepts (contraintes de gestion, zonage de réservoir, équilibre du stock d'eau) sont adoptés pour la gestion des barrages-réservoirs du Mae Klong. Dans le chapitre II, plus haut, nous avons discuté les contraintes de gestion des barrages de Srinagarind et de Khao Laem.

Or, le deuxième type de contraintes, les contraintes logiques, se modifie aisément, car elles sont souvent subjectives. Plusieurs études ont cherché à améliorer l'efficacité de gestion des retenues en utilisant des modèles mathématiques complexes pour mettre au point des courbes-enveloppes saisonnières (EGAT, 1992 ; Rajasekaram, 1997). Mais la technique utilisée actuellement par EGAT en gestion opérationnelle n'utilise qu'un logiciel de type « tableur » pour élaborer des courbes objectives de niveau ou de stock.

Pour le zonage, nous ne retrouvons pas d'indication précise de la part de l'EGAT, nous pouvons toutefois définir des zones de façon suivante.

La zone d'écrêtement des crues est comprise entre le niveau supérieur de fonctionnement et le niveau supérieur saisonnier (*Upper rule curve*, URC). Tandis que la zone de restriction se définit entre le niveau inférieur de fonctionnement et le niveau inférieur saisonnier (*Lower rule curve*, LRC). La zone de fonctionnement normal se situe entre la URC et la LRC. Au-delà du niveau minimum de fonctionnement, c'est la zone inactive.

Dans le cas du barrage Khao Laem la définition des zones est simple, car le niveau inférieur de fonctionnement est bien fixé à 120 m(snm). Mais ce n'est pas le cas du barrage Srinagarind.

Le niveau minimum de fonctionnement de celui-ci a d'abord été fixé à 159 m(snm), mais après l'installation des turbines des unités 4 et 5, le niveau de 168 m(snm) est recommandé pour le fonctionnement optimal des nouvelles turbines. Le choix d'un tel niveau conduit à un volume inactif très important de l'ordre de 13,15 milliards de m³, soit 74% du volume total de retenue.

En pratique le niveau inférieur de Srinagarind varie entre 160,5 et 165 m(snm), alors que la disponibilité de l'eau dans la retenue est transmise aux agences concernées sur la base d'un niveau de 159 m (snm).

Enfin, à l'aide d'une méthode basée sur l'analyse d'indices de disponibilité en eau, nous pouvons confirmer que la maintenance en équilibre des stocks est une pratique de gestion effective pour l'ensemble constitué par les barrages-réservoirs du Mae Klong.

Nous comparons les stocks d'eau de Srinagarind et de Khao Laem par un indice de disponibilité d'eau défini par l'équation suivante :

$$\text{indice}(t) = \frac{V(t) - V_{\text{inf}}}{V_{\text{sup}} - V_{\text{inf}}}$$

$V(t)$	étant le volume actif d'eau dans la retenue au temps t ,
V_{sup}	étant le volume d'eau au niveau supérieur de fonctionnement,
V_{inf}	étant le volume d'eau au niveau inférieur de fonctionnement.

La Figure IV-6, la Figure IV-7, la Figure IV-8 et la Figure IV-9, comparent les indices obtenus pour les barrages-réservoirs du Mae Klong entre 1993 et 1996 :

- L'année 1993 (Figure IV-6) était une année très sèche ; elle a entraîné une restriction de l'usage de l'eau l'année suivante.
- Les années 1994 (Figure IV-7) et 1996 (Figure IV-9) étaient des années humides ; en 1994 le barrage Khao Laem a connu des débordements pour la première fois

depuis sa mise en eau. En 1996 des crues exceptionnelles sont survenues, ont provoqué des dégâts considérables sur les zones basses du bassin du Mae Klong.

- L'année 1995 (Figure IV-8) peut être considérée comme une année normale où nous pouvons analyser objectivement la pratique de gestion opérationnelle.

En général, nous pouvons distinguer deux modes d'évolution des retenues : remplissage et vidange. Au cours du remplissage les apports aux réservoirs sont plus importants que les pertes ; au contraire les pertes totales d'eau sont plus élevées pendant les vidange.

Pour commencer en janvier, les volumes d'eau des deux retenues diminuent proportionnellement. Nous observons que les indices journaliers suivent la diagonale (voir la Figure IV-8) ; cela signifie que les stocks d'eau des retenues sont bien équilibrés au cours de l'exploitation en période de vidange.

Au milieu de l'année (juin/juillet) nous retrouvons une inversion où l'état des réservoirs passe à mode de remplissage. Le taux de remplissage de Khao Laem est nettement plus élevé du fait d'apports plus importants entre juillet et août dès le début de la saison humide. Il semble qu'équilibrage des stocks ne soit plus une préoccupation du gestionnaire durant cette période.

A la fin de l'année en novembre/décembre la saison humide se conclut ; les stocks d'eau rebasculent en mode de vidange.

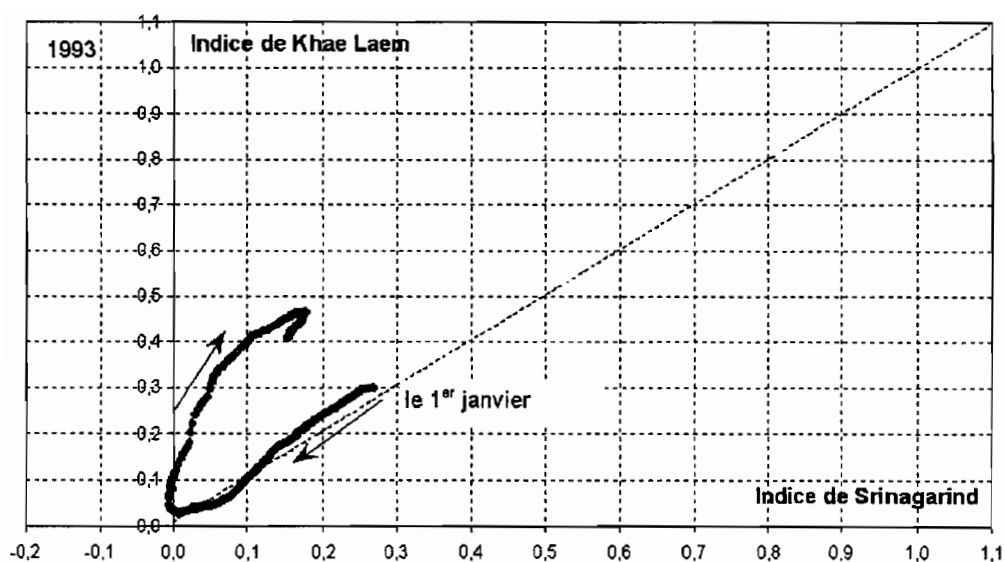


Figure IV-6 : Variation conjointe des indices de stock d'eau de Srinagarind et de Khao Laem en 1993 (année sèche)

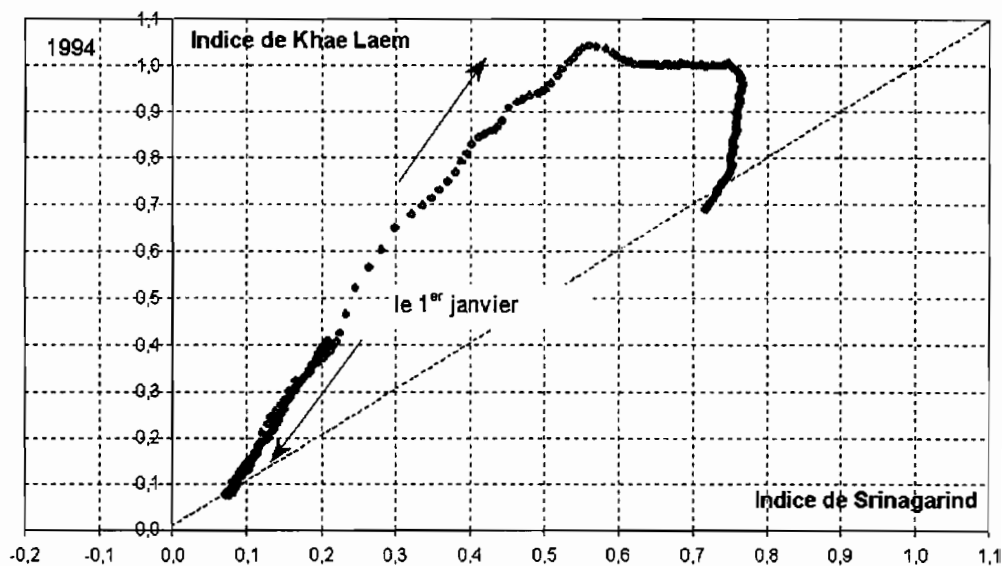


Figure IV-7 : Variation conjointe des indices de stock d'eau de Srinagarind et de Khao Laem en 1994 (année humide)

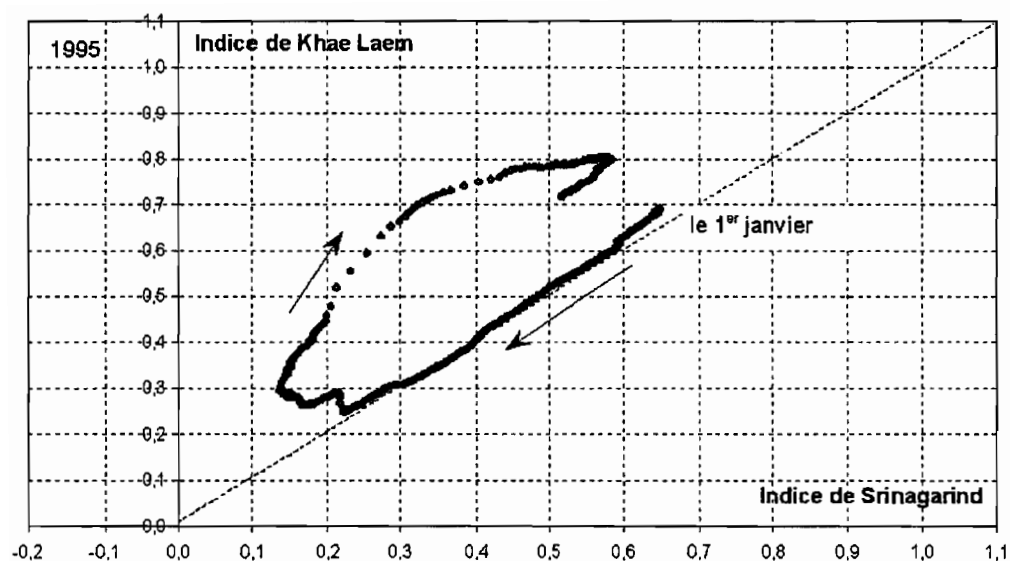


Figure IV-8 : Variation conjointe des indices de stock d'eau de Srinagarind et de Khae Laem en 1995 (année normale)

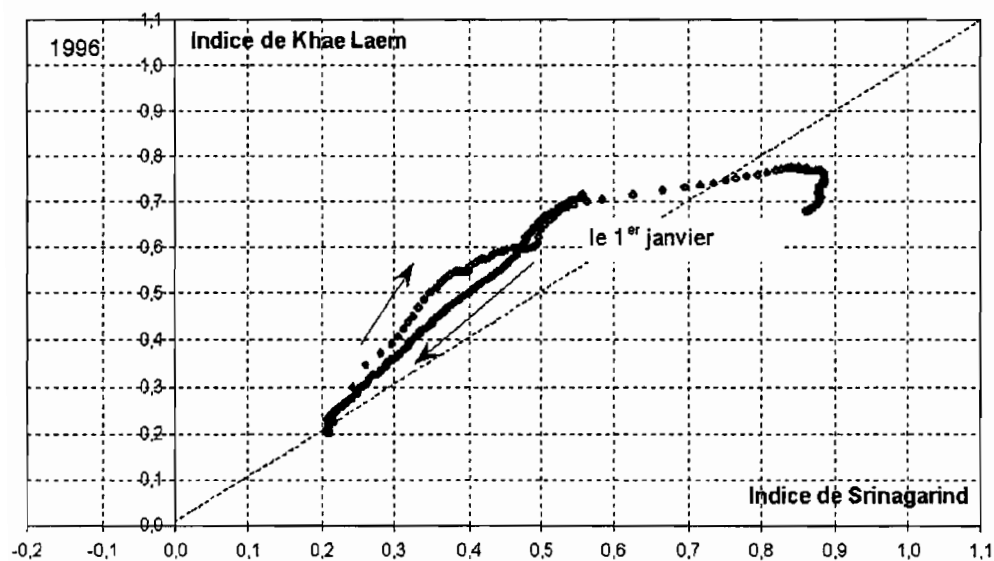


Figure IV-9 : Variation conjointe des indices de stock d'eau de Srinagarind et de Khae Laem en 1996 (année humide)

c) *Etat des stocks d'eau*

L'état des disponibilités en eau est l'un des éléments de la décision de lâchers. Les niveaux de plan d'eau des retenues sont enregistrés tous les jours à minuit. Les volumes d'eau correspondants sont estimés à l'aide des courbes caractéristiques de retenue (hauteur-volume).

L'évaluation des variations des stocks s'effectue sur la base d'un bilan hydrique de chacune des retenues. Les apports aux retenues constituent la composante la plus variable du bilan. Généralement, on procède sur la base des données existantes ; les apports correspondant à 40% de la probabilité de dépassement sont sélectionnés en phase de planification. Les stocks du système après les lâchers doivent être évalués afin d'examiner les conséquences de la décision de lâchers sur l'état de retenues.

d) *La décision de lâchers*

La décision de lâchers est prise à l'aide de l'ensemble des informations discuté plus haut : les demandes en eau, l'état de stocks d'eau et les règles/contraintes de gestion de barrage-réservoir. En pratique, le décideur n'utilise pas de modèle mathématique complexe, mais il se base sur les informations disponibles et son expérience. Le raisonnement humain joue un rôle prédominant avec pour objectif fondamental de « *satisfaire toutes les demandes en eau en respectant les règles et les contraintes* ».

Des volumes provisoires de lâchers sur une semaine sont d'abord estimés. Les lâchers doivent être au moins égaux à la somme de toutes les demandes pour l'aval du bassin. Ensuite, les impacts de la décision sur l'état de stocks d'eau sont évalués par calcul du bilan hydrique au niveau de la retenue à l'aide d'un tableur. Si la décision de lâchers satisfait toutes les contraintes, la décision finale sera prise. Sinon, les politiques de lâchers d'eau et/ou les demandes en eau seront affinées ou modifiées. C'est un processus itératif exécuté jusqu'à ce que les objectifs fixés soient obtenus.

Or, les lâchers dans le système de Mae Klong sont souvent plus importants que les demandes en aval, en particulier en saison humide. Cet excédent a pour but de satisfaire la demande de production hydroélectrique. Cependant, cette dernière ne pourra pas être satisfaite avec une telle politique de gestion, dans le cas d'une situation déficitaire. Par conséquent, une modification du programme de production hydroélectrique est inévitable ; d'autres sources de production électrique se substitueront à la production hydroélectrique. Lorsque les lâchers d'eau n'arrivent pas à satisfaire les demandes en aval dans la semaine courante, l'EGAT comblera la pénurie par une augmentation des lâchers dans la semaine suivante.

Les lâchers journaliers et horaires sont déterminés sur la base de la variation de consommation électrique en fonction de la disponibilité de fonctionnement des autres centrales électriques. Généralement la consommation électrique en week-ends est plus faible que pendant les jours ouvrables dans la semaine. Selon la convention entre EGAT

et RID (voir Figure IV-10), les lâchers journaliers pendant la semaine seront égaux à 110% du volume hebdomadaire demandé par RID, pour compenser les faibles lâchers en week-end, 90 % le samedi et seulement 60% le dimanche.

D'ailleurs, la variation journalière des lâchers est la cause de difficulté pour la maîtrise du niveau du plan d'eau du barrage de dérivation de Vajiralongkorn. La variation horaire de consommation entraîne également une fluctuation des lâchers, mais moins d'ampleur. Le volume de retenue du barrage de Vajiralongkorn de 40,5 de million m³ fonctionne dans la pratique comme tampon.

Dans la pratique opérationnelle en temps réel, des modifications du programme de production hydroélectrique sont régulièrement effectuées. En cas de panne fortuite d'une centrale électrique de quelque nature qu'elle soit dans le système de production, une centrale hydroélectrique est immédiatement choisie pour la remplacer du fait de la rapidité de mise en fonction.

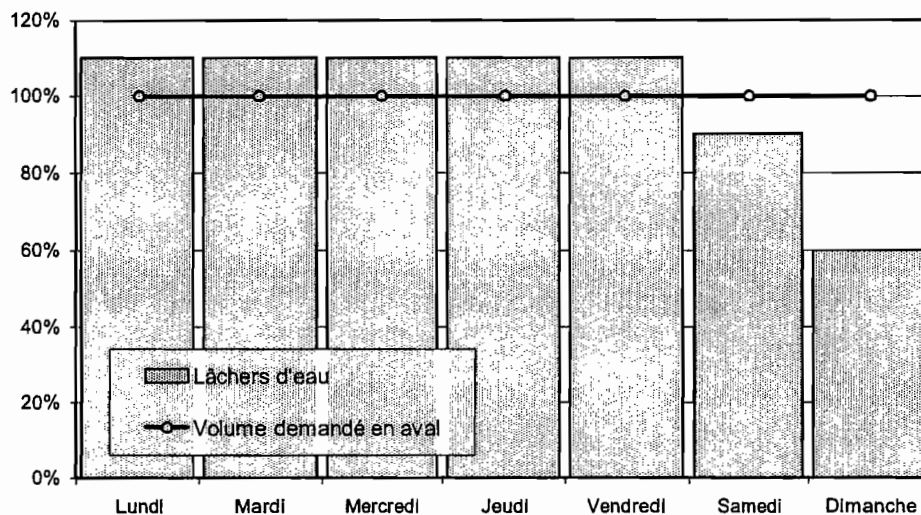


Figure IV-10 : Variation des lâchers d'eau de retenues selon la convention RID/EGAT

e) *Volume d'eau pompé*

La planification de l'exploitation d'eau des retenues n'inclut pas l'opération de pompage par les deux turbines réversibles du barrage de Srinagarind (unités 4 et 5). La Section *Reservoir Operation* d'EGAT transmet le programme journalier de production hydroélectrique à la Section *Short-term Operation Planning* où la programmation horaire des turbines et des pompes est préparée. Chaque centrale hydroélectrique reçoit le programme d'opération horaire des turbines dans la matinée. L'opération de pompage est indiquée comme une production hydroélectrique négative. Les lâchers nets d'une journée doivent correspondre au programme préparé par la Section *Reservoir Operation*. Pourtant le programme d'opération n'est qu'une grille directrice indicative. Le démarrage et l'arrêt des turbines sont commandés par le Centre national d'opération (*National Dispatching Center*).

Généralement, les opérations de pompage s'effectuent pendant la nuit entre 24h00 et 05h00, lorsque la consommation électrique est faible. Les contraintes qui peuvent empêcher la mise en marche des pompes sont les problèmes de sources énergétiques et de transmission. Depuis l'installation de l'unité 5 en 1991, le volume pompé annuellement dans le barrage de Srinagarind varie entre 20% et 30% du volume lâché. Le volume d'eau pompé a atteint un maximum en 1994 avec 50% du volume lâché.

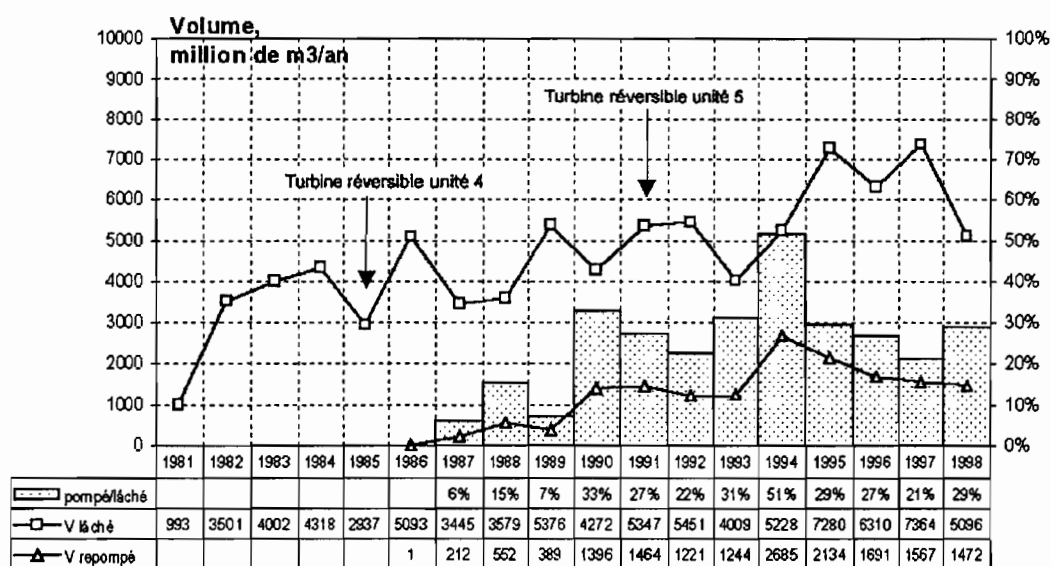


Figure IV-11 : Volumes d'eau lâchés et pompés au Barrage Srinagarind

IV-3.2 Gestion du barrage de dérivation

Le Projet O&M Barrage de Vajiralongkorn est responsable de la manutention du barrage de dérivation. La mise en marche des vannes du barrage, ainsi que des prises d'eau des canaux sur la rive gauche du Fleuve Mae Klong sont de sa responsabilité sous la direction de l'Office Régional d'Irrigation 10.

a) *Règles de gestion du barrage de Vajiralongkorn*

Vudhivanich *et al.* (1998) décrivent le principe de l'opération de barrage Vajiralongkorn comme suit :

« Généralement, les vannes de barrage sont ajustées toutes les 3 heures (par exemple à 24h00, 3h00, 6h00 ... 21h00) afin de maintenir le niveau du plan d'eau en amont du barrage à 22,50 m(snm) pour desservir les réseaux des canaux d'irrigation, ainsi qu'assurer les lâchers minimums en aval de 50 m³/s et maintenir une salinité inférieure à 2 g/litre. »

Les paramètres d'ouverture des vannes sont aussi enregistrés toutes les 3 heures. Dans la pratique l'ajustement systématique est moins nécessaire pendant la période de basses eaux, tandis que les opérateurs doivent surveiller attentivement les vannes pendant la période de hautes eaux, en particulier au moment de l'arrivée des crues.

b) *Priorité des usages de l'eau*

La mise en place d'une politique de gestion de l'eau coordonnant la priorité des usages est indispensable dès lors que les ressources en eau disponibles ne sont pas suffisantes pour satisfaire à toutes les demandes. La priorité d'allocation en eau est définie par RID dans l'ordre suivant :

- Usage domestique (alimentation en eau potable des villes) ;
- Protection contre les intrusions salines ;
- Usage agricole à consommation modéré en eau (vergers, jardins maraîchers, culture de canne à sucre) ;
- Navigation fluviale ;
- Usage agricole à grande consommation d'eau (riziculture, aquaculture).

De point de vue des gestionnaires du barrage de dérivation, il n'y a que deux types d'utilisation de l'eau : *l'eau lâchée en aval du barrage* et *l'eau prélevée*. Les lâchers en aval de Vajiralongkorn sont destinés à plusieurs usages tels que l'alimentation en eau des villes le long du fleuve du Mae Klong, la protection des milieux contre les

intrusions salines, et la navigation fluviale, etc. Les prélèvements ont pour but les usages agricoles et les transferts d'eau vers les bassins voisins (Tha Chin et Chao Praya) et les grandes agglomérations (Bangkok en particulier).

Selon la priorité définie ci-dessus, les lâchers sont prioritaires sur les prélèvements. En outre, les usages de l'eau au sein du bassin (le GMKIP) sont prioritaires sur les transferts hors du bassin.

c) *Outil opérationnel*

Le modèle WASAM (*Water Allocation, Scheduling And Monitoring*) est cité comme l'outil opérationnel du GMKIP (e.g. ILACO/EMPIRE M&T, 1988). La première version de WASAM a été mise en place en 1989 par ILACO/EMPIRE M&T.

D'autres versions ont été développées ultérieurement pour d'autres systèmes d'irrigation (Irrigation College, 1994 ; Vudhivanich et Suiadee, 1995 ; Vudhivanich et Keawkhae, 1996). Cependant, les différentes versions sont peu compatibles ; les échanges de données ou la mise à jour vers la version plus récente semblent très compliqués. Le système d'informatique au centre d'opération du GMKIP est finalement tombé en panne en 1997 et n'a pas été remis en service ; c'est-à-dire que dans la pratique le modèle n'est plus utilisé pour les opérations du GMKIP.

Cependant le GMKIP continue d'utiliser certaines règles de gestion définies par WASAM en introduisant des incohérences. Par exemple, la semaine d'opération (ou d'irrigation) du GMKIP diffère de celle de la Section *Water Allocation* du RID et de la Section *Reservoir Operation* de l'EGAT : elle va du jeudi au mercredi suivant, alors que l'autre se déroule du lundi au dimanche.

d) *La décision de prélèvement d'eau*

Il existe 2 modes pour la décision de prélèvement (ou d'allocation) :

- La décision de prélèvement d'eau en situation excédentaire ;
- La décision de prélèvement d'eau en situation déficitaire.

En situation excédentaire. Le volume d'eau prélevé doit être connu. Les débits calculés au pas de temps hebdomadaire à partir du modèle WASAM pourraient être considérés comme grille directrice. Une rectification et un ajustement sont toutefois essentiels. Mais dans la pratique, on dispose également des volumes d'eau enregistrés historiquement sur la même période. Autrement dit, l'estimation de l'eau prélevée se base prioritairement sur l'expérience des opérateurs plutôt que sur les résultats du

modèle. Cela conduit à décider les débits nécessaires à chaque canal principal pour une semaine d'irrigation donnée.

Notons qu'un ajustement des débits à l'aide des vannes de canaux pourrait se faire au cours de la semaine, si des plaintes étaient rapportées aux Projets O&M.

En situation déficitaire. Quand les apports entrant dans le barrage de dérivation sont légèrement inférieurs aux demandes en eau programmés, une petite diminution des prélèvements et des lâchers en aval est admissible. Car les demandes en eau programmées sont en général légèrement surestimées (en raison de la flexibilité en opération). La première priorité est de maintenir le niveau du plan d'eau en amont du barrage à 22.5 m (snm).

En situation plus sévère, la priorité des usages de l'eau s'applique. Le débit lâché en aval est fixé à un minimum de l'ordre de 40 m³/s. L'eau d'irrigation pour le bassin du Tha Chin est d'abord interrompue, avant de réduire les approvisionnements en eau du GMKIP. Si l'on ne peut pas garder le niveau objectif d'opération, les lâchers sont aussi diminués. Cependant, cette tactique ne peut s'appliquer que quelques jours consécutifs.

Ce cycle d'opération est maintenu durant une semaine d'irrigation. Si le déficit demeure, l'Office Régional d'Irrigation 10 sollicite de l'eau supplémentaire pour la semaine suivante auprès des barrages-réservoirs en amont via les intermédiaires (la Section *Water Allocation* du RID, et puis la Section *Reservoir Operation* de l'EGAT).

Des exemples de prise de décision pour la gestion du barrage de dérivation entre 1993 et 1996 sont illustrés par la Figure IV-12, la Figure IV-13, la Figure IV-14 et la Figure IV-15. Nous observons les apparitions périodiques entre les deux situations de décision. Les lâchers minimums de 40 m³/s surviennent souvent pendant la période sèche (la première moitié d'année). Et, spécialement en 1993 (Figure IV-12), une année très sèche, la situation déficitaire est perceptible même durant la période humide (la dernière moitié d'année).

Les prélèvements d'eau varient en sens inverses de l'abondance des ressources disponibles. Les prélèvements pendant la période humide s'avèrent faibles dans les années relativement abondantes (1995, Figure IV-14 ou 1996, Figure IV-15) par rapport à ceux des années sèches (1993, Figure IV-12).

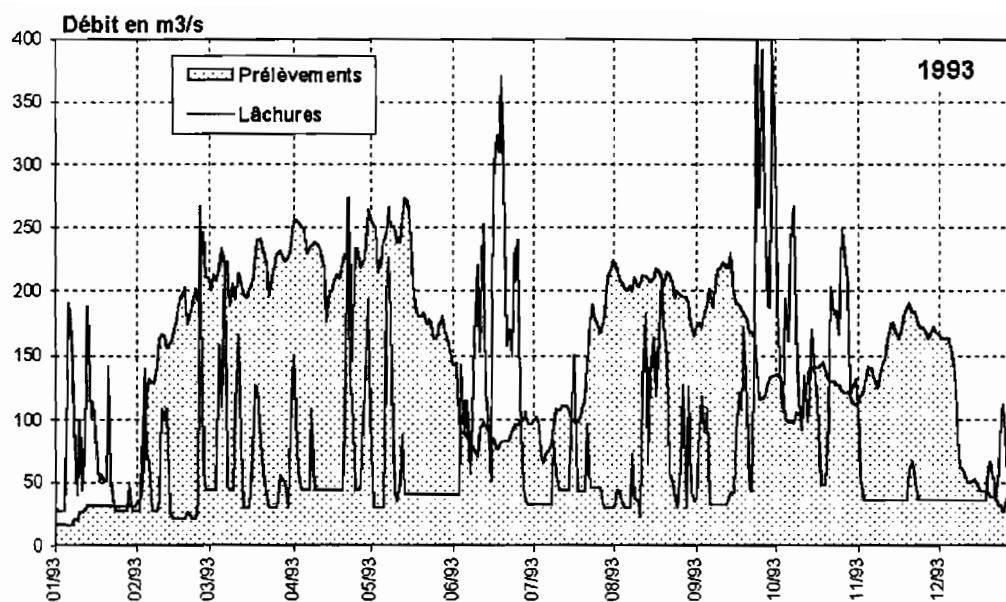


Figure IV-12 : Débits lâchés et prélevés au barrage Vajiralongkorn en 1993 (année sèche)

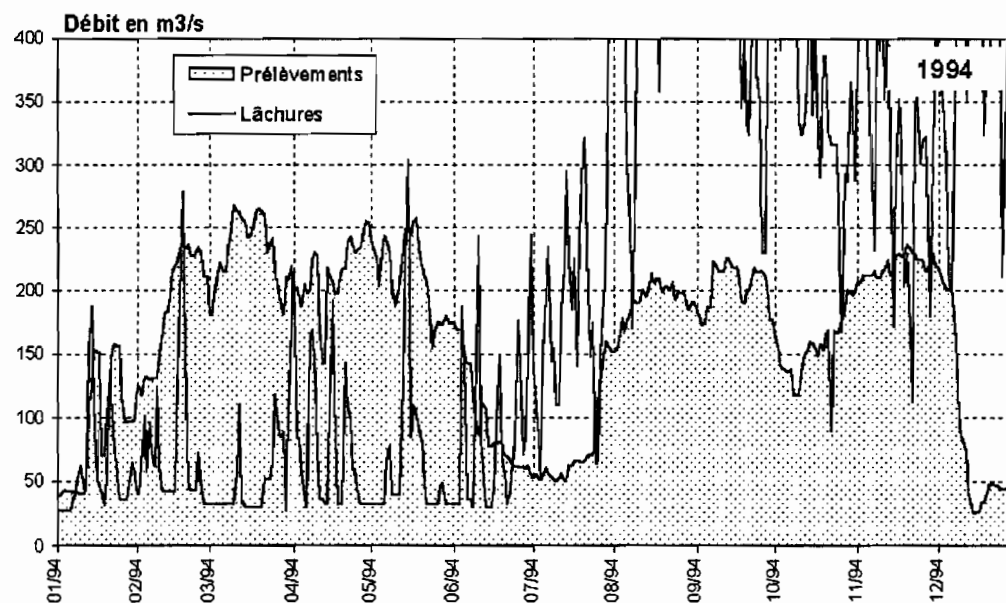


Figure IV-13 : Débits lâchés et prélevés au barrage Vajiralongkorn en 1994 (année humide)

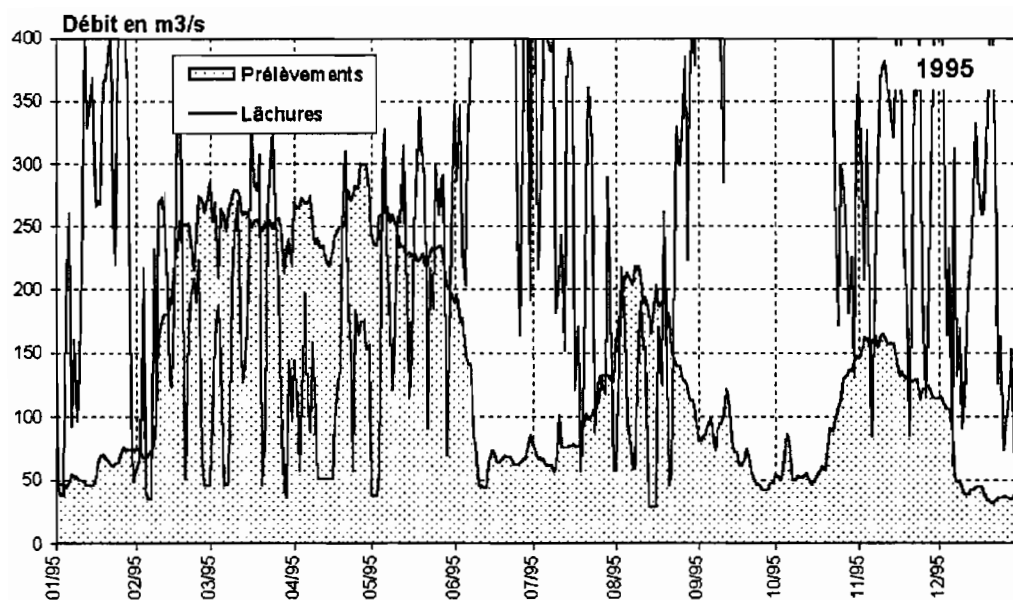


Figure IV-14 : Débits lâchés et prélevés au barrage Vajiralongkorn en 1995
(année normale)

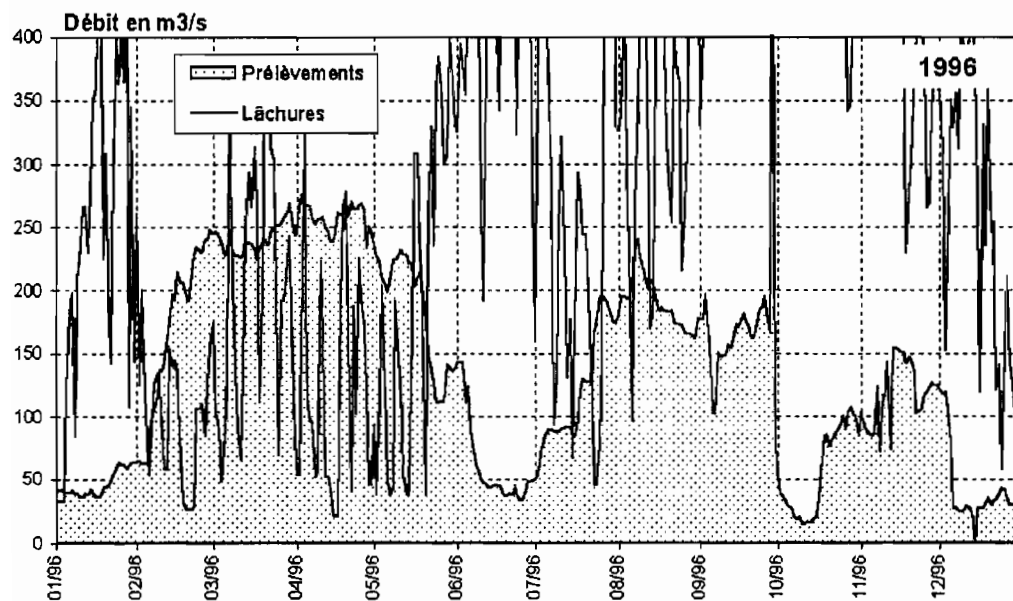


Figure IV-15 : Débits lâchés et prélevés au barrage Vajiralongkorn en 1996
(année humide)

CONCLUSIONS DE LA PREMIERE PARTIE

Voici les principaux points de la description du bassin du Mae Klong qu'il faut retenir :

Deux barrages-réservoirs à but multiple (Srinagarind - SNR et Khao Laem – KHL) qui viennent alimenter un troisième barrage de dérivation (Vajiralongkorn – VJK) contrôlent l'amont du bassin.

La distribution spatiale des précipitations offre un fort gradient spatial des reliefs du nord-est (plus de 4 000 mm annuel) vers les plaines proches de la mer au sud-est (un peu moins de 1 000 mm). C'est ainsi que les apports à la retenue de Khao Laem sont plus importants que ceux de Srinagarind, même si la superficie de son bassin versant est inférieure.

L'irrigation du Grand Projet d'Irrigation du Mae Klong (GMKIP), l'hydroélectricité et le débit réservé (contre les intrusions salines) sont actuellement les usages principaux de l'eau dans le bassin.

Les prélèvements pour l'irrigation dans le bassin voisin du Tha Chin et pour l'alimentation en eau potable de la zone métropolitaine de Bangkok doivent augmenter dans les prochaines années jusqu'à un débit maximum prévu en 2017.

Le RID (Département Royal d'Irrigation), opérateur des ouvrages de prélèvements pour l'irrigation, et l'EGAT (Agence Nationale de Production d'Electricité), opérateur des barrages-réservoirs, jouent ensemble le rôle central dans le système de gestion de l'eau.

La programmation annuelle des usages de l'eau se fait par collaboration entre les deux opérateurs, mais la politique actuelle de gestion ne tient pas compte de la demande en eau pour la production hydroélectrique lors de la planification de l'allocation en eau pour l'irrigation.

DEUXIEME PARTIE

MODELISATION DE L'HYDROSYSTEME DU MAE KLONG

.

V. CONSTRUCTION DES MODELES

Ce court chapitre qui constitue la deuxième partie de ce mémoire introduit l'architecture des modèles développés pour permettre au lecteur d'avoir une vision d'ensemble des éléments de modélisation de l'hydrosystème du Mae Klong avant d'aller plus loin dans le détail au cours des chapitres suivants.

V-1.1 Outil de modélisation

Dès le début de cette étude, deux questions se sont posées concernant le choix de l'outil de modélisation et le choix du pas de temps de simulation.

Choix de l'outil de modélisation. De nombreux outils sont disponibles pour la modélisation des systèmes de l'eau. Cela va des modèles génériques de simulation dont toutes les composantes ont été pré-configurées, jusqu'à des langages de programmation où l'utilisateur doit tout mettre en œuvre dès la première ligne de conceptualisation.

Pour représenter l'hydrosystème du Mae Klong, nous avons utilisé l'environnement de modélisation Vensim® (Ventana Systems, 1997). Vensim® se situe dans une position intermédiaire entre les langages de programmation et les modèles génériques. On peut l'assimiler à un langage de modélisation qui fournit des outils de base de construction des modèles, ainsi que des outils d'analyse et de validation aussi bien des structures de modèles que des résultats.

Par comparaison avec les modèles génériques, l'environnement de modélisation offre plus de flexibilité pour représenter les systèmes de flux d'eau. Il permet aussi de réduire considérablement le temps de développement de modèles en rapport avec une utilisation de langages de programmation plus primaires.

Vensim® assimile la méthode de la Dynamique des Systèmes ; il permet de créer un lien entre l'analyse qualitative des systèmes (*System Thinking*) et la mise en œuvre quantitative des modèles de simulation.

Choix de pas de temps de simulation. Le pas de temps de la semaine a été choisi comme étant celui qui correspond à la planification la plus fine des opérateurs de l'hydrosystème du Mae Klong tant pour la production d'énergie que pour l'irrigation.

Un pas de temps plus fin, par exemple journalier, aurait sans doute permis d'étudier avec plus de précision les comportements du système ; mais compte tenu de la taille du bassin hydrographique étudié de plusieurs dizaines de milliers de km² et de la qualité médiocre des données hydrologiques disponibles, des incertitudes apparaissent à toutes les étapes du travail. Le pas de temps de la semaine apparaît donc comme un compromis raisonnable entre le volume d'informations traitées et la qualité des résultats obtenus.

V-1.2 Architecture de la modélisation intégrée

La représentation de l'ensemble des flux dans l'hydrosystème aménagé dans le bassin du Mae Klong rassemble, d'une part, les flux d'eau de surface qui dépendent des conditions climatiques et sont contraints par les différents aménagements et, d'autre part, un certain nombre de règles de décisions telles qu'elles sont pratiquées dans les planifications opérationnelles des principaux opérateurs.

Pour ne pas alourdir le calcul, nous avons séparé le modèle de l'hydrosystème du Mae Klong en deux sous-modèles : un modèle hydrologique représentant les flux d'eau de surface écoulés en milieu naturel et un modèle de fonctionnement des ouvrages simulant les flux d'eau soumis aux contraintes réglementaires du milieu aménagé. Les écoulements calculés par le modèle hydrologiques deviennent les flux d'entrée du deuxième modèle de fonctionnement.

Un modèle pluie-débit semi-global, baptisé GR3 S, fonctionnant au pas de temps hebdomadaire a été dérivé de l'architecture du modèle GR3 J du Cemagref (Edijatno et al, 1999) pour estimer les apports aux retenues et les apports latéraux en provenance des bassins intermédiaires. Le modèle calcule les écoulements à partir des données pluviométriques critiquées et homogénéisées par la méthode du Vecteur Régional.

Le deuxième modèle incorpore la conduite opérationnelle des ouvrages et les contraintes réglementaires. Les fonctionnements de deux barrages-réservoirs équipés de turbines hydroélectriques (Srinagarind et Khao Laem) ont été intégralement représentés.

La décision de gestion se compose de deux dispositions principales selon les principaux opérateurs : la gestion des retenues à l'amont du système par EGAT et l'allocation en eau au barrage de dérivation par RID.

Les règles de décision de gestion tiennent compte aussi bien de l'état de disponibilité de la ressource que des diverses demandes en eau du bassin ; les contraintes de gestion des retenues et les priorités des usages de l'eau, telles qu'elles sont admises à l'heure actuelle, ont été intégrées de façon vraisemblable dans le modèle.

Enfin, différents indices techniques et économiques sont ajoutés au modèle dans le but d'évaluer sur des bases opérationnelles cohérentes les conséquences des stratégies de gestion sur la performance de fonctionnement de l'hydrosystème du Mae Klong.

L'ensemble de ces éléments conduit à des modèles susceptibles de simuler de façon réaliste les flux écoulés au travers des différents milieux de l'hydrosystème du Mae Klong. Ils permettent de tester une grande variété d'hypothèses pour des stratégies optimales de gestion de l'eau, sans qu'il soit nécessaire d'effectuer des essais réels.

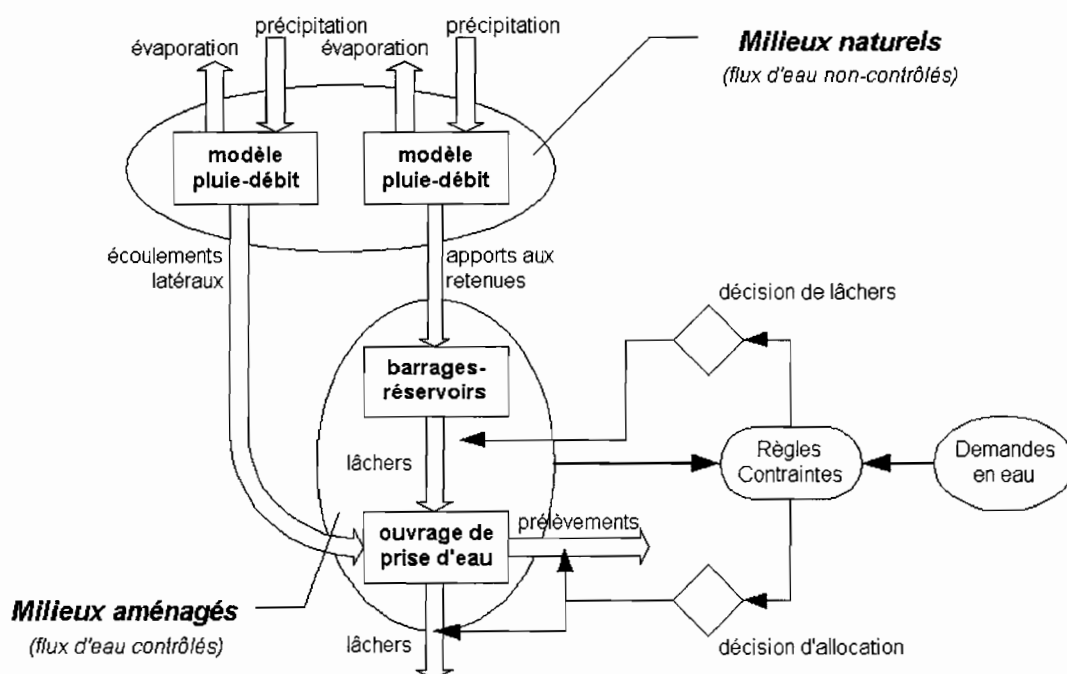


Figure V-1 : Composantes de la modélisation de l'hydrosystème du Mae Klong

VI. MODELISATION HYDROLOGIQUE

L'intérêt de l'utilisation d'un modèle hydrologique pour évaluer les écoulements à partir des précipitations est bien connu ; Thierry et Moutzopoulos (1995) écrivent :

« Le calcul du débit à l'aval d'un bassin versant hydrologique à partir des précipitations auquel il est soumis, est un problème extrêmement classique en hydrologie essentiellement pour deux raisons :

- L'information pluviométrique est généralement beaucoup plus abondante que l'information hydrométrique, parce qu'il est beaucoup plus simple et économique de mesurer la pluie en continu avec un pluviomètre que de jauger un cours d'eau ;
- Il est fondamental de connaître les réactions d'un bassin versant à des séquences de précipitations très abondantes - qui peuvent provoquer des inondations - ou à des séquences très déficitaires qui provoquent des difficultés d'approvisionnement. »

Dans cette étude, nous insistons sur le fait que l'évaluation de la ressource en eau disponible est une des principales questions à résoudre pour une bonne gestion de cette ressource. L'indisponibilité et les incertitudes des données hydrométriques dans le bassin du Mea Klong ont été soulignées dans l'étude antérieure (Kositsakulchai, 1997).

C'est le modèle GR développé au Cemagref qui a été adopté, car la philosophie de développement de cette série de modèles nous convient. Pourtant quelques modifications ont été apportées pour une meilleure application aux échelles de temps et d'espace de notre système.

VI-1 MODELE GR

En 1983, Michel a proposé un modèle conceptuel global, *aussi simple que possible*, pour reconstituer les débits journaliers du bassin à partir des pluies et des températures (pour estimer l'évapotranspiration). Une version plus mature du modèle est parue en 1989 ; c'est le modèle GR (pour « Génie Rural ») - un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. La philosophie de modèle GR est explicitée d'après les auteurs (Edijatno et Michel, 1989) :

« Notre ambition est d'arriver à une simulation pas trop décevante en utilisant une représentation la plus simple possible du processus pluie-débit, dépendante d'un très faible nombre de paramètres, qu'il restera à caler pour s'adapter à la rivière que l'on veut étudier. »

Le développement du modèle GR s'est ensuite poursuivi, conduisant à différentes versions plus récentes et complexes : GR3 J (CEMAGREF, 1989, Edijatno et Michel, 1989, Edijatno *et al.*, 1999), GR2 M (Makhlouf et Michel, 1994), GR4 J (Loumagne *et al.*, 1996). Le chiffre indique le nombre de paramètres du modèle ; la dernière lettre, le pas de temps : J, pour journalier, M, pour mensuel.

Les auteurs du modèle parlaient en premier lieu d'un modèle conceptuel. Mais, dans la dernière publication (Edijatno *et al.*, 1999), ils ont classé le modèle GR dans la catégorie des modèles empiriques pour les raisons suivantes : l'interprétation des variables internes du modèle (on doit s'abstenir de relier une variable de modèle à une mesure précise sur terrain) ; la présence de plusieurs paramètres fixés ; une représentation qui n'a parfois pas de lien direct avec le concept de cycle hydrologique.

a) *Architecture du modèle GR3 S*

Le modèle GR3 S proposé ici est une autre version du modèle GR à 3 paramètres au pas de temps hebdomadaire. Sa structure se base principalement sur la version la plus récente du modèle GR3 J (Edijatno *et al.*, 1999). La description détaillée de développement de ce modèle peut d'ailleurs être trouvée dans les articles originaux (Michel, 1983 ; Edijatno et Michel, 1989 ; Edijatno *et al.*, 1999). Nous nous limitons ici à la présentation des spécificités de la version GR3 S que nous proposons.

Selon les auteurs, l'architecture du modèle GR3 J repose sur deux réservoirs et un hydrogramme unitaire (Edijatno et Michel, 1989) :

- le *réservoir-sol* ayant comme seule sortie le prélèvement occasionné par l'évaporation potentielle. Ce réservoir commande la répartition de la pluie nette entre lui-même et le sous-modèle de routage ;
- un *hydrogramme unitaire*, décrivant la propagation des débits depuis leur formation à partir des pluies nettes jusqu'au deuxième réservoir qui est :
- le *réservoir-eau-gravitaire*. Ce réservoir reçoit les débits routés selon l'hydrogramme unitaire. Il a comme seule sortie le débit de la rivière et sa loi de vidange est du type quadratique.

Pour la version au pas de temps hebdomadaire, la notion d'hydrogramme unitaire a été abandonnée. Le pas de temps de simulation Δt est également rajouté dans les équations du modèle.

Une réduction partielle U de la précipitation P et de l'évapotranspiration E , empruntée à la version au pas de temps mensuel GR2 M (Figure VI-1 a, Makhoul et Michel, 1994), est introduite pour estimer la pluie nette P_n et l'évaporation nette E_n . Le bilan, pris dans la version journalière, comme la différence $P-E$, n'est pas applicable au pas de temps hebdomadaire du fait que le cumul de l'évapotranspiration potentielle sur une semaine donnée est généralement supérieur à celui de pluie, même pendant la période humide de l'année.

Les flux entrant (P_s) et sortant (E_s) du réservoir-sol S sont calculés sur la base de l'état du stock S . La pluie efficace P_e , correspondant à la différence $P_n - P_s$, donne lieu à du ruissellement qui se sépare en deux parties. Comme dans la version de GR3 J, une partie de 90% de P_e entre dans le réservoir de routage R . L'autre partie de 10% de P_e rejoint le débit routé Q_r pour constituer le débit Q_c à l'exutoire du bassin versant, après avoir échangé de l'eau avec le réservoir R .

Les trois paramètres libres (qu'il nous faudra donc ajuster) du modèle sont A, B et D. Le paramètre C de l'hydrogramme unitaire est omis. Dans les versions récentes du modèle GR, le paramètre A du réservoir-sol S, peu influence sur l'ajustement, a été fixé à 330 mm pour GR3 J (Edijatno *et al.*, 1999), ou à 200 mm pour GR2 M (Makhoul et Michel, 1994). Toutefois, le modèle GR n'est jamais appliqué sur des bassins versants en Thaïlande et le pas de temps de simulation est différent des deux versions précédentes, il est donc nécessaire de trouver des valeurs pertinentes de ce paramètre A pour notre cas d'étude.

Le schéma conceptuel du modèle GR3 S est présenté sur la Figure VI-2. Le Tableau VI-1 résume les variables utilisées dans le modèle GR3 S.

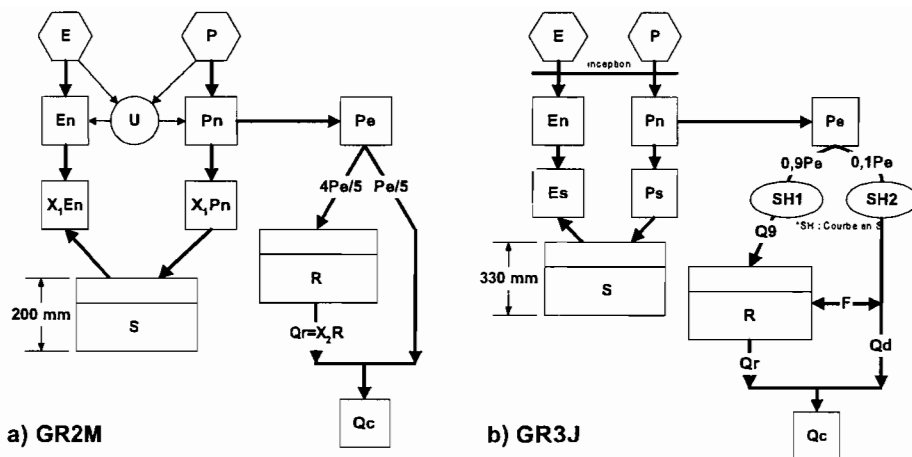


Figure VI-1 Schéma conceptuel des modèles GR2 M (Makhlouf et Michel, 1994) et GR3 J (Edijatno *et al.*, 1999)

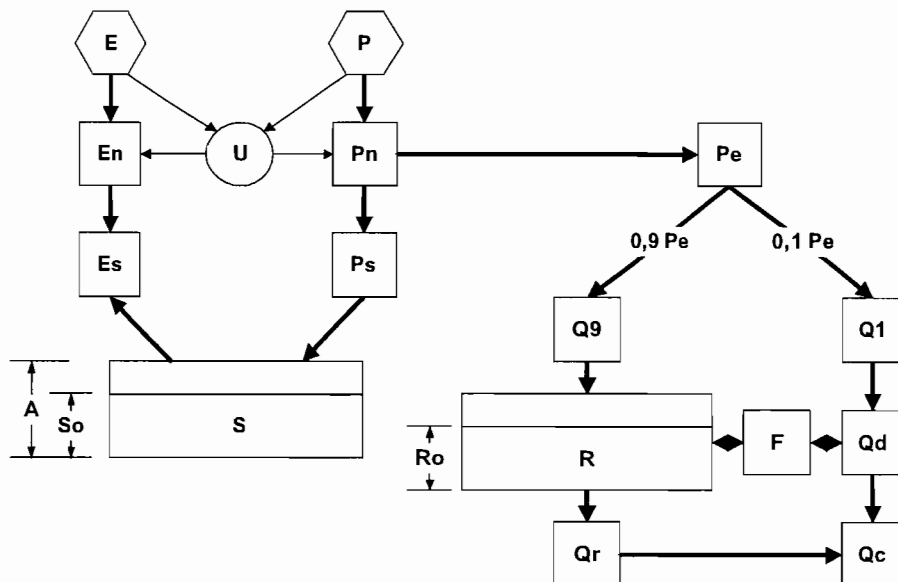


Figure VI-2 : Schéma conceptuel du modèle GR3 S

Tableau VI-1 : Récapitulatif des variables du modèle GR3 S

$U = \frac{P \cdot E}{\left(\sqrt{P} + \sqrt{E}\right)^2}$	Facteur de réduction
$En = E - U$	Evaporation nette
$Pn = P - U$	Pluie nette
$Es = \frac{En \cdot \frac{S}{A} \cdot \left(2 - \frac{S}{A}\right)}{1 + \frac{En \cdot \Delta t}{A} \cdot \left(2 - \frac{S}{A}\right)}$	Evaporation du sol
$Ps = \frac{Pn \cdot \left(1 - \left(\frac{S}{A}\right)^2\right)}{1 + \frac{Pn \cdot \Delta t}{A} \cdot \left(1 + \frac{S}{A}\right)}$	Pluie infiltrée
$S_{t+\Delta t} = S_t + Ps \cdot \Delta t - Es \cdot \Delta t$	Stock du réservoir-sol
$Pe = Pn - Ps$	Pluie efficace
$Q1 = 0,1 \cdot Pe$	
$Q9 = 0,9 \cdot Pe$	Débits entrant dans le réservoir-eau-gravitaire
$F = \frac{D \cdot (R/B)^4}{\Delta t} ; \quad D \geq 0$	
$F = -\min\left(Q1, \frac{ D \cdot (R/B)^4}{\Delta t}\right) ; \quad D < 0$	Echange d'eau
$Qd = Q1 + F$	
$R^* = \max(0, R + F \cdot \Delta t + Q9 \cdot \Delta t)$	
$Qr = \left(R^* - \sqrt[4]{\frac{1}{1/R^4 + 1/B^4}}\right) / \Delta t$	Débit du réservoir-eau-gravitaire
$R_{t+\Delta t} = R_t + Q9 \cdot \Delta t - F \cdot \Delta t - Qr \cdot \Delta t$	Stock du réservoir-eau-gravitaire
$Qc = Qr + Qd$	Débit calculé

VI-2 CALAGE DES PARAMETRES DU MODELE HYDROLOGIQUE

La détermination des trois paramètres du modèle GR3 S nécessite un calage avec des données observées avant que le modèle ne puisse être utilisé pour des applications spécifiques.

L'évaluation de la qualité du calage peut se faire de façon aussi bien quantitative que qualitative.

- L'évaluation quantitative consiste à déterminer la meilleure valeur (optimale) d'une fonction objective (ou fonction critère) par des techniques d'optimisation souvent automatique. La fonction objective ou le critère d'évaluation résume les résultats de comparaison entre les données calculées et les données observées en un seul chiffre. De nombreux critères d'évaluation pour évaluer des paramètres de calage ont été proposés dans la littérature (Nash et Sutcliffe, 1970 ; Fortin *et al.*, 1974 ; Servat et Dezetter, 1990 ; Houghton-Carr, 1999).
- L'évaluation qualitative se base sur une comparaison graphique entre les valeurs calculées et les valeurs observées. Plusieurs représentations des écoulements peuvent être utilisées : hydrogramme de crue, écoulements annuels, courbe de débits classés, histogramme, courbe de tarissement, etc.

Dans cette section nous n'avons pas la prétention de faire une synthèse exhaustive sur la base des nombreux critères existant dans la littérature. Trois critères quantitatifs, communément employés, ont été mis en œuvre.

a) Critère de Nash

Proposé par Nash (1969), ce critère a pour formulation :

Équation VI-1 :

$$C_{Nash} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{o_i} - Q_{c_i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{o_i} - Q_m)^2}$$

Avec Q_{o_i} : débit observé pour la semaine i ;
 Q_{c_i} : débit calculé pour la semaine i ;
 Q_m = débit observé moyen.

Cette expression tend vers 1 lorsque Q_c tend vers Q_o . Nous avons utilisé ce critère pour le calage préliminaire du modèle, tandis que les deux autres critères ont servi à affiner les résultats d'optimisation.

b) Critère de Fortin

Fortin *et al.* (1971) ont testé différents critères et ont montré que le critère suivant était bien adapté pour l'optimisation de séquences de débits aussi bien en crue qu'en étiage (Chevallier, 1988) :

Équation VI-2 :
$$C_{Fortin} = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_{c_i} - Q_{o_i}}{Q_{o_i}} \right) \left(\frac{Q_m + |Q_m - Q_{o_i}|}{Q_m} \right)$$

Cette expression tend vers 1 lorsque Q_c tend vers Q_o . Ce critère provoque toutefois un problème de calcul lorsque la chronique d'écoulements observés (Q_{o_i}) contient des valeurs nulles.

c) Critère de bilan d'écoulements observés-calculés

Le critère de bilan d'écoulements observés-calculés est choisi dans le but de respecter le volume d'eau écoulé qui est particulièrement important dans le cas de notre étude.

Équation VI-3 :
$$C_{Bilan} = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{o_i} - Q_{c_i})}{\sum_{i=1}^n Q_{o_i}}$$

Cette expression serait égale à 0, s'il n'y avait pas d'erreur dans le bilan d'écoulement. Si non, C_{bilan} peut être positif ou négatif.

d) Technique d'optimisation des paramètres du modèle.

L'environnement de modélisation Vensim® offre une possibilité d'optimisation des paramètres du modèle. La fonction «*Payoff*» programmée dans Vensim® est un chiffre simple qui résume les résultats à la fin de simulation.

Elle permet de comparer des variables calculées du modèle avec des données observées, aussi bien que la combinaison entre elles. Deux types de fonctions «*Payoff*» sont reconnus en tant que «*Calibration Payoff*» et «*Policy Payoff*».

Pour comparer des résultats calculés avec les données observées nous choisissons l'option «*Calibration Payoff*». A chaque pas de temps de simulation la différence entre

la donnée et la variable est calculée et multipliée par un coefficient, lorsqu'il est spécifié. Ensuite, le carré de cette valeur, toujours positif, est soustrait du « *Payoff* » initialement égal à zéro. Le « *Payoff* » est donc toujours négatif.

La fonction d'optimisation de Vensim® recherche les valeurs des paramètres qui rendent le « *Payoff* » le plus élevé. Maximiser le « *Payoff* » signifie que l'on essaie d'obtenir une valeur aussi proche au zéro que possible.

VII. REPRÉSENTATION DES COMPOSANTES DE FONCTIONNEMENT

Le régime d'écoulement d'un hydrosystème est considérablement modifié par les aménagements hydrauliques. Dans la modélisation du fonctionnement d'un hydrosystème aménagé, le rôle des ouvrages hydrauliques comme, par exemple, celui d'un barrage-réservoir est donc particulièrement important.

Nous pouvons considérer que les composantes du fonctionnement de l'hydrosystème se décomposent en deux catégories : les composantes physiques et les composantes logiques. Les composantes logiques telles que la décision dans les processus de la gestion de l'eau, et plus précisément de la gestion des ouvrages hydrauliques, comprennent elles-mêmes deux étapes : la décision de lâchers de l'eau des retenues et la décision d'allocation en eau.

Les sections suivantes proposent une représentation de ces composantes de l'hydrosystème aménagé au travers de la méthode de la Dynamique des Systèmes en utilisant l'environnement de modélisation Vensim®.

VII-1 LES COMPOSANTES PHYSIQUES

Ginocchio (1970) décrit que tous les types d'aménagements hydroélectriques comportent les quatre ouvrages principaux suivants : ouvrage de retenue (barrage), ouvrage de prise d'eau, ouvrage de dérivation (canal ou galerie d'amenée et de restitution, conduites forcées) et usine ou centrale (équipée de turbine).

Pourtant les rôles de l'ouvrage de retenue et de l'usine hydroélectrique semblent les plus prédominants dans le fonctionnement des hydrosystèmes aménagés, comme celui du bassin du Mae Klong. Cette section est donc consacrée à la description de la représentation de ces deux ouvrages complexes.

VII-1.1 Ouvrages de retenue

a) Caractéristique d'une retenue

Un barrage-réservoir est composé de plusieurs organes ; par son rôle la retenue d'eau est une des composantes les plus importantes. Les barèmes hauteur-surface ou hauteur-volume servent généralement à la description des caractéristiques de la retenue. Pour caractériser une retenue, on emploie souvent une fonction puissance ajustée à ce barème.

Vensim® offre une alternative à cette représentation : le graphique « *Lookup* » permet d'entrer directement les couples de valeurs hauteur/volume. La précision s'accroît en fonction du nombre de couples entrés. Cette méthode permet d'éliminer les erreurs lorsque les caractéristiques de la retenue ne conforment pas à la fonction puissance. La courbe caractéristique hauteur (Z)-volume (V) du barrage de Srinagarind (SNR) est représenté sur la Figure VII-1.

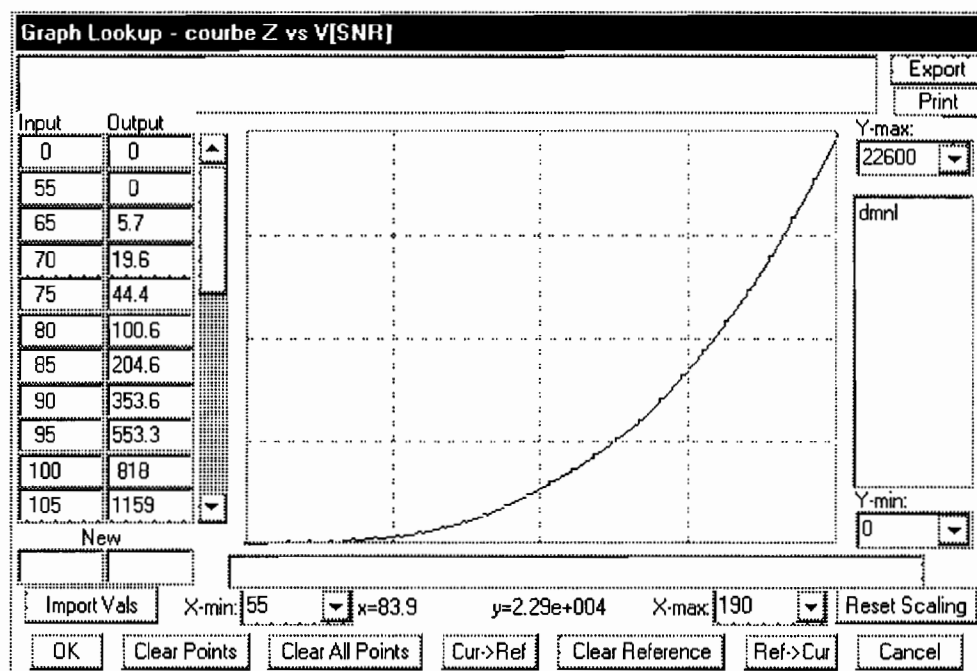
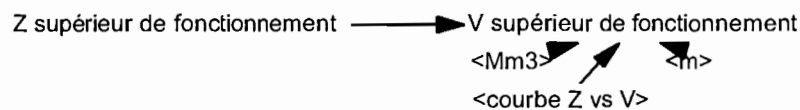


Figure VII-1 : Courbe caractéristique hauteur/volume de la retenue de Srinagarind, utilisant le graphique « *Lookup* » de Vensim®

b) Contraintes de gestion de la retenue

Les divers niveaux critiques de la retenue sont définis dans un but opérationnel d'utilisation de mettre en fonctionnement des organes de barrage. Les contraintes de gestion des barrage-réservoir sont exposées dans le chapitre II : *Aménagements hydrauliques et hydroagricoles*.

Pour les introduire dans le modèle « barrage-réservoir », les niveaux sont considérés comme des paramètres fixes du modèle ; les volumes de la retenue correspondants sont calculables à l'aide des courbes niveaux-volume (courbe Z vs V en Figure VII-1 et Figure VII-2).



```
V supérieur de fonctionnement[DAM] = courbe Z vs V[DAM] ( \
    Z supérieur de fonctionnement[DAM] / m ) * Mm3
~
~      m*m*m
      |
```

Figure VII-2 : Représentation et formulation dans l'environnement Vensim® des divers niveaux et volumes de retenue définis pour sa gestion

c) *Bilan hydrique de la retenue*

La dynamique de l'état de ressources en eau est donnée par l'évolution du stock d'eau dans les retenues. Le bilan hydrique au niveau de la retenue est un moyen d'évaluation. L'équation fondamentale du bilan est la suivante (Diaz et Brown, 1997) :

Équation VII-1 :
$$\frac{dS(t)}{dt} = I(t) - O(t)$$

Avec

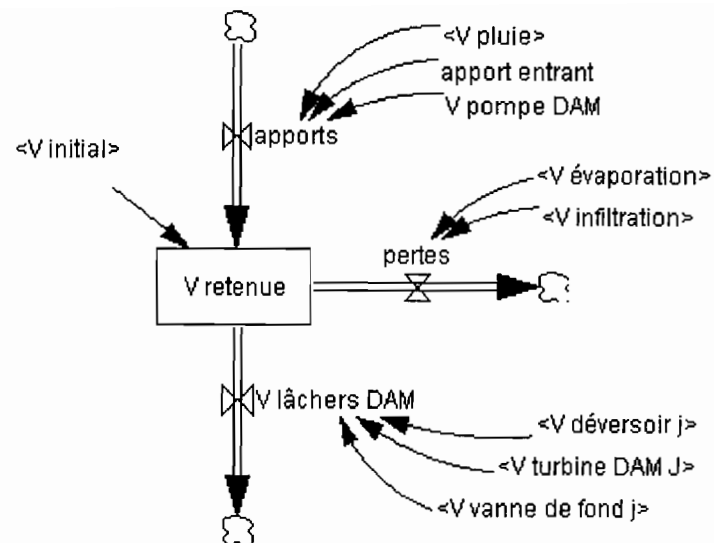
$\frac{dS(t)}{dt}$: variation du stock d'eau dans la retenue avec le temps ;
 $I(t)$: flux entrants (apports) ;
 $O(t)$: flux sortants (pertes).

Vensim® emploie la fonction d'intégration pour représenter l'équation de bilan hydrique (voir l'encadré en Figure VII-3). Diaz et Brown (1997) distinguent de plus deux types de flux entrants/sortants d'une retenue en : les flux contrôlés et les flux non-contrôlés.

Dans notre cas, les flux entrants incluent les écoulements naturels entrants dans la retenue, la pluie tombant sur la retenue et les lâchers en provenance d'un éventuel ouvrage à l'amont. Seul le dernier est un flux contrôlé.

En examinant les flux sortants, comprenant les lâchers (à travers la prise d'eau, la turbine ou la vanne de fond), les déversements, l'évaporation et l'infiltration, seules l'évaporation et l'infiltration sont non-contrôlées.

En modélisant le fonctionnement d'un barrage-réservoir, les flux d'eau non-contrôlés sont habituellement présentés sous la forme de données brutes, alors que les flux d'eau contrôlés subissent une relation complexe dans les processus de décision. La représentation de ces derniers sera exposée en détail dans une section ultérieure.



V retenue [DAM] =	INTEG (apports [DAM] - pertes [DAM] - \
~	V lâchers DAM [DAM], V initial [DAM])
~	m*m*m

Figure VII-3 : Représentation et formulation dans l'environnement Vensim® du bilan d'une retenue d'eau avec ses flux entrants et sortants

VII-1.2 Usine hydroélectrique

La production hydroélectrique joue un rôle fondamental dans l'analyse du fonctionnement de l'hydrosystème du Mae Klong aussi bien sous l'aspect hydrologique que sous l'aspect économique. Le comportement dynamique de la production est lié, d'une part, à la variation du niveau de la retenue et, d'autre part, au volume d'eau lâché à travers des turbines (« V turbine j » en Figure VII-4).

Les fluctuations de la hauteur de chute et du rendement global de la turbine, déduites de l'évolution du niveau de la retenue, ont par ailleurs moins d'impact sur la production que le volume d'eau lâché.

Dans le modèle de fonctionnement d'une usine hydroélectrique, le volume d'eau lâché à chaque turbine, généralement connu permet de calculer la durée de fonctionnement ($\tau_{opr J}$), cette information n'étant généralement pas conservée par l'opérateur.

La production d'énergie électrique (« E produit TURB » exprimée en watts-heure) est le produit de la puissance utile de la turbine (puissance TURB) par la durée de fonctionnement. Enfin la production hydroélectrique de chaque usine est égale à la somme de la production de ses turbines.

La puissance utile de la turbine pour un débit Q_a a pour expression :

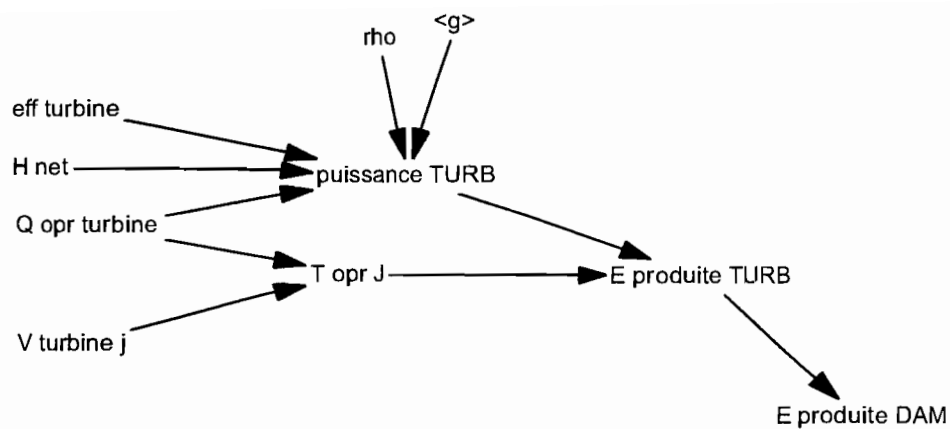
Équation VII-2 :
$$P_u = \eta \cdot \rho \cdot g \cdot Q_a \cdot H_{nm}$$

Avec

P_u	: puissance utile exprimée, W (watts) ;
ρ	: masse spécifique de l'eau, 1000 kg/m ³ ;
η	: rendement global de la turbine ;
g	: 9,81 m/s ² ;
Q_a	: débit aménagé, m ³ /s ;
H_n	: hauteur de chute nette, m.

La modélisation des turbines réversibles du barrage Srinagarind se fait sur le même principe. On y ajoute un module de calcul de la consommation électrique lors de la période de pompage.

La résultante de ce calcul est présentée sur la figure XI-4.



```

puissance TURB[TURBINE] = rho * g * eff turbine[TURBINE] / 100 * H
net[TURBINE] * Q opr turbine[TURBINE]
~                               W
~                               |

E produite TURB[TURBINE] = puissance TURB[TURBINE] * T opr J[TURBINE]
/ s2hr
~                               W*hr/Day
~                               |

E produite DAM[KHL] = SUM ( E produite TURB[turbine KHL!] ) ~~|
E produite DAM[SNR] = SUM ( E produite TURB[turbine SNR!] )
~                               W*hr/Day
~                               |

```

Figure VII-4 : Représentation et formulation dans l'environnement Vensim® du calcul de la puissance et de l'énergie produite par une usine hydroélectrique

VII-2 DECISION DE LACHERS D'EAU D'UNE RETENUE

L'étude de simulation du fonctionnement de l'hydrosystème aménagé ne donne de résultats pratiques qu'à la condition que la politique de gestion incluse dans la simulation représente réellement la gestion opérationnelle en vigueur.

Dans la plupart des cas, les règles de gestion théoriques prédéfinies dans les modèles génériques de simulation sont applicables aux études de cas pour de nouveaux projets d'aménagement. Mais, pour étudier des systèmes déjà réalisés, l'introduction de la pratique de gestion dans la modélisation pose souvent une difficulté du fait que le jugement humain joue un rôle très important dans des processus de décision.

Dans cette section, nous introduisons les éléments des processus de gestion de l'eau dans le modèle de simulation.

VII-2.1 Disponibilité de la ressource en eau

En général si les ressources en eau disponibles s'avèrent suffisantes, les lâchers d'eau de la retenue sont un peu près égaux au volume d'eau demandé : cela correspond à un *état normal* de la ressource. L'*état* de la retenue est *excédentaire* lorsque la retenue d'eau se remplit et qu'il est nécessaire de lâcher de plus eau que la demande afin d'atténuer les risques de débordements. Par contre en *état déficitaire* de la ressource, on limite les lâchers afin de conserver de l'eau pour des utilisations sur un horizon plus lointain.

Dans le modèle mathématique, les états de la ressource en eau doivent être traduits en chiffres pour effectuer des opérations mathématiques ou logiques. D'abord, le niveau d'eau dans la retenue est transformé en *indice d'état de stock*.

L'indice atteint la valeur maximale de 4, quand le niveau d'eau dans la retenue est égal au niveau maximum (voir Tableau VII-1). L'indice de 3 correspond au niveau supérieur de fonctionnement ; celle de 2, au niveau inférieur de fonctionnement. L'indice de 1 indique que le niveau d'eau arrive au niveau minimum de fonctionnement. L'indice de 0 coïncide avec le niveau minimum absolu de la retenue. Lorsque le niveau d'eau dans la retenue se situe entre deux niveaux de référence, on obtient l'indice à l'aide d'une interpolation linéaire.

Dans le Tableau VII-1, les indices compris entre 0 et 1 correspondent à la zone inactive de la retenue. Les indices de 1 à 2 font référence à la zone de restriction. La zone de fonctionnement normal se trouve entre les indices 2 et 3. Enfin les indices entre 3 et 4 signalent que le niveau d'eau de la retenue se situe dans la zone d'écrêtement des crues.

Les trois *états de disponibilité* de la ressource en eau sont interprétés de façon suivante :

- *Etat normal (0)* : le niveau d'eau de la retenue se trouve dans la zone de fonctionnement normal où la valeur de l'indice est comprise entre 2 et 3.
- *Etat excédentaire (+1)* : le niveau d'eau de la retenue arrive à la zone d'écêtement des crues où la valeur de l'indice est supérieure à 3.
- *Etat déficitaire (-1)* : le volume de la retenue se situe dans la zone de restriction ou dans la zone inactive où la valeur de l'indice est inférieure à 2.

Avec cette représentation, on définit dans le modèle un critère numérique de décision des lâchers d'eau du système. Mais lorsqu'un système est composé de plusieurs retenues d'eau, il faut déterminer combien d'eau doit lâcher chacune des retenues. On introduit pour cela le concept d'*équilibre des stocks d'eau*.

Pour cela, il faut tenter de maintenir en équilibre la disponibilité en eau de chaque retenue dans le système. La décision de lâchers est prise en fonction de l'état de disponibilité de chacune en respectant les demandes en eau locales et globales. Les contraintes de lâchers pourraient être engendrées, si la retenue ne se trouvait pas en état normal.

D'après Loucks et Sigvaldason (1982), deux configurations-types de système à réservoirs multiples sont représentées sur la Figure VII-6 : (a) réservoirs en cascade et (b) réservoirs en parallèle. La gestion des retenues dans les deux types de système se différencie par le fait que la décision de lâchers du réservoir aval dans le système en cascade doit prendre en compte l'eau lâchée par le réservoir amont.

Loucks (1994) a également donné un exemple de la fonction d'équilibrage de stock dans un système à trois réservoirs (Figure VII-7). Les réservoirs 1 et 2 sont en parallèle, alors que le troisième se trouve en cascade à l'aval des deux premiers. La vidange des deux réservoirs amont se fait proportionnellement à l'état de disponibilité du système. Le troisième réservoir reste plein jusqu'à ce que les deux réservoirs en amont soient vides.

Avec quelques modifications près, nous avons opté pour ces concepts afin de modéliser le fonctionnement du système du Mae Klong.

**Tableau VII-1 : Définition des indices d'état de stock d'eau
à partir des divers niveaux de la retenue**

Indices	Niveaux de la retenue	Zones
4	Niveau maximum de la retenue	-----
		Ecrêtement des crues
3	Niveau supérieur de fonctionnement	-----
		Fonctionnement normal
2	Niveau inférieur de fonctionnement	-----
		Restriction
1	Niveau minimum de fonctionnement	-----
		Inactive
0	Niveau minimum absolu	-----

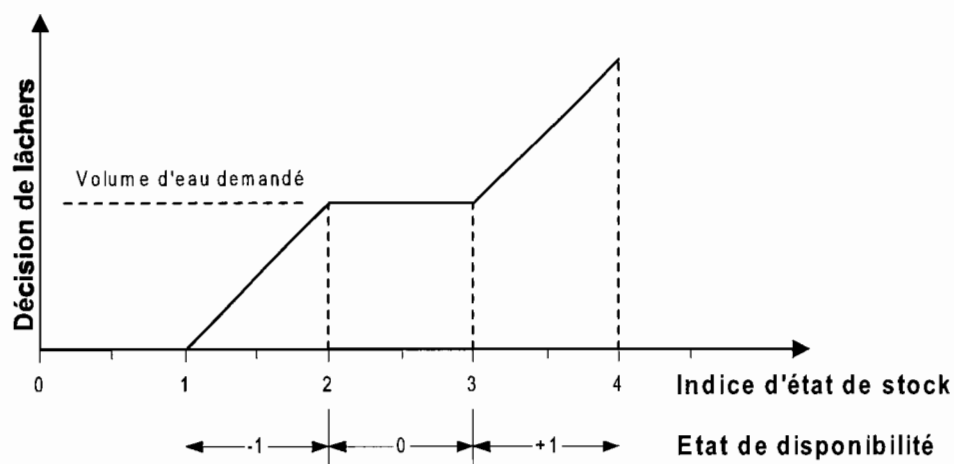


Figure VII-5 : Etats de disponibilité du stock d'eau et décision de lâchers

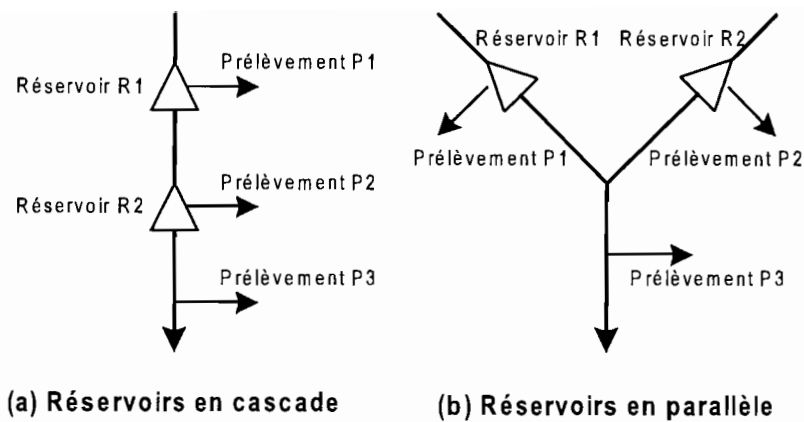


Figure VII-6 : Configurations types de système à réservoirs multiples (Loucks et Sigvaldason, 1982)

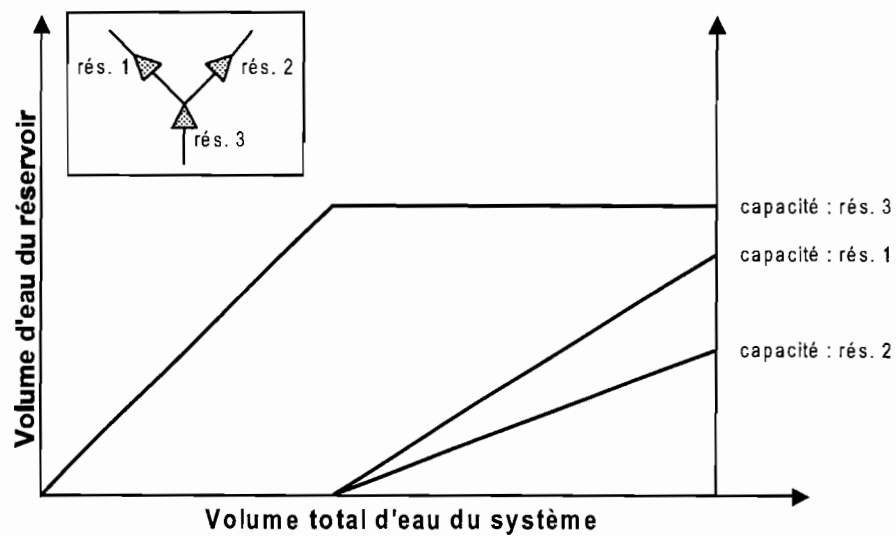


Figure VII-7 : Fonctions d'équilibrage de stock d'eau dans un système multi-réservoir (Loucks, 1994)

VII-2.2 Décision de lâchers d'eau en deux étapes

Le système du Mae Klong se compose de quatre barrages dont deux disposent d'une capacité importante. De ce fait, seulement les barrages Khao Laem (KHL) et Srinagarind (SNR), installés en parallèle, sont pris en considération en tant que stock d'eau du système du Mae Klong.

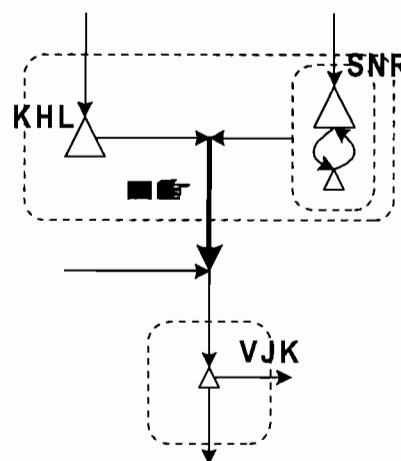
Les volumes des retenues de Tha Thung Na (TTN) et de Vajiralongkorn (VJK) sont très faibles en comparaison avec ceux des deux premières. De plus, comme nous l'avons déjà exposé plus haut, il est plus commode d'intégrer le barrage TTN dans le système de Srinagarind que de le considérer séparément

a) Lâchers du système multi-réservoir

Nous utilisons quatre types d'information pour la décision de lâchers d'eau des retenues :

- l'état de la ressource ;
- les règles et contraintes de gestion ;
- les apports dans les retenues et
- les demandes en eau.

Nous avons vu dans la section précédente comment on évalue l'état de disponibilité de ressource en eau. Les règles et les contraintes de gestion sont prises en considération lors de l'évaluation de l'état de ressource.



Pourtant, quand les ressources en eau du système ne se trouvent pas en état normal, les contraintes de lâchers d'eau se trouvent aussi changées :

- Les lâchers minimums nécessaires sont en général égaux au débit réservé dans le cours d'eau. Lorsque la retenue est remplie ; le niveau de la retenue dépasse le niveau supérieur de fonctionnement (c'est l'état excédentaire de la ressource). Ils deviennent le volume d'eau à évacuer sur le pas de temps considéré.
- Pour les lâchers maximums, la capacité du bief en aval du barrage est constitue la limite des lâchers d'eau de la retenue. Quand la ressource est en état déficitaire, il est nécessaire de conserver l'eau dans le stock pour l'utiliser tout au long de la période critique. Pendant cette période les lâchers maximums ne peuvent pas être supérieurs au volume mobilisable de la retenue divisé par un horizon considéré. Nous avons choisi un horizon de 6 mois qui correspond à la période sèche d'année.

Les apports aux retenues constituent un autre paramètre de décision. En gestion opérationnelle, on ne peut pas les connaître à l'avance. Dans notre cas, nous avons choisi la moyenne inter-annuelle comme apports prévus. Au cours de la simulation, les erreurs de prévision sont atténuées grâce à la prise en compte de l'information sur les états de stock d'eau du système au pas de temps de simulation précédent.

En ce qui concerne les demandes en eau du système du Mae Klong, c'est le point de vue de l'EGAT pour gérer des barrages qui est adopté (voir la section *Stratégie de l'exploitation des retenues* dans le chapitre IV). Les demandes en eau à satisfaire comprennent deux composantes : la demande pour la production hydroélectrique et la somme des usages de l'eau à l'aval du bas du bassin. En comparant les deux sur un pas de temps de simulation donné, c'est le volume d'eau le plus important qui est considéré comme le volume d'eau demandé par le système.

La décision de lâcher du système (L_{SYS}) est prise en fonction de la demande en eau et des contraintes réglementaires :

Équation VII-3 :
$$L_{SYS} = \text{MIN} (C_Lmax, \text{MAX} (\text{demande de système}, C_Lmin))$$

L_{SYS} doit être supérieure aux contraintes de lâchers minimums (C_Lmin), mais inférieure aux contraintes de lâchers maximums (C_Lmax).

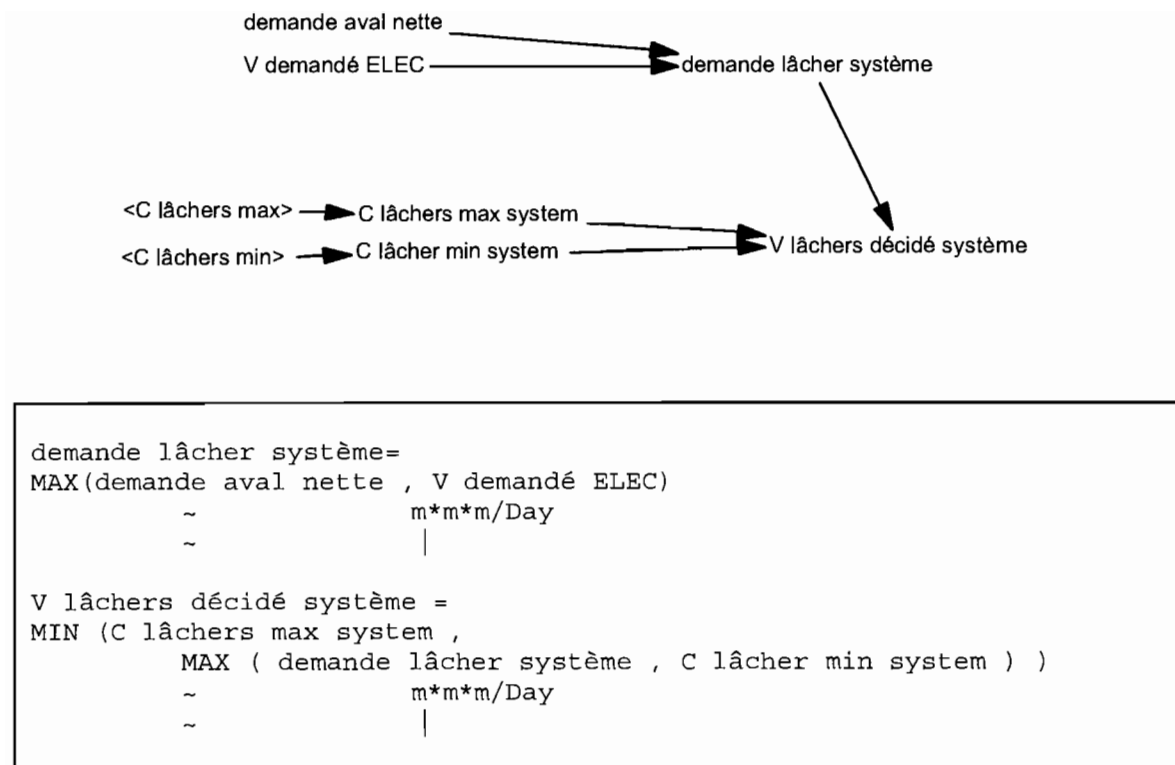
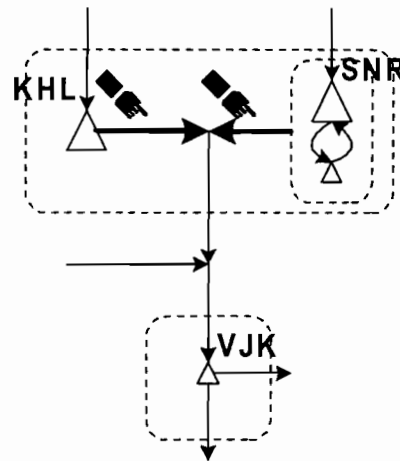


Figure VII-8 : Représentation et formulation dans l'environnement Vensim® de la décision de lâchers d'eau du système

b) Lâchers d'eau du réservoir individuel du système

Bien que fréquemment adoptée pour la modélisation du fonctionnement de barrages-réservoirs (Hydrologic Engineering Center (HEC), 1981 ; 1982 ; Loucks *et al.*, 1995), l'approche de l'équilibrage de stocks d'eau trouve certaines limites dans son application au système du Mae Klong.

Le volume démesuré de la retenue de Srinagarind par rapport aux apports entrants pose le problème de l'équilibrage. Ainsi, la définition du niveau inférieur de la retenue de Srinagarind semble floue.



Même si le niveau de la retenue de 159 m (snm) est signalé comme le niveau inférieur de fonctionnement, le gestionnaire ne souhaite pas descendre en dessous du niveau de 160,5 m (snm). En état de fonctionnement normal de la retenue de Srinagarind, des niveaux inférieurs de fonctionnement entre 162 et 165 sont observés dans la pratique de gestion opérationnelle. Si le niveau inférieur est fixé à 168 m (snm) pour favoriser le fonctionnement des turbines 4 et 5, un volume énorme de plus de 13 milliards de m³ ne sera pas mobilisable.

Pour étudier la politique de gestion des retenues dans le cas particulier du Mae Klong, nous avons développé une nouvelle approche d'équilibrage des stocks d'eau.

Au lieu de maintenir en équilibre les volumes disponibles d'eau de chaque retenue, un niveau objectif (Zobj) est introduit entre les limites de la zone de fonctionnement normal de la retenue (voir Figure VII-9). Ce niveau objectif peut être considéré comme le niveau moyen à long terme de la retenue.

Pour équilibrer le stock d'eau dans le système, on essaie de maintenir les écarts relatifs entre le niveau de plan d'eau et le niveau objectif de chaque retenue à la même condition. Notons ici que si on définit le Zobj égal au niveau inférieur de fonctionnement, il n'y aura aucune différence par rapport à l'approche d'équilibrage normal.

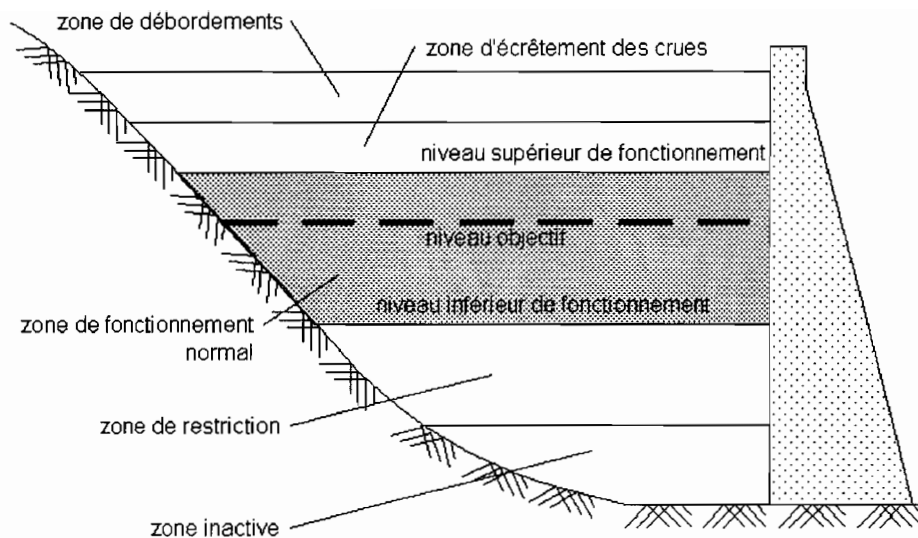


Figure VII-9 : Le niveau objectif situé à la zone de fonctionnement normal de la retenue

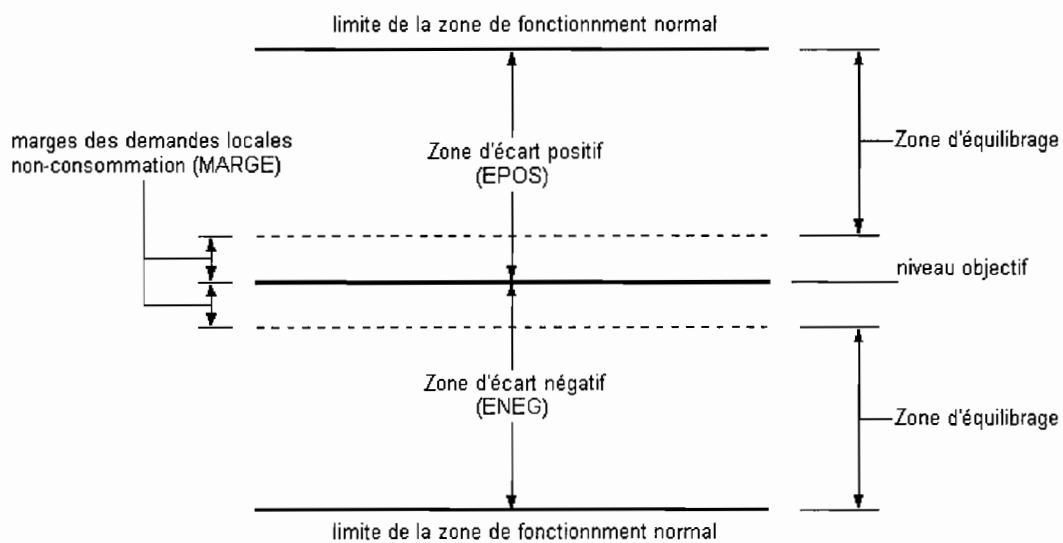


Figure VII-10 : Définition des zones de lâchers par équilibrage des stocks

Fonction d'équilibrage

Les lâchers d'équilibrage (LEQ) ne s'appliquent que quand les niveaux d'eau des deux retenues du système se situent dans la zone de fonctionnement normal (la zone grise en Figure VII-9). La décision de lâchers est prise dans le but de se rapprocher du niveau objectif en satisfaisant les demandes en eau du système. La traduction mathématique de ces situations s'exprime par les formulations suivantes utilisables pour le modèle de fonctionnement.

Notons que :

L_{SYS} : Lâchers du système (voir la section précédente plus haute).

$MARGE$: Demande locale (non-consommation) correspondant à la valeur comparativement la plus élevée de la demande de production hydroélectrique et du débit d'étiage :

Équation VII-4 : $MARGE = MAX(hydroélectricité, débit d'étiage)$

$ECART$: Ecart relatif par rapport au niveau objectif. Si le niveau de la retenue est supérieur au niveau objectif, on obtient un écart positif ($EPOS$). Dans la situation contraire, on obtient un écart négatif ($ENEG$).

Équation VII-5 :
$$EPOS = \frac{V_{retenue} - V_{objectif}}{|V_{supérieur} - V_{objectif}|}, \text{ si } Z_{retenue} - Z_{objectif} \geq 0$$

Équation VII-6 :
$$ENEG = \frac{V_{retenue} - V_{objectif}}{|V_{inférieur} - V_{objectif}|}, \text{ si } Z_{retenue} - Z_{objectif} < 0$$

Il existe 3 cas de décision de lâchers d'équilibrage des retenues :

- **Le cas (1) :** L'équilibrage s'applique quand les écarts du niveau objectif des deux barrages se situent dans le même côté (positif & positif ou négatif & négatif). Les lâchers de chaque barrage sont proportionnels à l'écart au niveau objectif ; les valeurs de LEQ doivent être supérieures aux valeurs de $MARGE$.

Équation VII-7 :
$$LEQ_{BARRAGE[i]} = L_{SYS} \cdot \frac{|ECART_{BARRAGE[i]}|}{\sum_{i=1}^N |ECART_{BARRAGE[i]}|},$$

avec $LEQ_{BARRAGE[i]} \geq MARGE_{BARRAGE[i]}$

- **Le cas (2) :** Si les lâchers (LEQ) des deux barrages se trouvent dans la marge ($LEQ_{BARRAGE[i]} < MARGE_{BARRAGE[i]}$), les lâchers des deux barrages seront égaux à la marge.

Équation VII-8 :
$$LEQ_{BARRAGE[i]} = MARGE_{BARRAGE[i]}$$

- **Le cas (3) :** Si les écarts ne se situent pas du même côté (l'un est positif ; l'autre, négatif), c'est l'écart négatif ($ENEG$) qui conditionnera les lâchers.

Le lâcher du barrage où l'écart est négatif (le niveau de la retenue est inférieur au niveau objectif), sera égal à la marge des demandes locales ($MARGE$) (Équation VII-9). Tandis que le lâcher de l'autre barrage sera égal à la différence entre le lâcher décidé du système et le lâcher du barrage de l'écart négatif (Équation VII-10).

Le troisième cas de décision de lâchers s'applique également au cas où l'un des $LEQ_{BARRAGE[i]}$ calculé serait inférieur à la marge. ($LEQ_{BARRAGE[i]} < MARGE_{BARRAGE[i]}$).

Équation VII-9 :
$$LEQ_{BARRAGE[-]} = MARGE_{BARRAGE[-]}$$

Équation VII-10 :
$$LEQ_{BARRAGE[+]} = L_{SYS} - MARGE_{BARRAGE[-]}$$

En conclusion, lorsque les deux barrages sont en état de fonctionnement normal, il existe 9 choix possibles pour définir la décision des lâchers aux barrages Srinagarind (LEQ_{SNR}) et Khao Laem (LEQ_{KHL}), en fonction des écarts de niveau objectif de chacun. Le Tableau VII-2 montre un récapitulatif de ces 9 choix. Dans un système où le stock d'eau est bien équilibré, ce sont les deux situations correspondant au cas 1 (en zone grise du Tableau VII-2) qui sont mises en œuvre.

Tableau VII-2 : Décisions de lâchers d'eau en vue de l'équilibrage de stock en cas du fonctionnement normal des retenues

Ecart du niveau objectif [SNR]	Ecart du niveau objectif [KHL]	Lâcher [SNR]	Lâcher [KHL]	Cas
$EPOS_{SNR}$	$EPOS_{KHL}$	LEQ_{SNR}	LEQ_{KHL}	1
$EPOS_{SNR}$	$ECART_{KHL} < MARGE_{KHL}$	$L_{SYS} - MARGE_{KHL}$	$MARGE_{KHL}$	3
$EPOS_{SNR}$	$ENEG_{KHL}$	$L_{SYS} - MARGE_{KHL}$	$MARGE_{KHL}$	3
$ECART_{SNR} < MARGE_{SNR}$	$EPOS_{KHL}$	$MARGE_{SNR}$	$L_{SYS} - MARGE_{SNR}$	3
$ECART_{SNR} < MARGE_{SNR}$	$ECART_{KHL} < MARGE_{KHL}$	$MARGE_{SNR}$	$MARGE_{KHL}$	2
$ECART_{SNR} < MARGE_{SNR}$	$ENEG_{KHL}$	$L_{SYS} - MARGE_{KHL}$	$MARGE_{KHL}$	3
$ENEG_{SNR}$	$EPOS_{KHL}$	$MARGE_{SNR}$	$L_{SYS} - MARGE_{SNR}$	3
$ENEG_{SNR}$	$ECART_{KHL} < MARGE_{KHL}$	$MARGE_{SNR}$	$L_{SYS} - MARGE_{SNR}$	3
$ENEG_{SNR}$	$ENEG_{KHL}$	LEQ_{SNR}	LEQ_{KHL}	1

Décision de lâchers au cas où l'une ou les deux retenues ne seraient pas en état normal

Le schéma décisionnel pour équilibrage de stock (Tableau VII-2) n'est applicable directement que dans le cas de retenues dans un état normal ; les niveaux des deux retenues se trouvent dans la zone de fonctionnement normal (l'indice de SNR=[0] et celui de KHL=[0]).

En état excédentaire (indice=[+1]), un lâcher supérieur au lâcher d'équilibrage de stock est requis pour atténuer le risque de débordements de la retenue. Cela devient une contrainte de lâcher minimum (**LMIN**).

En revanche en état déficitaire (indice=[-1]), le lâcher ne peut pas dépasser la contrainte de lâcher maximum (**LMAX**) où on considère les débits maximums possibles que le barrage puisse assurer sur un horizon considéré.

Le Tableau VII-3 résume les décisions de lâchers définies en fonction des états de disponibilité de stock de la retenue et des contraintes.

Tableau VII-3 : Définition des décisions de lâchers en fonction des états de stock d'eau et des contraintes

Etat de stock d'eau	Décision de lâchers	Contraintes
[+1] zone d'écrêtement de crues	Lâchers minimums exigés (LMIN)	Volume d'eau à évacuer
[0] zone de fonctionnement normal	Satisfaction à la demande sollicitée (LEQ)	Equilibre de stock
[-1] zone de restriction	Lâchers maximums possibles (LMAX)	Volume d'eau à réserver

Avec trois types d'état de stock (normal [0], déficitaire [-1] et excédentaire [+1]) et deux composantes dans le système (retenues de Srinagarind et de Khao Laem), il existe donc neuf (3^2) classes de décisions de lâchers de barrage (Tableau VII-4).

Tableau VII-4 : Règles de décision de lâchers d'eau du système du Mae Klong selon l'état de disponibilité de stock d'eau.

Etat de stock d'eau		Décision de lâchers	
SNR	KHL	Lâchers [SNR]	Lâchers [KHL]
+1	+1	$\text{Max}(\text{LEQ}_{\text{SNR}}, \text{LMin}_{\text{SNR}})$	$\text{Max}(\text{LEQ}_{\text{KHL}}, \text{LMin}_{\text{KHL}})$
+1	0	$\text{Max}(\text{LEQ}_{\text{SNR}}, \text{LMin}_{\text{SNR}})$	$\text{L}_{\text{SYS}} - \text{Max}(\text{LEQ}_{\text{SNR}}, \text{LMin}_{\text{SNR}})$
+1	-1	$\text{Max}(\text{LEQ}_{\text{SNR}}, \text{LMin}_{\text{SNR}})$	$\text{Min}(\text{LEQ}_{\text{KHL}}, \text{LMax}_{\text{KHL}})$
0	+1	$\text{L}_{\text{SYS}} - \text{Max}(\text{LEQ}_{\text{KHL}}, \text{LMin}_{\text{KHL}})$	$\text{Max}(\text{LEQ}_{\text{KHL}}, \text{LMin}_{\text{KHL}})$
0	0	LEQ_{SNR}	LEQ_{KHL}
0	-1	$\text{L}_{\text{SYS}} - \text{Min}(\text{LEQ}_{\text{KHL}}, \text{LMax}_{\text{KHL}})$	$\text{Min}(\text{LEQ}_{\text{KHL}}, \text{LMax}_{\text{KHL}})$
-1	+1	$\text{Min}(\text{LEQ}_{\text{SNR}}, \text{LMax}_{\text{SNR}})$	$\text{Max}(\text{LEQ}_{\text{KHL}}, \text{LMin}_{\text{KHL}})$
-1	0	$\text{Min}(\text{LEQ}_{\text{SNR}}, \text{LMax}_{\text{SNR}})$	$\text{L}_{\text{SYS}} - \text{Min}(\text{LEQ}_{\text{SNR}}, \text{LMax}_{\text{SNR}})$
-1	-1	$\text{Min}(\text{LEQ}_{\text{SNR}}, \text{LMax}_{\text{SNR}})$	$\text{Min}(\text{LEQ}_{\text{KHL}}, \text{LMax}_{\text{KHL}})$

VII-3 DECISION D'ALLOCATION EN EAU

La décision d'allocation en eau est la seconde étape dans le processus de décision de gestion de l'eau du bassin du Mae Klong. Le prélèvement de l'eau dans la rivière se fait en fonction de la ressource disponible. Dans la suite on exposera d'abord le cas le plus simple d'un seul usage, avant d'aborder le cas des usages multiples avec une priorité pour le système du Mae Klong.

Cas d'un usage unique d'eau

Le cas le plus simple de décision de prélèvement de l'eau dans une rivière est illustré par la Figure VII-11. On distingue deux situations de disponibilité de la ressource : excédentaire et déficitaire. En situation excédentaire, la ressource en eau est supérieure à la demande ; il est possible de prélever de l'eau autant que demandée. En situation déficitaire, le prélèvement est limité par le volume d'eau disponible.

Pourtant, une phase transitoire peut être observée entre les deux situations tant que le demandeur continue à être satisfait, même avec prélèvement légèrement inférieur à la demande exprimée pendant cette phase. Cette situation peut être observée en gestion opérationnelle ; la demande surestimée (ou volume tampon) est considérée comme une marge de sécurité de gestion.

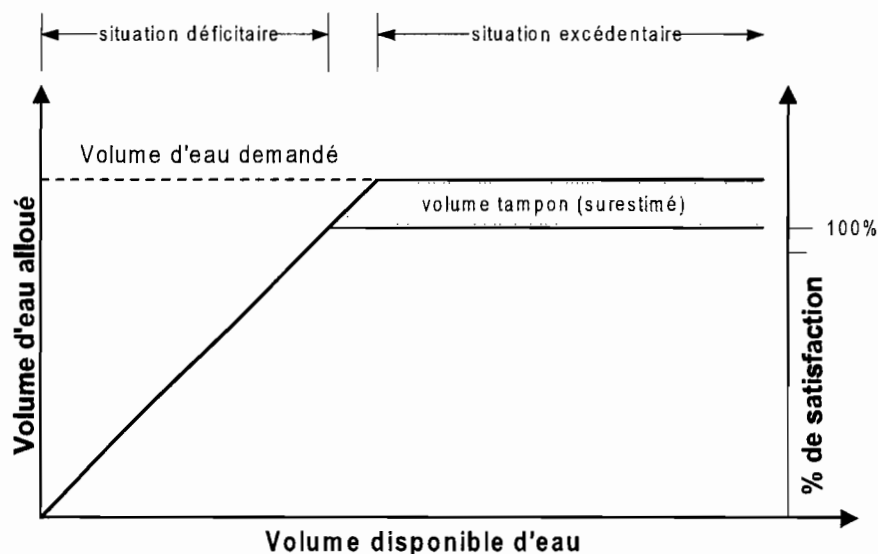
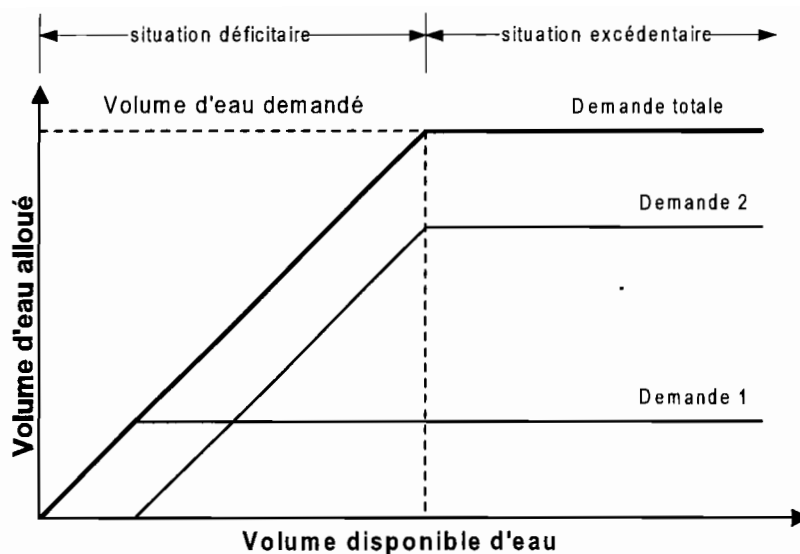


Figure VII-11 : Exemple de fonction d'allocation en eau



**Figure VII-13 : Exemple de fonction d'allocation en eau :
la demande 1 est prioritaire sur la demande 2**

Cas du bassin du Mae Klong

Selon le point de vue du RID, gestionnaire de l'ouvrage de prélèvement, nous pouvons diviser l'eau dans le fleuve Mae Klong auprès du barrage Vajiralongkorn en deux catégories : l'eau relâchée à l'aval du barrage dans le fleuve (débit réservé), et l'eau prélevée pour être utilisée soit dans le bassin du Mae Klong, soit dans le bassin du Tha Chin.

La règle en vigueur donne la priorité au débit réservé dans le fleuve sur les usages dans le bassin du Mae Klong. Les usages de l'eau dans le bassin du Tha Chin sont considérés comme moins prioritaire encore.

La politique de l'allocation en eau du Mae Klong est représentée sur la Figure VII-14. En état excédentaire, la ressource en eau est suffisante pour toutes les demandes exprimées. En revanche, les demandes en eau peuvent évoluer lorsque la déficience approche ; celles qui sont exprimée en état excédentaire deviennent déductibles et l'arrivée dans une situation déficitaire est en conséquence retardée.

Pourtant, dans le cas d'une ressource disponible très insuffisante, le prélèvement pour le bassin du Tha Chin peut être suspendu. Ensuite, la desserte pour les usages dans le bassin du Mae Klong décroît en fonction de la ressource disponible. Seul le débit réservé dans le fleuve est intégralement respecté.

Mais avec l'introduction de nouveaux usages prioritaires, en particulier celui de l'alimentation en eau potable de la Région Métropolitaine de Bangkok, la politique de l'allocation en eau du Mae Klong exige une redéfinition.

Comme dans la pratique, cette situation n'existe pas encore actuellement, nous plaçons dans notre modèle de fonctionnement cet usage en deuxième priorité après le débit réservé. Cela semble logique selon la définition de la priorité des usages de l'eau par le RID ; il existe toutefois un débat (que nous ne pouvons pas traiter ici) sur l'éventuelle priorité des droits entre les usagers résidant au sein du bassin du Mae Klong et ceux qui se trouvent à l'extérieur de ce bassin.

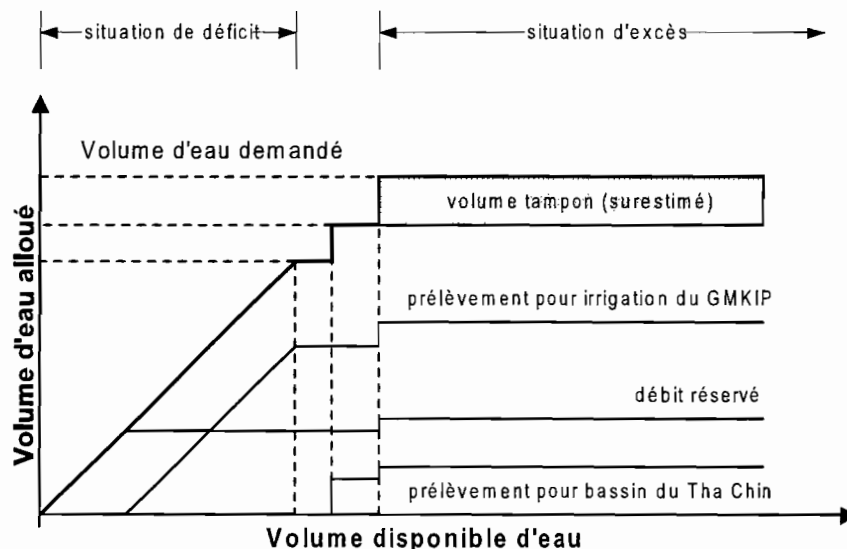


Figure VII-14 : Fonction d'allocation en eau du bassin du Mae Klong

VIII. EVALUATION DE LA PERFORMANCE DE L'HYDROSYSTEME

Les critères d'évaluation sont mis en œuvre dans le but de permettre de comparer quantitativement la performance de l'hydrosystème sous différentes situations. Une application dans ce contexte est la comparaison des stratégies de gestion de l'eau sous diverses hypothèses. Les critères techniques et économiques proposés sont abordés dans ce chapitre.

VIII-1 EVALUATION PAR CRITERES TECHNIQUES

Hashimoto *et al.* (1982b) ont développé des critères de mesure de la performance d'un système d'eau. Ces critères techniques sont souvent cités et employés dans le domaine de l'ingénierie de l'eau (*Water Resources Engineering*).

D'après Hashimoto, la performance d'un système peut être vue sous trois aspects différents :

- Avec quelle fréquence le système est-il défaillant (*fiabilité*) ?,
- Dans quel délai le système revient-t-il à un état de bonne marche après une défaillance (*résilience*) ?, et
- Quelle est l'ampleur les conséquences probables d'une défaillance (*vulnérabilité*) ?¹

De plus, la défaillance de système peut être définie de plusieurs manières. Pour les ouvrages hydrauliques, Tung (1996) distingue la défaillance structurale et la défaillance de performance. Dans notre cas, c'est la dernière qui nous intéresse plus particulièrement. Pour interpréter ce concept en terme mathématique, les notions de « *charge* » et « *résistance* » sont introduites.

¹ (1) how often the system fails (reliability)?,

(2) how quickly the system returns to a satisfactory state once a failure has occurred (resiliency)?, and

(3) how significant the likely consequences of failure may be (vulnerability?).

Selon Simonovic (1997a), la **charge** l est une variable qui traduit les comportements d'un système qui subit certaines conditions externes de pression ou de chargement. La **résistance** r est une variable caractéristique qui décrit la capacité du système à supporter une charge externe. Lorsque la charge dépasse la résistance ($l > r$), la défaillance ou l'incident survient. Un état de sécurité ou de fiabilité est obtenu, si la résistance est égale ou supérieure à la charge ($l \leq r$).

Le concept de « charge/résistance » peut être interprété différemment selon le domaine spécifique de problème posé. Dans le système de gestion des retenues du Mae Klong, trois groupes de performance de gestion à évaluer peuvent être identifiés : approvisionnement en eau, production hydroélectrique et protection contre les crues. Le Tableau VIII-1 donne un résumé des types de charge, de résistance et d'incidence pour les trois groupes.

Cinq points de contrôle ont été sélectionnés pour évaluer la performance de gestion de l'eau du système du Mae Klong. Les quatre premiers sont les demandes locales au niveau de la retenue ; le dernier est la somme des demandes en eau à l'aval du bassin.

- Demande hydroélectrique des Barrages Srinagarind et Khao Laem (1-ELEC SNR, 2-ELEC KHL)
- Demandes en volume dans la zone d'écrêtement des crues de la retenue (3-FLOOD SNR, 4-FLOOD KHL)
- Somme des demandes en eau à l'aval du bassin (5-LOW BASIN)

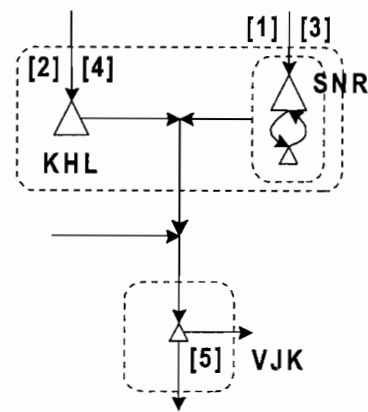


Tableau VIII-1 : Trois groupes de performance à évaluer pour le fonctionnement du système du Mae Klong

	Charge	Résistance	Type d'incident
Approvisionnement en eau	Demande en eau	Lâchers de retenues ou bien prélèvements	Pénurie en eau
Production hydroélectrique	Demande hydroélectrique ou objectif de production	Production hydroélectrique	Manque d'électricité (écart de l'objectif)
Protection des crues	Volume des crues	Volume réservé dans la retenue	Dépassement du niveau supérieur de fonctionnement (ou débordements)

Quatre critères de fonctionnement du système ont été mis au point : deux concernent la quantité et deux concernent le temps. L'interprétation du concept d'Hashimoto pour évaluer la performance du système est la suivante :

Fiabilité : Deux aspects de la fiabilité de fonctionnement du système sont considérés : la fiabilité concernant la quantité $IP(1)$, d'une part, et celle concernant le temps $IP(2)$, d'autre part.

Le premier indice de performance considère quantitativement les demandes et les services. Pour l'approvisionnement en eau et la production hydroélectrique, les demandes en eau sont exprimées en volume exigé. Les services sont les volumes d'eau lâchés à l'aval pour les demandes en eau dans la zone basse du bassin ou les lâchers turbinés pour l'hydroélectricité. La meilleure performance est obtenue, si l'indice de performance tend vers 1. C'est-à-dire que les demandes en eau sont satisfaites tout au long de la période considérée.

Pour la protection contre les crues, la demande est le volume libre dans la zone d'écrêtement des crues. L'indice de performance est égal à 1 lorsque le niveau d'eau de la retenue ne se trouve pas dans cette zone.

Équation VIII-1 :
$$IP(1) = \frac{S}{D}$$

Avec

$IP(1)$: Indice de performance pour la fiabilité de fonctionnement du système concernant la quantité ;

S : Service ;

D : Demande.

Au lieu de comptabiliser les déficits en quantité, le deuxième indice de performance considère la durée de défaillance. L'indice atteint une valeur de 1, ou 100% de fiabilité de fonctionnement, si aucune défaillance ne survient.

Équation VIII-2 :
$$IP(2) = \frac{T - \sum_{i=1}^T f_i}{T}$$

Avec

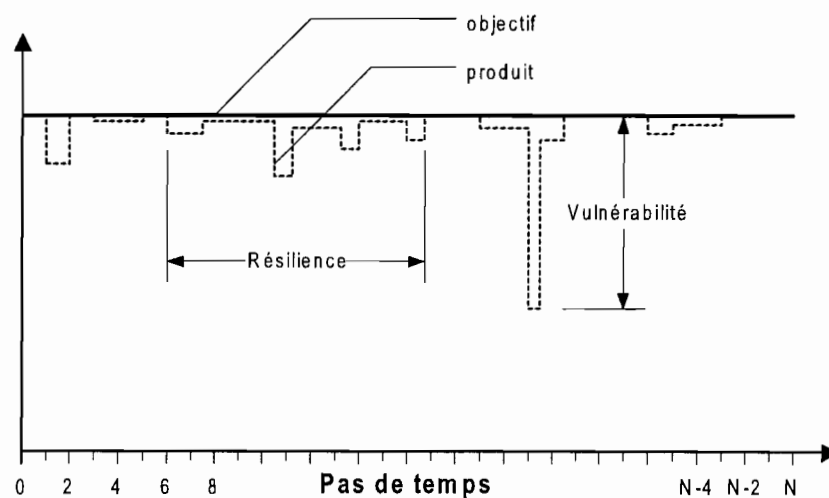
$IP(2)$: Indice de performance pour la fiabilité de fonctionnement
du système concernant le temps ;

T : Durée de simulation ;

f_i : Durée totale de défaillance.

Résilience et Vulnérabilité

La **résilience** est la période consécutive la plus longue de la défaillance. C'est une estimation du temps au bout duquel le système retourne à un état normal lorsqu'un incident s'est produit. La **vulnérabilité maximale** mesure l'ampleur la plus importante de la défaillance. L'illustration des deux indices se trouve en Figure VIII-1.



**Figure VIII-1 : Définition de la résilience et la vulnérabilité maximum
(BUDHAKOONCHAROEN, 1990)**

VIII-2 EVALUATION PAR CRITERES ECONOMIQUES

L'évaluation économique peut être définie comme la recherche d'indicateurs permettant à ceux qui les mettent en œuvre, d'apprécier les effets positifs et négatifs d'un projet ou d'un programme du point de vue de la collectivité par rapport à des objectifs économiques et sociaux définis à l'avance (Garraqué, 1994). L'évaluation par critères économiques offre un intérêt supplémentaire à celle par critères techniques, car elle résume toutes les activités en termes d'unité monétaire. Il peut demeurer en effet le seul indicateur à observer pour chaque simulation.

L'Équation VIII-3 montre le critère économique employé. A l'inverse du critère coût-bénéfice (B/C) couramment utilisé, la sensibilité du critère IB est plus intéressante, car le bénéfice net, qui a une gamme de variations plus large, est au dénominateur. Un gradient plus important est avantageux pour une résolution optimale.

Équation VIII-3

$$\frac{I_{\text{tot}}}{B_{\text{net}}} = \frac{\sum I_{\text{investissement}}}{\sum B_{\text{usage}} - \sum C_{\text{exploitation}}}$$

Le coût total I_{tot} est égal à la somme des investissements. La prise en compte des ouvrages hydrauliques dépend de l'échelle d'évaluation. De même, le bénéfice net B_{net} est égal à la somme des bénéfices des usages, à laquelle on soustrait la somme des coûts d'exploitation et de substitution.

Quatre échelles d'évaluation économique ont été choisies : évaluation globale, évaluation globale tarifiée, évaluation locale de Srinagarind et évaluation locale de Khao Laem.

L'évaluation globale considère les valeurs de tous les usages de l'eau, tandis que l'évaluation globale tarifiée ne prend en compte que les usages de l'eau qui sont présents dans les systèmes de tarification en vigueur comme l'électricité ou l'eau potable.

Les évaluations à échelle locale des barrages-réservoirs ont été proposées afin d'examiner les impacts de stratégies de gestion sur le fonctionnement de chaque barrage, particulièrement du point de vue de la production hydroélectrique. Le Tableau VIII-2 donne un sommaire des paramètres économiques qui sont pris en considération à chaque échelle d'évaluation.

Dans notre étude, l'évaluation économique souffre de l'insuffisance de données en quantité aussi bien qu'en qualité. L'obtention de données chiffrées objectives d'opérations, comme les dépenses ou les recettes d'exploitation, n'est pas toujours possible. Les valeurs/bénéfices des usages de l'eau sont difficiles à évaluer de façon concertée.

L'évaluation économique présentée ici est encore loin d'être exhaustive, bien que l'outil de modélisation développé soit capable avec un minimum d'adaptation de prendre en compte les informations économiques plus complètes. Une interprétation rigoureuse demande des études plus approfondies, en particulier, sur les valeurs des usages de l'eau ainsi que leurs comportements dynamiques. Nous limitons à l'application des indices pour la comparaison et le test de divers scénarios d'exploitation.

Tableau VIII-2 : Sommaire des paramètres économiques pris en compte aux différentes échelles d'évaluation

	Echelle d'évaluation			
	Globale	Globale tarifiée	Locale [SNR]	Locale [KHL]
Coût d'investissement				
SNR	☒	☒	☒	☐
KHL	☒	☒	☐	☒
VJK	☒	☒	☐	☐
Coût d'exploitation				
SNR	☒	☒	☒	☐
KHL	☒	☒	☐	☒
VJK	☒	☒	☐	☐
Coût de substitution				
électricité SNR	☒	☒	☒	☐
électricité KHL	☒	☒	☐	☒
eau potable BKK	☒	☒	☐	☐
irrigation MK	☒	☐	☐	☐
irrigation TCH	☒	☐	☐	☐
débit réservé	☒	☐	☐	☐
Coût de pompage	☒	☒	☒	☐
Domage des crues	☒	☐	☐	☐
Revenue				
électricité SNR	☒	☒	☒	☐
électricité KHL	☒	☒	☐	☒
eau potable BKK	☒	☒	☐	☐
Bénéfice				
irrigation MK	☒	☐	☐	☐
irrigation TCH	☒	☐	☐	☐
débit réservé	☒	☐	☐	☐

VIII-3 DEFINITION DES PARAMETRES ECONOMIQUES

Un certain nombre d'informations ont été obtenues à partir de diverses sources dans le but d'introduire des paramètres économiques (les coûts et les bénéfices d'usages de l'eau) dans le modèle de fonctionnement de l'hydrosystème du Mae Klong. Cependant, du fait que ces informations revêtent un caractère incomplet et peut-être parfois erroné, elles sont susceptibles d'introduire des incertitudes sur les résultats.

Pour atténuer les incertitudes sur ces paramètres économiques, des analyses de sensibilité ont été effectuées. Pour chaque paramètre étudié, on a testé jusqu'à 100 valeurs différentes dans une limite prédéfinie. Les simulations ont été faites sur l'ensemble de séries de données disponibles entre 1959 et 1998 (40 ans) au pas de temps hebdomadaire. L'étude de sensibilité nous permet de percevoir l'amplitude de variation des résultats en fonction des valeurs utilisées pour les paramètres.

Dans cette section l'exposé est limité aux paramètres économiques, tandis que l'étude détaillée sur les autres paramètres (la ressource en eau, les demandes en eau et les politiques de gestion) sera abordée dans la partie suivante.

a) Investissement

Les informations sur l'investissement des barrages-réservoirs se trouvent principalement dans les rapports d'achèvement des barrages - *completion report* (EGAT, 1982 ; 1985a ; 1985b). Le manuel d'études de projet d'aménagement hydroélectrique réalisé par Vacharasindhu (1989) fournit aussi quelques renseignements complémentaires. Quant à l'investissement du GMKIP (y compris celui du barrage Vajiralongkorn (VJK)) nous l'établissons à partir du bulletin d'information diffusé par le RID.

L'étude de sensibilité de ce paramètre est effectuée par l'introduction d'un paramètre « *erreur d'estimation* ». Ce nouveau paramètre multiplicateur varie entre 0 et 2 (ou entre 0% et 200%). Quand le paramètre « *erreur d'estimation* » est égal à 1, nous obtenons les valeurs d'investissement estimées (résumées dans le Tableau VIII-3).

Comme la somme de l'investissement est au numérateur de l'indice économique IB, nous retrouvons la relation linéaire entre l'investissement et l'indice IB (Figure VIII-2). La variation de l'indice par rapport à celle du paramètre « *investissement* » est considérable ; une erreur de 1% sur la valeur estimée modifie l'indice IB-Global de 8,6%.

b) Coût d'exploitation

L'estimation du coût d'exploitation et d'entretien (O&M) des barrages se base sur les informations budgétaires. Nous avons obtenu les coûts O&M de l'*Hydroplant Srinagarind* et l'*Hydroplant Khao Leam* pour l'année fiscale 1997/98 de la part de l'EGAT. Le budget annuel de l'Office Régional 10 (RID) est assimilé au coût O&M du GMKIP. Cette estimation est toutefois probablement surestimée, car le budget de l'Office Régional 10 comprend non seulement les dépenses du GMKIP, mais aussi celles de petits projets annexes.

L'agence budgétaire de l'Office Régional 10 nous a fourni les données des budgets pour les années fiscales 1997/98 et 1998/99. Du fait de la diminution considérable du budget en 1998/99, conséquence de la crise économique qui a débuté en 1997 et par cohérence avec les données disponibles de l'EGAT, seules les données de l'année fiscale 1997/98 sont retenues. Les coûts O&M annuels sont résumés dans le Tableau VIII-3.

L'étude de sensibilité du paramètre « *coût O&M* » est faite de la même façon que celle du paramètre « *investissement* ». Un paramètre « *erreur d'estimation* » a été rajouté ; il varie de même entre 0% et 200%. Le coût O&M est un paramètre qui vient en déduction du bénéfice total. Une hausse de la valeur du coût O&M estimée réduit donc le bénéfice net du système. En effet, l'indice IB varie dans le même sens que le coût O&M (Figure VIII-3). Une erreur d'estimation de 1% du coût O&M entraîne la variation de l'indice inférieure à 2,5%.

Tableau VIII-3 : Paramètres économiques du modèle de fonctionnement de l'hydrosystème du Mae Klong

Paramètres	Valeurs utilisées	Test de la sensibilité
Coût		
investissement		
SNR	6 223 M Baht ²	Pourcentage de la valeur estimée de 0 à 200%
KHL	9 110 M Baht	
GMKIP(VJK)	10 634 M Baht	
exploitation (O&M)		
SNR	376,84 M Baht/an	Pourcentage de la valeur estimée de 0 à 200%
KHL	196,91 M Baht/an	
GMKIP(VJK)	793,69 M Baht/an	
pompage		
SNR	1,2 Baht/KWh	-
substitution		
Hydroélectricité SNR	1,2 Baht/KWh	0 – 10 Baht/KWh id.
Hydroélectricité KHL	1,2 Baht/KWh	
Eau potable BKK	10 Baht/m ³	
Débit d'étiage à l'aval VJK	5 Baht/m ³	
dommage des crues	0,935 Baht/m ²	
Bénéfice des usages		
Hydroélectrique	1,50 Baht/KWh	0 – 10 Baht/KWh
Irrigation du Mae Klong	0,75 Baht/m ³	0 – 10 Baht/m ³
Débit d'étiage	1,00 Baht/m ³	0 – 20 Baht/m ³
Eau potable de BKK	0,30 Baht/m ³	0 – 20 Baht/m ³
Irrigation du Tha Chin	0.75 Baht/m ³	-

² 1 Euro ~ 40 Baht ; 1 Franc ~ 6 Baht (novembre 2000)

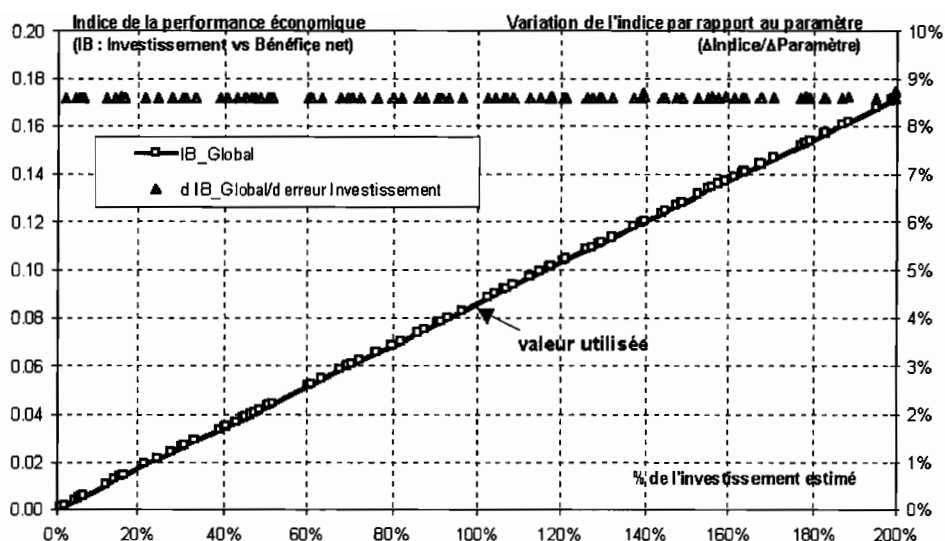


Figure VIII-2 : Variation de l'indice IB par rapport à l'investissement estimé

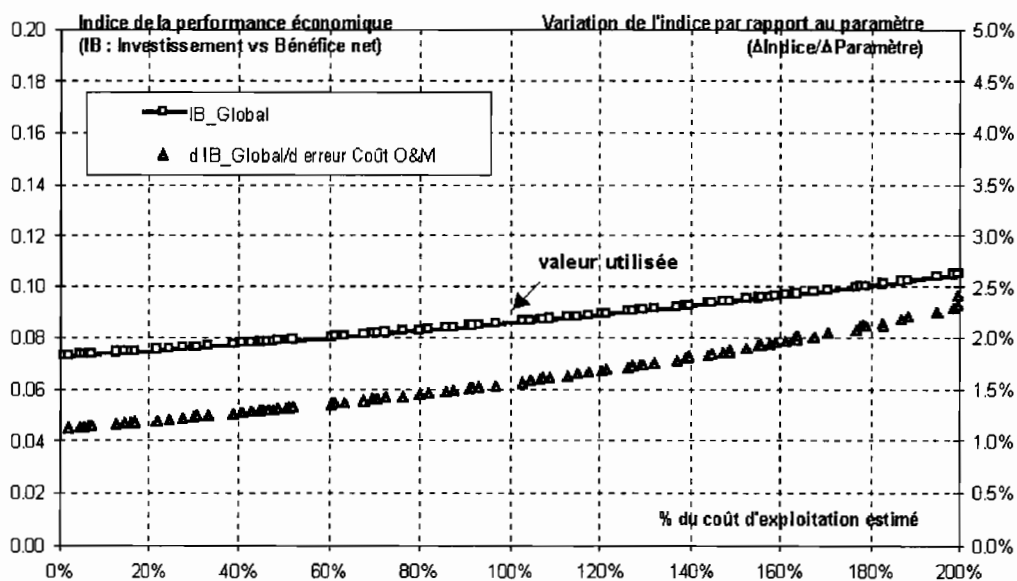


Figure VIII-3 : Variation de l'indice IB par rapport au coût d'exploitation estimé

c) *Coût de substitution*

Une difficulté se pose lors de la définition des coûts de substitution, car il n'existe pas en réalité d'évaluation de tels coûts en gestion opérationnelle. L'évaluation de ces coûts se base donc sur le raisonnement analogique.

Pour la production hydroélectrique, si le système d'hydroélectrique du Mae Klong ne pouvait pas atteindre l'objectif de production, la mise en marche d'autres usines électriques serait nécessaire. C'est ainsi qu'un coût de production moyen de l'ensemble du système de production électrique de 1,2 Baht/KWh est adopté comme coût de substitution de la production hydroélectrique.

Pour l'eau potable, le coût d'approvisionnement en eau à partir d'autre ressource est considéré comme coût de substitution. En faisant l'hypothèse que le coût d'approvisionnement en eau n'est pas supérieur au prix de vente de l'eau potable³, nous avons choisi un coût de substitution de 10 Baht/m³. Ainsi, nous utilisons la moitié de ce dernier de 5 Baht/m³ pour le coût de substitution du débit réservé. Le débit réservé possède une qualité inférieure à celle de l'eau potable et on peut raisonnablement estimer que son coût d'approvisionnement en eau est moins élevé.

L'observation de l'impact sur les résultats de la simulation est nécessaire, car ces coûts de substitution sont soumis à plusieurs hypothèses. L'impact du coût de substitution de l'hydroélectricité est plus important que celui des autres. La variation atteignant 4,5 % est observée quand le coût de substitution de l'hydroélectrique atteint 10 Baht/KWh (Figure VIII-4).

De variations très faibles (< 0,02%) sont observées dans les cas des coûts de substitution de l'eau potable et du débit réservé (Figure VIII-5 et Figure VIII-6 respectivement), même si le coût de substitution s'accroît jusqu'à 50 Baht/m³. Etant donnée ces deux usages de l'eau sont les plus prioritaires, les pénuries en eau surviennent moins fréquemment sur l'ensemble de la période de simulation. L'impact sur les résultats est donc relativement réduit, bien que l'estimation des coûts de substitution de ces usages de l'eau soit très grossière.

³ D'après Thai DCI (1990), le tarif moyen de l'eau potable de la région métropolitaine de Bangkok en 1989 est de l'ordre de 6,12 Baht/m³ ; celui en 2000 est prévu de 12,37 Baht/m³.

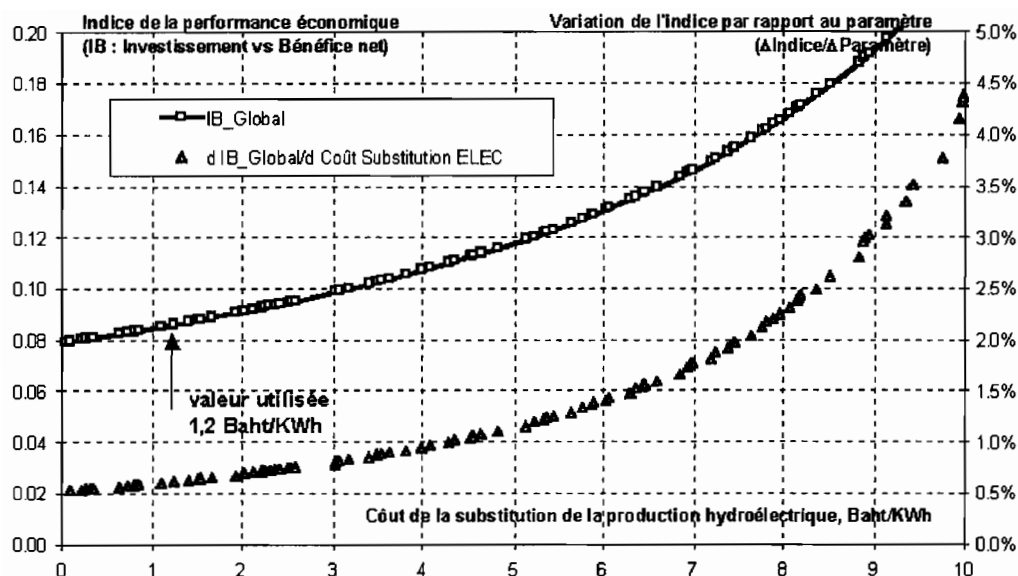


Figure VIII-4 : Variation de l'indice IB par rapport au coût de substitution de la production hydroélectrique

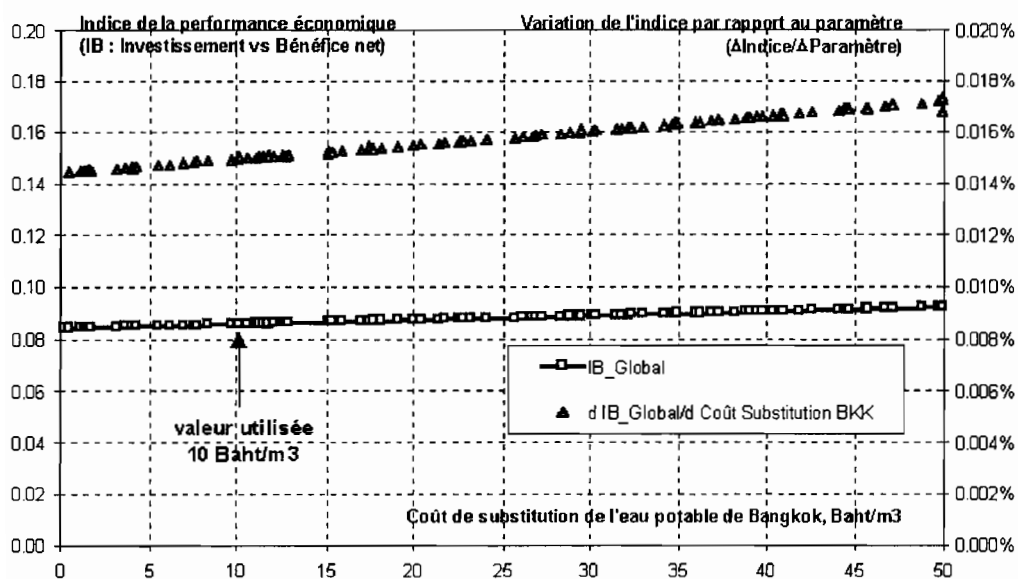


Figure VIII-5 : Variation de l'indice IB par rapport au coût de substitution de l'approvisionnement en eau potable de la Région Métropolitaine de Bangkok

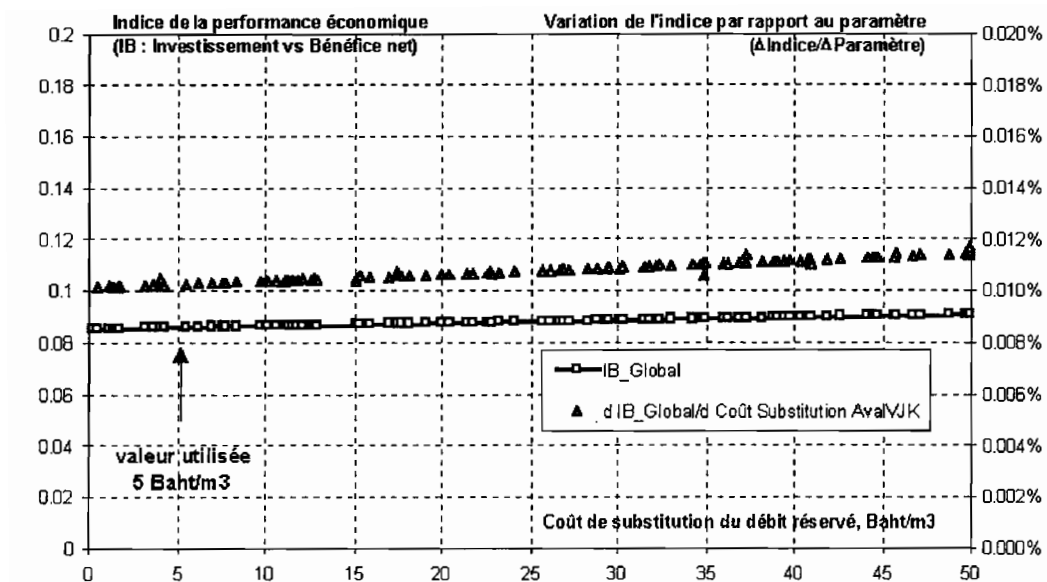


Figure VIII-6 : Variation de l'indice IB par rapport au coût de substitution du débit réservé

d) Dommages des crues

Les crues dans le fleuve Mae Klong ont quasiment disparu après la mise en eau des barrages-réservoirs à l'amont du bassin versant dans les années 80. Grâce à l'étude de la JICA (1978) sur le système de prévision des crues de ce bassin, les coûts des inondations et des dommages causés par les crues en 1971, 1972 et 1974 ont été établis. Nous avons utilisé ces éléments pour estimer les surfaces endommagées rapportées au volume d'eau écoulé dans le fleuve. Cela conduit à une estimation de 0,935 Baht/m² pour le coût des dommages par unité de surface sur la base du bénéfice moyen des périmètres irrigués.

L'étude de sensibilité de ce paramètre nous montre que les crues ne surviennent pratiquement pas sur l'ensemble de la période de simulation. Aucune variation n'est observée sur la Figure VIII-7. Le résultat nous amène à conclure qu'avec les aménagements déjà réalisés dans le bassin et avec la politique raisonnée de gestion le risque des crues de ce bassin est bien atténué.

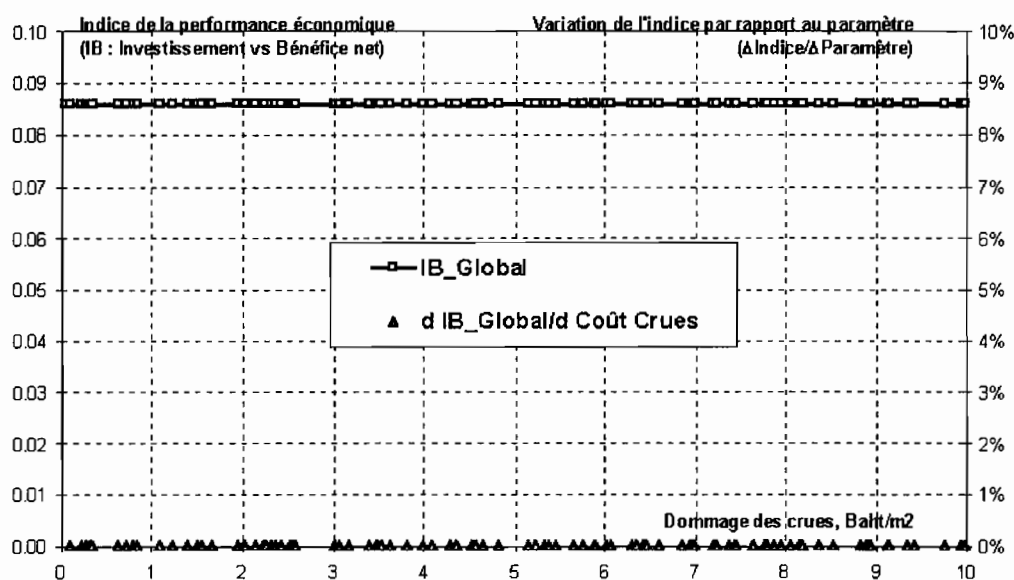


Figure VIII-7 : Variation de l'indice IB par rapport aux dommages des crues

e) *Valeurs économiques des usages de l'eau*

L'évaluation de la valeur des usages de l'eau en terme monétaire s'avère délicate en raison du comportement spécifique de cette ressource naturelle. Dans le contexte de l'hydrosystème du Mae Klong, certains usages de l'eau, tels que l'hydroélectricité et l'eau potable, se trouvent déjà dans un système de tarification. Mais aucune évaluation économique ne se fait d'une manière directe pour l'eau agricole et pour le débit réservé.

Nous avons adopté les tarifs en vigueur dans le cas où ils existeraient. Un prix de vente moyen de l'électricité de 1,5 Baht/kWh a été choisi ; c'est le prix que vend, au tarif grossiste, l'EGAT aux agences de distribution d'électricité.

Pour l'eau potable, un prix de 0,30 Baht/m³ a été adopté. C'est la redevance à laquelle l'Agence de l'Eau Potable de Bangkok (MWA) est soumise par le RID lors des prélèvements de l'eau du bassin du Mae Klong.

Ce prix est d'ailleurs bien inférieur au prix de vente de l'eau potable dans la région métropolitaine de Bangkok (qui est environ de 10 Baht/m³). Nous considérons toutefois que ce tarif est celui qui est à mettre au bénéfice du système du Mae Klong, à l'exclusion des coûts additionnels du système de production et de traitement de l'eau potable qui sortent du cadre d'analyse de notre étude, laquelle s'attache au fonctionnement d'un bassin hydrographique.

En ce qui concerne l'évaluation de bénéfice de l'eau d'irrigation, plusieurs sources d'information ont été examinées (Tingsanchali *et al.*, 1993 ; BINNIE *et al.*, 1997 ; Rajasekaram, 1997). Les études de Tingsanchali *et al* et de BINNIE *et al* concernent le bassin du Chao Phraya, même si la thèse de doctorat de Rajasekarem fait référence au bassin du Mae Klong.

Mais comme les zones d'irrigation du Mae Klong appartiennent de fait au Delta du Chao Phraya, l'utilisation de ces informations n'est pas absurde. Finalement, et en raison de la cohérence des données fournies, nous avons adopté intégralement les données de Tingsanchali *et al.* (1993) pour l'évaluation du bénéfice d'irrigation.

Selon les informations présentées dans le Tableau VIII-4, le bénéfice annuel pour l'irrigation du GMKIP est estimé à 3,8 milliards de Bahts. Mais l'application brute des données trouve encore une autre limite, car les bénéfices des cultures sont exprimés en Bahts/hectare qu'il faut ramener à un bénéfice pour un mètre cube d'eau. Sur la base du volume prélevé de 5,1 milliards de m³ par an qui correspond aux données moyennes de la période 1989 / 1998, nous obtenons une estimation pour le bénéfice de l'eau d'irrigation de 0,75 Baht/ m³.

En ce qui concerne la valeur de l'usage de l'eau pour la protection contre les intrusions salines (ou du débit réservé), nous ne possédons pas d'indicateur pour évaluer son bénéfice. Notre raisonnement se base donc sur la définition des usages prioritaire de l'eau en vigueur. Comme cet usage est défini comme prioritaire sur l'usage de l'eau agricole, sa valeur doit être supérieure. Nous optons donc pour une valeur de 1 Baht/m³

pour le bénéfice de cet usage. Le calcul du bénéfice se limite d'ailleurs à un seuil de débit de 50 m³/s (défini en tant que la demande pour cet usage) ; le débit qui dépasse ce seuil ne produisant plus de bénéfice.

Pour terminer cette section, les quatre graphiques ci-dessous présentent les résultats d'étude de sensibilité de paramètres « *valeur d'usage de l'eau* » : Figure VIII-8, Figure VIII-9, Figure VIII-10 et Figure VIII-11. Comme ces paramètres sont des dénominateurs de l'indice IB, une décroissance exponentielle de l'indice est observée dans les quatre graphiques, mais avec une ampleur de variation différente. La variation de l'indice est amplifiée, lorsque la valeur de paramètre est faible. En revanche, elle est réduite, quand la valeur de paramètre est plus importante.

C'est le bénéfice de l'eau d'irrigation qui donne la variation de l'indice la plus remarquable entre 10% et 30%, quand la valeur utilisée est inférieure à 1 Baht/m³ (Figure VIII-8). Tandis que le changement du prix de l'électricité ne provoque pas plus de 8% de variation de l'indice (Figure VIII-9). De même, les changements de la valeur du débit réservé et du prix de l'eau potable entraînent moins de 3% de variation de l'indice (Figure VIII-10 et Figure VIII-11, respectivement).

L'impact considérable du paramètre du bénéfice de l'eau d'irrigation sur l'indice IB (uniquement à l'échelle d'évaluation globale) est du à la fraction importante du volume d'eau prélevé pour l'usage agricole dans l'hydrosystème du Mae Klong. Il est donc regrettable que, comme nous constatons par l'indisponibilité des données et par l'absence d'un système de tarification, ce bénéfice n'ait jamais été évalué de façon rigoureuse par les gestionnaires.

Tableau VIII-4 : Surfaces cultivées selon les types de culture et bénéfice net correspondant des zones d'irrigation du Mae Klong (GMKIP)

Types de culture	Surface cultivée en ha (moyenne 1993-1998)	Bénéfice net en Baht/ha (Tingsanchali <i>et al.</i> , 1993)
Rizière (saison humide)	141 523,20	951,5
Rizière (saison sèche)	90 182,74	4 813,50
Champs de canne à sucre	82 466,29	3 111,50
Vergers fruitiers	57 389,45	27 702,68
Jardins maraîchers	29 661,23	39 062,56
Aquaculture	9 554,85	27 793,94

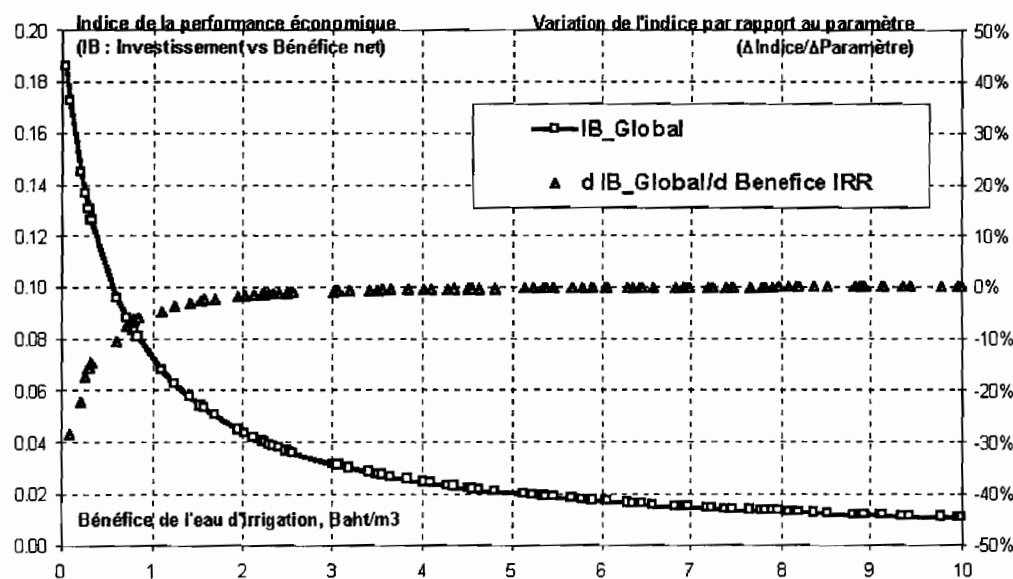


Figure VIII-8 : Variation de l'indice IB par rapport au bénéfice de l'eau d'irrigation

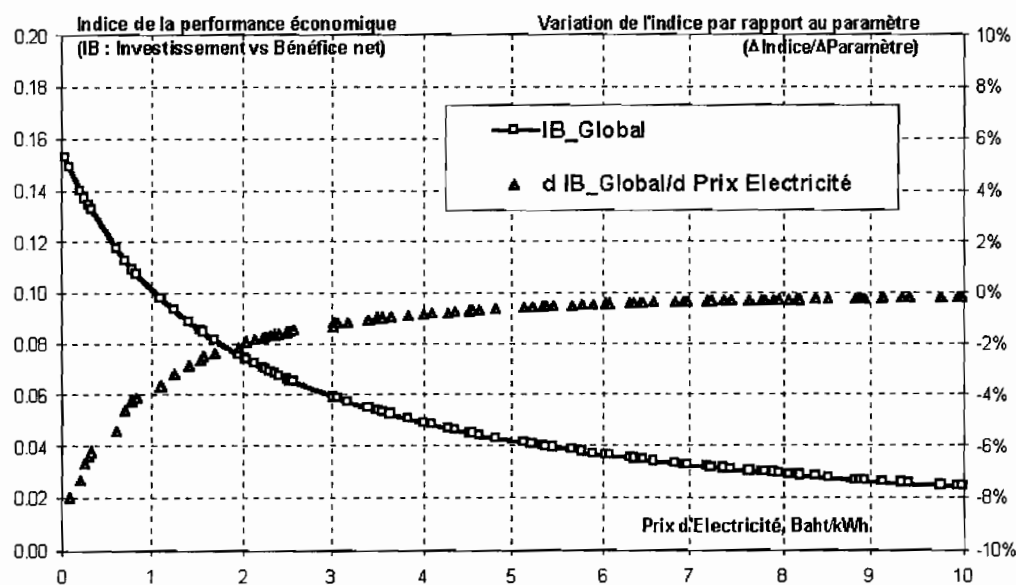


Figure VIII-9 : Variation de l'indice IB par rapport au prix de vente de l'électricité

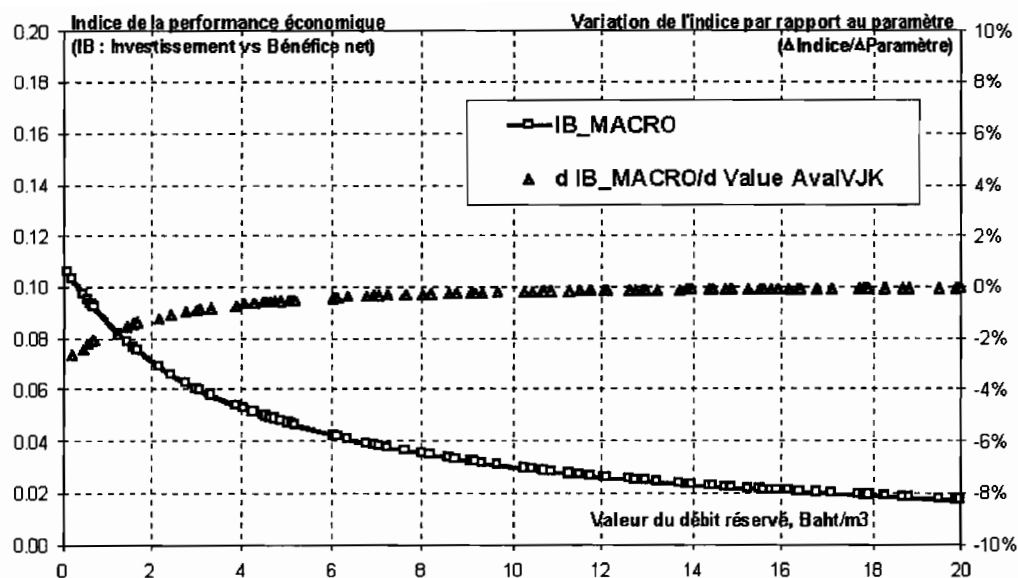


Figure VIII-10 : Variation de l'indice IB par rapport au bénéfice du débit réservé

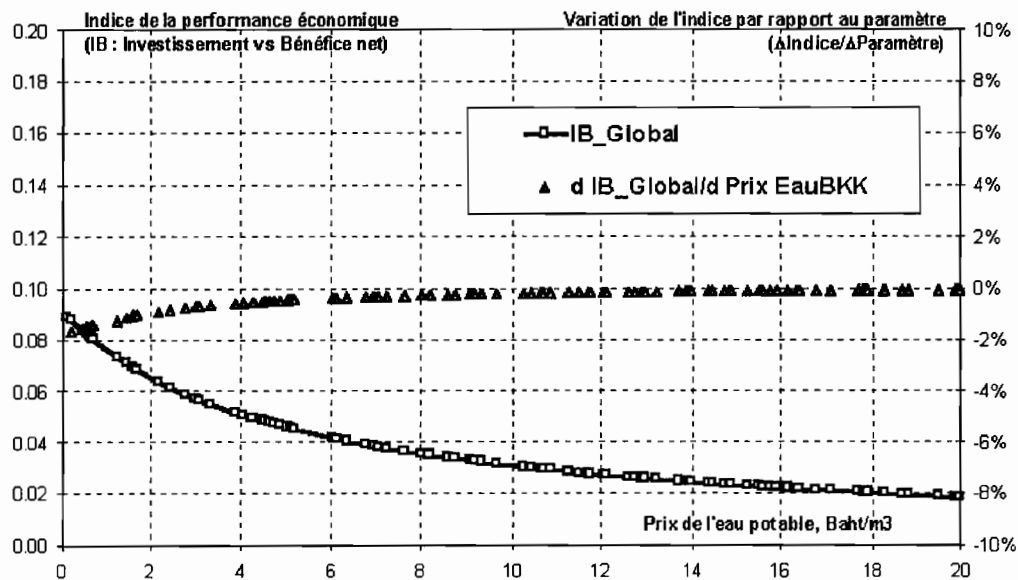


Figure VIII-11 : Variation de l'indice IB par rapport au prix de vente de l'eau potable

CONCLUSIONS DE LA DEUXIEME PARTIE

La deuxième partie traite de la mise au point des modèles pour représenter la circulation des flux d'eau dans l'hydrosystème du bassin du Mae Klong.

Un modèle pluie-débit semi-global, GR3 S, fonctionnant au pas de temps hebdomadaire a été dérivé de l'architecture du modèle GR3 J pour reconstituer les apports naturels aux retenues et les apports latéraux en provenance des bassins intermédiaires. Le modèle calcule les écoulements à partir des données pluviométriques.

Le modèle de simulation de fonctionnement des ouvrages est construit pour simuler les flux d'eau contrôlés par les aménagements. Les contraintes réglementaires des retenues et des usines hydroélectriques sont introduites dans le modèle.

Une méthode d'équilibre du stock est proposée en introduisant la notion de niveau objectif de fonctionnement à long terme pour étudier finement le fonctionnement des ouvrages du système.

Des indices de performance de fonctionnement sont définis pour aider à évaluer quantitativement les résultats de la simulation sous différentes hypothèses. Quatre indices techniques sont choisis pour contrôler cinq points dans le bassin : le premier concerne la demande totale à l'aval et les quatre autres visent à une évaluation locale des fonctionnements des barrages-réservoirs dans une optique de production hydroélectrique et de protection contre des crues.

L'un autre indice IB (Investissement/Bénéfice net) est établi pour évaluer la performance économique à l'échelle globale du bassin autant qu'à l'échelle locale des barrages-réservoirs. La variabilité des résultats due aux paramètres économiques est mise en évidence à l'aide d'une analyse de sensibilité.

TROISIEME PARTIE

APPLICATIONS DES MODELES

Trois chapitres dans la dernière partie traitent l'application du modèle aux différents problèmes dans l'hydrosystème du Mae Klong :

- Reconstitution des écoulements naturels aux ouvrages hydrauliques dans le chapitre IX ;
- Impact de la variabilité des ressources en eau et des demandes sur le fonctionnement du système dans le chapitre X ;
- Enfin, dans le chapitre XI, stratégies de gestion de l'eau, plus particulièrement d'exploitation des retenues dans le système

IX. RECONSTITUTION DES ECOULEMENTS NATURELS

L'objectif de la modélisation pluie-débit dans cette étude est de reconstituer les écoulements naturels du bassin versant à l'amont du barrage de Vajiralongkorn (dans la suite, on l'appellera « bassin amont du Mae Klong »). C'est, d'une part, les apports entrant aux deux grands barrages-réservoirs du bassin, et, d'autre part, les apports latéraux en provenance des bassins intermédiaires entre les barrages-réservoirs et le barrage de dérivation de Vajiralongkorn.

La modification du modèle GR pour fonctionner au pas de temps hebdomadaire est discutée dans la partie précédente plus haut. Pourtant, les questions concernant l'applicabilité d'un modèle hydrologique de type global à un bassin versant de grande dimension, ainsi que les données disponibles, requièrent une adaptation du modèle GR, avant la mise en application dans le cas du bassin du Mae Klong.

IX-1 DONNEES HYDROLOGIQUES

Nous pouvons classer les données utilisées pour la modélisation hydrologique en 4 types : les caractéristiques de bassins versants, les précipitations, l'écoulement et l'évaporation.

a) Caractéristiques du bassin versant

Les rapports antérieurs d'études sur le bassin du Mae Klong apportent une quantité considérable d'informations. Les études de la JICA (1980a) et de l'AIT (1994) ont pris en considération l'ensemble du bassin hydrographique.

Nous exploitons également la base de données spatiales (SIG) du Projet DORAS, le modèle numérique de terrain (MNT) à 30" d'arc extrait de la base GTOPO30 diffusée par *Eros Data Center (US Geological Survey)*, et les données numérisées de l'occupation des sols de l'*Office of Agricultural Economics (OAE)* de Thaïlande.

b) Observations météorologiques

Le *Thai Meteorological Department* (TMD) est chargé de l'observation météorologique et de l'entretien de la base de données. Les données numérisées de précipitations et d'évaporation y sont disponibles.

L'estimation de l'évaporation du bassin du Mae Klong est faite à partir des données relevées sur les bacs de type « Classe A » de 4 stations météorologiques situées dans le bassin ou à proximité : Umphang, Thong Pha Phum, Kanchanaburi et Suphanburi (Figure IV-3). Etant donnée que l'évaporation du bassin du Mae Klong ne présente que de faibles variations inter-annuelles, ce sont les moyennes mensuelles inter-annuelles qui ont été utilisées.

Quant aux précipitations, 320 stations pluviométriques situées dans les 11 provinces du bassin du Mae Klong ont été sélectionnées : Kanchanaburi, Suphanburi, Ratchaburi, Phetchaburi, Samut Songkhram, Samut Sakhon, Tak, Kamphaeng Phet, Nakhon Sawan, Nakhon Pathom et Uthai Thani. Les données pluviométriques journalières sont numérisées à partir de 1952. TMD est le gestionnaire de la plupart des stations, mais RID renforce ce réseau national d'observation sur les périmètres irrigués et les sites d'aménagement hydraulique.

La qualité de données dépend directement de la catégorie de station. Les stations météorologiques synoptiques du TMD possèdent en général une longue série d'observation et peu de lacunes. Nous retrouvons la même qualité de données pour les stations agrométéorologiques de deuxième catégorie, mais la durée d'observation est relativement moins étendue. Les stations de ces deux catégories se localisent dans les villes principales. Malgré une qualité de données médiocre, les stations de district, de troisième catégorie, apportent des informations indispensables dans des zones plus reculées. Sur ce critère de qualité de données, les stations du RID appartiennent plutôt à la troisième catégorie.

La densité du réseau d'observation pluviométrique engendre d'ailleurs une difficulté en analyse pluviométrique. Un réseau très dense est en place dans la plaine, alors que peu de postes pluviométriques existent dans les zones forestières, en particulier à l'amont du bassin de la Khwae Yai. Nous n'avons obtenu que très peu d'information sur les précipitations dans les zones montagneuses élevées, car la plupart des postes se trouve au long des cours d'eau.

En résumé, nous avons les données numérisées des précipitations entre 1952 et 1997 pour 279 stations pluviométriques dont 259 sont localisables de manière précise. Lors du premier traitement, 102 stations ont été analysées à l'aide du logiciel Climant pour leur homogénéisation et leur régionalisation. 59 stations (encadrées par des carrés clairs sur la Figure IX-1) sont retenues pour élaborer les vecteurs régionaux du bassin du Mae Klong.

c) Hydrométrie

Les données disponibles d'écoulements sont beaucoup moins abondantes que celles de pluies. Nous avons obtenu les données hydrométriques journalières du RID et de l'EGAT. Les deux organismes utilisent ces données dans un objectif opérationnel. Les données du RID sont numérisées à partir de 1965.

Les données de 42 stations hydrométriques dans le bassin du Mae Klong ont été sélectionnées. Parmi celles-ci, 29 stations se trouvent sur les cours d'eau principaux : Mae Klong, Khwae Yai, Khwae Noi, Lam Taphoen et Lam Pachi. Plusieurs de ces stations ne sont plus en service. De plus les débits relevés aux nouvelles stations sont fortement influencés par les aménagements et ne représentent plus les écoulements naturels.

Après un contrôle de données (Kositsakulchai, 1997), nous avons conservé 7 stations (Figure IX-2) pour le calage et la validation du modèle hydrologique. Les écoulements estimés par bilan hydrique des retenues ont aussi été exploités.

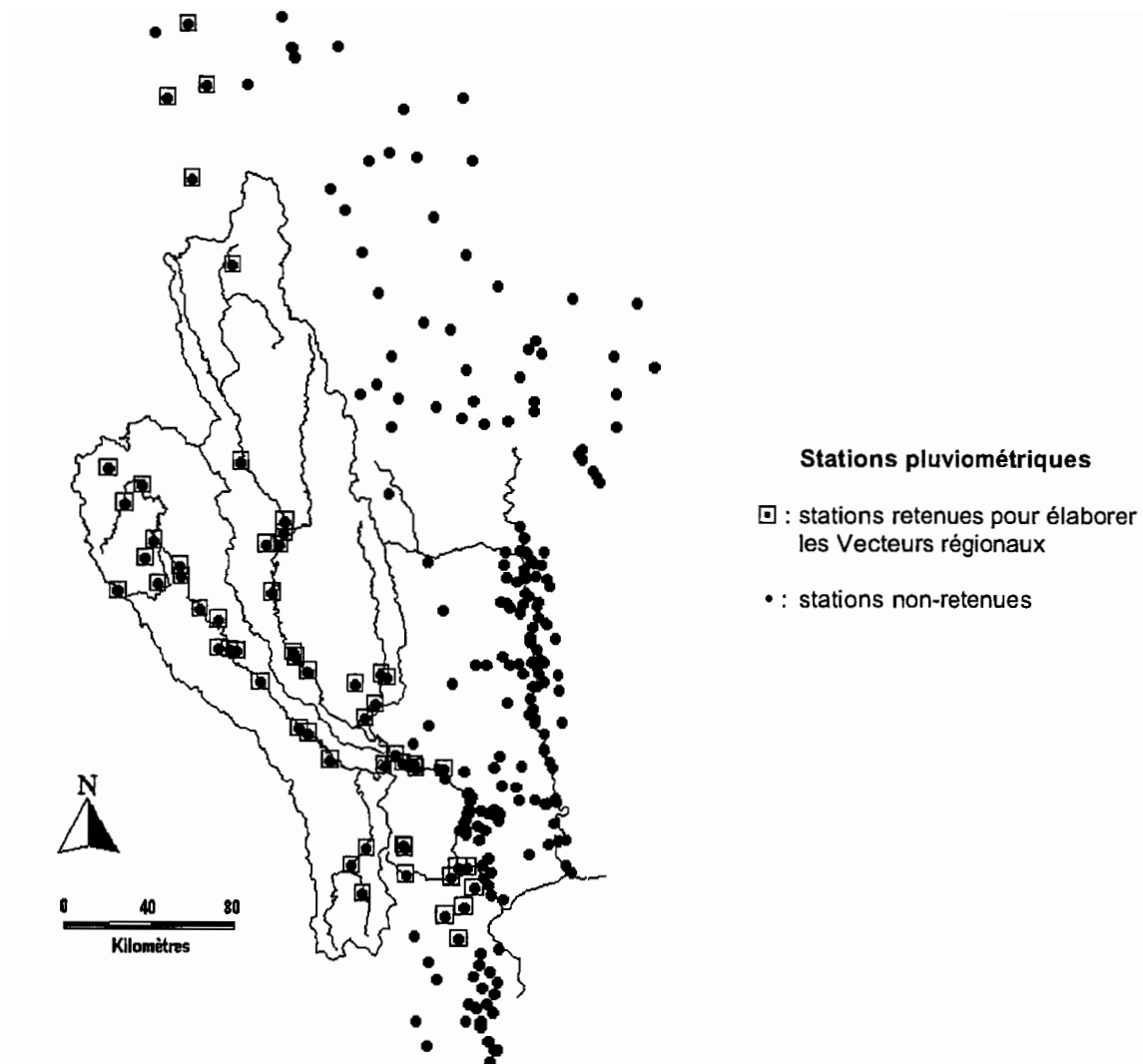


Figure IX-1 : Localisation des stations pluviométriques dans le bassin du Mae Klong et à proximité

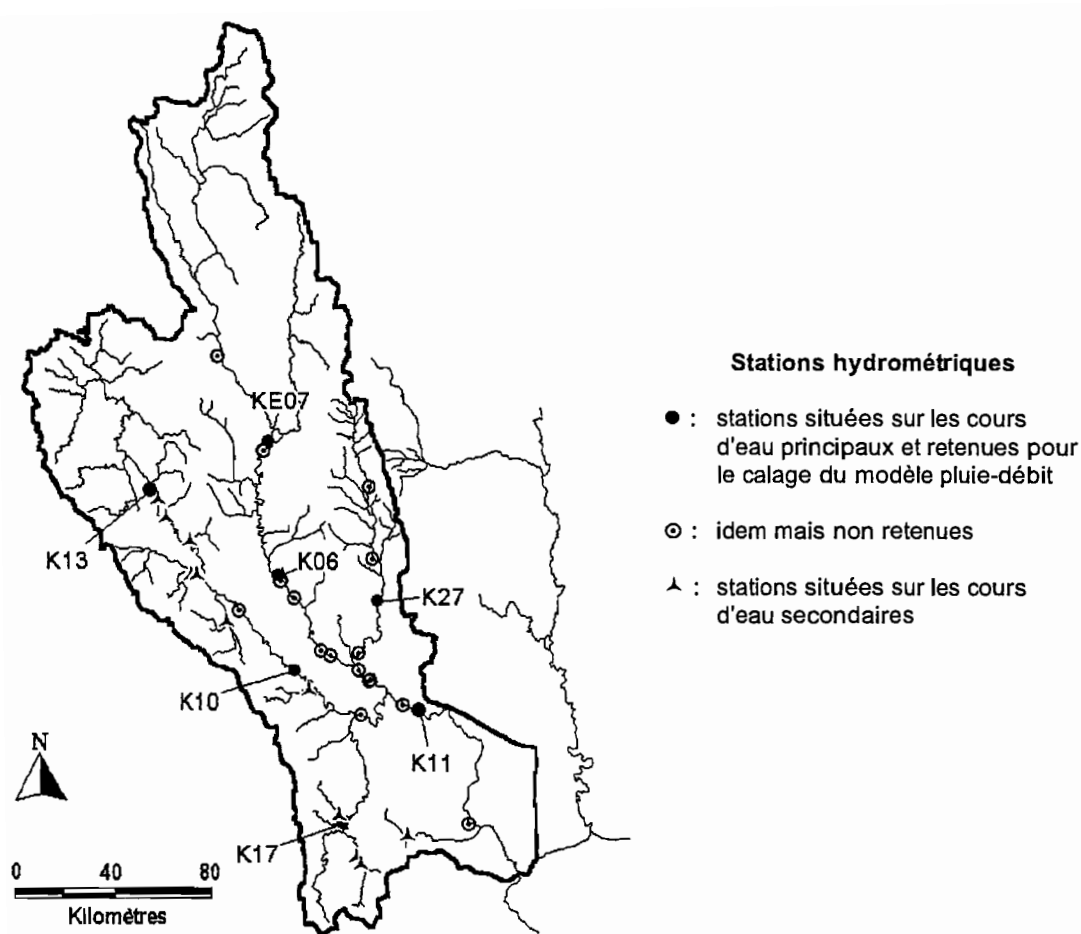


Figure IX-2 : Localisation des stations hydrométriques du fleuve Mae Klong et de ses affluents

IX-2 HOMOGENEISATION DES PRECIPITATIONS

Hiez (1977) a relevé de nombreuses sources d'hétérogénéité des données pluviométriques. Cela montre la nécessité d'un contrôle rigoureux des données. De ce fait nous avons choisi la méthode dite du « Vecteur Régional » en utilisant le logiciel Climant pour l'analyse d'homogénéité et de régionalisation des précipitations du bassin du Mae Klong.

a) *Présentation de la méthode du Vecteur Régional (VR)*

La méthode du Vecteur Régional a consisté à définir une *station fictive*, « régionale », caractéristique d'un ensemble de stations. Cette station fictive, représentative de l'ensemble de la région, pourra dès lors être utilisée comme *station de base* pour le contrôle individuel des stations (Meylan & Musy, 1996).

Nous empruntons ainsi à Meylan & Musy (1996) une description sommaire du Vecteur Régional de Brunet-Moret :

Brunet-Moret (1979) définit un *vecteur des indices annuels de précipitation* $\{z_j\}$ par la relation :

$$\text{Équation IX-1 : } \frac{P_{ij}}{\bar{P}_i} = z_j + e_{ij}$$

Où P_{ij} est le module pour l'année j à la station i ,
 $\bar{P}_i$ est la normale de la station i ,
 z_j est l'indice annuel de précipitation pour l'année j et
 e_{ij} est un résidu aléatoire.

Le principe de la méthode consiste alors à déterminer simultanément les valeurs de l'indice régional z_j pour chaque année j et les valeurs des normales $\bar{P}_i$ pour chaque station i en minimisant la somme des carrés des écarts e_{ij} , sur la base des hypothèses suivantes :

- a.) l'espérance des z_j vaut un ;
- b.) l'espérance des résidus e_{ij} est nulle ;
- c.) les variances des e_{ij} , pour chaque station i , sont égales entre elles.

b) *Le logiciel Climán.*

Le logiciel Climán a été développé à partir de l'algorithme de calcul de la méthode du Vecteur Régional de Brunet-Moret (1979). Le fonctionnement de Climán est expliqué dans un article de Nouvelot, Le Goulven et Pourrut (Nouvelot *et al.*, 1994) :

« ... Le programme fonctionne au pas de temps mensuel (analyse et corrections) et permet de traiter les paramètres climatiques (pluies, température, insolation, humidité relative, vent, évaporation sur bac) ainsi que les débits moyens.

Il permet d'abord de détecter, corriger ou supprimer les erreurs systématiques des séries chronologiques étudiées (phase d'homogénéisation), puis de rechercher les limites des zones climatiques homogènes (phase de régionalisation) pour les quelles il génère une série chronologique représentative d'indices mensuels et annuels.

La pseudo-proportionnalité d'une zone est mesurée par la valeur du coefficient de corrélation moyen entre stations et vecteur correspondant (en cas de stricte proportionnalité, cette valeur est égale à 1).

Après plusieurs essais, on considère une zone comme homogène si les coefficients de corrélation mensuels et annuels sont supérieurs ou égaux à 0,9. En réalité, on accepte également des zones où ces coefficients sont proches de 0,9 lorsque la faible densité du réseau ne permet pas de réduire la zone.

En théorie, il est possible de regrouper les phases d'homogénéisation et de régionalisation. La visualisation des courbes de doubles cumuls entre stations et vecteur d'une même zone permet de déterminer si une mauvaise liaison (coef. de corrélation faible) provient d'erreurs systématiques ou de non-appartenance de la station à la zone homogène symbolisée par le vecteur ... »

c) *Mise en œuvre et résultats*

Bien que Climán soit susceptible de traiter les données jusqu'au pas de temps mensuel, l'application de la méthode VR à cette étude n'est pas de détecter ou corriger toutes les erreurs dans les chroniques des stations pluviométriques du bassin du Mae Klong.

Nous essayons par contre de construire les vecteurs pluviométriques des zones homogènes à partir des données disponibles et fiables. La détection et la correction des erreurs n'ont été faites qu'au pas de temps annuel.

La détection, correction ou suppression des erreurs des données pluviométriques par Climán sont un processus itératif. Un exemple de résultat d'analyse est illustré en Figure IX-3 et Figure IX-4.

La Figure IX-3 montre un graphique de doubles masses des précipitations avant la correction, d'une station située dans le bassin amont de la Khwae Noi. Nous notons un changement de pente au cours de l'année 1985. Afin de corriger la série pluviométrique, la période 1967 à 1985 a dû être multipliée par un coefficient correcteur

de 0,733. Ce coefficient est similaire à $2/\pi$, valeur due aux erreurs les plus fréquentes entre les éprouvettes et les pluviomètres. Le résultat après correction est présenté en Figure IX-4.

Après plusieurs essais, nous obtenons les vecteurs annuels des précipitations de 6 zones homogènes du bassin du Mae Klong (Figure IX-5), selon les critères définis au-dessus. Par ailleurs, Climax produit la moyenne de vecteur annuel égale à 1000 mm ; le vecteur annuel doit donc être rajusté par un coefficient dérivé de la pluie annuelle moyenne de la zone correspondante.

Ensuite, dans le but de reproduire les chroniques des précipitations au pas de temps hebdomadaire pour le modèle pluie-débit, nous avons estimé la distribution temporelle à partir des stations pluviométriques de bonne qualité. Le classement de celles-ci a été effectué selon plusieurs critères : une longue durée d'observation, un coefficient de corrélation élevé entre station et vecteur correspondant, peu de données corrigées ou supprimées.

Dans la pratique, deux à trois stations par zone sont sélectionnées. Les vecteurs de précipitations au pas de temps hebdomadaires sont calculés à partir des vecteurs annuels et de la répartition temporelle moyenne des stations pluviométriques de la zone et de l'année correspondantes (Cf. Figure IX-6).

¹Sur le graphique de doubles masses, on a représenté pour chaque année :

- | | |
|-----------------|--|
| Par des points | les valeurs de RAN calées sur l'échelle R (de 0,6 à 1,4). Lorsque les valeurs sortent de cet intervalle elles sont indiquées en bout de graphique. |
| Par des croix | les doubles cumuls CUX et CUY normalisés sur une échelle P (de -4 à +4). De la même manière que précédemment, si des doubles cumuls sortent de l'intervalle, ils restent bloqués aux bornes. |
| Par des étoiles | les valeurs de RAN et de doubles cumuls quand leurs points sont confondus sur le graphique. |

avec

An : Année considérée.

CUX : Totaux cumulés de la station

CUY : Totaux cumulés du vecteur

RAN : Représente la position relative d'une valeur annuelle de la station compte tenu de la valeur du vecteur pour la même année. Comme nous sommes dans l'hypothèse d'une pseudo-proportionnalité, RAN devrait être proche de 1 tel qu'il est calculé. Toute valeur anormalement forte en valeur absolue est vite repérée.

¹ Texte extrait du document méthodologique de Climant réalisé par Le Goulven.

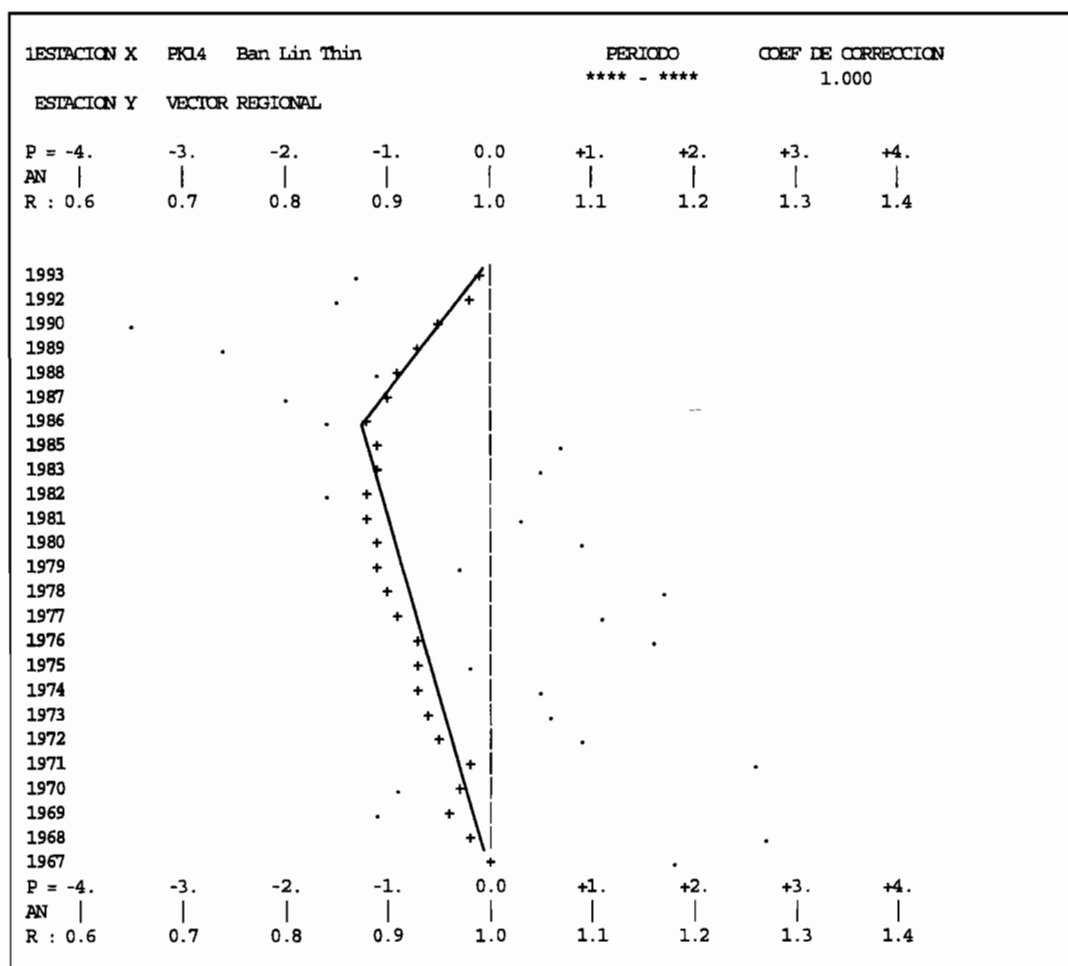


Figure IX-3 : Exemple de résultat de l'analyse de Climán – Courbe de doubles cumuls de la station pluviométrique de Ban Lin Thin et du vecteur régional de la zone correspondante avant la correction

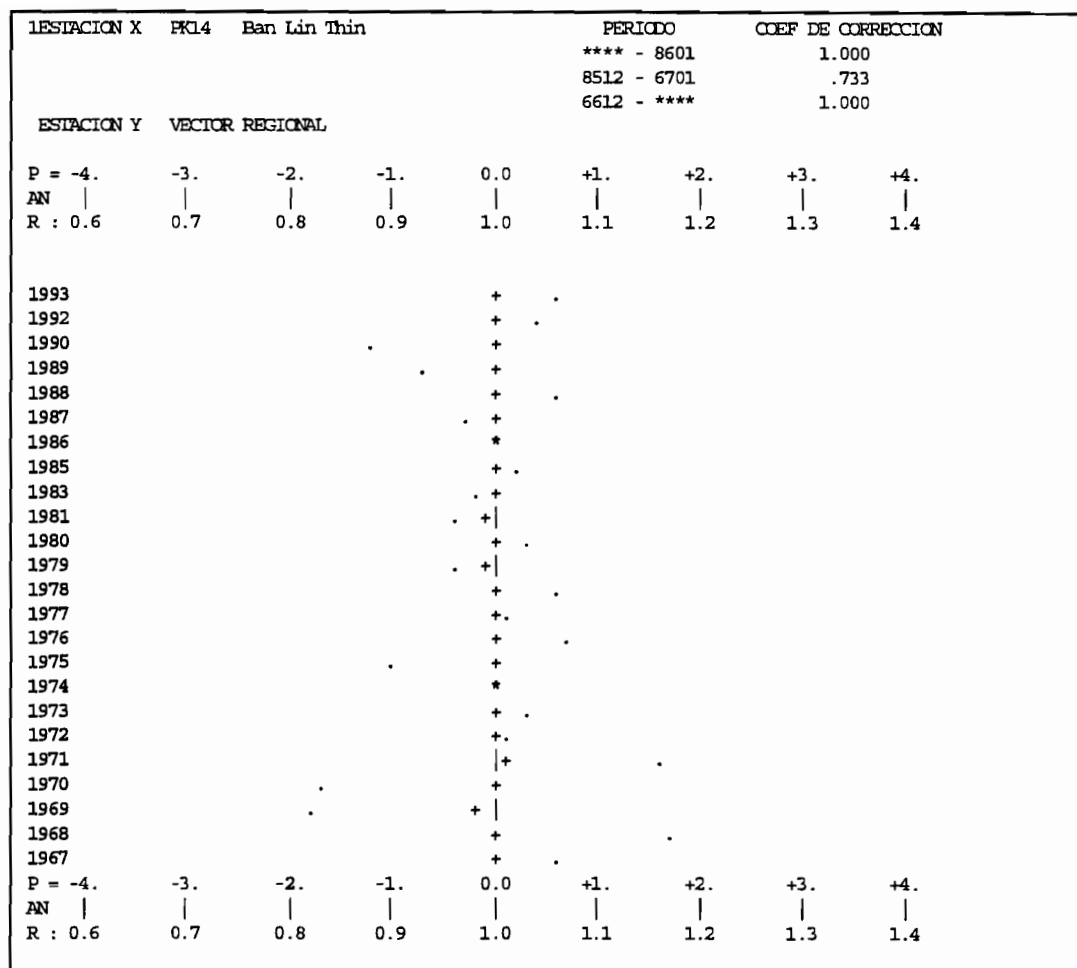
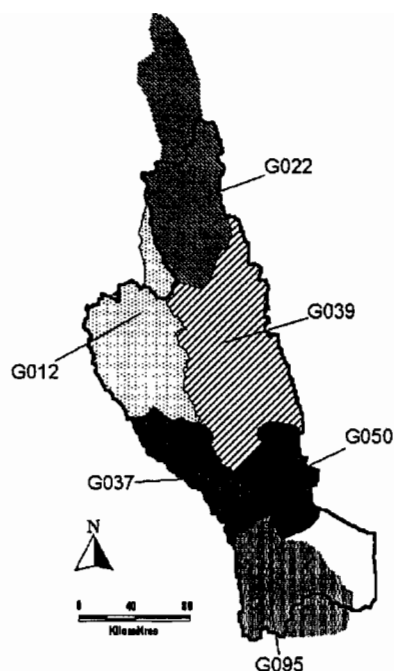


Figure IX-4 : Exemple de résultat de l'analyse de Climán – Courbe de doubles cumuls de la station pluviométrique de Ban Lin Thin et du vecteur régional de la zone correspondante après la correction



Les zones homogènes délimitées à partir des résultats de l'analyse de Climan.

Du fait de la faible densité du réseau d'observation dans la partie amont du bassin, les limites des zones homogènes sont approximatives.

Figure IX-5 : Zonage des précipitations annuelles homogènes

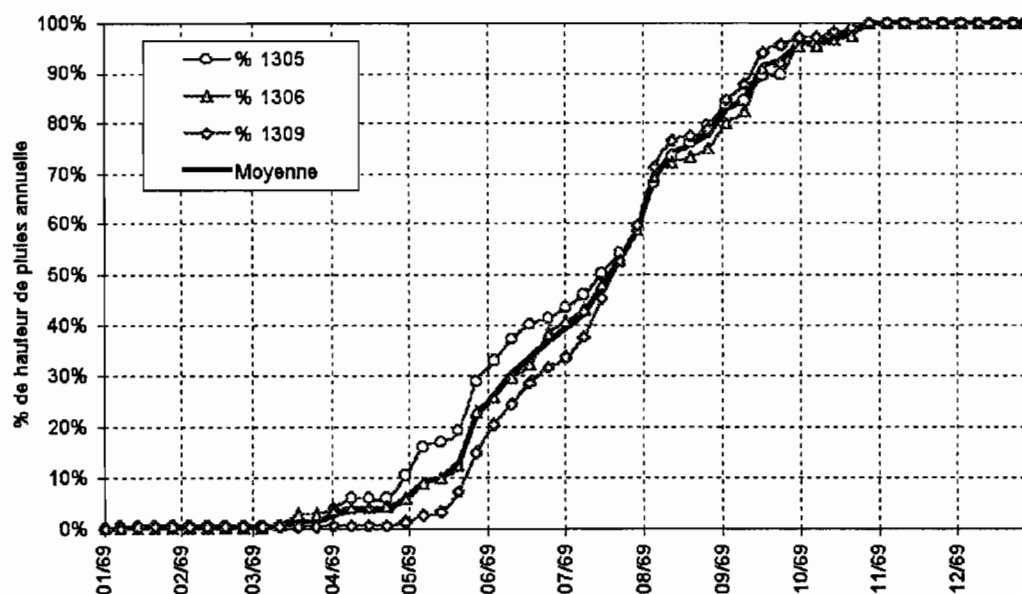


Figure IX-6 : Exemple pour l'année 1969 de l'estimation de la distribution temporelle des hauteurs de pluies pour la région G012 à partir de 3 stations pluviométriques homogénéisées par le Vecteur Régional (pas de temps hebdomadaire)

IX-3 MISE EN APPLICATION DU MODELE GR3 S

Les modèles de famille GR ont déjà été testés sur des bassins de dimension variées allant du km^2 jusqu'à plusieurs milliers de km^2 , dans les différentes régions géographiques telles qu'en France, en Afrique de l'Ouest et en Amérique du Sud (voir Tableau IX-1). De plus, Edijatno *et al.* (1999) ont déjà calé le modèle GR3 J sur un bassin versant de plus de 9 000 km^2 , mais les résultats n'ont pas été précisés.

Dans le cas du Mae Klong, nous avons d'abord obtenu les résultats décevants après nos premiers essais de calage sur des tailles comparables (station K10, surface drainée de 7 008 km^2). Nous essayons donc de découper le bassin en sous-bassins de taille inférieure à 5 000 km^2 . Il est toutefois nécessaire de tenir compte dans ces découpages des données disponibles indispensables pour le calage du modèle.

Finalement, nous avons divisé le bassin amont du Mae Klong en 4 bassins versants principaux selon les cours d'eau principaux : bassin de la Khwae Noi (KHN), bassin de la Lam Pachi (LPC), bassin de la Khwae Yai (KHY) et bassin de la Lam Taphoen (LTP). La Lam Pachi est un affluent principal de la Khwae Noi ; la Lam Taphoen, de la Khwae Yai.

Or, on peut généralement trouver les stations hydrométriques près des sites de barrages. Ces stations ont été installées avant la construction des barrages, lors des études préliminaires. Ce sont les données précieuses, car le régime d'écoulement n'est plus naturel après la mise en eau des barrages.

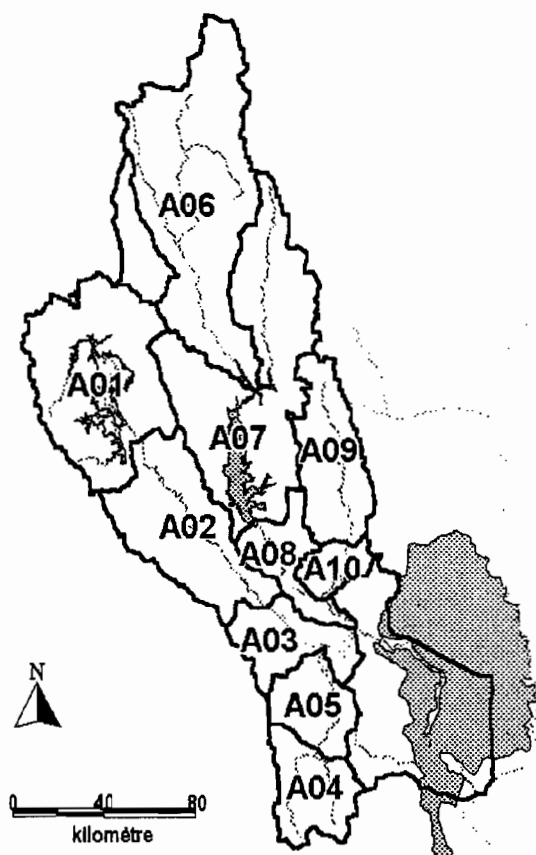
Pour caler le modèle hydrologique, 6 stations hydrométriques sont choisies (Cf. Figure IX-2). Les bassins versants des cours d'eau principaux du Mae Klong ont été subdivisés à nouveau en tenant compte du contrôle des stations hydrométriques. Au final, le bassin amont du Mae Klong a été décomposé en 10 sous-bassins dont 6 sous-bassins de dimensions comprises entre 1350 et 5650 km^2 , pour lesquels on dispose des données hydrométriques correspondantes (voir Tableau IX-2).

Par ailleurs, les bassins aval de la Khwae Noi (KHN_L – A02) et de la Khwae Yai (KHY_L – A07) présentent la particularité, de recevoir des écoulements de bassins amonts. On a donc besoin d'adapter la méthode pour le calage. Les paramètres du modèle du bassin amont doivent être déterminés et fixés, pour pouvoir effectuer le calage du bassin aval. Lors du calage des paramètres du bassin aval, les écoulements en provenance du bassin amont sont ajoutés.

La Figure IX-7 illustre le découpage de bassin du Mae Klong, les superficies de sous-bassins ; les stations hydrométriques correspondantes sont détaillées dans le Tableau IX-2. Enfin, la Figure IX-8 représente un schéma simplifié des sous-bassins. Les résultats du calage de modèle et l'estimation des écoulements dans les bassins du Mae Klong sont présentés dans les sections suivantes.

Tableau IX-1 : Caractéristiques de quelques applications de modèles de famille GR à diverses dimensions de bassin versant dans différentes régions géographiques.

Modèle	Dimension de bassin versant (km ²)	Région géographique	Référence
GR3 J	2 340	Bassin de la Seine à Bar-sur-Seine, France	Edijatno et Michel, 1989
GR3 J (EMILE)	100 – 6 500	Côte d'Ivoire	Dezetter, 1991
GR2 M	315 – 5 560	France	Makhoul et Michel, 1994
GRHUM	20 – 500	Bretagne centrale, France	Lomagne <i>et al.</i> , 1996
GR3 J distribué (EMILE 3)	–	Bassin du Paute, Equateur	Bacci, 1997
GR3 J	1,4 – 9 387	France	Edijatno <i>et al.</i> , 1999



Sous-bassins de la Khwae Noi :

- A01 : Bassin amont de la Khwae Noi (KHN_U),
- A02 : Bassin aval de la Khwae Noi (KHN_L),
- A04 : Bassin de la Lam Pachi (LPC).

Sous-bassins de la Khwae Yai :

- A06 : Bassin amont de la Khwae Yai (KHY_U),
- A07 : Bassin aval de la Khwae Yai (KHY_L),
- A09 : Bassin de la Lam Taphoen (LTP).

Figure IX-7 : Découpage du bassin du Mae Klong en sous-bassins

Tableau IX-2 : Noms et superficies des sous-bassins et stations hydrométriques correspondantes

Nom de bassin	Superficie, km ²	Station hydrométrique
Khwaë Noi (KHN)	8339	
A01 – KHN_U	4 047	K13 & KHL
A02 – KHN_L	2 961	K10
A03	1 331	-
Lam Pachi (LPC)	2527	
A04 - LPC	1 355	K17
A05	1 172	-
Khwaë Yai (KHY)	12028	
A06 – KHY_U	5 644	KE07
A07 – KHY_L	5 366	K06 & SNR
A08	1 010	-
Lam Taphoen (LTP)	2561	
A09 – LTP	1 971	K27
A10	590	-

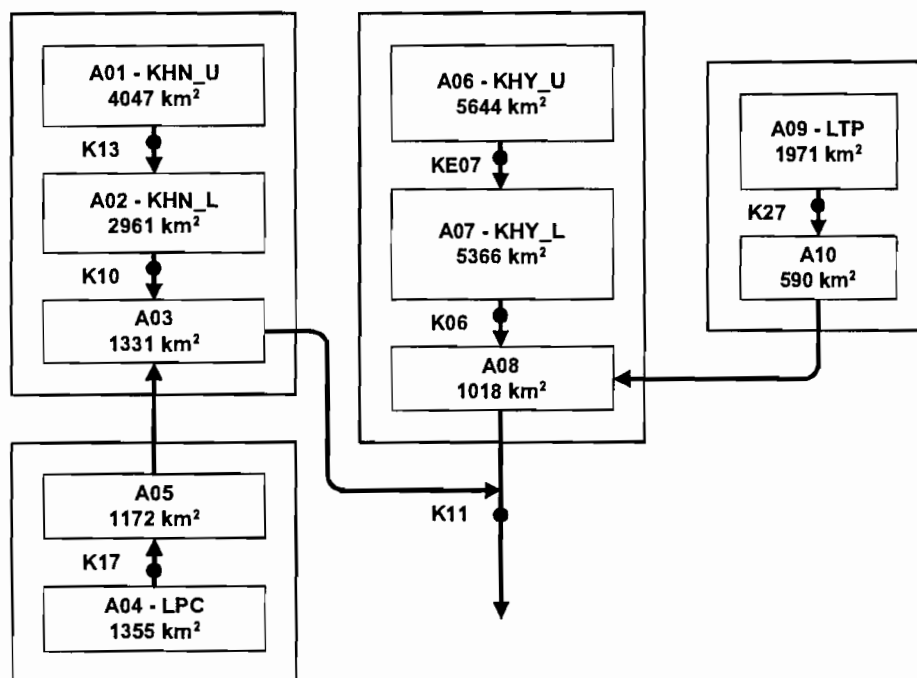


Figure IX-8 : Schéma de représentation de sous-bassins

IX-4 CALAGE ET CONTROLE DU MODELE PLUIE-DEBIT

Les périodes de calage et de validation du modèle pluie-débit sont choisies en fonction des données disponibles. Grâce à l'analyse critique et à l'homogénéisation des précipitations à l'aide de Climant (voir section précédente), nous disposons des informations pluviométriques au pas de temps hebdomadaire sur l'ensemble du bassin du Mae Klong à partir de 1959.

Pour la modélisation des écoulements, le calage des modèles ne peut être fait que sur des écoulements naturels ; les périodes de calage des paramètres du modèle GR3 S doivent donc être choisies avant la réalisation des barrages-réservoirs, ce qui correspond à avant l'année 1976 pour les bassins de la Khwae Yai et avant l'année 1980 pour ceux de la Khwae Noi. Le Tableau IX-3 résume les périodes de calage et de contrôle du modèle GR3 S pour les 6 sous-bassins de la partie amont du bassin du Mae Klong.

Pour exploiter au maximum les données disponibles, les durées de calage choisies varient entre 8 et 13 ans. Toutes les données n'ayant pas servi au calage, peuvent être utilisées en validation pour contrôler les résultats. On peut aussi utiliser dans cette validation les apports au niveau des retenues estimés à partir du bilan hydrique au pas de temps journalier. Comme l'estimation des apports par le bilan hydrique demeure incertaine, les écoulements calculés du modèle pluie-débit peuvent paradoxalement servir à la contrôler.

Les bons résultats du calage des paramètres du modèle sont vérifiés par des valeurs de critère Nash très élevées (près de 100%) et par l'obtention d'hydrogrammes graphiquement comparables entre les écoulements observés et calculés.

Le calage des paramètres du modèle pluie-débit s'est fait de l'amont vers l'aval. Le bassin amont de la Khwae Noi (KHN_U) a été choisi comme le point de départ, du fait qu'il dispose des informations les plus complètes en comparaison avec les autres bassins. Le résultat du calage des paramètres du modèle est très encourageant (Tableau IX-4) : le critère de Nash donne plus de 90% et le critère de bilan d'écoulements observés-calculés est proche de 0.

Les sous-bassins de la Khwae Noi (KHN_U et KHN_L) donnent de meilleurs résultats de calage que ceux de la Khwae Yai (KHY_U et KHY_L). Les critères Nash s'avèrent plus forts ; les erreurs de bilan d'écoulements observés-calculés plus faibles. Le bassin aval de la Khwae Noi (KHN_L) donne également un assez bon résultat. Mais des valeurs très élevées de paramètres sont observées, pour le résultat optimal (au sens du critère Nash). C'est aussi le cas des bassins de la Lam Pachi (LPC) et de la Lam Taphoen (LTP).

Si l'on interprète le paramètre « A », celui du réservoir-sol, du modèle GR3 S comme l'épaisseur moyenne du sol hydrologiquement fonctionnel, les valeurs très importantes obtenues pour ce paramètre dénotent une anomalie. On obtient par exemple pour « A »

sur le bassin KHN_L une valeur de 4 200 mm. En revanche, si l'on considère que « A » est un paramètre de modèle empirique, non pas conceptuel, l'importance de la valeur « A » se référera au faible de la fonction de production (de fortes pluies produisent de faibles écoulements).

Il est possible de limiter les valeurs de paramètres entre des bornes prédéfinies. Par exemple, Bacci (1997) a introduit dans ce but un paramètre correctif de la pluie, sous l'hypothèse d'erreurs dans l'évaluation de précipitations. Toutefois, les erreurs aussi bien peuvent provenir des données (pluie, évaporation ou écoulement) que de la structure de modèle ; rien ne permet de les identifier avec certitude.

Dans notre cas, nous avons choisi de retenir les résultats d'optimisation sans rajouter d'autres paramètres contraignant au modèle. Cela montre bien la nature de chaque bassin versant, ainsi que la qualité des données utilisées. Après la phase de contrôle et de validation, les résultats des simulations des écoulements sont satisfaisants.

Des comparaisons entre les écoulements observés et les écoulements calculés sont présentées sur les Figure IX-9 à Figure IX-14. Les périodes de 4 ans sélectionnées pour chaque bassin versant correspondent à l'étape de calage.

Un exemple de validation des résultats du modèle est présenté sur la Figure IX-15 : les écoulements (valeurs moyennes hebdomadaires) observés et calculés pour chaque bassin versant sont comparés graphiquement. La bonne corrélation est obtenue lors que les points se concentrent sur la ligne diagonale. C'est le cas des bassins de la Khwae Noi et de la Khwae Yai (KHN_U, KHN_L, KHY_U et KHY_L), mais non pas ceux des bassins de la Lam Pachi (LPC) et de la Lam Taphoen (LTP).

Les écoulements des bassins de la Lam Pachi et de la Lam Taphoen s'avèrent relativement faibles. Les écoulements moyens hebdomadaires sont généralement inférieurs à 1 mm/jour. Les hautes eaux ne s'observent que certaines années sur la durée d'observation. Cela pose une difficulté lors du calage, car les paramètres du modèle présentent une grande variabilité sur les différentes périodes de calage.

Nous avons en finalement retenu les paramètres correspondant sur l'ensemble de la période de calage. Toutefois, en raison de la contribution modeste des bassins de la LPC et de la LTP aux écoulements du bassin du Mae Klong, le problème du calage et de la simulation d'écoulement dans ces deux bassins ne provoque pas d'erreurs notables sur la simulation des écoulements de l'ensemble du bassin.

Tableau IX-3 : Périodes de calage et de validation

Bassin	Station de contrôle	Période d'observation	Période de calage	Période de validation
KHN_U	K13	09/65-04/80 04/81-03/89 04/90-03/91	01/68-12/79	04/81-12/83
	Bilan au KHL	10/85-02/99		10/85-12/98
KHN_L	K10	04/65-02/99	01/68-12/79	01/66-12/67, 01/80-12/83
LPC	K17	07/66-03/89 04/90-03/91 04/93-03/97	01/73-12/85	
KHY_U	KE07 KE08	10/69-03/79 07/78-10/92	01/70-12/77	07/78-10/92
KHY_L	K06 Bilan au SNR	04/63-03/89? 01/80-02/99	01/64-12/75	01/80-12/98
LTP	K27	10/69-01/70 04/70-01/72 09/72-12/85	01/73-12/85	
MK	K11	04/65-03/93	-	04/65-12/75
	K11A Bilan au VJK	04/94-02/99 09/70-02/99		09/70-12/75

Tableau IX-4 : Résultats du calage : paramètres du modèle GR3S et valeurs des critères de Nash et de bilan volumétrique

Bassin	A (mm)	B (mm)	D	NASH	BILAN
KHN_U	500	430	135	92,25%	-0,70%
KHN_L	4200	380	5250	83,70%	-0,97%
LPC	1100	150	45	63,68%	+1,32%
KHY_U	800	450	170	74,59%	-7,30%
KHY_L	650	142	52	64,96%	-9,00%
LTP	2200	180	225	66,70%	-21,36%

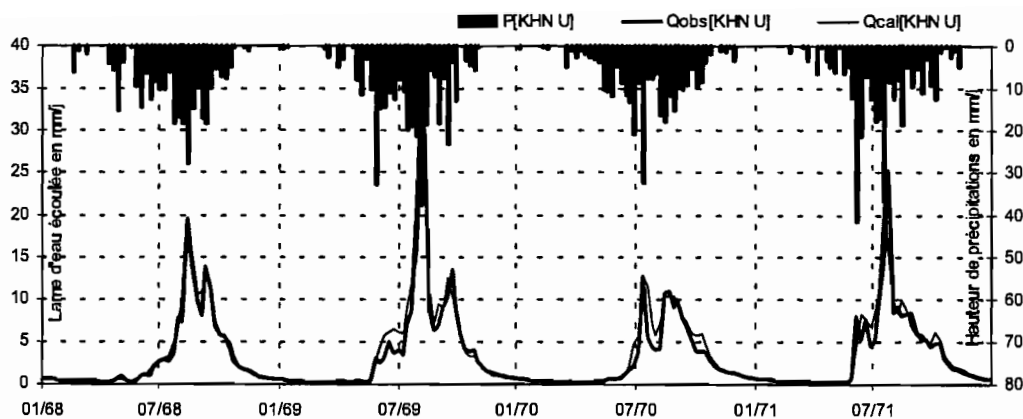


Figure IX-9 : Exemple de résultat du calage du bassin amont de la Khwae Noi, 1968-1971 (pas de temps hebdomadaire)

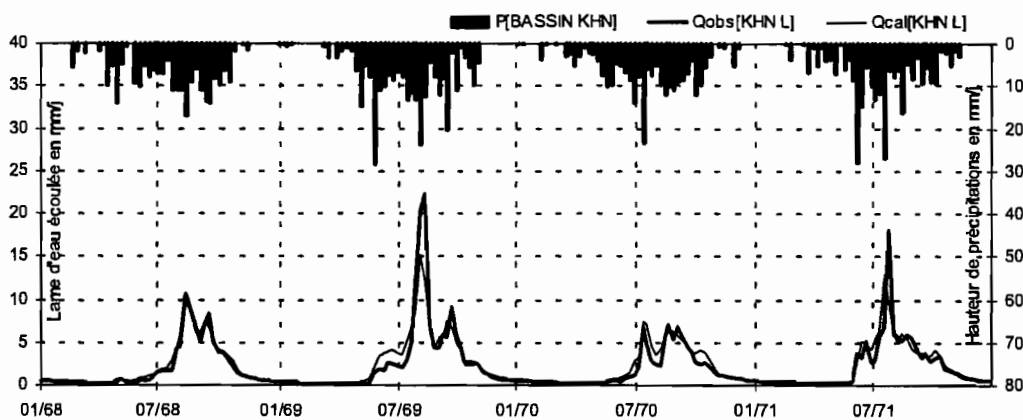


Figure IX-10 : Exemple de résultat du calage du bassin aval de la Khwae Noi, 1968-1971 (pas de temps hebdomadaire)

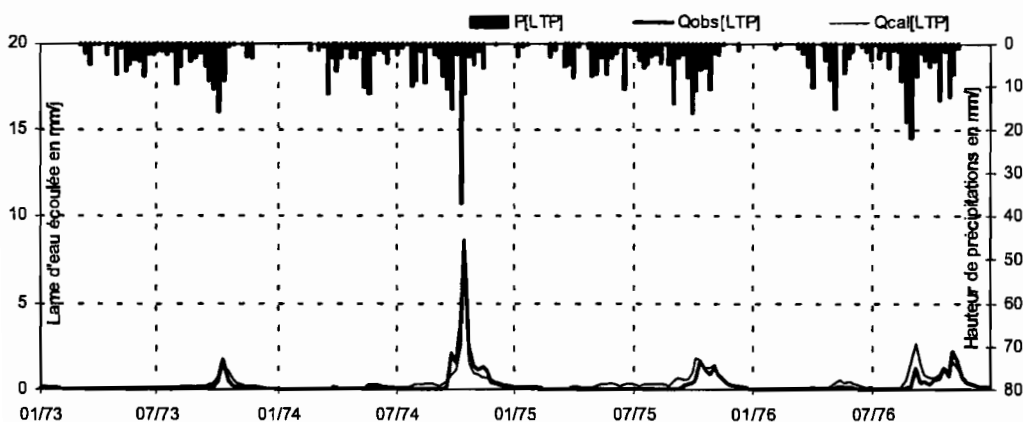


Figure IX-11 : Exemple de résultat du calage du bassin de la Lam Pachi, 1973-1976 (pas de temps hebdomadaire)

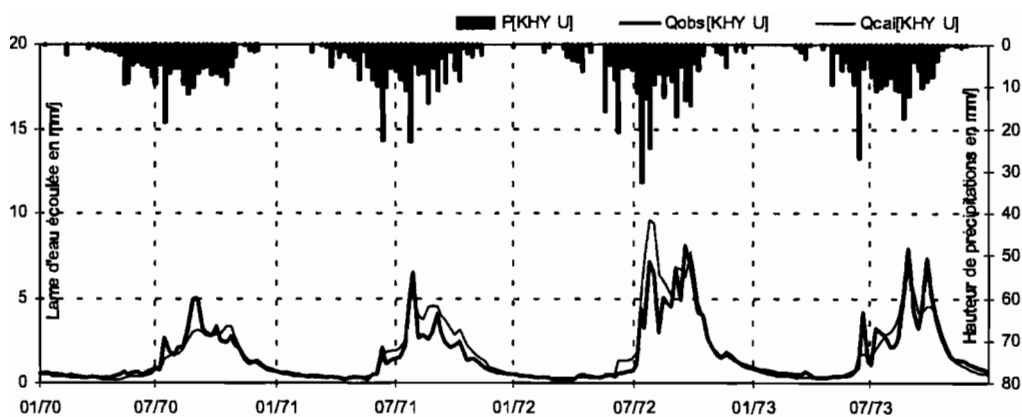


Figure IX-12 : Exemple de résultat du calage du bassin amont de la Khwae Yai, 1970-1973 (pas de temps hebdomadaire)

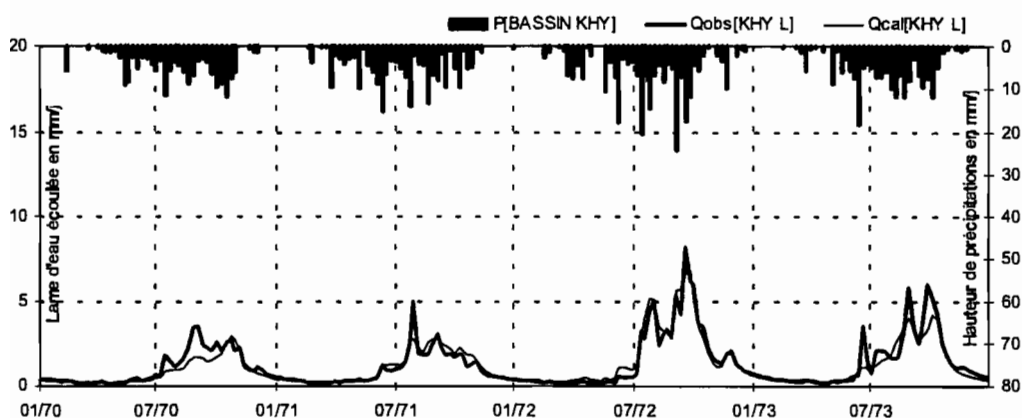


Figure IX-13 : Exemple de résultat du calage du bassin aval de la Khwae Yai, 1970-1973 (pas de temps hebdomadaire)

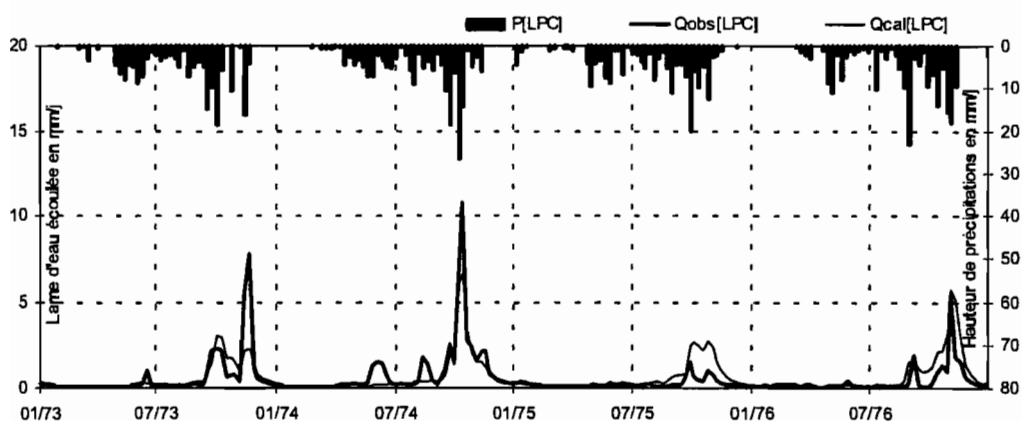
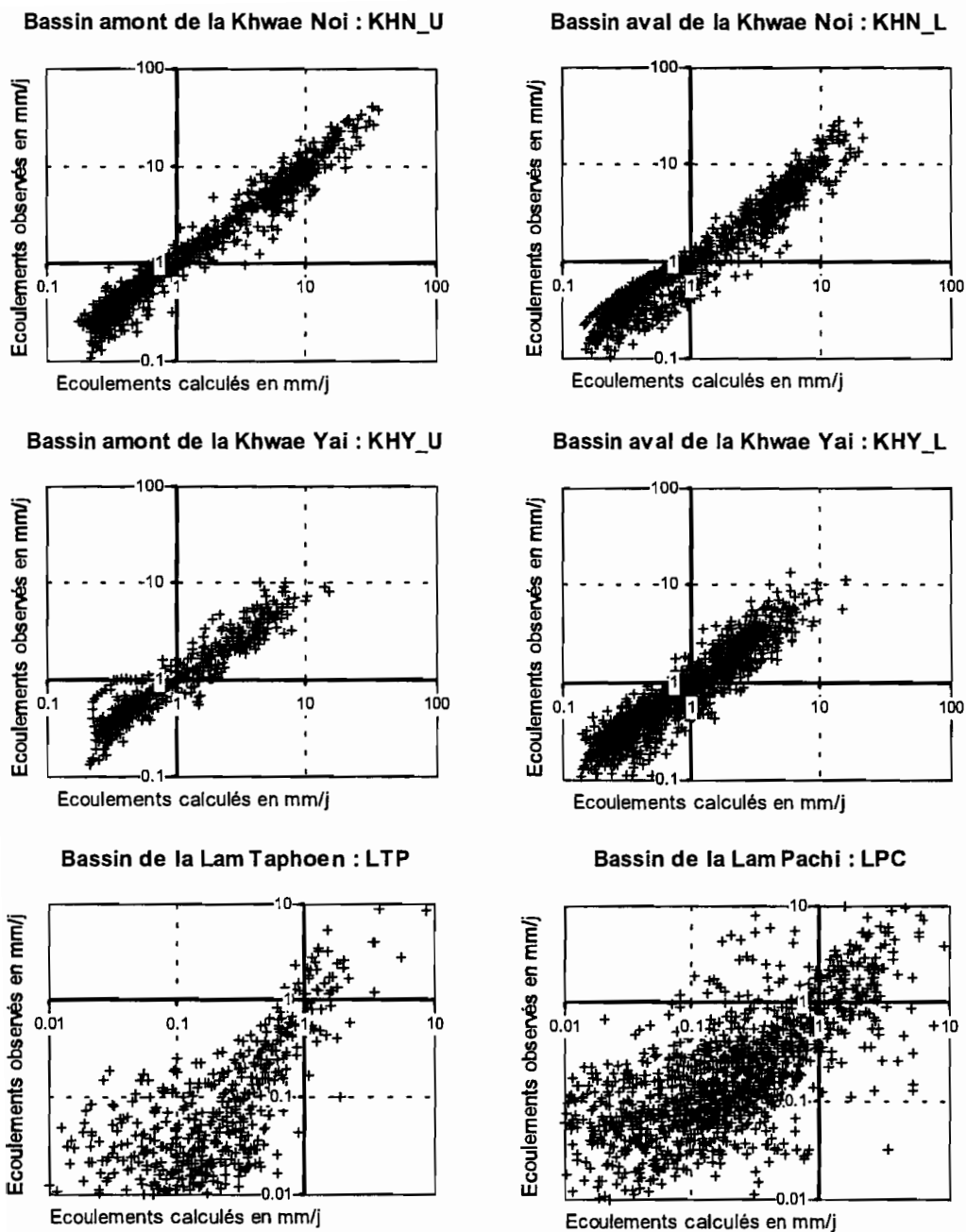


Figure IX-14 : Exemple de résultat du calage du bassin de la Lam Taphoen, 1973-1976 (pas de temps hebdomadaire)



**Figure IX-15 : Corrélation des écoulements calculés et observés
des 6 sous-bassins du Mae Klong**

IX-5 CALCUL DES ECOULEMENTS

Les écoulements aux exutoires des quatre bassins versants des cours d'eau principaux du Mae Klong sont calculés par les équations suivantes à partir des valeurs obtenues par modélisation :

Équation IX-2 :
$$Q_c[KHN] = Q_c[KHN_L] + \left(\frac{A_{03}}{A_{02}} \right) (Q_c[KHN_L] - Q_c[KHN_U])$$

Équation IX-3 :
$$Q_c[LPC] = \left(\frac{A_{04} + A_{05}}{A_{04}} \right) \cdot (Q_c[LPC_o])$$

Équation IX-4 :
$$Q_c[KHY] = Q_c[KHY_L] + \left(\frac{A_{08}}{A_{07}} \right) (Q_c[KHY_L] - Q_c[KHY_U])$$

Équation IX-5 :
$$Q_c[LTP] = \left(\frac{A_{09} + A_{10}}{A_{09}} \right) \cdot (Q_c[LTP_o])$$

Avec A_{yy} : surface drainée de sous-bassin versant.
 $Q_c[xxx]$: écoulements calculés en m³/jour,
 $Q_c[LPC_o]$: écoulements à la station intermédiaire de la Lam Pachi (modélisée)
 $Q_c[LTP_o]$: écoulements à la station intermédiaire de la Lam Taphoen (modélisée)

Dans le cas des bassins de la Khwae Noi (KHN) et de la Khwae Yai (KHY), les écoulements à l'exutoire des bassins versants sont égaux à la somme des écoulements des bassins aval ($Q_c[KHN_L]$ et $Q_c[KHY_L]$) avec ceux en provenance des bassins intermédiaires (A03 et A08 pour la Khwae Noi et la Khwae Yai respectivement). On admet que la lame d'eau écoulee des bassins intermédiaires est égale à celle issues du sous bassin aval uniquement.

Pour les bassins de la Lam Pachi (LPC) et de la Lam Taphoen (LTP), les écoulements calculés du modèle sont réajustés par coefficients de pondération proportionnellement à la surface drainée.

Les apports aux retenues des barrages-réservoirs sont considérés comme étant les produits des lames d'eau du bassin versant correspondant à la surface drainée par cette

retenue. Le bassin amont de la Khwae Noi (A01) a été sélectionné pour la retenue de Khao Laem ; le bassin aval de la Khwae Yai (A07), pour celle de Srinagarind.

Quelques validations d'estimation des apports aux retenues sont présentées sur les Figure IX-16 et Figure IX-17. Les deux approches de détermination des apports à la retenue par modélisation et par bilan conduisent à des résultats tout à fait comparables.

Les écoulements au barrage de Vajiralongkorn (correspondant à l'ensemble du bassin amont du Mae Klong) sont égaux à la somme volumétrique (en m³/jour) des écoulements des 4 sous-bassins (Équation IX-6).

Équation IX-6 :
$$Q_c[MK] = Q_c[KHN] + Q_c[LPC] + Q_c[KHY] + Q_c[LTP]$$

Cette estimation a pour objet de contrôler les écoulements calculés avec les données observées à la station hydrométrique K11 et ainsi de vérifier à la sortie du bassin que les valeurs cumulées obtenues par modélisation correspondent aux bilans observés ; cet écoulement permet aussi la détermination des apports latéraux aux bassins intermédiaires entre les retenues et le barrage Vajiralongkorn.

La Figure IX-18 montre une bonne concordance entre les écoulements observés et calculés entre 1972-1975. Le régime d'écoulements à la station K11 n'est plus naturel dès la mise en eau à la retenue du barrage Srinagarind en 1976 et une validation au delà de cette date n'est plus possible.

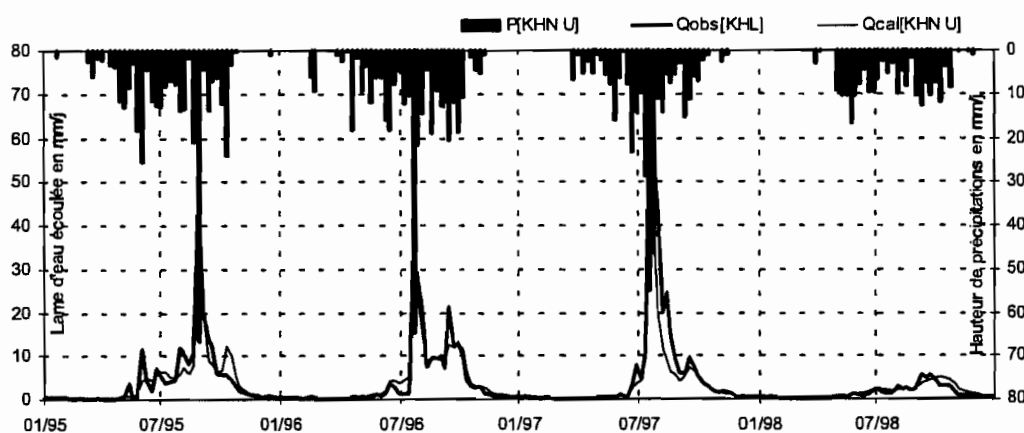


Figure IX-16 : Comparaison des écoulements du bassin amont de la Khwae Noi (KHN_U) calculés par le modèle GR3 S avec les apports à la retenue Khao Laem estimés par le bilan journalier, 1995-1998 (pas de temps hebdomadaire)

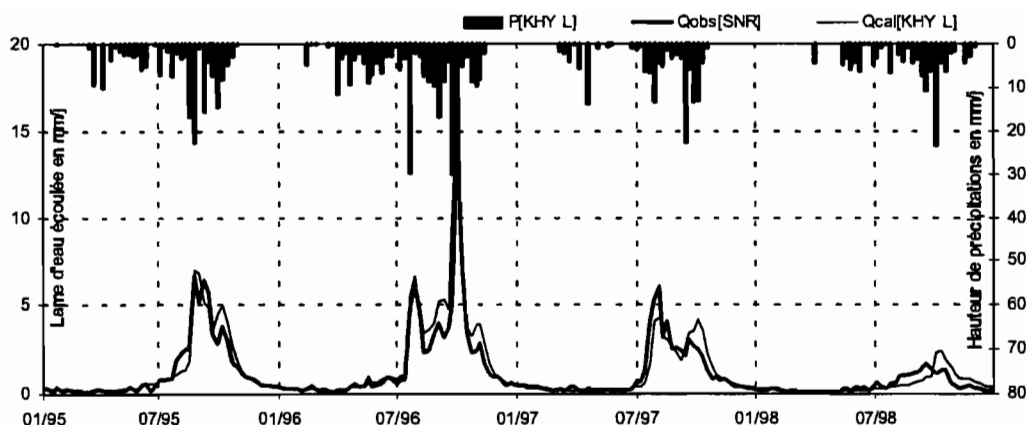


Figure IX-17 : Comparaison des écoulements du bassin aval de la Khwae Yai (KHY_L) calculés par modèles GR3 S avec les apports à la retenue Srinagarind estimés par le bilan journalier, 1995-1998 (pas de temps hebdomadaire)

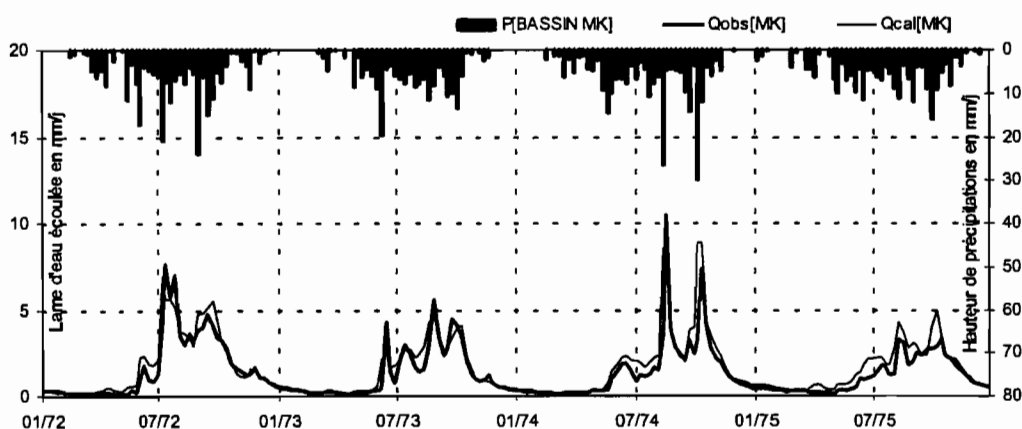


Figure IX-18 : Comparaison des écoulements au barrage Vajiralongkorn estimés à partir des résultats du modèle GR3 S avec les écoulements observés à la station K11, 1972-1975 (pas de temps hebdomadaire)

IX-6 CONCLUSIONS

L'estimation des écoulements naturels consiste en deux étapes principales : préparation des données et application du modèle hydrologique.

Les précipitations sont considérées comme l'entrée de l'hydrosystème. L'analyse critique et l'homogénéisation des données pluviométriques sont d'abord effectuées par la méthode du Vecteur Régional. Cette méthode permet de réduire le volume des données en conservant une bonne image de la variabilité de la pluie. Six chroniques de précipitations entre 1959 et 1998 ont été construites au pas de temps hebdomadaire.

La modélisation hydrologique a pour but de reconstituer les apports naturels aux retenues de Srinagarind et de Khao Laem, ainsi que les apports latéraux entre les deux retenues au point de prélèvement du barrage de Vajiralongkorn.

Le modèle pluie-débit GR3 du Cemagref a été adapté pour fonctionner au pas de temps hebdomadaire. Il transforme les pluies en écoulements de surface en utilisant des séries chronologiques d'apports sur une durée de 40 ans établies à partir des données de précipitations.

Pour caler le modèle hydrologique, le bassin amont du Mae Klong a été décomposé en 10 sous-bassins dont 6 sous-bassins de dimensions comprises entre 1 350 et 5 650 km², pour lesquels on dispose des données hydrométriques correspondantes. Les périodes avant la réalisation des barrages-réservoirs ont été choisies pour caler les paramètres du modèle GR3 S. Les données n'ayant pas servi au calage, ont été utilisées pour contrôler les résultats. Les résultats satisfaisants du calage du modèle hydrologique crédibilisent l'approche employée.

X. VARIABILITES DES PARAMETRES DU MODELE DE FONCTIONNEMENT

Les études sur la sensibilité des paramètres du modèle de fonctionnement de l'hydrosystème présentées dans ce chapitre s'inscrivent dans la continuité de la dernière section de la partie précédente, « *Définition des paramètres économiques* ».

Les paramètres du modèle étudié se répartissent en deux groupes : les ressources en eau et les demandes en eau. Contrairement aux paramètres économiques introduits dans le modèle, ces deux groupes de variables ont aussi des impacts sur les indices techniques de performance. Des analyses plus approfondies sont par conséquent nécessaires.

De plus, les études de sensibilité de ces paramètres apportent un éclairage pour la définition de nouvelles stratégies de gestion de l'eau de l'hydrosystème du Mae Klong.

X-1 SCENARIO DE REFERENCE

Avant de s'engager plus loin dans l'analyse des résultats d'études, il est essentiel d'introduire un point de départ. Un scénario de référence de la politique de gestion est tout d'abord défini dans le but de permettre une comparaison avec les résultats obtenus avec les divers scénarios de simulation développés ultérieurement. Il est établi de manière à ce qu'il corresponde d'aussi près que possible à la pratique de gestion en vigueur aujourd'hui.

Les résultats de simulation dans ce chapitre sont obtenus à partir des simulations au pas de temps hebdomadaire sur l'ensemble de données d'apports entrants dans les retenues d'eau entre 1959-1998, soit 40 années. Sauf pour l'étude de la variabilité des ressources en eau, des séries chronologiques de cinq années sont utilisées sur différentes périodes.

Les définitions des paramètres et les analyses critiques des résultats sont présentées en détail dans les sections suivantes.

Dans cette section, les résultats du scénario de référence sont présentés et interprétés. Afin de les comparer avec les données observées du remplissage des retenues, les simulations ont été effectuées sous deux options :

- Option S : sans prélèvement pour l'alimentation en eau potable de la région métropolitaine de Bangkok ;
- Option A : avec prélèvements.

La simulation en option S représente la situation d'usage de l'eau en vigueur actuellement dans le bassin, alors que la simulation en option A indique la situation de l'usage de l'eau à projeter sur l'horizon 2017.

Les courbes de remplissage des retenues de Srinagarind et de Khao Laem de la simulation en option S sont présentées sur la Figure X-1 et la Figure X-2, respectivement. La Figure X-4 et la Figure X-5 montrent les courbes de remplissages de la simulation en option A. Les indices de performance sont relevés et résumés dans le Tableau X-1, le Tableau X-2 et le Tableau X-3, ainsi que dans la Figure X-3 et la Figure X-6.

En comparaison avec les données enregistrées des courbes de remplissage de retenues (entre 1980-1998 pour Srinagarind, 1984-1998 pour Khao Laem), les hauteurs des retenues simulées en option S s'avèrent plus élevées que celles enregistrées (Figure X-1 et Figure X-2). Tandis que celles simulées en option A sont plus vraisemblables (Figure X-4 et Figure X-5).

Dans la pratique actuelle de la gestion des retenues du Mae Klong, les lâchers turbinés sont supérieurs aux usages en eau à l'aval du bassin. Autrement dit, la décision de lâchers de l'eau des retenues n'est pas contrainte par les demandes en eau à l'aval du bassin, mais elle répond à un objectif de production hydroélectrique (qui demande plus d'eau que les usages à l'aval). Cette remarque a déjà été notée dans notre précédente étude (Kositsakulchai, 1997).

Fiabilité de fonctionnement. Les indices de la fiabilité du fonctionnement du système du Mae Klong sont très élevés pour les deux aspects concernant la quantité (*Fiabilité Q*) ainsi que le temps (*Fiabilité T*). Ils dépassent la valeur de 95%, et la plupart d'entre eux atteignent une valeur proche de 99% (Tableau X-1 et Tableau X-2).

On note de plus qu'il n'y a pas pénurie pour les demandes en eau à l'aval bassin (100% de satisfaction) sous la simulation en option S. L'indice de la fiabilité de fonctionnement concernant le temps (*Fiabilité T*) évolue en concordance avec la *Fiabilité Q*, mais présente une sensibilité légèrement plus importante.

Lorsque les demandes de prélèvement augmentent (Option A), la fiabilité au point de contrôle (HydroE[SNR]) est légèrement accrue, tandis que celle au point 2 (HydroE[KHL]) est diminuée.

Les fiabilités du point de contrôle 3 et 4 (Crues[SNR] et Crues[KHL]), qui représentent les volumes de retenue réservés pour la protection contre les crues, se renforcent lorsque le prélèvement augmente. Au contraire au point de contrôle 5 (aval du bassin), la satisfaction de la demande diminue lorsque le volume d'eau prélevé augmente.

Résilience et vulnérabilité. En étudiant les deux options de simulation, nous observons que la résilience et la vulnérabilité sont relativement sensibles au changement du paramétrage de modèle.

La résilience représente la période consécutive la plus longue de l'incidence (exprimée en nombre de jours) ; la vulnérabilité indique le volume maximum de déficit (en million de m³ par jour).

A partir de l'observation des résultats (Tableau X-1 et Tableau X-2, ainsi que Figure X-4 (c, d et f) et Figure X-5 (c, d et f)), les cinq points de contrôle peuvent être classés en deux groupes selon leurs variations dues à l'augmentation de prélèvement de l'eau à l'aval du bassin (de l'option S à l'option A) :

- Les demandes de production hydroélectrique (HydroE[SNR] et HydroE[KHL]) et les demandes en eau à l'aval du bassin appartiennent au premier groupe qui évolue dans le même sens que le prélèvement (si le prélèvement augmente, les indices de résilience et vulnérabilité augmentent).
- Le second groupe inclut les volumes exigés dans la zone d'écêtement des crues de retenue (Crues[SNR] et Crues[KHL]). Les indices de résilience et de vulnérabilité de ce groupe diminuent, quand le prélèvement à l'aval du bassin s'accroît.

Du fait que la dimension de la vulnérabilité maximale dépend de la demande exprimée, les résultats présentés dans la Figure X-3 (d) et la Figure X-6 (d) peuvent conduire à une interprétation équivoque. Les vulnérabilités maximales du second groupe (Points 3 et 4) indiquent des valeurs très élevées par rapport à celles du premier groupe.

Pour éviter une telle interprétation, l'indice de vulnérabilité est divisé par la moyenne de la demande. Les valeurs normalisées de vulnérabilité donnent des variations d'indices plus satisfaisantes (Figure X-3(f) et Figure X-6 (f)).

Indice IB : Investissement vs Bénéfice net. Après la présentation des résultats selon les indices « techniques », l'interprétation des indices économiques est ensuite abordée. Ces indices économiques proviennent du produit de la division de l'investissement par le bénéfice net.

Comme la simulation a été faite sur un horizon 40 ans, le bénéfice net cumulé très élevé rend la valeur de l'indice IB relativement faible. Une valeur de l'indice inférieure à 1 signifie que le bénéfice net est bien supérieur à l'investissement. Plus l'indice IB est faible, meilleure est la performance économique.

Le prélèvement de l'eau potable pour la zone métropolitaine de Bangkok (simulation en option A) ne donne pas les mêmes résultats selon les différentes échelles d'analyse.

A l'échelle globale, y compris « globale-tarif », le prélèvement d'eau potable améliore la performance économique du système. Les indices IB global et « global-tarif » s'affaiblissent pour la simulation en option A (voir le Tableau X-3).

Au contraire à l'échelle locale où on ne considère que le bénéfice de la production hydroélectrique, le prélèvement de l'eau potable donne un accroissement des indices IB (local SNR et local KHL) provenant de l'abaissement de la production hydroélectrique.

Tableau X-1 : Indices de performance « technique » du résultat de simulation du scénario de référence en option S (sans prélèvement de l'eau potable pour Bangkok)

Points de contrôle	Fiabilité Q	Fiabilité T	Résilience (N° jours)	Vulnérabilité (Mm3)	Vulnérabilité normalisée
1) HydroE[SNR]	95,33%	93,29%	77	8,27	80,46%
2) HydroE[KHL]	99,07%	98,28%	35	6,95	72,41%
3) Crues[SNR]	98,93%	95,88%	105	232,69	149,60%
4) Crues[KHL]	99,59%	94,73%	70	89,00	29,12%
5) Aval du bassin	100,00%	100,00%	0	0,00	0,00%

Tableau X-2 : Indices de performance « technique » du résultat de simulation du scénario de référence en option A (avec prélèvement de l'eau potable pour Bangkok)

Points de contrôle	Fiabilité Q	Fiabilité T	Résilience (N° jours)	Vulnérabilité (Mm3)	Vulnérabilité normalisée
1) HydroE[SNR]	↑ 96,68%	↑ 94,92%	↑ 140	↑ 15,22	↑ 145,26%
2) HydroE[KHL]	↓ 95,04%	↓ 95,54%	↑ 147	↑ 13,32	↑ 130,03%
3) Crues[SNR]	↑ 99,54%	↑ 97,94%	↓ 63	↓ 154,85	↓ 99,55%
4) Crues[KHL]	↑ 99,87%	↑ 97,27%	↓ 63	↓ 62,31	↓ 20,39%
5) Aval du bassin	↓ 98,43%	↓ 97,70%	↑ 91	↑ 33,79	↑ 137,46%

Tableau X-3 : Indices économiques IB du scénario de référence

Indice IB	Sans BKK (Option S)	Avec BKK (Option A)
Global	0,083	↓ 0,082
Global Tarif	0,369	↓ 0,309
Local SNR	0,096	↑ 0,097
Local KHL	0,245	↑ 0,261

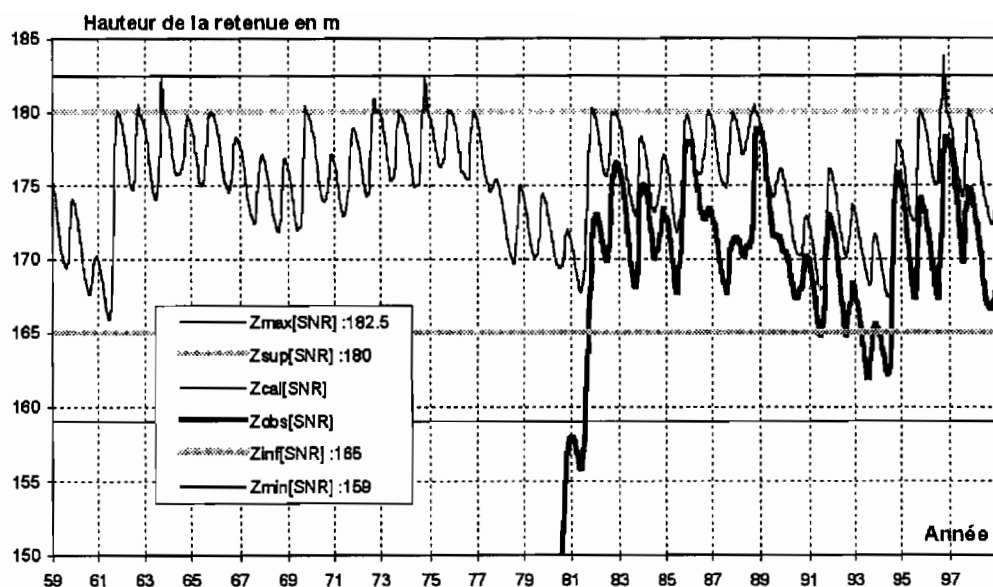


Figure X-1 : Remplissage de la retenue de Srinagarind pour le scénario de référence en option S - sans prélèvement de l'eau potable de Bangkok (1959-1998, pas de temps hebdomadaire)

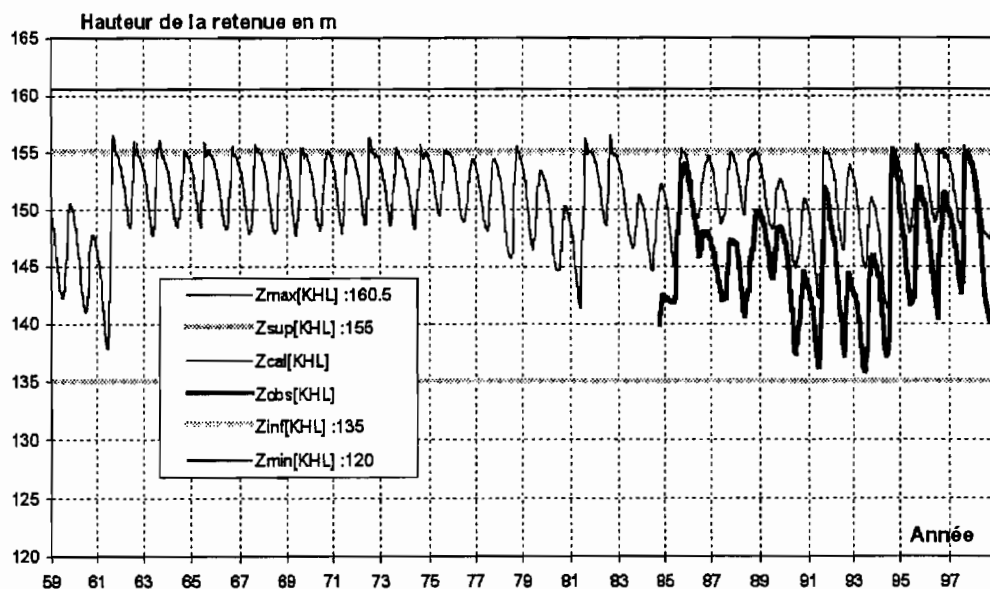


Figure X-2 : Remplissage de la retenue de Khao Laem pour le scénario de référence en option S - sans prélèvement de l'eau potable de Bangkok (1959-1998, pas de temps hebdomadaire)

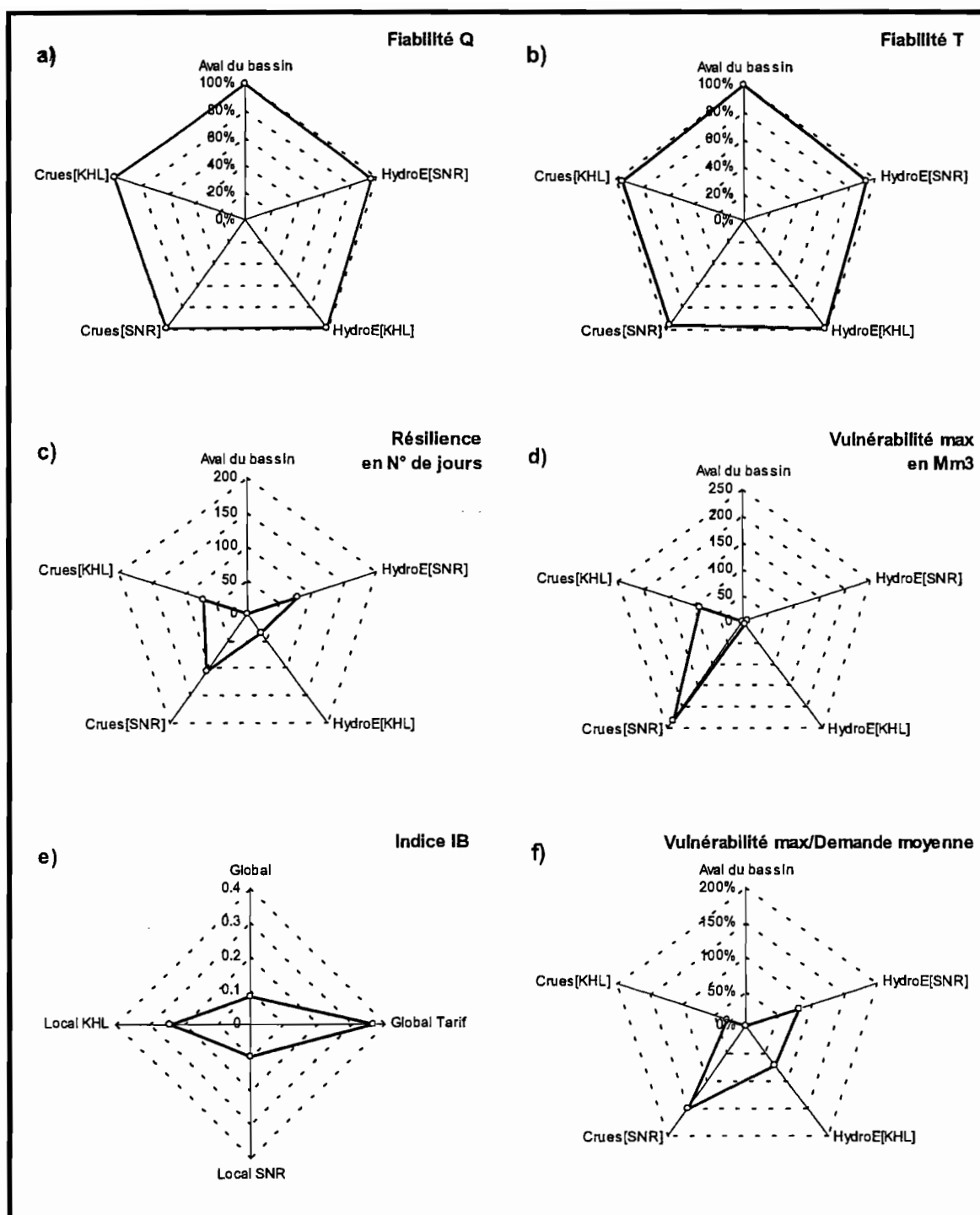


Figure X-3 : Indices de la performance de l'hydrosystème du scénario de référence en option S - sans prélèvement de l'eau potable de Bangkok

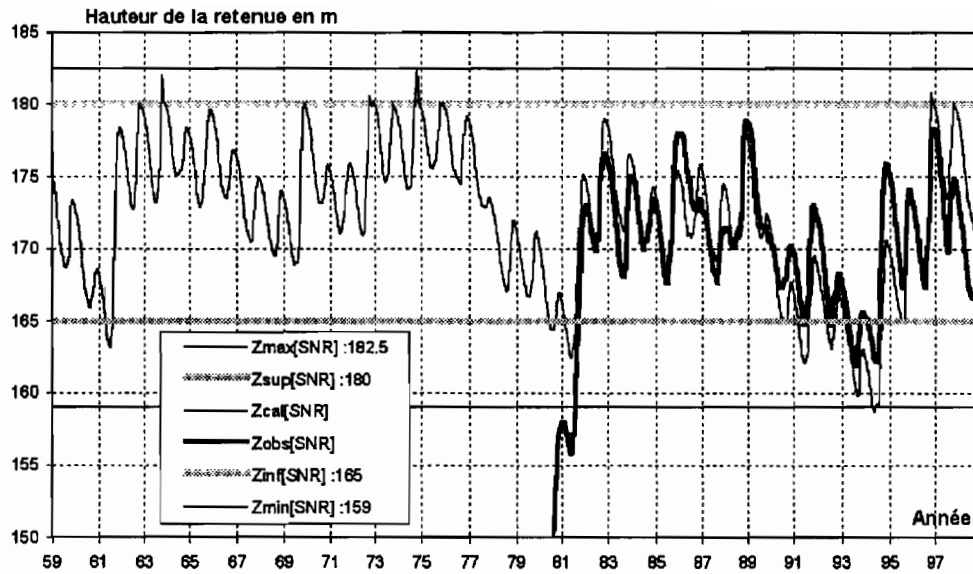


Figure X-4 : Remplissage de la retenue de Srinagarind pour le scénario de référence en option A - avec prélèvement de l'eau potable de Bangkok de $45 \text{ m}^3/\text{s}$ (1959-1998, pas de temps hebdomadaire)

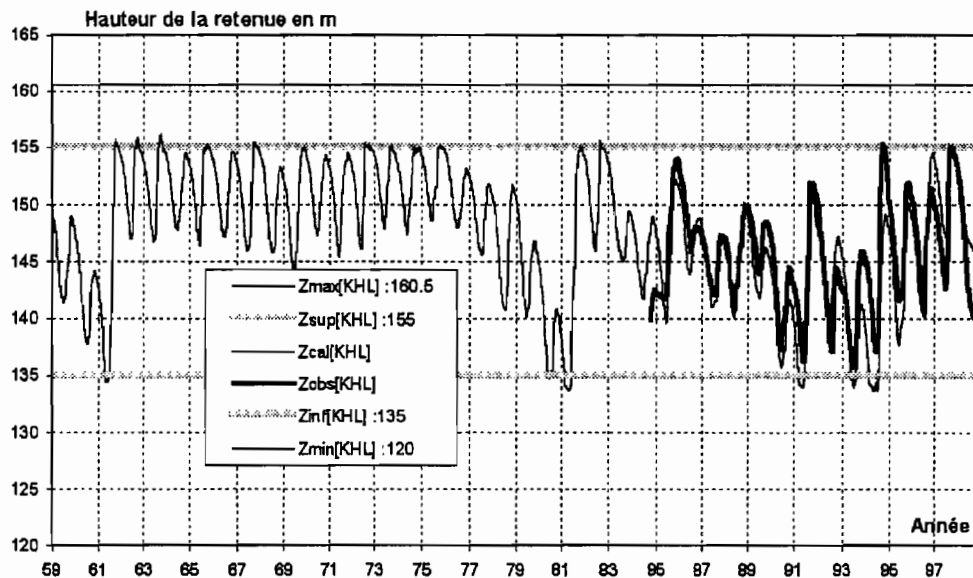


Figure X-5 : Remplissage de la retenue de Khao Laem pour le scénario de référence en option A - avec prélèvement de l'eau potable de Bangkok de $45 \text{ m}^3/\text{s}$ (1959-1998, pas de temps hebdomadaire)

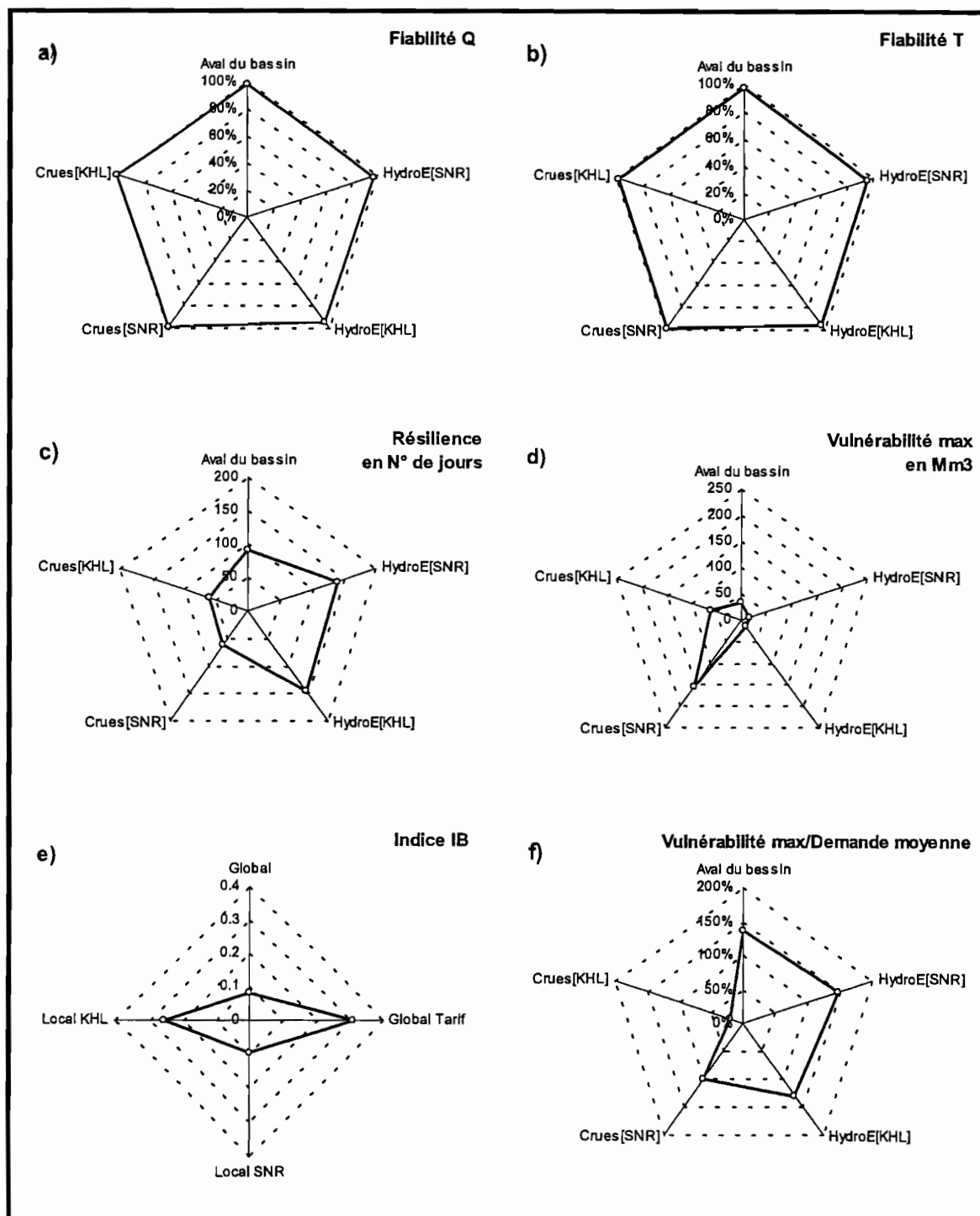


Figure X-6 : Indices de la performance de l'hydrosystème du scénario de référence en option A - avec prélèvement de l'eau potable de Bangkok de 45 m³/s

X-2 VARIABILITE DES RESSOURCES EN EAU

Dans le contexte de l'hydrosystème du Mae Klong, la gestion de l'eau vise principalement à optimiser la ressource en eau de surface. Les séries chronologiques d'apports aux retenues, simulées par le modèle GR3, entre 1959 et 1998, ont été utilisées pour la simulation du fonctionnement de cet hydrosystème.

Toutefois, des stratégies de gestion de l'eau, dérivées des résultats de simulation sur l'ensemble des séries d'apports, semblent parfois très peu flexibles ; c'est-à-dire qu'elles ne sont applicables que dans une situation bien particulière d'état de la ressource.

Afin de pallier à cette insuffisance et d'affiner les résultats, des séries d'apports de 5 années sous diverses conditions de ressources en eau ont été sélectionnées à partir des séries chronologiques complètes d'apports.

Si la période de simulation était trop courte, l'effet de l'état initial serait très important (voir un exemple dans la section *Analyses des conséquences* ci-dessous). En revanche, si elle était trop longue, on obtiendrait des résultats peu différents de la simulation sur l'ensemble de séries chronologiques disponibles. La période choisie de 5 années peut être donc considérée comme un compromis entre les deux critères.

Cette section présente la méthode employée pour identifier les séries extrêmes des apports aux retenues, et ainsi montrer leurs impacts sur des résultats de simulation.

X-2.1 Identification des années extrêmes

Même si les apports aux deux retenues du Mae Klong semblent relativement corrélés (Figure X-7), l'identification des années extrêmes d'apports n'est pas évidente. La méthode d'identification adoptée est la suivante :

- Calcul des moyennes mobiles de 5 années des apports annuels des deux retenues (Srinagarind et Khao Laem) ;
- Normalisation de ces moyennes mobiles sur cinq ans en divisant par les moyennes globales de chacune ;
- Détermination des distances des moyennes mobiles normalisées sur cinq ans par rapport aux moyennes globales (celles de Srinagarind et de Khao Laem qui sont égales à 1).

La Figure X-7 montre le pointage des moyennes mobiles normalisées sur cinq années (celles de Srinagarind en abscisse et celles de Khao Laem en ordonnée). Les points les plus lointains des moyennes (égales à 1) correspondent aux regroupements de cinq

années extrêmes, alors que ceux les plus proches correspondent à des regroupements de cinq années normales.

Au final, quatre séries chronologiques de cinq années consécutives sont sélectionnées :

- Années moyennes : 1980-1984
- Années sèches I : 1976-1980
- Années sèches II : 1989-1993 (la sécheresse récente)
- Années humides : 1961-1965

Le groupe 1980-84 a été choisi comme années moyennes de référence. On note (Figure X-8) que ces cinq années ne sont pas toutes « normales » sur la période considérée : une année humide (1981) est entourée par les années relativement sèches. Cependant, les apports aux deux retenues de 5 années successives sont les plus proches des moyennes.

Comme nous nous intéressons ici plus à la question d'allocation en eau pendant la période sèche, ce sont deux séries d'années sèches qui ont été retenues : l'une légèrement plus critique (1976-80) et l'autre plus récente (1989-93). L'année 1998, qui est l'année la plus sèche observée (voir Figure X-8), consécutive de l'événement El Niño de 1997, n'a pas été retenue, car elle ne s'inscrit pas dans un contexte d'années consécutives globalement sèches.

On n'observe pas de période récente abondante en eau dans ce bassin ; la période humide choisie est survenue entre 1961 et 1965, il y a plus de 30 ans. On ne trouve pas de période humide comparable ultérieurement.

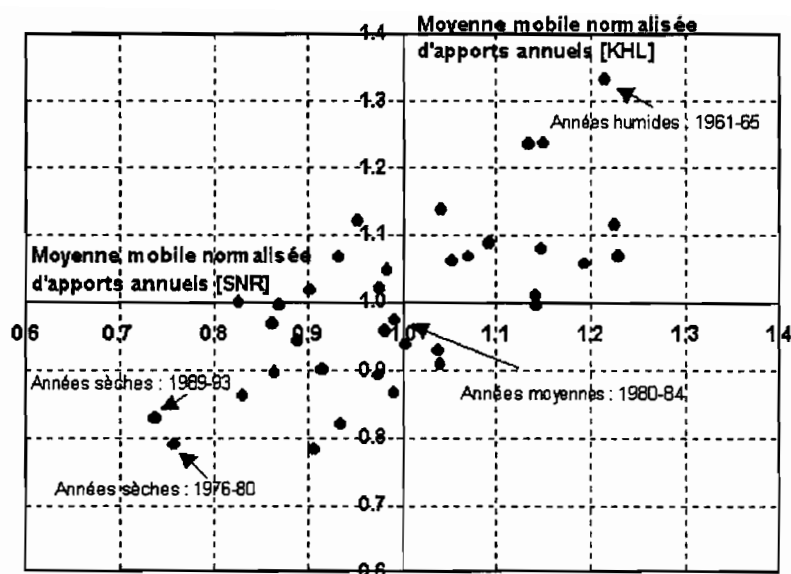


Figure X-7 : Moyennes mobiles de 5 ans normalisées d'apports annuels aux retenues de Srinagarind et de Khao Laem

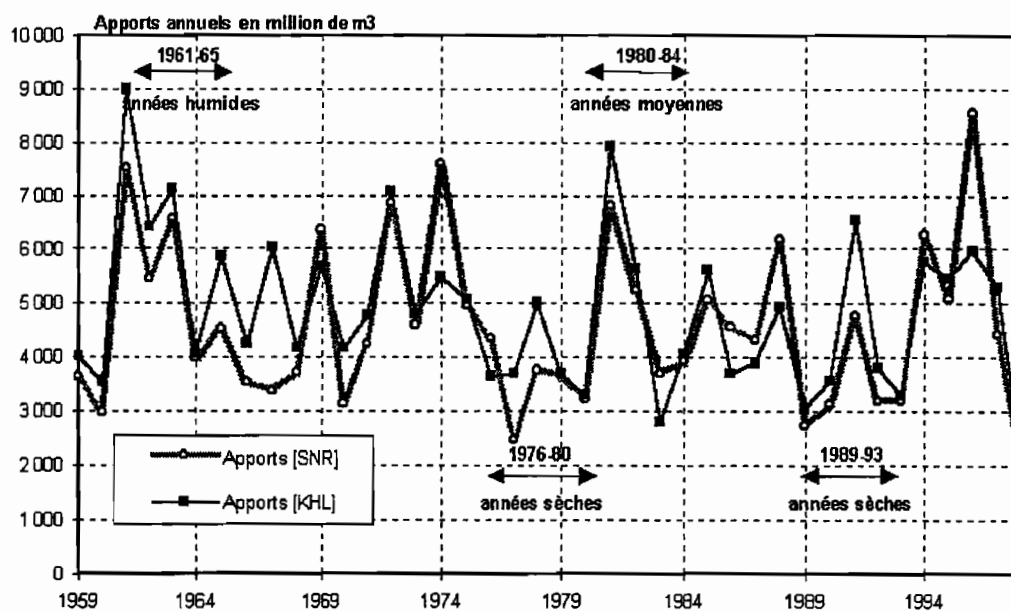


Figure X-8 : Apports annuels aux retenues de Srinagarind et de Khao Laem

X-2.2 Analyses des résultats

a) *Apports aux retenues*

Les simulations sous 4 conditions de ressource en eau se sont effectuées sur les périodes choisies de 5 années au pas de temps hebdomadaire. Les résultats sur les remplissages des retenues de Srinagarind et de Khao Laem sont donnés par la Figure X-9 et la Figure X-10, respectivement.

Toutes les paramétrisations de la modélisation étant égales par ailleurs, les résultats obtenus pour des conditions d'apport différentes sont notablement distincts. Les retenues de Srinagarind et de Khao Laem se trouvent en équilibre dans les années moyennes. Tandis qu'elles débordent dans les années humides et tendent à se vider en dessous des niveaux critiques dans les années sèches.

La configuration utilisée résultant d'un fonctionnement « classique actuel » du système du Mae Klong (voir le résultat de simulation du scénario de référence avec l'option de prélèvement dans la section précédente), cela confirme que la stratégie établie pour la gestion des retenues ne convient pas à toutes les situations de la ressource.

Les stratégies actuelles de gestion de retenue ainsi que les demandes en eau nécessitent donc des adaptations à la situation dynamique de la ressource.

b) *Etat initial des retenues*

La définition de l'état initial du système (dans ce contexte c'est celui des retenues d'eau) a été prise en considération dans cette section, pour la raison qu'elle a un impact appréciable sur les résultats de simulation, en particulier lorsque la période de simulation est relativement courte.

Les remplissages des retenues du système du Mae Klong sous divers états initiaux sont présentés sur la Figure X-11 et la Figure X-12. Les états initiaux ont été définis par le pourcentage du volume mobilisable dans la zone de fonctionnement normal de retenue (la zone située entre le niveau supérieur et le niveau inférieur de fonctionnement). Quatre états initiaux de retenues ont été testés avec la série moyenne des apports entrant (1980-84) : 0%, 33,3%, 66,7% et 100% du volume mobilisable.

A partir de l'observation des courbes de remplissage des retenues (Figure X-11 et Figure X-12), les niveaux des retenues sous des options différentes de l'état initial tendent à converger. Au-delà de la troisième année (la 157^e semaine), les courbes de remplissage sont quasiment confondues.

De plus, dans le cas de la retenue de Khao Laem où le volume de retenue est du même ordre de grandeur que le volume d'apports annuels, la réinitialisation de l'état de la retenue se fait plus rapidement. Les niveaux de retenue de Khao Laem ont atteint le niveau supérieur de fonctionnement *Zsup* (voir Figure X-12) avec les 4 options testées d'état initial du fait d'apports importants dans la deuxième année ; dès cette année-là, les courbes de remplissage de retenue évoluent de façon similaire.

Choix de l'état initial. Du fait que la saison des pluies se termine vers la fin d'octobre et que la simulation dans notre étude débute toujours par la première semaine du mois de janvier, l'eau emmagasinée dans les retenues passe par une période de vidange au cours des deux mois.

Il se trouve donc qu'un choix de l'état initial pour notre étude de deux tiers (soit 66,7%) du volume mobilisable dans la zone de fonctionnement normal correspond à peu près à la situation réelle.

A partir des résultats de simulation sur 40 années (1959-98), nous observons que le système se réinitialise - les retenues se remplissent de façon satisfaisante - dès 1961 (voir Figure X-4 et Figure X-5). On en déduit que la définition de l'état initial des retenues a un impact négligeable dans les analyses de résultats sur l'ensemble de la période de simulation (40 années).

Cependant, une interprétation prudente des résultats de simulation est nécessaire, particulièrement lors de simulation sur des périodes relativement courtes.

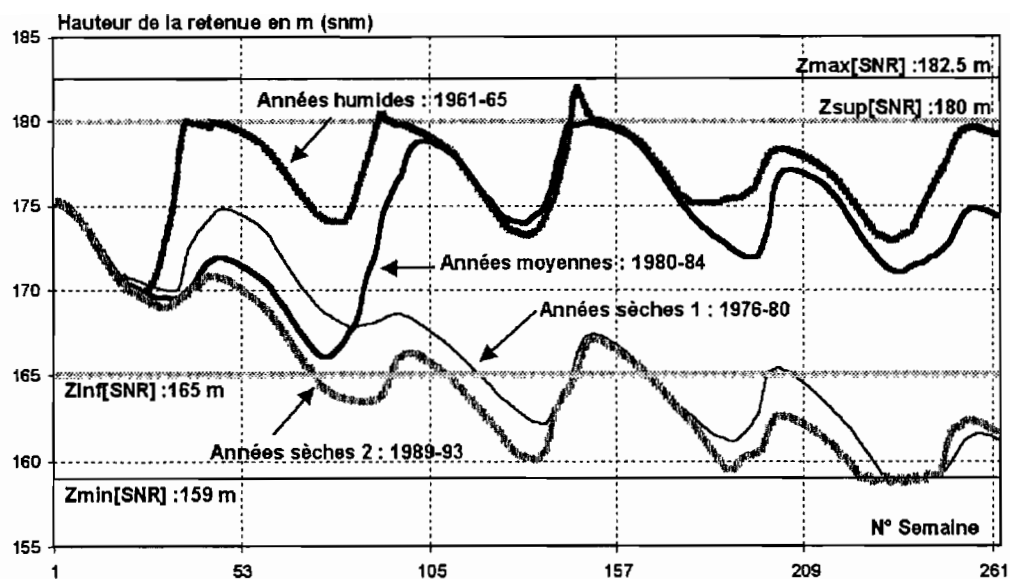


Figure X-9 : Remplissage de la retenue de Srinagarind avec des apports différents (simulation sur 5 ans, pas de temps hebdomadaire)

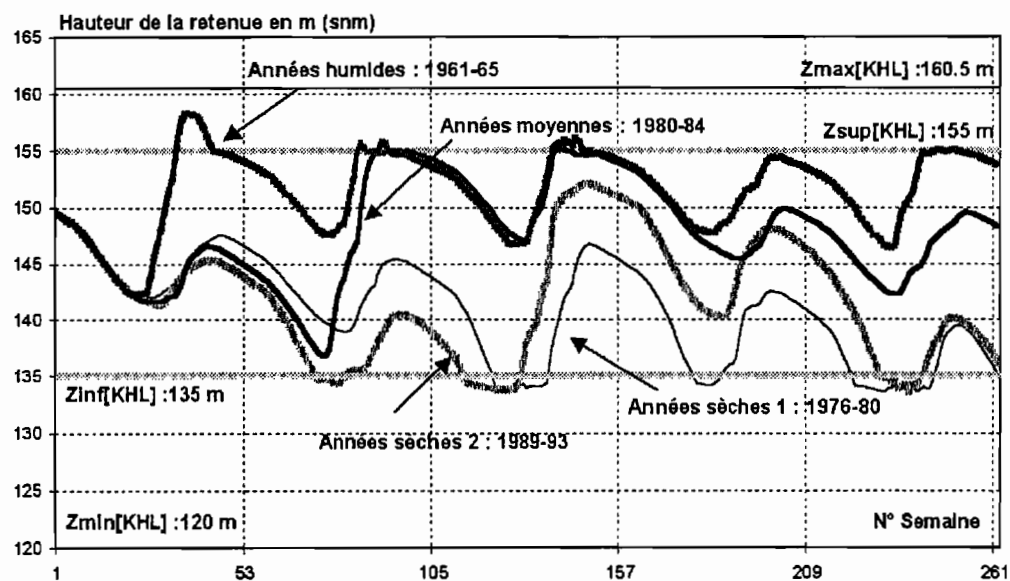


Figure X-10 : Remplissage de la retenue de Khao Laem avec des apports différents (simulation sur 5 ans, pas de temps hebdomadaire)

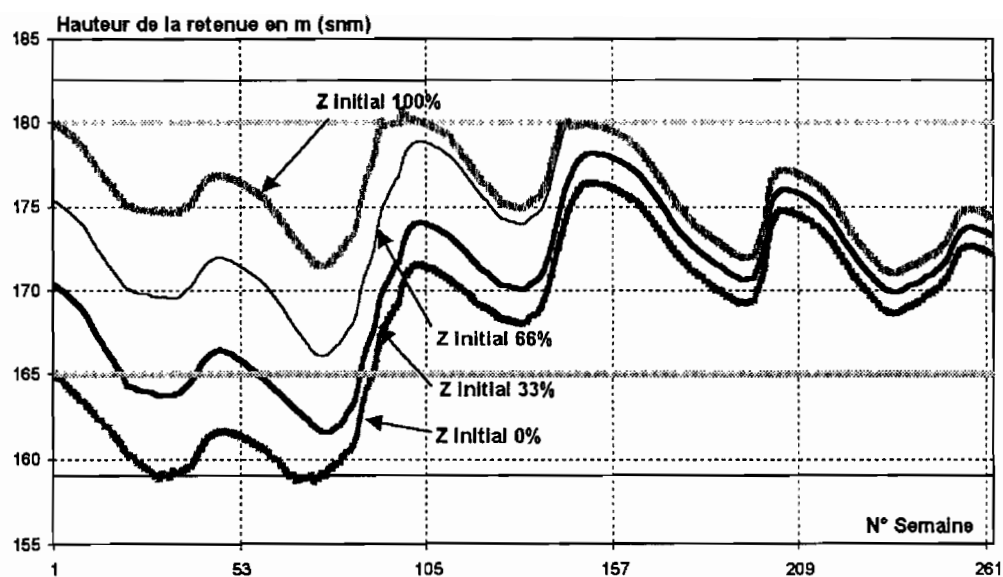


Figure X-11 : Remplissage de la retenue de Srinagarind avec des états initiaux différents (simulation sur 5 années moyennes (1980-1984), pas de temps hebdomadaire)

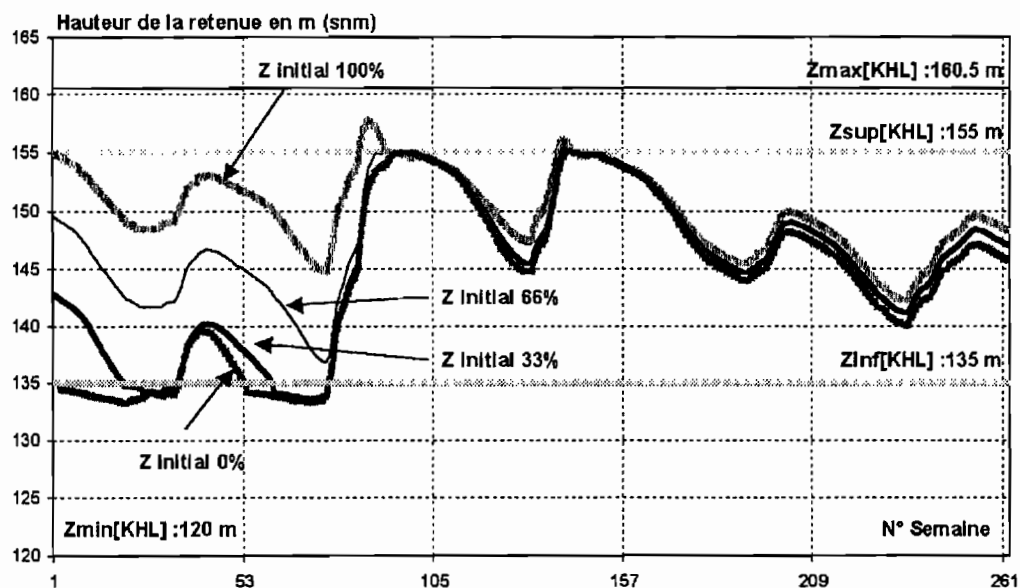


Figure X-12 : Remplissage de la retenue de Khao Laem avec des états initiaux différents (simulation sur 5 années moyennes (1980-1984), pas de temps hebdomadaire)

X-3 DEMANDES EN EAU A L'AVAL DU BASSIN

Comme pour les paramètres économiques introduits dans le modèle de fonctionnement du système du Mae Klong, la définition des demandes en eau contient une incertitude notable sur les grandeurs qui sont susceptibles de conduire à des erreurs sur les résultats.

Cette section présente les différentes représentations des demandes en eau dans le modèle de fonctionnement de l'hydrosystème du Mae Klong, ainsi que les amplitudes de variation des résultats selon la manière dont elles sont prises en considération.

X-3.1 Irrigation

Dans le modèle de fonctionnement de l'hydrosystème du Mae Klong, les prélèvements pour l'irrigation dans le bassin du Mae Klong (le GMKIP) et dans le bassin du Tha Chin sont considérés séparément.

La définition du volume d'eau sollicité pour l'irrigation du GMKIP se base sur les données enregistrées des prélèvements au barrage de Vajiralongkorn. Les moyennes des données, au pas de temps hebdomadaire sur 10 années (1989-98), ont été utilisées pour le scénario de référence. Le volume annuel de prélèvement est de l'ordre de 5 milliards de m³.

Afin d'étudier la sensibilité de ce paramètre, les écarts-types des volumes prélevés au pas de temps hebdomadaire ont été calculés. On a fait varier les volumes d'eau de plus ou moins deux écarts-types autour de la moyenne. A l'échelle annuelle, les volumes de prélèvement varient entre 2,7 et 7,5 milliards de m³.

Pour représenter les prélèvements destinés au bassin du Tha Chin, un débit de 80 m³/s a été fixé pendant 4 mois en saison sèche (entre janvier et avril). Ce débit représente un volume annuel de 0,83 milliards de m³.

L'analyse de sensibilité consiste à tester des débits compris entre 0 et 100 m³/s, cette valeur constituant la limite supérieure de capacité des canaux d'amenée. Le volume d'eau nécessaire pour assurer le débit maximum de 100 m³/s pendant 4 mois est de l'ordre de 1 milliard de m³.

Les résultats d'analyse de sensibilité montrent que les variations de prélèvement d'eau pour l'irrigation ont relativement peu d'impact sur la performance économique globale du système du Mae Klong (Figure X-13 et Figure X-14). Le prélèvement pour le bassin du Tha Chin apparaît comme mineur par rapport aux autres usages de l'eau.

Même si le volume d'eau prélevé pour l'irrigation du GMKIP concerne plus de moitié des usages de l'eau à l'aval du bassin du Mae Klong, la variation de ce dernier n'entraîne guère de changement de la performance économique global de l'hydrosystème du Mae Klong.

Le volume d'eau sollicité pour l'irrigation ne peut pas dépasser pas celui de la production hydroélectrique, c'est donc l'hydroélectricité qui contraint la décision de lâchers de l'eau des retenues. L'augmentation du volume sollicité, par exemple de 5 à 7,5 milliards de m³, ne provoque pas de pénurie dramatique du système ; le bénéfice net du système est en effet relativement peu sensible à ce paramètre.

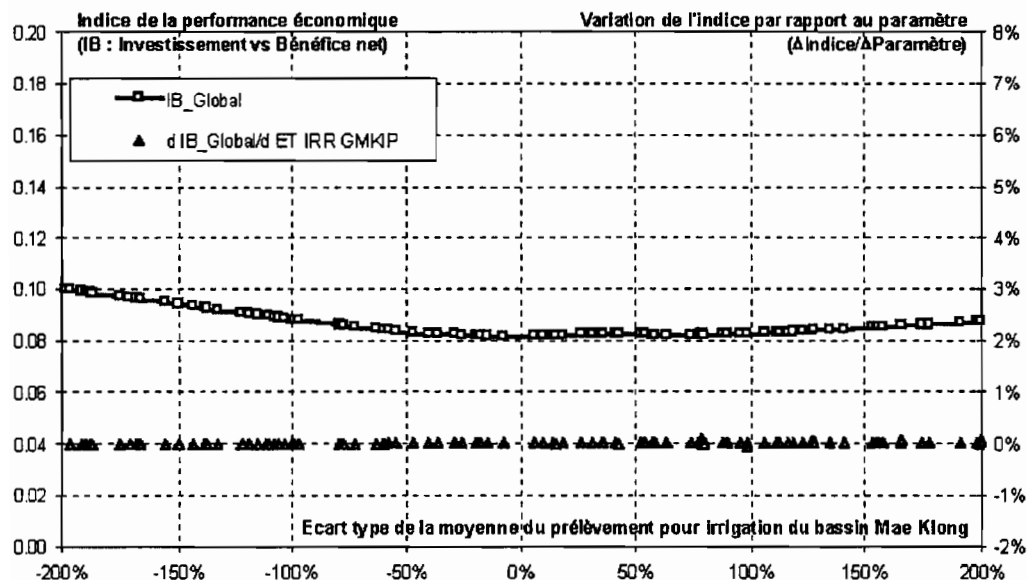


Figure X-13 : Variabilité de l'indice IB par rapport aux prélèvements pour l'irrigation du bassin du Mae Klong

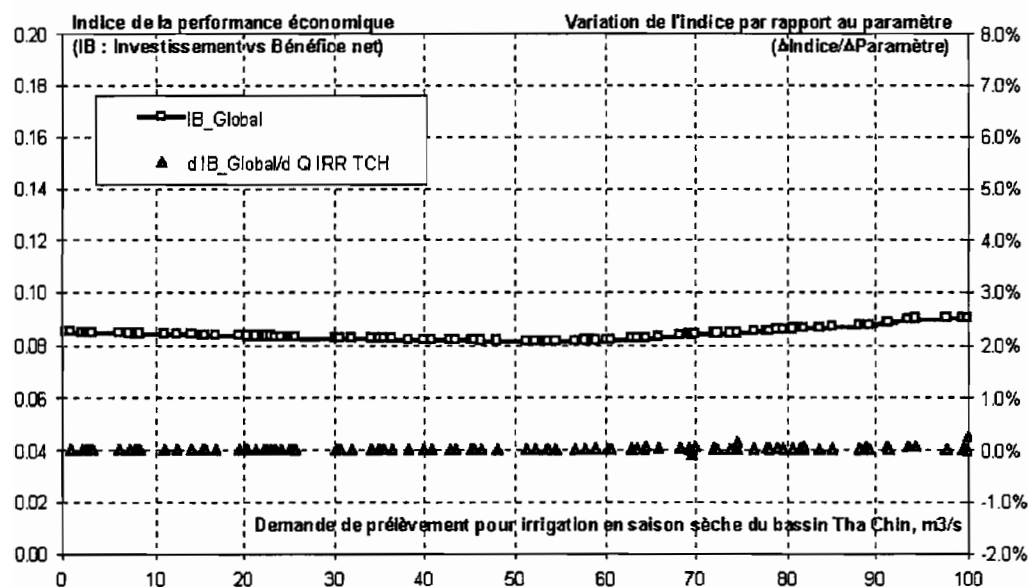


Figure X-14 : Variabilité de l'indice IB par rapport aux prélèvements pour l'irrigation du bassin du Tha Chin

X-3.2 Eau potable

Le prélèvement pour la fourniture d'eau potable à la zone métropolitaine de Bangkok atteindra le débit maximum de 45 m³/s (1,42 de milliards de m³/an) en 2017. C'est ce débit qui a été choisi dans l'étude de simulation de fonctionnement du système du Mae Klong.

La variation de ce paramètre a été également mise à l'étude de sensibilité. On fait varier le débit de prélèvement entre 0 et 100 m³/s. Un débit de 100 m³/s équivaut à un volume annuel de prélèvement de 3,15 milliards de m³.

Le résultat de l'analyse de sensibilité montre un impact modéré sur la performance du système (Figure X-15). Les meilleures performances économiques (correspondant à de faibles valeurs d'indice IB) sont observées lorsque le prélèvement ne dépasse pas 40 m³/s. Au-delà les pénuries en eau surviennent de plus en plus intensément, le bénéfice net du système commence à se détériorer.

Toutefois on ne peut pas conclure brutalement que le débit de 40 m³/s est le seuil maximum de prélèvement, puisque les simulations plus fines réalisées sur les séries d'apport de 5 années consécutives produisent des résultats un peu différents (Figure X-16).

En séries d'années sèches consécutives, la conclusion demeure même. En revanche les simulations pour les séries d'années moyennes et humides montrent que les bénéfices du système s'accroissent en fonction du débit prélevé. L'amélioration de la performance économique (repérée par la diminution de l'indice IB dans la Figure X-16) continue jusqu'au débit maximum proposé par l'étude.

Avec la condition fixée dans le scénario de référence, le prélèvement maximum programmé de 45 m³/s pour la fourniture d'eau potable à la zone métropolitaine de Bangkok est économiquement rentable en dehors des périodes de sécheresse soutenues.

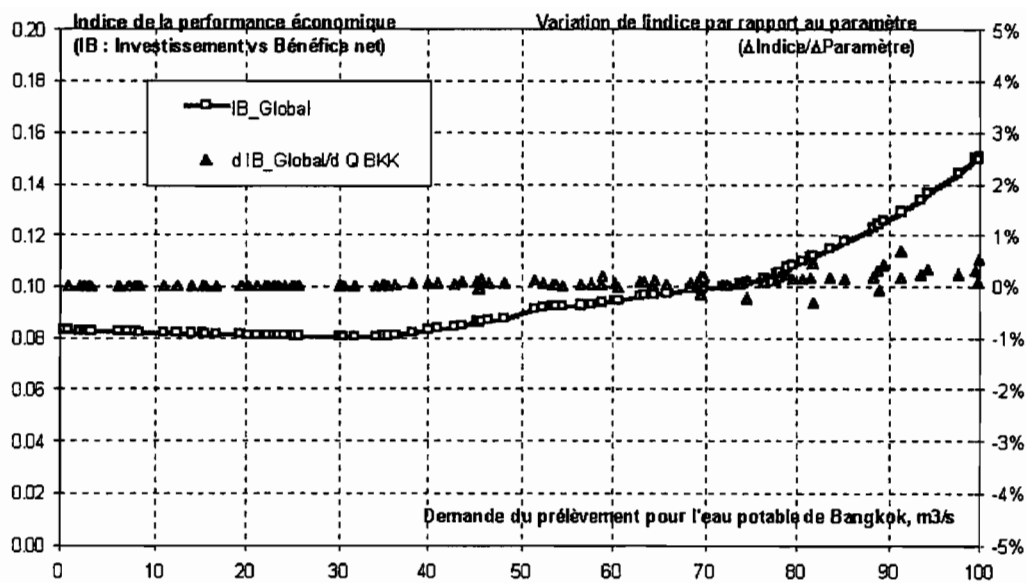


Figure X-15 : Variabilité de l'indice IB par rapport aux prélèvements pour la fourniture d'eau potable à la zone métropolitaine de Bangkok

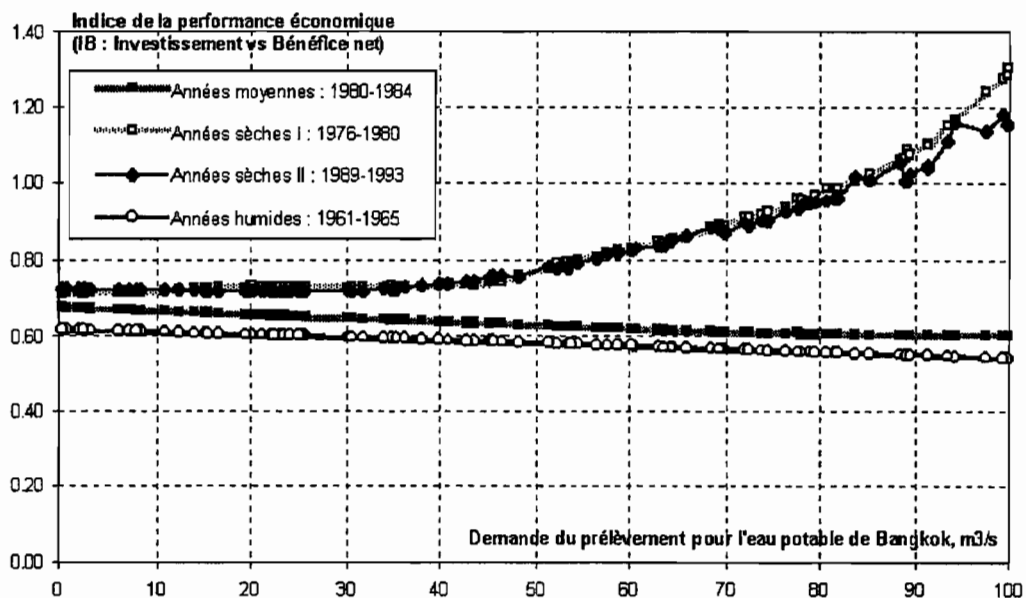


Figure X-16 : Indice IB - Global vs Prélèvements pour la fourniture d'eau potable à la zone métropolitaine de Bangkok, simulation sur 4 séries différentes d'apports de 5 années

X-3.3 Débit réservé contre les intrusions salines

Un débit de 50 m³/s, adopté en gestion opérationnelle du barrage Vajiralongkorn, a été introduit dans le modèle de fonctionnement du système du Mae Klong en tant que demande en eau pour la protection contre les intrusions salines. Le volume d'eau exigé pour cet usage est comparable à celui de la fourniture en eau potable de Bangkok, de l'ordre de 1,57 de milliards de m³/an.

La sensibilité de ce paramètre a été testée de même manière que pour le prélèvement pour la fourniture en eau potable de Bangkok. On fait varier ce débit entre 0 et 100 m³/s.

Le résultat des simulations montre que l'impact de la variation de cette demande est relativement faible. Les meilleures performances économiques sont obtenues quand la demande en eau est établie entre 35 et 50 m³/s (Figure X-17). Lorsque la demande en eau se situe en dehors des marges économiques favorables, la performance est légèrement dégradée (la valeur de l'indice IB s'accroît).

De même manière que la demande en eau potable de Bangkok, le débit réservé à la protection contre les intrusions salines ne conduit à un préjudice économique qu'en période de sécheresse (Figure X-18). Au cours des périodes moyennes et humides, la performance économique croît en fonction de la demande exprimée. Cela explique que l'augmentation du débit réservé jusqu'à 100 m³/s n'aggrave pas la situation de pénurie en eau à ce système durant ces périodes-là.

Par ailleurs, il semble important de souligner que le débit réservé pour la protection contre l'intrusion saline se trouve déjà dans une situation avantageuse ; le débit adopté en gestion opérationnelle de 50 m³/s devance les marges économiques favorables.

Avec l'augmentation d'autres usages de l'eau du bassin et particulièrement durant la période sèche, un débit réservé permanent de 50 m³/s est susceptible de provoquer une situation déficitaire. On note tout particulièrement la diminution du bénéfice net (l'augmentation de l'indice IB en Figure X-18) qui traduit la situation de pénurie en eau du système du Mae Klong, lorsque le débit réservé dépasse 50 m³/s.

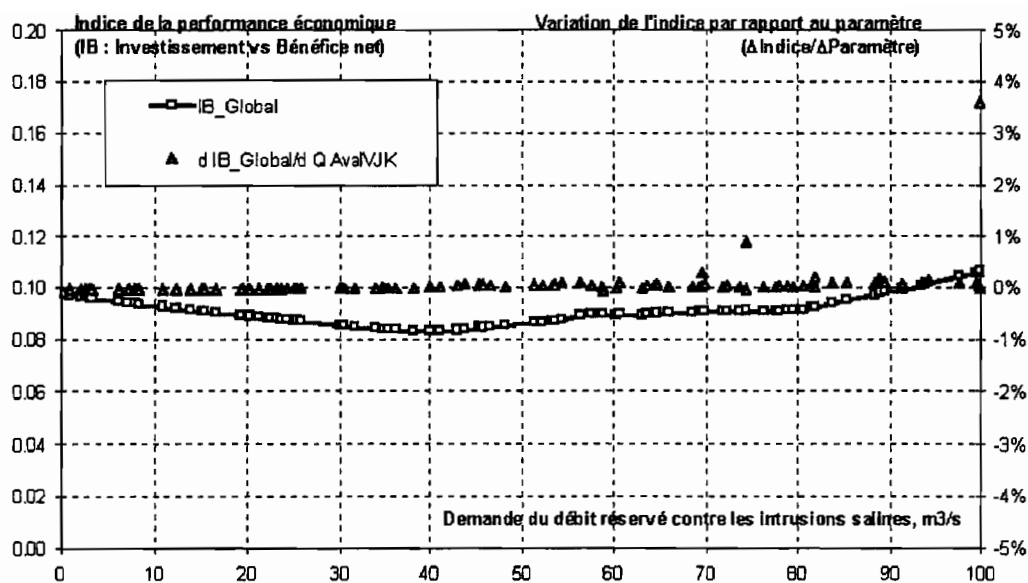


Figure X-17 : Variabilité de l'indice IB en fonction du débit réservé pour la protection contre les intrusions salines

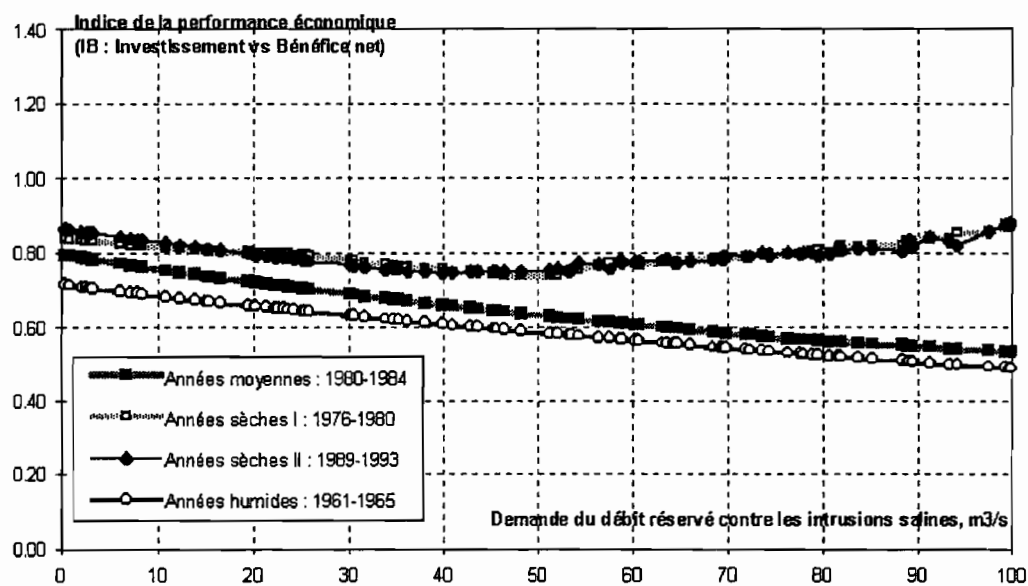


Figure X-18 : Indice IB - Global vs Débit réservé pour la protection contre l'intrusion saline, simulation sur 4 séries différentes d'apports de 5 années

X-4 PRODUCTION HYDROELECTRIQUE

En analysant le système de gestion eau-énergie du bassin du Mae Klong, nous avons noté que la demande en eau pour la production hydroélectrique n'est pas explicitement exprimée en volume par l'opérateur EGAT, mais en énergie à produire mensuellement ou annuellement (EGAT, 1992 ; EGAT, 1999).

De plus, le RID, l'autre acteur principal de gestion de l'eau du Mae Klong, ne prend pas en compte le besoin en eau pour la production hydroélectrique, lorsqu'il élabore avec l'EGAT le programme annuel de la gestion de l'eau à l'échelle du bassin versant, car on considère qu'il n'y a pas de perte d'eau dans les usines hydroélectriques.

Afin de permettre d'introduire le volume d'eau sollicité pour la production hydroélectrique dans le modèle de fonctionnement du système du Mae Klong, c'est l'approche de l'EGAT, qui définit la demande en électricité et non pas la demande en eau, qui a été adoptée.

Tout d'abord, l'objectif de production hydroélectrique est défini comme le pourcentage de la capacité installée des usines hydroélectriques.

Nous avons choisi une valeur de 20% de la capacité installée pour définir l'objectif de production hydroélectrique du scénario de référence. Cet objectif correspond à une production annuelle d'énergie de 1 855 GW h (voir le tableau ci-dessous) ; il est inférieur à la production moyenne annuelle des dix dernières années (2 400 GW h/an entre 1989 et 1998).

Barrage	Capacité installée des usines hydroélectriques	Objectif de production (20% de la capacité)	Objectif de production d'énergie
Srinagarind	720 MW	144 MW	1 262,3 GW h/an
Tha Thung Na	38 MW	7,6 MW	66,6 GW h/an
Khao Laem	300 MW	60 MW	526,0 GW h/an
Total	1058 MW	211,6 MW	1854,9 GW h/an

Ensuite, le volume d'eau exigé pour la production électrique est estimé à l'aide du « *water rate* » qui dépend de la hauteur d'eau dans la retenue.

A partir des résultats de simulation du scénario de référence (en option A – avec prélèvement de l'eau potable), le système du Mae Klong nécessite l'utilisation de 20,71 millions de m³/jour (ou 7,5 milliards de m³/an) pour satisfaire l'objectif de production de 20% de la capacité installée.

Du fait que les niveaux des retenues de la simulation en option S (sans prélèvements) sont supérieurs à ceux en option A (voir Figure X-1 à Figure X-5 plus haut), pour la même demande en électricité exprimée, le volume d'eau exigé pour l'hydroélectricité est légèrement inférieur (19,88 millions de m³/jour, soit 7,26 milliards de m³/an).

En outre, il apparaît dans la Figure X-19 que la sensibilité de la demande hydroélectrique est très ample. Lorsque l'on définit un objectif de production hydroélectrique supérieur à 20% de la capacité installée, l'indice IB croît dramatiquement.

L'indice IB tend même vers l'infini si la demande dépasse la capacité installée de 30%, et ensuite il devient négatif. Cette situation engendre une pénurie fatale en eau s'il est fait un usage excessif de l'eau stockée dans les retenues pour la production hydroélectrique.

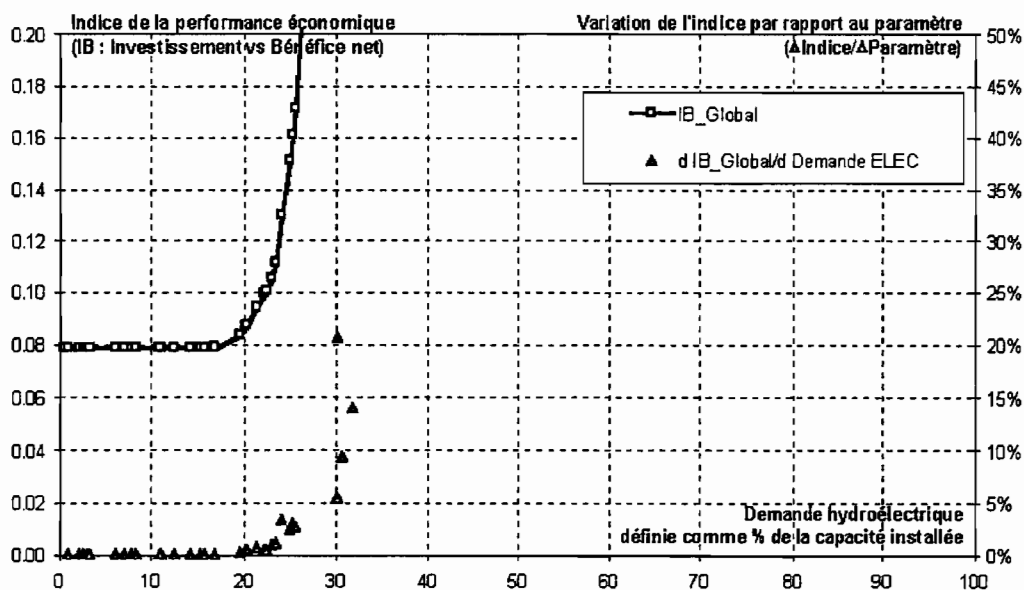


Figure X-19 : Variabilité de l'indice IB par rapport à la demande de production hydroélectrique

Néanmoins, comme dans le cas des demandes en eau à l'aval du bassin analysées précédemment, cette conclusion que la production hydroélectrique du système du Mae Klong ne peut pas passer 20% de la capacité installée, n'est valide que sous certaines conditions.

Les simulations plus fines pour les apports de 5 années consécutives sélectionnées conduisent à des résultats plus nuancés illustrés par les indices IB construits aux autres échelles d'évaluation (voir la définition dans le chapitre XII, section XII-2) :

- IB Globale en Figure X-20,
- IB Global-Tarif en Figure X-21,
- IB Local de Srinagarind en Figure X-22, et
- IB Local de Khao Laem en Figure X-23.

Les résultats de l'évaluation à deux échelles globales sont concordants : L'exploitation de la ressource en eau pour l'hydroélectricité de l'hydrosystème du Mae Klong se limite à 20% de la capacité installée pendant la période sèche, à 30% pendant la période moyenne et à 35% pendant la période humide.

En comparant l'indice IB Global et l'indice IB Global-Tarif (Figure X-20 et Figure X-21), nous pouvons constater, d'une part que la prise en compte de tous les bénéfices d'usages de l'eau donne des performances économiques plus élevées, et d'autre part, que le système est plus robuste : lorsque la ressource est surexploitée, la dégradation de la performance semble moins dangereuse.

A l'échelle locale, l'évaluation au barrage Srinagarind conduit aussi à une conclusion cohérente (Figure X-22), excepté au cours de la période humide où on observe une potentialité à exploiter un peu supérieure à 35% de la capacité installée.

Au contraire, l'évaluation au barrage Khao Laem présente un caractère particulier (Figure X-23) : la limite de 20% de la capacité installée provoque déjà une exploitation excessive pendant les périodes sèches et la retenue de Khao Laem n'est exploitable qu'à moins de 25% pour la période moyenne et 35% pour la période humide.

Pour conclure, on ne peut pas donner de recommandation optimale absolue pour la production hydroélectrique. La seule chose que l'on peut dire est que la demande électrique introduite de manière statique dans le modèle de fonctionnement n'est pas suffisamment adaptée à la situation dynamique telle que la variation de la ressource en eau.

Pour mieux définir la demande hydroélectrique qui se conforme à la condition de la ressource disponible, il faudrait faire appel à l'intellectualité humaine qui joue véritablement un rôle principal en planification et en gestion opérationnelle.

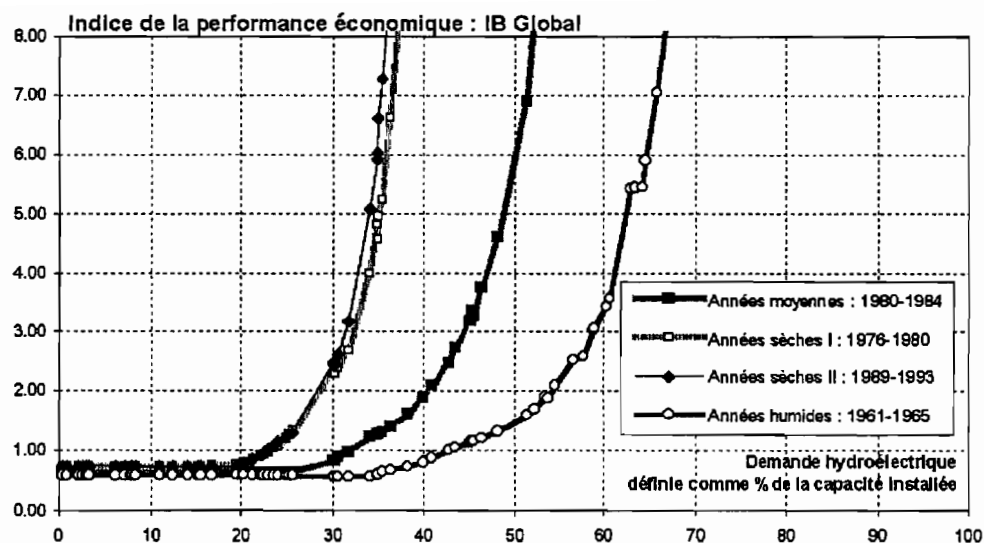


Figure X-20 : Variabilité de l'indice IB Global par rapport à la demande de production hydroélectrique sous 4 conditions d'apports

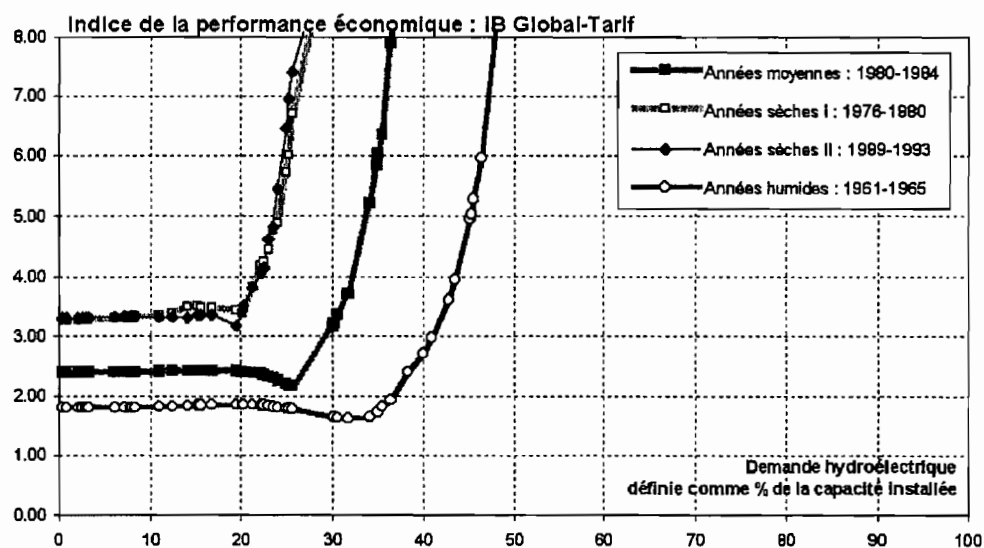


Figure X-21 : Variabilité de l'indice IB Global-Tarif par rapport à la demande de production hydroélectrique sous 4 conditions d'apports

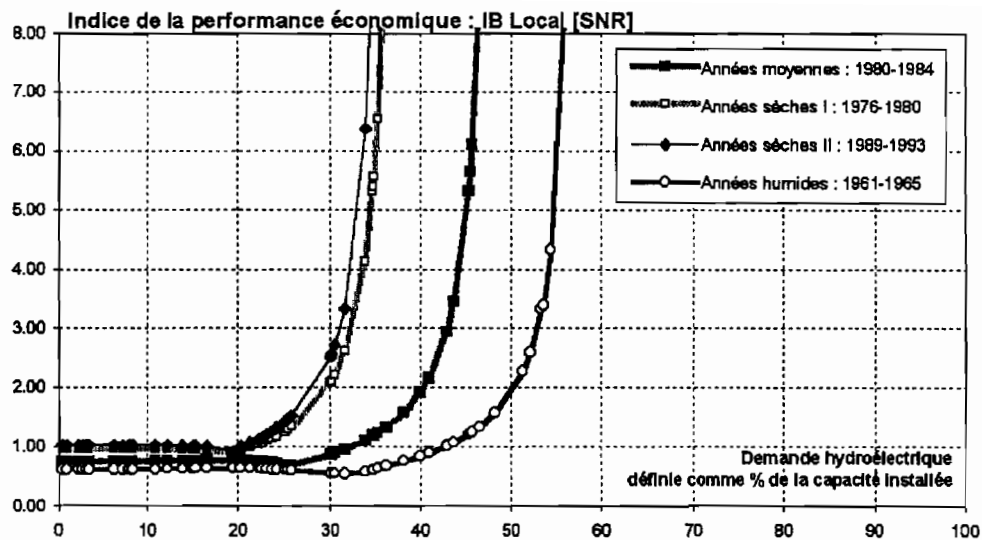


Figure X-22 : Variabilité de l'indice IB - Local [SNR] par rapport à la demande de production hydroélectrique sous 4 conditions d'apports

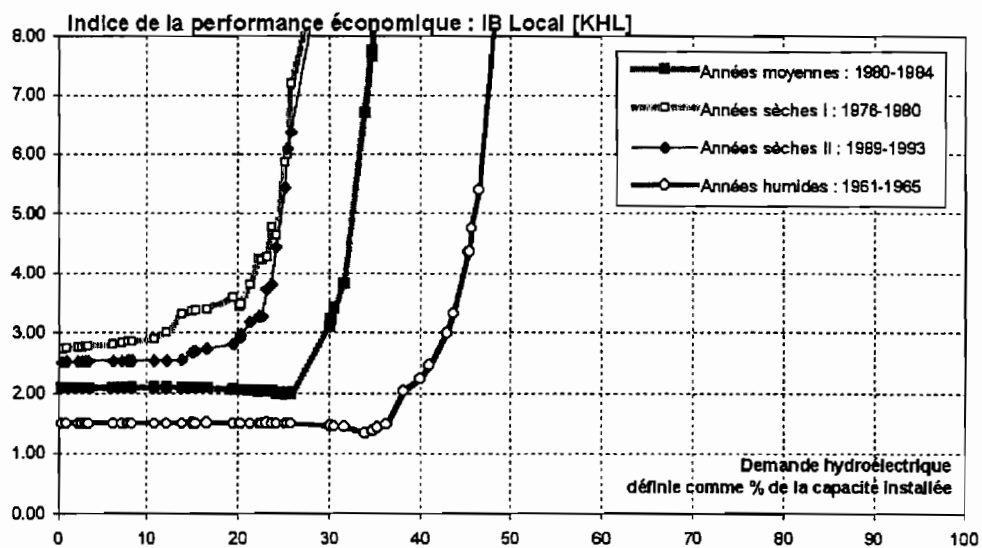


Figure X-23 : Variabilité de l'indice IB Local [KHL] par rapport à la demande de production hydroélectrique sous 4 conditions d'apports

X-5 CONCLUSIONS

Les études de la variabilité des paramètres du modèle de fonctionnement apportent un éclairage pour la définition de nouvelles stratégies de gestion de l'eau de l'hydrosystème du Mae Klong.

Un scénario de référence de la politique de gestion est d'abord défini dans le but de permettre une comparaison des résultats obtenus avec divers autres scénarios de simulation. Il est établi de manière à ce qu'il corresponde d'aussi près que possible à la pratique de gestion en vigueur aujourd'hui. Les simulations du scénario de référence ont été effectuées sous deux options :

- Option S, sans prélèvement pour l'alimentation en eau potable de la région métropolitaine de Bangkok, représentant la situation d'usage de l'eau en vigueur actuellement dans le bassin ;
- Option A, avec prélèvements, indiquant la situation de l'usage de l'eau à projeter sur l'horizon 2017.

Les résultats de simulation sont observés et interprétés à l'aide des indicateurs mis en œuvre qui comprennent les fiabilités de fonctionnement du système en volume et en temps, la résilience, la vulnérabilité et les indices économiques IB à différentes échelles d'évaluation.

Les paramètres du modèle étudié se répartissent en deux groupes : ceux qui concernent les ressources en eau et ceux qui concernent les demandes en eau.

Quatre séries d'apports de 5 années consécutives sous diverses conditions de ressources en eau ont été sélectionnées à partir des séries chronologiques complètes d'apports :

- Années moyennes : 1980-1984
- Années sèches I : 1976-1980
- Années sèches II : 1989-1993
- Années humides : 1961-1965

Les résultats de simulation sous ces 4 conditions d'apports démontrent la nécessité d'adaptation des stratégies de gestion de retenues à la situation dynamique de la ressource.

Les demandes en eau à l'aval du bassin consistent en trois groupes : les prélèvements pour l'irrigation du Mae Klong et du Tha Chin, l'alimentation en eau potable des zones métropolitaines de Bangkok et le débit réservé contre les intrusions salines.

Les résultats d'analyse de sensibilité montrent que les impacts des variations des demandes en eau pour l'irrigation et pour le débit réservé sont relativement faibles, même si le volume d'eau prélevé pour l'irrigation du Mae Klong concerne plus de la moitié des usages de l'eau à l'aval du bassin du Mae Klong. On note également que la

variation de la demande en eau pour l'alimentation en eau potable de Bangkok provoque un impact modéré sur la performance économique global du système.

La variabilité des demandes en eau à l'aval du bassin concerne la performance de fonctionnement du système, plus particulièrement lors d'années sèches consécutives.

En ce qui concerne la demande en eau pour la production hydroélectrique, un seuil assimilé à un pourcentage de la capacité installée des usines hydroélectriques a été défini comme objectif de production électrique. Les résultats de simulation illustrent une sensibilité importante de la performance du système due à la variation de la demande hydroélectrique.

Les simulations plus fines avec les différents scénarios de 5 années consécutives montrent une diversification des choix de production hydroélectrique optimale selon l'hydraulicité des années, selon le critère d'évaluation économique.

Tableau X-4 : Valeurs des paramètres utilisées dans le modèle de fonctionnement de l'hydrosystème du Mae Klong pour le scénario de simulation de référence

Paramètres	Valeurs utilisées dans le scénario de référence	Test de sensibilité	Impact sur les résultats
Apports	Années moyennes (1980-1984) ne pas prendre en compte des apports intermédiaires lors de la planification	4 séries différentes moyennes sèches I sèches II humides	Fort
Demande en eau du bas du bassin			
Irrigation du Mae Klong	moyenne	$M \pm 2 \cdot ET^2$	Faible
Débit réservé	50 m ³ /s	0 – 100 m ³ /s	Faible
Eau potable de Bangkok	45 m ³ /s	0-100 m ³ /s	Modéré
Irrigation du Tha Chin en saison sèche	80 m ³ /s (4 mois à partir de janvier)	0-100 m ³ /s	Faible
Demande en eau pour la production hydroélectrique	20 % 3 h de pompage sèche/humide = 1	0 – 100 % 0-5 hr 0-5	Fort Faible Assez fort

² M : moyenne, ET : écart-type

XI. STRATEGIES DE LA GESTION DE L'EAU

Ce chapitre présente une synthèse sur les situations des ressources en eau et des usages, en vigueur et à l'horizon 2017 ; la pratique actuelle de gestion sera mise en cause. Quelques stratégies élaborées dans le but d'améliorer la performance du système seront testées à l'aide du modèle de fonctionnement développé.

XI-1 ANALYSE CRITIQUE DE LA GESTION EN VIGUEUR

L'analyse critique de la gestion de l'eau en vigueur se base sur les données enregistrées depuis 1970. La période des dix dernières années (1989-1998) nous intéresse plus particulièrement, car la plupart des aménagements sont réalisés et les prélèvements pour les usages agricoles du GMKIP atteignent leur potentiel maximum.

Les ressources en eau. Pour ce qui concerne les ressources en eau disponibles au cours de cette période, les apports entrant dans les barrages-réservoirs sont inférieurs à ceux prévus lors de la conception des retenues, du fait de deux périodes de sécheresse entre 1977 et 1980, puis entre 1989 et 1993.

La mise en eau prolongée de la retenue de Srinagarind est l'une des conséquences de la première période de sécheresse. La récente sécheresse au début des années 1990 a amené le système de gestion d'eau du Mae Klong au bord de la défaillance. Les deux retenues du système ont approché les niveaux inférieurs de fonctionnement (Figure XI-1). Des restrictions des usages ont dû être décidés à partir de l'année 1993 jusqu'au début de l'année 1994.

En moyenne sur 10 ans (1989-98), les apports annuels totaux au barrage de Vajiralongkorn sont de l'ordre de 11 milliards de m³. Environ 80% des apports sont contrôlés par les barrages-réservoirs ; ils sont lâchés à travers les turbines et servent à la production hydroélectrique.

Les débordements ne se sont jamais produits au barrage de Srinagarind et ils ne se sont produits que deux fois (en 1994 et 1997) au barrage de Khao Laem.

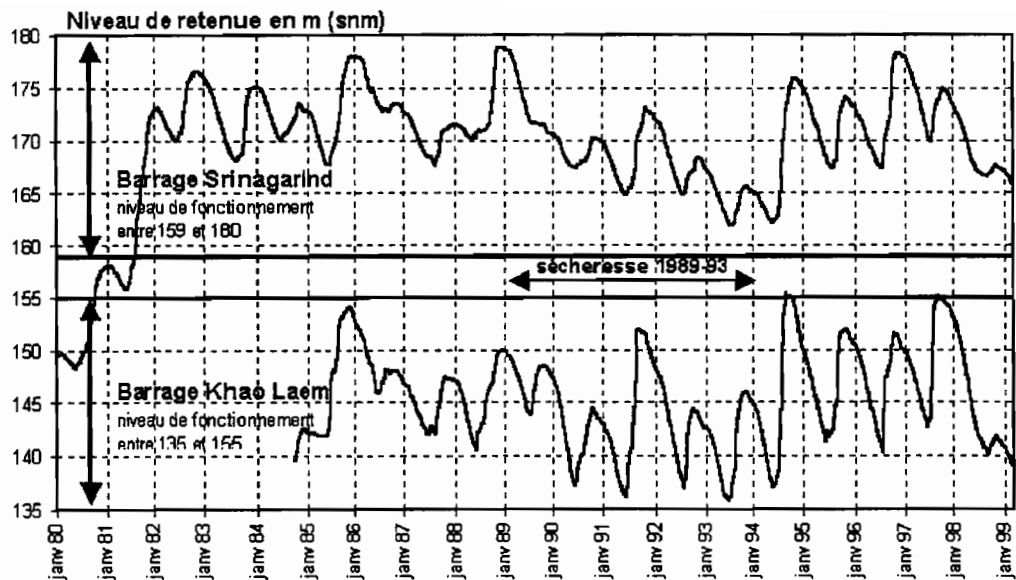


Figure XI-1 : Remplissage des retenues de Srinagarind et de Khao Laem

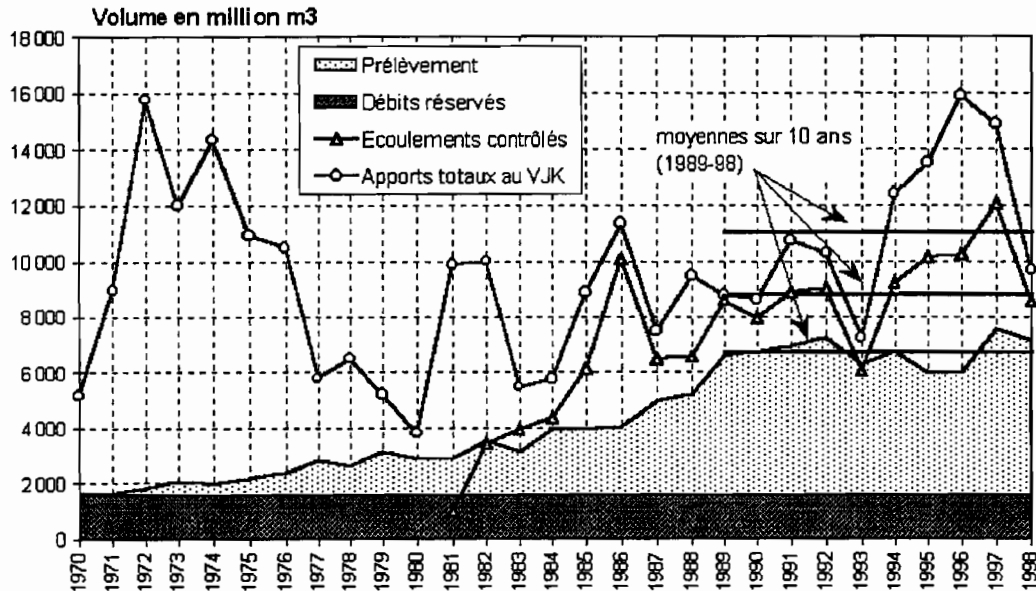


Figure XI-2 : Variation annuelle des apports totaux au barrage de Vajiralongkorn et des écoulements contrôlés par les barrages-réservoirs selon les usages de l'eau

Les usages de l'eau. Au contraire des ressources, caractérisées par une variabilité aléatoire, les usages de l'eau tendent à s'accroître au fil du temps (voir Figure XI-2).

Depuis la mise en service de la deuxième phase d'aménagement du GMKIP en 1989, les prélèvements pour les périmètres irrigués du Mae Klong commencent à se stabiliser. Le prélèvement moyen annuel est de l'ordre de 5 milliards de m³.

En rajoutant les débits réservés de 50 m³/s contre l'intrusion saline, soit 1,57 milliards de m³ par an, nous obtenons le volume exigé annuellement au barrage de Vajiralongkorn qui correspond à 60% des écoulements annuels totaux (Figure XI-3).

A l'horizon 2017, le prélèvement pour l'alimentation en eau potable de Bangkok atteindra le maximum prévu correspondant à un volume annuel de 1,42 milliards de m³. Il faut y ajouter des transferts d'eau vers le fleuve Tha Chin, à raison de 80 m³/s pendant 6 mois, soit 1,26 milliards de m³.

Toutefois une partie du volume d'eau à transférer est déjà incluse dans le volume prélevé dans le fleuve Mae Klong (voir la section VI-2 « *Prélèvement d'eau pour le fleuve Tha Chin* » dans le chapitre VI). La moyenne du volume écoulé dans le canal Thasarn-Bangpla pendant 6 mois (janvier – juin) étant de l'ordre de 0,46 milliards de m³, le volume demandé pour le fleuve Tha Chin à l'horizon 2017 est ramené à 0,8 milliards de m³.

Les usages totaux à l'horizon 2017 atteindront donc les volumes des écoulements contrôlés par les barrages-réservoirs (voir le bilan du Tableau XI-1).

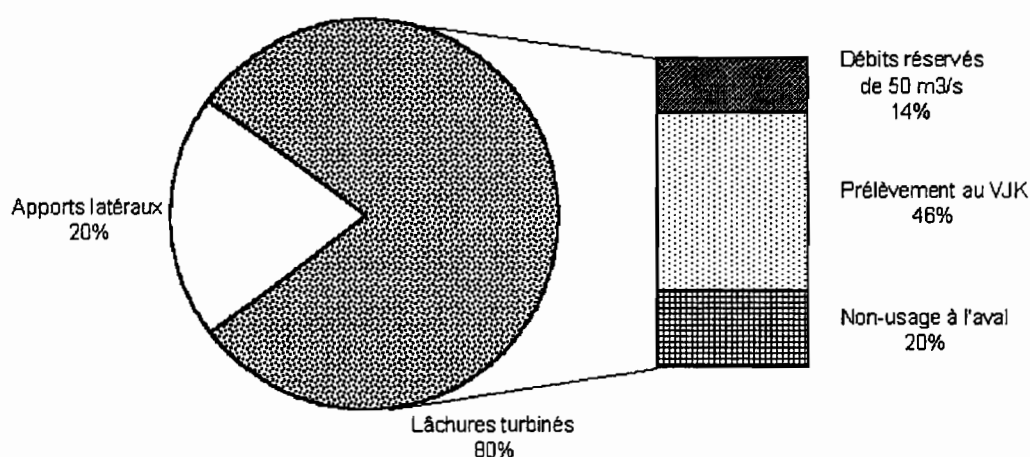


Figure XI-3 : Ressources en eau et usages en moyenne annuelle (1989–1998)

**Tableau XI-1 : Bilan moyen annuel des ressources en eau et des usages
du bassin du Mae Klong**

Unité : million de m³

Ressources	
(a) Ecoulements contrôlés par les barrages-réservoirs	8 827,98
(b) Ecoulements des bassins intermédiaires latéraux	2 260,97
Total	11 088,95
Usages	
(a) Prélèvements pour irrigation du Mae Klong	5 063,23
(b) Débits réservés de 50 m ³ /s contre l'intrusion saline	1 577,88
(c) Prélèvements pour irrigation du Tha Chin (1 262,30-466,68)	795,62
(d) Prélèvement pour alimentation en eau potable de Bangkok	1 420,09
Total : (a)+(b)	6 641,11
Total : (a)+(b)+(c)+(d)	8 856,82

La gestion de l'eau. Sur la base du bilan moyen annuel, on pourrait dire que les ressources en eau sont suffisantes pour satisfaire toutes les demandes. Mais alors pourquoi la gestion des barrages-réservoirs du Mae Klong a-t-elle rencontré des difficultés au cours des dernières années alors que les usages actuels sont bien inférieurs à ceux prévus à l'horizon 2017 ?

Jusqu'à présent, la gestion des retenues du bassin du Mae Klong est relativement souple du fait des ressources en eau excédantes. Les usages aval n'imposent une gestion contraignante que pendant la période sèche de l'année (de janvier à juin, soit de la 1^{ère} à la 26^e semaine de l'année sur les graphiques).

Pendant la période humide de l'année les écoulements au barrage de Vajiralongkorn sont supérieurs à la somme des demandes à l'aval du bassin. Les écoulements excédentaires proviennent, d'une part, des écoulements des bassins intermédiaires latéraux, et, d'autre part, des lâchers pour produire de l'électricité (Figure XI-4).

Selon la politique de gestion de l'eau en vigueur, l'EGAT obtient occasionnellement la liberté d'utiliser de l'eau excédentaire pour la production hydroélectrique. Mais cet usage, non pris en compte lors de la phase de planification inter-agences, est parfois excessif.

De plus, le programme d'allocation en eau n'est mis en œuvre qu'en période sèche, en se basant sur l'état du stock d'eau à la fin de la saison des pluies, ou bien après un usage non-contrôlé de l'eau dans les retenues pendant la période humide.

Dans la pratique il arrive qu'une restriction d'usage de l'eau en période sèche de l'année soit dû à un usage imprudent en vue de maximiser la production hydroélectrique pendant la période humide.

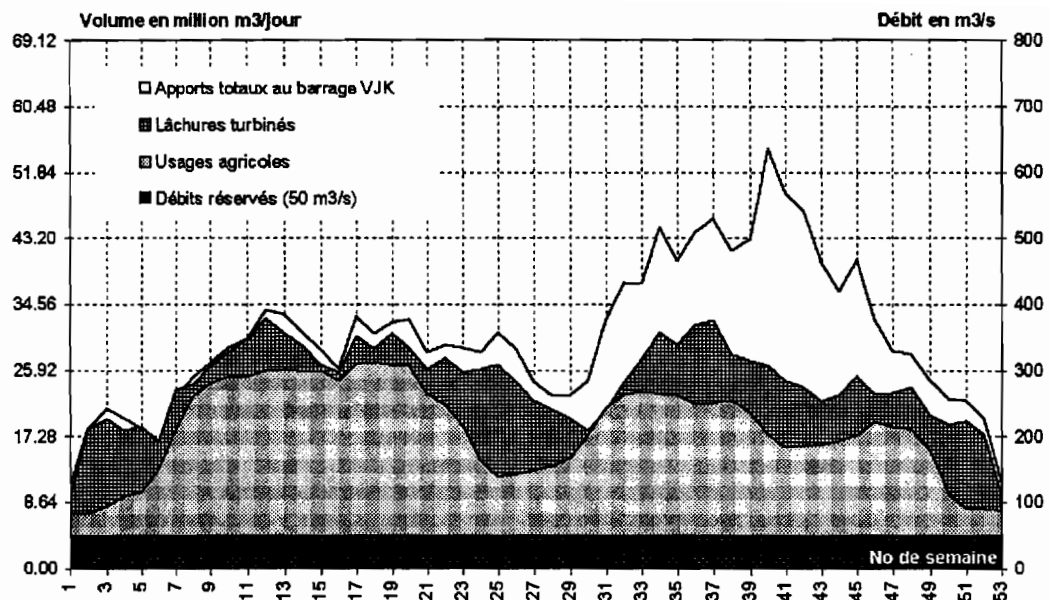


Figure XI-4 : Variation saisonnière des apports au barrage de Vajiralongkorn, des lâchers turbinés et des usages en vigueur, en moyenne hebdomadaire entre 1989 et 1998

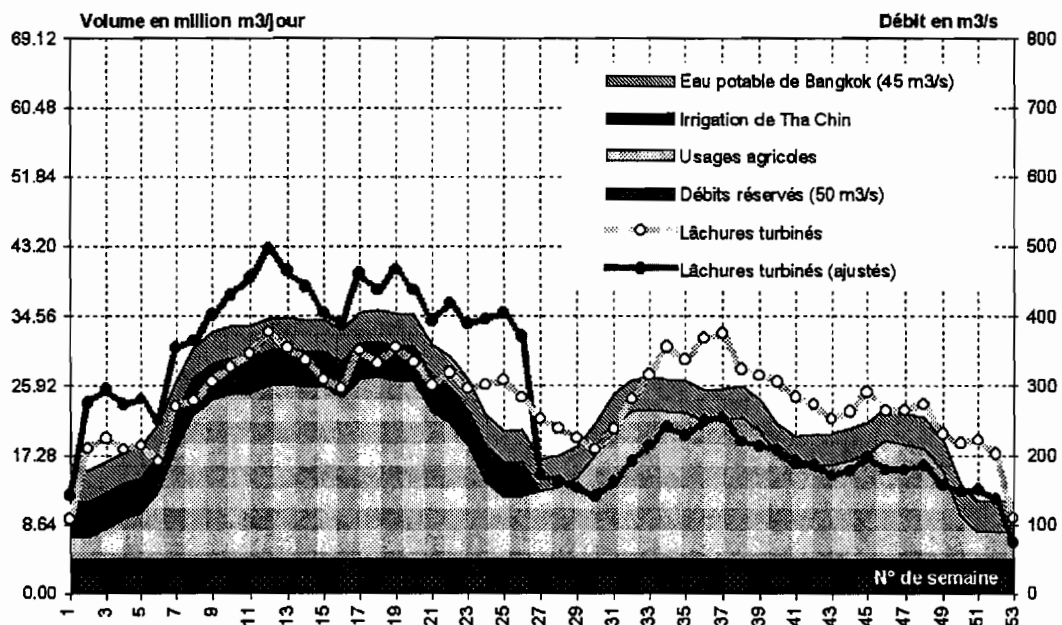


Figure XI-5 : Les usages de l'eau à l'horizon 2017 avec les lâchers turbinés ajustés

La situation à l'horizon 2017. Sur la base du bilan moyen annuel, les apports du bassin du Mae Klong sont encore excédentaires. En rajoutant les nouveaux usages de l'eau à l'horizon 2017 sur la Figure XI-4, nous remarquons sur la Figure XI-5 que la demande totale en eau à l'aval du bassin n'est pas supérieure en moyenne aux lâchers turbinés. La Figure XI-5 montre qu'il est possible de répondre à la demande des usagers en modifiant la production saisonnière.

Sur la Figure XI-5, la courbe avec les points clairs représente les lâchers turbinés actuellement pour la production hydroélectrique. Ces lâchers sont à peu près équivalents pendant les périodes sèches et humides ($V_{\text{sèche}}/V_{\text{humid}} \sim 1$). Une modification de ce rapport de lâchers afin de se conformer à la variation saisonnière de la demande aval à venir est envisageable.

Si on augmentait les lâchers en période sèche jusqu'à $V_{\text{sèche}}/V_{\text{humid}} = 2$ (ligne avec les points foncés dans la Figure XI-5), le même volume annuel d'eau lâchée satisferait encore les demandes. On note toutefois que les écoulements latéraux ne peuvent plus être négligés pour les usages en période humide.

En outre, pendant des périodes sèches prolongées, l'utilisation de l'eau stockée dans la zone de restriction des retenues (au-delà du niveau inférieur de fonctionnement) est une possibilité tentante afin d'atténuer la pénurie en eau.

Cependant, un abaissement du niveau de plan d'eau de la retenue peut avoir des impacts importants sur le fonctionnement des usines hydroélectriques et conduire à : un rendement beaucoup plus faible, une augmentation du coût d'entretien ou un arrêt total des usines.

En examinant la pratique de gestion des retenues en vigueur de l'EGAT, il apparaît que ce choix n'est jamais fait. Une telle stratégie nécessite donc, pour être justifiée, une évaluation rigoureuse aussi bien du point de vue technique qu'économique.

Pour optimiser la gestion de l'hydrosystème du Mae Klong, les tactiques d'exploitation de retenues pour la production hydroélectrique et la redéfinition des contraintes de gestion correspondent donc à deux catégories de mesures que nous allons maintenant étudier en détail.

XI-2 DE NOUVELLES STRATEGIES DE GESTION

Les stratégies, discutées plus haut, pour améliorer la performance de la gestion de l'eau nécessitent des vérifications soigneuses avant leur mise en œuvre, car tout changement peut avoir des impacts considérables sur l'hydrosystème. Dans ces conditions le modèle de simulation de fonctionnement de l'hydrosystème joue un rôle crucial.

Dans le contexte de l'hydrosystème du Mae Klong, deux catégories de mesures seront examinées et discutées : une réévaluation de la demande hydroélectrique et une redéfinition des contraintes réglementaires de gestion des retenues.

XI-2.1 Production hydroélectrique

Nous avons étudié dans le chapitre précédant la sensibilité du paramètre de demande en eau pour la production hydroélectrique et l'ampleur de son impact sur la performance de l'hydrosystème. Dans cette section, nous allons préciser encore la définition de la demande hydroélectrique.

Comme l'illustre la Figure XI-6, adopter une valeur constante pour la demande en électricité dans le modèle de fonctionnement ne correspond ni à la situation réelle, ni à la variation saisonnière de la demande en eau à l'aval du bassin.

D'abord, il est important de souligner que la production hydroélectrique du système du Mae Klong ne dépend généralement pas d'une demande en électricité pour ajuster la production à la demande de consommation électrique. Les lâchers turbinés des retenues du système du Mae Klong sont uniquement conditionnés, d'une part, à la ressource disponible qui varie d'une année à l'autre, et d'autre part, à la demande en eau à l'aval du bassin.

En examinant l'exploitation des barrages au cours de la période sèche la plus récente (1989-1993) (Figure XI-6), les lâchers des retenues de l'année 1991 (la plus humide) s'avèrent les plus importants. Ils sont plus élevés même que la demande en eau à l'horizon 2017. Cette ressource abondante est utilisée jusqu'à la saison sèche 1992.

L'adaptation des lâchers au calendrier cultural de la riziculture constitue l'usage dominant dans la zone d'irrigation du Mae Klong ; c'est ainsi que l'on observe un pic au milieu de la période sèche (mars/avril) pour submersion des casiers rizicoles, et des étiages au milieu de l'année (juin/juillet) et à la fin de l'année (novembre/décembre) correspondant à la période des moissons.

En outre, même si la demande en électricité ne variait pas au cours de la simulation (par exemple, 20% de la capacité installée pour le scénario de référence), la demande en eau pour la production hydroélectrique évoluerait selon le niveau de l'eau dans la retenue.

La demande, en volume, pour la production hydroélectrique augmente (Figure XI-6) d'environ 20 millions de m³/jour au début de simulation jusqu'à plus de 25 millions de m³/jour à la fin de simulation (où les niveaux des retenues sont relativement bas (voir Figure XI-10 et Figure XI-11 plus loin).

La variation saisonnière est déjà marquée : le volume d'eau demandé pour l'hydroélectricité est plus élevé pendant la phase de vidange des retenues en saison sèche que pendant la phase de remplissage de retenues en saison humide. C'est-à-dire que, même si le rapport de la demande en hydroélectricité, exprimée en énergie électrique, entre la saison sèche et la saison humide était égale à 1 ($E_{\text{sèche}} / E_{\text{humide}} = 1$), le même rapport exprimé en volume serait légèrement supérieur à 1 ($V_{\text{sèche}} / V_{\text{humide}} > 1$).

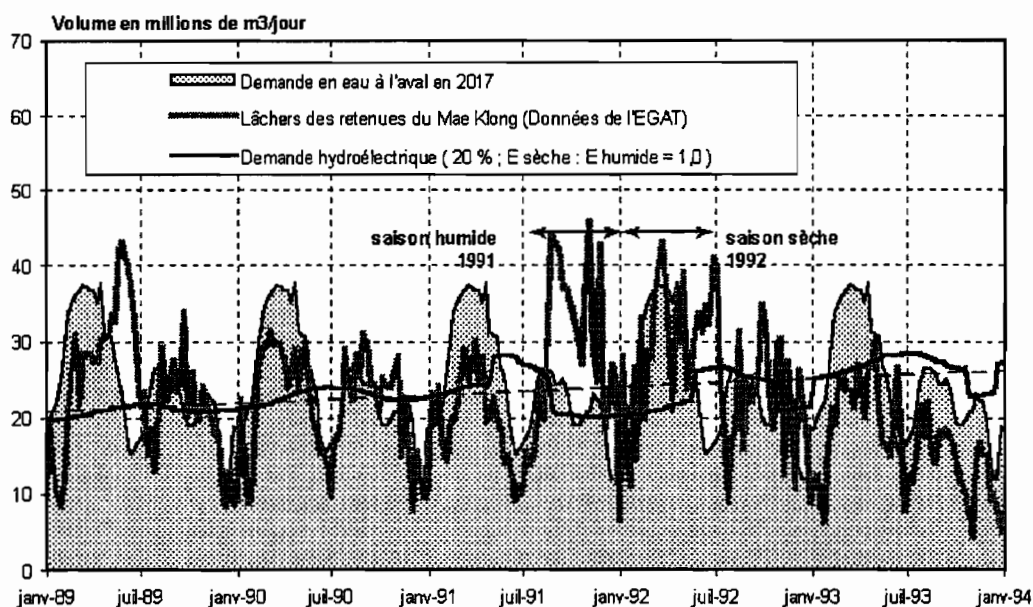


Figure XI-6 : Demande en eau à l'aval du bassin en 2017, demande hydroélectrique et lâchers des retenues du système du Mae Klong (données de l'EGAT) sur la même période.

L'introduction du rapport entre la demande de production hydroélectrique en saison sèche (exprimée en énergie électrique) et celle en saison humide ($E_{\text{sèche}} / E_{\text{humide}}$) a pour but permettre d'étudier la variation saisonnière de cette demande. Pour que le modèle ne soit pas trop complexe, seulement la variation entre la saison sèche et humide a été ajoutée.

La Figure XI-7 montre les résultats obtenus en volume d'eau pour plusieurs valeurs de ce rapport. Lorsque le rapport est égal à 1, les demandes en électricité pendant les deux saisons sont identiques, alors que lorsqu'il est égal à 2, la production électrique en saison sèche deux fois plus élevée qu'en saison humide (2 sur 1).

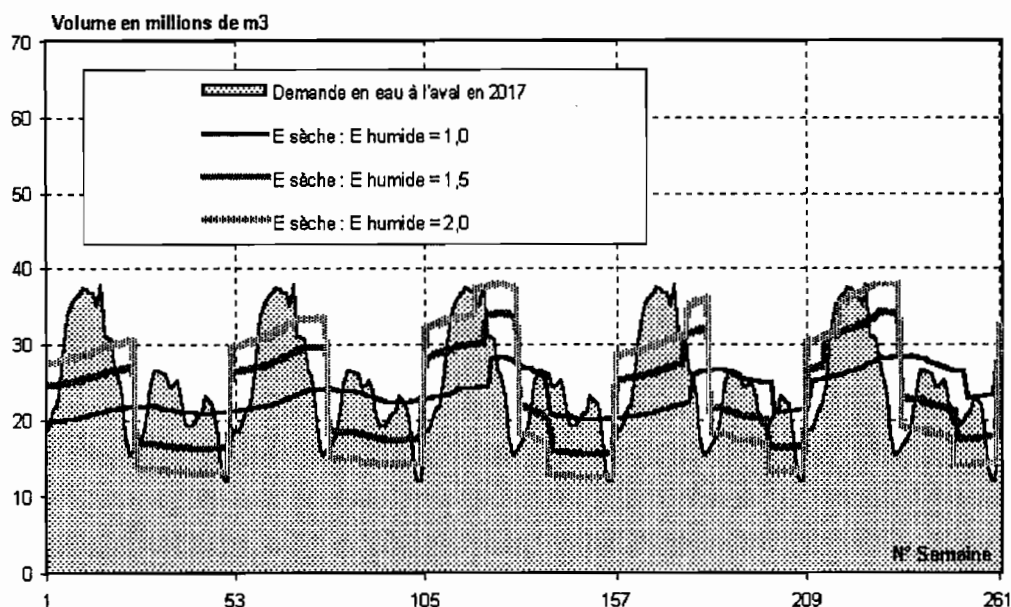


Figure XI-7 : Simulation sur 5 années (1989-1993) de la demande hydroélectrique selon les rapports de production $E_{\text{sèche}} / E_{\text{humide}}$ différents en comparaison avec la demande en eau à l'aval du bassin du Mae Klong en 2017

Une étude de sensibilité de ce paramètre représenté par le rapport de la demande de production hydroélectrique a été effectuée en faisant varier sa valeur de 0 à 10.

Les résultats font apparaître un rôle non négligeable pour ce paramètre. Les rapports proche de l'unité produisent les meilleures performances économiques pour l'hydrosystème du Mae Klong (Figure XI-8). Des simulations plus fines sur 5 années donnent les mêmes résultats uniquement avec les années sèches (Figure XI-9).

On peut l'expliquer de la façon suivante :

- Une demande hydroélectrique plus importante pendant la saison sèche se traduit par une valeur du rapport supérieure à 1. L'augmentation de la production hydroélectrique pendant cette période n'améliore pas la performance du système ; elle ne l'aggrave pas forcément, non plus. Les lâchers d'eau des retenues en saison sèche sont décidés par une demande en eau à l'aval plus élevée.
- Une production hydroélectrique plus élevée en saison humide est figurée par une valeur du rapport inférieure à 1. Une dégradation fatale est perceptible dès lors que la valeur est inférieure à 1, confirmant qu'un usage excessif d'eau pendant la période humide de l'année dégrade rapidement la disponibilité des ressources et place le système dans une situation de gestion difficile pendant la saison sèche suivante.

La Figure XI-10 et la Figure XI-11 illustrent enfin la variation des niveaux de l'eau dans les retenues pour diverses valeurs des rapports de la demande de production hydroélectrique. Les courbes de remplissage des retenues de Srinagarind et de Khao Laem sont tracées à partir des résultats de simulation des années sèches entre 1989 et 1993.

Une production hydroélectrique dominante pendant la saison humide ($E_{\text{sèche}} / E_{\text{humide}} = 0,5$) démontre une performance nettement inférieure du système. Les meilleures performances de gestion des retenues de Srinagarind et de Khao Laem seraient obtenues, si on mettait l'accent sur la production hydroélectrique en saison sèche. Le rapport égal à 1 présente le meilleur résultat pour Khao Laem, alors qu'à Srinagarind, ce sont les rapports légèrement supérieurs à 1 qui produisent les meilleures performances.

La définition appropriée de la demande en eau pour la production hydroélectrique semble une stratégie prometteuse qui offre une possibilité d'optimiser la performance de la gestion de l'hydrosystème du Mae Klong, particulièrement en période de sécheresse prolongée. Néanmoins il est indispensable de prendre en compte l'hydroélectricité lors de la programmation de l'allocation en eau.

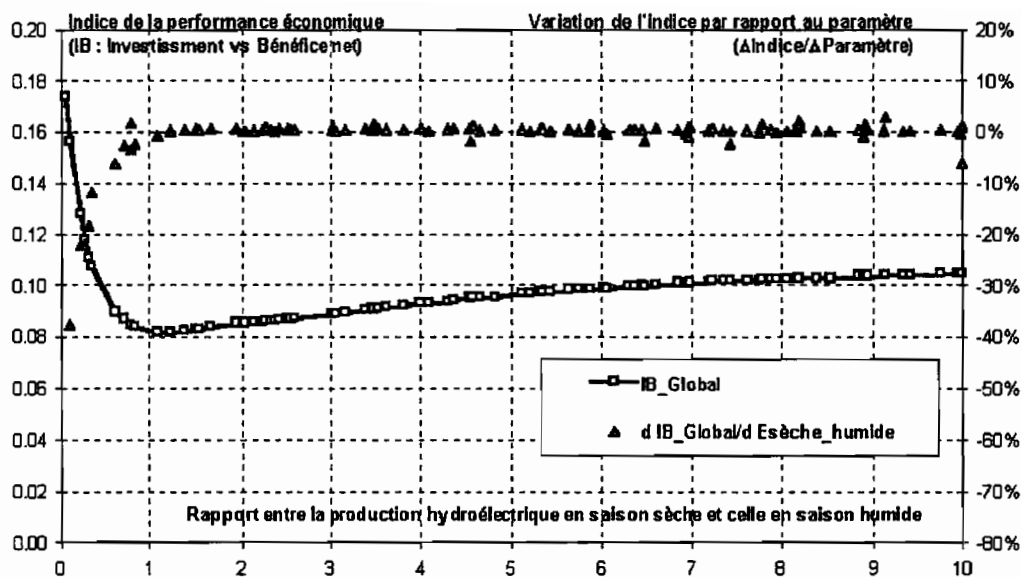


Figure XI-8 : Variabilité de l'indice IB par rapport au rapport entre la demande de production hydroélectrique entre saison sèche et saison humide

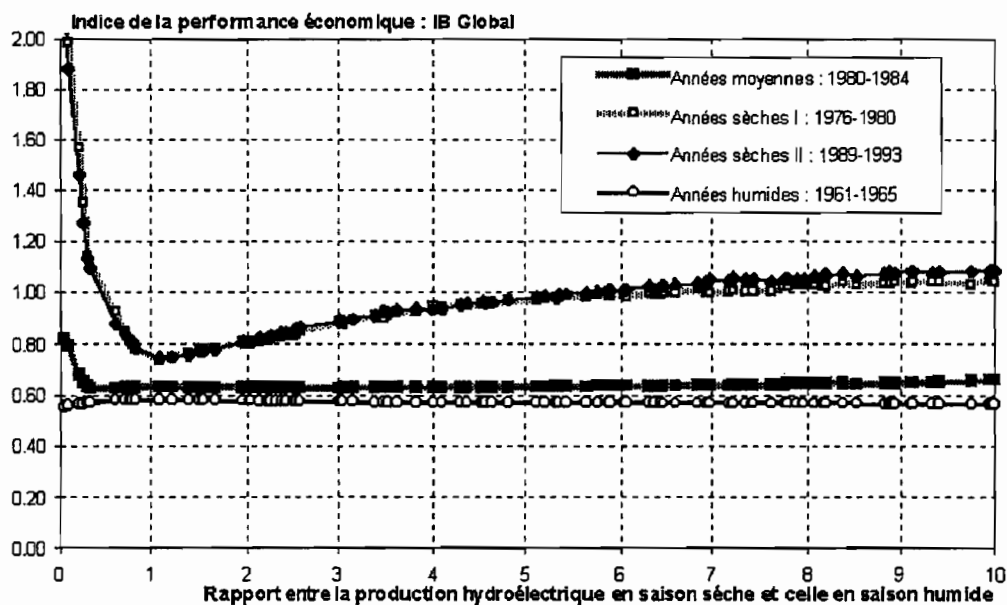


Figure XI-9 : IB Global vs Rapport entre la production hydroélectrique en saison sèche et celle en saison humide sous 4 séries différentes d'apports

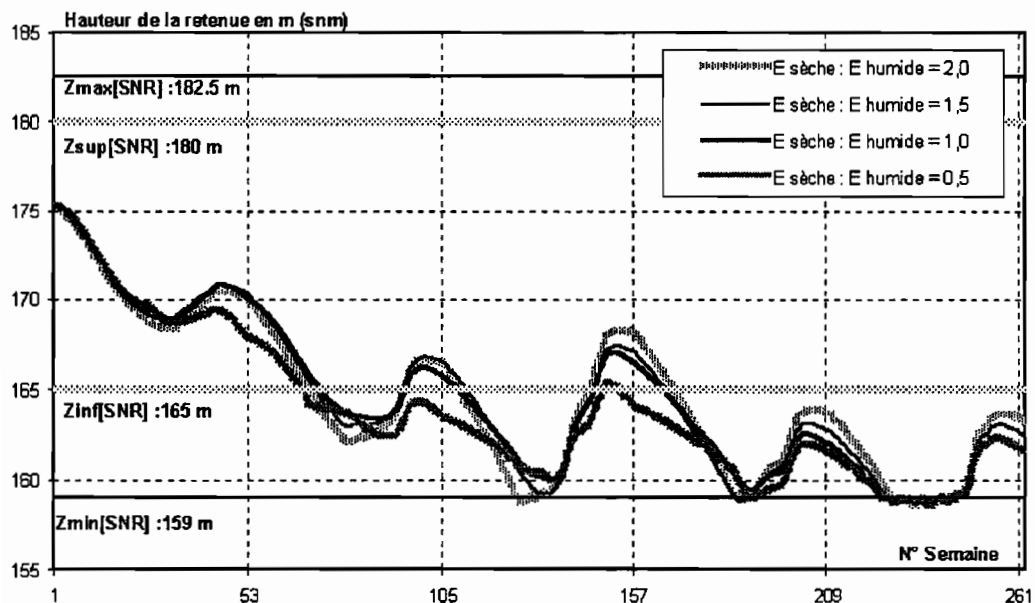


Figure XI-10 : Remplissage de retenue de Srinagarind selon les rapports de production hydroélectrique $E_{\text{sèche}} : E_{\text{humide}}$ différents, simulation sur la période sèche II (1989-1993)

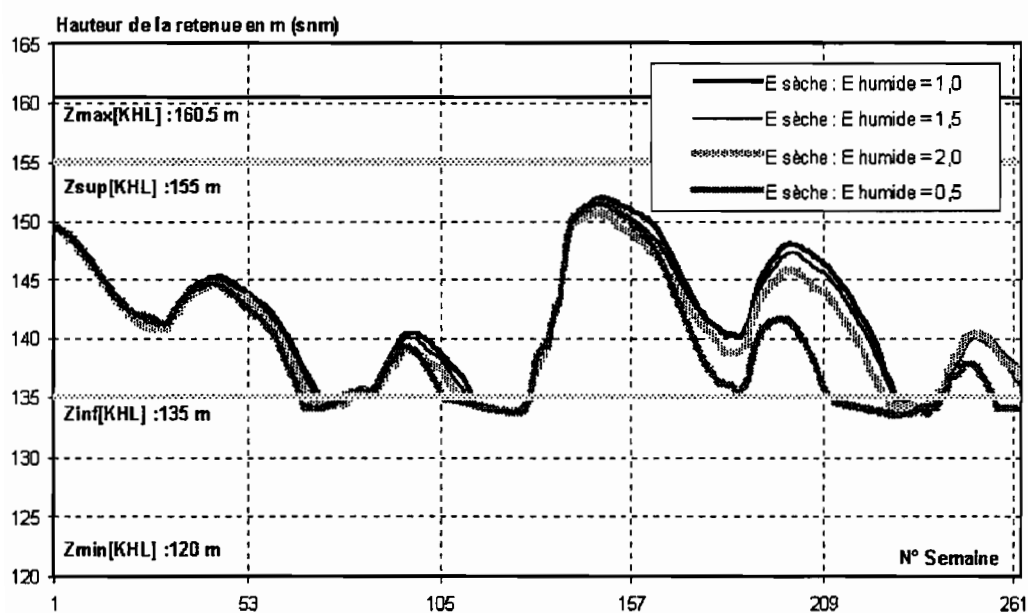


Figure XI-11 : Remplissage de retenue de Khao Laem selon les rapports de production hydroélectrique $E_{\text{sèche}} : E_{\text{humide}}$ différents, simulation sur la période sèche II (1989-1993)

XI-2.2 Contraintes de gestion des retenues

Comme nous l'avons exposé plus haut dans le chapitre III (*Aménagements hydrauliques et hydroagricoles*), les contraintes de gestion imposées par divers niveaux de la retenue sont définies dans le but d'assurer un fonctionnement correct des ouvrages de barrage-réservoir.

Plusieurs techniques, et plus particulièrement celles de la recherche opérationnelle appliquée à la gestion de retenue, ont été explorées pour mieux exploiter les réservoirs du Mae Klong. Plusieurs chercheurs ont tenté de mettre au point de nouvelles versions plus efficaces des courbes enveloppes intra-annuelles (*Upper ou Lower Rules Curve*, URC ou LRC) (EGAT, 1992 ; Rajasekaram, 1997).

De même l'importance de la précision dans la prévision des apports entrants a été mise en évidence par Takeuchi & Sivaarthitkul (1995) et Sivaarthitkul (1996) ; le bassin du Mae Klong constitue un cas d'étude particulièrement intéressant.

Nous n'avons toutefois pas l'intention de répéter ces études. Après plusieurs tests de simulation pour différentes versions de ces courbes enveloppes, y compris celles fournies par l'opérateur, ainsi que celles élaborées par un groupe de recherche de l'EGAT (1992) et par Rajasekaram (1997), nous n'avons pas réussi à mettre en évidence une amélioration de la performance de gestion grâce à ces courbes. La seule véritable utilité de ces courbes semble être de servir de repères d'état de disponibilité de l'eau dans des retenues pour leur gestion opérationnelle.

Par contre, certaines contraintes de gestion des retenues soulèvent encore des questions. Une cote inférieure de retenue de Srinagarind de 159 m (snm) est adoptée par l'exploitant EGAT, alors que les autres études ont toutes adopté un niveau de 168 m (snm) à partir de l'installation des turbines réversibles. Or, selon la valeur adoptée pour cette cote inférieure, les résultats de la simulation donnent des résultats très nettement divergents.

De fait, dans cette section nous examinerons le rôle du niveau inférieur de fonctionnement des retenues. C'est ainsi que nous chercherons à évaluer un niveau objectif de fonctionnement proposé pour l'hydrosystème du Mae Klong.

a) *Niveau inférieur de fonctionnement des retenues*

Les niveaux inférieurs de fonctionnement seront examinés pour les retenues de Srinagarind et de Khao Laem. Les analyses de sensibilité ont porté sur des niveaux inférieurs de fonctionnement jusqu'au niveau de 100 m.

Les résultats de simulations sur 40 années des niveaux inférieurs de Khao Laem compris entre 100 m et 135 m sont donnés par la Figure XI-12. De même, la Figure XI-13 présente les résultats des simulations sur les séries-test de 5 années représentant différentes conditions d'apports aux retenues.

Pour la retenue de Srinagarind, les niveaux inférieurs ont été testés entre 100 m et 168 m. La Figure XI-14 montre les résultats pour les simulations sur 40 années ; la Figure XI-15, pour les simulations sur 5 années.

En abaissant le niveau inférieur de fonctionnement, la diminution du bénéfice net du système est discernable sous la forme d'une augmentation de l'indice IB pour les deux retenues (voir Figure XI-12 et Figure XI-14). Comme la Figure XI-13 et la Figure XI-15 l'illustrent, ce n'est que pendant les périodes sèches que l'hydrosystème du Mae Klong présentent une défaillance.

Dans la pratique les plans d'eau des retenues n'atteignent les niveaux inférieurs de fonctionnement qu'à l'occasion des années sèches et la gestion des retenues pendant les années moyennes et humides ne se rapporte pas à cette stratégie.

Un exemple de la dégradation de la performance de la production hydroélectrique au barrage Srinagarind est illustré sur la Figure XI-16.

L'indice de performance technique « *fiabilité en quantité pour la demande de production hydroélectrique* » exprime la satisfaction de la demande en eau pour la production hydroélectrique au barrage Srinagarind. Pour ne pas surcharger la présentation, les résultats pour les autres indices dont les variations sont moins flagrantes sont donnés en annexe.

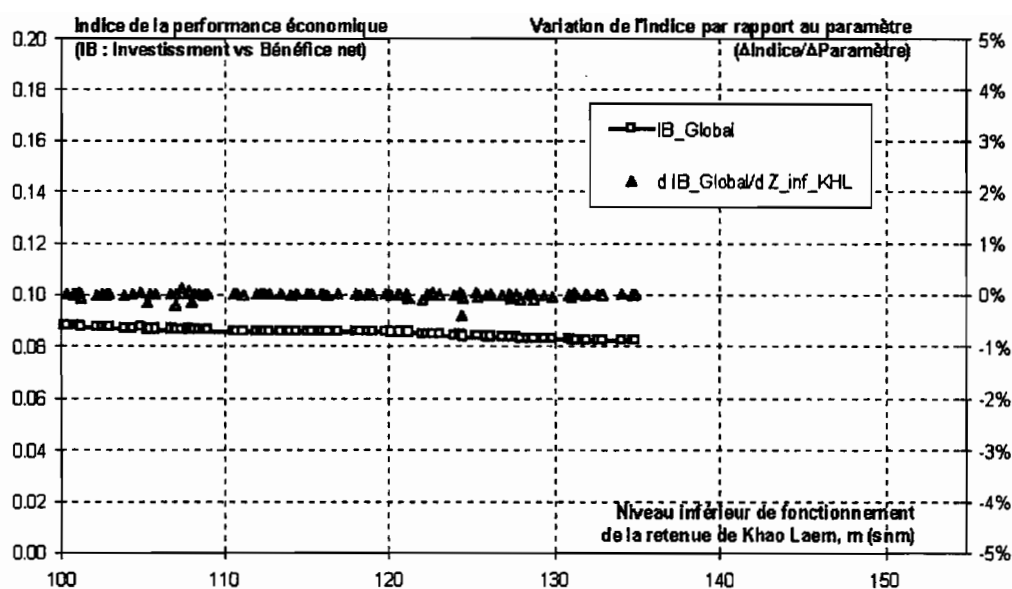


Figure XI-12 : Variabilité de l'indice IB par rapport au niveau inférieur de fonctionnement de la retenue de Khao Laem

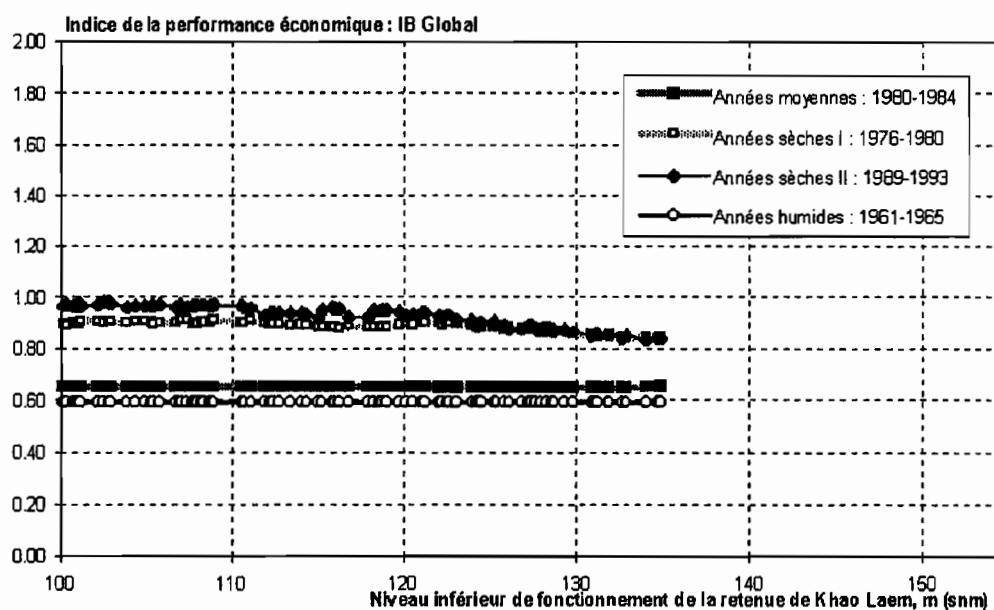


Figure XI-13 : IB Global vs Niveau inférieur de fonctionnement de la retenue de Khao Laem sous 4 conditions d'apports

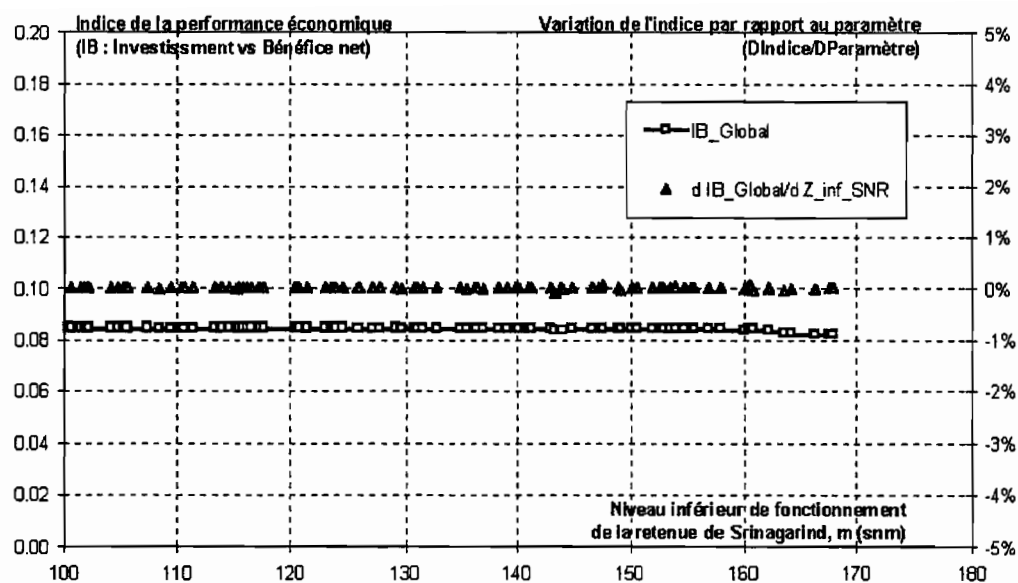


Figure XI-14 Variabilité de l'indice IB par rapport au niveau inférieur de fonctionnement de la retenue de Srinagarind

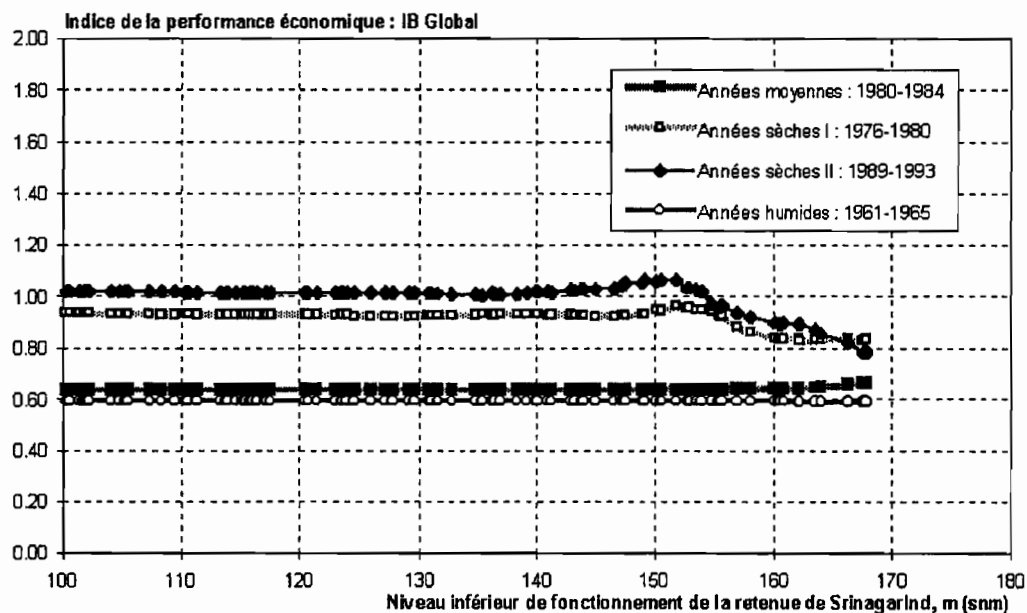


Figure XI-15 : IB Global vs Niveau inférieur de fonctionnement de la retenue de Srinagarind sous 4 conditions d'apports

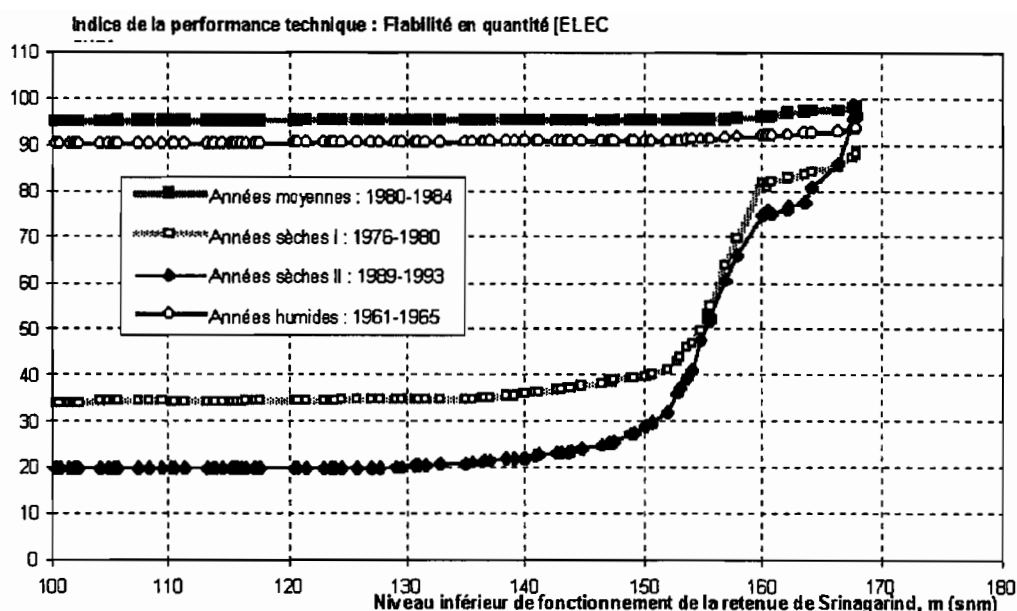


Figure XI-16 : Indice « Fiabilité en quantité » pour la demande de la production hydroélectrique au barrage Srinagarind vs Niveau inférieur de fonctionnement de la retenue de Srinagarind sous 4 conditions d'apports

L'interruption du fonctionnement des usines hydroélectrique se traduit par une diminution de la satisfaction de la demande de production hydroélectrique. La dégradation importante de la performance est observable (Figure XI-16 : cas des séries tests d'années sèches I et II) :

- La fiabilité de fonctionnement atteint plus de 75%, quand les niveaux inférieurs de fonctionnement sont supérieurs à 160 m (snm) ;
- La performance se dégrade rapidement dès que certaines turbines ne fonctionnent plus en dessous du niveau de 159 m (snm) ;
- Enfin, la satisfaction de la demande hydroélectrique ne dépasse pas 40%, si les niveaux inférieurs de fonctionnement se trouvent au-dessous du niveau de 150 m (snm).

Dans la pratique, il n'y a pas de seuil nominal pour décider d'arrêter les turbines ; une indication est seulement fournie par les constructeurs de turbines. De plus les deux groupes distincts de turbines de Srinagarind ont des exigences différentes pour leur fonctionnement.

Dans le modèle de simulation de l'hydrosystème du Mae Klong, le niveau de 162 m (snm) est adopté comme niveau minimum de fonctionnement des turbines réversibles des unités 4 et 5 de Srinagarind, et le niveau de 159 m (snm), pour les

turbines des unités 1, 2 et 3. C'est-à-dire que le pompage est arrêté au-dessous du 162 m (snm) et les groupes hydroélectriques de Srinagarind s'arrêtent totalement en dessous du niveau de 159 m (snm).

En résumé on doit retenir que bien que la baisse du niveau inférieur de fonctionnement de retenue permette d'utiliser de l'eau supplémentaire pendant les périodes de pénurie, l'amplitude du dommage dû à la rupture de la production électrique ne peut pas être négligée.

Lorsque le niveau de retenue se trouve au-dessous du niveau minimum de fonctionnement des turbines, la mise en marche des usines hydroélectriques n'est plus rentable en raison de la baisse de rendement et de l'augmentation des coûts d'entretien.

b) Niveau objectif de fonctionnement des retenues

Des niveaux objectifs de fonctionnement des retenues sont introduits dans le modèle de l'hydrosystème du Mae Klong afin d'analyser plus profondément les règles/contraintes de gestion de l'eau dans les retenues.

Le « niveau objectif » peut être interprété comme le niveau moyen du plan d'eau à long terme. Il est moins rigoureux que le niveau inférieur de fonctionnement, car l'abaissement du niveau de plan d'eau au-dessous du niveau objectif est admissible sans restriction d'usage.

L'étude des impacts sur la performance du système s'est effectuée à l'aide d'analyse de sensibilité. Le résultat des simulations pour la retenue de Khao Lam est présenté sur la Figure XI-17 ; celui de Srinagarind, sur la Figure XI-18.

L'étude de sensibilité du niveau objectif de Khao Laem a été limitée entre 120 et 155 m (snm). Un niveau inférieur de fonctionnement de 120 m (snm) a été choisi parce qu'il correspond au niveau de prise de la vanne de fond du barrage de Khao Laem, tandis que celui de 135 m (snm) est signalé comme le niveau minimum de fonctionnement des turbines.

Sur la Figure XI-17, les zones de meilleure performance sont observées pour un niveau objectif supérieur au niveau inférieur de fonctionnement (135 m). Si le niveau objectif est trop proche du niveau supérieur de fonctionnement (155 m), la performance du système recommence à se dégrader.

Pour la retenue de Srinagarind, on a considéré un niveau objectif de fonctionnement compris entre 145 et 180 m (snm). Le niveau inférieur de fonctionnement est toutefois fixé à 159 m, de même pour le niveau minimum de fonctionnement des turbines.

Dans la Figure XI-18, les résultats de simulations montrent que la performance du système s'améliore lors que le niveau objectif de la retenue de Srinagarind tend vers le niveau inférieur de fonctionnement. Mais l'amélioration de performance du système reste stable dès que le niveau objectif se trouve au-dessous du niveau inférieur.

Cela confirme que l'exploitation de la retenue de Srinagarind en dessous du niveau inférieur de fonctionnement en vigueur n'a d'intérêt que si la production hydroélectrique n'est pas interrompue.

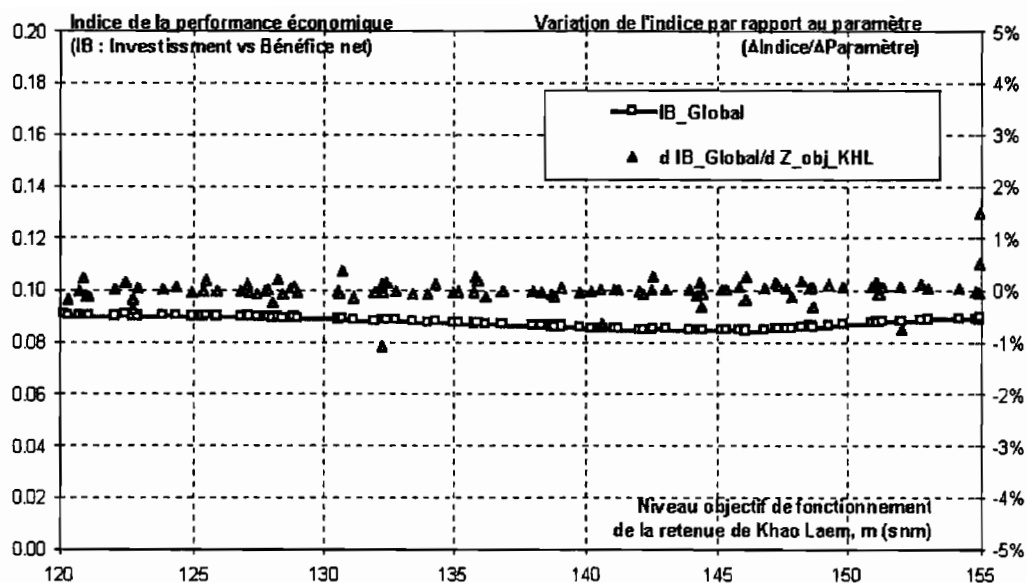


Figure XI-17 : Variabilité de l'indice IB par rapport au niveau objectif de fonctionnement de la retenue de Khao Laem

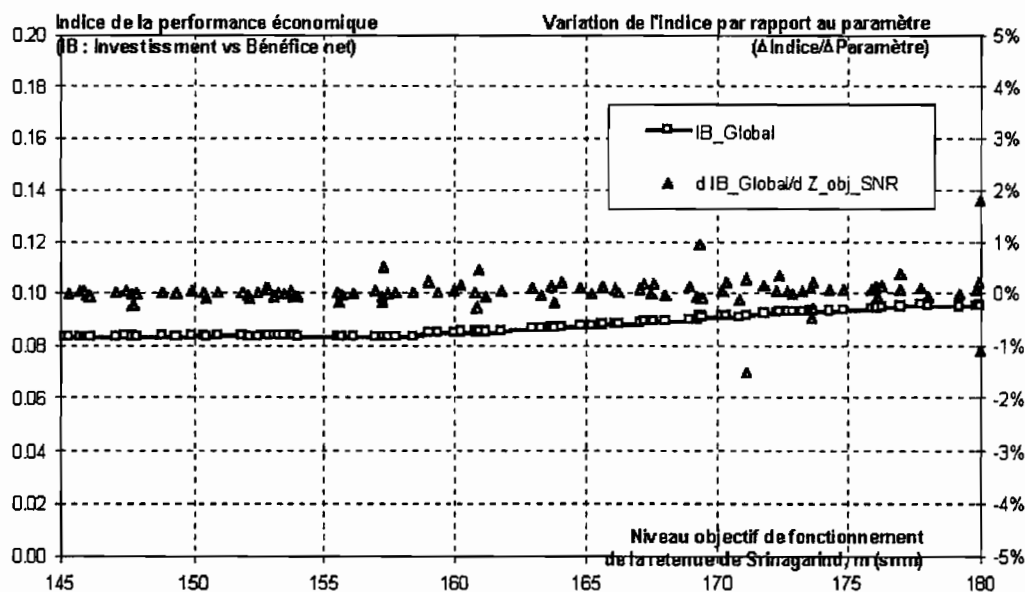


Figure XI-18 : Variabilité de l'indice IB par rapport au niveau objectif de fonctionnement de la retenue de Srinagarind

Analyse croisée des niveaux objectifs de fonctionnement. Comme la décision des lâchers des deux grandes retenues du système dépendent l'une de l'autre (effet de rétroaction) ; les contraintes de gestion appliquées à une retenue imposent aussi des effets sur l'autre.

L'étude de sensibilité dans un schéma à une dimension (en changeant un seul paramètre à chaque fois) ne permet d'analyser que des résultats partiels. De nouvelles simulations en faisant varier plusieurs paramètres à la fois apportent des informations supplémentaires. Toutefois le nombre des simulations et les temps de calcul s'accroissent également en fonction du nombre de paramètres considérés dans des proportions géométriques.

La Figure XI-19 présente les résultats de 225 simulations en changeant à la fois les niveaux objectifs de fonctionnement de Khao Laem et de Srinagarind. Les résultats présentés dans la Figure XI-17 et la Figure XI-18 peuvent être considérés comme des coupes de la Figure XI-19, au niveau objectif de Khao Laem à 135 m pour la première et au niveau objectif de Srinagarind à 165 m pour la seconde.

En comparant avec les résultats des analyses à une dimension, les zones de meilleures performances se déplacent avec les deux niveaux objectifs.

Pour le barrage Khao Laem, le niveau objectif de fonctionnement présente les meilleures performances de 135 m jusqu'à 140 m ; le niveau de 135 m correspond d'ailleurs au niveau minimum de fonctionnement des turbines utilisé dans le modèle.

En ce qui concerne le barrage Srinagarind, c'est les niveaux entre 159 m et 166 m qui donnent les meilleurs résultats. Le premier a été fixé comme niveau minimum de fonctionnement pour les turbines des unités 1, 2 et 3 de Srinagarind. Rappelons qu'un niveau minimum de 162 m est défini pour les turbines réversibles des unités 4 et 5.

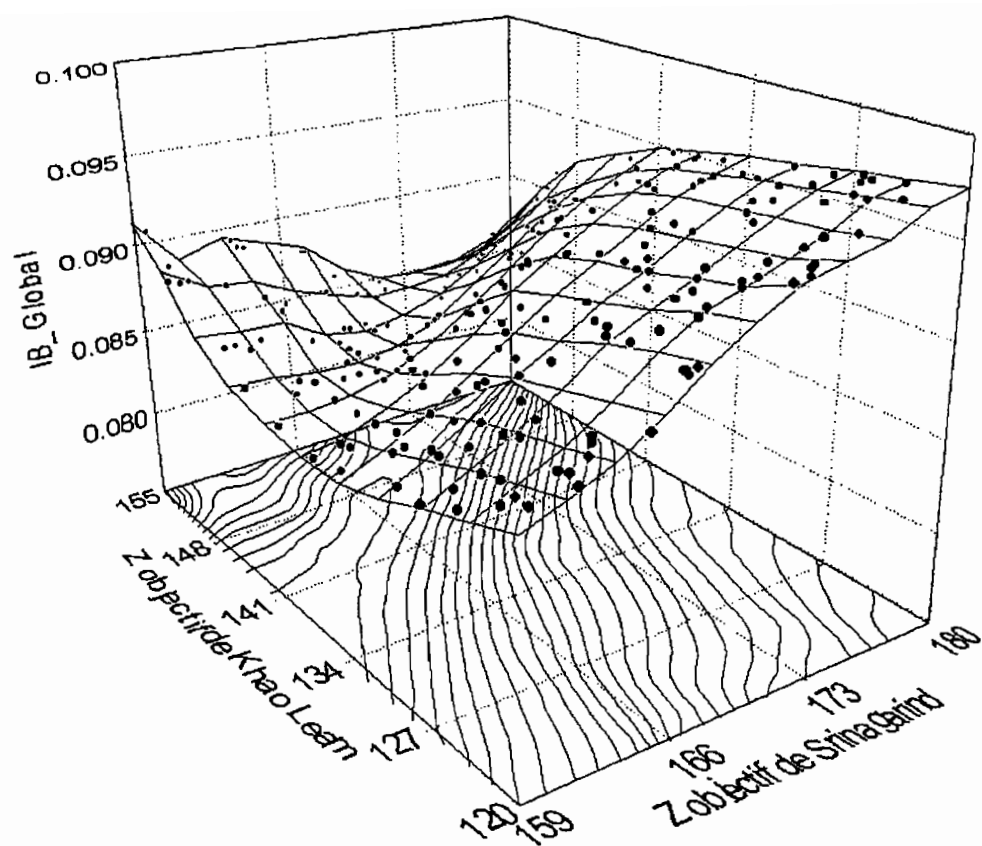


Figure XI-19 : Variation de l'indice IB-Global en comparaison avec les niveaux objectifs de Khao Laem et de Srinagarind, simulation sur 40 années

XI-2.3 Choix des stratégies sous diverses hypothèses

De nombreuses simulations dans les précédentes sections décrivent diverses options de stratégies de gestion optimale pour l'hydrosystème du Mae Klong.

L'importance des disponibilités de la ressource est largement relevée ; c'est elle qui conditionne les stratégies de gestion, en concernant à la fois la programmation de l'exploitation des retenues et la programmation de la production hydroélectrique. Pour trois grandes options élémentaires de disponibilité de la ressource en eau, les recommandations sont les suivantes :

Années moyennes : Une demande de production hydroélectrique de plus de 20% de la capacité installée du système du Mae Klong est admissible (Figure XI-20 (a)). Il semble qu'une demande de 25% constitue la limite supérieure de production sans dégradation de la performance du système (Figure XI-20 (b)).

Les performances du système sont peu différentes selon qu'on adopte divers niveaux objectifs pour les retenues si la production hydroélectrique ne dépasse pas le seuil critique. Toutefois les zones les plus favorables donnant une valeur de l'indice IB légèrement supérieure, se trouvent entre les niveaux 159 m et 165 m à Srinagarind.

Les niveaux objectifs favorables à Khao Laem se déplacent vers la zone la plus basse (135 m) (Figure XI-20 (a) à (b)), lorsque l'on augmente la production hydroélectrique.

Années humides : La production hydroélectrique de 20% définie dans le scénario de référence est trop faible pour les années humides (Figure XI-21 (a)). Une demande de production allant jusqu'à 30% améliore considérablement la performance du système (Figure XI-21 (b)). Mais une augmentation supplémentaire de production jusqu'à 35% montre une légère dégradation de la performance, comme le montre une augmentation de l'indice IB sur la Figure XI-21 (c).

D'ailleurs, on obtient un gain supplémentaire en faisant un choix de production hydroélectrique qui préserve la disponibilité de la ressource en eau. Lors de l'augmentation de la production hydroélectrique à 30%, les valeurs de l'indice restent inférieures à 0,6. Par comparaison avec d'autres conditions de ressource, c'est la situation qui présente la meilleure performance du système.

En ce qui concerne les niveaux objectifs des retenues, c'est la même situation que pour les années moyennes. Les zones favorables de niveaux objectifs des retenues se déplacent vers le niveau plus bas au moment de l'accroissement de la production hydroélectrique. C'est la retenue de Srinagarind qui la cause de cette propriété (Figure XI-21 (a) à (b)).

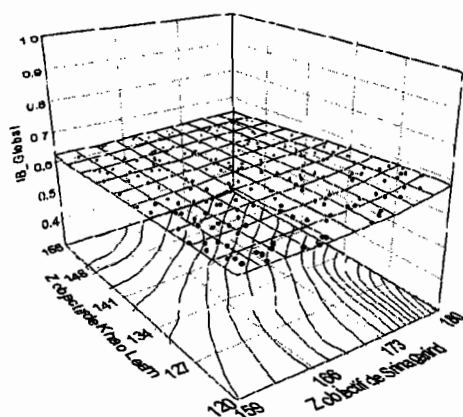
En revanche, les apports importants pendant des années humides conduisent à ce que les zones basses sont plus favorables pour la retenue de Khao Laem. La hausse du niveau de plan d'eau entraîne des pertes d'eau par des débordements, contrairement à Srinagarind qui possède une marge de volume beaucoup plus élevée. Avec une croissance de la production hydroélectrique jusqu'à 35% de la capacité installée, il est plus intéressant d'avoir un niveau d'eau de la retenue de Khao Laem plus élevée pour satisfaire la demande (Figure XI-21 (c)).

Années sèches. Les résultats de simulation avec deux séries sèches d'apports aux retenues sont cohérents sur la Figure XI-22 et la Figure XI-23. Au contraire des années moyennes et humides, une production hydroélectrique de 20% de la capacité installée semble déjà excessive.

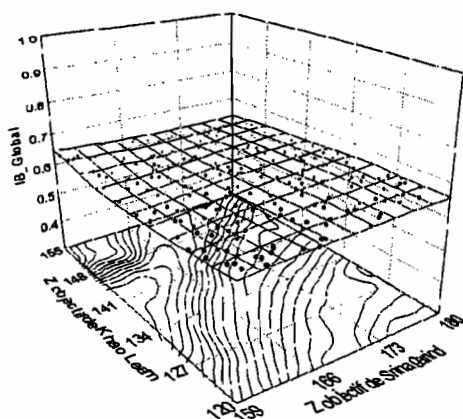
Une diminution de la demande hydroélectrique de 20% à 15% donne une meilleure performance. Tandis que l'abaissement de la demande jusqu'à 10% n'apporte plus d'amélioration par rapport à la demande de 15%. La demande de production hydroélectrique devient mineure ; la décision des lâchers est conduite par les usages d'eau à l'aval du bassin.

Ainsi, un choix optimal des niveaux objectifs des retenues est susceptible d'améliorer la performance du système. Une demande de production hydroélectrique plus élevée déplace les zones favorables des niveaux objectifs vers des niveaux des retenues plus hauts (Figure XI-22 (a) et Figure XI-23 (a)).

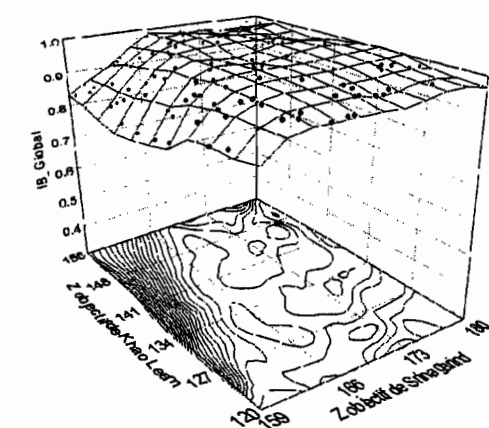
De plus, on trouve des limites opérationnellement acceptables avec les résultats de simulation sur 40 ans (Figure XI-19), mais en considérant une demande hydroélectrique de 15% de la capacité installée ; cela n'est plus vrai avec 20%. Cela confirme et renforce la recommandation qu'avec une production hydroélectrique convenable, on peut adopter des niveaux objectifs proche des niveaux minimums de fonctionnement des turbines en conservant une zone de sécurité pendant plusieurs années sèches consécutives.



- a) Production hydroélectrique de 20% de la capacité installée en années moyennes d'apports



- b) Production hydroélectrique de 25% de la capacité installée en années moyennes d'apports



- c) Production hydroélectrique de 28% de la capacité installée en années moyennes d'apports

Figure XI-20 : Zones optimales des niveaux objectifs des retenues sous des options différentes de la production hydroélectrique pendant des années moyennes

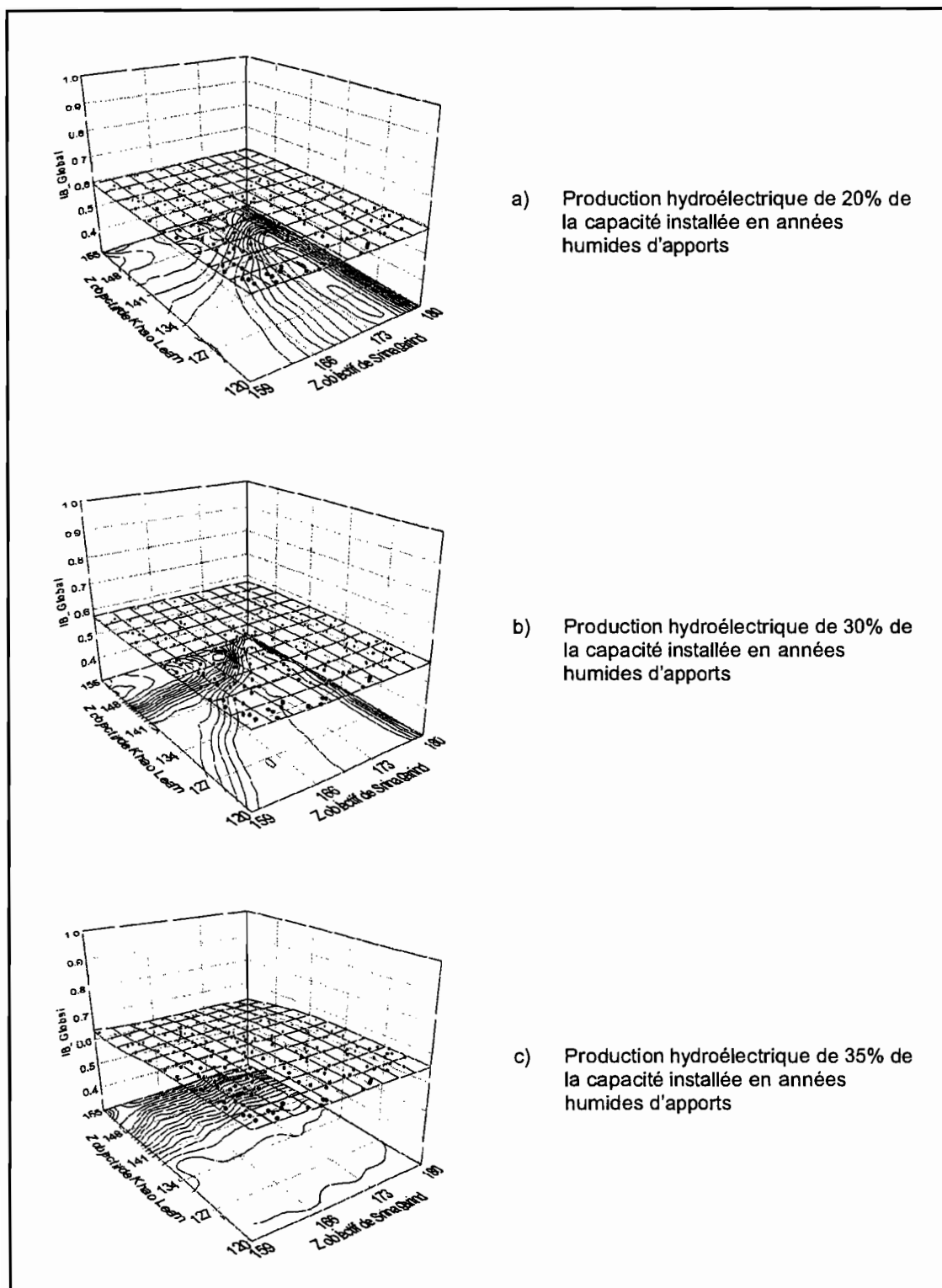


Figure XI-21 : Zones optimales des niveaux objectifs des retenues sous des options différentes de la production hydroélectrique pendant des années humides

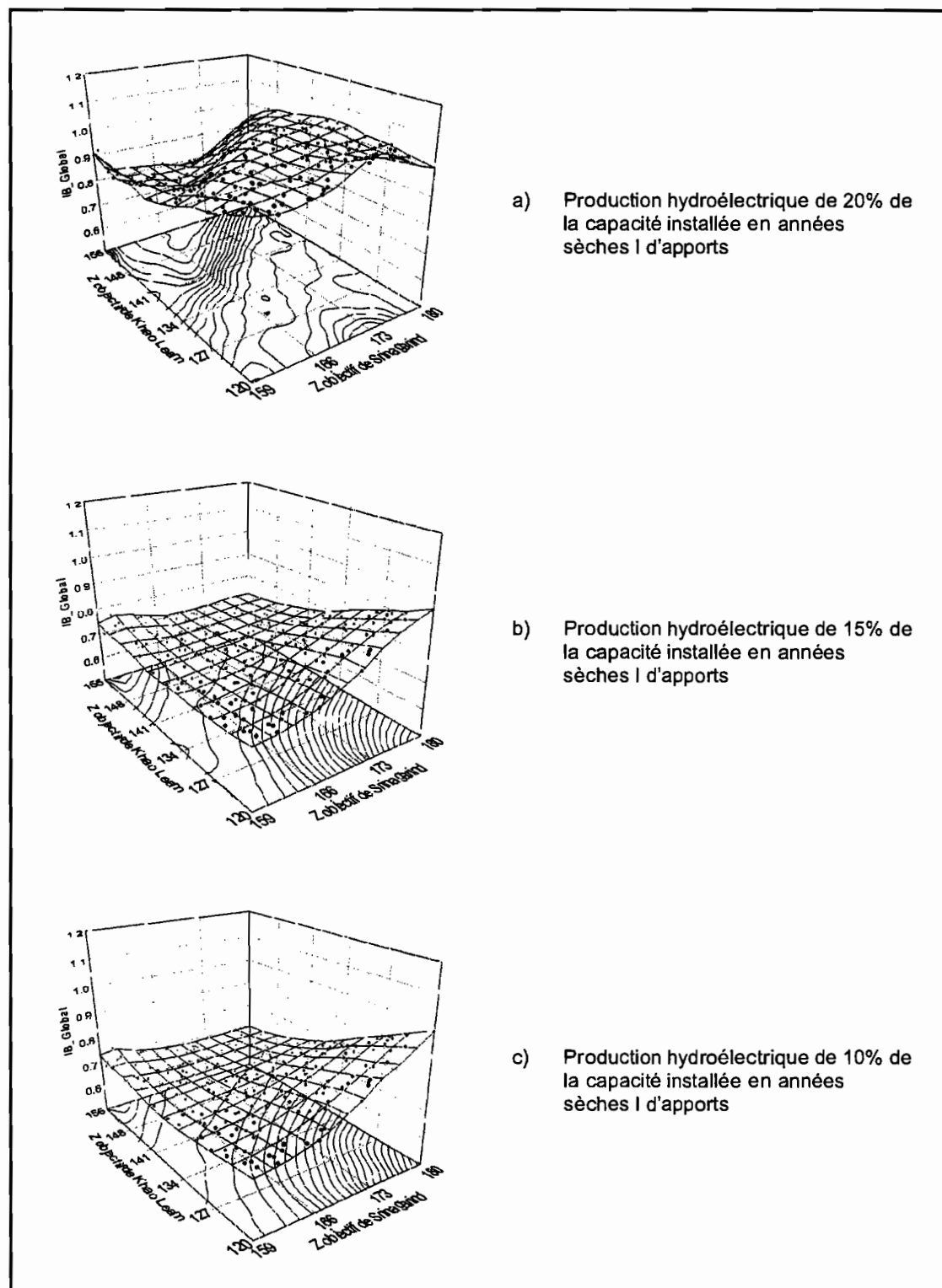
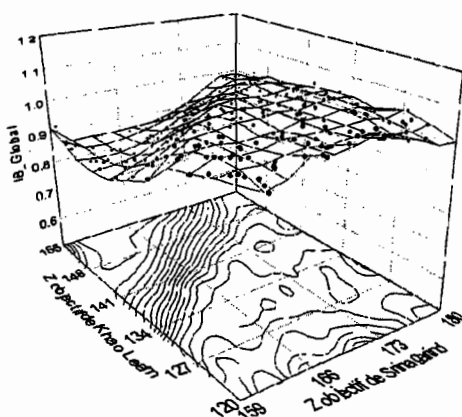
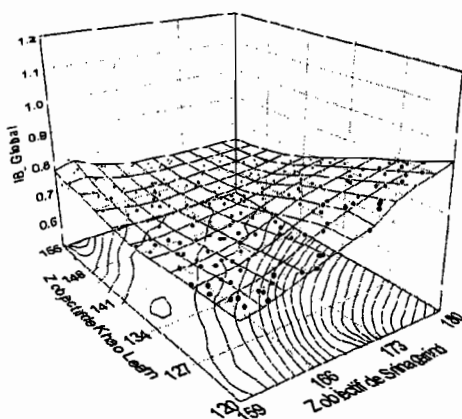


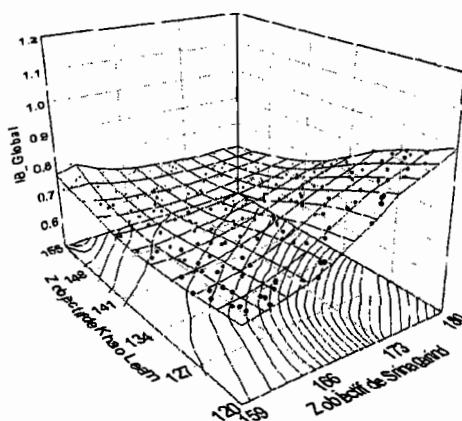
Figure XI-22 : Zones optimales des niveaux objectifs des retenues sous des options différentes de la production hydroélectrique pendant des années sèches I



a) Production hydroélectrique de 20% de la capacité installée en années sèches II d'apports



b) Production hydroélectrique de 15% de la capacité installée en années sèches II d'apports



c) Production hydroélectrique de 10% de la capacité installée en années sèches II d'apports

Figure XI-23 : Zones optimales des niveaux objectifs des retenues sous des options différentes de la production hydroélectrique pendant des années sèches II

XI-3 CONCLUSIONS

Face aux situations des usages de l'eau à l'horizon 2017, la pratique actuelle de gestion a été mise en cause.

Selon le bilan moyen annuel, les ressources en eau sont suffisantes pour satisfaire toutes les demandes. Dans la pratique actuelle, il arrive qu'une restriction d'usage de l'eau en période sèche de l'année découle d'un usage imprudent en vue de maximiser la production hydroélectrique pendant la période humide où l'EGAT possède la liberté d'utiliser de l'eau excédentaire.

Deux catégories de mesures de gestion de l'eau dans le bassin du Mae Klong ont été examinées :

- L'évaluation de la demande pour la production hydroélectrique ;
- La définition des contraintes réglementaires de gestion des retenues.

L'analyse de sensibilité met en évidence l'amplitude considérable de l'impact de la demande hydroélectrique sur la performance de l'hydrosystème. La variation saisonnière de cette demande a été étudiée en introduisant le paramètre du rapport entre la demande de production hydroélectrique en saison sèche et celle en saison humide ($E_{\text{sèche}} / E_{\text{humide}}$).

La définition appropriée de la demande hydroélectrique semble une stratégie à engager. Les choix de la production hydroélectrique optimale dépendent bien de l'hydraulicité.

Le rôle du niveau inférieur de fonctionnement des retenues a également été observé. Les plans d'eau des retenues n'atteignent les niveaux inférieurs de fonctionnement qu'à l'occasion d'années sèches consécutives.

Bien que la baisse du niveau inférieur de fonctionnement des retenues permette d'utiliser de l'eau supplémentaire pendant les périodes de pénurie, l'amplitude du dommage dû à la rupture de la production électrique ne peut pas être négligée. L'exploitation des retenues en dessous des niveaux inférieurs de fonctionnement en vigueur n'est pas une stratégie prometteuse pendant des périodes sèches prolongées.

Finalement, nous notons que les meilleures performances de gestion se trouvent souvent près des niveaux minimums de fonctionnement des turbines. On ne peut cependant considérer ces résultats comme une conclusion absolue du fait de l'impact de nombreux autres paramètres du modèle.

CONCLUSIONS DE LA TROISIEME PARTIE

Dans cette partie, nous avons mis en application le modèle de l'hydrosystème du Mae Klong.

- La reconstitution des écoulements naturels aux ouvrages hydrauliques à partir des précipitations, par le modèle GR3 S, donne des résultats satisfaisants.
- Les impacts des paramètres du modèle sur les résultats de simulation ont été mis en évidence par l'analyse de sensibilité. Ces paramètres concernent la ressource en eau, les usages et les contraintes réglementaires de gestion des retenues. Grâce aux études de sensibilité, on s'aperçoit que la variabilité des ressources en eau, d'une part, et la production hydroélectrique, d'autre part, présentent chacune un rôle clé sur la performance du système.
- De nouvelles stratégies de gestion sont recommandées. Une programmation cohérente de la production hydroélectrique tenant compte des ressources disponibles apporterait une amélioration considérable de la performance du système. Il demeure toutefois la question de la prévision des ressources lors de la phase de programmation d'exploitation des retenues.

CONCLUSIONS GENERALES

L'analyse et la représentation du système de gestion de l'eau de l'hydrosystème du Mae Klong démontre l'efficacité d'une méthode qui prend en considération de manière systémique les composantes organisées de l'hydrosystème dans le but de transformer une ressource en eau naturelle en eau maîtrisée pour la société. La modélisation et la simulation de la dynamique de l'ensemble des flux dans le bassin du Mae Klong s'appuient sur l'environnement de modélisation Vensim®.

Dans le contexte de l'hydrosystème du Mae Klong, la gestion vise à optimiser principalement l'exploitation de la ressource en eau de surface. Un modèle pluie-débit a été développé pour simuler ou reconstituer les apports naturels aux ouvrages hydrauliques dans le bassin. L'estimation des écoulements est calculée à partir des séries chronologiques de précipitations sur 40 ans (1959-1998). Un modèle de décision qui tient compte de la conduite opérationnelle des ouvrages et des contraintes réglementaires, a été développé pour représenter la circulation des flux d'eau en milieux aménagés.

La technique de l'analyse de sensibilité des paramètres du modèle de fonctionnement par la simulation stochastique met en évidence, d'une part la variabilité des résultats dus aux incertitudes des paramètres économiques introduits dans le modèle, et d'autre part, les amplitudes différentes de leurs impacts sur la performance du système.

- La variabilité de la ressource en eau domine amplement le fonctionnement du système. Les simulations fines pour différentes hypothèses d'apports sur des durées de cinq ans (à période de retour moyenne, humide et sèche) montrent, d'une part que les recommandations pour la stratégie de gestion dérivée de la simulation sur des périodes relativement longues, par exemple sur l'ensemble de la série d'apports sur 40 ans, ne sont pas applicables à toutes les circonstances, et d'autre part, que du point de vue de la ressource en eau, il faut être particulièrement attentif aux années sèches consécutives qui conduisent à la défaillance de fonctionnement du système.
- La variabilité des demandes en eau à l'aval du bassin (irrigation, débit réservé et alimentation en eau potable) a un impact modéré sur le fonctionnement du système du Mae Klong. Cependant, comme la demande en eau pour la production hydroélectrique n'est pas prise en compte lors de la programmation annuelle de l'allocation en eau, cela provoque une pénurie importante lorsque cette programmation n'est pas cohérente avec la ressource disponible.
- En ce qui concerne les contraintes réglementaires des retenues, l'étude a tenté de vérifier la possibilité d'utiliser l'eau stockée en dessous du niveau inférieur de fonctionnement, notamment à la retenue de Srinagarind qui possède un volume immobilisé important. Les résultats de simulations, obtenus en particulier sous une

hypothèse d'années sèches consécutives, montrent qu'une stratégie utilisant de l'eau de cette zone de stockage *mort* apporte peu d'amélioration à la performance de fonctionnement.

Pour préparer à la situation en 2017. Une situation conflictuelle entre les ressources et les usages est inévitable. Les trois mesures envisageables, qui sont généralement pratiquées en vue d'assurer un bon fonctionnement de l'hydrosystème aménagé, sont : la mise en œuvre de nouvelles ressources, la gestion de la demande et l'amélioration des pratiques de gestion.

Dans le cas d'un hydrosystème très aménagé comme le bassin du Mae Klong (80% d'écoulements annuels contrôlés par les deux barrages-réservoirs du système), la recherche d'une nouvelle ressource au travers de la réalisation de nouveaux grands barrages-réservoirs se heurte déjà à diverses contraintes techniques (site aménageable), économiques (financement), sociales (contestation par les habitants concernés, les ONGs, etc.) et environnementales (submersion de zone forestière).

Des mesures nouvelles de la gestion de la demande en eau (particulièrement pour l'irrigation) nécessitent encore un délai de mise en pratique, car le concept d'une ressource en eau considérée comme un bien économique permettant de mettre en place des instruments de gestion (la tarification, les quotas, les marchés d'eau) soulève encore bien des débats.

L'adaptation de la pratique de gestion semble une mesure plus prometteuse tant à court terme qu'à plus long terme.

- La politique de gestion actuelle qui encourage l'EGAT à utiliser plus d'eau que le volume d'eau sollicité à l'aval du bassin, nécessite une redéfinition. Le volume d'eau pour la production hydroélectrique doit désormais être défini en concertation avec les autres acteurs concernés.
- La programmation de l'utilisation de l'eau doit être envisagée sur l'année complète, et plus seulement sur la saison sèche. En outre, il serait profitable d'évaluer les impacts de décision d'allocation en eau sur des horizons plus lointains, jusqu'à plusieurs années, avec divers scénarios d'apports et de demandes.
- Une contribution de cette thèse est d'esquisser un outil d'aide à la décision qui permettrait aux gestionnaires de tester leurs choix de stratégies avant de prendre leur décision. Les exemples de mise en œuvre et d'application dans cette étude démontrent qu'une large gamme de questions peut être traitée par le modèle. Ils confirment aussi que la modélisation par la méthode de la Dynamique des Systèmes pour l'analyse des processus complexes en interaction avec les indicateurs économiques peut donner des résultats convaincants dans le domaine des hydrosystèmes aménagés.

Jusqu'où irons-nous ? Bien que la modélisation actuelle de l'hydrosystème du Mae Klong soit susceptible de répondre fidèlement à de nombreuses questions, un perfectionnement de la représentation du système est toujours envisageable.

- *Prévision des ressources en eau.* Les conditions climatiques d'une année (ou plus) à venir sont-elles prévisibles et avec quelle précision ? De nouvelles voies d'exploitation pourraient être ouvertes avec la mise en œuvre de prévisions climatiques saisonnières qui font actuellement l'objet de recherches (en particulier à l'IRI aux Etats-Unis) pour lesquelles on peut nourrir quelque espoir.
- *Représentation de la dynamique des demandes en eau.* La dynamique de la demande en eau pour la production hydroélectrique est partiellement introduite dans notre modèle ; cette demande varie en fonction de la hauteur des retenues. Mais l'objectif de production annuelle d'hydroélectricité (défini par le pourcentage de la capacité installée des turbines) reste constant tout le long de la simulation. Les règles de définition de cet objectif ne sont pas de fait explicitées par le gestionnaire.

La demande en eau pour la protection contre les intrusions salines dépend de l'oscillation de la marée ; une étude du comportement hydrodynamique fluvial permettra de mieux connaître le temps de transfert entre le point de lâcher et l'embouchure du fleuve et ainsi de contribuer à économiser de l'eau, notamment pendant la période sèche.

Tout en constituant la plus grande part de la ressource consommée dans l'hydrosystème, la demande en eau pour l'agriculture n'est pas véritablement optimisée. L'approche agronomique classique qui calcule le besoin en eau des plantes à partir de la demande climatique en rajoutant les pertes dans les systèmes de distribution, peut aider à améliorer cette estimation. Mais cette méthode ne prend pas en considération les dimensions socio-économiques à l'origine de la décision d'irriguer (date, durée, volume) des paysans. Le développement récent des méthodes de simulation par systèmes multi-agents laisse entrevoir une approche pour représenter cette demande collective.

- *Modéliser la décision.* Le lecteur aura pu trouver notre approche et nos raisonnements subjectifs, ambigus ou imprécis. Malgré une représentation satisfaisante des décisions de gestion de l'eau dans le système du Mae Klong, une formulation très complexe se cache encore derrière chacun des éléments de l'hydrosystème que nous avons étudié. Il est probable que de nouvelles approches pourraient améliorer notre représentation, par exemple la théorie du sous-ensemble flou ou une analyse faisant appel aux nouvelles connaissances dans le domaine des sciences cognitives ou de l'intelligence artificielle.

,

.

BIBLIOGRAPHIE

- ACRES. *Chao Phraya-Meklong Basin Study - Phase I*. Report prepared for RID. Niagara Falls : Acres International Ltd., 1979. (Main Report and Appendix A-F).
- ACRES & SINDHU. *Chao Phraya-Meklong Basin Study - Phases 2 and 3*. Completion report prepared for RID. Bangkok : Acres International Ltd. and Sindhu Pulsirivong&Associates, 1982.
- AFCET. *Modélisation et maîtrise des systèmes techniques, économiques, sociaux*, Tome 1. Actes du congrès organisé par l'Association Française pour la Cybernétique Economique et Technique (AFCET) à Versailles, France, 21-24 novembre 1977. Suresnes : Hommes et Techniques, 1977a. 598 p.
- AFCET. *Modélisation et maîtrise des systèmes techniques, économiques, sociaux*, Tome 2. Actes du congrès organisé par l'Association Française pour la Cybernétique Economique et Technique (AFCET) à Versailles, France, 21-24 novembre 1977. Suresnes : Hommes et Techniques, 1977b. 680 p.
- AIT. *Study of Potential Development of Water Resources in the Mae Klong River Basin*. Report prepared for NESDB. Bangkok : Asian Institute of Technology, 1994. (3 volumes).
- AIT. *Salinity Intrusion in the Chao Phraya and Mae Klong Rivers*. Final report prepared for NESDB and EGAT. Bangkok : Asian Institute of Technology, 1978. 85 p.
- AIT & DMR. *Groundwater Resources in Bangkok Area : Development and Management Study - Phase II*. Final report submitted to National Environment Board, Government of Thailand. Bangkok : Asian Institute of Technology and Department of Mineral Resources, 1980.
- AMIGUES, J.P.; BONNIEUX, F.; LE GOFFE, P. & POINT, P. *Valorisation des usages de l'eau*. Poche Environnement, 2. Paris : Economica & INRA, 1995. 112 p.
- ANDREU, J.; CAPILLA, J. & SANCHIS, E. "AQUATOOL, a generalized decision-support system for water-resources planning and operational management." *Journal of Hydrology*, 1996; 177 : 269-291.
- ANDREU, J.; CAPILLA, J. & SANCHIS, E. "Aquatool : A Computer-Assisted Support System for Water Resources Research Management including Conjunctive Use." In : LOUCKS, D.P. & DA COSTA, J.R. (eds.). *Decision Support Systems : Water Resources Planning*. Berlin : Springer-Verlag, 1991. p 333-355.
- ARACIL, J. *Introduction à la dynamique des systèmes*. Coll. Science des systèmes. Lyon : Presses universitaires de Lyon, 1984. 414 p. (Trad. de Introducción a la dinámica de sistemas (Alianza Editorial, 1983), par M. Ossandon).
- ASCE & UNESCO/IHP. *Sustainability Criteria for Water Resource Systems*. Task Committee on Sustainability Criteria, Water Resources Planning and Management Division, ASCE and Working Group, UNESCO/IHP IV Project M-4.3. Reston, Virginia : American Society of Civil Engineers (ASCE), 1998. 253 p.
- ASHBY, W.R. *An Introduction to Cybernetics*. London : Chapman & Hall, Ltd, 1956. 295 p. (Web ed., : 1999, <http://pcp.vub.ac.be/books/IntroCyb.pdf>).
- AUBERT, B. *Les technologies de l'information et l'organisation*. Montréal : Gaëtan Morin, 1996. 255 p.
- BAARSE, G. & MIEDEMA, G. "Modelling approach for a regional water management study in a polder area." In : LOWING, M.J. (ed.). *Optimal Allocation of Water Resources*. IAHS Publication, No.135. Wallingford, Oxon (UK) : International Association of Hydrological Sciences, 1982. p 155-163.

- BACCI, J. "Modélisation hydropluviométrique : du modèle global au modèle distribué. Application au bassin versant du Paute (Equateur)." 75 p. *Mémoire de DEA* : Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc (USTL), Montpellier : 1997.
- BAKKER, M.; BARKER, R.; MEINZEN-DICK, R. & KONRADSEN, F.(eds.). *Multiple Uses of Water in Irrigated Areas : A Case Study from Sri Lanka*. SWIM Paper, 8. Colombo : International Water Management Institute (IWMI), 1999. 48 p.
- BARDE, J.P. *Economie et politique de l'environnement*, 2e éd. Paris : Presses Universitaires de France (PUF), 1992. 383 p. (1er éd., 1991).
- BARRAQUE, B. "La politique européenne dans le domaine de l'eau. Impact, implication, impératifs." *Revue Française de Géographie*, 1998; 4 : 125-136.
- BARRITT-FLATT, P.E. "Implementing a Computer-Aided Support System for Water Resources Research and Management." In : LOUCKS, D.P. & DA COSTA, J.R. (eds.). *Decision Support Systems : Water Resources Planning*. Berlin : Springer-Verlag, 1991. p 87-96.
- BARRITT-FLATT, P.E. & CORMIE, A.D. "Implementing a Decision Support System for Operations Planning at Manitoba Hydro." In : LOUCKS, D.P. & DA COSTA, J.R. (eds.). *Decision Support Systems : Water Resources Planning*. Berlin : Springer-Verlag, 1991. p 357-374.
- BATCHELOR, C.; CAIN, J.; FARQUHARSON, F. & ROBERTS, J. *Improving Water Utilization from a Catchment Perspective*. SWIM Paper, n° 4. Colombo : International Water Management Institute (IWMI), 1998. 32 p.
- BAUSCH, K.C. "The Practice and Ethics of Design." *Systems Research and Behavioral Science*, 2000; 17(1) : 23-50.
- BEAUD, S. & WEBER, F. *Guide de l'enquête de terrain. Produire et analyser des données ethnographiques*. Coll. Guides "Repères". Paris : La Découverte, 1998. 328 p.
- BECK, M.B. "Water Quality Modeling : A Review of the Analysis of Uncertainty." *Water Resources Research*, 1987; 23(8) : 1393-1442.
- BECKER, L. & YEH, W.W.G. "Optimization of Real Time Operation of a Multiple-Reservoir system." *Water Resources Research*, 1974; 10(6) : 1107-1112.
- BENDER, M.J. & SIMONOVIC, S.P. "Consensus as the measure of sustainability." *Hydrological Sciences Journal*, 1997; 42(4) : 493-500.
- BEN HAMOUDA, N. "Stratégies des agriculteurs irriguants confrontées à une situation de pénurie d'eau : Cas d'un périmètre irrigué privé dans le bassin du Merguellil - Tunisie Centrales." 216 p. *Thèse de Mastère* : Centre International de Hautes Etudes Agronomiques Méditerranéennes (CIHEAM) : 1999.
- BERNIER, J. "Risque et décisions en gestion de l'eau : Essai d'analyse de la rationalité du dialogue entre hydrologue et gestionnaire." *Revue des sciences de l'eau*, 1998; 1 : 3-24.
- BERNIER, J. "Quantitative analysis of uncertainties in water resources : Application for predicting the effects of changes." In : DUCKSTEIN, L. & PARENT, E. (eds.). *Engineering Risk in Natural Resources Management*. NATA ASI Series E : Applied Sciences, volume 275. The Netherlands : Kluwer Academic Publishers, 1994. p 343-357.
- BERNIER, J. "Prise en compte des incertitudes d'information et des objectifs dans l'estimation des modèles hydrologiques." *Revue Internationale des Sciences de l'Eau*, 1985; 1(1/4) : 3-10.
- BERNIER, J. "Aspects méthodologiques de la gestion optimale des réservoirs à buts multiples." *La Houille Blanche*, 1977; 2/3 : 253-257.
- BERNIER, J. "Sur les probabilités d'occurrence des sécheresses et des étiages." *Bulletin du Centre de Recherches et d'Essais de Chatou*, 1965; 11 : 3-12.
- BERNIER, J.; PARENT, E. & BOREUX, J.J. *Statistique pour l'environnement. Traitement bayésien de l'incertitude*. Paris : Editions TEC&DOC, 2000. 363 p.

- BINNIE; MACRO; WS ATKINS & TDRI. *Chao Phraya Basin Water Management Strategy*. Final Report prepared for NESDB, RID and PCD. Bangkok : Binnie&Partners(overseas), Ltd., Macro Consultants Co., Ltd., W.S. Atkins International (UK) and Thailand Development Research Institute (TDRI), 1997. (2 volumes, Main Report and Appendices).
- BLUMENTHAL, K.P. "Overview of the Dutch water management system." In : LOWING, M.J. (ed.). *Optimal Allocation of Water Resources*. IAHS Publication, N° 135. Wallingford, Oxon (UK) : International Association of Hydrological Sciences (IAHS), 1982. p 103-112.
- BOGARDI, J.J. "The concept of integrated water resources management as a decision making problem." In : BOGARDI, J.J. & NACHTNEBEL, H.P. (eds.). *Multicriteria Decision Analysis in Water Resources Management*. Paris : International Hydrological programme, UNESCO, 1994a. p 9-22.
- BOGARDI, J.J. "Introduction of systems analysis : terminology, concepts, objective functions and constraints." In : BOGARDI, J.J. & NACHTNEBEL, H.P. (eds.). *Multicriteria Decision Analysis in Water Resources Management*. Paris : International Hydrological programme, UNESCO, 1994b. p 23-32.
- BOGARDI, J.J.(ed.). *Conflict Analysis in Reservoir Management*. Bangkok : Asian Institute of Technology (AIT), 1989. 580 p.
- BOGARDI, J.J. & NACHTNEBEL, H.P.(eds.). *Multicriteria Decision Analysis in Water Resources Management*. Paris : International Hydrological programme, UNESCO, 1994. 469 p.
- BOILY, C. *Guide pratique d'analyse systémique*. Montréal : Gaëtan Morin, 2000. 145 p.
- BOIS, P. *Hydrologie Générale*. Grenoble : Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique de Grenoble, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1979. 174 p.
- BOIS, P. & LEBEL, T. "Modélisation stochastique de la relation pluie-débit." In : *Journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier, 17-18 septembre 1985*. Paris : Edition de l'ORSTOM, 1986. p 272-290.
- BOSSEL, H. *Indicators for sustainable development : Theory, method, applications*. A Report to the Balaton Group. Manitoba, Canada : International Institute for Sustainable Development (IISD), 1999. 124 p. (<http://iisd1.iisd.ca/pdf/balatonreport.pdf>).
- BOULDING, K.E. "General Systems Theory : The Skeleton of Science." *Management Science*, 1956; 2(3) : 197-208.
- BOUSQUET, F. "Des milieux, des poissons, des hommes : étude par simulations multi-agents. Le cas de la pêche dans le Delta Central du Niger." 175 p. *Thèse de Doctorat* : Université de Lyon I - Claude Bernard, Lyon : 1994.
- BOUVARD, M. *Economie et techniques essentielles des aménagements hydrauliques : Dimensionnement, Tarification*. Coll. de la Division Recherche et Développement d'Electricité de France, n° 102. Paris : Eyrolles, 1999. 358 p.
- BRISCOE, J. *Water as an Economic Good : The Idea and What it Means in Practice*. A paper presented at the World Congress of the International Commission on Irrigation and Drainage, Cairo, September 1996., 1996. (<http://www-esd.worldbank.org/rdv/training/icidad16.htm>).
- BROSSIER, J.; VISSAC, B. & LE MOIGNE, J.L.(eds.). *Modélisation systémique et système agraire*. Paris : Edition INRA, 1990. 365 p.
- BRUNET-MORET, Y. "Homogénéisation des précipitations." *Cahier ORSTOM*, Série Hydrologie, 1979; XVI(3 et 4) : 147-170.
- BRUNET-MORET, Y. "Test d'homogénéité." *Cahier ORSTOM*, Série Hydrologie, 1977; XIV(2) : 119-170.
- BRUNET-MORET, Y. "Etude de l'homogénéité de séries chronologiques de précipitations annuelles par la méthode des doubles masses." *Cahier ORSTOM*, Série Hydrologie, 1971; VIII(4) : 3-30.
- BRUNET-MORET, Y. "Etude de quelques lois statistiques utilisées en Hydrologie." *Cahier ORSTOM*, Série Hydrologie, 1969; VI(3) : 3-100.

- BUDHAKOONCHAROEN, S. "Interactive Multi-objective Decision Making in Reservoir Operation." 271 p. *Doctoral Dissertation* : Asian Institute of Technology (AIT), Bangkok : 1990.
- BUISHAND, T.A. "Tests for detecting a shift in the mean of hydrological time series." *Journal of Hydrology*, 1984; 73 : 51-69.
- BUISHAND, T.A. "Some methods for testing the homogeneity of rainfall records." *Journal of Hydrology*, 1982; 58 : 11-27.
- BURAS, N. *Scientific Allocation of Water Resources*. New York : American Elsevier, 1972. 208 p.
- BURKE, R., III & HEANEY, J.P. *Collective Decision Making in Water Resource Planning*. Lexington : Lexington Books, D. C. Heath and Company, 1975. 209 p.
- BURN, D.H. & SIMONOVIC, S.P. "Sensitivity of Reservoir Operation Performance to Climatic Change." *Water Resources Management*, 1996; 10 : 463-478.
- CADIER, E.; MOLLE, F.; DE ALBUQUERQUE, C.H.C.; DOHERTY, F.R. & MONTGAILLARD, M. "Dimensionnement de petits barrages dans le NORDEST brésilien semi-arid." In : CARRÉ, P. (ed.). *Usage Agricole de l'eau*. Coll. Colloques et Séminaires, Sixièmes Journées Hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, les 12 et 13 septembre 1990. Paris : ORSTOM Editions, 1992. p 175-200.
- CALDER, I.R. *Water-Resource and Land-Use Issues*. SWIM Paper, n° 3. Colombo : International Water Management Institute (IWMI), 1998. 24 p.
- CÂMARA, A.S.; FERREIRA, F.C.; LOUCKS, D.P. & SEIXAS, M.J. "Multidimensional Simulation Applied to Water Resources Management." *Water Resources Research*, 1990; 26(9) : 1877-1886.
- CHANBURANAPINID, W. "Marginal Cost Pricing : A Case of Metropolitan Waterworks Authority." 77 p. *Master Thesis* : National Institute of Development Administration (NIDA), Bangkok : 1993. (in Thai).
- CHANROJANAKIJ, B.; UDOMVITHIT, K. & SUKCHAROEN, V. *Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT)*. Bangkok : Institute for Public Policy Studies (IPPS), 1994. 80 p. (in Thai with an English abstract).
- CHAROENMUANG, T. "The Governance of Water Allocation Problems in Thailand : Four Case Studies from the Upper Northern Region." In : *Water Conflicts*. Bangkok : Thailand Development Research Institute (TDRI), 1994. p 111-147.
- CHECKLAND, P. *Systems Thinking, Systems Practice*. Chichester : John Wiley & Sons, 1981. 330 p.
- CHECKLAND, P. & HOLWELL, S. *Information, Systems and Information Systems : making sense of the field*. Chichester : John Wiley & Sons, 1998. 262 p.
- CHECKLAND, P. & SCHOLES, J. *Soft Systems Methodology in Action*. Chichester : John Wiley & Sons, 1990. 329 p.
- CHEVALLIER, P. "Complexité hydrologique du petit bassin versant : exemple en savane humide Booro-Borotou (Côte d'Ivoire)." 331 p. *Thèse de Doctorat* : Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc (USTL), Montpellier : 1990.
- CHEVALLIER, P. & POUYAUD, B.(eds.). *L'hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développement*. IAHS Publication, n° 238. Wallingford, Oxfordshire (UK) : International Association of Hydrological Sciences (IAHS), 1996.
- CHOFFRAY, J.M. *Système Intelligents de Management. Diagnostic, Analyse et Assistance à la Décision*. Coll. Connaître et Pratiquer la Gestion. Paris : Nathan, 1992. 143 p.
- CHRISTENSEN, S.R. "Water Allocation Conflicts in Thailand : An Analysis of Government Failure." In : *Water Conflicts*. Bangkok : Thailand Development Research Institute (TDRI), 1994. p 53-86.
- CHRISTENSEN, S.R. & BOON-LONG, A. *Institutional problems in Thai water management*. Bangkok : Natural Resources and Environment Program, Thailand Development Research Institute (TDRI), 1994. 54 p.

- CLERGUE, G. *L'apprentissage de la complexité*. Paris : Hermès, 1997. 159 p.
- COCHONNEAU, G.; HIEZ, G. & SECHET, P. "MVR-automatisation d'un modèle d'information pluviométrique régionale." In : *Séminfo 2, Montpellier, 26-28 septembre 1988*. Montpellier : ORSTOM, 1988. p 131-143.
- COCHONNEAU, G.; HIEZ, G.; SECHET, P. & L'HOTE, Y. *MVR 1.5 : Logiciel pour la critique, l'homogénéisation et la synthèse d'observations pluviométriques*. Coll. Logorstom. Editions de l'Orstom : Paris, 1992.
- COLAS, H. "Modélisation intégrée bassin versant - activités humaines - milieux hydriques. Application au bassin versant du Lez et des étangs palavasiens." 392 p. *Thèse de Doctorat* : Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc (USTL), Montpellier : 1991.
- COLAS, H.; BOCQUILLON, C. & VALETTE, F. "Modélisation de la gestion des ressources en eau dans les zones littorales méditerranéennes. Application au cas du bassin versant du Lez." In : *L'Avenir de l'Eau. Quelques réponses des sciences hydrotechniques à une inquiétude mondiale*. XXIIe Journées de l'Hydraulique. Paris, les 15, 16 et 17 septembre 1992, Question III : L'adéquation des ressources à la fois quantitativement et qualitativement. Paris : Société Hydrotechnique de France, 1992. p 10.
- COQUILLARD, P. & HILL, D.R.C. *Modélisation et simulation d'écosystèmes : Des modèles déterministes aux simulations à événements discrets*. Paris : Masson, 1997. 273 p.
- CORDEIRO-NETTO, O.; PARENT, E. & DUCKSTEIN, L. "Multicriterion Design of Long-Term Water Supply in Southern France." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1996; 122(6) : 403-413.
- CORDEIRO-NETTO, O.; PARENT, E. & DUCKSTEIN, L. *Evaluation of Two MCDM Techniques for Staging the Multicriterion Design of Long-Term Water Supply in Southern France*. Cahier du LAMSADE, no.118. Paris : Laboratoire d'Analyse et Modélisation de Système pour l'Aide à la Décision (LAMSADE), Université Paris-Dauphine, 1993. 25 p.
- CORNELIS, A. "The Philosophy of Neeltje Jans." *Water Science and Technology*, 1995; 31(8) : 9-17.
- COVARRUBIAS, A. "Modélisations hydraulique et hydrologique d'un réseau de captage dans la cordillère des Andes : La Vallée de Toconce (2ème Région du Chili)." 84 p. *Mémoire de DEA* : Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc (USTL), Montpellier : 1996.
- COWLEY, J.E. & JARASWATHANA, D. "Results of the preliminary phase of the Chao Phraya and Meklong river basin study in Thailand." In : *Proceeding of the International Conference on Water Resources Engineering, Bangkok, Thailand, 10-13 January, 1978*, Volume II : Water resources development and management. Bangkok : International Association of Hydraulic Research (IAHR), 1978. p 727-748.
- CROZIER, M. & FRIEDBERG, E. *L'acteur et le système : Les contraintes de l'action collective*. Coll. Points Essais, 248. Paris : Le Seuil, 1977. 500 p.
- DAGLI, C.H. & MILES, J.F. "Determining operating policies for a water resource system." *Journal of Hydrology*, 1980; 47 : 297-306.
- DAMWAN, K. "An Analysis of Cost and Return on Sugarcane Production : A Case Study in Amphure Thamuang, Kanchanaburi Province." 69 p. *Special Study* : Kasetsart University, Bangkok : 1998. (in Thai).
- DAVIS, J.R.; NANNINGA, P.M.; BIGGINS, J. & LAUT, P. "Prototype Decision Support System for Analysing Impact of Catchment Policies." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1991; 117(4) : 399-414.
- DE ROSNAY, J. *Le microscope. Vers une vision globale*. Coll. Points Essais, n° 80. Paris : Le Seuil, 1975. 315 p.
- DESBORDES, M. "Contribution à l'analyse et à la modélisation des mécanismes hydrologiques en milieu urbain." 242 p. *Thèse de Docteur d'Etat* : Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc (USTL), Montpellier : 1987. (avec Annexes).

- DEZETTER, A. "Modélisation globale de la relation pluie débit. Application en zone de savanes soudanaises (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire)." 422 p. *Thèse de Doctorat* : Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc (USTL), Montpellier : 1991.
- DEZETTER, A.; POUGET, J.C. & CAOBALLER, L. *Application d'HYDRAM au schéma d'utilisation des eaux de la Guadeloupe pour l'eau potable et l'irrigation*. Guadeloupe, France : ORSTOM/Conseil Général de la Guadeloupe, 1994. 113 p. (+annexes).
- DIAZ, G.E. & BROWN, T.C. *AQUARIUS : A Modeling System for River Basin Water Allocation*. General Technical Report, RM-GTR-299. Fort Collins, Colorado : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, 1997. 160 p.
- DIJKMAN, J. & KLOMP, R. "Current Trends in Computer-Aided Water Resources Management at Delft Hydraulics." In : LOUCKS, D.P. & DA COSTA, J.R. (eds.). *Decision Support Systems : Water Resources Planning*. Berlin : Springer-Verlag, 1991. p 201-249.
- DINAR, A.; ROSEGRANT, M.W. & MEINZEN-DICK, R. *Water Allocation Mechanisms - Principles and Examples*. Washington, D.C. : World Bank, 1997. 40 p.
- DIORDJEVIC, B. *Cybernetics in Water Resources Management*. Colorado : Water Resources Publications, 1993. 619 p. (Translated from Serbo-Croatian by Dragan Savic, Stevan Bruk & Biljana Djoric-Francuski).
- DOORENBOS, J. & PRUITT, W.O. *Guidelines for predicting crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper, n° 24. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 1977.
- DOORENBOS, J. *et al.* *Yield response to water*. FAO Irrigation and Drainage Paper, n° 33. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 1979.
- DREYFUS, A.; HUBERT, P. & RAMAIN, P. "'Prolo" : modèle de prévision pour l'aménagement et la gestion intégrée d'un grand bassin hydrographique." *La Houille Blanche*, 1975; 1 : 17-36.
- DUCKSTEIN, L. & PARENT, E.(eds.). *Engineering Risk in Natural Resources Management*. NATO ASI Series E : Applied Sciences, Vol. 275. The Netherlands : Kluwer Academic Publishers, 1994a. 459 p.
- DUCKSTEIN, L. & PARENT, E. "Systems engineering of natural resources under changing physical conditions : A framework for reliability and risk." In : DUCKSTEIN, L. & PARENT, E. (eds.). *Engineering Risk in Natural Resources Management*. NATO ASI Series E : Applied Sciences, Vol. 275. The Netherlands : Kluwer Academic Publishers, 1994b. p 3-17.
- DUCKSTEIN, L. & PLATE, E.J.(eds.). *Engineering Reliability and Risk in Water Resources*. NATO ASI Series, Series E : Applied Sciences, no.124. Dordrecht, The Netherlands : Martinus Nijhoff Publishers, 1987.
- DUCKSTEIN, L.; PLATE, E.J. & BENEDINI, M. "Water Engineering Reliability and Risk : A System Framework." In : DUCKSTEIN, L. & PLATE, E.J. (eds.). *Engineering Reliability and Risk in Water Resources*. Dordrecht, The Netherlands : Martinus Nijhoff Publishers, 1987. p 1-20.
- DUNN, S.M.; MACKAY, R.; ADAMS, R. & OGLETHORPE, D.R. "The hydrological component of the NELUP decision-support system : an appraisal." *Journal of Hydrology*, 1996; 177 : 213-235.
- DUPONT, J.; SMITZ, J.; ROUSSEAU, A.N.; MAILHOT, A. & GANGBAZO, G. "Utilisation des outils numériques d'aide à la décision pour la gestion de l'eau." *Revue des sciences de l'eau*, 1998; n° spécial : 5-18.
- DURAND, D. *La systémique*, 7e éd. Que sais-je?, n° 891. Paris : Presses Universitaires de France (PUF), 1996. 126 p. (1re éd. : 1979).
- DUTTA, D. "Evaluation of Groundwater Quality and Monitoring System Design using GIS : Lower Mae Klong Basin, Thailand." 136 p. *Master Thesis* : Asian Institute of Technology, Bangkok : 1994. (with appendix).
- EDIJATNO & MICHEL, C. "Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres." *La Houille Blanche*, 1989; 2 : 113-120.

- EDIJATNO; NASCIMENTO, N.de O.; MAKHLOUF, Z. & MICHEL, C. "GR3J : a daily watershed model with three free parameters." *Hydrological Sciences Journal*, 1999; 44(2) : 263-277.
- EGAT. *Monthly Operating Program, February 1999*. Report n° SOP-P 1/99. Bangkok : Generation Operation Planning Department, Electricity Generating Authority of Thailand, 1999. 49 p.
- EGAT. *Dry season water releases plan from EGAT's Dams : 1998/1999*. Bangkok : Reservoirs Operation Section, Electricity Generating Authority of Thailand, 1998. (in Thai).
- EGAT. *Annual Report 1997*. Bangkok : Electricity Generating Authority of Thailand, 1997a. 86 p.
- EGAT. *Dry season water releases plan from EGAT's Dams : 1997/1998*. Bangkok : Reservoirs Operation Section, Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT), 1997b. (in Thai).
- EGAT. *Dry season water releases plan from EGAT's Dams : 1996/1997*. Bangkok : Reservoirs Operation Section, Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT), 1996. (in Thai).
- EGAT. *Dry season water releases plan from EGAT's Dams : 1995/1996*. Bangkok : Reservoirs Operation Section, Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT), 1995a. (in Thai).
- EGAT. *Water Quality Testing and Monitoring - Khao Laem Dam and Srinagarind Dam, 1994*. Bangkok : Environment Department, Electricity Generating Authority of Thailand, 1995b. 54 p. (in Thai).
- EGAT. *Dry season water releases plan from EGAT's Dams : 1994/1995*. Bangkok : Reservoirs Operation Section, Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT), 1994. (in Thai).
- EGAT. *Dry season water releases plan from EGAT's Dams : 1993/1994*. Bangkok : Reservoirs Operation Section, Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT), 1993. (in Thai).
- EGAT. *Criteria for Water Release from Reservoirs in Mae Klong River Basin*. Research Report, n° 60-59. Bangkok : Electricity Generating Authority of Thailand, 1992. 133 p. (in Thai with an English abstract).
- EGAT. *Basic Data of Dam, including maximum design flood and criteria for flood routing*. Bangkok : Survey and Ecology Department, Electricity Generating Authority of Thailand, 1989.
- EGAT. *Khao Laem Multipurpose Project*. Completion Report. Bangkok : Hydroelectric Construction Department, Electricity Generating Authority of Thailand, 1985a. 109 p.
- EGAT. *Srinagarind Unit 5 Project*. Feasibility Report, report n° 32000-2802. Bangkok : Project Planning and Investigation Department, Electricity Generating Authority of Thailand, 1985b. 38 p. (with appendix).
- EGAT. *Srinagarind Hydro-Electric Project, Volume I*. Completion Report and Operation & Maintenance Manual, report n° 812-2515. Bangkok : Hydroelectric Construction Department, Electricity Generating Authority of Thailand, 1982. 26 p. (with appendices).
- EGAT. *Hydrological Investigations of Upper Quae Yai Project*. Bangkok : Planning Department, Electricity Generating Authority of Thailand, 1978. 33 p. (with appendix).
- EMSELLEM, Y. "La gestion intégrée des ressources en eau." *La Houille Blanche*, 1977; 2/3 : 243-251.
- ENDERLEIN, R.E. "Protecting Europe's Water Resources : Policy Issues." *Water Science and Technology*, 1995; 31(8) : 1-8.
- EPDC. *Quae Yai No. 1 Hydroelectric Project*. Feasibility report prepared for Yanhee Electricity Authority. Tokyo : Electricity Power Development Co., Ltd. (EPDC), 1968. (3 vol.).
- ERHARD-CASSEGRAIN, A. & MARGAT, J. *Introduction à l'économie générale de l'eau*. Paris : Masson, 1982. 361 p.
- FANG, Z.X. "Gestion de barrages réservoirs à buts multiples. Méthodologie et pratiques de la programmation dynamique." 173 p. *Thèse de Doctorat* : Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc (USTL), Montpellier : 1988.
- FAO. *Irrigation in Asia in Figures*. Water Reports, n° 18. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 1999. 228 p.

- FAO. *Réformer les politiques dans le domaine des ressources en eau : Guide des méthodes, processus et pratiques*. Bulletin FAO d'Irrigation et de Drainage, n° 52. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 1997.
- FAO. *Reforming water resources policy. A guide to methods, processes and practices*. FAO Irrigation and Drainage Paper, n° 52. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 1995. 71 p.
- FAO; UNDP & WORLD BANK. *Water sector policy review and strategy formulation. A general framework*. FAO Land and Water Bulletin, n° 3. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 1995. 117 p.
- FEDRA, K. *Decision Support for Natural Resources Management : Models, GIS and Expert Systems*. International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)., 1995. (<http://www.iiasa.ac.at/Research/ACA/papers/toronto.html>).
- FEDRA, K. "GIS and Environmental Modeling." In : GOODCHILD, M.F.; PARKS, B.O. & STEYAERT, L.T. (eds.). *Environmental Modeling with GIS*. New York : Oxford University Press, 1993. p 37-50.
- FEDRA, K. & JAMIESON, D.G. "The "WaterWare" decision-support system for river-basin planning. 2.Planning capability." *Journal of Hydrology*, 1996; 177 : 177-198.
- FEDRA, K. & LOUCKS, D.P. "Interactive Computer Technology for Planning and Policy Modeling." *Water Resources Research*, 1985; 21(2) : 114-122.
- FIDDAMAN, T.S. "Feedback Complexity in Integrated Climate-Economy Models." 360 p. *Doctoral Dissertation* : Massachusetts Institute of Technology (MIT), Massachusetts : 1997.
- FLATTERS, F. & HORBULYK, T.M. "Water and Resource Conflicts in Thailand : An Economic Perspective." In : *Water Conflicts*. Bangkok : Thailand Development Research Institute (TDRI), 1994. p 11-51.
- FORD, D. "Getting Someone to Use the Systems : Lessons from HEC." In : LOUCKS, D.P. & DA COSTA, J.R. (eds.). *Decision Support Systems : Water Resources Planning*. Berlin : Springer-Verlag, 1991. p 251-266.
- FORRESTER, J.W. *Principes des Systèmes*, 2e éd. Coll. Science des Systèmes. Lyon : Presses Universitaires de Lyon, 1981. (Trad. de Principles of Systems : Wright-Allen Press, 1968, par P. Sylvestre-Baron).
- FORRESTER, J.W. *Urban Dynamics*. Cambridge, MA : Productivity Press, 1969. 285 p. (Originally published by MIT Press).
- FORRESTER, J.W. *Principles of Systems*, 2nd ed. Cambridge, Massachusetts : Wright-Allen Press, Inc., 1968. (Text and Workbook, Chapters 1 through 10).
- FORRESTER, J.W. *World Dynamics*. Cambridge, MA : Productivity Press, 1967. 142 p. (Originally published by MIT Press).
- FORRESTER, J.W. *Industrial Dynamics*. Cambridge, MA : Productivity Press, 1961. 464 p. (Originally published by MIT Press).
- FORTIN, J.P.; CHARBONNEAU, R.; LEFEVRE, J. & GIRARD, G. "Proposition et analyse de quelques critères adimensionnels d'optimisation." In : *Mathematical Models in Hydrology*, Volume 2. IAHS Publication, n° 101. Wallingford, Berkshire (UK) : IAHS Press, Institute of Hydrology, 1974. p 548-557.
- FRIEDMAN, R.; ANSELL, C. & DIAMOND, S. "The Use of Models for Water Resources Management, Planning and Policy." *Water Resources Research*, 1984; 20(7) : 793-802.
- FUJIKI, T.; SATOH, M.; SAKUMA, T.; SOPAPHUN, P.; KWANYUEN, B. & CHERDCHANPIPAT, N. "Development of farmers' participation in water management in the Upper Chao Phraya Delta." In : *Proceeding of the Workshop on Sustainable Development of Agriculture and Organizational Management of Chao Phraya and Mae Klong Basins*, Kasetsart University, Bangkok, October 30, 1998. Bangkok : Kasetsart University/University of Tsukuba (Japan), 1998. p 14.

- GARRABE, M. *Ingénierie de l'évaluation économique*. Enseignement Supérieur Tertiaire. Paris : Ellipses, 1994. 255 p.
- GATES, W.E.; MALES, R.M. & WALKER, J.F. "Application of Industrial Dynamics Concepts to Decision Making in Environment Management." *Water Resources Research*, 1970; 5(6) : 1549-1558.
- GAYTE, O.; LIBOUREL, T.; CHEYLAN, J.P. & LARDON, S. *Conception des systèmes d'information sur l'environnement*. Coll. Géomatique. Paris : Hermès, 1997. 153 p.
- GELDOF, G.D. "Policy Analysis and Complexity - A Non-Equilibrium Approach for Integrated Water Management." *Water Science and Technology*, 1995; 31(8) : 301-309.
- GENEREUX, J. *Introduction à l'économie*. Coll. Points Economie, n°E31. Paris : Le Seuil, 1992. 188 p.
- GILOT, L. "Evaluation water delivery in tertiary units. Part 1 : Method." *Agricultural Water Management*, 1997; 32 : 147-167.
- GILOT, L. "L'eau des livres et l'eau des champs. Des règles de distribution à leur mise en pratique. Principes généraux et analyse du cas d'Urcuqui." 363 p. *Thèse de Doctorat* : Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier(ENSA.M), Montpellier : 1994.
- GILOT, L.; CALVEZ, R.; LE GOULVEN, P. & RUF, T. "Evaluation water delivery in tertiary units. Part 2 : A case study, Urcuqui, a farmer-managed irrigation system in the Andes." *Agricultural Water Management*, 1997; 32 : 163-179.
- GINOCCHIO, R. *Aménagement Hydroélectriques*, 3e éd. Coll. du Centre de Recherches et d'Essais de Chatou. Paris : Eyrolles, 1970. 480 p.
- GOUROU, P. *Riz et civilisation*. Paris : Fayard, 1984. 299 p.
- GREENWOOD, W.T.(ed.). *Decision Theory and Information Systems : An Introduction to Management Decision Making*. Cincinnati, Ohio : South-Western Publishing Company, 1969. 818 p.
- GRIGG, N.S. "Management Framework for Large-Scale Water Problems." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1996a; 122(4) : 296-300.
- GRIGG, N.S. *Water Resources Management : Principles, Regulations, and Cases*. New York : McGraw-Hill, Inc., 1996b. 540 p.
- GUERRA, L.C.; BHUIYAN, S.I.; TUONG, T.P. & BARKER, R. *Producing More Rice with Less Water from Irrigated Systems*. SWIM Paper, n° 5. Colombo : International Water Management Institute (IWMI), 1998. 24 p.
- GUERRIEN, B. *Dictionnaire d'analyse économique : microéconomie, macroéconomie, théorie des jeux, etc.* Dictionnaire Repères. Paris : La Découverte, 1996. 540 p.
- GUIGO, M.; DAVOINE, P.A.; DUBUS, N.; GUARNIERI, F.; RICHARD, B. & BAILLY, B. *Gestion de l'environnement et systèmes experts*. Coll. Géographie. Paris : Masson, 1995. 181 p.
- GUIGO, M. & LE BERRE, M. *Ecrire un modèle de simulation systémique : impact des aménagements sur le comportement de la nappe phréatique d'une plaine alluviale : essai pédagogique*. Coll. Grenoble Sciences. Grenoble : Université Joseph Fourier - Grenoble I, 1989. 102 p.
- GULTER, I. & FORREST, D. "Use of geographical information systems (GIS) in river basin management." *Water Science and Technology*, 1987; 19(9) : 81-86.
- GWP & ORSTOM. *Research & Development related to Integrated Water Resources Management*. Proceedings of the Special Workshop held at Montpellier, France, 10-12 December 1997. Stockholm : Global Water Partnership (GWP), 1997. 62 p.
- GYAU-BOAKYE, P. & SCHULTZ, G.A. "Filling gaps in runoff time series in West Africa." *Hydrological Sciences Journal*, 1994; 39(6) : 621-636.
- HAIMES, Y.Y. "Sustainable Development : a Holistic Approach to Natural Resource Management." *Water International*, 1992; 17 : 187-192.
- HAMILTON, C. *et al. System Simulation for Regional Analysis : An Application to River-Basin Planning*. Cambridge, MA : MIT Press, 1969. 407 p.

- HARRIBEY, J.M. *Le Développement soutenable*. Economie Poche, n° 50. Paris : Economica, 1998. 111 p.
- HARRINGTON, J.J. & GIDLEY, J.S. "The Variability of Alternative Decisions in a Water Resources Planning Problem." *Water Resources Research*, 1985; 21(12) : 1831-1840.
- HASHIMOTO, T.; LOUCKS, D.P. & STEDINGER, J.R. "Robustness of Water Resources Systems." *Water Resources Research*, 1982; 18(1) : 21-26.
- HASHIMOTO, T.; STEDINGER, J.R. & LOUCKS, D.P. "Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria for Water Resource System Performance Evaluation." *Water Resources Research*, 1982; 18(1) : 14-20.
- HEYLIGHEN, F. *Representation and Change. A Metarepresentational Framework for the Foundation of Physical and Cognitive Science*. Ghent, Belgium : Communication & Cognition, 1990. 192 p. (Web ed. : 1999, <http://pcp.vub.ac.be/books/Rep&Change.pdf>).
- HIEZ, G. "L'homogénéité des données pluviométriques." *Cahier ORSTOM, Série Hydrologie*, 1977; XIV(2) : 129-172.
- HILL, D.R.C. *Analyse orientée objets & modélisation par simulation*. Paris : Addison-Wesley France, 1993. 362 p.
- HINCKLEY, J.A., Jr. *Object-GAWSER : Object-oriented Guelph All-Weather Storm-Event Ruvff Model, Phase I : Training Manual. Application of Object-Oriented Simulation to Hydrologic Modeling. Special Report 96-4*. Hanover, New Hampshire : Cold Regions Research & Engineering Laboratory. US Army Corps of Engineers, 1996. 55 p.
- HINO, M. "Runoff analysis of Khwae Yai River." In : *Proceeding of the International Conference on Water Resources Engineering, Bangkok, Thailand, 10-13 January, 1978*, Volume II : Water Resources Development and Management. Bangkok : International Association for Hydraulic Research (IAHR), 1978. p 915-921.
- HOUGHTON-CARR, H.A. "Assessment criteria for simple conceptual daily rainfall-runoff models." *Hydrological Sciences Journal*, 1999; 44(2) : 237-261.
- HUANG, W.C. "Decision Support System for Reservoir Operation." *Water Resources Bulletin*, 1996; 32(6) : 1221-1232.
- HUBERT, P. "De quelques concepts et outils utiles à la gestion de l'eau." 319 p. *Thèse de Doctorat d'Etat* : Université de Paris VI (Pierre et Marie Curie) : 1986.
- HUBERT, P. *Eaupuscul : Une introduction à la gestion de l'eau*. Paris : ellipses, 1984. 192 p.
- HUFSCHEMIDT, M.M. & KINDLER, J. *Approaches to Integrated Water Resources Management in Humid Tropical and Arid and Semiarid Zones in Developing Countries*. Technical Documents in Hydrology. Paris : International Hydrological Programme (IHP), UNESCO, 1991. 161 p.
- HUIBO, Z. "Optimal Reallocation of a Multipurpose Reservoir with Fuzzy Water Supply Objectives : A Case Study of Menlou Reservoir, PRC." 71 p. *Master Thesis* : Asian Institute of Technology (AIT), Bangkok : 1994.
- HUMBERT, L. *et al.* "La systémique dans les sciences de la Terre." In : LESOURNE, J. (ed.). *La notion de système dans les sciences contemporaines*. Colloque CNRS "Analyse de Système", Lyon, 1980. Aix en Provence : Librairie de l'Université, 1980. p 273-351.
- HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER (HEC). *HEC-5 : Simulation of Flood Control and Conservation Systems, User's Manual, Version 8.0*. Davis, California : US Army Corps of Engineers, 1998.
- HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER (HEC). *HEC-5 : Simulation of Flood Control and Conservation Systems*. Davis, California : U.S. Army Corps of Engineers, 1982.
- HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER (HEC). *HEC-3 : Reservoir System Analysis for Conservation, User's Manual*. Davis, California : U.S. Army Corps of Engineers, 1981.
- ILACO & EMPIRE M&T. *Mae Klong Irrigation Project - Malaiman Phase I (IBRD Loan 2022-TH). Project Completion Report prepared for RID*. Bangkok : Ilaco/Empire M&T, 1988.

- ILACO & EMPIRE M&T. *Mae Klong Irrigation Project, Malaiman Phase I (IBRD loan no. 2022-TH). Completion Report Sugarcane Pilot Area*, prepared for the Royal Irrigation Department. Arnhem, The Netherlands : Ilaco/Empire M&T, 1987.
- ILACO & EMPIRE M&T. *Water allocation scheduling and monitoring at project level. Supporting Document 5.6 : WASAM Computer Manual*. Meklong Irrigation Project (Loan No. 1787-TH & 2022-TH), Water Management and Operation&Maintenance Report N° 5. Bangkok : Ilaco/Empire M&T, 1984.
- ILACO & EMPIRE M&T. *Greater Mae Klong Malaiman Irrigation Project*. Feasibility study report prepared for RID. Bangkok : Ilaco & Empire M&T, 1980. (2 volumes, Main Report and Annexes).
- INAGAKI, M. "Maximizing Operation of Hydropower Plant in Thailand." 70 p. *Master Thesis* : Asian Institute of Technology, Bangkok : 1984. (WA-85-12).
- INGRAM, H.M.; MANN, D.E.; WEATHERFORD, G.D. & CORTNER, H.J. "Guidelines for Improved Institutional Analysis in Water Resources Planning." *Water Resources Research*, 1984; 20(3) : 323-334.
- IRRIGATION COLLEGE. *WASAM (Water Allocation Scheduling and Monitoring) for Windows*, Volume I : Program Description. Bangkok : NEWMASIP, RID, 1994. 82 p. (in Thai).
- ISRANGKURA, A. *Diverting Water from the Mae Klong Basin : Whose Rights and at What Price?* Bangkok : Natural Resources and Environment Program, Thailand Development Research Institute (TDRI), 1995.
- IVANOV, P.; MASLIEV, I.; KULARATHNA, M.; DE MARCHI, C. & SOMLYÓDY, L. *DESERT : DEcision Support system for Evaluating River basin sTrategies, User's Manual*. Laxenburg, Austria : International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), 1996. 151 p.
- JACOBY, H.D. & LOUCKS, D.P. "Combined Use of Optimization and Simulation Models in River Basin Planning." *Water Resources Research*, 1972; 8(6) : 1401-1414.
- JAMIESON, D.G. & FEDRA, K. "The "WaterWare" decision-support system for river-basin planning. 1. Conceptual design." *Journal of Hydrology*, 1996a; 177 : 163-175.
- JAMIESON, D.G. & FEDRA, K. "The "WaterWare" decision-support system for river-basin planning. 3. Example applications." *Journal of Hydrology*, 1996b; 177 : 199-211.
- JICA. *Master Plan Study on The Water Management System and Monitoring Program in the Chao Phraya River Basin*. Report prepared for RID. Bangkok : Japan International Cooperation Agency (JICA), 1989. (7 volumes).
- JICA. *Master Plan Study for the Greater Mae Klong River Basin Development Project*. Irrigated Agriculture Development in the Kingdom of Thailand. Bangkok : Japan International Cooperation Agency (JICA), 1980a. (Main Report and 4 volumes of Appendices).
- JICA. *Upper Quae Yai Hydroelectric Development Project*. Feasibility report prepared for EGAT. Tokyo : Japan International Cooperation Agency (JICA), 1980b. (3 Vol.).
- JICA. *Mae Klong River Basin Flood Forecasting System, Thailand*. Technical feasibility study report prepared for RID. Bangkok : Japan International Cooperation Agency (JICA), 1978.
- JOHNSON, L.E. "Water Resource Management Decision Support Systems." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1986; 112(3) : 308-325.
- JOHNSON, L.E. "An Interactive Method for Development and Evaluation of Reservoir Operating Policies." 204 p. *Doctoral Dissertation* : Cornell University, Ithaca, NY : 1981.
- JOUBE, P. *Le diagnostic du milieu rural. De la région à la parcelle. Approche systémique des modes d'exploitation agricole du milieu*. Montpellier : Centre National d'Etudes Agronomiques des Régions Chaudes (CNEARC), 1992. 39 p.
- KANDEL, R. *L'incertitude des climats*. Paris : Hachette Littératures, 1998. 206 p. (1ère version publiée sous le titre "Le Devenir des climats", 1995).

- KANE, J.; VERTINSKY, I. & THOMSON, W. "KSIM : A Methodology for Interactive Resource Policy Simulation." *Water Resources Research*, 1973; 9(1) : 65-79.
- KASETSART UNIVERSITY; THAMMASAT UNIVERSITY & MAHIDOL UNIVERSITY. *Baseline Survey Report of Mae Klong Integrated Rural Development Program Area*, 1974. Bangkok : Mae Klong Integrated Rural Development Program, 1978. 403 p. (English Translation, June 1978).
- KIRDPITUGSA, C. & KAYANKARNNAVY, C. "Study of Water Use in Mae Klong Basin." In : TINGSANCHALI, T. (ed.). *Proceedings of the International Conference on Environmentally Sound Water Resources Utilization, Bangkok, Thailand, 8-11 November, 1993*. Bangkok : Asian Institute of Technology and International Water Resources Association (IWRA), 1993.
- KOIKE, M.; BAHALAYODOHIN, B. & NIYAMAPA, T. "Dynamic behaviors of two different agricultural soils for Bangkok clay and sandy loam using the cyclic torsional shear loading test." In : *Proceeding of the Workshop on Sustainable Development of Agriculture and Organizational Management of Chao Phraya and Mae Klong Basins, Kasetsart University, Bangkok, October 30, 1998*. Bangkok : Kasetsart University/University of Tsukuba (Japan), 1998. p 17.
- KOSITSAKULCHAI, E. "Diagnostic de l'allocation de la ressource en eau au niveau du bassin du Mae Klong, Thaïlande : Analyse et Modélisation." 132 p. *Mémoire de DEA : Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (ENGREF)*, Montpellier : 1997.
- KOSITSAKULCHAI, E. "Irrigation Impact on Sugarcane Cultivation in the Mae Klong Irrigation Project, Thailand." 122 p. *Master Thesis* : Asian Institute of Technology, Bangkok : 1994. (Thesis n° IR-93-12).
- KOSITSAKULCHAI, E.; CHEVALLIER, P.; MOLLE, F.; LE GOULVEN, P.; VALETTE, F.; CADIER, E. & DEZETTER, A. "Application des méthodes de la Dynamique des Systèmes à la gestion intégrée des ressources en eau : exemple du bassin versant du Mae Klong, Thaïlande." In : *Séminaire International Gestion Intégrée des Ressources Naturelles en Zones Inondables Tropicales (GIRN-ZIT), 20-23 juin 2000, Bamako (Mali)*. Bamako, Mali : IRD, 2000.
- KOSITSAKULCHAI, E.; MOLLE, F.; KUMNUANSILP, U. & CHEVALLIER, P. "Analysis of water and power management of the Mae Klong River basin, Thailand. A regional management analysis within a national scope." *Engineering Journal - Kasetsart University*, 1999; 37 : 67-85.
- KRIDAKORN, C. & SITTIPOD, R. "Diversion and filling of reservoir during construction of Ban Chao Nen dam." In : *Proceeding of the International Conference on Water Resources Engineering, Bangkok, Thailand, 10-13 January, 1978*, Volume II : Water Resources Development and Management. Bangkok : International Association for Hydraulic Research (IAHR), 1978.
- KUCZERA, G. & PARENT, E. "Monte Carlo assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models : the Metropolis algorithm." *Journal of Hydrology*, 1998; 211 : 69-85.
- KUMNOETMANEE, M. "Microcomputer Simulation of Water Uses in the Meklong Basin." p. *Master Thesis* : Kasetsart University, Bangkok : 1989.
- KUNDZEWICZ, Z. "Water resources for sustainable development." *Hydrological Sciences Journal*, 1997; 42(4) : 467-480.
- KWANYUEN, B.; CHERDCHANPIPAT, N. & SATOH, M. "Analysis of climate change in Central Plain of Thailand." In : *Proceeding of the Workshop on Sustainable Development of Agriculture and Organizational Management of Chao Phraya and Mae Klong Basins, Kasetsart University, Bangkok, October 30, 1998*. Bangkok : Kasetsart University/University of Tsukuba (Japan), 1998. p 15.
- LABADIE, J.W. & SULLIVAN, C.H. "Computerized Decision Support Systems for Water Managers." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1986; 112(3) : 299-307.
- LALL, U. & MAYS, L.W. "Model for Planning Water-Energy Systems." *Water Resources Research*, 1981; 17(4) : 853-865.
- LAMACQ, S. "Coordination entre l'offre et la demande en eau sur un périmètre irrigué. Des scénarios, des systèmes, et des hommes." 137 p. *Thèse de Doctorat* : Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (ENGREF), Montpellier : 1997. (avec annexes, 111 p.).

- LANE, D.C. "Should System Dynamics be Described as a 'Hard' or 'Deterministic' Systems Approach?" *Systems Research and Behavioral Science*, 2000; 17(1) : 3-22.
- LAPIERRE, J.W. *L'analyse de systèmes. L'application aux sciences sociales*. Paris : Syros, 1992. 229 p.
- LARVET, P. *Analyse des systèmes : de l'approche fonctionnelle à l'approche objet*. Paris : InterEditions, 1994. 320 p.
- LAURENT, F. "Outils de modélisation spatiale pour la gestion intégrée des ressources en eau. Application aux Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux." 357 p. *Thèse de Doctorat* : Ecole Nationale Supérieure des Mines, Saint-Etienne : 1996.
- LEBDI, F.; SLIMANI, M. & PARENT, E. "Stratégie empirique d'un système de ressources en eau : l'exemple d'un périmètre irrigué en zone semi-aride." *Revue des sciences de l'eau*, 1997; 10(1) : 121-134.
- LE COZ, C.(ed.). *Gestion intégrée des milieux aquatiques*. Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1994.
- LEE, D.J. & DINAR, A. "Integrated Models of River Basin Planning, Development, and Management." *Water International*, 1996; 21 : 213-222.
- LEE, D.J. & DINAR, A. *Review of Integrated Approaches to River Basin Planning, Development and Management*. World Bank Working Paper, WPS1446. Washington, D.C. : World Bank, 1995. 18 p.
- LEE, J. "A formal approach to hydrological model conceptualization." *Hydrological Sciences Journal*, 1993; 38(5) : 391-400.
- LE GALLOU, F. & BOUCHON-MEUNIER, B.(eds.). *Systémique. Théorie et applications*. Paris : Technique & Documentation - Lavoisier, 1992. 341 p.
- LE GOULVEN, P. & RUF, T. "L'eau et sa gestion dans la planification de l'irrigation traditionnelle des Andes Equatoriennes." In : CARRÉ, P. (ed.). *Usage agricole de l'eau*. Coll. Colloques et Séminaires, Sixièmes Journées Hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, les 12 et 13 september 1990. Paris : ORSTOM Editions, 1992. p 203-224.
- LEIPNIK, M.R.; KEMP, K.K. & LOAICIGA, H.A. "Implementation of GIS for Water Resources Planning and Management." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1993; 119(2) : 184-205.
- LE MOIGNE, J.L. *La modélisation des systèmes complexes*. Coll. Afcet Systèmes. Paris : Dunod, 1995. 178 p. (1re éd. : Bordas, Paris 1990).
- LE MOIGNE, J.L. *La théorie du système général. Théorie de la modélisation*, 4e éd. Paris : Presses Universitaires de France (PUF), 1994. 338 p. (1re éd. : 1977).
- LE MOIGNE, J.L. *Les systèmes de décision dans les organisations*. Paris : Presses Universitaires de France (PUF), 1974. 244 p.
- LE MOIGNE, J.L. *Les systèmes d'information dans les organisations*. Paris : Presses Universitaires de France (PUF), 1973. 237 p.
- LESOURNE, J.(ed.). *La notion de système dans les sciences contemporaines*, Tome I : Méthodologies. Colloque CNRS "Analyse de Système", Lyon, 1980. Aix-en-Provence : Librairie de l'Université, 1980a. 533 p.
- LESOURNE, J.(ed.). *La notion de système dans les sciences contemporaines*, Tome II : Epistémologie. Colloque CNRS "Analyse de Système", Lyon, 1980. Aix-en-Provence : Librairie de l'Universitaire, 1980b. 317 p.
- LESOURNE, J. *Les systèmes du destin*. Paris : Dalloz économie, 1976. 449 p.
- L'HOTE, Y. "Rappel de l'histoire du concept du cycle de l'eau dans la culture occidentale. Son enseignement en France, hier et aujourd'hui." In : *Water for the Future : Hydrology in Perspective*. IAHS Publication, n° 164. Oxfordshire : IAHS Press, Institute of Hydrology, 1987. p 37-45.

- LI, J. "Contribution à l'optimisation de la gestion des retenues. Applications particulières de la méthode dit "du fil tendu"." 158 p. *Thèse de Doctorat* : Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc (USTL), Montpellier : 1987.
- LIEN, N.D. "Probabilistic Storage Models and Reservoir Reliability Estimates." 183 p. *Doctoral Dissertation* : Asian Institute of Technology (AIT), Bangkok : 1978.
- LIVINGSTON, M.L. "Normative and Positive Aspects of Institutional Economics : The Implications for Water Policy." *Water Resources Research*, 1993; 29(4) : 815-821.
- LOUCKS, D.P. "Quantifying trends in system sustainability." *Hydrological Sciences Journal*, 1997; 42(4) : 513-530.
- LOUCKS, D.P. "Surface water resource systems." In : MAYS, L.W. (ed.). *Water Resources Handbook*. New York : McGraw-Hill, Inc., 1996. p 15.1-15.44.
- LOUCKS, D.P. "Developing and Implementing Decision Support Systems : a critique and a challenge." *Water Resources Bulletin*, 1995; 31(4) : 571-582.
- LOUCKS, D.P. "Computer-Aided Support for Water Resources Research and Planning." In : LOUCKS, D.P. & DA COSTA, J.R. (eds.). *Decision Support Systems : Water Resources Planning*. Berlin : Springer-Verlag, 1991. p 173-188.
- LOUCKS, D.P. & DA COSTA, J.R. "Computer-Aided Decision Support in Water Resources Planning and Management." In : LOUCKS, D.P. & DA COSTA, J.R. (eds.). *Decision Support Systems : Water Resources Planning*. Berlin : Springer-Verlag, 1991. p 3-41.
- LOUCKS, D.P. & DE COSTA, J.R.(eds.). *Decision Support Systems : Water Resources Planning*. NATO ASI Series G : Ecological Sciences, Vol. 26. Berlin : Springer-Verlag, 1991. 574 p.
- LOUCKS, D.P. & FEDRA, K. "Impact of Changing Computer Technology on Hydrologic and Water Resource Modeling." *Reviews of Geophysics*, 1987; 25(2) : 107-112.
- LOUCKS, D.P.; FRENCH, P.N. & TOYLOR, M.R. *IRAS : Interactive River-Aquifer Simulation*. Ithaca, New York : Civil and Environmental Engineering, Cornell University, 1995. 255 p.
- LOUCKS, D.P.; KINDLER, J. & FEDRA, K. "Interactive Water Resources Modeling and Model Use : An Overview." *Water Resources Research*, 1985; 21(2) : 95-102.
- LOUCKS, D.P. & SIGVALDASON, O.T. "Multiple-reservoir Operation in North America." In : KACZMAREK, Z. & KINDLER, J. (eds.). *The Operation of Multiple Reservoirs Systems*. IASA Collaborative Proceeding Series, CP-82-S3. Laxenburg (Austria) : International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), 1982. p 1-103.
- LOUCKS, D.P. & SIGVALDASON, O.T. "Operations Research in Multiple-reservoir Operation." In : YARON, D. & TAPIERO, C.S. (eds.). *Operation Research in Agriculture and Water Resources*. Amsterdam : North-Holland Publishing Company, 1980. p 41-66.
- LOUCKS, D.P.; STEDINGER, J.R. & HAITH, D.A. *Water Resource Systems Planning and Analysis*. Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall, 1981. 559 p.
- LOUIE, P.W.F.; YEH, W.W.G. & HSU, N.S. "Multiobjective Water Resources Management Planning." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1984; 110(1) : 39-56.
- LOUMAGNE, C.; CHKIR, N.; NORMAND, M.; OTTLÉ, C. & VIDAL-MADJAR, D. "Introduction of the soil/vegetation/atmosphere continuum in a conceptual rainfall/runoff model." *Hydrological Sciences Journal*, 1996; 41(6) : 889-902.
- LOWING, M.J.(ed.). *Optimal allocation of water resources*. IAHS Publication, No.135. Wallingford : International Association of Hydrological Sciences (IAHS), 1982. 416 p.
- LUITEN, J.P.A. "The Water System Explorations - A New Dutch Project (The Aquatic Outlook) for Combining Monitoring, Research and Policy Analysis for Intergrated Water Management." *Water Science and Technology*, 1995; 31(8) : 329-344.
- LUITEN, J.P.A. "Policy analysis of water management for the Netherlands (PAWN). Modelling efforts related the 3rd note on water resources management." In : BOGARDI, J.J. & NACHTNEBEL, H.P.

- (eds.). *Multicriteria Decision Analysis in Water Resources Management*. Paris : International Hydrological programme, UNESCO, 1994. p 322-340.
- MAHIDOL UNIVERSITY. *Water Resources Management of the Tha Chin and Mae Klong Basins*. Report prepared for MWA. Bangkok : Department of Sanitary Engineering, Mahidol University, 1994. (3 Volumes).
- MAITA, H.; NAGAI, T.; VUDHIVANICH, V.; KWANYUEN, B.; NGERNPRASERTSRI, S.; TANGTHAM, N. & LORSIRIRAT, K. "Analysis of suspended sediment yield and watershed characteristics in Mae Klong River Basin." In : *Proceeding of the Workshop on Sustainable Development of Agriculture and Organizational Management of Chao Phraya and Mae Klong Basins, Kasetsart University, Bangkok, October 30, 1998*. Bangkok : Kasetsart University/University of Tsukuba (Japan), 1998. p 19.
- MAKHLOUF, Z. & MICHEL, C. "A two-parameter monthly water balance model for French watersheds." *Journal of Hydrology*, 1994; 162 : 299-318.
- MAKOWSKI, M. *Design and Implementation of Model-based Decision Support Systems*. Laxenburg, Austria : International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), 1994. 34 p. (WP-94-86).
- MAKOWSKI, M. *Guidelines for Software Development for Decision Support Systems*. Laxenburg, Austria : International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), 1991a. 13 p. (WP-91-15).
- MAKOWSKI, M. *Selected issues of design and implementation of Decision Support Systems*. Laxenburg, Austria : International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), 1991b. 34 p. (WP-91-16).
- MALATERRE, P.O. "Modélisation, analyse et commande optimale LQR d'un canal d'irrigation." 220 p. *Thèse de Doctorat* : Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (ENGREF), Montpellier : 1994.
- MARGAT, J. "Eau, développement économique et population." *Revue Française de Géoéconomie*, 1998; 4 : 63-76.
- MARGAT, J. *Les ressources en eau. Conception, évaluation, cartographie, comptabilité*. Coll. Manuels et Méthodes, n° 28. Orléans : Editions BRGM, 1996. 148 p.
- MASSE, P. *Le choix des investissements : critères et méthodes*. Paris : Dunod, 1964. 501 p. (2e éd., 1968).
- MATARASSO, P. "Eléments sur la construction de modèles hommes-nature intégrant des phénomènes physiques, biologiques et économiques dans le cadre de recherches sur l'environnement." In : REYNIERS, F.N. & BENOIT-CATTIN, M. (eds.). *Couplage de modèles en agriculture*. Actes du séminaire, 14-15 juin 1995, Montpellier, France. Montpellier : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), 1996. p 9-15.
- MAYS, L.W.(ed.). *Water Resources Handbook*. New York : McGraw-Hill, Inc., 1996.
- MAYS, L.W. & TUNG, Y.K. *Hydrosystems Engineering and Management*. New York : McGraw-Hill, Inc., 1992. 530 p.
- MCKINNEY, D.C.; CAI, X.; ROSEGRANT, M.W.; RINGLER, C. & SCOTT, C.A. *Modeling Water Resources Management at the Basin Level : Review and Future Directions*. SWIM Paper, n° 6. Colombo : International Water Management Institute (IWMI), 1999. 59 p.
- MEIJERS, H. "Involvement of Stakeholders in Management of a Water Reservoir in Takeo Province, Cambodia : Participation in and Appreciation of Decision Making Processes." 93 p. *Master Thesis* : Asian Institute of Technology (AIT), Bangkok : 1995. (with annex).
- MEKPRUKSAWONG, P. "Spatial Rainfall Distribution and Its Impact on the Water Demand of a Large Irrigation System." 76 p. *Master Thesis* : Asian Institute of Technology (AIT), Bangkok : 1991. (WA-92-17; with appendix).
- MELESE, J. *Approches systémiques des organisations. Vers l'entreprise à complexité humaine*. Paris : Hommes et Techniques, 1979a. 158 p.
- MELESE, J. *L'analyse modulaire des systèmes de gestion*, 2e éd. Paris : Hommes et Techniques, 1979b. 233 p. (1re éd. : 1972).

- MEYLAN, P. & MUSY, A. *Hydrologie fréquentielle*, version provisoire. Lausanne : Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), 1996.
- MICHEL, C. "Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle conceptuel à un seul paramètre?" *La Houille Blanche*, 1983; 1 : 39-44.
- MOLDEN, D.J. *Accounting for Water Use and Productivity*. SWIM Paper, n° 1. Colombo : International Water Management Institute (IWMI), 1997. 16 p.
- MOLLE, F. "Caractéristiques et potentialités des "Açudes" du NORDESTE brésilien." 381 p. *Thèse de Doctorat* : Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc (USTL), Montpellier : 1991.
- MOLLE, F.; CHOMPADIST, C. & SOPAPHUN, P. *Assessment of water control at the tertiary and farm levels : a case study in the Kamphaengsaen Irrigation Project*. DORAS-DELTA : research report, n° 3. Bangkok : DORAS Center, Kasetsart University/ORSTOM, 1997. 58 p.
- MOLLE, F.; DURONGDEJ, S.; CHOMPADIST, C.; JOANNON, A. & LIMSAWAD, Y. *Improvement of rice cultivation and water management in the flooded area of the Central Plain of Thailand. A zoning of rice systems by using remote sensing imagery*. DORAS-DELTA : Research Report, no.5. Bangkok : DORAS Center, Kasetsart University/ORSTOM, 1999. 157 p.
- MOLLE, F. & RUF, T. "Eléments pour une approche systémique du fonctionnement des périmètres irrigués." In : *Systems-Oriented Research in Agriculture and Rural Development*. International Symposium, Montpellier, France. 21-25 November 1994. Montpellier : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), 1994. p 114-118.
- MOLLE, F.; SUTTHI, C.; KEAWKULAYA, J. & KORPRADITSKUL, R. *Water management in poldered raised-bed systems : a case study in the Chao Phraya delta*. DORAS-DELTA : research report, no; 4. Bangkok : DORAS Center, Kasetsart University/ORSTOM, 1998. 68 p.
- MOLLE, F. & VALETTE, F. "Quelques réflexions sur l'apport de la modélisation dans les recherches-système." In : *Systems-Oriented Research in Agriculture and Rural Development*. International Symposium, Montpellier, France. 21-25 November 1994. Montpellier : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), 1994. p 193-198.
- MONSEF, Y. *Modélisation et simulation des systèmes complexes. Concepts, Méthodes et Outils*. Paris : Technique & Documentation, 1996. 277 p.
- MONTGINOUL, M. "Une approche économique de la gestion de l'eau d'irrigation : des instruments, de l'information et des acteurs." 296 p. *Thèse de Docteur* : Université Montpellier I - Faculté des Sciences Economiques, Montpellier : 1997.
- MORIN, E. *La tête bien faite*. coll. "L'histoire immédiate". Paris : Le Seuil, 1999. 154 p.
- MORIN, E. *Introduction à la pensée complexe*. coll. "Communication et complexité". Paris : ESF, 1990.
- MORIN, E. *La méthode. Tome 1. La Nature de la Nature*. Coll. Points Essais, n° 123. Paris : Le Seuil, 1977. 399 p.
- MÜLLER, N. & HAHN, H.H. "The German Water Authorities Needs for Computer-Aided Support Systems." In : LOUCKS, D.P. & DA COSTA, J.R. (eds.). *Decision Support Systems : Water Resources Planning*. Berlin : Springer-Verlag, 1991. p 295-304.
- NASH, J.E. & SUTCLIFFE, J.V. "River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles." *Journal of Hydrology*, 1970; 10 : 282-290.
- NG, T.P. "Operation of a Multiple Purpose Reservoir by Linear Decision Rule." 55 p. *Master Thesis* : Asian Institute of Technology (AIT), Bangkok : 1977. (Thesis n° 937).
- NIYAMAPA, T.; BAHALAYODOHIN, B. & KOIKE, M. "The State-of-the-Art of Soil Compaction in Agriculture." In : *Proceeding of the Workshop on Sustainable Development of Agriculture and Organizational Management of Chao Phraya and Mae Klong Basins, Kasetsart University, Bangkok, October 30, 1998*. Bangkok : Kasetsart University/University of Tsukuba (Japan), 1998. p 15.

- NOUVELOT, J.F.; LE GOULVEN, P. & POURRUT, P. "Analyse statistique et régionalisation des précipitations en Equateur." In : POURRUT, P. (ed.). *L'eau en Equateur : Principaux acquis en hydroclimatologie*. Paris : ORSTOM Edition, 1994. p 43-86.
- NSO. *Statistical Reports of Region, Bangkok Metropolitan and Vivinity Region 1998*. Bangkok : National Statistical Office, 1998. 137 p.
- NSO. *Statistical Reports of Region, Western Region 1997*. Bangkok : National Statistical Office, 1997. 133 p.
- OAE. *Agricultural Statistics of Thailand, Crop Year 1996/97*. Agricultural statistics, n° 18/1998. Bangkok : Center for Agricultural Information, Office of Agricultural Economics, 1998. 309 p.
- OAE. *Agricultural Statistics of Thailand, Crop Year 1991/92*. Bangkok : Center for Agricultural Statistics, Office of Agricultural Economics, 1992. 270 p.
- OBERLIN, G. & HUBERT, P. "Refondation du concept de régime hydrologique." In : BARRIOT, J.P. (ed.). *CNFGG - Rapport quadriennal 1995-1998*. Paris : Comité National Français de Géodésie et Geophysique (CNFGG), 1999. p 269-277.
- OCDE. *Gestion des projets d'aménagement des eaux*. Paris : Organisation de Coopération et de Développement Economique (OCDE), 1985. 269 p.
- O'CONNELL, P.E.; NASH, J.E. & FARRELL, J.P. "River flow forecasting through conceptual models. Part II - The Brosna catchment at ferbane." *Journal of Hydrology*, 1970; 10 : 317-329.
- OIEAU. *Glossaire National des SDAGE*. Office International de l'Eau (OIEAU), Paris., 1995. (<http://www.oieau.fr/eaudoc/integral/confital.htm>).
- OLIVEIRA, R. & LOUCKS, D.P. "Operating rules for multireservoir systems." *Water Resources Research*, 1997; 33(4) : 839-852.
- OPDAM, H.J. "Policy analysis for water management of the Twenthekanaal." In : PLATE, E. & BURAS, N. (eds.). *Scientific procedures applied to the planning, design and management of water resources systems*. IAHS Publication, N° 147. Wallingford, Oxon (UK) : International Association of Hydrological Sciences (IAHS), 1983. p 589-610.
- OSTROM, E. "Design Principles in Long-Enduring Irrigation Institutions." *Water Resources Research*, 1993; 29(7) : 1907-1942.
- OUARDA, T.B.M.J.; RASMUSSEN, P.F.; BOBEE, B. & BERNIER, J. "Utilisation de l'information historique en analyse hydrologique fréquentielle." *Revue des sciences de l'eau*, 1998; n° spécial : 41-49.
- OUPRASITWONG, N. *The Occurrence of Droughts in Thailand*. Technical Document, N° 551.577.3-02-1994. Bangkok : Meteorological Department, 1994. 44 p. (in Thai).
- PARENT, E. "Elaboration des consignes de gestion des barrages réservoirs." 346 p. *Thèse de Doctorat* : Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC), Paris : 1991.
- PARENT, E. & DUCKSTEIN, L. "Systems engineering of natural resources under changing physical conditions : State of the art in systems modeling." In : DUCKSTEIN, L. & PARENT, E. (eds.). *Engineering Risk in Natural Resources Management*. NATO ASI Series E : Applied Sciences, Vol. 275. The Netherlands : Kluwer Academic Publishers, 1994. p 19-42.
- PARENT, E. & ROCHE, P.A. "Simulation des systèmes complexes d'ouvrages." In : VALIRON, F. (ed.). *Gestion des Eaux : automatisation - information - télégestion*. Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1988. p 275-282.
- PERRY, C.J.; ROCK, M. & SECKLER, D. *Water as an Economic Good : A Solution, or a Problem?* Research Report, n° 14. Colombo : International Water Management Institute (IWMI), 1997. 16 p.
- PHONGPRAPAPHAN, S. "Operation of Reservoir Systems - A Case Study using Dynamic Programming." 134 p. *Master Thesis* : Asian Institute of Technology, Bangkok : 1977. (Thesis n° 936).

- PLATE, E.J. & BURAS, N.(eds.). *Scientific procedures applied to the planning : Design and management of water resources systems*. IAHS Publication, N° 147. Wallingford, UK : International Association of Hydrological Sciences (IAHS), 1985. 647 p.
- PONGSUDHIRAK, T. "Water Allocation Conflicts in Central, Thailand." In : *Water Conflicts*. Bangkok : Thailand Development Research Institute (TDRI), 1994. p 239-259.
- POPPER, J. & MALBRANCKE, J. *La dynamique des systèmes, principes et applications*. Paris : Editions d'Organisation, 1973. 272 p.
- POUGET, J.C. *Guide de l'utilisateur HYDRAM : Modélisation d'HYDRo-Aménagement*. Montpellier : ORSTOM, 1996. 94 p.
- POUGET, J.C. "HYDRAM : Aide à la gestion d'HYDRo-Aménagements. Application à l'irrigation en Guadeloupe." In : *Usage agricole de l'eau*. Sixième Journées Hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, les 12 et 13 septembre 1990. Paris : ORSTOM Editions, 1995. p 153-172.
- POUGET, J.C. *Elaboration d'un outil d'aide à la décision dans l'aménagement des eaux : HYDRAM. Application à l'irrigation de la Grand-Terre*. Guadeloupe, France : ORSTOM/Conseil Général de la Guadeloupe, 1994. 124 p. (+ annexes).
- POUGET, J.C. "HYDRAM : Aide à la gestion d'HYDRo-AMénagements. Application à l'irrigation en Guadeloupe." In : CARRÉ, P. (ed.). *Usage agricole de l'eau*. Coll. Colloques et Séminaires, Sixième Journées Hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, les 12 et 13 septembre 1990. Paris : ORSTOM Editions, 1992. p 153-172.
- POURRUT, P.(ed.). *L'eau en Equateur : Principaux acquis en hydroclimatologie*. Coll. Etudes et Thèses. Paris : ORSTOM Editions, 1994.
- PUNYINDU, P. "Simulation of a Complex Reservoir System in Thailand." 195 p. *Doctoral Dissertation* : Asian Institute of Technology (AIT), Bangkok : 1995.
- RAJASEKARAM, V. "Risk Based Optimal Reservoir Operation for Irrigation Systems : Mae Klong Irrigation Project, Thailand." 170 p. *Doctoral Dissertation* : Asian Institute of Technology, Bangkok : 1997. (+ Appendix).
- RAMAN, H. & CHANDRAMOULI, V. "Deriving a General Operating Policy for Reservoirs Using Neural Network." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1996; 122(5) : 342-347.
- RAMNARONG, V. & WONGSAWAT, S. "Groundwater potential in Thailand." *Journal of Hydrologists Association*, 1998; 2 : 240-276. (in Thai).
- RANDERS, J.(ed.). *Elements of the System Dynamics Method*. Cambridge, Massachusetts : Productivity Press, 1980. 321 p.
- RASMIDATTA, W. "An Economic Analysis of Irrigation Pricing : A Case of Mae Klong right Bank Irrigation Project." 117 p. *Master Thesis* : Kasetsart University, Bangkok : 1996. (in Thai).
- RATNAYAKE, U.R. "Sequential Stochastic Optimization of a Reservoir system." 151 p. *Doctoral Dissertation* : Asian Institute of Technology, Bangkok : 1995.
- RATNAYAKE, U.R. "Operation Rules by Heuristic and Optimizing Approaches for Series or Parallel Reservoirs." 119 p. *Master Thesis* : Asian Institute of Technology, Bangkok : 1990. (Thesis n° WA-90-28).
- REITSMA, R.F. "Structure and support of water-resources management and decision-making." *Journal of Hydrology*, 1996; 177 : 253-268.
- REITSMA, R.F.; ZAGONA, E.A.; CHAPRA, S.C. & STRZEPEK, K.M. "Decision Support Systems (DSS) for water resources management." In : MAYS, L.W. (ed.). *Water Resources Handbook*. New York : McGraw-Hill, Inc., 1996. p 33.1-33.35.
- REY, J. "Apports de la Gestion Industrielle au Management des Périmètres Irrigués : Comment mieux piloter la production?" 177 p. *Thèse de Doctorat* : Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris (ENSM), Paris : 1996.

- REYNIERS, F.N. & BENOIT-CATTIN, M.(eds.). *Couplage de modèles en agriculture*. Coll. Colloques, Actes du séminaire, 14-15 juin 1995, Montpellier, France. Montpellier : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), 1996. 114 p.
- RID. *Study of Water Use in the Mae Klong River Basin*. Bangkok : Water Allocation Section, Royal Irrigation Department, 1995.
- RID. *Water Management for Rice Cultivation in Thailand*. Bangkok : Royal Irrigation Department, 1991. 38 p.
- RID. *Water Delivery System, Phase 2*, 1 :100,000, Greater Mae Klong Irrigation Project, MK. 1086-1. Royal Irrigation Department, Bangkok, 1981.
- RID. *The Greater Mae Klong Multi-Purpose Project, Thailand : Second Stage Development for Irrigation, Flood Control, and Hydro Power*. Feasibility report. Bangkok : Royal Irrigation Department, 1968. (6 volumes, Main Report and Appendix A-E).
- RID. *The Greater Mae Klong Multi-Purpose Project, Thailand : First Stage Development for Irrigation and Flood Protection*. Feasibility report. Bangkok : Royal Irrigation Department, 1962. (5 volumes, Main Report and Appendix A-D).
- ROCHE, M.F. *Dictionnaire français d'hydrologie de surface : avec équivalents en anglais - espagnol - allemand*. Paris : Masson, 1986. 288 p.
- ROCHE, M. "Hydrologie et aménagement des eaux (Méthodes structurales)." *Cahier ORSTOM*, Série Hydrologie, 1973; X(1) : 3-104.
- ROCHE, M. "Les divers types de modèles déterministes." *Cahier ORSTOM*, Série Hydrologie, 1970; VII(4) : 39-66.
- ROCHE, M. *Hydrologie de surface*. Paris : Gauthier-Villars éditeur, 1963. 430 p.
- ROGERS, P.P. & FIERING, M.B. "Use of System Analysis in Water Management." *Water Resources Research*, 1986; 22(9) : 146S-158S.
- ROMIJN, E. & TAMMINGA, M. "Allocation of water resources in the eastern part of the Netherlands." In : LOWING, M.J. (ed.). *Optimal Allocation of Water Resources*. IAHS Publication, No.135. Wallingford, Oxon (UK) : International Association of Hydrological Sciences (IAHS), 1982. p 137-153.
- ROQUEPLO, P. *Enter savoir et décision, l'expertise scientifique*. Une conférence-débat organisée par le groupe Sciences en questions, Paris, INRA, 9 avril 1996. Paris : INRA Editions, 1997. 111 p.
- ROSSEL, F. "Influence du Niño sur les régimes pluviométriques de l'Equateur." 289 p. *Thèse de Doctorat* : Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc (USTL), Montpellier : 1997. (annexes, 95 p.).
- ROY, B. *Méthodologie Multicritère d'Aide à la Décision*. Coll. Gestion, Série : Production et techniques quantitatives appliquées à la gestion. Paris : Economica, 1985. 423 p.
- RUCHAY, D. "Living with Water : Rhine River Basin Management." *Water Science and Technology*, 1995; 31(8) : 27-32.
- SAEED, K. *Development Planning and Policy Design : System Dynamics Approach*. Aldershot, England : Avebury, 1994. 254 p.
- SAENGKHEAW, B. "Electricity Pricing in Thailand for the Highest Welfare Benefit." 128 p. *Master Thesis* : Thammasart University, Bangkok : 1985. (in Thai).
- SAKHO, M., A. "Incidences de l'instabilité des ressources en eau de surface sur les performances simulées d'un système d'eau. Exemple du Sassandra en Côte d'Ivoire." 211 p. *Thèse de Doctorat* : Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc (USTL), Montpellier : 1991. (avec annexes).
- SAKSIRIKOSOL, S. "A preliminary study of the construction of low dams across Khwae Noi river downstream of Khao Laem dam for electricity generation." p. *Master Thesis* : Chulalongkorn University, Bangkok : 1995.

- SAKUMA, T.; SATOH, M.; SOPAPHUN, P. & KWANYUEN, B. "The compared performances of land consolidation projects in paddy fields in Thailand and in Japan." In : *Proceeding of the Workshop on Sustainable Development of Agriculture and Organizational Management of Chao Phraya and Mae Klong Basins, Kasetsart University, Bangkok, October 30, 1998*. Bangkok : Kasetsart University/University of Tsukuba (Japan), 1998. p 13.
- SATOH, M.; KAWABATA, A.; VUDHIVANICH, V. & CHERDCHANPIPAT, N. "Reservoir Operation Principles for Stable Water Supply in the Mae Klong River Basin." In : *Proceeding of Workshop on Sustainable Management of the Mae Klong Basin, Kasetsart University, Bangkok, October 12, 1999*. Bangkok : Kasetsart University, 1999.
- SELVALINGAM, S. & PHONGPRAPAPHAN, S. "Operation of Meklong basin reservoirs system, Thailand." In : *Proceeding of the International Conference on Water Resources Engineering, Bangkok, Thailand, 10-13 January, 1978*, Volume II : Water Resources Development and Management. Bangkok : International Association for Hydraulic Research (IAHR), 1978. p 1289-1308.
- SENGE, P.M. *The Fifth Discipline : The Art and Practice of the Learning Organization*. New York : Currency and Doubleday, 1990. 423 p.
- SENGE, P.M.; KLEINER, A.; ROBERTS, C.; ROSS, R.B. & SMITH, B.J. *The Fifth Discipline Fieldbook : Strategies and Tools for Building a Learning Organization*. New York : Currency and Doubleday, 1994. 593 p.
- SERVAT, E. & DEZETTER, A. "Sélection de critères numériques de calage dans le cadre d'une modélisation pluie-débit en zone de savane soudanaise." *Hydrologie continentale*, 1990; 5(2) : 147-165.
- SERVAT, E. & DEZETTER, A. "Modélisation globale de la relation pluie-débit : des outils au service de l'évaluation des ressources en eau." *Hydrologie continentale*, 1988; 3(2) : 117-129.
- SETHAPUTRA, S.; PANAYOTOU, T. & WANGWACHARAKUL, V. *Water Shortages : Managing Demand to Expand Supply*. The 1990 TDRI Year-End Conference "Industrializing Thailand and its Impact on the Environment", Session : Natural Resources for the Future, December 8-9, 1990, Ambassador City Jomtien, Chon Buri, Research Report No.3. Bangkok : Thailand Development Research Institute (TDRI), 1990. 103 p.
- SHAFFER, J.M.; LABADIE, J.W. & JONES, E.B. "Analysis of Firm Water Supply under Complex Institutional Constraints." *Water Resources Bulletin*, 1981; 17(3) : 373-380.
- SHARMA, A. "Seasonal to interannual rainfall probabilistic forecasts for improved water supply management : Part 1 - A Strategy for system predictor identification." *Journal of Hydrology*, 2000a; 239(1-4) : 232-239.
- SHARMA, A. "Seasonal to interannual rainfall probabilistic forecasts for improved water supply management : Part 3 - A nonparametric probabilistic forecast model." *Journal of Hydrology*, 2000b; 239(1-4) : 249-258.
- SHARMA, A.; LUK, K.C.; CORDERY, I. & LALL, U. "Seasonal to interannual rainfall probabilistic forecasts for improved water supply management : Part 2 - Predictor identification of quarterly rainfall using ocean-atmosphere information." *Journal of Hydrology*, 2000; 239(1-4) : 240-248.
- SHRESTHA, D.L. "Multicriteria Decision Making in Reservoir System Planning." 139 p. *Doctoral Dissertation* : Asian Institute of Technology, Bangkok : 1991.
- SHRESTHA, D.L. "Application of Fuzzy Set Theory in Water Resource Management." 36 p. *Special Study Report* : Asian Institute of Technology, Bangkok : 1989.
- SIGVALDASON, O.T. "A Simulation Model for Operating a Multipurpose Multireservoir System." *Water Resources Research*, 1976; 12(2) : 263-278.
- SILAPAKORN UNIVERSITY. *Water Quality Study and Monitoring Project in the Central Plain : Mae Klong, Khwae Noi and Khwae Yai Rivers*. Report prepared for Pollution Control Department, Ministry of Sciences, Technology and Environment. Nakorn Pathom : Department of Environment Science, Silapakorn University, 1994. 136 p. (in Thai).
- SIMON, H.A. *The Sciences of the Artificial*, 3rd ed. Cambridge, Massachusetts : The MIT Press, 1996. 231 p. (1st ed., 1969).

- SIMON, H.A. *Le nouveau management : La décision par les ordinateurs*. Paris : Economica, 1980. 159 p.
(Trad. de "The New Science of Management Decision". Englewood Cliffs, New Jersey : Prentice-Hall, Inc., 1977, par F.Arditi).
- SIMON, H.A. *The new science of management decision*. New York : Harper & Row, 1960. 50 p.
- SIMONOVIC, S.P. "Risk in sustainable water resources management." In : ROSBJERG, D.; BOUTAYEB, Nour-E.; GUSTARD, A.; KUNGZEWICZ, Z.W. & RASMUSSEN, P.F. (eds.). *Sustainability of Water Resources under Increasing Uncertainty*. IAHS Publication, n° 240. Wallingford, Oxfordshire (UK) : IAHS Press, Institute of Hydrology, 1997a. p 3-17.
- SIMONOVIC, S.P. "Sustainable development of water resources : introduction." *Hydrological Sciences Journal*, 1997b; 42(4) : 449-450.
- SIMONOVIC, S.P. "Decision Support Systems for Sustainable Management of Water Resources : 1. General Principles." *Water International*, 1996a; 21 : 223-232.
- SIMONOVIC, S.P. "Decision Support Systems for Sustainable Management of Water Resources : 2. Case Studies." *Water International*, 1996b; 21 : 223-244.
- SIMONOVIC, S.P. & BENDER, M.J. "Collaborative planning-support system : an approach for determining evaluation criteria." *Journal of Hydrology*, 1996; 177 : 237-251.
- SIMONOVIC, S.P. & FAHMY, H. "A new modeling approach for water resources policy analysis." *Water-Resources Research*, 1999; 35(1) : 295-304.
- SIMONOVIC, S.P.; FAHMY, H. & EL-SHORBAGY, A. "The Use of Object-Oriented Modeling for Water Resources Planning in Egypt." *Water Resources Management*, 1997; 11 : 243-261.
- SIMONOVIC, S.P.; GOULTER, I.C.; BURN, D.H. & LENCE, B.J.(eds.). *Water Resource Systems Application*. Winnipeg, Canada : Department of Civil Engineering, University of Manitoba, 1990. 657 p.
- SIMONOVIC, S.P. & GRAHOVAC, J. "Evolution of a Decision Support System for Reservoir Operation : Manitoba Hydro Case Study." In : LOUCKS, D.P. & DA COSTA, J.R. (eds.). *Decision Support Systems : Water Resources Planning*. Berlin : Springer-Verlag, 1991. p 485-526.
- SIMONOVIC, S.P.; KUNDZEWICZ, Z.; ROSBJERG, D. & TAKEUCHI, K.(eds.). *Modelling and Management of Sustainable Basin-Scale Water Resource Systems*. IAHS Publication, N° 231. Wallingford, Oxfordshire (UK) : IAHS Press, Institute of Hydrology, 1995. 434 p.
- SIMONOVIC, S.P. & MARINO, M.A. "Reliability Programing in Reservoir Management. 3. System of Multipurpose Reservoirs." *Water Resources Research*, 1982; 18(4) : 735-743.
- SIMONOVIC, S.P. & MARINO, M.A. "Reliability Programing in Reservoir Management. 2. Risk-Loss Functions." *Water Resources Research*, 1981; 17(4) : 822-826.
- SIMONOVIC, S.P. & MARINO, M.A. "Reliability Programing in Reservoir Management. 1. Single Multipurpose Reservoir." *Water Resources Research*, 1980; 16(5) : 844-848.
- SIMONOVIC, S.P.; VENEMA, H.D. & BURN, D.H. "Risk-based parameter selection for short-term reservoir operation." *Journal of Hydrology*, 1992; 131 : 269-291.
- SIRIKULCHAYANONT, V. "A Techno-economic Approach on Water Quality Management : A Case Applied to the Mae Klong River." 79 p. *Master Thesis* : Thammasat University, Bangkok : 1979.
- SIVAARTHITKUL, V. "Quantitative Assessment of Efficiency Increase of Reservoirs by Improvement of Inflow Forecasts." 220 p. *Doctoral Dissertation* : Yamanashi University, Yamanashi (Japan) : 1996.
- SMEC. *Khao Laem Project*. Feasibility report prepared for EGAT, n° 841-2004. Bangkok : Snowy Mountains Engineering Corporation (SMEC), 1977.
- SONCINI-SESSA, R.; GANDOLFI, C.; NARDINI, A. & KRASZEWSKI, A. "Computer-Aided Water Reservoir Management : A Prototype Two-Level DSS." In : LOUCKS, D.P. & DA COSTA, J.R. (eds.). *Decision Support Systems : Water Resources Planning*. Berlin : Springer-Verlag, 1991. p 527-574.

- SOPHOCLEOUS, M.A.; KOELIKER, J.K.; GOVINDARAJU, R.S.; BIRDIE, T.; RAMIREDDYGARI, S.R. & PERKINS, S.P. "Integrated numerical modeling for basin-wide water management : The case of the Rattlesnake Creek basin in south-central Kansas." *Journal of Hydrology*, 1999; 214 : 179-196.
- SRIJANTR, P. "Appui méthodologique à l'application d'une politique agricole : Utilisation de la télédétection pour caractériser les sols en vue de la gestion des ressources en eau de la Plaine Centrale de Thaïlande (Kamphaengsaen, Province de Nakhon Pathom)." 260 p. *Thèse de Doctorat* : Université de Bordeaux III : 1996.
- SRIJANTR, T. "Transformations du système agraire de Thung Look Nok (Plaine Centrale) et perspectives de l'agriculture thaïlandaise." 497 p. *Thèse de Doctorat* : Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris : 1998.
- STERMAN, J.D. *Business Dynamics. Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. New York : Irwin/McGraw-Hill, 2000. 1008 p.
- STERN, C.P. & FINEBERG, H.V.(eds.). *Understanding Risk : Informing Decisions in a Democratic Society*. Committee on Risk Characterization. Commission on Behavioral and Social Sciences and Education. National Research Council. Washington, D.C. : National Academy Press, 1996. 249 p.
- SUGIYAMA, H.; VUDHIVANICH, V.; NGERNPRASERTSRI, S. & LORSIRIRAT, K. "Hydrologic drought characteristics of the upstream reaches of the Mae Klong River." In : *Proceeding of the Workshop on Sustainable Development of Agriculture and Organizational Management of Chao Phraya and Mae Klong Basins, Kasetsart University, Bangkok, October 30, 1998*. Bangkok : Kasetsart University/University of Tsukuba (Japan), 1998. p 12.
- SUGIYAMA, H.; WHITAKER, A.C.; VUDHIVANICH, V.; NGERNPRASERTSRI, S. & LORSIRIRAT, K. "Extension of the Stochastic Flow Duration Curve to the Upper Reaches of Streams." In : *Proceeding of Workshop on Sustainable Management of the Mae Klong Basin, Kasetsart University, Bangkok, October 12, 1999*. Bangkok : Kasetsart University, 1999.
- SUPPATARATARN, P. "Modelling of River Networks." 172 p. *Doctoral Dissertation* : Asian Institute of Technology, Bangkok : 1990. (Diss. n° WA-90-2).
- SUTANTO, A.A. "Development of An Interactive Decision Model for Multiobjective Water Resources Planning." 48 p. *Master Thesis* : Asian Institute of Technology, Bangkok : 1986. (with Appendices A-C).
- TAKEUCHI, K. "Least marginal environmental impact rule for reservoir development." *Hydrological Sciences Journal*, 1997; 42(4) : 583-597.
- TAKEUCHI, K. "Analyses of the flow regime of the Chao Phraya River." In : GLADWELL, J.S. (ed.). *Hydrology of Warm Humid Regions*. IAHS Publication, n° 216. Oxfordshire, UK : IAHS Press, Institute of Hydrology, 1993. p 181-193.
- TAKEUCHI, K. & SIVAARTHITKUL, V. "Assessment of effectiveness of the use of inflow forecasts to reservoir management." In : *Modelling and Management of Sustainable Basin-scale Water Resource Systems*. IAHS Publication, n° 231. Oxfordshire : International Association of Hydrological Sciences (IAHS), 1995.
- TANGTHAM, N.; LORSIRIRAT, K. & KAWAMOTO, M. "New Perspectives for Mae Klong Watershed Resources Management : Balancing Long-term Socio-economic Sustainability with Cumulative Environmental Change." In : *Proceeding of Workshop on Sustainable Management of the Mae Klong Basin, Kasetsart University, Bangkok, October 12, 1999*. Bangkok : Kasetsart University, 1999.
- TDRI & QUEEN'S UNIVERSITY. *Water Conflicts*. Bangkok : Natural Resources and Environment Program, Thailand Development Research Institute, 1994. 259 p.
- TEAM. *Environmental Impact Assessment for Lower Chao Phraya West Bank Area Development Project (T.A. no.1242-THA)*. Final report prepared for the Royal Irrigation Department and the Asian Development Bank. Bangkok : TEAM Consulting Engineers Co., Ltd., 1992.

- TEAM. *U-Thong Irrigation Project : Pre-Feasibility Study*. Summary report prepared for RID. Bangkok : TEAM Consulting Engineers Co., Ltd., 1991.
- TEAM; AACMC & SANYU. *Lower Chao Phraya West Bank Area Development Project*. Final report prepared for Royal Irrigation Department and Asian Development Bank. Bangkok : TEAM/AACMC/SANYU, 1991.
- TEEGAVARAPU, R.S.V. & SIMONOVIC, S.P. "Modeling uncertainty in reservoir loss functions using fuzzy sets." *Water Resources Research*, 1999; 35(9) : 2815-2823.
- TERRY, G.R. & FRANKLIN, S.G. *Les Principes du Management*. Coll. Gestion, Série : Politique générale, Finance et Marketing. Paris : Economica, 1985. 696 p. (Trad. de Principles of Management, 8th ed : Rivhard D. Irwin, Inc., 1982, par P. de Lavergne).
- THAI DCI; SEATEC; TEAM & SAFEGE. *Master Plan for Water Supply and Distribution of Metropolitan Bangkok*, Volume IV - Appendices. Final Report prepared for MWA. Bangkok : Thai DCI Co. Ltd., Southeast Asia Technology Co. Ltd., TEAM Consulting Engineers Co. Ltd., SAFEGE Consulting Engineers, 1990a.
- THAI DCI; SEATEC; TEAM & SAFEGE. *Master Plan for Water Supply and Distribution of Metropolitan Bangkok*, Volume II - Technical Report. Final report prepared for MWA. Bangkok : Thai DCI Co. Ltd., Southeast Asia Technology Co. Ltd., TEAM Consulting Engineers Co. Ltd., SAFEGE Consulting Engineers, 1990b.
- THAI DCI; SEATEC; TEAM & SAFEGE. *Master Plan for Water Supply and Distribution of Metropolitan Bangkok*, Feasibility Study of Raw Water. Report prepared for MWA. Bangkok : Thai DCI Co. Ltd., Southeast Asia Technology Co. Ltd., TEAM Consulting Engineers Co. Ltd., SAFEGE Consulting Engineers, 1990c.
- THAMMASAT UNIVERSITY. *Compilation and Revision of Water Resources Laws*. Report prepared for PCD. Bangkok : Faculty of Law, Thammasat University, 1993a. 115 p. (in Thai with an English summary).
- THAMMASAT UNIVERSITY. *Institutional Arrangements : Chao Phraya River*. Report prepared for PCD. Bangkok : Faculty of Law, Thammasat University, 1993b. 12 p. (in Thai and in English).
- THIEL, D. *Management Industriel. Une approche par la simulation*. Coll. Techniques de Gestion. Paris : Economica, 1993. 233 p.
- THIERRY, D. & MOUTZOPOULOS, C. "Un modèle hydrologique spatialisé pour la simulation de très grands bassins : le modèle EROS, formé de grappes de modèles globaux élémentaires." In : LE BARBE, L. & SERVAT, E. (eds.). *Régionalisation en hydrologie. Application au développement*. Coll. Colloques et Séminaires, Huitièmes Journées Hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, les 22 et 23 septembre 1992. Paris : ORSTOM Editions, 1995. p 285-295.
- THOMPSON, R.G. & YOUNG, H.P. "Forecasting Water Use for Policy Making : A Review." *Water Resources Research*, 1973; 9(4) : 792-799.
- TINGSANCHALI, T.; LOOF, R. & JHA, R. "Water Resources Utilization in the Chao Phraya River Basin with Minimum Water Shortage and Environmental Hazards." In : TINGSANCHALI, T. (ed.). *Proceedings of the International Conference on Environmentally Sound Water Resources Utilization, Bangkok, Thailand, 8-11 November, 1993*. Bangkok : Asian Institute of Technology and International Water Resources Association (IWRA), 1993.
- TISSIER, B. *Education, Formation, Environnement*. Poche Environnement, 11. Paris : Economica, 1998. 112 p.
- TREBUIL, G.; KAOJARERN, S.; TRAIMONGKONKOO, P.; NGERNPRASERTSRI, N. & CASTELLA, Jean-C. *Dynamics of Agrarian Landscapes in Western Thailand*. Bangkok : DORAS Project, Kasetsart University/AIT, 1994. 86 p.
- TSIHRINTZIS, V.A.; HAMID, R. & FUENTES, H.R. "Use of Geographic Information Systems (GIS) in Water Resources : A Review." *Water Resources Management*, 1996; 10 : 251-277.
- TUNG, Y.K. "Uncertainty and reliability analysis." In : MAYS, L.W. (ed.). *Water Resource Handbook*. New York : McGraw-Hill, Inc., 1996. p 7.1-7.65.

- UDAYASEN, N. & McBEAN, E. "Determination of optimum operating policies for a combined hydro-thermal electric system." In : LOUCKS, D.P. & SHAMIR, U. (eds.). *Systems Analysis for Water Resources Management : Closing the Gap Between Theory and Practice*. IAHS Publication, N° 180. Wallingford, UK : International Association of Hydrological Science (IAHS), 1989. p 269-276.
- VACHARASINDHU, C.(ed.). *Feasibility Study for Hydropower Development Project*. Bangkok : Physics Center, 1989. 806 p. (in Thai).
- VALETTE, F. *Les outils de la Recherche Opérationnelle : analyse des fonctions et des complémentarités aux niveaux micro, meso et macro-économique*. Montpellier : Centre d'Ecotechnique, Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), 1990a. 13 p.
- VALETTE, F. *Présentation d'un nouvel outil de simulation : SOSIE 2*. Montpellier : Centre d'Ecotechnique, Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), 1990b. 10 p.
- VALETTE, F. & COLAS, H. *Integrated Water Resources Management Modeling in Mediterranean Region*. Montpellier : Centre d'Ecotechnique du CNRS, 1992. 30 p.
- VALIRON, F. *Gestion des Eaux : automatisation - informatisation - télégestion*, tome 3. Paris : Presse de l'Ecole Nationale de Ponts et Chaussées, 1988. 551 p.
- VALIRON, F. *Gestion des eaux : alimentation en eau et assainissement*, tome 2. Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1985.
- VALIRON, F. *Gestion des eaux : principes-moyens-structures*, tome 1. Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1984. 343 p.
- VAN BEEK, E. "Approach of various competitive water users and impact categories in PAWN (Policy Analysis of Water Management for the Netherlands)." In : LOWING, M.J. (ed.). *Optimal Allocation of Water Resources*. IAHS Publication, No.135. Wallingford, Oxon (UK) : International Association of Hydrological Sciences, 1982. p 123-135.
- VAN DER SLUIJS, J. *Integrated Assessment Models and the Management of Uncertainties*. Laxenburg, Austria : International Institute for Applied Systems Analysis, 1996. 83 p. (WP-96-119).
- VAN DE VEN, F.H.M.; GUTKENHT, D.; LOUCKS, D.P. & SALEWICZ, K.A.(eds.). *Hydrology for the Water Management of Large River Basins*. IAHS Publication, No.201. Wallingford, UK : International Association of Hydrological Sciences (IAHS), 1991. 400 p.
- VAN GIGCH, J.P. *System Design Modeling and Metamodeling*. New York : Plenum Press, 1991. 453 p.
- VAN GIGCH, J.P. *Applied General Systems Theory*. New York : Harper & Row, Publishers, 1974. 439 p.
- VAROQUAUX, W. *Calcul économique et électricité*. Coll. Que sais-je?, n° 3201. Paris : Presses Universitaires de France (PUF), 1996. 127 p.
- VEEN, M.A. & BAARSE, G. "Policy Analysis of Water Management for the Netherlands (PAWN)." In : LOWING, M.J. (ed.). *Optimal Allocation of Water Resources*. IAHS Publication, No.135. Wallingford, Oxon (UK) : International Association of Hydrological Sciences, 1982. p 113-122.
- VEEN, M.A.; BAARSE, G. & VAN BEEK, E. "Water resources management : from policy analysis to policy formulation." In : LOWING, M.J. (ed.). *Optimal Allocation of Water Resources*. IAHS Publication, No.135. Wallingford, Oxon (UK) : International Association of Hydrological Sciences (IAHS), 1982. p 165-175.
- VENTANA SYSTEMS. *Vensim. Modeling Guide, version 3.0*. Harvard, Massachusetts : Ventana Systems, Inc, 1997a. 118 p.
- VENTANA SYSTEMS. *Vensim. Reference Manual, version 3.0*. Harvard, Massachusetts : Ventana Systems, Inc, 1997b. 375 p.
- VENTANA SYSTEMS. *Vensim. Tutorial, version 3.0*. Harvard, Massachusetts : Ventana Systems, Inc, 1997c. 164 p.
- VENTANA SYSTEMS. *Vensim : Ventana Simulation Environment. Reference Manual, version 1.62*. Havard, Massachusetts : Ventana Systems, Inc, 1995a. 413 p.

- VENTANA SYSTEMS. *Vensim : Ventana Simulation Environment. User's Guide, version 1.62*. Harvard, Massachusetts : Ventana Systems, Inc, 1995b. 217 p.
- VERNAY, L. "Mise au point d'un outil d'aide à la gestion et à la définition d'une politique de l'eau dans les îles méditerranéennes, s'appuyant sur des technique adaptées, le cas de Formentera (Baléares, Espagne)." 430 p. *Thèse de Doctorat* : Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc (USTL), Montpellier : 1996. (+annexes).
- VIDAL, A.; LALOUX, S. & LEPOUTRE, D. "Analyse des systèmes d'information et intégration des données spatialisées." *La Houille Blanche*, 1996; 8 : 55-60.
- VILLENEUVE, J.P.; HUBERT, P.; MAILHOT, A. & ROUSSEAU, A.N. "La modélisation hydrologique et la gestion de l'eau." *Revue des sciences de l'eau*, 1998; n° spécial : 19-39.
- VON BERTALANFFY, L. *General System Theory : Foundations, Development, Applications*, Revised ed. New York : George Braziller, 1969. 295 p. (12th paperback printing, 1998).
- VONGVISESSOMJAI, S. & THIMAKORN, P. *Navigation Channel Improvement for the Development of Samut Songkram, Thailand*. Research report n° 77, prepared for the Harbour Department. Bangkok : Asian Institute of Technology, 1979. 94 p.
- VOTRUBA, L. *Analysis of Water Resource Systems*. Development in Water Science, n° 32. Amsterdam : Elsevier, 1988. 454 p.
- VOTRUBA, L. & BROZA, V. *Water Management in Reservoirs*. Development in Water Sciences, n° 33. Amsterdam : Elsevier, 1989. 444 p. (translation by Eva Turkova).
- VUDHIVANICH, V. "Concept of Water Management at Project Level." In : *Dong Tan Sampan 2539*. Bangkok : Kasetsart University Engineering Alumni Association, 1995. p 30-41. (in Thai).
- VUDHIVANICH, V. *Development of Stochastic Model for Streamflow of Meklong River Basin*. Research report. Bangkok : Kasetsart University, 1992. 114 p. (in Thai).
- VUDHIVANICH, V. "Methodology for Inclusion of Risk in Multireservoir Operations." 329 p. *Doctoral Dissertation* : Colorado State University, Fort Collins, Colorado : 1986.
- VUDHIVANICH, V. & KEAWKHAH, L. "Development of WASAM 2.2 for Mun Bon Irrigation Project." *Engineering Journal - Kasetsart University*, 1996; 28 : 59-72.
- VUDHIVANICH, V.; NGERNPRASERTSRI, S.; SUGIYAMA, H.; MAITA, H. & SATOH, M. "Existing rules for operation of Srinagarind and Khao Laem reservoirs and their effects on water management of Mae Klong Irrigation System." In : *Proceeding of the Workshop on Sustainable Development of Agriculture and Organizational Management of Chao Phraya and Mae Klong Basins, Kasetsart University, Bangkok, October 30, 1998*. Bangkok : Kasetsart University/University of Tsukuba (Japan), 1998. p 20.
- VUDHIVANICH, V. & SUIADEE, W. "Development of Computer Program - WASAM Version 2." *Engineering Journal - Kasetsart University*, 1995; 26 : 98-115.
- WALKER, S. "Computer-Aided Water Resources Planning and Operational Management in a Water Company in the U.K." In : LOUCKS, D.P. & DA COSTA, J.R. (eds.). *Decision Support Systems : Water Resources Planning*. Berlin : Springer-Verlag, 1991. p 305-330.
- WALKER, W.E. & VEEN, M.A. "Screening Tactics in a Water Management Policy Analysis for the Netherlands." *Water Resources Research*, 1987; 23(7) : 1145-1151.
- WALLISER, B. *Systèmes et modèles. Introduction critique à l'analyse de systèmes*. Paris : Le Seuil, 1977. 248 p.
- WALSH, M.R. "Toward Spatial Decision Support Systems in Water Resources." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1993; 119(2) : 158-169.
- WATERSTONE, M. "Institutional analysis and water resources management." In : DUCKSTEIN, L. & PARENT, E. (eds.). *Engineering Risk in Natural Resources Management*. NATO ASI Series E : Applied Sciences, Vol. 275. The Netherlands : Kluwer Academic Publishers, 1994. p 57-74.

- WCED (WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT). *Our Common Future*. Oxford, New York : Oxford University Press, 1987. 400 p.
- WIEL, N. "Régime des crues dans la Plaine Centrale de Thaïlande." 110 p. *Mémoire de DEA* : Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (ENGREF), Montpellier : 1996. ((+annexes)).
- WISSERHOF, J. "Enhancing Research Utilization for Integrated Water Management." *Water Science and Technology*, 1995; 31(8) : 311-319.
- WITTHAWATCHUTIKUL, P. "Modelling for Evaluation of Critical Condition of Watershed in Thailand." 146 p. *Doctoral Dissertation* : Kasetsart University, Bangkok : 1997.
- WONGBANDIT, A. "Legal Perspectives of Water Allocation Problems in the Upper Northern and Central Regions." In : *Water Conflicts*. Bangkok : Thailand Development Research Institute (TDRI), 1994a. p 87-110.
- WONGBANDIT, A. "Water Use Conflicts Management in the Northeast : Case Studies of Nam Siaw and Nam Pong." In : *Water Conflicts*. Bangkok : Thailand Development Research Institute (TDRI), 1994b. p 149-238.
- WONGVITAVAS, P. *Rainfalls in Thailand*. Technical Document, N° 551.582-04-1989. Bangkok : Meteorological Department, 1989a. 98 p. (in Thai, with annex of 24 p.).
- WONGVITAVAS, P. *Tropical Cyclones over Thailand*. Technical Document, N° 551.166.4-01-1989. Bangkok : Meteorological Department, 1989b. 32 p. (in Thai).
- WONGVITAVAS, P. & OUPRASITWONG, N. *Drought in Thailand*. Bangkok : Meteorological Department, 1992. 35 p. (data updated from the 1st printing in 1989; in Thai, with annex of 28 p.).
- WU, R.S. "Derivation of Balancing Curves for Multiple Reservoir Operation." 138 p. *Master Thesis* : Cornell University, : 1988.
- WURBS, R.A. *Water Management Models : A Guide to Software*. Englewood Cliffs, New Jersey : Prentice-Hall, Inc., 1995. 239 p.
- WURBS, R.A. "Reservoir-System Simulation and Optimization Models." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1993; 119(4) : 455-472.
- WURBS, R.A. & CABEZAS, L.M. "Analysis of reservoir storage reallocations." *Journal of Hydrology*, 1987; 92(1-2) : 77-95.
- YAKOWITZ, S. "Dynamic Programming Applications in Water Resources." *Water Resources Research*, 1982; 18(4) : 673-696.
- YANG, X.; PARENT, E.; MICHEL, C. & ROCHE, P.A. "Comparison of Real-Time Reservoir-Operation Techniques." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1995; 121(5) : 345-351.
- YANG, X.; PARENT, E.; MICHEL, C. & ROCHE, P.A. "Gestion d'un réservoir pour la régularisation des débits." *La Houille Blanche*, 1991; 6 : 433-440.
- YEH, W.W.G. "Reservoir Management and Operations Models : A State-of-the-Art Review." *Water Resources Research*, 1985; 21(12) : 1797-1818.
- YEH, W.W.G. & BECKER, L. "Multiobjective Analysis of Multireservoir Operations." *Water Resources Research*, 1982; 18(5) : 1326-1336.
- YEH, W.W.G.; BECKER, L. & ZETTLEMOYER, R. "Worth of Inflow Forecast for Reservoir Operation." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1982; 108(WR3) : 257-269.
- YEVJEVICH, V. "Effects of Area and Time Horizons in Comprehensive and Integrated Water Resources Management." *Water Science and Technology*, 1995; 31(8) : 19-25.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	III
RESUME	V
ABSTRACT.....	VI
SOMMAIRE.....	VII
SIGLES ET ABREVIATIONS.....	VIII
INTRODUCTION	1
Contexte et problématique	1
Objectifs de l'étude.....	3
Cadre méthodologique	4
PREMIERE PARTIE	
LE CADRE DE L'ETUDE BASSIN DU MAE KLONG.....	7
I. MILIEU NATUREL	9
I-1 <i>Situation du bassin versant du Mae Klong</i>	9
I-2 <i>Climat et saisons</i>	13
I-3 <i>Ecoulements superficiels et eau souterraine</i>	14
I-4 <i>Végétation</i>	17
II. AMENAGEMENTS HYDRAULIQUES ET HYDROAGRIQUES	19
II-1 <i>Histoire des études et des aménagements dans le bassin du Mae Klong</i> ...	19
II-2 <i>Ouvrages hydrauliques</i>	25
II-2.1 Grand projet d'irrigation du Mae Klong (GMKIP)	25
II-2.2 Système de Srinagarind	29
II-2.3 Barrage de Khao Laem	33
III. LE ROLE DE LA SOCIETE	37
III-1 <i>Pression démographique</i>	37
III-2 <i>Eau pour l'agriculture</i>	40
a) Cultures dans les périmètres irrigués	40
b) Prélèvement d'eau dans le système du Mae Klong	42
c) Prélèvement d'eau pour le fleuve Tha Chin	44
III-3 <i>Hydroélectricité</i>	46
a) Production nationale d'électricité	46
b) Production hydroélectrique du système du Mae Klong.....	47
c) Variation saisonnière de la production hydroélectrique	48
d) Demande en eau pour la production hydroélectrique	51
III-4 <i>Besoins en eau des villes</i>	52
III-4.1 Usages de l'eau le long du fleuve Mae Klong	52
III-4.2 Alimentation en eau de la Région Métropolitaine de Bangkok.....	52
III-5 <i>Usages locaux</i>	54
III-5.1 Protection contre les intrusions salines	54
III-5.2 Activités récréatives et écotourisme	54

III-5.3	Qualité de l'eau	55
IV.	GESTION DE L'EAU	57
IV-1	<i>Organisation de la gestion de l'eau</i>	57
IV-1.1	Les acteurs	57
IV-1.2	Organisation des principales agences de gestion de l'eau	58
a)	Organisation du RID	58
b)	Organisation de l'EGAT	61
IV-1.3	Interrelation RID/EGAT	61
IV-2	<i>Processus de la gestion de l'eau</i>	63
IV-2.1	Programmation de la gestion de l'eau	63
a)	Politique de gestion de l'eau en vigueur	63
b)	Programmation de la production électrique	65
c)	Allocation saisonnière de la ressource	66
d)	Révision des programmations d'usages de l'eau	67
IV-3	<i>De la planification à la mise en œuvre</i>	68
IV-3.1	Stratégie de l'exploitation des retenues	68
a)	Demandes en eau	69
b)	Règles et contraintes de gestion de réservoir	70
c)	Etat des stocks d'eau	76
d)	La décision de lâchers	76
e)	Volume d'eau pompé	78
IV-3.2	Gestion du barrage de dérivation	79
a)	Règles de gestion du barrage de Vajiralongkorn	79
b)	Priorité des usages de l'eau	79
c)	Outil opérationnel	80
d)	La décision de prélèvement d'eau	80
	CONCLUSIONS DE LA PREMIERE PARTIE	85
DEUXIEME PARTIE :		
	MODELISATION DE L'HYDROSYSTEME DU MAE KLONG	87
V.	CONSTRUCTION DES MODELES	89
V-1.1	Outil de modélisation	89
V-1.2	Architecture de la modélisation intégrée	90
VI.	MODELISATION HYDROLOGIQUE	93
VI-1	<i>Modèle GR</i>	93
a)	Architecture du modèle GR3 S	94
VI-2	<i>Calage des paramètres du modèle hydrologique</i>	98
a)	Critère de Nash	98
b)	Critère de Fortin	99
c)	Critère de bilan d'écoulements observés-calculés	99
d)	Technique d'optimisation des paramètres du modèle	99
VII.	REPRESENTATION DES COMPOSANTES DE FONCTIONNEMENT	101
VII-1	<i>Les composantes physiques</i>	101
VII-1.1	Ouvrages de retenue	102
a)	Caractéristique d'une retenue	102
b)	Contraintes de gestion de la retenue	103
c)	Bilan hydrique de la retenue	104
VII-1.2	Usine hydroélectrique	106
VII-2	<i>Décision de lâchers d'eau d'une retenue</i>	108

VII-2.1	Disponibilité de la ressource en eau	108
VII-2.2	Décision de lâchers d'eau en deux étapes.....	112
a)	Lâchers du système multi-réservoir.....	112
b)	Lâchers d'eau du réservoir individuel du système.....	115
VII-3	Décision d'allocation en eau.....	122
VIII.	EVALUATION DE LA PERFORMANCE DE L'HYDROSYSTEME.....	127
VIII-1	Evaluation par critères techniques.....	127
VIII-2	Evaluation par critères économiques.....	131
VIII-3	Définition des paramètres économiques.....	133
a)	Investissement.....	133
b)	Coût d'exploitation.....	134
c)	Coût de substitution.....	137
d)	Dommages des crues.....	140
e)	Valeurs économiques des usages de l'eau.....	141
	CONCLUSIONS DE LA DEUXIEME PARTIE.....	145
TROISIEME PARTIE :		
	APPLICATIONS DES MODELES.....	147
IX.	RECONSTITUTION DES ECOULEMENTS NATURELS.....	149
IX-1	Données hydrologiques.....	149
a)	Caractéristiques du bassin versant.....	149
b)	Observations météorologiques.....	150
c)	Hydrométrie.....	151
IX-2	Homogénéisation des précipitations.....	154
a)	Présentation de la méthode du Vecteur Régional (VR).....	154
b)	Le logiciel Climant.....	155
c)	Mise en œuvre et résultats.....	155
IX-3	Mise en application du modèle GR3 S.....	161
IX-4	Calage et contrôle du modèle pluie-débit.....	164
IX-5	Calcul des écoulements.....	170
IX-6	Conclusions.....	173
X.	VARIABILITES DES PARAMETRES DU MODELE DE FONCTIONNEMENT.....	175
X-1	Scénario de référence.....	175
X-2	Variabilité des ressources en eau.....	184
X-2.1	Identification des années extrêmes.....	184
X-2.2	Analyses des résultats.....	187
a)	Apports aux retenues.....	187
b)	Etat initial des retenues.....	187
X-3	Demandes en eau à l'aval du bassin.....	191
X-3.1	Irrigation.....	191
X-3.2	Eau potable.....	194
X-3.3	Débit réservé contre les intrusions salines.....	196
X-4	Production hydroélectrique.....	198
X-5	Conclusions.....	203
XI.	STRATEGIES DE LA GESTION DE L'EAU.....	205
XI-1	Analyse critique de la gestion en vigueur.....	205
XI-2	De nouvelles stratégies de gestion.....	212
XI-2.1	Production hydroélectrique.....	212
XI-2.2	Contraintes de gestion des retenues.....	218

a)	Niveau inférieur de fonctionnement des retenues.....	219
b)	Niveau objectif de fonctionnement des retenues	224
XI-2.3	Choix des stratégies sous diverses hypothèses	228
XI-3	<i>Conclusions</i>	235
	CONCLUSIONS DE LA TROISIEME PARTIE.....	237
	CONCLUSIONS GENERALES	239
	BIBLIOGRAPHIE.....	243
	TABLE DES MATIERES.....	269
	LISTE DES TABLEAUX.....	273
	LISTE DES FIGURES	275

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II-1 : Inventaire des études d'aménagements et de gestion concernant le bassin du Mae Klong	22
Tableau II-2 : Classement des types d'aménagement parcellaire.....	28
Tableau III-1 : Les « <i>Water rates</i> » des usines hydroélectriques du Mae Klong.....	51
Tableau VI-1 : Récapitulatif des variables du modèle GR3 S.....	97
Tableau VII-1 : Définition des indices d'état de stock d'eau à partir des divers niveaux de la retenue	110
Tableau VII-2 : Décisions de lâchers d'eau en vue de l'équilibrage de stock en cas du fonctionnement normal des retenues	119
Tableau VII-3 : Définition des décisions de lâchers en fonction des états de stock d'eau et des contraintes.....	120
Tableau VII-4 : Règles de décision de lâchers d'eau du système du Mae Klong selon l'état de disponibilité de stock d'eau.	121
Tableau VIII-1 : Trois groupes de performance à évaluer pour le fonctionnement du système du Mae Klong	128
Tableau VIII-2 : Sommaire des paramètres économiques pris en compte aux différentes échelles d'évaluation.....	132
Tableau VIII-3 : Paramètres économiques du modèle de fonctionnement de l'hydrosystème du Mae Klong.....	135
Tableau VIII-4 : Surfaces cultivées selon les types de culture et bénéfice net correspondant des zones d'irrigation du Mae Klong (GMKIP)	142
Tableau IX-1 : Caractéristiques de quelques applications de modèles de famille GR à diverses dimensions de bassin versant dans différentes régions géographiques. .	162
Tableau IX-2 : Noms et superficies des sous-bassins et stations hydrométriques correspondantes	163
Tableau IX-3 : Périodes de calage et de validation	166
Tableau IX-4 : Résultats du calage : paramètres du modèle GR3S et valeurs des critères de Nash et de bilan volumétrique	166
Tableau X-1 : Indices de performance « technique » du résultat de simulation du scénario de référence en option S (sans prélèvement de l'eau potable pour Bangkok).....	179
Tableau X-2 : Indices de performance « technique » du résultat de simulation du scénario de référence en option A (avec prélèvement de l'eau potable pour Bangkok).....	179
Tableau X-3 : Indices économiques IB du scénario de référence.....	179
Tableau X-4 : Valeurs des paramètres utilisées dans le modèle de fonctionnement de l'hydrosystème du Mae Klong pour le scénario de simulation de référence.....	204
Tableau XI-1 : Bilan moyen annuel des ressources en eau et des usages du bassin du Mae Klong	208

LISTE DES FIGURES

Figure I-1 : Topographie du bassin du Mae Klong.....	11
Figure I-2 : Pluviométries, températures et évaporations en moyenne mensuelle des stations météorologiques du Mae Klong	15
Figure I-3 : Ecoulements moyens mensuels des cours d'eau principaux du bassin du Mae Klong	16
Figure I-4 : Pourcentage des différentes occupations des sols	17
Figure I-5 : L'occupation des sols du bassin du Mae Klong	18
Figure II-1 : Barrages et réseaux de canaux du Mae Klong	24
Figure II-2 : Schéma de représentation des canaux du GMKIP (modifié d'après Vudhivanich <i>et al.</i> , 1998)	26
Figure II-3 : Types d'aménagements parcellaires du GMKIP en pourcentage de la superficie totale.....	28
Figure II-4 : Courbes caractéristiques du Barrage Srinagarind : Hauteur-Volume et Hauteur-Surface	31
Figure II-5 : Contraintes physiques de gestion du barrage Srinagarind	31
Figure II-6 : Règles en vigueur de gestion du barrage-réservoir Srinagarind.....	32
Figure II-7 : Courbes caractéristiques du Barrage Khao Laem : Hauteur-Volume et Hauteur-Surface	34
Figure II-8 : Contraintes physiques de gestion du barrage Khao Laem	34
Figure II-9 : Règles en vigueur de gestion du barrage Khao Laem	35
Figure III-1 : Population dans les provinces du bassin du Mae Klong et des zones d'usages de l'eau en 1996 (source : DoLA)	39
Figure III-2 : Surfaces cultivées au sein du GMKIP en saison sèche et en saison humide	41
Figure III-3 : Les cinq principaux groupes de cultures au sein du GMKIP	41
Figure III-4 : Volume d'eau prélevé au barrage Vajiralongkorn depuis 1970	43
Figure III-5 : Variation saisonnière du volume d'eau prélevé au barrage Vajiralongkorn entre 1989-1998 (en moyenne hebdomadaire)	43
Figure III-6 : Volumes annuels d'eau prélevés vers le fleuve Tha Chin par les canaux Jarakae Samphan et Thasarn-Bangpla (1985-1998).	44
Figure III-7 : Variation saisonnière des débits prélevés du canal Jarakae Samphan (pas de temps mensuel)	45
Figure III-8 : Variation saisonnière des débits prélevés du canal Thasarn-Bang Pla (pas de temps mensuel)	45
Figure III-9 : Evolution des diverses sources de production électrique au niveau national	46
Figure III-10 : Part de la production hydroélectrique du Mae Klong dans la production nationale.....	47
Figure III-11 : Variation saisonnière de la consommation électrique totale au niveau national.....	49
Figure III-12 : Variation saisonnière de la production hydroélectrique au niveau national	49

Figure III-13 : Variation saisonnière de la production hydroélectrique du système de Mae Klong	50
Figure III-14 : Nombre de m ³ d'eau pour produire un kWh d'énergie électrique Barrages Srinagarind et Khao Laem	51
Figure III-15 : Programmation des prélèvements dans les fleuves Chao Phraya, Tha Chin et Mae Klong pour l'alimentation en eau potable de la Région Métropolitaine de Bangkok	53
Figure IV-1 : Structures du RID et de l'EGAT, organisées pour la gestion de l'eau.	60
Figure IV-2 : Agences principales dans le système eau-énergie	62
Figure IV-3 : Programmes en gestion de l'eau par RID/EGAT	64
Figure IV-4 : Décision de lâchers des barrages-réservoirs	68
Figure IV-5 : Concept de zonage d'un barrage-réservoir	71
Figure IV-6 : Variation conjointe des indices de stock d'eau de Srinagarind et de Khao Laem en 1993 (année sèche).....	74
Figure IV-7 : Variation conjointe des indices de stock d'eau de Srinagarind et de Khao Laem en 1994 (année humide).....	74
Figure IV-8 : Variation conjointe des indices de stock d'eau de Srinagarind et de Khao Laem en 1995 (année normale)	75
Figure IV-9 : Variation conjointe des indices de stock d'eau de Srinagarind et de Khao Laem en 1996 (année humide).....	75
Figure IV-10 : Variation des lâchers d'eau de retenues selon la convention RID/EGAT	77
Figure IV-11 : Volumes d'eau lâchés et pompés au Barrage Srinagarind.....	78
Figure IV-12 : Débits lâchés et prélevés au barrage Vajiralongkorn en 1993 (année sèche)	82
Figure IV-13 : Débits lâchés et prélevés au barrage Vajiralongkorn en 1994 (année humide)	82
Figure IV-14 : Débits lâchés et prélevés au barrage Vajiralongkorn en 1995 (année normale)	83
Figure IV-15 : Débits lâchés et prélevés au barrage Vajiralongkorn en 1996 (année humide)	83
Figure V-1 : Composantes de la modélisation de l'hydrosystème du Mae Klong	91
Figure VI-1 Schéma conceptuel des modèles GR2 M (Makhlouf et Michel, 1994) et GR3 J (Edijatno <i>et al.</i> , 1999)	96
Figure VI-2 : Schéma conceptuel du modèle GR3 S	96
Figure VII-1 : Courbe caractéristique hauteur/volume de la retenue de Srinagarind, utilisant le graphique « <i>Lookup</i> » de Vensim®	102
Figure VII-2 : Représentation et formulation dans l'environnement Vensim® des divers niveaux et volumes de retenue définis pour sa gestion.....	103
Figure VII-3 : Représentation et formulation dans l'environnement Vensim® du bilan d'une retenue d'eau avec ses flux entrants et sortants	105
Figure VII-4 : Représentation et formulation dans l'environnement Vensim® du calcul de la puissance et de l'énergie produite par une usine hydroélectrique.....	107
Figure VII-5 : Etats de disponibilité du stock d'eau et décision de lâchers.....	110
Figure VII-6 : Configurations types de système à réservoirs multiples (Loucks et Sigvaldason, 1982).....	111
Figure VII-7 : Fonctions d'équilibrage de stock d'eau dans un système multi-réservoir (Loucks, 1994).....	111

Figure VII-8 : Représentation et formulation dans l'environnement Vensim® de la décision de lâchers d'eau du système	114
Figure VII-9 : Le niveau objectif situé à la zone de fonctionnement normal de la retenue	116
Figure VII-10 : Définition des zones de lâchers par équilibrage des stocks.....	116
Figure VII-11 : Exemple de fonction d'allocation en eau	122
Figure VII-12 : Exemple de fonction d'allocation en eau : deux demandes de même priorité.....	123
Figure VII-13 : Exemple de fonction d'allocation en eau : la demande 1 est prioritaire sur la demande 2	124
Figure VII-14 : Fonction d'allocation en eau du bassin du Mae Klong	125
Figure VIII-1 : Définition de la résilience et la vulnérabilité maximum (BUDHAKOONCHAROEN, 1990)	130
Figure VIII-2 : Variation de l'indice IB par rapport à l'investissement estimé.....	136
Figure VIII-3 : Variation de l'indice IB par rapport au coût d'exploitation estimé	136
Figure VIII-4 : Variation de l'indice IB par rapport au coût de substitution de la production hydroélectrique	138
Figure VIII-5 : Variation de l'indice IB par rapport au coût de substitution de l'approvisionnement en eau potable de la Région Métropolitaine de Bangkok ...	138
Figure VIII-6 : Variation de l'indice IB par rapport au coût de substitution du débit réservé.....	139
Figure VIII-7 : Variation de l'indice IB par rapport aux dommages des crues	140
Figure VIII-8 : Variation de l'indice IB par rapport au bénéfice de l'eau d'irrigation.	143
Figure VIII-9 : Variation de l'indice IB par rapport au prix de vente de l'électricité ..	143
Figure VIII-10 : Variation de l'indice IB par rapport au bénéfice du débit réservé	144
Figure VIII-11 : Variation de l'indice IB par rapport au prix de vente de l'eau potable	144
Figure IX-1 : Localisation des stations pluviométriques dans le bassin du Mae Klong et à proximité	152
Figure IX-2 : Localisation des stations hydrométriques du fleuve Mae Klong et de ses affluents	153
Figure IX-3 : Exemple de résultat de l'analyse de Climant – Courbe de doubles cumuls de la station pluviométrique de Ban Lin Thin et du vecteur régional de la zone correspondante avant la correction	158
Figure IX-4 : Exemple de résultat de l'analyse de Climant – Courbe de doubles cumuls de la station pluviométrique de Ban Lin Thin et du vecteur régional de la zone correspondante après la correction	159
Figure IX-5 : Zonage des précipitations annuelles homogènes.....	160
Figure IX-6 : Exemple pour l'année 1969 de l'estimation de la distribution temporelle des hauteurs de pluies pour la région G012 à partir de 3 stations pluviométriques homogénéisées par le Vecteur Régional (pas de temps hebdomadaire).....	160
Figure IX-7 : Découpage du bassin du Mae Klong en sous-bassins	162
Figure IX-8 : Schéma de représentation de sous-bassins	163
Figure IX-9 : Exemple de résultat du calage du bassin amont de la Khwae Noi, 1968-1971 (pas de temps hebdomadaire)	167
Figure IX-10 : Exemple de résultat du calage du bassin aval de la Khwae Noi, 1968-1971 (pas de temps hebdomadaire)	167

Figure IX-11 : Exemple de résultat du calage du bassin de la Lam Pachi, 1973-1976 (pas de temps hebdomadaire)	167
Figure IX-12 : Exemple de résultat du calage du bassin amont de la Khwae Yai, 1970- 1973 (pas de temps hebdomadaire)	168
Figure IX-13 : Exemple de résultat du calage du bassin aval de la Khwae Yai, 1970- 1973 (pas de temps hebdomadaire)	168
Figure IX-14 : Exemple de résultat du calage du bassin de la Lam Taphoen, 1973-1976 (pas de temps hebdomadaire)	168
Figure IX-15 : Corrélation des écoulements calculés et observés des 6 sous-bassins du Mae Klong	169
Figure IX-16 : Comparaison des écoulements du bassin amont de la Khwae Noi (KHN_U) calculés par le modèle GR3 S avec les apports à la retenue Khao Laem estimés par le bilan journalier, 1995-1998 (pas de temps hebdomadaire).....	171
Figure IX-17 : Comparaison des écoulements du bassin aval de la Khwae Yai (KHY_L) calculés par modèles GR3 S avec les apports à la retenue Srinagarind estimés par le bilan journalier, 1995-1998 (pas de temps hebdomadaire).....	172
Figure IX-18 : Comparaison des écoulements au barrage Vajiralongkorn estimés à partir des résultats du modèle GR3 S avec les écoulements observés à la station K11, 1972-1975 (pas de temps hebdomadaire)	172
Figure X-1 : Remplissage de la retenue de Srinagarind pour le scénario de référence en option S - sans prélèvement de l'eau potable de Bangkok (1959-1998, pas de temps hebdomadaire)	180
Figure X-2 : Remplissage de la retenue de Khao Laem pour le scénario de référence en option S - sans prélèvement de l'eau potable de Bangkok (1959-1998, pas de temps hebdomadaire)	180
Figure X-3 : Indices de la performance de l'hydrosystème du scénario de référence en option S - sans prélèvement de l'eau potable de Bangkok	181
Figure X-4 : Remplissage de la retenue de Srinagarind pour le scénario de référence en option A - avec prélèvement de l'eau potable de Bangkok de 45 m ³ /s (1959-1998, pas de temps hebdomadaire).....	182
Figure X-5 : Remplissage de la retenue de Khao Laem pour le scénario de référence en option A - avec prélèvement de l'eau potable de Bangkok de 45 m ³ /s (1959-1998, pas de temps hebdomadaire).....	182
Figure X-6 : Indices de la performance de l'hydrosystème du scénario de référence en option A - avec prélèvement de l'eau potable de Bangkok de 45 m ³ /s	183
Figure X-7 : Moyennes mobiles de 5 ans normalisées d'apports annuels aux retenues de Srinagarind et de Khao Laem	186
Figure X-8 : Apports annuels aux retenues de Srinagarind et de Khao Laem.....	186
Figure X-9 : Remplissage de la retenue de Srinagarind avec des apports différents (simulation sur 5 ans, pas de temps hebdomadaire)	189
Figure X-10 : Remplissage de la retenue de Khao Laem avec des apports différents (simulation sur 5 ans, pas de temps hebdomadaire)	189
Figure X-11 : Remplissage de la retenue de Srinagarind avec des états initiaux différents (simulation sur 5 années moyennes (1980-1984), pas de temps hebdomadaire)..	190
Figure X-12 : Remplissage de la retenue de Khao Laem avec des états initiaux différents (simulation sur 5 années moyennes (1980-1984), pas de temps hebdomadaire)..	190
Figure X-13 : Variabilité de l'indice IB par rapport aux prélèvements pour l'irrigation du bassin du Mae Klong	193

Figure X-14 : Variabilité de l'indice IB par rapport aux prélèvements pour l'irrigation du bassin du Tha Chin	193
Figure X-15 : Variabilité de l'indice IB par rapport aux prélèvements pour la fourniture d'eau potable à la zone métropolitaine de Bangkok	195
Figure X-16 : Indice IB - Global vs Prélèvements pour la fourniture d'eau potable à la zone métropolitaine de Bangkok, simulation sur 4 séries différentes d'apports de 5 années.....	195
Figure X-17 : Variabilité de l'indice IB en fonction du débit réservé pour la protection contre les intrusions salines	197
Figure X-18 : Indice IB - Global vs Débit réservé pour la protection contre l'intrusion saline, simulation sur 4 séries différentes d'apports de 5 années	197
Figure X-19 : Variabilité de l'indice IB par rapport à la demande de production hydroélectrique	199
Figure X-20 : Variabilité de l'indice IB Global par rapport à la demande de production hydroélectrique sous 4 conditions d'apports	201
Figure X-21 : Variabilité de l'indice IB Global-Tarif par rapport à la demande de production hydroélectrique sous 4 conditions d'apports	201
Figure X-22 : Variabilité de l'indice IB - Local [SNR] par rapport à la demande de production hydroélectrique sous 4 conditions d'apports	202
Figure X-23 : Variabilité de l'indice IB Local [KHL] par rapport à la demande de production hydroélectrique sous 4 conditions d'apports	202
Figure XI-1 : Remplissage des retenues de Srinagarind et de Khao Laem	206
Figure XI-2 : Variation annuelle des apports totaux au barrage de Vajiralongkorn et des écoulements contrôlés par les barrages-réservoirs selon les usages de l'eau	206
Figure XI-3 : Ressources en eau et usages en moyenne annuelle (1989–1998).....	207
Figure XI-4 : Variation saisonnière des apports au barrage de Vajiralongkorn, des lâchers turbinés et des usages en vigueur, en moyenne hebdomadaire entre 1989 et 1998	210
Figure XI-5 : Les usages de l'eau à l'horizon 2017 avec les lâchers turbinés ajustés..	210
Figure XI-6 : Demande en eau à l'aval du bassin en 2017, demande hydroélectrique et lâchers des retenues du système du Mae Klong (données de l'EGAT) sur la même période.	213
Figure XI-7 : Simulation sur 5 années (1989-1993) de la demande hydroélectrique selon les rapports de production $E_{\text{sèche}} / E_{\text{humide}}$ différents en comparaison avec la demande en eau à l'aval du bassin du Mae Klong en 2017.....	214
Figure XI-8 : Variabilité de l'indice IB par rapport au rapport entre la demande de production hydroélectrique entre saison sèche et saison humide	216
Figure XI-9 : IB Global vs Rapport entre la production hydroélectrique en saison sèche et celle en saison humide sous 4 séries différentes d'apports.....	216
Figure XI-10 : Remplissage de retenue de Srinagarind selon les rapports de production hydroélectrique $E_{\text{sèche}} : E_{\text{humide}}$ différents, simulation sur la période sèche II (1989-1993)	217
Figure XI-11 : Remplissage de retenue de Khao Laem selon les rapports de production hydroélectrique $E_{\text{sèche}} : E_{\text{humide}}$ différents, simulation sur la période sèche II (1989-1993)	217
Figure XI-12 : Variabilité de l'indice IB par rapport au niveau inférieur de fonctionnement de la retenue de Khao Laem	220

Figure XI-13 : IB Global vs Niveau inférieur de fonctionnement de la retenue de Khao Laem sous 4 conditions d'apports	220
Figure XI-14 Variabilité de l'indice IB par rapport au niveau inférieur de fonctionnement de la retenue de Srinagarind	221
Figure XI-15 : IB Global vs Niveau inférieur de fonctionnement de la retenue de Srinagarind sous 4 conditions d'apports.....	221
Figure XI-16 : Indice « Fiabilité en quantité » pour la demande de la production hydroélectrique au barrage Srinagarind vs Niveau inférieur de fonctionnement de la retenue de Srinagarind sous 4 conditions d'apports	222
Figure XI-17 : Variabilité de l'indice IB par rapport au niveau objectif de fonctionnement de la retenue de Khao Laem	225
Figure XI-18 : Variabilité de l'indice IB par rapport au niveau objectif de fonctionnement de la retenue de Srinagarind	225
Figure XI-19 : Variation de l'indice IB-Global en comparaison avec les niveaux objectifs de Khao Laem et de Srinagarind, simulation sur 40 années	227
Figure XI-20 : Zones optimales des niveaux objectifs des retenues sous des options différentes de la production hydroélectrique pendant des années moyennes	230
Figure XI-21 : Zones optimales des niveaux objectifs des retenues sous des options différentes de la production hydroélectrique pendant des années humides	231
Figure XI-22 : Zones optimales des niveaux objectifs des retenues sous des options différentes de la production hydroélectrique pendant des années sèches I.....	232
Figure XI-23 : Zones optimales des niveaux objectifs des retenues sous des options différentes de la production hydroélectrique pendant des années sèches II	233

ANNEXES

SOMMAIRE DES ANNEXES

A.	MODELISATION ET GESTION DE L'EAU : ETAT DES CONNAISSANCES	5
A-1	SYSTEME ET EAU	5
A-1.1	<i>Approche systémique</i>	6
A-1.2	<i>Dynamique des systèmes.....</i>	8
A-1.3	<i>Hydrosystème Complexe</i>	11
A-2	GESTION DE L'EAU	16
A-2.1	<i>Notion de gestion de l'eau.....</i>	16
A-2.2	<i>Durabilité du développement et gestion de l'eau.....</i>	17
A-2.3	<i>Analyse de la politique de gestion de l'eau.....</i>	22
A-3	OUTILS INFORMATIQUES EN GESTION DE L'EAU	24
A-3.1	<i>Information et décision</i>	25
A-3.2	<i>Modélisation de simulation.....</i>	30
A-3.3	<i>Applications des modèles en gestion de l'eau.....</i>	38
A-4	CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE	40
A-5	CITATIONS EN ANGLAIS DANS LE TEXTE	41
B.	RECAPITULATIFS DES CARACTERISTIQUES DES OUVRAGES HYDRAULIQUES.....	43
C.	INTERFACE GRAPHIQUE DU MODELE	49
D.	MODELE EN LANGAGE DE VENSIM®.....	55
D-1	DEFINITION « SUBSCRIPTS »	55
D-2	DONNÉES EXTERNES	57
D-3	COMPOSANTES NATURELLES.....	58
D-4	COMPOSANTES BARRAGES-RESERVOIRS.....	59
D-4.1	<i>Caractéristiques de retenue.....</i>	59
D-4.2	<i>Contraintes de gestion de retenue</i>	61
D-4.3	<i>Déversoir.....</i>	63
D-4.4	<i>Vanne de fond.....</i>	63
D-5	USINE HYDROELECTRIQUE	64
D-5.1	<i>Turbine</i>	64
D-5.2	<i>Pompe (Turbine réversible).....</i>	67
D-5.3	<i>Conduite d'amenée</i>	68
D-6	DEMANDES EN EAU.....	70
D-6.1	<i>Demandes à l'aval du bassin.....</i>	70

D-6.2	<i>Demandes en volume dans la zone d'écêtement des crues de retenue..</i>	72
D-6.3	<i>Demande hydroélectrique.....</i>	72
D-7	DECISION DE LACHERS.....	74
D-7.1	<i>Etat des ressources</i>	74
D-7.2	<i>Lâchers du système multi-réservoir.....</i>	74
D-7.3	<i>Lâchers du réservoir individuel du système.....</i>	75
D-8	DECISION D'ALLOCATION	79
D-9	EVALUATION ECONOMIQUE.....	81
D-9.1	<i>Valeurs économiques des usages.....</i>	81
D-9.2	<i>Coûts</i>	82
D-9.3	<i>Critères d'évaluation économique.....</i>	84
D-10	EVALUATION DE PERFORMANCE « TECHNIQUE »	87
D-11	DIVERS	90
E.	RESULTATS DE SIMULATION	93
E-1	PRODUCTION HYDROELECTRIQUE.....	95
E-1.1	<i>Rapport entre la production hydroélectrique en saison sèche et celle en saison humide</i>	95
E-2	CONTRAINTES DE GESTION DES RETENUES.....	109
E-2.1	<i>Niveau inférieur de fonctionnement de retenue de Khao Laem.....</i>	109
E-2.2	<i>Niveau inférieur de fonctionnement de retenue de Srinagarind.....</i>	123

ANNEXE - A. MODELISATION ET GESTION DE L'EAU : ETAT DES CONNAISSANCES

« L'homme vit et travaille à l'intérieur de systèmes sociaux. Ses recherches scientifiques constituent un exposé de la structure des systèmes naturels. Sa technologie a produit des systèmes physiques complexes. Même dans ces conditions ; les principes gouvernant le comportement des systèmes ne sont pas très bien compris. »ⁱ

J. W. Forrester (1968)

Dans cette partie, la discussion porte sur trois mots clés : **Analyse des systèmes**, **Gestion de l'eau** et **Modélisation**. Tout d'abord, nous définirons certains concepts et la terminologie des systèmes en général et de l'hydrosystème en particulier. Ensuite, dans le deuxième chapitre nous étudierons les termes de la gestion de l'eau. Enfin, le troisième chapitre traitera des outils informatiques appliqués à la gestion de l'eau.

A-1 SYSTEME ET EAU

L'analyse de la dynamique complexe entre la ressource et les usages dans l'hydrosystème exige une approche qui permette d'avoir une vue d'ensemble des différents éléments et de leurs interactions. Pour cette étude, c'est la méthode de la Dynamique des Systèmes (DS) qui est adoptée. Une première section présentera l'approche systémique sur laquelle la méthode DS se base, avant d'exposer ensuite la méthode DS elle-même dans la section suivante. Puis, le terme « hydrosystème » et ses différentes déclinaisons seront traités.

A-1.1 Approche systémique

L'approche systémique est une méthode permettant d'assembler et d'organiser les connaissances en vue d'une plus grande efficacité de l'action (De Rosnay, 1975). Elle s'appuie sur la notion de système. Cette notion, souvent vague et ambiguë, est pourtant utilisée aujourd'hui dans un nombre croissant de disciplines en raison de son pouvoir d'unification et d'intégration. Quelques définitions de la notion de système sont proposées par divers auteurs :

De Rosnay (1975) propose la définition suivante : *« un système est un ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisés en fonction d'un but. »*

Pour Le Moigne (1977) un système est : *« quelque chose (n'importe quoi, présumé identifiable), qui dans quelque chose (environnement), pour quelque chose (finalité ou projet), fait quelque chose (activité = fonctionnement), par quelque chose (structure = forme stable), qui se transforme dans le temps (évolution). »*

Larvet (1994) a retenu une définition en 7 points selon laquelle un système est : *« (1) un ensemble d'éléments, (2) doté(s) d'une structure, (3) en interaction entre eux et avec l'environnement, (4) qui réalise des fonctions, (5) qui transforme de la matière, de l'énergie ou de l'information, (6) qui évolue dans le temps, (7) selon un objectif. »*

La Systémique est constituée d'ensemble de concepts, de méthodes et de techniques utilisées pour l'étude d'un objet complexe naturel ou artificiel (Humbert *et al.*, 1979). Elle permet :

- de décrire, reconstituer et prévoir le fonctionnement et l'évolution,
- de choisir les variables essentielles et construire un modèle représentatif en conservant une vision globale et transdisciplinaire,
- de construire un système d'observation et de mesure capable de fournir des informations représentatives,
- de contrôler le fonctionnement pour modifier ou conserver la stabilité,
- de faciliter la prise de décision pour passer de l'expérience à la connaissance et réciproquement de la connaissance à l'expérience ou à la pratique.

Pour décrire la Systémique, Durand (1979) propose un schéma (Figure A-1). Les fondateurs de la Revue Internationale de Systémique en donnent la définition suivante (Tissier, 1998) : *« Nouvelle discipline, la systémique regroupe les démarches théoriques, pratiques et méthodologiques relatives à l'étude de ce qui est reconnu comme trop complexe pour pouvoir être abordé de façon réductionniste et qui pose des problèmes de frontière, de relation internes et externes, de structures, de lois ou de propriétés émergentes caractérisant le système comme tel ou des problèmes de mode d'observation, de représentation, de modélisation ou de simulation d'une totalité complexe ».*

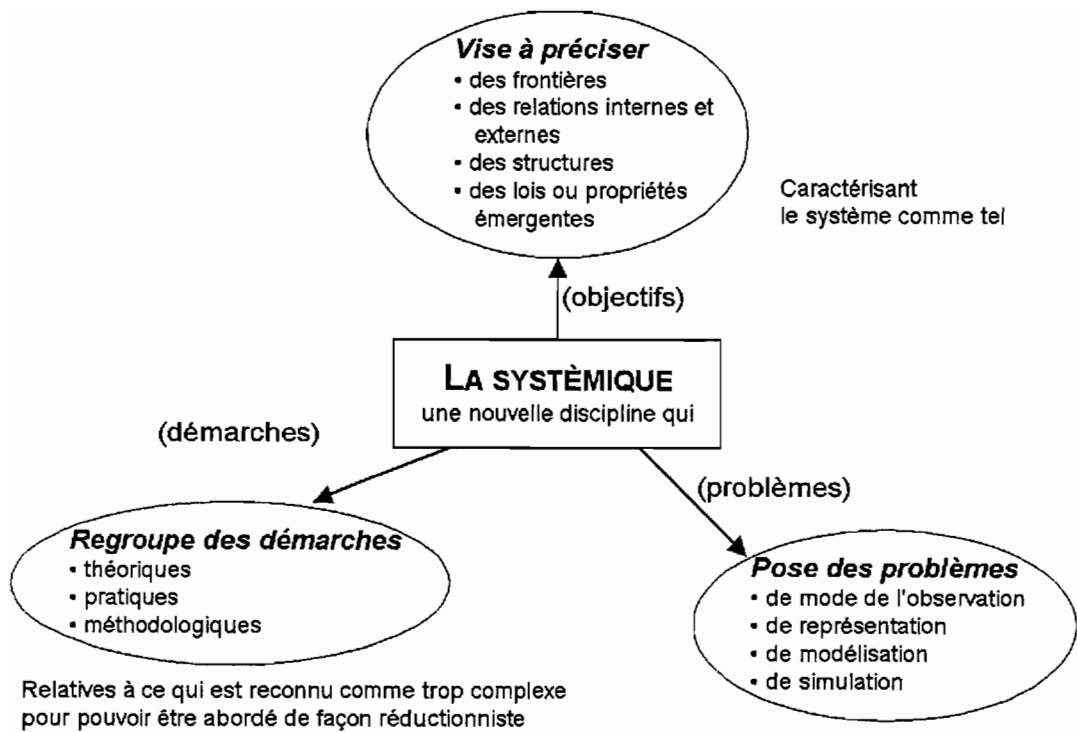


Figure A-1 : Une définition de la systémique (Durand, 1979)

A-1.2 Dynamique des systèmes

La méthode de la Dynamique des Systèmes (DS) met l'accent sur l'évolution dans le temps de la notion de système ; elle offre à la fois un moyen d'analyse et de représentation des systèmes complexes. Nous présenterons dans cette section une introduction succincte de la méthode DS, présentant les outils et quelques applications dans le domaine de l'eau.

Le lecteur intéressé par cette méthode est invité à consulter les ouvrages généraux consacrés à ce sujet tels que : « *Principe des Systèmes* » (Forrester, 1968), par le fondateur de la méthode, traduit en français en 1981, ou bien « *Le Macroscopie* » (De Rosnay, 1975), ainsi que « *Introduction à la Dynamique des Systèmes* » (Aracil, 1984), ou encore plus récemment « *Business Dynamics* » (Sterman, 2000).

a) *Concept de la Dynamique des Systèmes*

Une histoire du développement de la méthode de la Dynamique des Systèmes est résumée par De Rosnay (1975) :

« ... Forrester crée en 1961 la dynamique industrielle (*Industrial Dynamics*). Son but : considérer les entreprises comme des systèmes cybernétiques, pour simuler (et tenter de prévoir) leur comportement. En 1964, confronté aux problèmes de la croissance et de la dégénérescence des villes, il étend la dynamique industrielle à celle des systèmes urbains (*Urban Dynamics*). Enfin, en 1971, il généralise ses précédents travaux en créant une nouvelle discipline, la 'dynamique des systèmes', et publie un ouvrage (*World Dynamics*)... ».

Les systèmes dynamiques sont les héritiers de la cybernétique, c'est-à-dire de la science du *feedback*. Ces systèmes sont formés de variables interconnectées qui s'influencent mutuellement et évoluent avec le temps ; ils modélisent le mouvement et les changements qui l'accompagnent : délais et retards, accélérations, amortissement, inertie... Autant de phénomènes que leur caractère non linéaire rend le plus souvent imprévisibles (Clergue, 1997).

Le cœur du modèle est constitué par un ensemble de variables d'état, elles-mêmes comprises dans des boucles de rétroaction en interaction (Figure A-2). Sous forme mathématique, celles-ci sont décrites par des équations différentielles qui permettent de connaître la variation instantanée de leur niveau.

Le modèle simule donc la vie d'une entité spatiale, ou plus précisément son comportement du temps initial $t=0$ (début de simulation) au temps $t=n$ (fin de la simulation, donc de la période sur laquelle on désire obtenir le comportement du système).

Les résultats de la modélisation sont des courbes de simulation qui montrent l'évolution d'un phénomène (ou de plusieurs) dans le temps : elles constituent le

document de base de l'interprétation. En revanche les résultats numériques sont difficilement manipulables (Guigo et Le Berre, 1989).

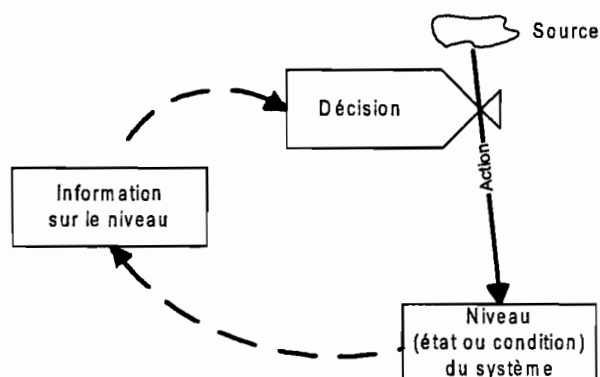


Figure A-2 : Boucle de rétroaction (d'après Forrester, 1968)

b) Outils de la Dynamique des Systèmes (DS)

Les logiciels conçus dans le but de faciliter la construction et l'utilisation des modèles en Dynamique des Systèmes sont parfois appelés « environnement de modélisation » (*modeling environment*) ou « langage de simulation » (*simulation language*).

DYNAMO®, commercialisé au début des années 60, est le premier langage de simulation de la DS ; pendant longtemps ce langage et le domaine de la DS ont été considérés comme synonymes. Ithink®/Stella® est apparu en 1984, initialement conçu pour les configurations Macintosh® dont les interfaces graphiques, pour l'époque, étaient très conviviales. Actuellement ce logiciel est disponible pour Macintosh® et Windows®.

PowerSim® et Vensim®, les deux derniers-nés, sont disponibles depuis le milieu des années 80. Grâce à un support financier du gouvernement norvégien, un projet de développement des modèles sur la base de la DS a été lancé en vue de l'amélioration de la qualité de l'éducation dans les lycées. Le fruit de ce projet s'est appelé Mosaic, un jeu de simulation éducatif. PowerSim® a été ultérieurement développé sur cette base pour l'environnement Windows®.

La société Ventana Systems, Inc., développeur de Vensim, a été fondée en 1985. Elle construisait initialement des modèles de simulation complexe. Afin de réduire le temps de développement, elle a décidé de créer Vensim®, son langage propre de simulation. En 1991, une année après la sortie de MS Windows® 3, Vensim® 1.5 est disponible dans une version commerciale.

La version 3.0 de Vensim®, mise en service en septembre 1997, a été choisie comme outil de modélisation dans le cadre de cette thèse. Depuis novembre 1999, une version 4.0 est disponible.

c) *Application au domaine de l'eau*

Un ouvrage d'Hamilton, « *System Simulation for Regional Analysis: An Application to River Basin Planning* » (1969) est probablement la première application de la Dynamique des Systèmes au domaine de l'eau¹. Dans la période de jeunesse de la DS, quelques applications portant parfois le nom de « Dynamique Industrielle », sont décrites dans des revues de sciences de l'eau comme *Water Resource Research* (par exemple, Gates *et al.*, 1970).

Ensuite les publications appliquant la DS aux sciences de l'eau ont quasiment disparues. On ne retrouve de nouvelles applications dans les articles plus récentes qu'une vingtaine d'années plus tard : traitant par exemple, la modélisation du comportement d'une nappe phréatique (Guigo et Le Berre, 1989), la modélisation hydrologique (Lee, 1993 ; Hinckley, 1996), la gestion de retenue (Simonovic *et al.*, 1997), l'analyse des politiques de l'eau (Simonovic et Fahmy, 1999).

On peut citer également en France la thèse de Colas qui a utilisé Stella pour une modélisation en gestion intégrée des ressources en eau (Colas, 1991 ; Colas *et al.*, 1992 ; Valette et Colas, 1992).

Bien que l'intérêt pour l'application de la DS au domaine de l'eau se manifeste dès les années 60, la longue interruption pourrait être due aux difficultés d'application à des cas réels. Le développement rapide de l'informatique a permis ensuite sans doute d'avoir des outils plus conviviaux de modélisation ; cela explique l'accroissement des publications dans ce domaine au cours des dix dernières années.

Toutefois, les titres des publications cachent souvent la méthode utilisée. Par exemple, l'ouvrage de Guigo et Le Berre (1989) est intitulé *Ecrire un modèle de simulation systémique* ; Wurbs (1995) et Simonovic *et al.* (1997) emploient le terme « modélisation orientée-objet » (*object-oriented modeling*) pour décrire des modélisations utilisant le logiciel Stella. Les mots-clés de la discipline tels que « dynamique » ou « système » sont englobés par d'autres terminologies voisines. Cela rend les requêtes bibliographiques ardues.

¹ D'après J.W. Forrester dans un message diffusé sur le forum de discussion consacré à la Dynamique des Systèmes sur Internet.

A-1.3 Hydrosystème Complexe

Le terme « hydrosystème » n'est en fait pas très couramment employé, même dans la littérature anglo-saxonne où nous trouvons plus souvent « *water resources system* » que nous traduisons ici par « hydrosystème » ou bien avec la même signification par « système des ressources en eau » ou « système d'eau ». Nous avons rassemblé quelques définitions de cette expression :

Mays et Tung (1992) proposent la définition suivante pour l'expression en anglais,

« L'hydrosystème est un terme initialement proposé par V.T. Chow afin de décrire collectivement les disciplines techniques de l'hydrologie, de l'hydraulique et des ressources en eau, en incluant les applications en économie, optimisation, probabilité, statistique et gestion. Ainsi « hydrosystème » est un terme employé pour faire référence aux types de projets d'aménagement des eaux tels que les systèmes des retenues d'eau de surface, les systèmes d'eau souterraine, les systèmes de distribution, les systèmes de protection des crues, les systèmes de drainage en milieu urbain, etc.ⁱⁱ »

Une autre définition est extraite du Glossaire national des SDAGE (OIEAU, 1995).

Hydrosystème : « Système composé de l'eau et des milieux aquatiques associés dans un secteur géographique délimité, notamment un bassin versant. Le concept d'hydrosystème insiste sur la notion de système et sur son fonctionnement hydraulique et biologique qui peuvent être modifiés par les actions de l'homme. Un hydrosystème peut comprendre un écosystème ou plusieurs écosystèmes. »

Fonctionnement des hydrosystèmes : « Ensemble des phénomènes physiques (hydrauliques, érosif,...), biologiques et de leurs interactions qui ont lieu au sein de l'hydrosystème. Ainsi la grande diversité des communautés végétales et animales (biocénoses) ne s'expriment que grâce à la dynamique fluviale (alternance de crue et d'étiage, de dépôts et d'érosion,...). Ces phénomènes sont influencés par les différents usages et peuvent contribuer à leur satisfaction. »

En français, le CNFSH² propose une définition de l'hydrosystème :

« Portion de l'espace où, dans les trois dimensions, sont superposés les milieux de l'atmosphère, de la surface du sol et du sous-sol, à travers lesquels les flux hydriques sont soumis à des modes particuliers de circulation. L'hydrosystème est le siège, sous l'effet de l'eau, de transformations car, en toutes ses phases, le cycle de l'eau a d'étroits rapports avec d'autres cycles physiques, géochimiques et biologiques de l'environnement terrestre. »

Dans le cadre de notre travail la définition de Mays et Tung semble celle qui convient le mieux pour décrire l'ensemble des éléments dans l'hydrosystème aménagé.

² Des définitions des mots et expressions du domaine de l'eau sont proposés dans le Dictionnaire des Sciences Hydrologiques, ouvrage très riche en cours d'élaboration par la Commission de Terminologie du Comité National Français des Sciences Hydrologiques (CNFSH). Les intéressés peuvent accéder au site Internet du dictionnaire à l'adresse : <http://www.cig.ensmp.fr/~hubert/termino.htm>

a) *Hydrosystème aménagé*

L'hydrosystème aménagé ajoute à la prise en compte de l'environnement dans l'hydrosystème naturel les impacts de la société humaine.

Du point de vue de Bossel (1999), le système naturel n'est qu'un des six secteurs différents jouant un rôle important dans le système sociétal (Figure A-3) : (1) le développement individuel, (2) le système social, (3) le système gouvernemental, (4) le système des infrastructures, (5) le système économique, (6) l'environnement et le système des ressources.

Ces six secteurs peuvent être regroupés en trois sous-systèmes³ : le système humain, le système d'appui et le système naturel.

Grâce à cette distinction et par analogie, il est possible de proposer une représentation de l'hydrosystème aménagé (Figure A-4). Les milieux hydriques naturels se distinguent en quatre systèmes : (1) le système d'eau atmosphérique, (2) le système d'eau superficiel, (3) le système d'eau souterrain et (4) le système d'eau océanique. Deux autres systèmes s'y insèrent : la société humaine et le système de production de l'eau maîtrisée (système d'appui)³.

Les interactions avec les milieux naturels se font à travers des flux hydriques de précipitations, d'évaporation et d'échanges souterrains. Les voies d'échange du système d'eau atmosphérique avec les deux systèmes humains passent par les précipitations et l'évaporation.

Afin de satisfaire les demande en eau de la société, le système de production de l'eau maîtrisée prélève et stocke de l'eau des milieux hydriques - superficiels, souterrains ou même océaniques. Les eaux usées sont rejetées vers ces milieux « naturels ». Du fait de l'augmentation incessante des besoins en eau de la société humaine, les prélèvements d'eau deviennent de plus en plus importants dans le fonctionnement de l'hydrosystème aménagé.

³ L'eau maîtrisée, terme proposé par J. Rey (1996) : c'est le produit fabriqué sur un système hydraulique géré par l'homme.

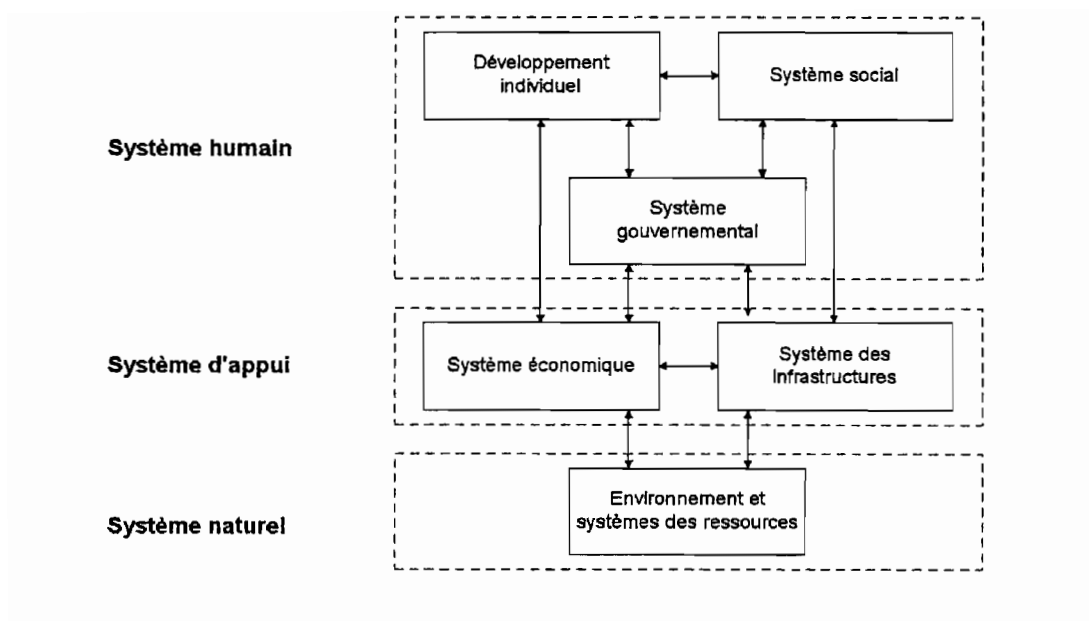


Figure A-3 : Les six systèmes principaux de l'anthroposphère et leurs liens principaux (Bossel, 1999).

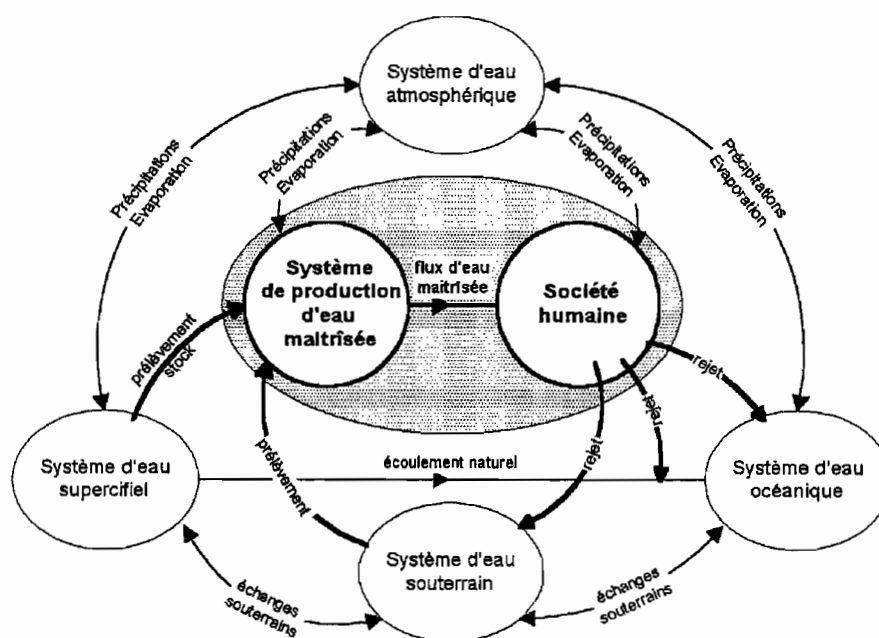


Figure A-4 : La société humaine avec son système d'appui et leurs relations avec l'environnement hydrique dans l'hydrosystème aménagé

b) *Phases de l'aménagement de l'hydrosystème*

Dejordjevic (1993) décrit trois phases de l'aménagement des hydrosystèmes. Les paragraphes suivants sont extraits de son ouvrage « *Cybernetics in water resources management* ».

La première phase est caractérisée par l'abondance d'eau. ... Durant cette phase, il n'y a aucune tension importante sur les ressources en eau, pas de conflits préoccupants parmi les différents usagers. ... Aucune contrainte d'usage de l'eau ne s'impose. La consommation d'eau s'accroît exponentiellement. La Figure A-5 représente schématiquement les trois phases de l'aménagement. La première phase persiste aussi longtemps que la consommation reste inférieure aux limites des étiages du bassin versant. Généralement, une gestion des ressources en eau par une institution organisée n'est pas encore nécessaire.

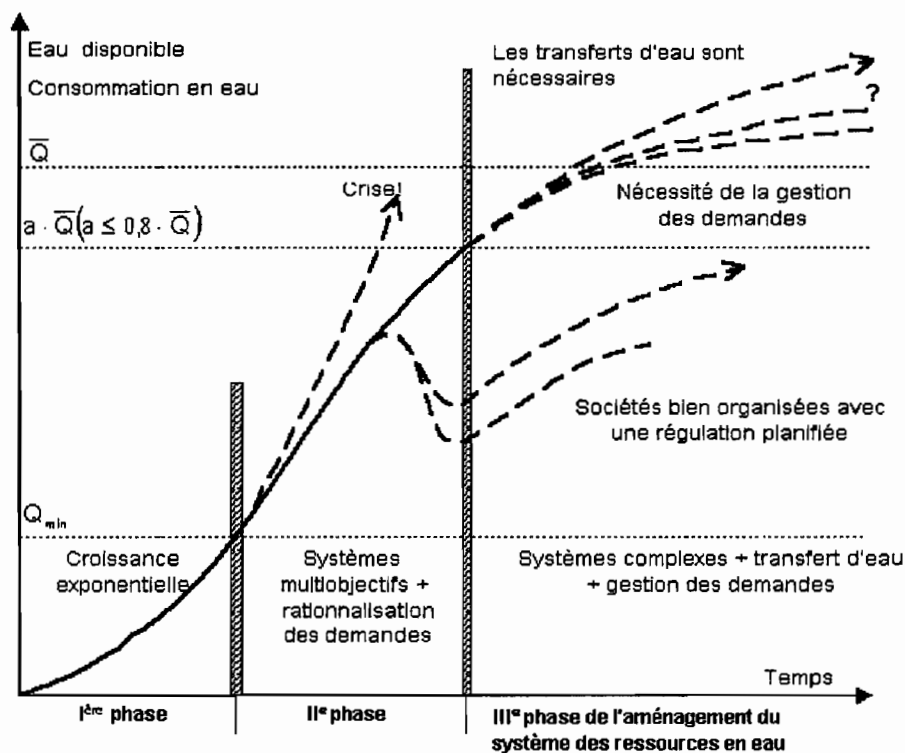


Figure A-5 : Tendances des trois phases de la relation entre la consommation en eau et l'aménagement du système des ressources en eau (d'après Djordjevic, 1993)

Avec la croissance de demandes en eau et la diminution des ressources disponibles pendant la deuxième phase, une restriction des usages de l'eau devient nécessaire. ... Les mesures sont progressivement mises en place afin d'établir des usages rationnés de l'eau. La planification devient désormais une tâche complexe, du fait que les résolutions de problèmes des différents usagers de l'eau dans le système sont conflictuelles. Cette phase exige une activité indépendante de gestion des ressources en eau.

La troisième phase de l'aménagement du système est symbolisée par un accroissement prolongé de la consommation et de la demande en eau, et par le désaccord fréquente entre les usagers des mêmes ressources en eau. Une maîtrise plus stricte des écoulements au moyen de réservoirs et des redistributions spatiale et temporelle de l'eau sont les pratiques les plus courantes au cours de cette troisième phase. La nécessité des transferts d'eau d'un bassin versant à un autre est plus fréquente. ... Quand la consommation moyenne atteint sa limite (Figure A-5), des mesures plus élaborées d'allocation d'eau sont nécessaires, avec une réduction rigoureuse de la demande dans les bassins versants déficitaires. Au-delà de cette limite, les systèmes sont donc dans la troisième phase de l'aménagement. Cela signifie une nouvelle méthode qualitative de la planification des ressources en eau.

Les sous-systèmes se combinent en systèmes ; les systèmes en super-systèmes. ... Ces nouveaux systèmes et super-systèmes peuvent s'étendre sur un bassin versant, des territoires nationaux ou même internationaux. L'eau s'apprécie comme les autres ressources naturelles. ... Une gestion de l'eau bien organisée est cruciale pour les grands systèmes et les super-systèmes. Il est également indispensable d'établir des agences gouvernementales qui sont responsables de la planification intégrale et du contrôle de la gestion des régimes d'eau dans les grands bassins versants. La compétence de l'état dans le domaine de la gestion intégrée de ressources en eau s'avère considérableⁱⁱⁱ.

La description des phases d'aménagement démontre la nécessité de la mise en place de mesures de plus en plus sophistiquées. La complexité de gestion qui s'accroît parallèlement au degré d'aménagement de l'hydrosystème ouvre plusieurs pistes de recherche pour le développement de nouveaux concepts, méthodes et outils dans le domaine de la gestion de l'eau.

A-2 GESTION DE L'EAU

« Taking control of the future therefore means tightening the connection between science and policy ».

William D. Ruckenshaus (Haimes, 1992)

Dans le deuxième chapitre nous aborderons les terminologies et les concepts de la gestion de l'eau. Le développement durable et la gestion intégrée de l'eau sont des concepts développés au cours des années 90. Ils ne possèdent pas encore de définitions précises et concertées. Quelques discussions d'auteurs qui se sont intéressés au sujet sont rassemblées ici. Elles sont complétées par un exposé de la méthodologie employée pour l'analyse des politiques de gestion de l'eau.

A-2.1 Notion de gestion de l'eau

La gestion est un processus spécifique réunissant des activités de planification, d'organisation, d'impulsion et de contrôle visant à déterminer et à atteindre des objectifs définis par l'activité humaine et la mise en œuvre d'autres ressources (Terry et Franklin, 1985).

La gestion de l'eau est conçue comme un ensemble de décisions qui permet de mettre en valeur les ressources en eau en vue de maintenir en équilibre la demande et l'approvisionnements^{iv} (Yevjevich, 1995).

L'objectif de la gestion de l'eau est de fournir en quantité suffisante de l'eau à l'homme et à l'environnement naturel^v (Grigg, 1996). Elle inclut l'aménagement, l'opération, la protection, la régulation et les usages à des fins bénéfiques des eaux superficielles et souterraines.^{vi} (Wurbs, 1995).

La gestion de l'eau repose d'abord sur une bonne connaissance des phénomènes naturels qui sont à l'origine des écoulements superficiels et souterrains de l'eau, et, ensuite, sur la maîtrise des techniques de prélèvement, de stockage, de transport et de

traitement de l'eau qui permettent de rendre l'eau disponible à la demande des usagers là où ils en ont besoin et au moment où ils en ont besoin⁴.

A-2.2 Durabilité du développement et gestion de l'eau

a) *Développement durable*

Afin de satisfaire les besoins de la génération présente sans compromettre les facilités des générations futures à satisfaire les leurs, un développement durable doit d'être techniquement approprié, environnementalement non dommageable, économiquement viable et socialement acceptable⁵. Le concept de développement durable se présente comme une tentative de réponse à la crise à la fois socio-économique et écologique, depuis que le Rapport Brundtland (WCED, 1987) en a proposé la définition qui est devenu officielle (Harribey, 1998) :

« Le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs⁶. »

La durabilité incite à une façon différente de penser aux conséquences et aux implications des décisions de développement. Cela conduit à un nouvel engagement basé sur des liens fondamentaux vis-à-vis de la gestion et la protection environnementale, le développement économique, et le bien-être social. La durabilité est devenue un concept d'unification accentuant la nécessité de la prise en considération des conséquences résultant des décisions/actions prises aujourd'hui sur ceux qui vivent aujourd'hui ainsi que ceux qui se présenteront à l'avenir^{vii} (Simonovic, 1997b).

Toutefois, Kundzewicz (1997) indique que le développement durable est un concept relativement ancien appliqué à la gestion des ressources naturelles renouvelables afin de s'assurer que le taux d'exploitation d'une ressource est inférieur à celui de son renouvellement^{viii}.

Pour Loucks (1997), les systèmes durables de ressources en eau sont ceux qui sont conçus et gérés afin de s'appuyer entièrement sur les objectifs de la société, aujourd'hui et à l'avenir, en gardant leur intégrité écologique, environnemental et hydrologique^{ix}.

⁴ Texte extrait de La Lettre d'Agropolis, N° spécial, Juillet 1999

⁵ Texte extrait du site de l'EPFL (<http://dgrwww.epfl.ch/DD/>)

⁶ Sustainable development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs (WCED, 1987, p. 43).

La nouvelle éthique du développement durable renforce et prolonge les principes élémentaires de gestion des ressources en eau^x (Simonovic, 1996a).

- Appliquer les principes de la durabilité nécessite des *changements majeurs des objectifs* sur lesquelles les décisions s'appuient et une compréhension des interrelations complexes vis-à-vis des facteurs sociaux, économiques et écologiques préalables.
- Le deuxième aspect important de la prise de décision soutenable est *le défi du temps* (les conséquences à long terme). Une extension de l'échelle temporelle est nécessaire si nous devons prendre en compte les besoins des générations futures. Aussi l'extension des échelles temporelles déclenche-t-elle l'expansion des limites spatiales.
- Le troisième aspect du contexte de durabilité est le *changement des politiques opérationnelles* (la mise en œuvre). Poursuivre un choix soutenable d'un projet nécessitera des changements importants en politiques à la fois sémantiques et opérationnelles^{xi} (Simonovic, 1997a).

b) *Approche intégrée en gestion de l'eau*

La gestion intégrée des ressources en eau est une expression à la signification très étendue dont l'interprétation varie suivant les auteurs (Grigg, 1996). On en trouvera ci-dessous diverses interprétations proposées par plusieurs auteurs :

Bogardi (1994a) donne la définition suivante de la gestion intégrée de l'eau :

« C'est la tâche stratégique des agences gouvernementales qui définissent les politiques et la coordination des usages de l'eau exécutées sur la base du concept systémique en tenant compte *des liens fonctionnels internes* entre les aspects qualitatif et quantitatif des eaux superficielles et souterraines, ainsi que *des interactions externes* entre la gestion des ressources en eau et des ressources associées tels que la protection environnementale, la planification régionale, la conservation de la nature, etc. »^{xii}

Une autre définition est extraite du Glossaire national des SDAGE (OIEAU, 1995) :

« Gestion qui implique à l'échelle d'une unité hydrographique cohérente, d'une part, une concertation et une organisation de l'ensemble des acteurs ainsi qu'une coordination des actes d'aménagement et de gestion (politiques sectorielles, programmation, ...), d'autre part, de favoriser une synergie entre le bon fonctionnement des écosystèmes aquatiques et la satisfaction des usages. La gestion intégrée vise à optimiser les actions pour atteindre une gestion équilibrée. » (Loi sur l'Eau 92-3 du 03/01/92)

Pour Grigg (1996) :

« La gestion intégrée de l'eau maintient en équilibre les perspectives et les objectifs entre les groupes politiques concernés, les régions géographiques et les produits de la

gestion d'eau, tout en assurant l'approvisionnement en eau des systèmes écologiques et naturels^{xiii}. »

Selon Kundzewicz (1997) :

« La notion de la gestion intégrée de l'eau se base sur la perception de l'eau en tant que partie intégrale de l'écosystème, ressource naturelle et bien social et économique. Elle embrasse les aspects quantitatif et qualitatif, les eaux superficielle et souterraine et les intérêts multiples en compétition. Il s'agit d'améliorer l'efficacité de l'usage de l'eau, d'instaurer des modes durables d'utilisation de l'eau, de conserver l'eau et de minimiser les gaspillages. L'utilisation rationnelle des terres et la planification des paysages devraient jouer un rôle important pour la maîtrise de la distribution de l'eau en diminuant la pollution et l'eutrophisation des eaux douces.^{xiv} »

Une autre définition a été proposée par le Technical Advisory Committees (TAC) du Global Water Partnership (GWP et ORSTOM, 1997) :

« La gestion de l'eau est un processus qui vise à assurer à la fois la gestion et la mise en valeur des eaux, des terres et d'autres ressources pour maximiser le bien-être social et économique sans compromettre la durabilité des systèmes environnementaux vitaux »^{xv}.

Même si la gestion intégrée de l'eau ne peut pas être précisément définie, l'expression qui la désigne soulève encore beaucoup de débats. Bogardi (1994a) indique qu'il faut au moins que ce que recouvre la gestion de l'eau soit clarifié. D'une façon presque exhaustive, la gestion de l'eau peut être représentée à l'aide d'une analogie avec la structure de l'oignon (Figure A-6).

En tant que bulbe, les activités de gestion de l'eau elles-mêmes ne sont pas généralement très visibles. Cependant elles accumulent et amalgament l'essentiel dans des couches concentriques ; ensuite elles produisent le résultat, la tige et les feuilles qu'il est possible de voir et percevoir. Donc, l'intégration se fait par la plante^{xvi}.

Pour caractériser la gestion de l'eau, les aspects suivants méritent d'être notés^{xvii} :

- La gestion de l'eau elle-même est une intégration des techniques, des organisations administrative, sociale et naturelle enracinées dans les aspirations sociales, les changements climatiques, etc.
- La gestion de l'eau est fondamentalement un processus complexe de prise de décision ; nous réalisons les conséquences de ces décisions plutôt que nous percevons le processus lui-même.

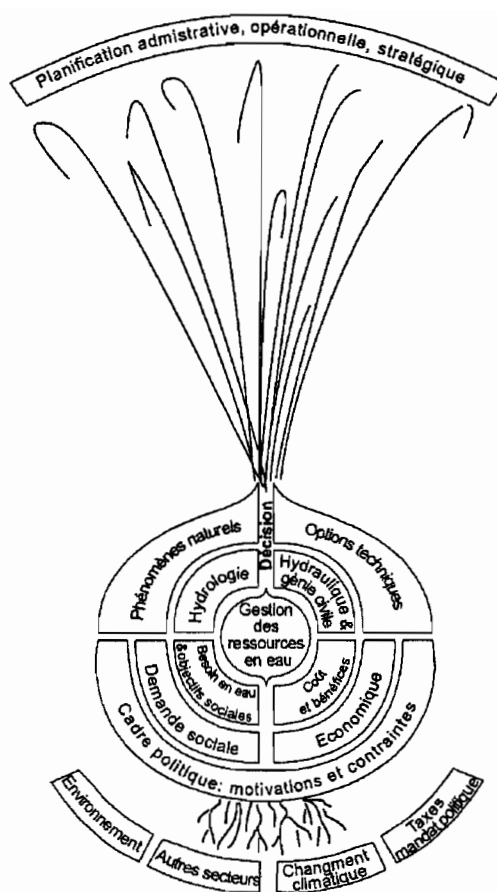


Figure A-6 : L'« Oignon » de la gestion des ressources en eau (d'après Bogardi, 1994a)

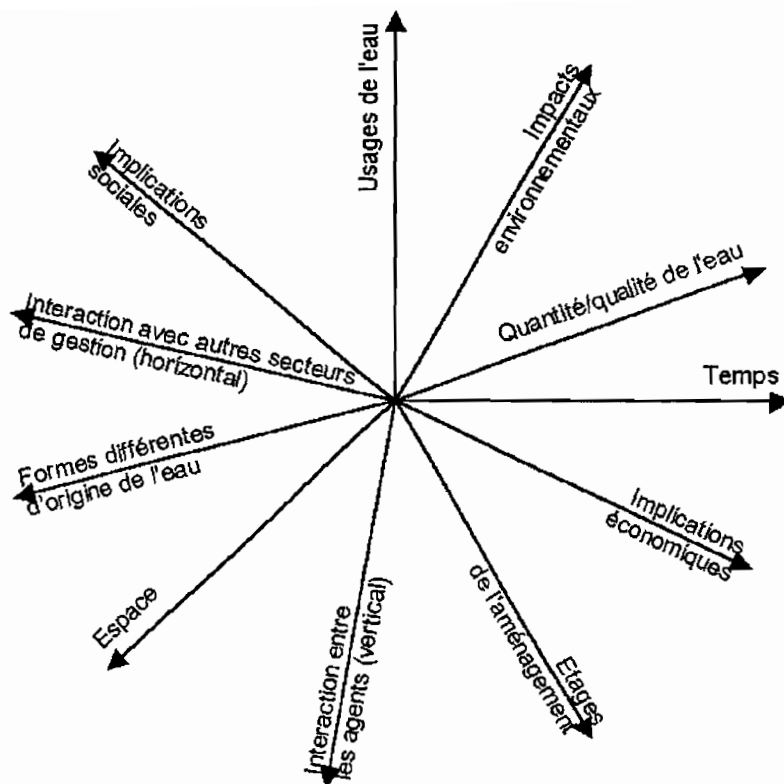


Figure A-7 : Les axes possibles de l'intégration en gestion de l'eau (Bogardi, 1994a)

« Alors, pourquoi le terme 'intégré' devrait-il être ajouté ? », demande Bogardi (1994a). Cet adjectif crée une ambiance de hautes aspirations ; il promet distinctement de nouvelles approches par rapport aux pratiques antérieures et suscite l'attente de décisions 'meilleures' et d'un usage plus prudent de la ressource.

Aux sens mathématique et linguistique, le mot 'intégré' suggère un perfectionnement. En tant qu'intégrale le long d'un axe ou sur un plan, la gestion de l'eau peut être imaginée comme une intégration des considérations et des efforts de gestion de l'eau dans l'espace et le temps, sur des implications sociales et sur des usages sectoriels de l'eau, etc. (Figure A-7)^{xviii}

A-2.3 Analyse de la politique de gestion de l'eau

L'analyse de la politique (*policy analysis*) de gestion pourrait être définie comme « *l'étude des impacts de différentes politiques sur un système dans le but de permettre aux décideurs d'obtenir les informations nécessaires pour le choix stratégique le plus favorable à la résolution des problèmes*^{xix} » (Opdam, 1983).

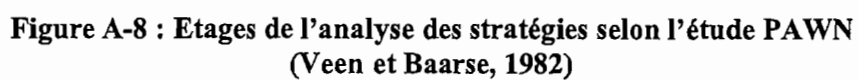
Initialement quatre questions fondamentales sont posées pour l'analyse de cette politique (Veen et Baarse, 1982) :

- Comment les choix stratégiques de gestion de l'eau sont-ils abordés et évalués ?
- Quels types de modèles sont nécessaires et construits afin d'élaborer et d'évaluer ces stratégies ?
- Quelles hypothèses de scénarios sont testées dans le but d'estimer l'efficacité des stratégies sur les conditions à venir ?
- Quels types de résultats et quelles conclusions stratégiques sont obtenus ?

Ensuite, les démarches de l'analyse se composent de trois étapes principales (Figure A-8 ; Luiten, 1994) : l'élucidation des choix, l'élaboration des stratégies et l'évaluation des conséquences.

- A l'étape de l'élucidation des choix, de nombreuses tactiques possibles sont évaluées grossièrement afin d'identifier ensuite les tactiques à engager (le choix est principalement basé sur des critères de coût-bénéfice et sur la possibilité de mise en œuvre).
- A l'étape de l'élaboration des stratégies, les tactiques à engager sont associées de façons différentes pour définir le nombre de stratégies à engager.
- A l'étape de l'évaluation des conséquences, les stratégies à engager finalement sélectionnées sont soumises à une analyse plus rigoureuse dans le but d'évaluer leurs conséquences sur toutes les catégories d'utilisateurs concernés^{xx}.

Les documents de l'étude PAWN (*Policy Analysis of Water Management for the Netherlands*) éclairent la méthode employée pour l'étude de la gestion de l'eau, exposant à la fois le cadre méthodologique et les applications à des cas spécifiques de gestion. Dans cette section, nous ne présentons ici qu'un extrait de l'ensemble de la démarche proposée ; le lecteur intéressé peut se reporter aux documents originaux. (Blumenthal, 1982, Veen et Baarse, 1982, van Beek, 1982, Romijn et Tamminga, 1982, Baarse et Miedema, 1982, Veen *et al.*, 1982 ; voir aussi Walker et Veen, 1987 ; Luiten, 1994).



A-3 OUTILS INFORMATIQUES EN GESTION DE L'EAU

The real world was, and is, not always like model developers see it. Real world problems are often much bigger, much more complex, much less structured, and require much more human input and judgment.

D. P. Loucks (1995)

Pour maîtriser la circulation dynamique des flux d'eau dans l'hydrosystème, l'outil d'aide à la décision joue un rôle indispensable. Cet outil s'appuie sur la technologie informatique qui évolue aujourd'hui très rapidement.

Avant de parler des divers outils informatiques développés et utilisés dans le domaine de l'eau, nous présentons des définitions des termes généraux concernant tout d'abord la prise de décision, le système d'information et le système d'aide à la décision. Puis, l'approche de la modélisation par la simulation sera traitée.

A-3.1 Information et décision

Prise de décision. Simon (1960) décrit que la prise de décision comporte quatre phases principales : il faut d'abord trouver l'occasion de prendre une décision (renseignement), puis envisager les modes d'action possibles (conception), en choisir un (sélection), et juger les choix effectués auparavant (constatation).

Chaque décision peut se situer sur une échelle allant de structurée (programmée) à complexe (non programmée).

- Les décisions sont programmées dans la mesure où elles sont répétitives et routinières, et où l'on a établi une procédure déterminée pour les effectuer, de façon à ne pas avoir à les reconsidérer chaque fois qu'elles se présentent.
- On peut parler de décisions non programmées dans la mesure où elles sont nouvelles, non structurées et se présentent de façon inhabituelle. Il n'existe pas de méthode toute faite pour régler le problème, car il se pose pour la première fois, ou parce que sa nature et sa structure précise sont mal définies ou complexes, ou encore parce que son importance est telle qu'il mérite une solution sur mesure (Simon, 1960).

L'*information* est une denrée essentielle pour un gestionnaire. Les bonnes décisions doivent se baser sur de l'information pertinente. Il existe une quantité maximale d'information pouvant être traitée par un individu (Figure A-9), correspondant au sommet de la courbe. A partir de ce point, il y a surcharge d'information et l'individu, malgré une recherche plus étendue d'information, devient moins efficace (Aubert, 1996).

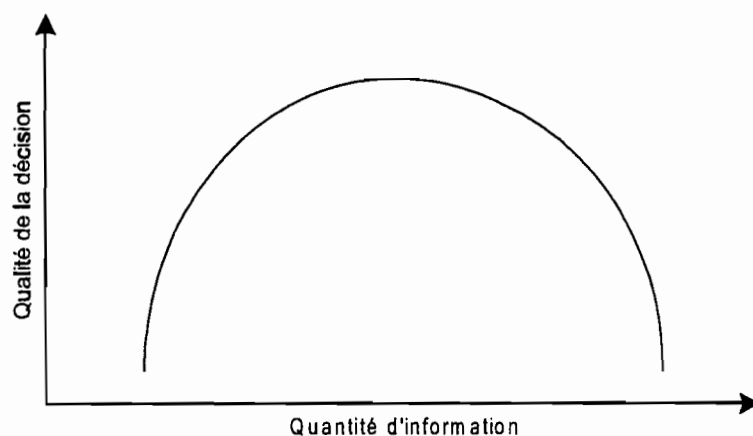


Figure A-9 : La quantité d'information et la qualité de décision (Aubert, 1996)

Système d'information. La notion de Système d'Information (SI) est due à l'économiste américain Boulding (1956) qui a défini la structure d'un système par trois composantes : système de pilotage, système d'information et système opérant (Figure A-10).

- Le *système opérant* est à l'origine de l'activité et de la dynamique du système. Il exécute les tâches que lui demande d'assurer le système de pilotage.
- Le *système de pilotage* définit les objectifs du système et transmet ses instructions au système opérant. Il s'agit du centre de décisions.
- Le *système d'information* renseigne le système de pilotage sur l'activité et l'efficacité du système opérant.

Enfin, *l'environnement* du système est l'ensemble des éléments n'appartenant pas au système et dont l'état est susceptible d'affecter ou d'être affecté par le système (Gayte *et al.*, 1997).

La structure du système présentée par Boulding convient assez bien à la représentation des organisations du type « entreprises », mais elle ne permet pas de modéliser des systèmes complexes en forte interaction avec leur environnement. Par conséquent, Gayte *et al.* (1997) rajoutent le système d'information sur l'environnement étant chargé d'assurer l'interface entre le système et son environnement (Figure A-11).

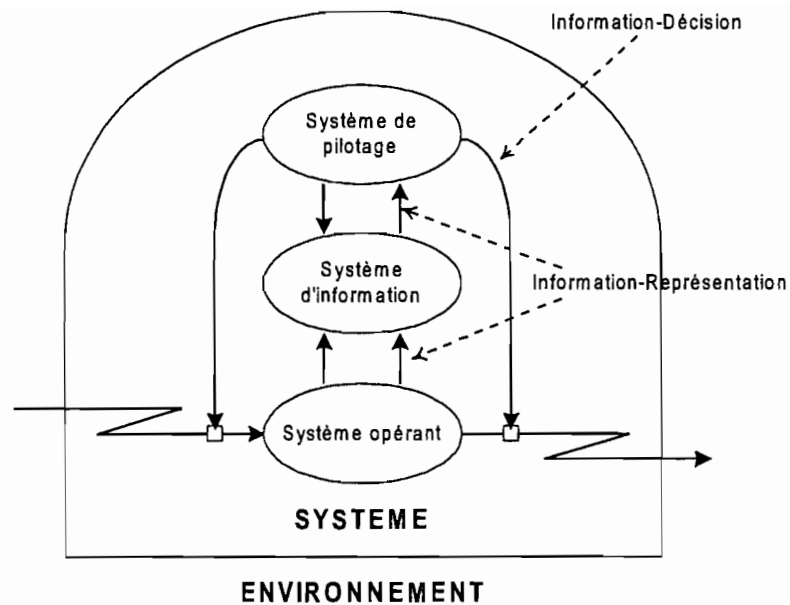


Figure A-10 : Structure d'un système définie par trois composantes (Le Moigne, 1977).

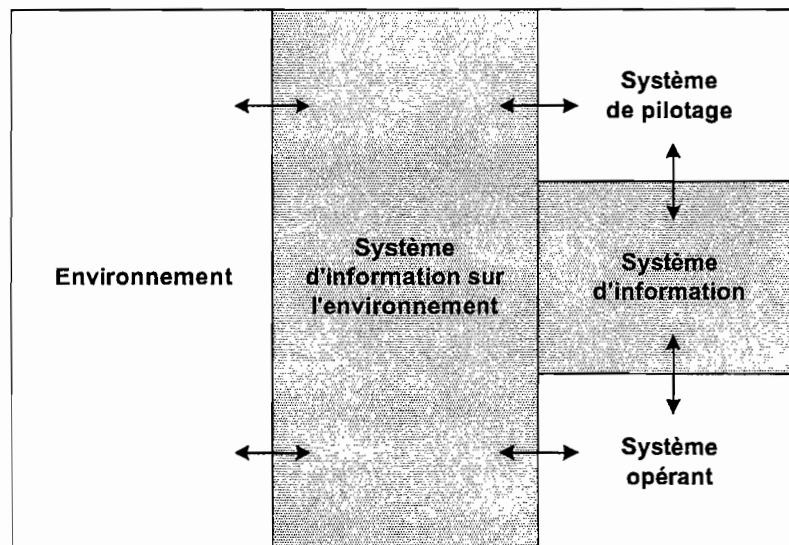


Figure A-11 : Le second système d'information proposé afin d'assurer l'interface entre le système et son environnement (Gayte et al., 1997)

Système d'Aide à la Décision (SAD). L'aide à la décision est l'activité de celui qui, prenant appui sur des modèles clairement explicités mais non nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponses aux questions que se pose un intervenant dans un processus de décision, éléments concourant à éclairer la décision et normalement à prescrire, ou simplement à favoriser, un comportement de nature à accroître la cohérence entre l'évolution du processus, d'une part, les objectifs et le système de valeurs au service desquels cet intervenant se trouve placé, d'autre part (Roy, 1985).

Un SAD permet à des décideurs d'incorporer des jugements personnels aux résultats de l'ordinateur au travers d'une interface homme-machine, afin de constituer un ensemble d'informations motivant le processus de prise de décision.

De tels systèmes contribuent à résoudre tous les types de problèmes (structurés, semi-structurés et non structurés) en utilisant toutes les informations disponibles sur la demande. Ils exploitent les éléments quantitatifs des bases de données et des modèles en résolvant le problème. Ils font partie intégrante des approches qu'utilisent les décideurs en résolution et identification de problèmes^{xxi} (Simonovic, 1996a).

Du point de vue structurel, Reitsma *et al.* (1996) proposent que le SAD, particulièrement dans le domaine de la ressource en eau/environnement, soit un outil informatique intégrant les informations d'état, les informations de dynamique ou de processus et des outils d'évaluation dans une seule implémentation logicielle (Figure A-12).

- Les *informations d'état* se réfèrent aux données qui représentent l'état du système de ressource en eau/environnement à un instant quelconque.
- Les *informations de processus* représentent en premier lieu les principes qui gouvernent les comportements de la ressource au cours du temps.
- Les *outils d'évaluation* se réfèrent à des utilitaires qui transforment les données brutes du système en informations concrètes conduisant à une prise de décision^{xxii}.

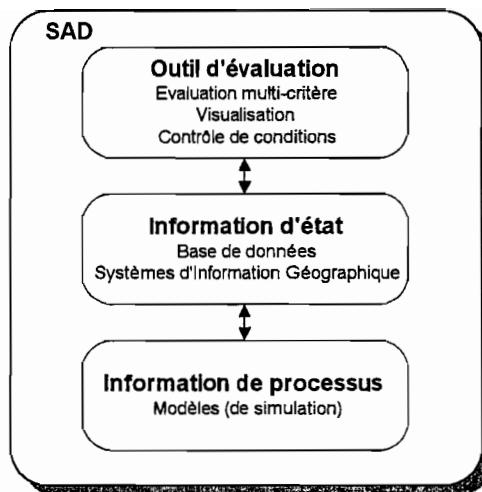


Figure A-12 : La structure de Système d'Aide à la Décision (SAD) et ses composantes (Reitsma *et al.*, 1996)

A-3.2 Modélisation de simulation

Nous venons de voir que les modèles sont une composante essentielle des systèmes d'aide à la décision. De même, la modélisation est une étape fondamentale de l'étude des systèmes complexes ; comme le dit De Rosnay (1975) :

L'analyse de systèmes, la modélisation et la simulation constituent trois étapes fondamentales de l'étude du comportement dynamique des systèmes complexes.

- L'analyse de systèmes consiste à définir les limites du système, à modéliser ; à identifier les éléments importants et les types d'interaction entre ces éléments, puis à déterminer les liaisons qui les intègrent en un tout organisé.
- La modélisation consiste à construire un modèle à partir des données de l'analyse de système. Les composantes de l'hydrosystème et leurs relations seront représentées dans un modèle d'allocation en eau qui compose de plusieurs sous-modèles.
- La simulation étudie le comportement dans le temps d'un système complexe.

Dans cette section, après avoir exposé l'ensemble des notions de modélisation et de simulation, nous présenterons les discussions de différents auteurs qui se sont intéressés à l'approche intégrée en modélisation.

Modèle

Un modèle est un schéma qui, pour un champ de questions, est pris comme représentation d'une classe de phénomènes, plus ou moins habilement dégagés de leur contexte par un observateur pour servir de support à l'investigation et/ou à la communication (Roy, 1985).

Popper (1973) relève trois caractéristiques communes à tous les modèles :

- Un modèle doit avoir un caractère de ressemblance avec le système réel ;
- Un modèle doit constituer une simplification du système réel ;
- Un modèle est une idéalisation du système réel ;

Coquillard et Hill (1997) ajoutent une quatrième caractéristique : un modèle doit reproduire le mieux possible le comportement du système réel, et ce, en fonction des objectifs fixés (la problématique) pour le cadre de l'étude.

Modélisation

La modélisation est l'action d'élaboration et de construction intentionnelle, par composition de symboles, de modèles susceptibles de rendre intelligible un phénomène perçu complexe, et d'amplifier le raisonnement de l'acteur projetant une intervention délibérée au sien du phénomène ; raisonnement visant notamment à anticiper les conséquences de ces projets d'action possibles (Le Moigne, 1995).

Pour Larvet, (1994), on modélise un système pour le comprendre, pour communiquer la compréhension qu'on en acquiert au cours de l'analyse et enfin pour valider le découpage qu'on en a fait (voir Figure A-13). Durand (1979) distingue quatre grands types de modèles en fonction de l'usage :

- Le *modèle cognitif* doit donner une représentation simplifiée d'un système réel en ne retenant que les éléments et les interactions les plus significatifs du système.
- Le *modèle décisionnel* doit fournir au décideur des schémas qui lui permettent de prendre rapidement une décision en présence soit d'une information trop abondante et donc difficilement maîtrisable, soit au contraire d'une information lacunaire ou incertaine.
- Le *modèle normatif* est en fait une forme particulière du modèle décisionnel qui est particulièrement contraignante.
- Le *modèle prévisionnel* doit, à partir de la connaissance de l'état présent et passé d'un système, permettre de déduire son comportement futur.

Pour terminer, nous empruntons un schéma réalisé par Durand (1979) pour décrire quatre étapes de processus de modélisation : définir le projet, dessiner le modèle, étudier le comportement du modèle, utiliser le modèle (Figure A-14).

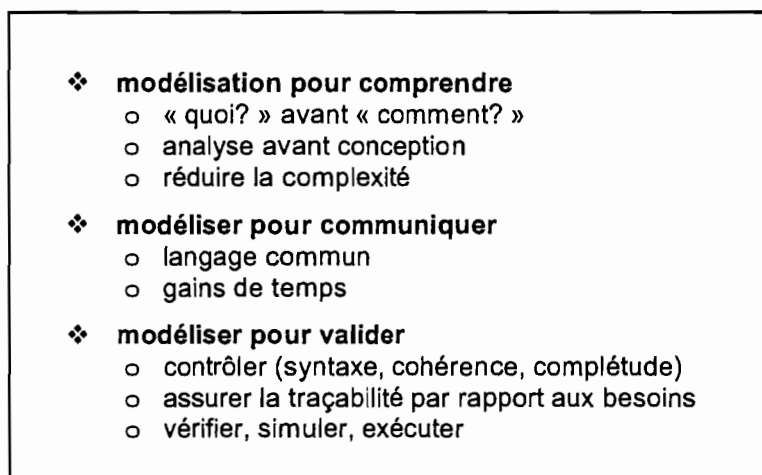


Figure A-13 : Trois objectifs pour la modélisation (Larvet, 1994)

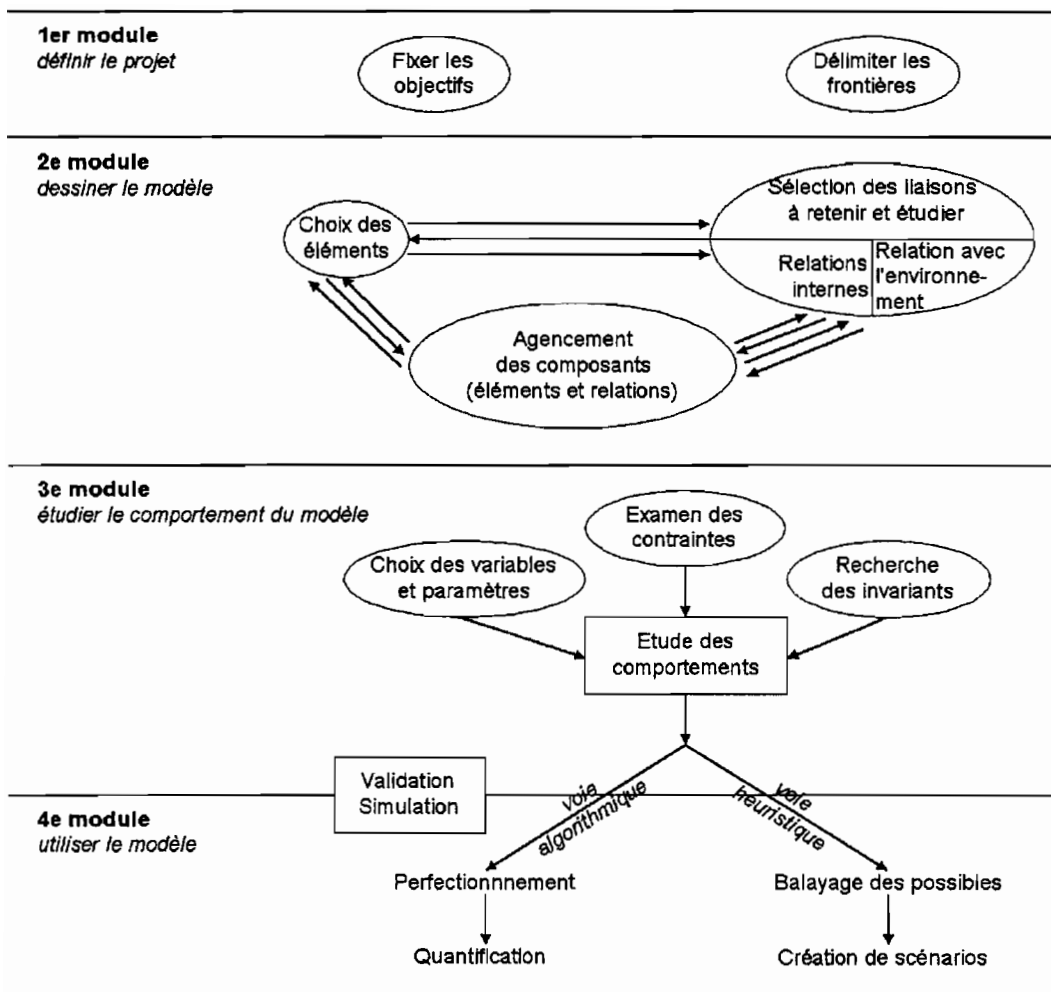


Figure A-14 : Processus de modélisation en quatre étapes (Durand, 1979)

Modélisation Objet

Le modèle objet parle de *classes* décrivant les *attributs* (les données ou les caractéristiques) et les *méthodes* ou fonctions (activités ou comportements) d'un ensemble d'objets. Cette terminologie s'adapte plus aux objets concrets qu'aux êtres vivants, mais elle a le mérite d'être générale du point de vue informatique. Dans le modèle objet, le terme d'*instance* est synonyme d'objet, l'*instanciation* étant le mécanisme qui permet de créer des objets à partir d'une description contenue dans une classe.

De même le terme d'*encapsulation* désigne à la fois le regroupement des données qui ne peuvent être consultées ou modifiées que sur demande explicite à l'objet. Les objets communiquent essentiellement par *message*, faisant appel aux services proposés par d'autres objets. Les services que peuvent rendre les objets correspondent aux activités (ou comportements) décrites dans leurs classes respectives (Coquillard et Hill, 1997).

On peut considérer qu'il existe trois niveaux d'application des concepts objet : (1) le niveau « basé objet », (2) le niveau « orienté classe », (3) le niveau « orienté objet » (Larvet, 1994).

- Les systèmes « basés objet » s'appuient sur les deux seules notions de modularité et d'encapsulation. Il n'y a donc pas de notion de classe, ni d'instance, ni, a fortiori, d'héritage dans un système basé objet. L'unité de décomposition est le module qui possède une partie visible, appelée interface ou spécification, par exemple, et une partie cachée, appelée implémentation ou corps.
- Les systèmes « orientés classe » sont des systèmes basés objet qui possèdent en plus la notion de classe, donc l'instanciation et l'héritage. Ils sont composés de modules contenant des classes, celles-ci pouvant posséder des instances et des sous-classes. Ces modules permettent, bien sûr, la triple encapsulation.
- Les systèmes « orientés objet » sont des systèmes orientés classe dans lesquels est utilisée en plus la notion de polymorphisme. Ce concept permet à plusieurs opérations héritées, nommées avec un nom identique, de posséder des implémentations différentes, adaptées au type des objets concernés.

Avec une approche objet, un système est vu comme un ensemble d'objets en relation formant un tout structuré et collaborant en vue de permettre au système de remplir sa fonction. Cette approche est cohérente avec le formalisme et les concepts proposés par la systémique (Hill, 1993). Cela est également confirmé par Larvet (1994) selon sa vue du concept de système à travers les objets (Figure A-15).

Éléments de la définition d'un système	Couverture par les « objets »
• ensemble d'éléments	⇒ ensemble d'objets
• doté(s) d'une structure	⇒ <i>modèle objet</i> , relation interobjets
• en interaction entre eux avec l'environnement	⇒ communication interobjets communication externe
• réalisation des fonctions	⇒ <i>modèle fonctionnel</i> , opérations des objets
• transformation : matière, énergie, information	⇒ attributs + opérations
• évolution dans le temps	⇒ <i>modèle dynamique</i> , comportement des objets
• selon un objectif	⇒ diagramme de contexte du modèle fonctionnel

Figure A-15 : Couverture par les objets de la définition d'un système (Larvet, 1994)

Simulation

La simulation consiste à faire évoluer une abstraction d'un système au cours du temps afin d'aider à comprendre le fonctionnement et le comportement de ce système et à appréhender certaines de ses caractéristiques dynamiques dans l'objectif d'évaluer différentes décisions (Hill, 1993). Elle est fondamentalement une représentation simplifiée du monde réel qui permet de comprendre et de résoudre un problème par l'approche « essai vs erreur » en posant des questions et en observant les réponses (Monsef, 1996). En général, un modèle de simulation devrait être susceptible de répondre à la question suivante (Djordjevic, 1993) :

« Que se passera-t-il dans le système, si une certaine commande s'appliquait ou si une de ses composantes était modifiée ou encore si des paramètres du système étaient changés? »

L'approche de simulation permet de faire varier les hypothèses de règles de gestion pour chaque aménagement et de juger des conséquences sur les critères de fonctionnement. On peut ajouter facilement un sous-modèle par simple réécriture d'un sous-programme, on peut ainsi scinder une unité fonctionnelle en plusieurs parties pour en décrire plus finement le fonctionnement. A l'inverse, on peut aussi représenter les contraintes à l'échelle du système tout entier. C'est ainsi que l'on pourra définir des priorités entre unités fonctionnelles (Parent et Roche, 1988)

a) *Approche intégrée en modélisation*

Simonovic (1996a) distingue quatre catégories d'outils couramment utilisées dans le développement des systèmes d'aide à la décision.

- *Système d'information* : traitement de données spatiales et temporelles comprenant la statistique, les outils de gestion de base de données, et le système d'information géographique ;
- *Analyse des systèmes* : simulation, optimisation et analyse multicritère
- *Intelligence artificielle* : système expert, réseau de neurones, méthode orientée objet, logique floue ;
- *Outils techniques multimédias* : visualisation, sons, animation, etc.

Du fait des nombreux outils incorporés, les difficultés de construction et d'application des modèles de systèmes à grande échelle tels que les hydrosystèmes, sont constatées par plusieurs auteurs.

D'après Matarasso (1996), la construction de modèles « intégrés » ramène les discussions sur les méthodes et les outils à des questions telles que :

- Quel progiciel de modélisation choisir ?

- Vaut-il mieux recourir à la simulation séquentielle ou à l'optimisation ?
- De quelle manière analyser un système complexe et en écrire les équations ?
- Comment coupler la représentation de phénomènes très hétérogènes et faire interagir les modélisateurs des sciences physiques, naturelles et sociales ?
- L'extrapolation des tendances passées représente-t-elle de manière adéquate l'évolution future du système, etc. ?

La recherche de solutions à ces problèmes a pris divers noms, « cybernétique », « analyse système », « science de la complexité », « théorie de contrôle », « recherche opérationnelle ».

Harrington et Gidley (1985) discernent sept défauts en modélisation de système à grande échelle : (1) hyper-détaillés ; (2) démesurés dans l'échelle ; (3) voraces en données ; (4) faussement intitulés (erronés dans leurs théories) ; (5) compliqués ; (6) mécanisés ; (7) chers.

Par conséquent les apports de ce type de modélisation portent plus sur les méthodes de résolution, que sur les problèmes de décision.

En ce qui concerne l'utilisation des modèles, Friedman *et al.* (1984) indiquent plusieurs contraintes institutionnelles qui empêchent la mise en application opérationnelle des modèles ; par exemple, le manque d'information sur les modèles existants, le manque de formation à utilisation des modèles et à leur interprétation, le manque de communication entre développeurs et utilisateurs et le manque des services techniques nécessaires.

Malgré des obstacles, l'intégration des modèles n'est pas impossible. Gayte *et al.* (1997) illustrent un concept d'intégration par un exemple d'unification des composants logiciels tels que le système d'information géographique (SIG), le système de gestion de base de données (SGBD), le système expert et la statistique (Figure A-16).

Dans un autre exemple de Fedra (1993), on note l'intégration du SIG et de modèles mathématiques, qui est aussi applicable à d'autres types d'outils et peut se réaliser de plusieurs façons (Figure A-17) :

- l'interface logicielle (les liens entre les deux systèmes établis à travers des fichiers communs) ;
- l'intégration dans un système avec une interface visuelle ;
- le chevauchement partiel de fonctions dans un système spécifique.

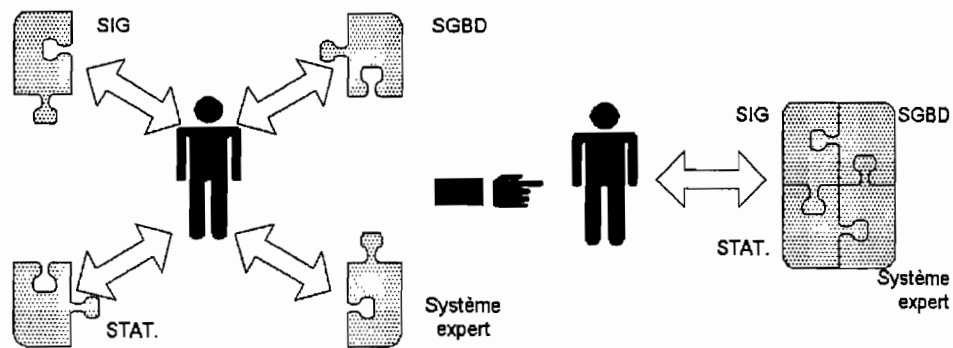


Figure A-16 : Principe de l'unification des composants logiciels (Gayte *et al.*, 1997)

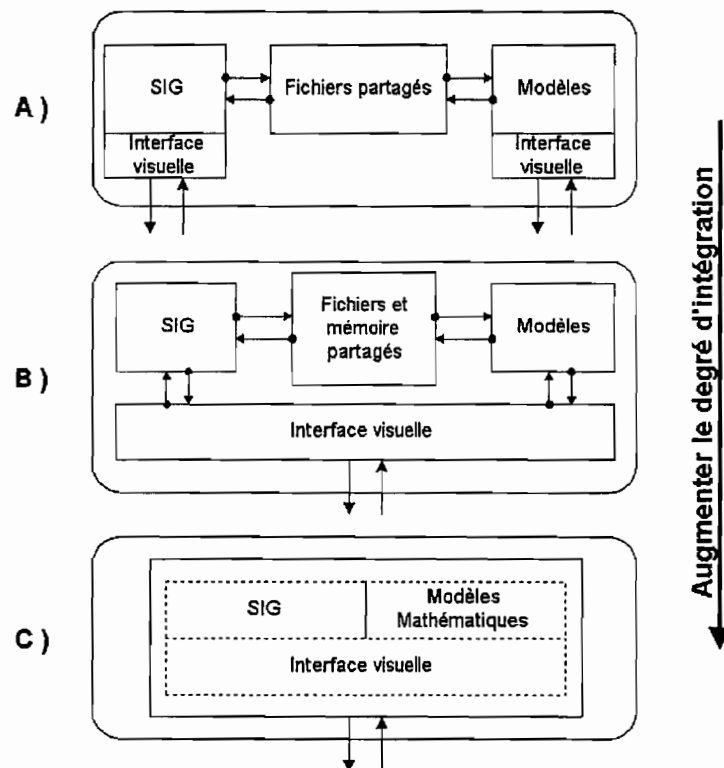


Figure A-17 : Trois niveaux d'intégration des modèles (adaptée de Fedra, 1993)

A-3.3 Applications des modèles en gestion de l'eau

L'application de modèles au domaine de l'eau est commune. Il est cependant difficile, voire impossible de faire un inventaire complet de tous les modèles appliqués à ce domaine. Pourtant, certains ont essayé, mais sans réussir à être exhaustifs. Il est cependant honorable de relever leurs efforts ; nous présentons ici, donc, les publications qui tentent de rassembler de manière synthétique les applications des modèles au domaine de l'eau en général, et plus particulièrement en gestion de l'eau. Cela donnera aux lecteurs intéressés des pistes pour continuer à explorer ce domaine.

Durant les années 80, l'application des modèles mathématiques dans le domaine de l'eau s'accroît parallèlement au développement des technologies informatiques.

Friedman *et al.* (1984) ont observé, d'une part, l'utilité des modèles, d'autre part, la possibilité de leur mise en application par les agences opérationnelles. Ainsi, une réflexion intéressante sur la sensibilité des choix de décision dérivés de modèles de type optimisation est proposée dans un article de Harrington et Gidley (1985).

Rogers et Fiering (1986) ont examiné l'utilisation des méthodes de la Recherche Opérationnelle (ou Analyse des Systèmes) en gestion de l'eau à partir de plusieurs milliers d'articles parus dans trois revues internationales de référence dans le domaine des sciences de l'eau : « *Water Resource Research* », « *Journal of Water Resources Planning and Management* », et « *Journal of Hydrology* ». Plusieurs contraintes de mise en application des méthodes sont discutées. Ils explorent également les différences entre les applications dans les pays développés et celles dans les pays en développement.

Une soixantaine de publications concernant les méthodes d'Analyse des Systèmes appliquées à divers problèmes de l'eau se trouve recensées dans « *Water Resource Systems Application* » (Simonovic *et al.*, 1990).

Du fait que les barrages-réservoirs sont l'une des composantes principales de l'hydrosystème, les recherches sur la meilleure méthode d'exploitation sont très intéressantes ; toutes les sortes des modèles mathématiques sont probablement testées, d'une simple retenue jusqu'à des systèmes complexes comme un ensemble de réservoirs à but multiple.

Yeh (1985) a réalisé un état de l'art sur les diverses méthodes mathématiques (optimisation/simulation) pour l'exploitation des retenues. Quant à l'approche de simulation des systèmes de retenues, les articles de Sigvaldason (1976), ainsi que de Loucks et Sigvaldason (1982) sont plus souvent cités. De même, Yakowitz (1982) présente les applications de la programmation dynamique aux problèmes divers de l'eau.

Dès le début des années 90, le mot « modèle » n'est plus séduisant. La dénomination évolue ; plusieurs nouveaux termes le remplacent ; par exemple, système d'aide à la décision, système d'information géographique, etc. Mais, ces approches sont toujours fortement inspirées de la modélisation

Loucks et Costa (1991) sont éditeurs d'un ouvrage intitulé « *Decision Support Systems : Water Resources Planning* ». Cet ouvrage comporte plusieurs dizaines d'articles qui sont présentés sous trois thèmes principaux : les technologies et leurs mises en œuvre, les expériences institutionnelles, et les exemples. Jamieson (1996) a édité un numéro spécial du *Journal of Hydrology* (177 : 3-4, 1996) ayant pour thème « *Decision-Support Systems* ».

Les modèles spatiaux comme les systèmes d'information géographique (SIG) ont été l'objet de beaucoup d'intérêts durant la décennie passée (Gulter & Forrest, 1987 ; Leipnik *et al.*, 1993 ; Tsihrintzis *et al.*, 1996 ; Vidal *et al.*, 1996 ; Walsh, 1993).

Un ouvrage de deux cents pages, intitulé « *Water Management Models : A Guide to Software* » (Wurbs, 1995) présente les exemples de modèles classés selon les grands systèmes d'eau : demandes en eau, système de distribution, eau souterraine, eau superficielle, hydrauliques des rivières, qualité des eaux, et exploitation des retenues. La présentation inclut aussi les agences (la plupart américaines) qui prennent en charge le développement et la distribution des modèles.

On peut sans doute considérer cet ouvrage comme un des inventaires les plus exhaustifs pour les modèles réalisés pendant les années 80-90.

On peut y trouver les présentations de modèles récemment développés tels que :

- AQUATOOL (Andreu *et al.*, 1991, 1996),
- NELUP (Dunn *et al.*, 1996),
- TERRA (Reistima, 1996), et
- WaterWare (Fedra et Jamieson, 1996 ; Jamieson et Fedra, 1996a, 1996b).

Dans la littérature plus récente, de nouveaux outils se trouvent décrits dans les articles de Lee et Dinar (1995 ; 1996), ou l'article de Dupont *et al.* (1998), ou encore dans un rapport de recherche de McKinney *et al.* (1999) auprès de l'IWMI.

Enfin, les approches de modélisation s'inscrivent parmi les éléments indispensables pour le développement durable. Les exemples de telles approches se trouvent dans « *Modelling and Management of Sustainable Basin-Scale Water Resource Systems* » (Simonovic *et al.*, 1995).

A-4 CONCLUSIONS

Les concepts introduits dans cette partie fournissent une base théorique pour la construction de modèle, orientés vers la gestion de l'eau. Les notions émergentes de développement durable ou de gestion intégrée de l'eau sont également abordées. Plusieurs exemples d'outils existants illustrent la diversité des approches selon le domaine d'application et les objectifs fixés.

Toutefois chacun des concepts présentés n'est développé que succinctement, et une description plus détaillée aurait nécessité individuellement un ouvrage de taille comparable au présent mémoire. Le lecteur intéressé est invité à se reporter aux ouvrages cités dans le texte et récapitulés dans la bibliographie.

A-5 CITATIONS EN ANGLAIS DANS LE TEXTE

-
- ⁱ Man lives and works within social system. His scientific research is exposing the structure of nature's system. His technology has produced complex physical system. But even so, the principles governing the behavior of systems are not widely understood.
- ⁱⁱ Hydrosystems is a term originally coined by V.T. Chow to describe collectively the technical areas of hydrology, hydraulics, and water resources including the application of economics, optimization, probability, statistics, and management. Hydrosystems has also been a term used for reference types of water projects including surface water storage systems, groundwater systems, distribution systems, flood control systems, urban drainage systems, etc.
- ⁱⁱⁱ Dejordjevic (1993) identified three phases in water resources systems development.
 The first phase is characterized by water abundance. ... In this phase, there is no significant pressure on water resources, no serious conflicts among different users. ... Water is used without any imposed constraints. Water consumption usually follows an exponential law of increase. Figure gives a schematic representation of all the three phases. The first phase lasts while consumption is within bounds of low flows in the watershed. Generally, there is no need for an organized institutional water resources management.
 With the increase in water demand and the decrease of available resources in the second phase, restriction on water use begins. ... Measures are gradually introduced to ration the use of water. ... Planning becomes complex because of conflict resolution problems between the different water users of the system. This phase develops the need for water resources management to become an independent activity.
 The future increase in water demand and consumption and the increased discord among users of the available water resources symbolize the third phase of system development. A more pronounced flow regulation by reservoirs and the temporal and spatial redistribution of water are the typical factors in this third phase. The requirements for water transfers from one watershed to another are more often. ... When average consumption reaches the boundary (fig), more extensive measures of water diversion are required, with stringent demand reduction in the watershed with water deficit. Beyond this boundary, the systems are in the third development phase. It means a qualitatively new type of water resources planning.
 Subsystems are combined into systems, and systems into supersystems. ... These new systems and supersystems may stretch over one watershed, national or even multinational territory. Water gains its price like the other natural resources. ... Water management must be well organized for large systems and supersystems. It is also required to establish governmental bodies responsible for the integral planning and the control of water regime management on large watershed. State competence in the area of combined water resources management increases.
- ^{iv} The management of water resources is conceived as the sets of decisions which permit development of water resource in order to match their demand and supply.
- ^v The purpose of water resources management is to provide adequate water for humans and the natural environment.
- ^{vi} Water management involves the development, control, protection, regulation and beneficial use of surface and ground-water resources.
- ^{vii} Sustainability entails a different way of thinking about the consequences and implications of development decision. This is leading to a new commitment based on fundamental linkages between environmental protection and management, economic development, and the social well-being of people. Sustainability has become a unifying concept emphasizing the need to consider the impacts resulting from decisions and actions taken today, both on those living today as well as on those following in the future.
- ^{viii} In fact, sustainable development is an old concept that has been used in the management of renewable natural resources to ensure that the rate of harvesting a resource is smaller than the rate of its renewal.
- ^{ix} Sustainable water resource systems are those designed and managed to contribute fully to the objectives of society, now and in the future, while maintaining their ecological, environmental and hydrological integrity.
- ^x The new ethic of sustainable development reinforces and extends the main principles of water resources management.
- ^{xi} Applying principles of sustainability requires major changes in the objectives on which decisions are based and an understanding of the complicated interrelationships between existing ecological, economic and social factors. ... The second important aspect of sustainable decision making is the challenge of time (long term consequences). ... Extension of temporal scale is required if we are to address the needs of future generations. Extension of temporal scales triggers the expansion of spatial boundaries too. The third aspect of the sustainability context is the change in procedural policies (implementation). Pursuing sustainable project selection will require major changes in both substantive and procedural policies.
- ^{xii} Interrelated water resources policy making and management by government agencies responsible for the strategical and management tasks, executed on the basis of the systems concept under consideration of the internal functional relationships between quality and quantity aspects of both surface -and groundwater, as well as the external

-
- interactions between the water resources management and other fields of management like environmental protection, regional planning, nature conservation etc.
- ^{xiii} Integrated water resources management balances the views and goals of affected political groups, geographical regions, and purpose of water management; and protects the water supplies for natural and ecological systems.
- ^{xiv} The notion is based on the perception of water as an integral part of the ecosystem, a natural resource and a social and economic good. It embraces quantity and quality aspects, surface water and groundwater and multi-interest competing demands. It should enhance the efficiency of water use, sustainable water utilization patterns, water conservation, and wastage minimization. Rational land use and landscape planning should play an important role in controlling water distribution, and the abatement of pollution and eutrophication of freshwater bodies.
- ^{xv} IWRM is a process, which aims at ensuring the co-ordinated development and management of water, land and related resources for maximizing economic and social welfare without compromising the sustainability of vital environmental systems.
- ^{xvi} Even if we accept that IWRM cannot be defined exactly, its name still raises many disturbing questions. ... At least the term water resources management should be clarified. In a most comprehensive way WRM can be visualized with the help of an onion-analogy. Like the bulb, the water resources management activity itself is usually not very much visible. It does however accumulate and amalgamate the essence of the concentric layers and sprouting the result, the stem, and leaves to be seen and perceived. Thus, the integration is done by the plant.
- ^{xvii} To characterize water resources management the following aspects worth to be noted:
- WRM itself is an integration of techniques, natural and social administrative setup rooted in social aspirations, climatic changes etc.
 - WRM is basically a complicated decision making procedure, where we realize the consequence of these decisions rather than perceiving the process itself.
- ^{xviii} Why should then the term 'integrated' be added? This adjective creates the aura of high aspirations, promises distinctly new approaches vis-à-vis the previous practice and ultimately raising the expectation of 'better' decisions, and a more careful use of the resource water. Both in linguistic and mathematical sense the 'integrated' suggests completeness. Like integrating along an axis or over a plane, IWRM can be imagined as an integration of water resources management considerations and efforts in space, time, over social implications, and sectoral water use etc.
- ^{xix} Policy analysis might be defined as "the study of the impacts of different policies on a system in order to provide decision makers with the required information to select the most desirable policy to solve the problems."
- ^{xx} In the screening stage, a great number of possible tactics were roughly evaluated to identify promising tactics (mainly based on benefit-cost and implementation criteria). In the policy design stage, promising tactics were combined in different ways to obtain a number of promising policies. In the impact assessment stage the selected promising policies underwent a more detailed analysis to determine their consequences for all relevant user categories
- ^{xxi} A Decision Support System allows decision-makers to combine personal judgment with computer output, in a user-machine interface, to produce meaningful information for support in a decision-making process. Such systems are capable of assisting in solution of all problems (structured, semi-structured, and unstructured) using all information available on request. They use quantitative models and database elements for problem solving. They are an integral part of the decision-maker's approach to problem identification and solution.
- ^{xxii} Decision support systems are computer-based systems which integrate state information, dynamic or process information, and plan evaluation tools into a single software implementation. State information refers to data which represent the water resource or environmental system's state at any point of time. Process information represents first principles governing the resource's behavior over time. Evaluation tools refer to utility software for transforming raw system data into information relevant for decision making.

ANNEXE - B. RECAPITULATIFS DES CARACTERISTIQUES DES OUVRAGES HYDRAULIQUES

Tableau B-1 : Caractéristiques des barrages du Mae Klong

Nom	Vajiralongkorn	Srinagarind	Tha Thung Na	Khao Laem
Type de barrage	Dérivation	Réservoir	Régulation journalière	Réservoir
Année d'achèvement	1970	1980	1981	1984
Superficie de bassin versant, km ²	26 441	10 880	11 428	3 720
Apports annuels, 10 ⁶ m ³	-	4 457	-	5 161
Volume total, 10 ⁶ m ³	40,5	17 745	54,8	8 860
Volume actif, 10 ⁶ m ³	-	7 470	28,8	5 848
Volume inactif (mort), 10 ⁶ m ³	-	10 265	26,0	3 012
Niveau maximum, m (snm)	22,5	182,4	59,7	160,5
Niveau supérieur de fonctionnement, m (snm)	22,5	180,0	59,7	155,0
Zone d'écrêtement des crues	-	175,15-180,0	-	150,0-155,0
Zone de restriction (tampon)	-	159,0-163,35	-	135,0-143,1
Niveau inférieur de fonctionnement, m (snm)		159,0	55,5	135,0
Capacité de production d'électricité, MW	-	720 (3x120+2x180)	38 (2x19)	300 (3x100)
Electricité produite annuelle, GW.h	-	1 185	165	460

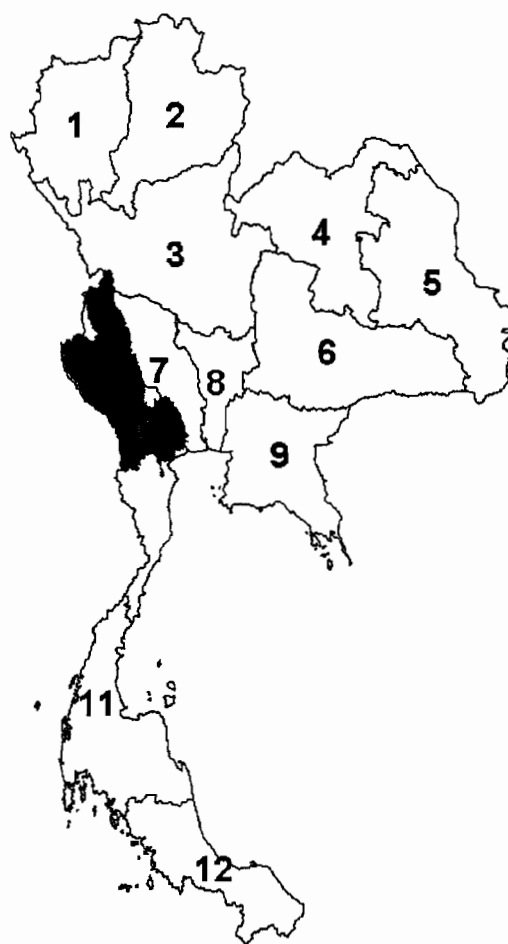
Tableau B-2 : Caractéristiques des canaux du GMKIP

Nom de canal	Capacité (m3/s)	Longueur (km)
Feeder Canal (Canal d'amenée)	276,00	3,077
Left Main Canal, LMC (Canal principal de rive gauche)	129,00	62,64
Canal 1L	18,62	57,80
Canal 2L	121,26	60,50
Canal 1R	92,40	125,20
Canal 2R	22,00	67,25
Canal Jarakae Sampan	~50,00	

Tableau B-3 : Caractéristiques et contraintes de fonctionnement des différents organes des barrages du Mae Klong

Nom du barrage-réservoir	Khao Laem [KHL]			Srinagarind [SNR]			Tha Thung Na [TTN]		
<i>Evacuateur de crue</i>									
Z min, m(snm)	146,0			171,0					
Q max, m ³ /s	3 200			2 420			3 000		
<i>Vanne de fond</i>									
Z min, m(snm)	120,0			55,0					
Q max, m ³ /s	270,0			160,0					
<i>Usine hydroélectrique</i>									
Puissance installée totale, MW	300			720			39		
<i>Turbine</i>									
	KHL01-03			SNR01-03			TTN01-02		
Puissance installée, MW	3x100			3x120			2*19,5		
H aménagé (<i>design head</i>), m	61 m			105m			15,4 m		
	(149,5 m-snm)			(165,0 m-snm)					
Z inférieur de fonctionnement	135,0			159,0					
Z min de fonctionnement	120,0			143,5			150		
Q aménagé, m ³ /s	181,0			135,0					
<i>Turbine-pompe</i>									
	-			SNR04-05			-		
Puissance installée, MW	-			2x180			-		
H aménagé (<i>design head</i>), m	-			115 m			-		
	-			(175,0 m-snm)			-		
Z inférieur de fonctionnement	-			165,0			-		
Z min de fonctionnement	-			156,0			-		
Q aménagé, m ³ /s	-			199,6			-		
<i>Conduites forcées</i>									
	D	L	V	D ¹	L	V			
Diamètre x Longueur x Vitesse en m x m x m ³ /s	6,3	240	5,93	6,0	159	4,43	<= SNR01-03		
				5,3	107	5,68			
				4,5	24	7,88			
				7,0	162	4,95	<= SNR04-05		
				6,0	122	6,74			
			5,2	13	8,97				

¹ Chacune des conduites possède trois tronçons successifs dont les caractéristiques sont données de l'amont vers l'aval : un premier tronçon de 159m avec un diamètre de 6,0m, puis un second de 107m, etc..



**Figure B-1 : Les 12 Offices Régionaux d'irrigation et les zones correspondantes
(la zone grisée correspond au bassin versant du Mae Klong)**

Tableau B-4 : Projets O&M au sein du GMKIP

Projet O&M	Période de construction	Superficie du projet (hectares)	Localisation
Vajiralongkom	1964-1970		
Kamphaeng Saen	1965-1975	49 440	Rive gauche (phase I)
Nakhon Pathom	1966-1973	71 936	Rive gauche (phase I)
Nakhonchum	1966-1972	47 200	Rive gauche (phase I)
Ratchaburi LB	1967-1977	38 608	Rive gauche (phase I)
Panomthuan	1977-1999	53 664	Rive gauche (phase II)
Son Phi Nong	1981-1991	59 344	Rive gauche (phase II)
Banglen	depuis 1983	59 568	Rive gauche (phase II)
Tamaka	1970-1980	54 720	Rive droite (phase II)
Ratchaburi RB	1973-1989	53 968	Rive droite (phase II)
Damnoen Saduak	1902-1907	25 210	Rive gauche (zone de conservation)
Total		513 658	

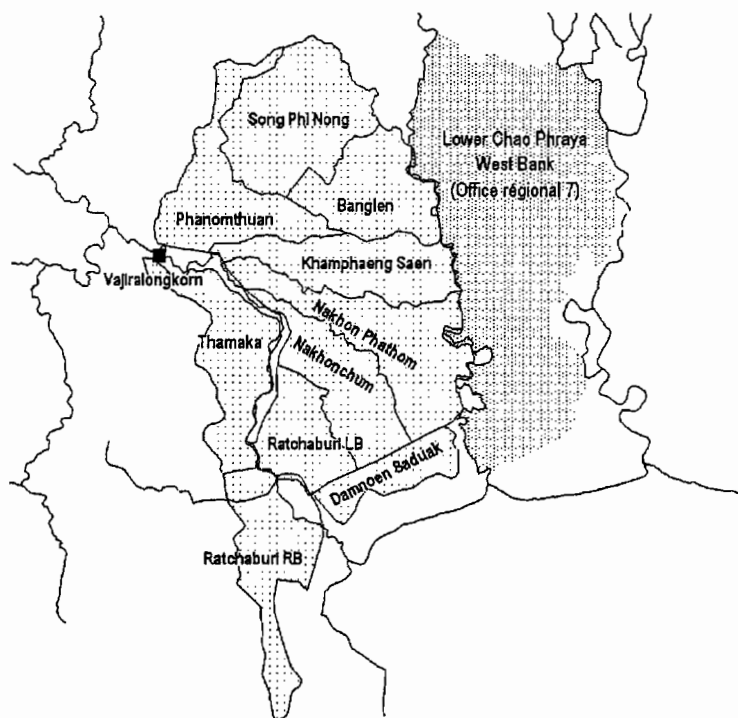


Figure B-2 : Projets O&M au sein du GMKIP, en charge de l'Office Régional 10

**Tableau B-5 : Valeurs des paramètres « techniques » utilisées
dans le modèle de fonctionnement de l'hydrosystème du Mae Klong
pour le scénario de simulation de référence**

Paramètres	Valeurs utilisées dans le scénario de référence	Test de sensibilité	Impact sur les résultats
Apports	Années moyennes (1980-1984) ne pas prendre en compte des apports intermédiaires lors de la planification	4 séries différentes	Fort
Demande en eau du bas du bassin			
Irrigation du Mae Klong	moyenne	$M \pm 2 \cdot ET^2$	Non/Faible
Débit d'étiage (Lâchers min en aval)	50 m ³ /s	0 – 100 m ³ /s	Modéré
Eau potable de Bangkok	45 m ³ /s	0-100 m ³ /s	Modéré
Irrigation du Tha Chin en saison sèche	80 m ³ /s (4 mois à partir de janvier)	0-100 m ³ /s	Faible
Demande en eau pour la production hydroélectrique	20 % 3 h de pompage sèche/humide = 1	0 – 100 % 0-5 hr 0-5	Fort Faible Assez fort
Niveau de la retenue Srinagarind			
Maximum	182,5	Non	-
Supérieur de fonctionnement	180,0	Non	-
Inférieur de fonctionnement (turbines 04/05)	165	Non	-
Inférieur de fonctionnement (turbines 01/02/03)	159	Non	-
Inférieur de fonctionnement	165	100-159-168	Modéré
Minimum	159	Non	-
Upper Rule Curve	Non	Non	-
Lower Rule Curve	Non	Non	-
Niveau moyen à long terme	165	100-159-180	Modéré
Niveau de la retenue Khao Laem			
Maximum	160,5	Non	-
Supérieur de fonctionnement	155,0	Non	-
Inférieur de fonctionnement (turbines 01/02/03)	135	Non	-
Inférieur de fonctionnement	135	120-135	Modéré
Minimum	120	Non	-
Upper Rule Curve	Non	Non	-
Lower Rule Curve	Non	Non	-
Niveau moyen à long terme	135	120-155	Modéré

² M : moyenne, ET : écart-type

ANNEXE - C. INTERFACE GRAPHIQUE DU MODELE

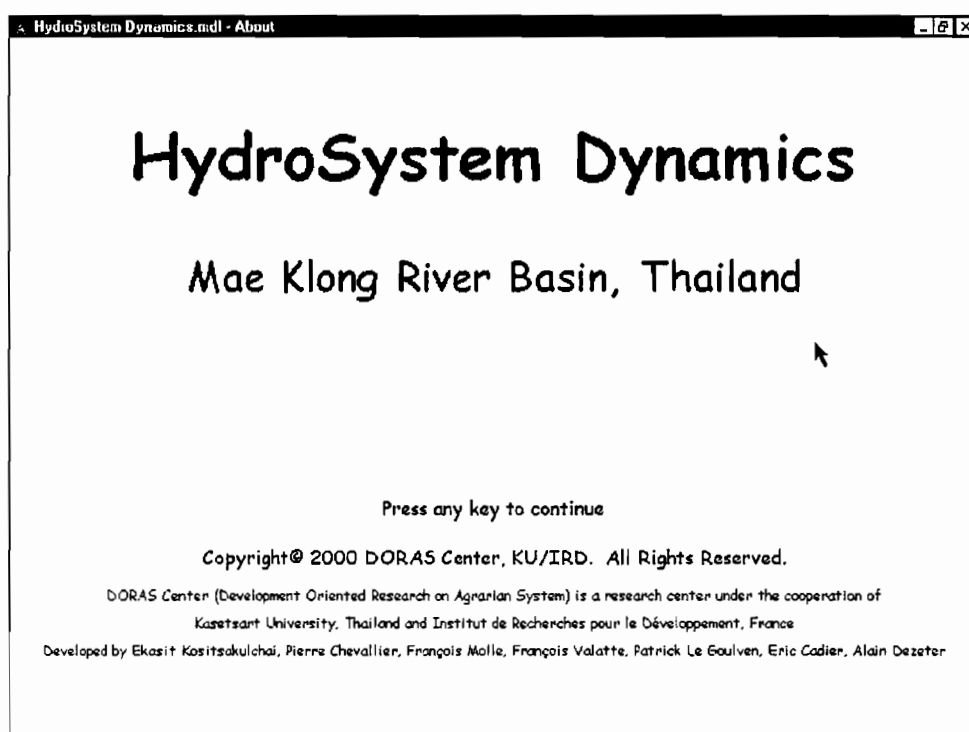


Figure C-1 : A propos du modèle de la dynamique de l'hydrosystème du Mae Klong

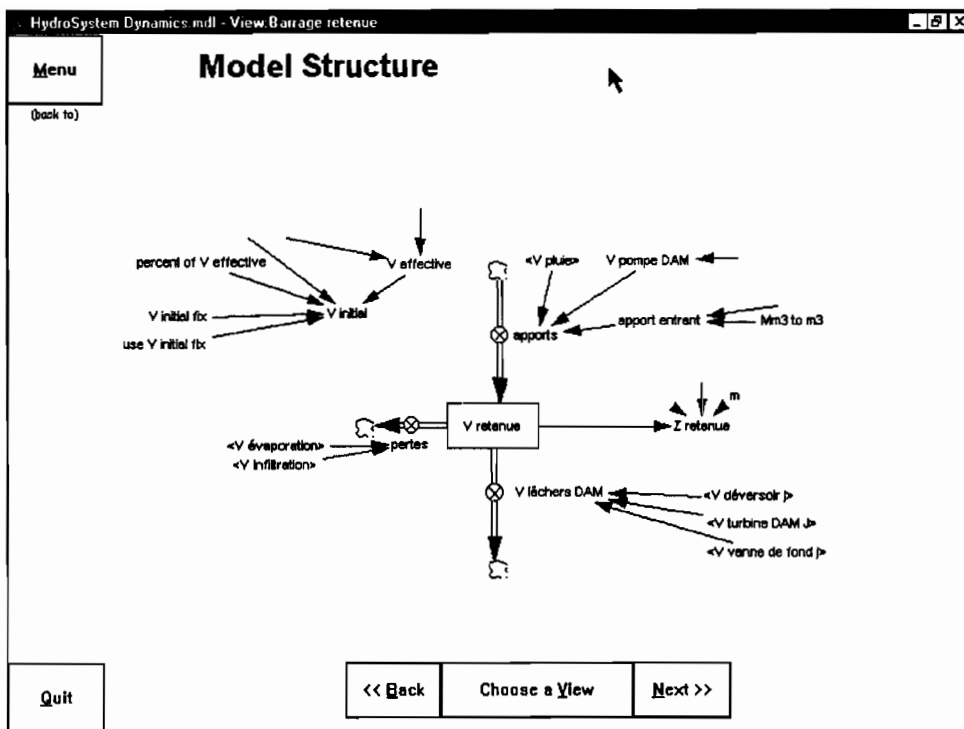


Figure C-2 : Visualisation de la structure du modèle

Figure C-3 : Options de simulation

HydroSystem Dynamics.mdl - Option : Water Supply

Water Supply Option

= > Inflows to the Storage Dams

Typical Inflow

Average year : 1975
 Average year (slightly dry) : 1968
 Average year (slightly wet) : 1985

Extreme Inflow

Very dry year : 1998	Very wet year : 1961
Very dry year : 1983	Very wet year : 1996
Very dry year : 1977	Very wet year : 1981

= > Lateral Flows (Sideflow)

☐ Take into an account the lateral flows in planning

Menu (back to)

Option

Supply

Demand

Power

Policy

Quit

OK

Cancel

Figure C-4 : Information pour les ressources en eau

HydroSystem Dynamics.mdl - Option : Water Demand

Lower Basin Water Demands

= > Irrigation Demand for the Greater Mae Klong Irrigation Project
(estimation based on recorded data between 1988-1998)

☐ very low (mean-SD) ☐ low (mean-0.5SD) ☒ average (mean) ☐ high (mean+0.5SD) ☐ very high (mean+SD)

= > Minimum Downstream Water Release from Vajiralongkorn Dam

Min 40 cms 50 Max 60 cms

= > Water Diversion for Bangkok Water Supply

Min 0 cms 45 Max 60 cms

= > Dry Season Diversion for Tha Chin Basin

Months: 4 (No. of months from January)

Min 0 cms 80 Max 100 cms

Menu (back to)

Option

Supply

Demand

Power

Policy

Quit

OK

Cancel

Figure C-5 : Définition des demandes en eau à l'aval du bassin

HydroSystem Dynamics.mdl - Option : Hydropower

Hydropower Generation Demand

= > Hydropower Generation Demand : defined as % of installed capacity

0 % 100 %

= > Time of pumping operation (max. 5 hours/day)

= > Select Ratio of Dry/Wet Hydropower Generation

Menu (back to)

Option

Supply

Demand

Power

Policy

Quit OK Cancel

Figure C-6 : Définition de la demande hydroélectrique

HydroSystem Dynamics.mdl - Option : Management Policy

Reservoir Operation Policy

	Srinagarind	Khao Laem
Maximum Water Level, m.MSL	182.5	160.5
Normal High Water Level, m.MSL	180	155
Apply Upper Rule Curve?	☒ No ☐ Yes:EGAT1 ☐ Yes:EGAT2	☒ No ☐ Yes:EGAT1 ☐ Yes:EGAT2
Desired Water Level, m.MSL (long-term average level)	165.0	135.0
Apply Lower Rule Curve? (Low Water Level : SNR=159, KHL=135)	☒ No ☐ Yes:EGAT1 ☐ Yes:EGAT2 ☐ Yes:AIT	☒ No ☐ Yes:EGAT1 ☐ Yes:EGAT2 ☐ Yes:AIT
Low Water Level, m.MSL	165.0	135.0
Minimum Water Level, m.MSL (river outlet level)	159	120

Menu (back to)

Option

Supply

Demand

Power

Policy

Quit OK Cancel

Figure C-7 : Définition de la gestion des retenues

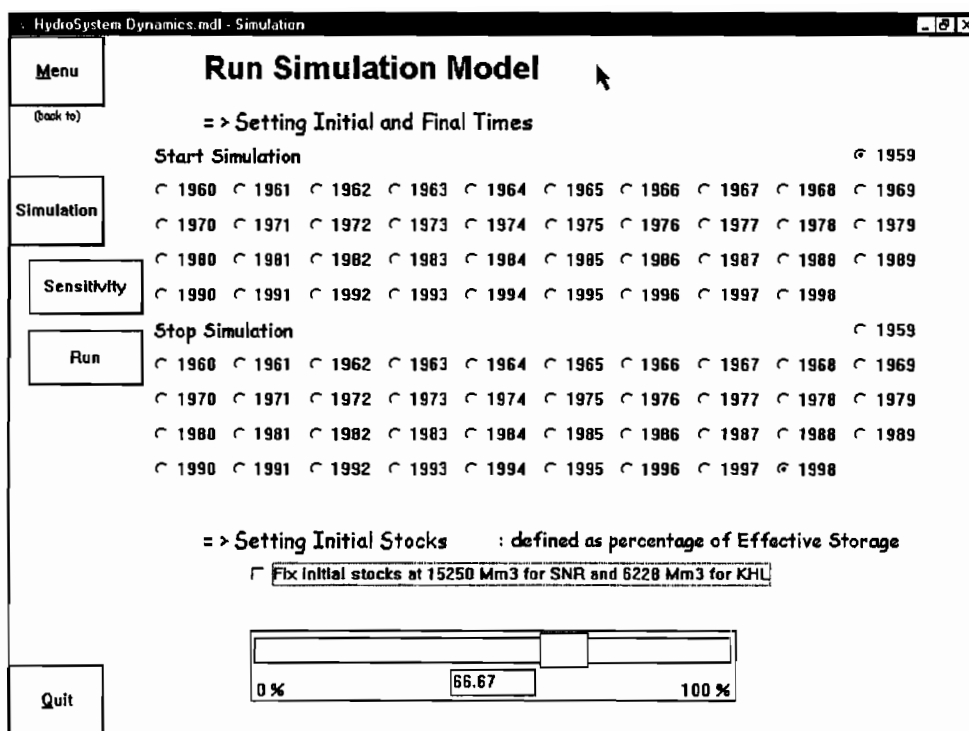


Figure C-8 : Paramétrage de simulation

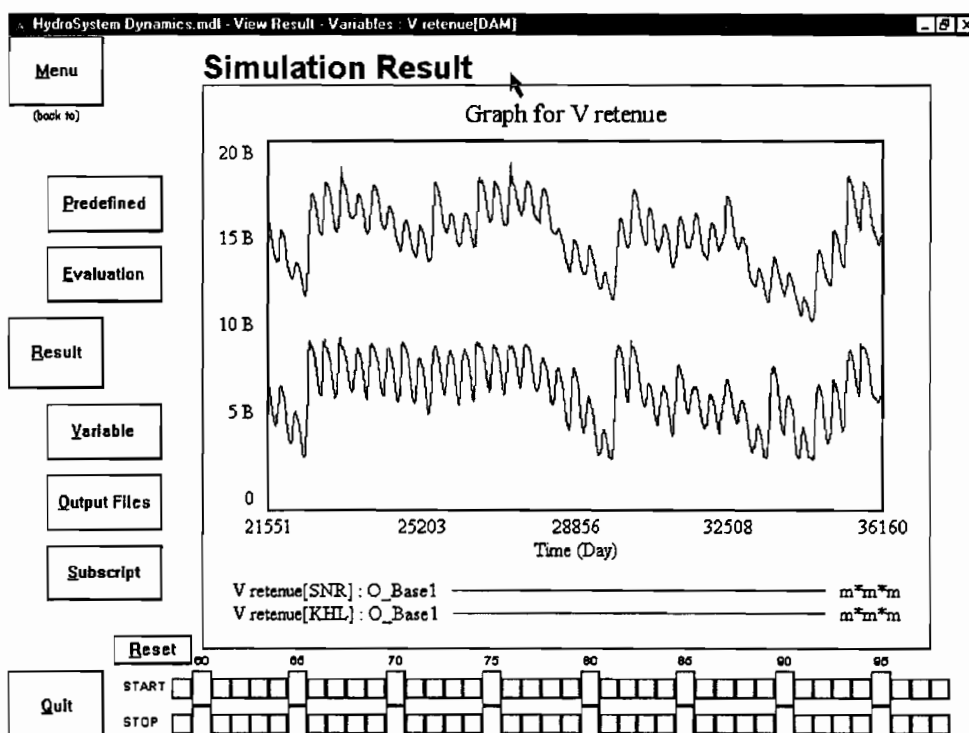


Figure C-9 : Visualisation des résultats de simulation

ANNEXE - D. MODELE EN LANGAGE DE VENSIM®

D-1 DEFINITION « SUBSCRIPTS »

```
DAM : SNR,KHL
~
~      |

ref : POS, ZERO, NEG
~
~      |

SCALE: MICRO,MACRO,LOCAL SNR, LOCAL KHL
~
~      |

SOURCE: NONE, EGAT1, EGAT2, AIT
~
~      |

TURBINE : SNR01,SNR02,SNR03,SNR04,SNR05,KHL01,KHL02,KHL03
~
~      |

turbine KHL : KHL01,KHL02,KHL03
~
~      |

turbine SNR : SNR01,SNR02,SNR03,SNR04,SNR05
~
~      |

turbine SNRnp : SNR01,SNR02,SNR03
~
~      |

turbine SNRp : SNR04,SNR05
~
~      |

TUYAU : ASNR01,ASNR02,ASNR03,ASNR04,ASNR05,BSNR01,BSNR02,BSNR03,BSNR04,BSNR05,CSNR01,\
        CSNR02,CSNR03,CSNR04,CSNR05, AKHL01,AKHL02,AKHL03
~
~      |

tuyau AKHL : AKHL01,AKHL02,AKHL03
~
~      |

tuyau ASNR : ASNR01,ASNR02,ASNR03
~
~      |

tuyau ASNRp : ASNR04,ASNR05
~
~      |

tuyau BSNR : BSNR01,BSNR02,BSNR03
~
~      |
```

```

tuyau BSNRp : BSNR04,BSNR05
~
~ |

tuyau CSNR : CSNR01,CSNR02,CSNR03
~
~ |

tuyau CSNRp : CSNR04,CSNR05
~
~ |

tuyau SNR01 : ASNR01,BSNR01,CSNR01
~
~ |

tuyau SNR02 : ASNR02,BSNR02,CSNR02
~
~ |

tuyau SNR03 : ASNR03,BSNR03,CSNR03
~
~ |

tuyau SNR04 : ASNR04,BSNR04,CSNR04
~
~ |

tuyau SNR05 : ASNR05,BSNR05,CSNR05
~
~ |

TYPE: LOW BASIN,ELEC SNR,ELEC KHL,FLOOD SNR,FLOOD KHL
~
~ |

```

D-2 DONNÉES EXTERNES

```

*****
.00Data
*****~

|

apport entrant[KHL]= Vc[KHL] * Mm3 to m3 ~~|
apport entrant[SNR]= Vc[SNR] * Mm3 to m3
~      m*m*m/Day
~      Vc[KHL]*1e+006, Vc[SNR]*1e+006
|

apport entrant prévu[DAM]
~      m*m*m/Day
~      |

apport entrant prévu 6 mois[DAM]
~      m*m*m
~      |

ETP[DAM]
~      mm/Day
~      |

infiltration[DAM] = 0
~      mm/Day
~      |

rain[DAM]
~      mm/Day
~      |

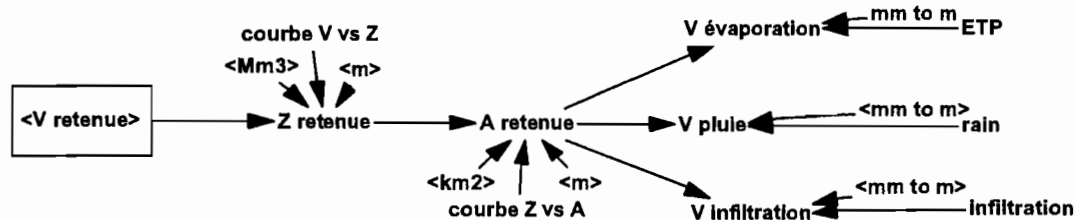
V sideflow
~      Mm3/Day
~      |

Vc[DAM]
~      Mm3/Day
~      |

week
~      week
~      |

```

D-3 COMPOSANTES NATURELLES



```

*****
.OlNature
*****~
|

apport intermédiaire prévu
~      m*m*m/Day
~      |

apports[SNR] = apport entrant[SNR] + V pluie[SNR] + V pompe DAM[SNR] ~~|
apports[KHL] = apport entrant[KHL] + V pluie[KHL]
~      m*m*m/Day
~      |

apports intermédiaires= V sideflow * Mm3 to m3
~      m*m*m/Day
~      |

pertes[DAM] = V évaporation[DAM] + V infiltration[DAM]
~      m*m*m/Day
~      |

Use sideflow= 0
~      dmn1
~      |

V évaporation[DAM]= ETP[DAM]*mm to m * A retenue[DAM]
~      m*m*m/Day
~      |

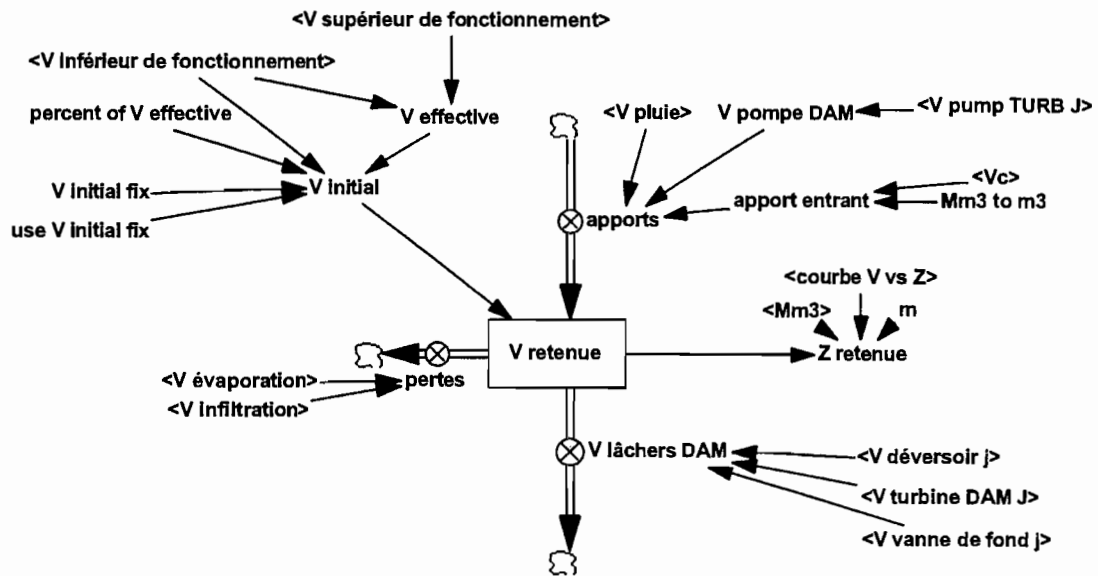
V infiltration[DAM]= infiltration[DAM]*mm to m * A retenue[DAM]
~      m*m*m/Day
~      |

V pluie[DAM]= rain[DAM]*mm to m * A retenue[DAM]
~      m*m*m/Day
~      |

```

D-4 COMPOSANTES BARRAGES-RESERVOIRS

D-4.1 Caractéristiques de retenue



```

*****
.02Dam
*****~
|

V initial [DAM] =
  IF THEN ELSE (use V initial fix=1,V initial fix[DAM], V inférieur de fonctionnement[\
    DAM] + V effective[DAM]*percent of V effective/100)
  ~      m*m*m
  ~      |

V initial fix[SNR]= 1.525e+010 ~~|
V initial fix[KHL]= 6.228e+009
  ~      m*m*m
  ~      |

use V initial fix= 0
  ~      dmn1
  ~      |

courbe Q vs Z aval[KHL] (
  [(0,80)-(1000,90)], (0,83.8), (150,83.8), (300,84.8), (400,85.6), (600,87), (800,88), (1000\
    ,88.8)) ~~|
courbe Q vs Z aval[SNR] (
  [(0,50)-(1000,65)], (0,55.4), (130,55.4), (200,56.3), (300,57.2), (400,57.7), (500,58.3), (\
    600,58.9), (700,59.4), (800,59.8), (900,60.3), (1000,60.6))
  ~      dmn1
  ~      |

courbe V vs Z[SNR] (
  [(0,0)-(25000,200)], (0,55), (5.7,65), (19.6,70), (44.4,75), (100.6,80), (204.6,85), (353.6\
    ,90), (553.3,95), (818,100), (1159.2,105), (1576,110), (2065.9,115), (2633,120), (3276.4,125\

```

```

), (3995.3,130), (4796.5,135), (5694.5,140), (6707.5,145), (7849.5,150), (9132.6,155), (10562.3\
,160), (12136.4,165), (13855.8,170), (15724.3,175), (17745.1,180), (19922.6,185), (22262.6\
,190)) --|
courbe V vs Z[KHL] ( [(0,0)-(20000,200)], (0,84), (0.135,85), (1.585,90), (16.148,95), (58.688\
,100), (150.558,105), (320.325,110), (587.366,115), (962.544,120), (2135.37,130), (3001.67\
,135), (4117.46,140), (7036.77,150), (8860.87,155), (10914,160) )
~      dam1
~      |

courbe Z vs A[SNR] ( [(0,0)-(200,600)], (65,1.9), (70,3.7), (75,6.3), (80,16.2), (85,25.4)\
, (90,34.2), (95,45.7), (100,60.2), (105,76.3), (110,90.5), (115,105.5), (120,121.3), (125,\
136), (130,151.5), (135,168.9), (140,190.3), (145,214.9), (150,241.9), (155,271.4), (160,300.5\
), (165,329.1), (170,358.7), (175,389.1), (180,418.8), (185,452.2), (190,483.8) ) --|
courbe Z vs A[KHL] ( [(80,0)-(200,600)], (84,0), (85,0.192), (90,0.993), (95,5.235), (100,\
12.5), (105,25.282), (110,43.273), (115,63.839), (120,86.88), (130,153.437), (135,197.901\
), (140,244.559), (150,340.713), (155,388), (160,438.215), (160.5,439.6), (163,453.5) )
~      dam1
~      |

courbe Z vs V[SNR] (
[(55,0)-(190,22600)], (0,0), (55,0), (65,5.7), (70,19.6), (75,44.4), (80,100.6), (85,204.6)\
, (90,353.6), (95,553.3), (100,818), (105,1159.2), (110,1576), (115,2065.9), (120,2633), (125,\
3276.4), (130,3995.3), (135,4796.5), (140,5694.5), (145,6707.5), (150,7849.5), (155,9132.6\
), (160,10562.3), (165,12136.4), (170,13855.8), (175,15724.3), (180,17745.1), (185,19922.6\
), (190,22262.6)) --|
courbe Z vs V[KHL] ( [(80,0)-(200,20000)], (84,0), (85,0.135), (90,1.585), (95,16.148), (100\
,58.688), (105,150.558), (110,320.325), (115,587.366), (120,962.544), (130,2135.37), (135\
,3001.67), (140,4117.46), (150,7036.77), (155,8860.87), (160,10914), (160.5,11000), (163,\
12160) )
~      dam1
~      |

percent of V effective= 66.67
~      dam1
~      |

V effective[DAM]=
V supérieur de fonctionnement[DAM] - V inférieur de fonctionnement[DAM]
~      m*m*m
~      |

V lâchers DAM[DAM] = V déversoir j[DAM] + V turbine DAM J[DAM] + V vanne de fond j[DAM\
]
~      m*m*m/Day
~      |

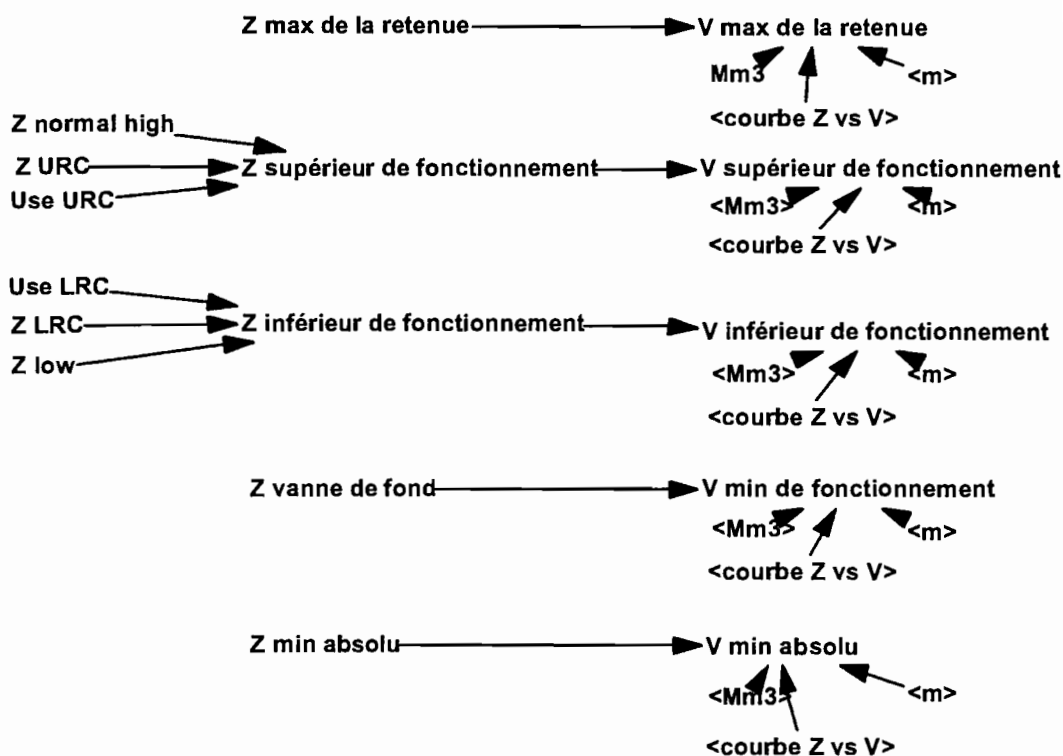
V lâchers min[DAM] = Q lâchers min[DAM] * s2Day
~      m*m*m/Day
~      |

V retenue[DAM]= INTEG (
apports[DAM] - pertes[DAM] - V lâchers DAM[DAM],
V initial[DAM])
~      m*m*m
~      V inférieur de fonctionnement[DAM] + ( V supérieur de fonctionnement[DAM] \
- V inférieur de fonctionnement[DAM] ) * 2 / 3
~      |

Z retenue[DAM] = courbe V vs Z[DAM] ( V retenue[DAM] / Mm3 ) * m
~      m
~      |

```

D-4.2 Contraintes de gestion de retenue



```

*****
.02DamLogique
*****~
|
Q lâchers max[DAM] = 750
~      m*m*m/s
~      |

Use LRC[DAM] = 0
~      dmn1
~      |

Use URC[DAM] = 0
~      dmn1
~      |

V inférieur de fonctionnement[DAM] = courbe Z vs V[DAM] ( Z inférieur de fonctionnement\
[DAM] / m ) * Mm3
~      m*m*m
~      |

V min de fonctionnement[DAM] = courbe Z vs V[DAM] ( Z vanne de fond[DAM] / m ) * Mm3
~      m*m*m
~      |

V supérieur de fonctionnement[DAM] = courbe Z vs V[DAM] ( Z supérieur de fonctionnement\
[DAM] / m ) * Mm3
~      m*m*m
~      |

```

```

Z inférieur de fonctionnement[DAM]=
  IF THEN ELSE ( Use LRC[DAM] = 0 , Z low[DAM] , \
    IF THEN ELSE ( Use LRC[DAM] = 1 , Z LRC[DAM, EGAT1] , \
      IF THEN ELSE ( Use LRC[DAM] = 2 , Z LRC[DAM, EGAT2] , \
        IF THEN ELSE ( Use LRC[DAM] = 3 , Z LRC[DAM, AIT] , Z low[DAM] ) ) ) )
~
~
Z low[SNR]= 165 --|
Z low[KHL]= 135
~
~
Z LRC[DAM, SOURCE]
~
~
Z normal high[SNR]= 180 --|
Z normal high[KHL]= 155
~
~
Z supérieur de fonctionnement[DAM]=
  IF THEN ELSE ( Use URC[DAM] = 0, Z normal high[DAM], \
    IF THEN ELSE ( Use URC[DAM] = 1, Z URC[DAM, EGAT1], \
      IF THEN ELSE ( Use URC[DAM] = 2, Z URC[DAM, EGAT2], Z normal high[DAM]
    ) ) )
~
~
Z URC[DAM, SOURCE]
~
~

*****
.02DamPhysique
*****~

A retenue[DAM] = ( courbe Z vs A[DAM] ( Z retenue[DAM] / m ) ) * km2
~
~
V lâchers max[DAM] = Q lâchers max[DAM] * s2Day
~
~
V max de la retenue[DAM] = courbe Z vs V[DAM] ( Z max de la retenue[DAM] / m ) * Mm3
~
~
V min absolu[DAM] = courbe Z vs V[DAM] ( Z min absolu[DAM] / m ) * Mm3
~
~
Z aval retenue[DAM] = courbe Q vs Z aval[DAM] ( Q opr DAM[DAM] / cms ) * m
~
~
Z max de la retenue[KHL] = 160.5 --|
Z max de la retenue[SNR] = 182.5
~
~
Z min absolu[KHL] = 84 --|
Z min absolu[SNR] = 55
~
~

```


D-4.3 Déversoir

```
*****
.02Déversoir
*****~
|

Q déversoir max[KHL] = 3200 ~~|
Q déversoir max[SNR] = 2420
~      m*m*m/s
~      |

V déversoir j[DAM] = IF THEN ELSE ( Z retenue[DAM] < Z crête déversoir[DAM] , 0, IF THEN ELSE\
      ( V lâchers décidé dam[DAM] > V turbine DAM J[DAM] + V vanne de fond j[DAM] , MIN \
      ( V déversoir max j[DAM] , V lâchers décidé dam[DAM] - V turbine DAM J[DAM] - V vanne de
fond j\
      [DAM] ) , 0) )
~      m*m*m/Day
~      |

V déversoir max j[DAM] = Q déversoir max[DAM] * s2Day
~      m*m*m/Day
~      |

Z crête déversoir[KHL] = 146 ~~|
Z crête déversoir[SNR] = 171
~      m
~      |
```

D-4.4 Vanne de fond

```
*****
.02VanneFond
*****~
|

Q vanne de fond max[KHL] = 270 ~~|
Q vanne de fond max[SNR] = 160
~      m*m*m/s
~      |

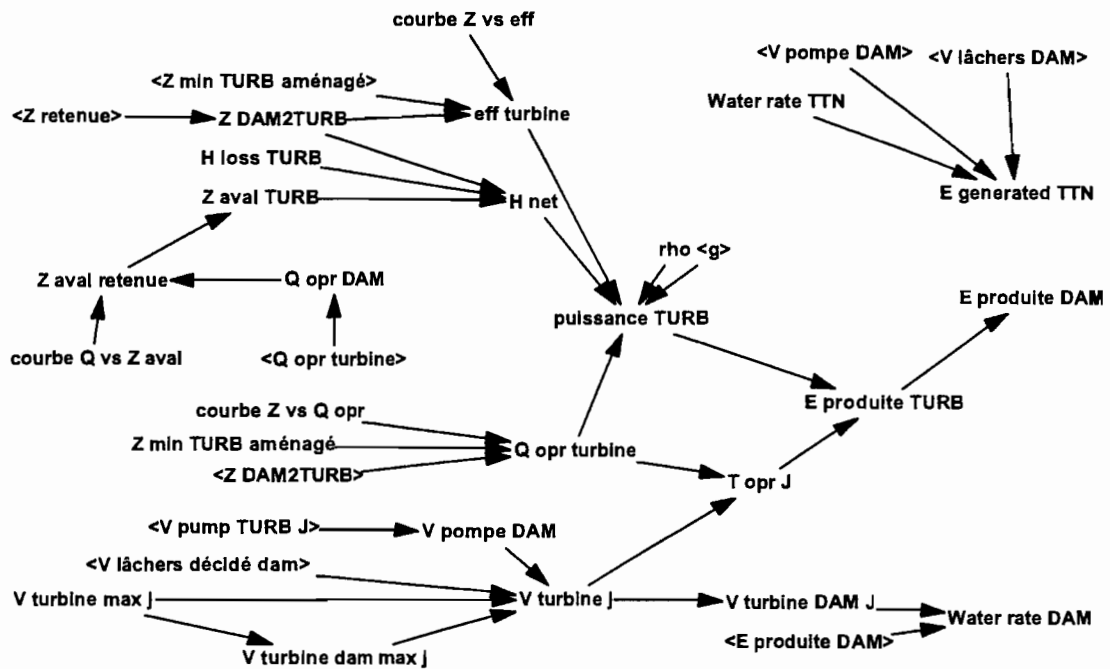
V vanne de fond j[DAM] = IF THEN ELSE ( Z retenue[DAM] < Z vanne de fond[DAM] , 0, MIN\
      ( V vanne de fond max j[DAM] , MAX ( 0, V lâchers décidé dam[DAM] - V turbine DAM J\
      [DAM] ) ) )
~      m*m*m/Day
~      |

V vanne de fond max j[DAM] = Q vanne de fond max[DAM] * s2Day
~      m*m*m/Day
~      |

Z vanne de fond[KHL]=120 ~~|
Z vanne de fond[SNR]=
159
~      m
~      SNR = 55 m (MSL)      |
```

D-5 USINE HYDROELECTRIQUE

D-5.1 Turbine



```

*****
.02Turbine
*****

courbe Z vs eff[turbine KHL] (
  [(100,0)-(165,94)], (100,70), (130,81.5), (135,83.2), (140,84.8), (145,85.7), (150,86), (155\
    ,85.8), (160,85)) ~~|
courbe Z vs eff[turbine SNRnp] (
  [(100,50)-(200,90)], (100,70), (120,76.6), (130,80.2), (140,83), (150,84.6), (160,85.4), (165\
    ,85.5), (170,85.8), (180,86.2), (185,86.2)) ~~|
courbe Z vs eff[turbine SNRp] (
  [(100,50)-(200,90)], (100,70), (125,77), (150,81.4), (155,82.3), (160,82.8), (165,83.2), (170\
    ,83.5), (175,83.6), (180,83.5), (185,83))
  ~      dmn1
  ~      |

courbe Z vs Q opr[turbine KHL] (
  [(80,100)-(190,190)], (100,105), (130,145), (135,152.5), (140,160), (145,167), (150,174), (\
    154,181), (155,176), (160,153.5)) ~~|
courbe Z vs Q opr[turbine SNRnp] (
  [(80,0)-(200,150)], (100,90), (120,104.5), (130,112), (140,118), (150,125), (160,132), (170\
    ,139), (173.5,141), (180,133), (190,122.5)) ~~|
courbe Z vs Q opr[turbine SNRp] (
  [(100,120)-(200,200)], (100,135), (150,173), (155,177), (160,182), (164.955,186.184), (170\
    ,190), (175,194.4), (180,185), (185,176))
  ~      dmn1
  ~      |

E produite DAM[KHL]= SUM ( E produite TURB[turbine KHL!] ) ~~|

```

```

E produite DAM[SNR] = SUM ( E produite TURB[turbine SNR!] )
~      W*hr/Day
~      |

E generated TTN=(MIN(300*2*3600*24, V lâchers DAM[SNR]-V pompe DAM[SNR]))/Water rate TTN
~      W*hr/Day
~      Qmax = 300*2 cms
~      |

E produite TURB[TURBINE] = puissance TURB[TURBINE] * T opr J[TURBINE] / s2hr
~      W*hr/Day
~      |

eff turbine[TURBINE]=
  IF THEN ELSE(Z DAM2TURB[TURBINE]<Z min TURB aménagé[TURBINE],0, courbe Z vs eff[TURBINE\
    ] ( Z DAM2TURB[TURBINE] / m ))
~      dnnl
~      |

H loss TURB[KHL01] = H perte tuyau[AKHL01] ~~|
H loss TURB[KHL02] = H perte tuyau[AKHL02] ~~|
H loss TURB[KHL03] = H perte tuyau[AKHL03] ~~|
H loss TURB[SNR01] = SUM ( H perte tuyau[tuyau SNR01!] ) ~~|
H loss TURB[SNR02] = SUM ( H perte tuyau[tuyau SNR02!] ) ~~|
H loss TURB[SNR03] = SUM ( H perte tuyau[tuyau SNR03!] ) ~~|
H loss TURB[SNR04] = SUM ( H perte tuyau[tuyau SNR04!] ) ~~|
H loss TURB[SNR05] = SUM ( H perte tuyau[tuyau SNR05!] )
~      m
~      |

H net[TURBINE] = Z DAM2TURB[TURBINE] - Z aval TURB[TURBINE] - H loss TURB[TURBINE]
~      m
~      |

puissance TURB[TURBINE] = rho * g * eff turbine[TURBINE] / 100 * H net[TURBINE] * Q opr turbine\
  [TURBINE]
~      W
~      |

Q opr DAM[SNR] = SUM ( Q opr turbine[turbine SNR!] ) ~~|
Q opr DAM[KHL] = SUM ( Q opr turbine[turbine KHL!] )
~      m*m*m/s
~      |

Q opr turbine[TURBINE] = IF THEN ELSE ( Z DAM2TURB[TURBINE] < Z min TURB aménagé[TURBINE\
  ] , 0, courbe Z vs Q opr [TURBINE] ( Z DAM2TURB[TURBINE] / m ) * cms )
~      m*m*m/s
~      |

T opr J[TURBINE] = MIN ( 3600 * 24, IF THEN ELSE ( Q opr turbine[TURBINE] = 0, 0, V turbine j\
  [TURBINE] / Q opr turbine[TURBINE] ) )
~      s/Day
~      |

V turbine dam max j[SNR] = SUM ( V turbine max j[turbine SNR!] ) ~~|
V turbine dam max j[KHL] = SUM ( V turbine max j[turbine KHL!] )
~      m*m*m/Day
~      |

V turbine j[turbine SNR] = MIN ( V turbine max j[turbine SNR] , IF THEN ELSE ( V turbine dam max j\
  [SNR] = 0, 0, V turbine max j[turbine SNR] / V turbine dam max j[SNR] * ( V lâchers décidé dam\
  [SNR] + V pompe DAM[SNR] ) ) ) ~~|
V turbine j[turbine KHL] = MIN ( V turbine max j[turbine KHL] , IF THEN ELSE ( V turbine dam max j\
  [KHL] = 0, 0, V turbine max j[turbine KHL] / V turbine dam max j[KHL] * V lâchers décidé dam\
  [KHL] ) )
~      m*m*m/Day
~      |

V turbine max j[TURBINE] = Q opr turbine[TURBINE] * s2Day
~      m*m*m/Day
~      |

Water rate DAM[DAM]=ZIDZ(V turbine DAM J[DAM],E produite DAM[DAM])
~      m*m*m/(W*hr)

```

```

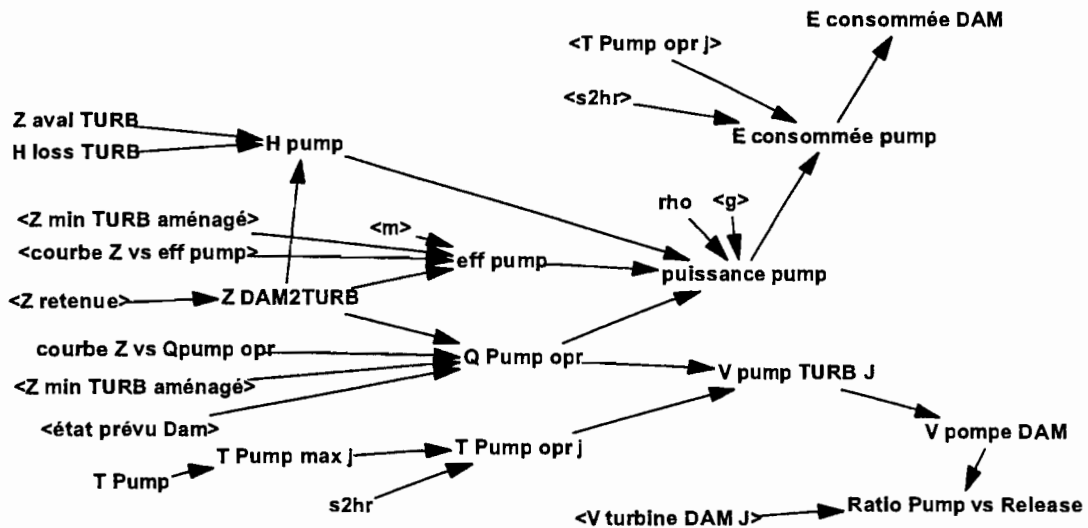
~      |
Z aval TURB[turbine SNR] = Z aval retenue[SNR] ~~|
Z aval TURB[turbine KHL] = Z aval retenue[KHL]
~      m      |
~      |

Z DAM2TURB[turbine SNR] = Z retenue[SNR] ~~|
Z DAM2TURB[turbine KHL] = Z retenue[KHL]
~      m      |
~      |

Z min TURB aménagé[turbine KHL]= 135 ~~|
Z min TURB aménagé[turbine SNRnp]= 159 ~~|
Z min TURB aménagé[turbine SNRp]= 162
~      m      |
~      |

```

D-5.2 Pompe (Turbine réversible)



```

*****
.02Pump
*****~

E consommée DAM= SUM(E consommée pump[turbine SNRp])
~      W*hr/Day
~      |

courbe Z vs eff pump[turbine SNRp](
  [(100,50)-(200,90)],(100,70),(150,80.4),(155,81.3),(160,81.8),(165,82.2),(170,82.5),\
  (175,82.6),(180,82.5),(185,82))
~      dmn1
~      |

courbe Z vs Qpump opr[turbine SNRp](
  [(100,100)-(200,300)],(100,250),(150,185),(180,145),(185,138))
~      dmn1
~      |

eff pump[turbine SNRp]=
  IF THEN ELSE(Z DAM2TURB[turbine SNRp]<Z min TURB aménagé[turbine SNRp],0, courbe Z vs eff pump\
  [turbine SNRp] ( Z DAM2TURB[turbine SNRp] / m ))
~      dmn1
~      |

E consommée pump[turbine SNRp] = puissance pump[turbine SNRp] * T Pump opr j[turbine SNRp\
  ] / s2hr
~      W*hr/Day
~      |

H pump[turbine SNRp] = Z DAM2TURB[turbine SNRp] - Z aval TURB[turbine SNRp] + H loss TURB\
  [turbine SNRp]
~      m
~      |

puissance pump[turbine SNRp]=
  ZIDZ( rho * g * H pump[turbine SNRp] * Q Pump opr[turbine SNRp], eff pump[turbine SNRp\
  ] / 100 )
~      W

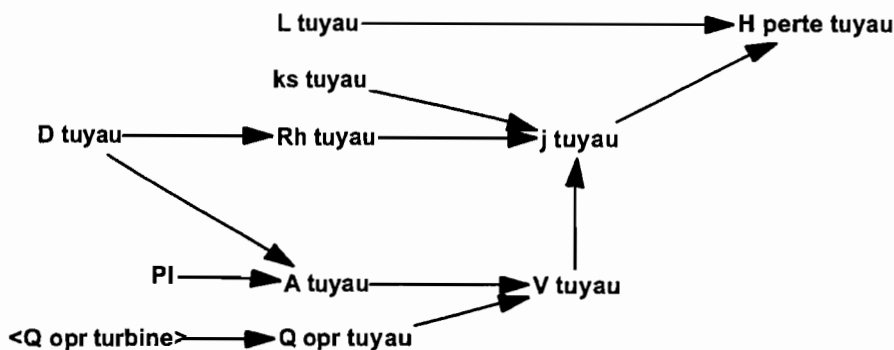
```

```

~      |
Q Pump opr[turbine SNRp]=
  IF THEN ELSE (état prévu Dam[SNR]=1,0, IF THEN ELSE ( Z DAM2TURB[turbine SNRp]<Z min TURB
aménagé\
      [turbine SNRp], 0, courbe Z vs Qpump opr[turbine SNRp] ( Z DAM2TURB[turbine SNRp] )\
      * cms / m ))
~      m/s
~      |
T Pump= 3
~      hr/Day
~      |
T Pump max j[turbine SNRp]= T Pump
~      hr/Day
~      |
T Pump opr j[turbine SNRp] = T Pump max j[turbine SNRp] * s2hr
~      s/Day
~      |
V pompe DAM[SNR] = SUM ( V pump TURB J[turbine SNRp] ) ~~|
V pompe DAM[KHL]= 0
~      m*m*m/Day
~      |
V pump TURB J[turbine SNRp] = Q Pump opr[turbine SNRp] * T Pump opr j[turbine SNRp]
~      m*m*m/Day
~      |

```

D-5.3 Conduite d'amenée



```

*****
.02Tuyau
*****~
|
A tuyau[TUYAU] = D tuyau[TUYAU] * D tuyau[TUYAU] * PI / 4
~      m*m
~      |
D tuyau[tuyau ASNR] = 6 ~~|
D tuyau[tuyau BSNR] = 5.3 ~~|
D tuyau[tuyau CSNR] = 4.5 ~~|
D tuyau[tuyau ASNRp] = 7 ~~|

```

```

D tuyau[tuyau BSNRp] = 6 ~~|
D tuyau[tuyau CSNRp] = 5.2 ~~|
D tuyau[tuyau AKHL] = 6.3
~      m
~      |

H perte tuyau[TUYAU] = j tuyau[TUYAU] * L tuyau[TUYAU]
~      m
~      |

j tuyau[TUYAU] = ( V tuyau[TUYAU] / ( ks tuyau[TUYAU] * Rh tuyau[TUYAU] ^ ( 2 / 3 ) ) \
~      ) ^ 2
~      1
~      |

ks tuyau[TUYAU] = 95
~      dmn1
~      |

L tuyau[tuyau ASNR] = 159 ~~|
L tuyau[tuyau BSNR] = 107 ~~|
L tuyau[tuyau CSNR] = 24 ~~|
L tuyau[tuyau ASNRp] = 162 ~~|
L tuyau[tuyau BSNRp] = 122 ~~|
L tuyau[tuyau CSNRp] = 13 ~~|
L tuyau[tuyau AKHL] = 240
~      m
~      |

Q opr tuyau[tuyau SNR01] = Q opr turbine[SNR01] ~~|
Q opr tuyau[tuyau SNR02] = Q opr turbine[SNR02] ~~|
Q opr tuyau[tuyau SNR03] = Q opr turbine[SNR03] ~~|
Q opr tuyau[tuyau SNR04] = Q opr turbine[SNR04] ~~|
Q opr tuyau[tuyau SNR05] = Q opr turbine[SNR05] ~~|
Q opr tuyau[AKHL01] = Q opr turbine[KHL01] ~~|
Q opr tuyau[AKHL02] = Q opr turbine[KHL02] ~~|
Q opr tuyau[AKHL03] = Q opr turbine[KHL03]
~      m*m*m/s
~      |

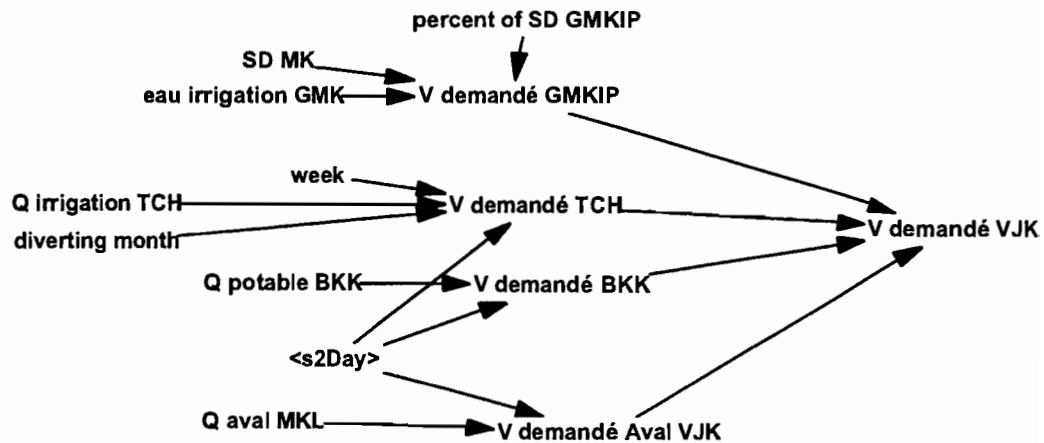
Rh tuyau[TUYAU] = D tuyau[TUYAU] / 4
~      m
~      |

V tuyau[TUYAU] = Q opr tuyau[TUYAU] / A tuyau[TUYAU]
~      m/s
~      |

```

D-6 DEMANDES EN EAU

D-6.1 Demandes à l'aval du bassin



```

*****
.05Demande
*****~
|

marge[SNR]=
  MAX ( IF THEN ELSE(Z retenue[SNR]>Z min TURB aménagé[SNR01],V demandé ELEC DAM[SNR]\
    ,0), V lâchers min[SNR] ) ~~|

marge[KHL]=
  MAX ( IF THEN ELSE(Z retenue[KHL]>Z min TURB aménagé[KHL01],V demandé ELEC DAM[KHL]\
    ,0), V lâchers min[KHL] )
  ~ m*m*m/Day
  ~ demande locale non consommation dam
  |

C lâcher min system = SUM ( C lâchers min[DAM!] )
  ~ m*m*m/Day
  ~ |

demande aval nette=
  MAX(0,V demandé VJK-apport intermédiaire prévu*Use sideflow)
  ~ m*m*m/Day
  ~ |

diverting month=4
  ~ month
  ~ |

eau irrigation GMK
  ~ m*m*m/Day
  ~ |

percent of SD GMKIP=
  0
  ~ dmn1
  ~ vary from -1.5 to 1.5 => -1.5SD to 1.5SD

```



```

|
Q aval MKL = 50
~      m*m*m/s
~      |

Q irrigation TCH=
80
~      m/s
~      |

Q lâchers min[DAM] = 25
~      m*m*m/s
~      |

Q potable BKK = 45
~      m*m*m/s
~      |

SD MK
~      m*m*m/Day
~      |

V demandé Aval VJK = Q aval MKL * s2Day
~      m*m*m/Day
~      |

V demandé BKK = Q potable BKK * s2Day
~      m*m*m/Day
~      |

V demandé GMKIP=
MAX(0,eau irrigation GMK+percent of SD GMKIP*SD MK/100)
~      m*m*m/Day
~      |

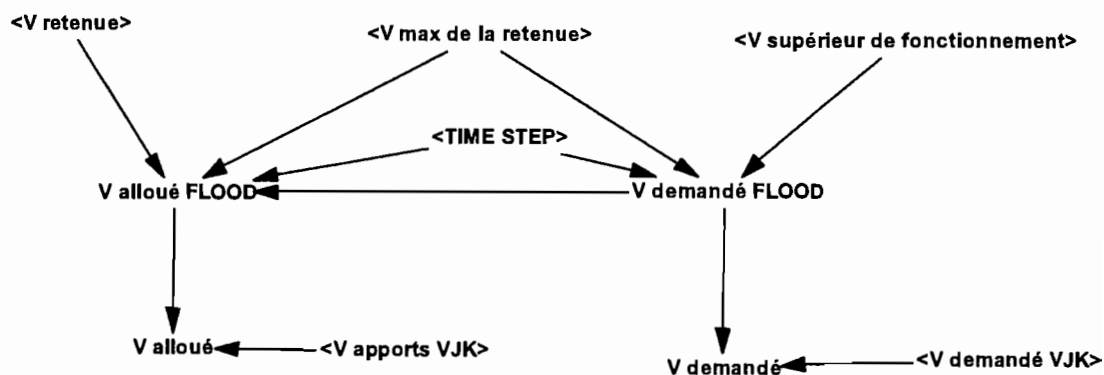
V demandé TCH=
IF THEN ELSE (week >52 :OR: week < diverting month*365.25/12/7,Q irrigation TCH*s2Day\
,0)
~      m*m*m/Day
~      |

V demandé totale[TYPE]= INTEG (
V demandé[TYPE],
0)
~      m*m*m
~      |

V demandé VJK=
V demandé Aval VJK + V demandé GMKIP + V demandé TCH + V demandé BKK
~      m*m*m/Day
~      |

```

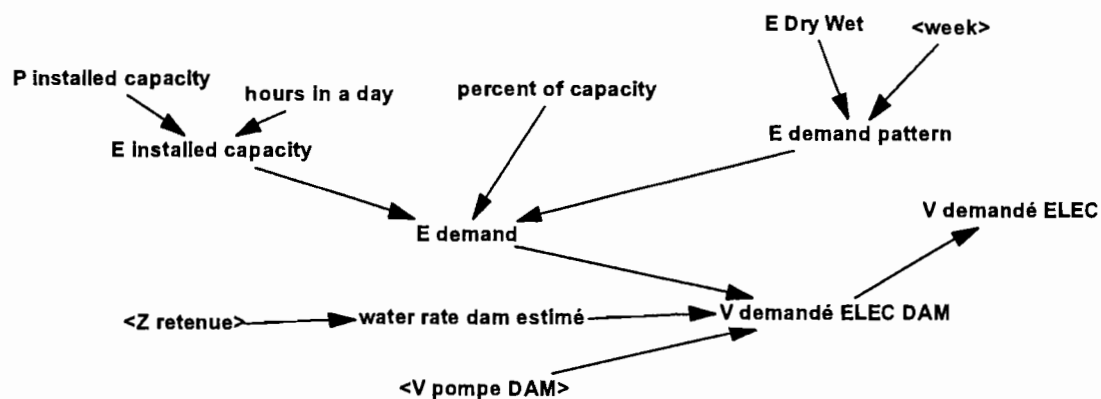
D-6.2 Demandes en volume dans la zone d'écêtement des crues de retenue



```

*****
.05Flood
*****~
|
V alloué FLOOD[DAM] =
  MIN((V max de la retenue[DAM] - V retenue[DAM]) / TIME STEP, V demandé FLOOD[DAM])
  ~      m*m*m/Day
  ~
V demandé FLOOD[DAM] =
  (V max de la retenue[DAM] - V supérieur de fonctionnement[DAM]) / TIME STEP
  ~      m*m*m
  ~
  
```

D-6.3 Demande hydroélectrique



```

*****
.05Hydropower
*****~
|

E déficit[DAM]= MAX(0,E demand[DAM]-E produite DAM[DAM])
~      W*hr/Day
~      |

E demand[DAM]= E installed capacity[DAM]*percent of capacity*E demand pattern/100
~      W*hr/Day
~      |

E demand pattern= IF THEN ELSE(week > 52 :OR: week<=26, 2*E Dry Wet/(E Dry Wet+1),2/(\
~      E Dry Wet+1))
~      dmn1
~      |

E Dry Wet= 1
~      dmn1
~      |

E installed capacity[DAM]= P installed capacity[DAM]*hours in a day
~      W*hr/Day
~      |

P installed capacity[KHL]= 3e+008 ~~|
P installed capacity[SNR]= 7.2e+008
~      W
~      |

percent of capacity= 20
~      dmn1
~      SNR : 13.89 ; KHL : 13.33
~      |

Ratio Pump vs Release= ZIDZ(V pompe DAM[SNR],V turbine DAM J[SNR])
~      dmn1
~      |

V demandé ELEC= SUM ( V demandé ELEC DAM[DAM!] )
~      m*m*m/Day
~      |

V demandé ELEC DAM[DAM]= MAX(0,E demand[DAM] * water rate dam estimé[DAM]-V pompe DAM\
~      [DAM])
~      m*m*m/Day
~      |

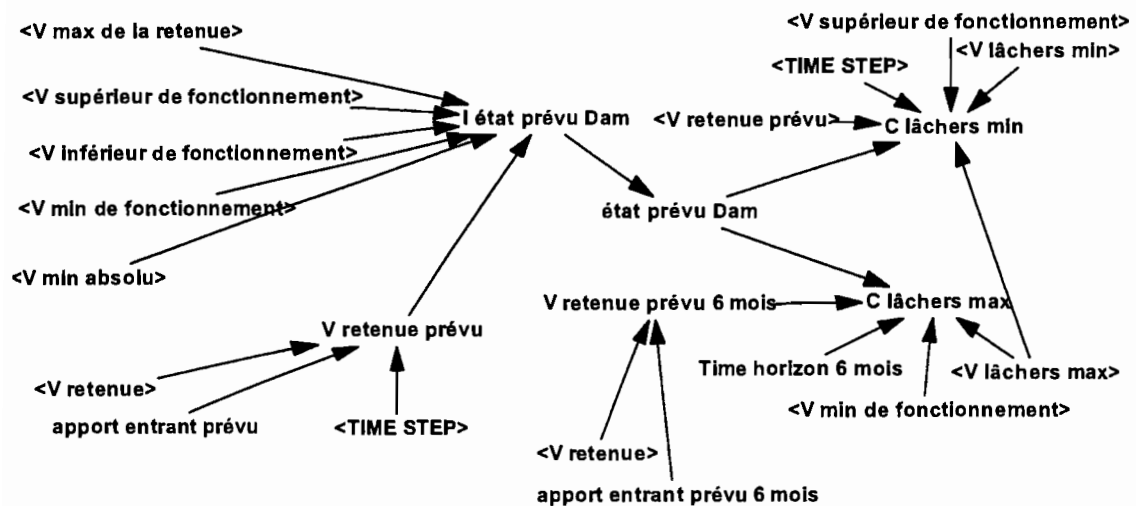
water rate dam estimé[SNR] = 4.0505e-008 * Z retenue[SNR] ^ 2 - 4.7357e-005 * Z retenue\
~      [SNR] + 0.0109 ~~|
water rate dam estimé[KHL] = 2.7593e-006 * Z retenue[KHL] ^ 2 - 0.000937 * Z retenue\
~      KHL] + 0.0852
~      m*m*m/(W*hr)
~      |

Water rate TTN= 22.5/1000
~      m*m*m/(W*hr)
~      |

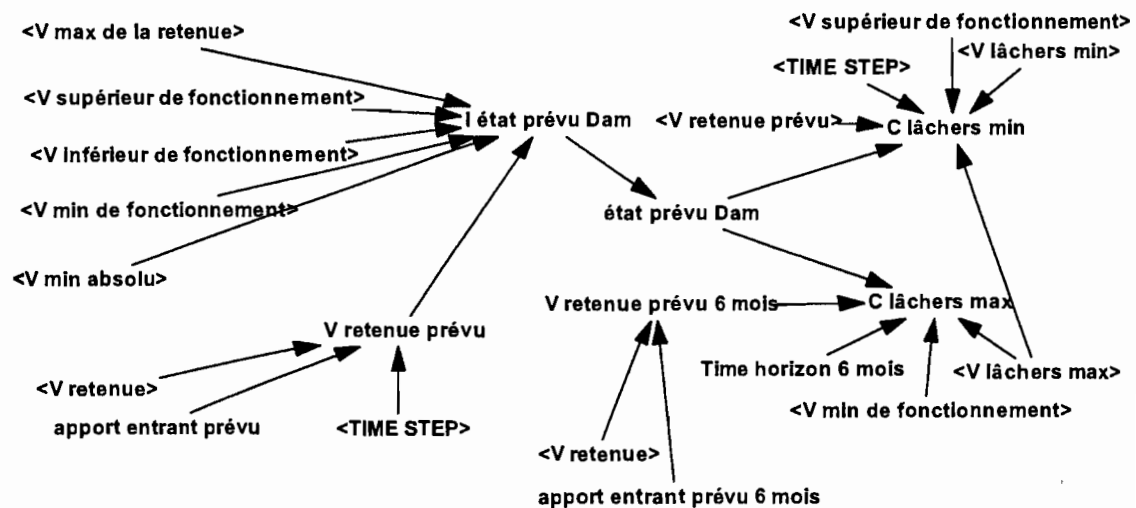
```

D-7 DECISION DE LACHERS

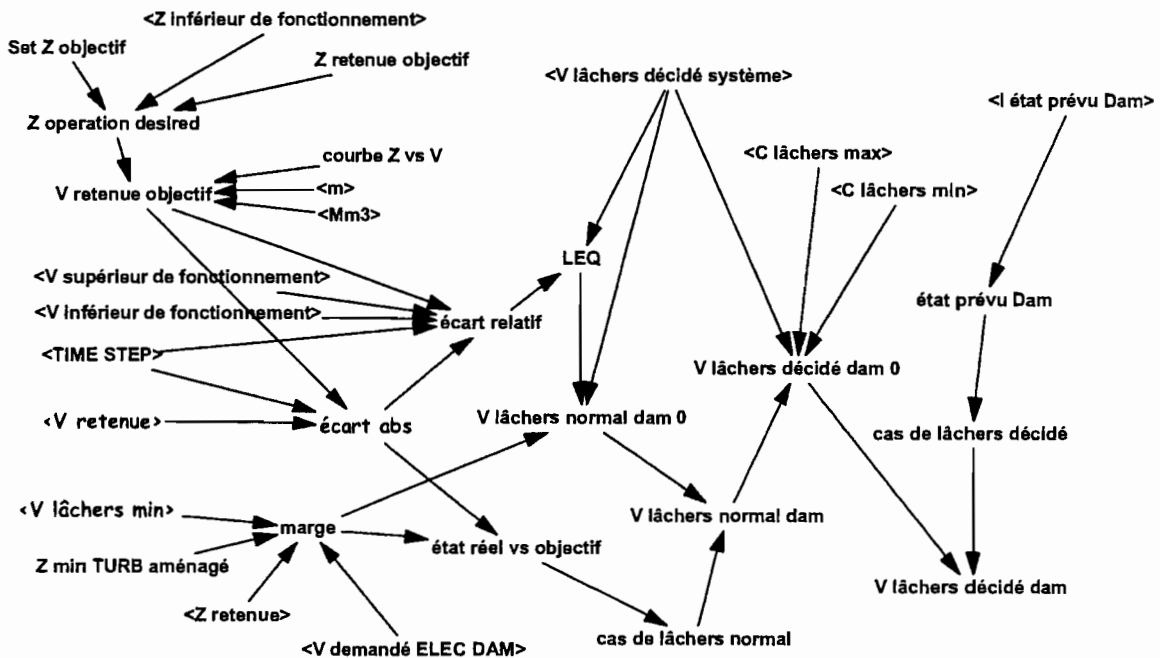
D-7.1 Etat des ressources



D-7.2 Lâchers du système multi-réservoir



D-7.3 Lâchers du réservoir individuel du système



```

*****
.06Décision
*****~
|
C lâchers max[DAM]=
  IF THEN ELSE ( état prévu Dam[DAM] < 0, MAX ( 0, \
    MIN( V lâchers max[DAM], (V retenue prévu 6 mois[DAM]-V min de fonctionnement[DAM])\
    /Time horizon 6 mois ) ), V lâchers max[DAM] )
-   m*m*m/Day
-   |
C lâchers max system = SUM ( C lâchers max[DAM!] )
-   m*m*m/Day
-   |
C lâchers min[DAM]=
  IF THEN ELSE ( état prévu Dam[DAM] > 0, MIN ( V lâchers max[DAM] , \
    (V retenue prévu[DAM]-V supérieur de fonctionnement[DAM])/TIME STEP ) , \
    V lâchers min[DAM] )
-   m*m*m/Day
-   |
cas de lâchers décidé=
  IF THEN ELSE(état prévu Dam[SNR]<0 :AND: état prévu Dam[KHL]<0, 1, \
    IF THEN ELSE(état prévu Dam[SNR]<0 :AND: état prévu Dam[KHL]=0, 2, \
    IF THEN ELSE(état prévu Dam[SNR]<0 :AND: état prévu Dam[KHL]>0, 3, \
    IF THEN ELSE(état prévu Dam[SNR]=0 :AND: état prévu Dam[KHL]<0, 4, \
    IF THEN ELSE(état prévu Dam[SNR]=0 :AND: état prévu Dam[KHL]=0, 5, \
    IF THEN ELSE(état prévu Dam[SNR]=0 :AND: état prévu Dam[KHL]>0, 6, \
    IF THEN ELSE(état prévu Dam[SNR]>0 :AND: état prévu Dam[KHL]<0, 7, \
    IF THEN ELSE(état prévu Dam[SNR]>0 :AND: état prévu Dam[KHL]=0, 8, \
    IF THEN ELSE(état prévu Dam[SNR]>0 :AND: état prévu Dam[KHL]>0, 9, \
    10 ))) )))
-   dmn1
-   |
cas de lâchers normal=

```

```

IF THEN ELSE(état réel vs objectif[SNR]<0 :AND: état réel vs objectif[KHL]<0, 1, \
  IF THEN ELSE(état réel vs objectif[SNR]<0 :AND: état réel vs objectif[KHL]=0, 2, \
  IF THEN ELSE(état réel vs objectif[SNR]<0 :AND: état réel vs objectif[KHL]>0, 3, \
  IF THEN ELSE(état réel vs objectif[SNR]=0 :AND: état réel vs objectif[KHL]<0, 4, \
  IF THEN ELSE(état réel vs objectif[SNR]=0 :AND: état réel vs objectif[KHL]=0, 5, \
  IF THEN ELSE(état réel vs objectif[SNR]=0 :AND: état réel vs objectif[KHL]>0, 6, \
  IF THEN ELSE(état réel vs objectif[SNR]>0 :AND: état réel vs objectif[KHL]<0, 7, \
  IF THEN ELSE(état réel vs objectif[SNR]>0 :AND: état réel vs objectif[KHL]=0, 8, \
  IF THEN ELSE(état réel vs objectif[SNR]>0 :AND: état réel vs objectif[KHL]>0, 9, \
  10 ))) )))
~
~
demande lâcher système=
  MAX ( demande aval nette , V demandé ELEC )
~
~
écart abs[DAM] = ( V retenue[DAM] - V retenue objectif[DAM] ) / TIME STEP
~
~
écart relatif[DAM]=
  ZIDZ(écart abs[DAM], IF THEN ELSE(écart abs[DAM]<0, ABS(V inférieur de fonctionnement[\
  DAM]-V retenue objectif[DAM])/TIME STEP, ABS(V supérieur de fonctionnement[DAM]-V retenue
objectif\
  [DAM])/TIME STEP))
~
~
état prévu Dam[DAM] = IF THEN ELSE ( I état prévu Dam[DAM] < 2, -1, IF THEN ELSE ( I état prévu Dam\
  [DAM] > 3, 1, 0 ) )
~
~
état réel vs objectif[DAM]=
  IF THEN ELSE(ABS(écart abs[DAM])<=marge[DAM], 0, \
  ZIDZ(écart abs[DAM], ABS(écart abs[DAM]) ) )
~
~
I état prévu Dam[DAM] = MAX ( 0, ZIDZ ( V retenue prévu[DAM] - V supérieur de fonctionnement\
  [DAM] , V max de la retenue[DAM] - V supérieur de fonctionnement[DAM] ) ) + MAX ( 0\
  , XIDZ ( MIN ( V retenue prévu[DAM] , V supérieur de fonctionnement[DAM] ) - V inférieur
de fonctionnement\
  [DAM] , V supérieur de fonctionnement[DAM] - V inférieur de fonctionnement[DAM] , 1\
  ) ) + MAX ( 0, XIDZ ( MIN ( V retenue prévu[DAM] , V inférieur de fonctionnement[DAM\
  ] ) - V min de fonctionnement[DAM] , V inférieur de fonctionnement[DAM] - V min de
fonctionnement\
  [DAM] , 1 ) ) + MAX ( 0, XIDZ ( MIN ( V retenue prévu[DAM] , V min de fonctionnement\
  [DAM] ) - V min absolu[DAM] , V min de fonctionnement[DAM] - V min absolu[DAM] , 1)\
  ) )
~
~
LEQ[DAM]=
  V lâchers décidé système * IF THEN ELSE ( écart relatif[DAM] < 0,\
  1 - ZIDZ(ABS(écart relatif[DAM]) , SUM ( ABS ( écart relatif[DAM!] ) ) ) , \
  ZIDZ(ABS ( écart relatif[DAM] ) , SUM ( ABS ( écart relatif[DAM!]) ) ) )
~
~
Set Z objectif=
  1
~
~
V lâchers décidé dam[DAM]=
  IF THEN ELSE(cas de lâchers décidé=1,V lâchers décidé dam 0 [NEG,NEG,DAM],\
  IF THEN ELSE(cas de lâchers décidé=2,V lâchers décidé dam 0 [NEG,ZERO,DAM],\
  IF THEN ELSE(cas de lâchers décidé=3,V lâchers décidé dam 0 [NEG,POS,DAM],\
  IF THEN ELSE(cas de lâchers décidé=4,V lâchers décidé dam 0 [ZERO,NEG,DAM],\
  IF THEN ELSE(cas de lâchers décidé=5,V lâchers décidé dam 0 [ZERO,ZERO,DAM],\
  IF THEN ELSE(cas de lâchers décidé=6,V lâchers décidé dam 0 [ZERO,POS,DAM],\

```

```

IF THEN ELSE(cas de lâchers décidé=7,V lâchers décidé dam 0[POS,NEG,DAM], \
IF THEN ELSE(cas de lâchers décidé=8,V lâchers décidé dam 0[POS,ZERO,DAM], \
IF THEN ELSE(cas de lâchers décidé=9,V lâchers décidé dam 0[POS,POS,DAM], \
-99))) ))) )))
~
m*m*m/Day
~
|

V lâchers décidé dam 0[NEG,NEG,SNR]=
MIN(V lâchers normal dam[SNR],C lâchers max[SNR]) --|
V lâchers décidé dam 0[NEG,NEG,KHL]=
MIN(V lâchers normal dam[KHL],C lâchers max[KHL]) --|
V lâchers décidé dam 0[NEG,ZERO,SNR]=
MIN(V lâchers normal dam[SNR],C lâchers max[SNR]) --|
V lâchers décidé dam 0[NEG,ZERO,KHL]=
V lâchers décidé système-MIN(V lâchers normal dam[SNR],C lâchers max[SNR]) --|
V lâchers décidé dam 0[NEG,POS,SNR]=
MIN(V lâchers normal dam[SNR],C lâchers max[SNR]) --|
V lâchers décidé dam 0[NEG,POS,KHL]=
MAX(V lâchers normal dam[KHL],C lâchers min[KHL]) --|
V lâchers décidé dam 0[ZERO,NEG,SNR]=
V lâchers décidé système-MIN(V lâchers normal dam[KHL],C lâchers max[KHL]) --|
V lâchers décidé dam 0[ZERO,NEG,KHL]=
MIN(V lâchers normal dam[KHL],C lâchers max[KHL]) --|
V lâchers décidé dam 0[ZERO,ZERO,SNR]=
V lâchers normal dam[SNR] --|
V lâchers décidé dam 0[ZERO,ZERO,KHL]=
V lâchers normal dam[KHL] --|
V lâchers décidé dam 0[ZERO,POS,SNR]=
V lâchers décidé système-MAX(V lâchers normal dam[KHL],C lâchers min[KHL]) --|
V lâchers décidé dam 0[ZERO,POS,KHL]=
MAX(V lâchers normal dam[KHL],C lâchers min[KHL]) --|
V lâchers décidé dam 0[POS,NEG,SNR]=
MAX(V lâchers normal dam[SNR],C lâchers min[SNR]) --|
V lâchers décidé dam 0[POS,NEG,KHL]=
MIN(V lâchers normal dam[KHL],C lâchers max[KHL]) --|
V lâchers décidé dam 0[POS,ZERO,SNR]=
MAX(V lâchers normal dam[SNR],C lâchers min[SNR]) --|
V lâchers décidé dam 0[POS,ZERO,KHL]=
V lâchers décidé système-MAX(V lâchers normal dam[SNR],C lâchers min[SNR]) --|
V lâchers décidé dam 0[POS,POS,SNR]=
MAX(V lâchers normal dam[SNR],C lâchers min[SNR]) --|
V lâchers décidé dam 0[POS,POS,KHL]=
MAX(V lâchers normal dam[KHL],C lâchers min[KHL])
~
m*m*m/Day
~
|

V lâchers décidé système = MIN ( C lâchers max system , MAX ( demande lâcher système \
, C lâcher min system ) )
~
m*m*m/Day
~
|

V lâchers normal dam[DAM]=
IF THEN ELSE(cas de lâchers normal=1,V lâchers normal dam 0[NEG,NEG,DAM], \
IF THEN ELSE(cas de lâchers normal=2,V lâchers normal dam 0[NEG,ZERO,DAM], \
IF THEN ELSE(cas de lâchers normal=3,V lâchers normal dam 0[NEG,POS,DAM], \
IF THEN ELSE(cas de lâchers normal=4,V lâchers normal dam 0[ZERO,NEG,DAM], \
IF THEN ELSE(cas de lâchers normal=5,V lâchers normal dam 0[ZERO,ZERO,DAM], \
IF THEN ELSE(cas de lâchers normal=6,V lâchers normal dam 0[ZERO,POS,DAM], \
IF THEN ELSE(cas de lâchers normal=7,V lâchers normal dam 0[POS,NEG,DAM], \
IF THEN ELSE(cas de lâchers normal=8,V lâchers normal dam 0[POS,ZERO,DAM], \
IF THEN ELSE(cas de lâchers normal=9,V lâchers normal dam 0[POS,POS,DAM], \
-99))) ))) )))
~
m*m*m/Day
~
|

V lâchers normal dam 0[NEG,NEG,SNR]=
MAX(marge[SNR],MIN(LEQ[SNR],V lâchers décidé système-marge[KHL])) --|
V lâchers normal dam 0[NEG,NEG,KHL]=
MAX(marge[KHL],MIN(LEQ[KHL],V lâchers décidé système-marge[SNR])) --|
V lâchers normal dam 0[NEG,ZERO,SNR]=
marge[SNR] --|
V lâchers normal dam 0[NEG,ZERO,KHL]=
V lâchers décidé système-marge[SNR] --|
V lâchers normal dam 0[NEG,POS,SNR]=

```

```

        marge[SNR] ~~|
V lâchers normal dam 0[NEG,POS,KHL]=
        V lâchers décidé système-marge[SNR] ~~|
V lâchers normal dam 0[ZERO,NEG,SNR]=
        V lâchers décidé système-marge[KHL] ~~|
V lâchers normal dam 0[ZERO,NEG,KHL]=
        marge[KHL] ~~|
V lâchers normal dam 0[ZERO,ZERO,SNR]=
        MAX(marge[SNR],MIN(LEQ[SNR],V lâchers décidé système-marge[KHL])) ~~|
V lâchers normal dam 0[ZERO,ZERO,KHL]=
        MAX(marge[KHL],MIN(LEQ[KHL],V lâchers décidé système-marge[SNR])) ~~|
V lâchers normal dam 0[ZERO,POS,SNR]=
        marge[SNR] ~~|
V lâchers normal dam 0[ZERO,POS,KHL]=
        V lâchers décidé système-marge[SNR] ~~|
V lâchers normal dam 0[POS,NEG,SNR]=
        V lâchers décidé système-marge[KHL] ~~|
V lâchers normal dam 0[POS,NEG,KHL]=
        marge[KHL] ~~|
V lâchers normal dam 0[POS,ZERO,SNR]=
        V lâchers décidé système-marge[SNR] ~~|
V lâchers normal dam 0[POS,ZERO,KHL]=
        marge[KHL] ~~|
V lâchers normal dam 0[POS,POS,SNR]=
        MAX(marge[SNR],MIN(LEQ[SNR],V lâchers décidé système-marge[KHL])) ~~|
V lâchers normal dam 0[POS,POS,KHL]=
        MAX(marge[KHL],MIN(LEQ[KHL],V lâchers décidé système-marge[SNR]))
~      m*m*m/Day
~      |

V retenue objectif[DAM]=
        courbe Z vs V[DAM] (Z operation desired[DAM] ) * Mm3 / m
~      m*m*m
~      |

V retenue prévu[DAM] = V retenue[DAM] + apport entrant prévu[DAM] * TIME STEP
~      m*m*m
~      |

V retenue prévu 6 mois[DAM] = V retenue[DAM] + apport entrant prévu 6 mois[DAM]
~      m*m*m
~      |

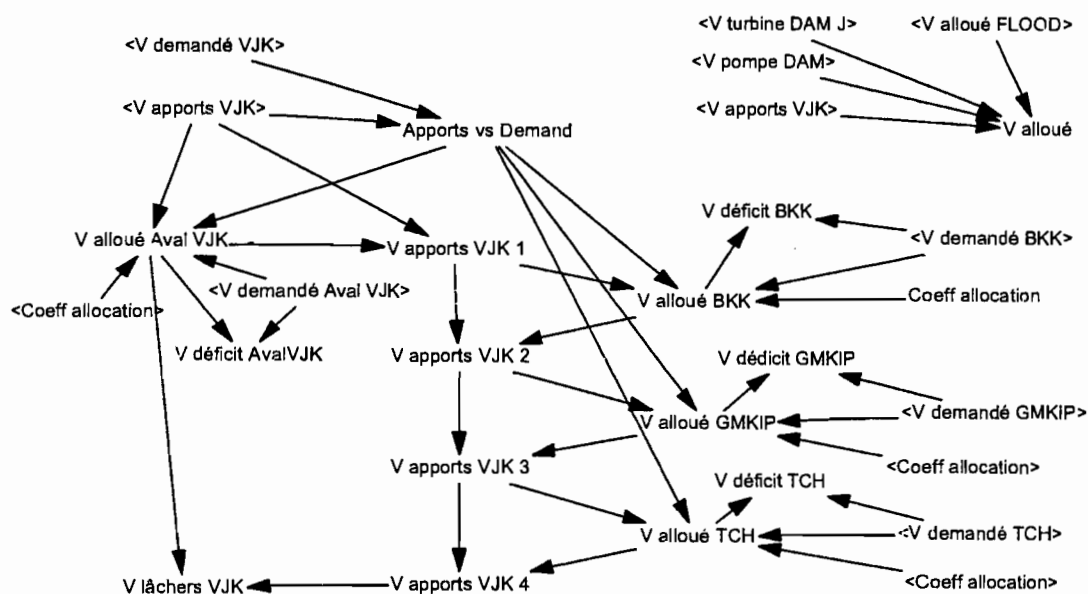
V turbine DAM J[SNR] = SUM ( V turbine j[turbine SNR!] ) ~~|
V turbine DAM J[KHL] = SUM ( V turbine j[turbine KHL!] )
~      m*m*m/Day
~      |

Z operation desired[DAM]=
        IF THEN ELSE(Set Z objectif=1,Z inférieur de fonctionnement[DAM],Z retenue objectif[\
        DAM])
~      m
~      |

Z retenue objectif[KHL]=
        135 ~~|
Z retenue objectif[SNR]=
        165
~      m
~      KHL : 145 ; SNR : 173.5
~      |

```


D-8 DECISION D'ALLOCATION



```

*****
.06Allocation
*****
|

Apports vs Demand= ZIDZ(V apports VJK,V demandé VJK)
~      dmn1
~      |

Coeff allocation= 0.8
~      dmn1
~      |

V alloué Aval VJK=
  IF THEN ELSE(Apports vs Demand>=Coeff allocation, MIN(1,Apports vs Demand)*V demandé Aval VJK\
    ,MIN(V apports VJK, Coeff allocation*V demandé Aval VJK
  ))
~      m*m*m/Day
~      |

V alloué BKK=
  IF THEN ELSE(Apports vs Demand>=Coeff allocation, MIN(1,Apports vs Demand)*V demandé BKK\
    ,MIN(V apports VJK 1, Coeff allocation*V demandé BKK))
~      m*m*m/Day
~      |

V alloué GMKIP=
  IF THEN ELSE(Apports vs Demand>=Coeff allocation, MIN(1,Apports vs Demand)*V demandé GMKIP\
    ,MIN(V apports VJK 2, Coeff allocation*V demandé GMKIP))
~      m*m*m/Day
~      |

V alloué TCH=
  IF THEN ELSE(Apports vs Demand>=Coeff allocation, MIN(1,Apports vs Demand)*V demandé TCH\

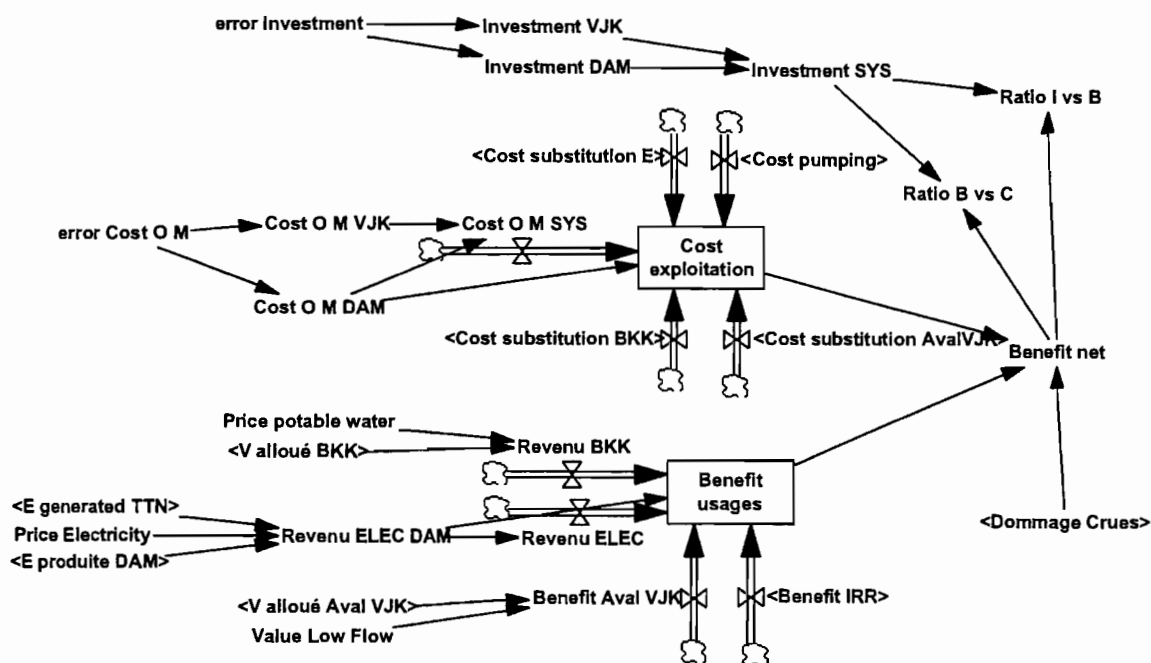
```

```

,MIN(V apports VJK 3, Coeff allocation*V demandé TCH))
~      m*m*m/Day
~      |
V apports VJK=
      SUM ( V lâchers DAM[DAM!] )+apports intermédiares-V pompe DAM[SNR]
~      m*m*m/Day
~      |
V apports VJK 1= V apports VJK-V alloué Aval VJK
~      m*m*m/Day
~      |
V apports VJK 2= V apports VJK 1-V alloué BKK
~      m*m*m/Day
~      |
V apports VJK 3= V apports VJK 2-V alloué GMKIP
~      m*m*m/Day
~      |
V apports VJK 4= V apports VJK 3-V alloué TCH
~      m*m*m/Day
~      |
V lâchers VJK=      V apports VJK 4+V alloué Aval VJK
~      m*m*m/Day
~      |

```

D-9 EVALUATION ECONOMIQUE



D-9.1 Valeurs économiques des usages

```
*****
.07Benefit
*****~

Benefit net[MACRO]=
  Benefit usages[MACRO]-Cost exploitation[MACRO]-Domage Crues ~~|
Benefit net[MICRO]=
  Benefit usages[MICRO]-Cost exploitation[MICRO] ~~|
Benefit net[LOCAL SNR]=
  Benefit usages[LOCAL SNR]-Cost exploitation[LOCAL SNR] ~~|
Benefit net[LOCAL KHL]=
  Benefit usages[LOCAL KHL]-Cost exploitation[LOCAL KHL]
  ~      Baht
  ~      |

Benefit Aval VJK=
  V alloué Aval VJK*Value Low Flow
  ~      Baht/Day
  ~      |

Benefit IRR=
  Benefit GMKIP+Benefit TCH
  ~      Baht/Day
  ~      |

Price potable water=
  0.3
```

```

~      Baht/(m*m*m)
~      |

Revenu BKK=Price potable water*V alloué BKK
~      Baht/Day
~      |

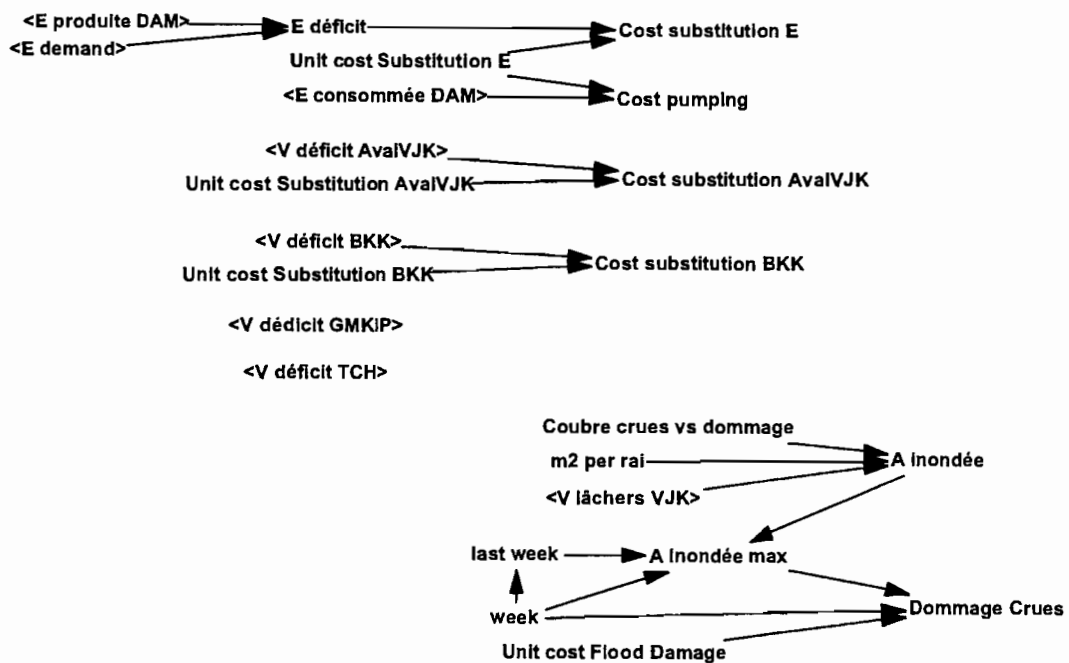
Revenu ELEC=
SUM(Revenu ELEC DAM[DAM!])
~      Baht/Day
~      |

Revenu ELEC DAM[SNR]=
(E produite DAM[SNR]+E generated TTN)*Price Electricity --|
Revenu ELEC DAM[KHL]=
E produite DAM[KHL]*Price Electricity
~      Baht/Day
~      |

Value Low Flow=
1
~      Baht/(m*m*m)
~      |

```

D-9.2 Coûts



```

*****
.07Cost
*****
|

Unit cost Substitution BKK=
10
~      Baht/(m*m*m)
~      |

Unit cost Substitution AvalVJK=
5
~      Baht/(m*m*m)

```

```

~      |
V déficit GMKIP=
  MAX(0,V demandé GMKIP-V alloué GMKIP)
  ~      m*m*m/Day
  ~      |

Cost substitution BKK=
  V déficit BKK*Unit cost Substitution BKK
  ~      Baht/Day
  ~      |

Cost substitution AvalVJK=
  Unit cost Substitution AvalVJK*V déficit AvalVJK
  ~      Baht/Day
  ~      |

V déficit BKK=
  MAX(0,V demandé BKK-V alloué BKK)
  ~      m*m*m/Day
  ~      |

Cost exploitation[MACRO]= INTEG (
  Cost O M SYS+SUM(Cost substitution E[DAM!])+Cost pumping+Cost substitution AvalVJK+Cost
substitution BKK\
  0) --|
Cost exploitation[MICRO]= INTEG (
  Cost O M SYS+SUM(Cost substitution E[DAM!])+Cost pumping,
  0) --|
Cost exploitation[LOCAL SNR]= INTEG (
  Cost O M DAM[SNR]+Cost substitution E[SNR]+Cost pumping,
  0) --|
Cost exploitation[LOCAL KHL]= INTEG (
  Cost O M DAM[KHL]+Cost substitution E[KHL],
  0)
  ~      Baht
  ~      |

V déficit AvalVJK=
  MAX(0,V demandé Aval VJK-V alloué Aval VJK)
  ~      m*m*m/Day
  ~      |

V déficit TCH=
  MAX(0,V demandé TCH-V alloué TCH)
  ~      m*m*m/Day
  ~      |

A inondée max=SAMPLE IF TRUE(
  A inondée>A inondée max :OR: last week > week, A inondée, A inondée)
  ~      m*m
  ~      |

Cost pumping=
  E consommée DAM*Unit cost Substitution E
  ~      Baht/Day
  ~      |

Dommage Crues=
  IF THEN ELSE (week=52, A inondée max*Unit cost Flood Damage,0)
  ~      Baht
  ~      |

Unit cost Flood Damage=
  0.935
  ~      Baht/(m*m)
  ~      9350 B/ha = 0.935 B/m2
  ~      |

A inondée=
  Coubre crues vs dommage(V lâchers VJK)*m2 per rai
  ~      m*m
  ~      |

```

```

Cost substitution E[DAM]=
  E déficit[DAM]*Unit cost Substitution E
  ~      Baht/Day
  ~      |

Unit cost Substitution E=
  0.0012
  ~      Baht/(W*hr)
  ~      1.2/1000
  ~      |

Cost O M DAM[SNR]=
  3.76843e+008/365*error Cost O M --|
Cost O M DAM[KHL]=
  1.96909e+008/365.25*error Cost O M
  ~      Baht/Day
  ~      SNR&TTN 376 843 381.64 + KHL : 196 908 679.58
  ~      |

Cost O M SYS=
  Cost O M DAM[SNR]+Cost O M DAM[KHL]+Cost O M VJK
  ~      Baht/Day
  ~      |

Cost O M VJK=
  7.93689e+008/365*error Cost O M
  ~      Baht/Day
  ~      1998 : 793 689 060 Baht/year
  ~      |

Coubre crues vs damage(
  [(0,0)-(4e+008,200000)],(0,0),(1.584e+008,0),(1.65e+008,1500),(2.25e+008,68744),(2.68e+008\
  ,173750))
  ~      rai/(m*m*m/Day)
  ~      Q vs damage area \
  [(0,0)-(4e+008,23000)],(0,0),(1.584e+008,0),(1.65e+008,1500),(2.25e+008,125\
  20),(2.68e+008,21820)\!\\!\\!
  ~      |

error Cost O M=
  1
  ~      dmn1
  ~      |

```

D-9.3 Critères d'évaluation économique

```

*****
.07Economic
*****~

Ratio I vs B[SCALE]=
  ZIDZ(Investment SYS[SCALE],MAX(0.101*Investment SYS[SCALE],Benefit net[SCALE]))
  ~      dmn1
  ~      |

Ratio B vs C[SCALE]=
  ZIDZ(Benefit net[SCALE], Investment SYS[SCALE])*100
  ~      dmn1
  ~      |

Benefit usages[MACRO]= INTEG (Revenu BKK+Revenu ELEC+Benefit IRR+Benefit Aval VJK,0) --|
Benefit usages[MICRO]= INTEG (+Revenu BKK+Revenu ELEC,0) --|
Benefit usages[LOCAL SNR]= INTEG (Revenu ELEC DAM[SNR],0) --|
Benefit usages[LOCAL KHL]= INTEG (Revenu ELEC DAM[KHL],0)
  ~      Baht
  ~      |

Benefit Cane=A Cane*Benefit net Cane/day in a year
  ~      Baht/Day

```

```

~      |
"Benefit Crop&Veget"="A Crop&Veget"*"Benefit net Crop&Veget"/day in a year
~      Baht/Day
~      |

Benefit GMKIP=Benefit GMKIP potential*Factor Benefit GMKIP
~      Baht/Day
~      |

Benefit GMKIP potential=V demandé GMKIP*Benefit GMKIP unitaire
~      Baht/Day
~      |

Benefit GMKIP unitaire= Benefit IRR unitaire
~      Baht/(m*m*m)
~      |

Benefit IRR unitaire= 0.75
~      Baht/(m*m*m)
~      |

Benefit net Cane= 3110/10000
~      Baht/(m*m)
~      |

"Benefit net Crop&Veget"= 39060/10000
~      Baht/(m*m)
~      |

Benefit net Paddy= IF THEN ELSE (week>26,950/10000,4810/10000)
~      Baht/(m*m)
~      |

Benefit net Pond= 27800/10000
~      Baht/(m*m)
~      |

Benefit net Tree= 27700/10000
~      Baht/(m*m)
~      |

Benefit Paddy= A Paddy*Benefit net Paddy/day in a year
~      Baht/Day
~      |

Benefit Pond= A Pond*Benefit net Pond/day in a year
~      Baht/Day
~      |

Benefit TCH= Benefit TCH potential*Factor Benefit TCH
~      Baht/Day
~      |

Benefit TCH potential= V demandé TCH*Benefit TCH unitaire
~      Baht/Day
~      |

Benefit TCH unitaire= Benefit IRR unitaire
~      Baht/(m*m*m)
~      Benefit GMKIP unitaire
~      |

Benefit Tree= A Tree*Benefit net Tree/day in a year
~      Baht/Day
~      |

error Investment= 1
~      dmn1
~      |

Factor Benefit GMKIP=ZIDZ(V alloué GMKIP,V demandé GMKIP)
~      dmn1
~      |

```

```

Factor Benefit TCH=ZIDZ(V alloué TCH,V demandé TCH)
~      dnnl
~      |

Investment DAM[KHL]=9.11e+009*error Investment ~~|
Investment DAM[SNR]=(4.62348e+009+6.5e+008+9.5e+008)*error Investment
~      Baht
~      SNR01-03 : 4 623 478 570 + SNR04 : 650 000 000 + SNR05 : 950 000 000 ; \
      KHL01-03 : 9 110 000 000
      |

Investment SYS[MACRO]=SUM(Investment DAM[DAM!])+Investment VJK ~~|
Investment SYS[MICRO]=SUM(Investment DAM[DAM!])+Investment VJK ~~|
Investment SYS[LOCAL SNR]=Investment DAM[SNR] ~~|
Investment SYS[LOCAL KHL]=Investment DAM[KHL]
~      Baht
~      |

Investment VJK=
(4.554e+009 + 5.4e+008 + 2.74e+009 + 2.3e+009 + 5e+008)*error Investment
~      Baht
~      4 554 000 000 + 540 000 000 + 2 740 000 000 + 2 300 000 000 + 500 000 000
      |

Price Electricity=
0.0015
~      Baht/(W*hr)
~      1.5 Baht/KWh = 0.0015 Baht/Whr
      |

```


D-10 EVALUATION DE PERFORMANCE « TECHNIQUE »

```

*****
.08Performance
*****~
|

IP9 Bis [TYPE]=
  ZIDZ(IP9 Vulnérabilité max[TYPE]*temps total, V demandé totale[TYPE])
  ~      dmn1
  ~      |

compteur défaillance[TYPE]=
  IF THEN ELSE ( mode défaillance[TYPE] - mode défaillance précédant[TYPE] > 0, 1/TIME STEP\
    , 0)
  ~      fois/Day
  ~      |

compteur non défaillance[TYPE]=
  IF THEN ELSE ( mode non défaillance[TYPE] - mode non défaillance précédant[TYPE] > \
    0, 1/TIME STEP, 0)
  ~      fois/Day
  ~      |

contrôle de fin[TYPE]=
  IF THEN ELSE ( mode défaillance[TYPE] - mode défaillance précédant[TYPE] < 0, durée en mode
défaillance\
    [TYPE] / TIME STEP , 0)
  ~      1/Day
  ~      |

durée en mode défaillance[TYPE]= INTEG(mode défaillance[TYPE] - contrôle de fin[TYPE]\
    , 0)
  ~      Day
  ~      |

durée totale en mode non défaillance[TYPE]= INTEG(mode non défaillance[TYPE], 0)
  ~      Day
  ~      |

durée totals en mode défaillance[TYPE]= INTEG(mode défaillance[TYPE], 0)
  ~      Day
  ~      |

IP1 fiabilité en quantité[TYPE]= XIDZ(V demandé totale[TYPE] - V déficit total[TYPE],\
    V demandé totale[TYPE], 1)*100
  ~      dmn1
  ~      |

IP2 fiabilité de temps[TYPE]=XIDZ(temps total - temps déficit total [TYPE], temps total\
    , 1)*100
  ~      dmn1
  ~      |

IP3 fiabilité d'occurrence[TYPE]=ZIDZ(nombre de non défaillance[TYPE], nombre de défaillance\
    [TYPE] + nombre de non défaillance[TYPE])*100
  ~      dmn1
  ~      |

IP4 écart de l'objectif[TYPE]=ZIDZ(somme2 V déficit[TYPE], somme2 V demandé[TYPE])^0.5
  ~      dmn1
  ~      |

IP5 temps d'interarrivée moyen[TYPE]=ZIDZ(durée totals en mode défaillance[TYPE], nombre de
défaillance\
    [TYPE])
  ~      Day/fois
  ~      |

```

```

IP6 temps d'interévènement moyen[TYPE]=ZIDZ( durée totale en mode non défaillance[TYPE\
], nombre de non défaillance[TYPE])
~      Day/fois
~      |

IP7 déficit moyen[TYPE]=ZIDZ(V déficit total[TYPE], temps déficit total[TYPE])
~      m*m*m/Day
~      |

IP8 résilience[TYPE]=SAMPLE IF TRUE(durée en mode défaillance[TYPE]>IP8 résilience[TYPE\
], durée en mode défaillance[TYPE], 0)
~      Day/fois
~      |

IP9 Vulnérabilité max[TYPE]=SAMPLE IF TRUE(V déficit[TYPE]>IP9 Vulnérabilité max[TYPE\
], V déficit[TYPE], 0)
~      m*m*m/Day
~      |

mode défaillance[TYPE]=IF THEN ELSE ( T déficit[TYPE] = 1 ,1 , 0)
~      1
~      |

mode défaillance précédant[TYPE]= DELAY FIXED (mode défaillance [TYPE], TIME STEP , 0\
)
~      1
~      |

mode non défaillance[TYPE]= IF THEN ELSE ( T déficit[TYPE] = 0, 1, 0)
~      1
~      |

mode non défaillance précédant[TYPE]= DELAY FIXED ( mode non défaillance[TYPE] , TIME STEP\
, 1)
~      1
~      |

nombre de défaillance[TYPE]= INTEG ( compteur défaillance[TYPE],0)
~      fois
~      |

nombre de non défaillance[TYPE]= INTEG ( compteur non défaillance[TYPE], 1)
~      fois
~      |

somme2 V déficit[TYPE]= INTEG ( V déficit carré[TYPE], 0)
~      m*m*m*m*m/Day
~      |

somme2 V demandé[TYPE]= INTEG (V demandé carré[TYPE], 0)
~      m*m*m*m*m/Day
~      |

T déficit[TYPE]= IF THEN ELSE ( V déficit[TYPE] > 0.001 * V demandé[TYPE] , 1, 0)
~      Day/Day
~      |

temps déficit total[TYPE]= INTEG ( T déficit[TYPE], 0)
~      Day
~      |

temps total= INTEG (pas de temps, 0)
~      Day
~      |

V alloué[LOW BASIN]= V apports VJK ~~|
V alloué[ELEC SNR]=V turbine DAM J[SNR]-V pompe DAM[SNR] ~~|
V alloué[ELEC KHL]=V turbine DAM J[KHL]-V pompe DAM[KHL] ~~|
V alloué[FLOOD SNR]=V alloué FLOOD[SNR] ~~|
V alloué[FLOOD KHL]=V alloué FLOOD[KHL]
~      m*m*m/Day
~      |

V déficit[TYPE]= MAX (10, V demandé[TYPE]- V alloué[TYPE] )-10

```

```

~      m*m*m/Day
~      |
V déficit carré[TYPE]= V déficit[TYPE] * V déficit[TYPE]
~      m*m*m*m*m/(Day*Day)
~      |
V déficit total[TYPE]= INTEG ( V déficit[TYPE], 0)
~      m*m*m
~      |
V demandé[LOW BASIN]=V demandé VJK ~~|
V demandé[ELEC SNR]=V demandé ELEC DAM[SNR] ~~|
V demandé[ELEC KHL]=V demandé ELEC DAM[KHL] ~~|
V demandé[FLOOD SNR]=V demandé FLOOD[SNR] ~~|
V demandé[FLOOD KHL]=V demandé FLOOD[KHL]
~      m*m*m/Day
~      |
V demandé carré[TYPE]= V demandé[TYPE] * V demandé[TYPE]
~      m*m*m*m*m/(Day*Day)
~      |

```

D-11 DIVERS

```

*****
.09Constant
*****

|

last week= DELAY FIXED (
    week,7,week)
~    week
~    |

cms = 1
~    m*m*m/s
~    |

day in a year=
    365.25
~    Day
~    |

g = 9.81
~    m/(s*s)
~    |

hours in a day=
    24
~    hr/Day
~    |

km2 = 1e+006
~    m*m
~    |

m = 1
~    m
~    |

m2 per rai=
    1600
~    m*m/rai
~    |

mm to m=
    1/1000
~    mm/m
~    |

Mm3 = 1e+006
~    m*m*m
~    |

Mm3 to m3=
    1e+006
~    m*m*m/Mm3
~    |

pas de temps=
    1
~    Day/Day
~    |

PI = 3.14159
~    dmn1
~    |

rho = 1000
~    kg/(m*m*m)
~    |

```

```

s2Day = 86400
~      s/Day
~      |

s2hr = 3600
~      s/hr
~      |

Time horizon 6 mois = 182
~      Day
~      |

*****
~.Control
*****~
      Simulation Control Paramaters
      |

FINAL TIME = 36160
~      Day
~      The final time for the simulation.
~      |

INITIAL TIME = 21551
~      Day
~      The initial time for the simulation.
~      |

SAVEPER = 1
~      Day
~      The frequency with which output is stored.
~      |

TIME STEP = 7
~      Day
~      The time step for the simulation.
~      |

```


ANNEXE - E. RESULTATS DE SIMULATION

Rappel : Les simulations sous 4 conditions de ressources en eau se sont effectuées sur les périodes choisies de 5 années au pas de temps hebdomadaires.

Critères économiques

1. IB Global
2. IB Global-Tarif
3. IB Local [SNR]
4. IB Local [KHL]

Critères techniques : demandes en eau à l'aval du bassin

5. Fiabilité en quantité [Aval du bassin]
6. Fiabilité en temps [Aval du bassin]
7. Résilience [Aval du bassin]
8. Vulnérabilité [Aval du bassin]

Critères techniques : demandes hydroélectrique du barrage Srinagarind

9. Fiabilité en quantité [ELEC SNR]
10. Fiabilité en temps [ELEC SNR]
11. Résilience [ELEC SNR]
12. Vulnérabilité [ELEC SNR]

Critères techniques : demandes hydroélectrique du barrage Khao Laem

13. Fiabilité en quantité [ELEC KHL]
14. Fiabilité en temps [ELEC KHL]
15. Résilience [ELEC KHL]
16. Vulnérabilité [ELEC KHL]

Critères techniques : demande en volume dans la zone d'écêtement des crues de la retenue de Srinagarind

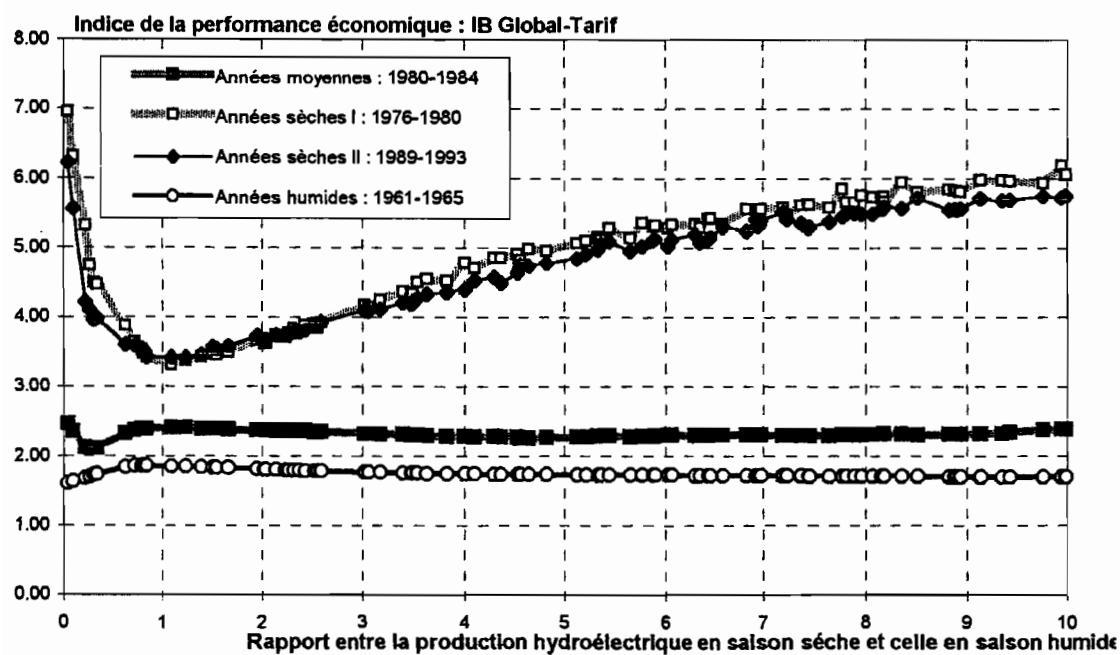
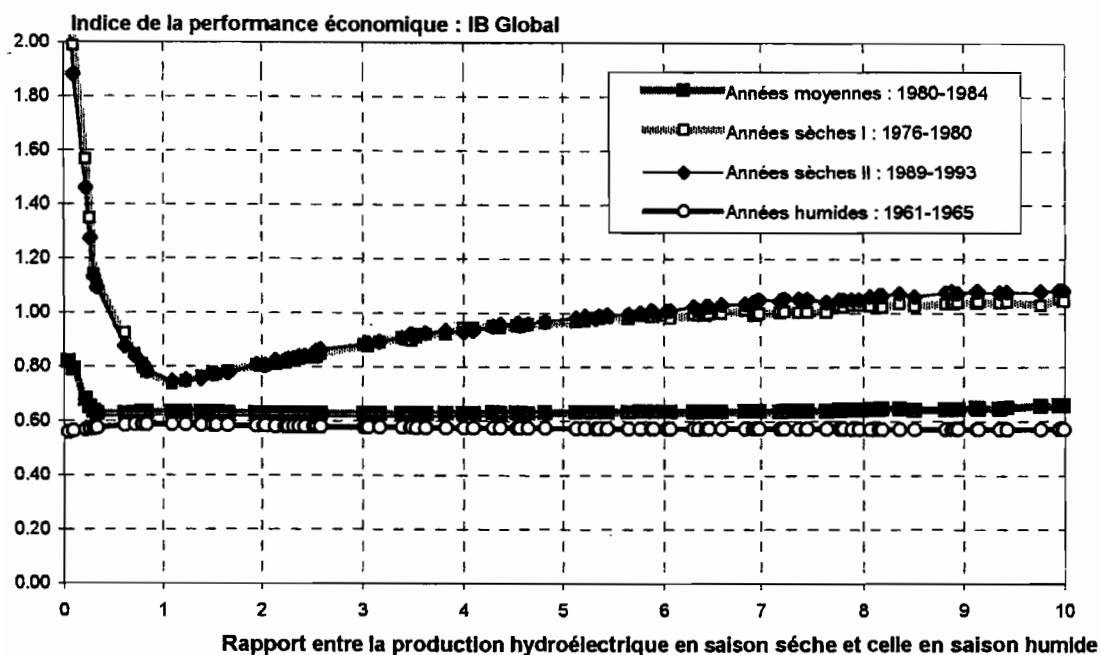
17. Fiabilité en quantité [CRUES SNR]
18. Fiabilité en temps [CRUES SNR]
19. Résilience [CRUES SNR]
20. Vulnérabilité [CRUES SNR]

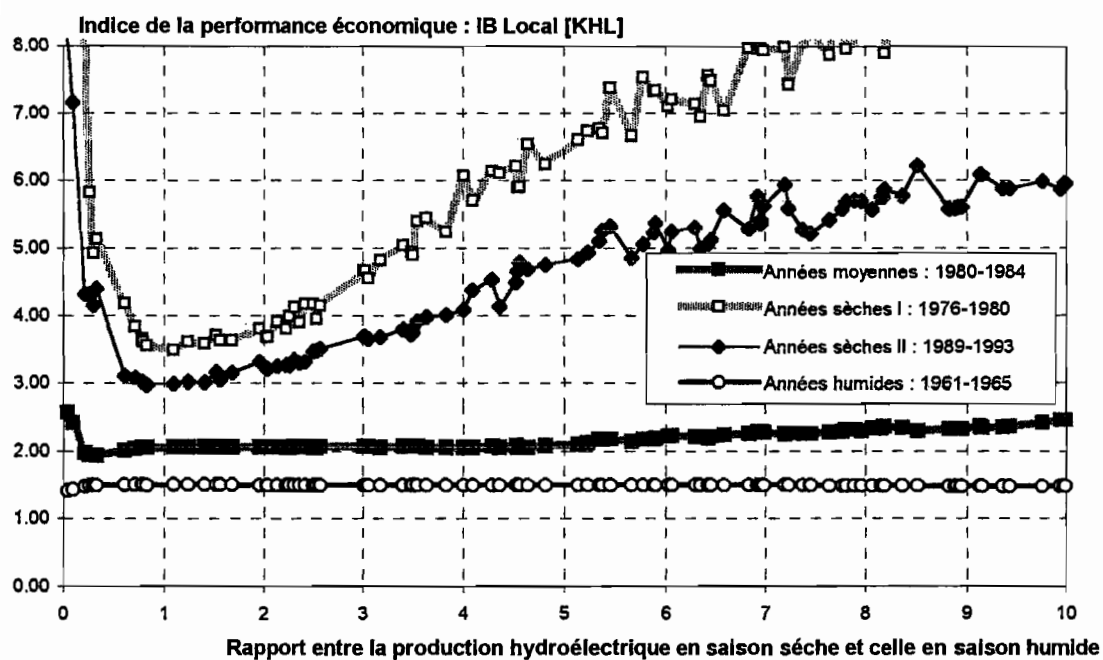
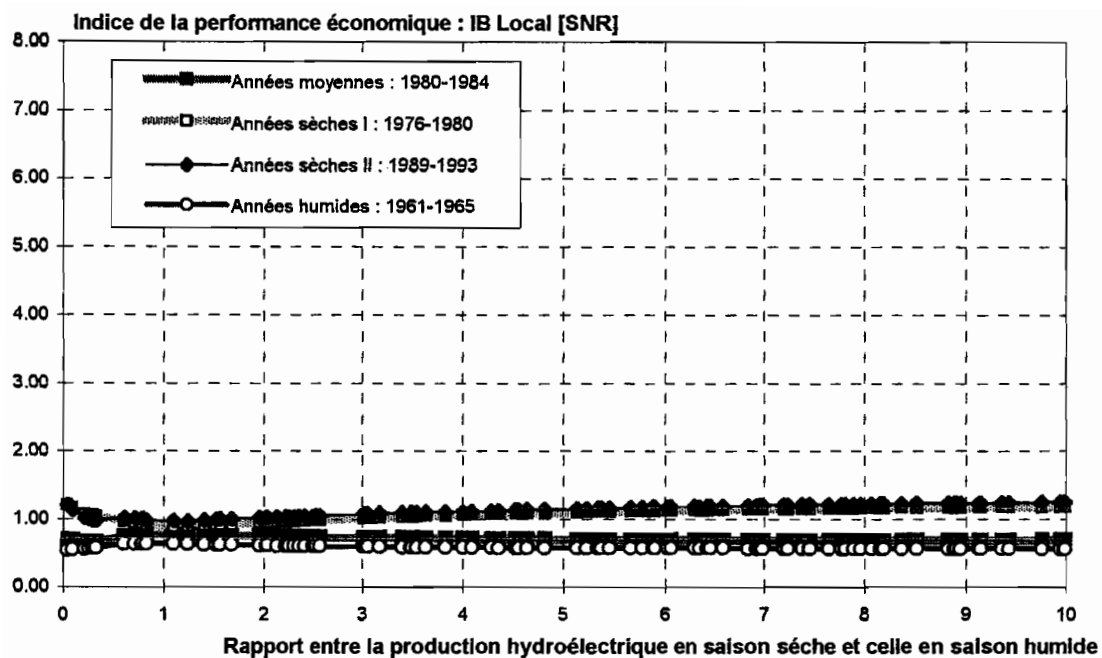
Critères techniques : demande en volume dans la zone d'écêtement des crues de la retenue de Khao Laem

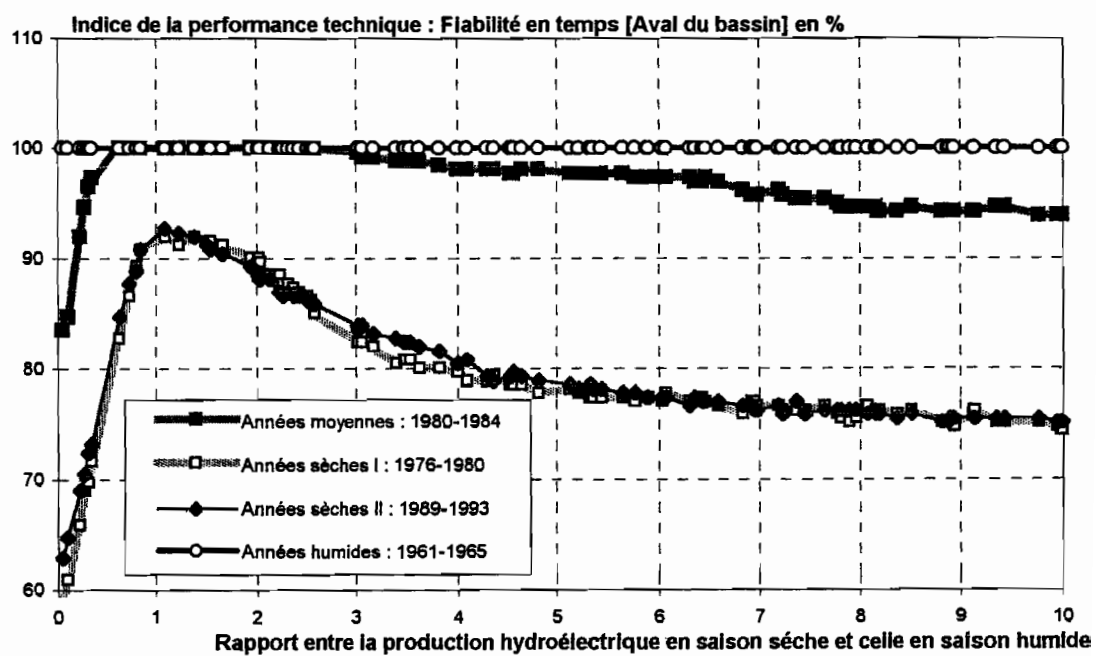
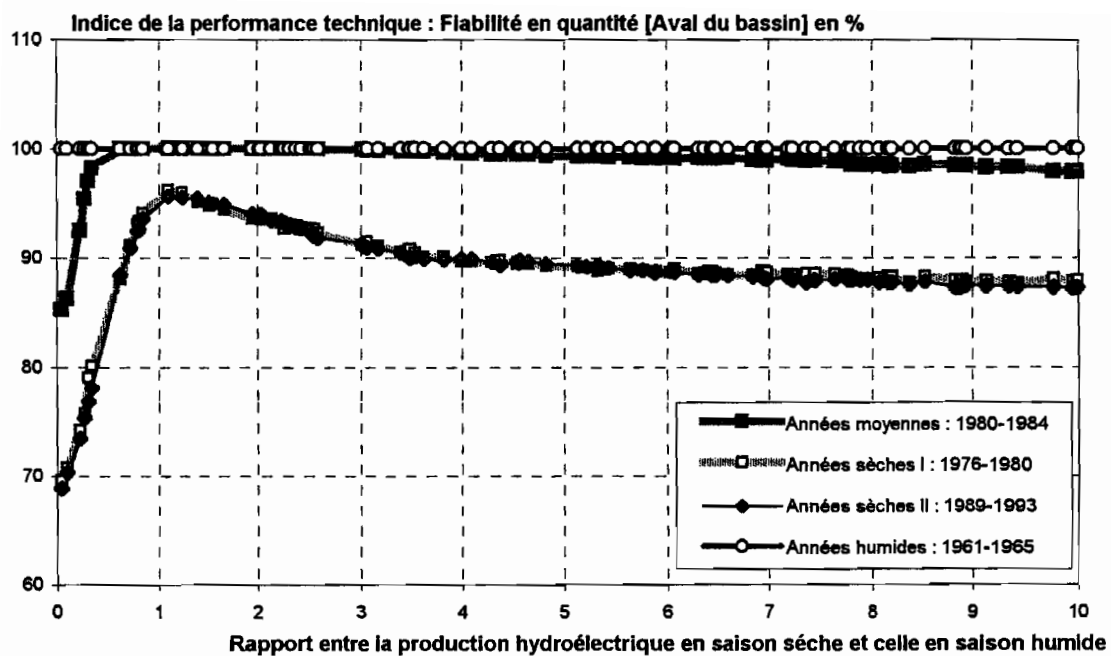
- 21. Fiabilité en quantité [CRUES KHL]
- 22. Fiabilité en temps [CRUES KHL]
- 23. Résilience [CRUES KHL]
- 24. Vulnérabilité [CRUES KHL]

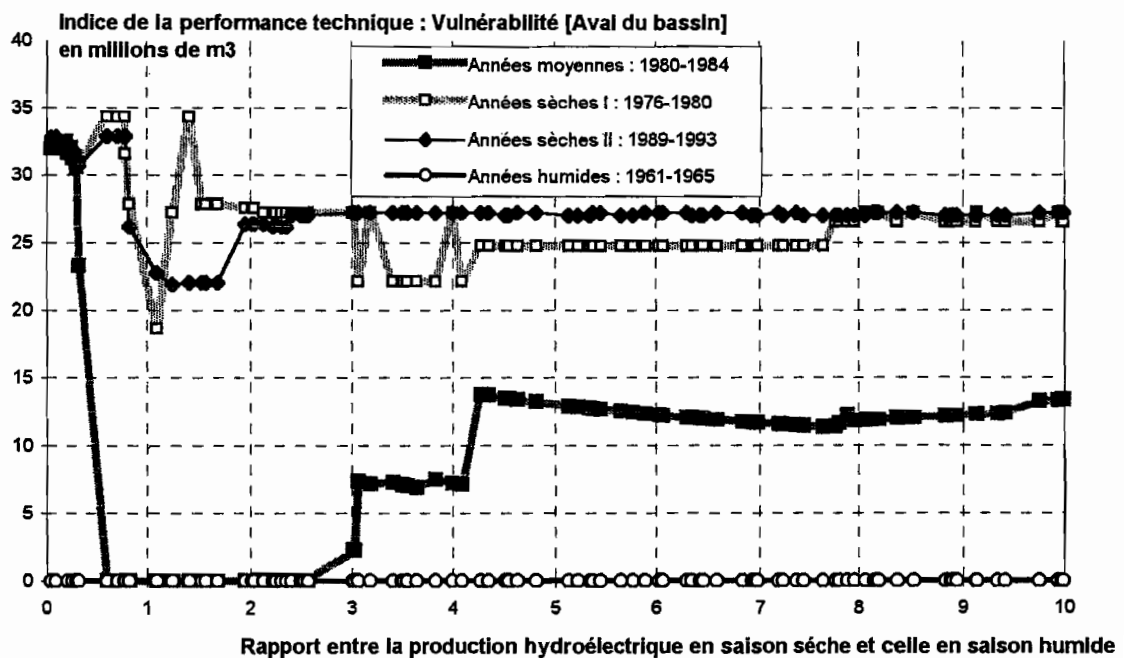
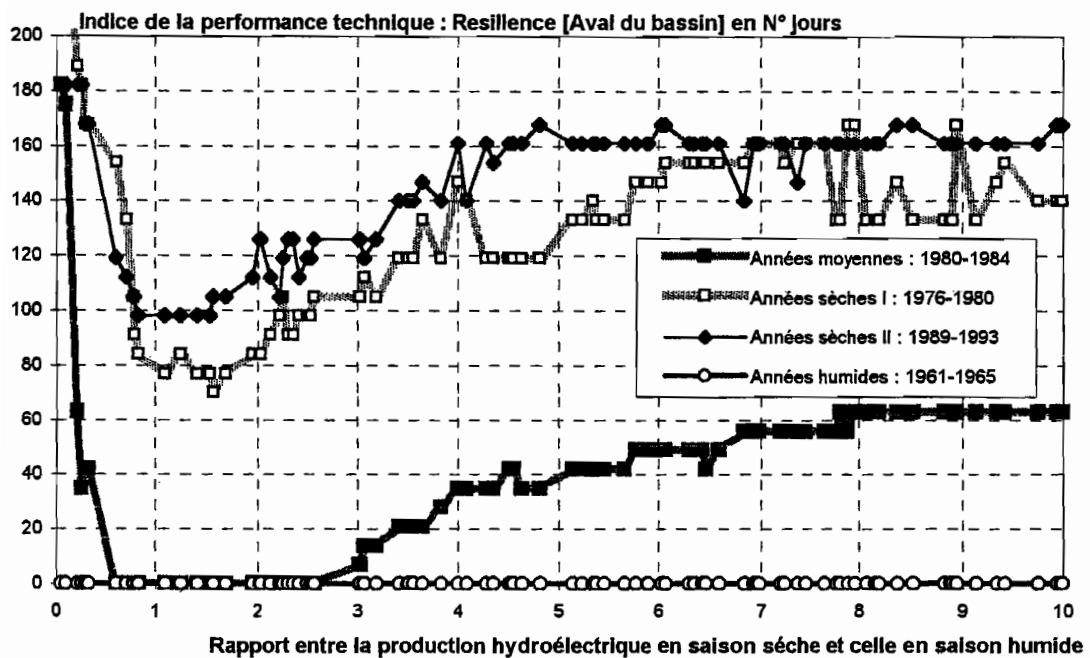
E-1 PRODUCTION HYDROELECTRIQUE

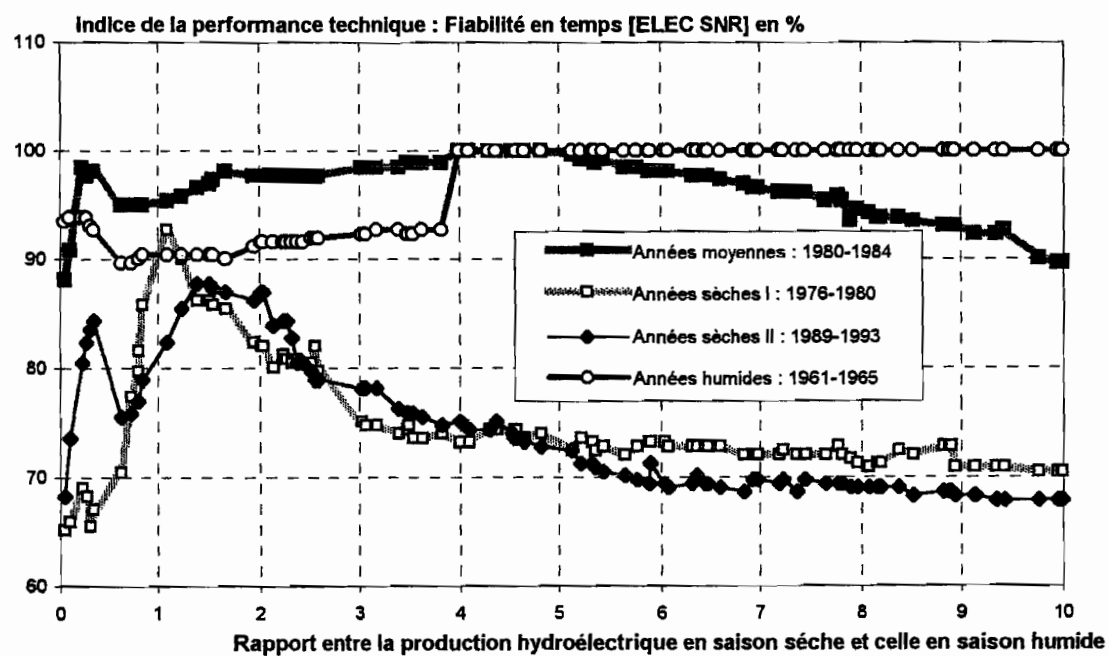
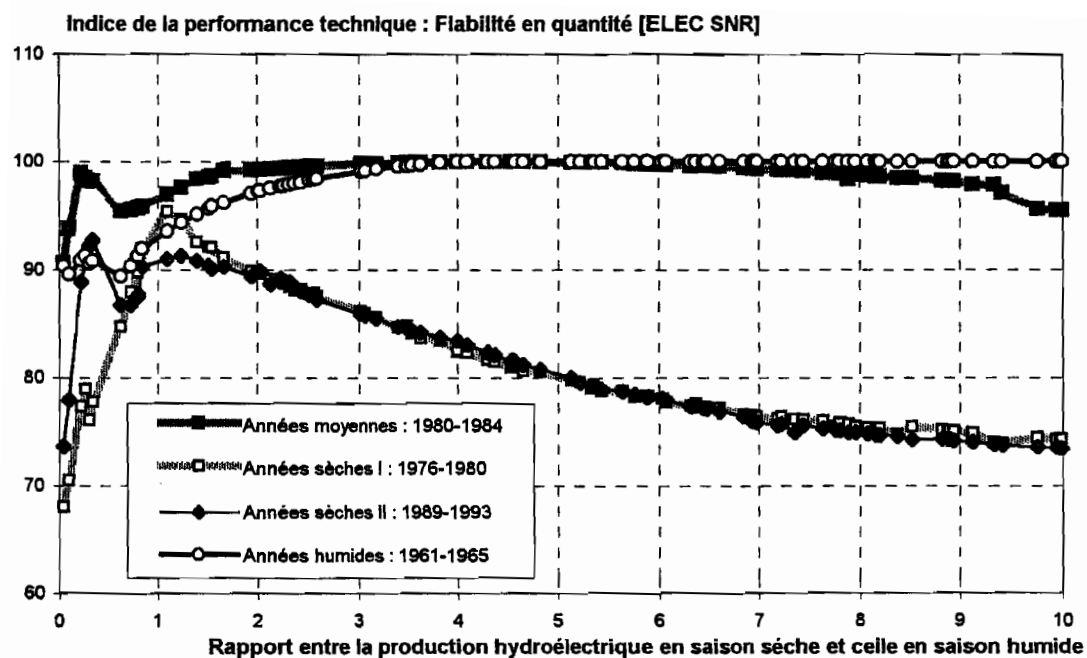
E-1.1 Rapport entre la production hydroélectrique en saison sèche et celle en saison humide

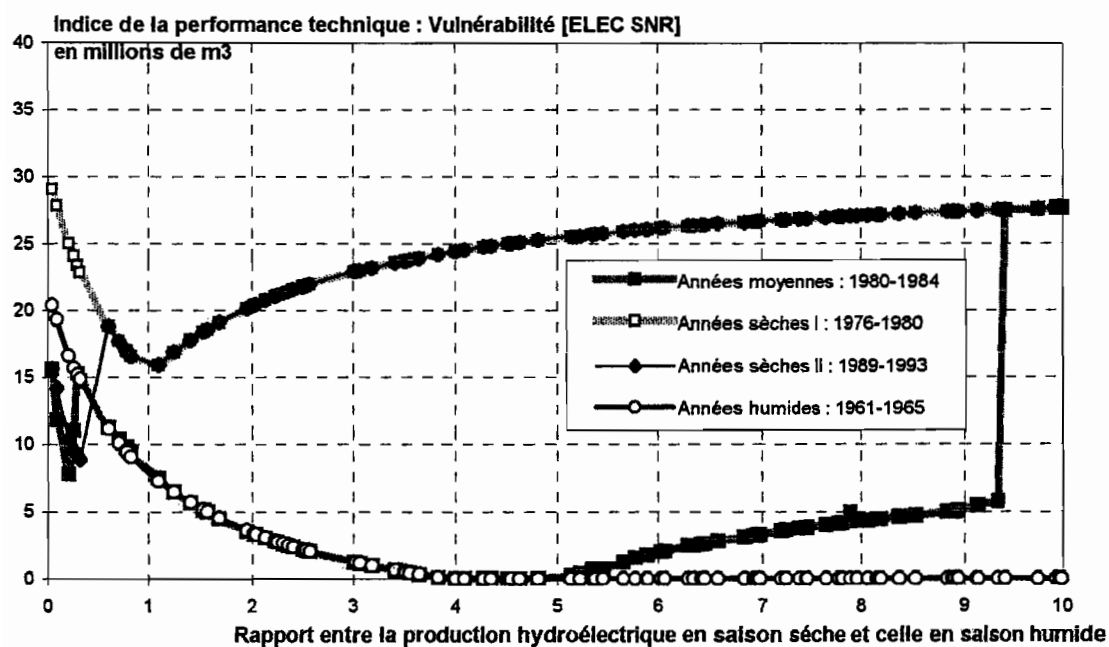
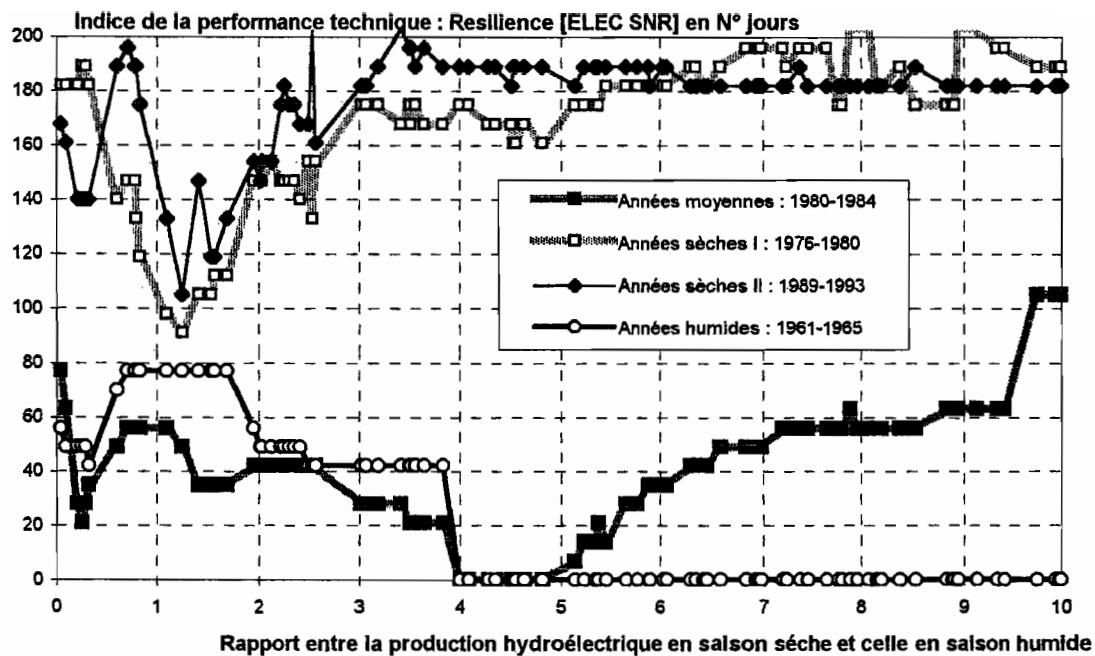


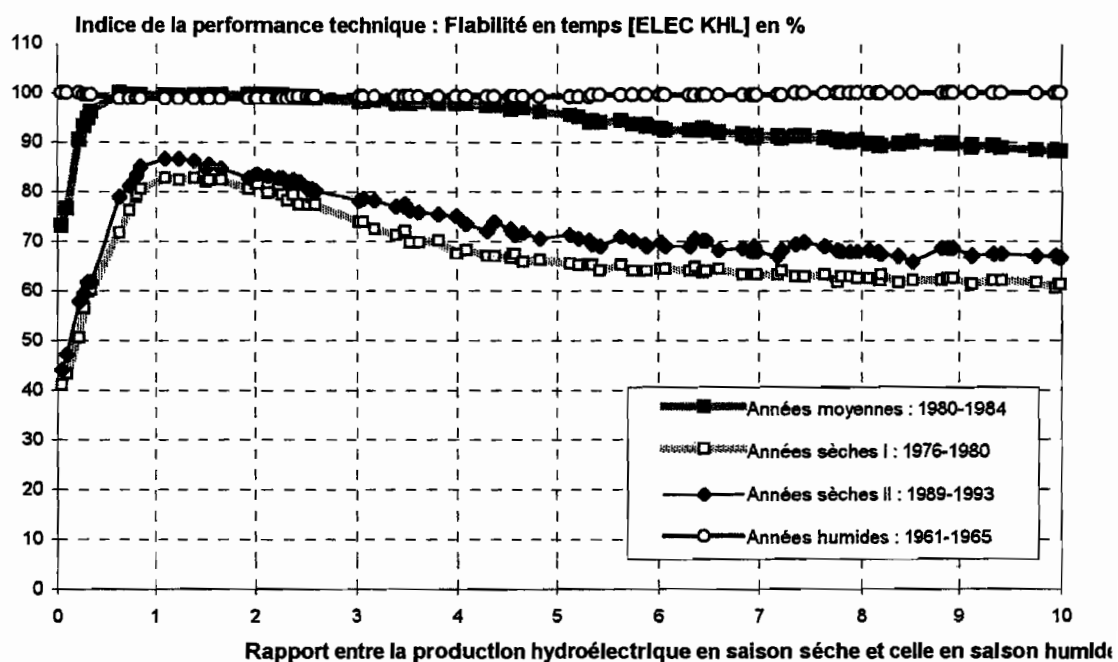
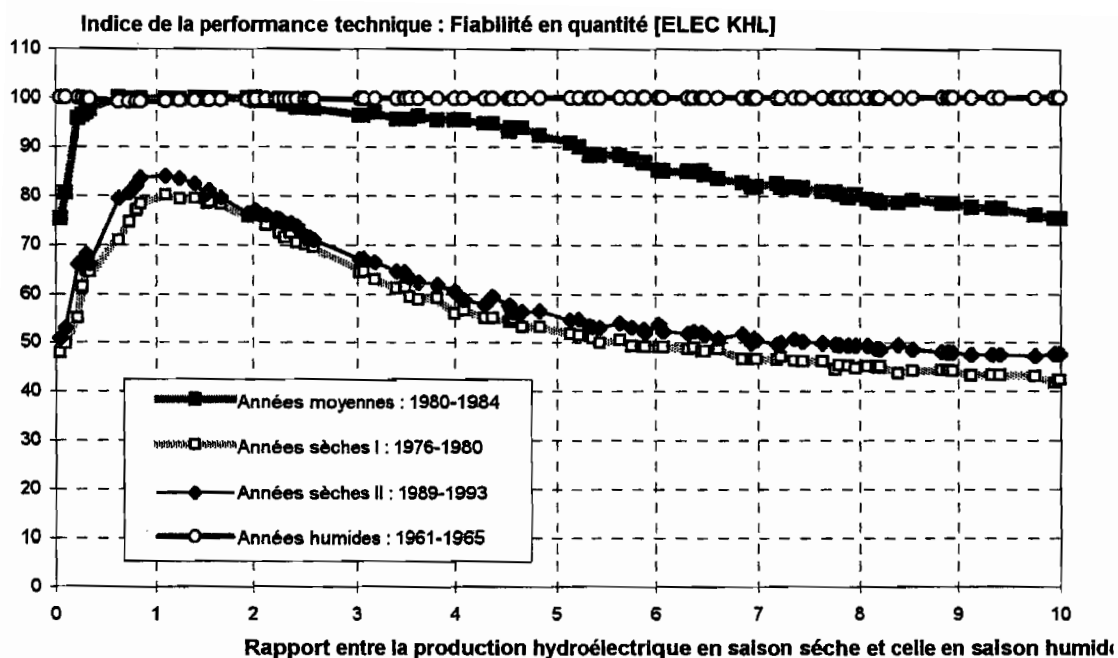


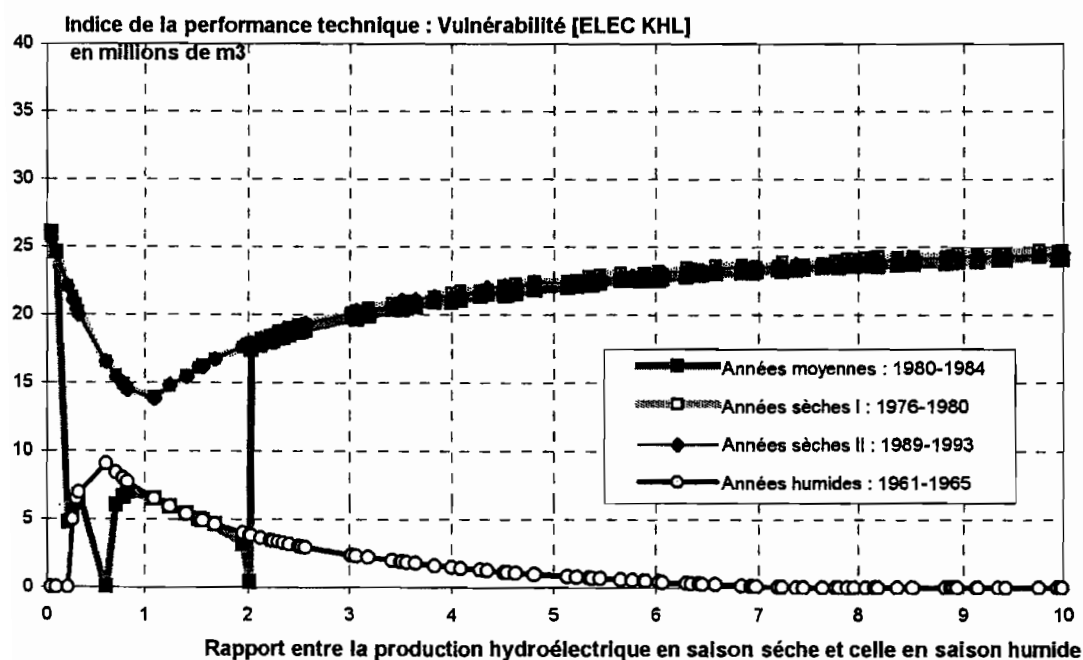
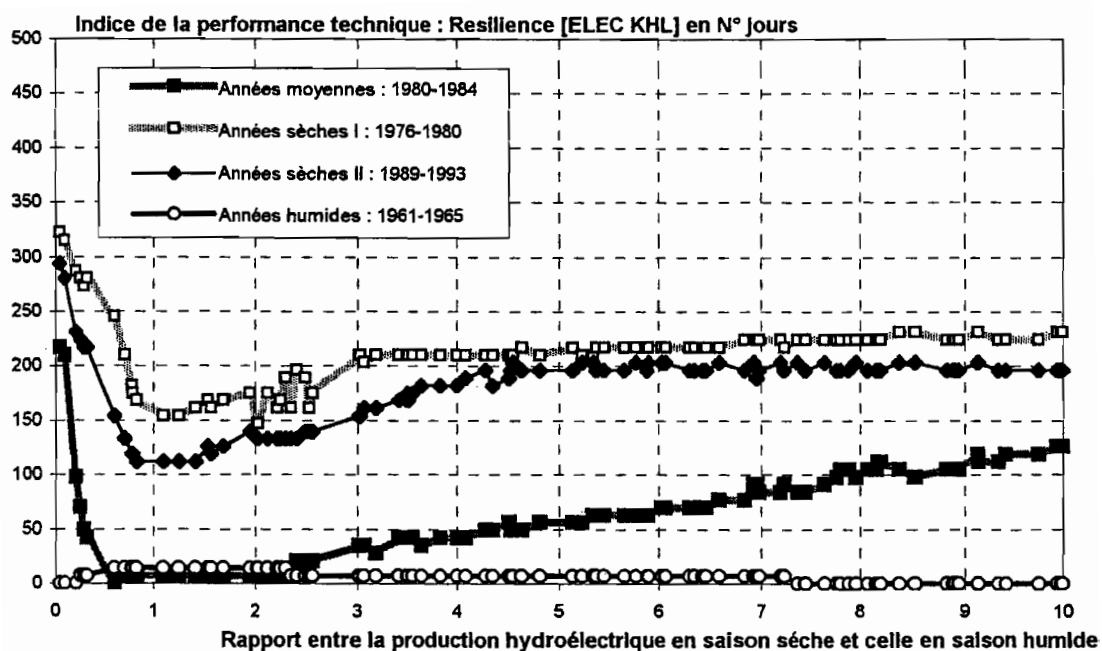


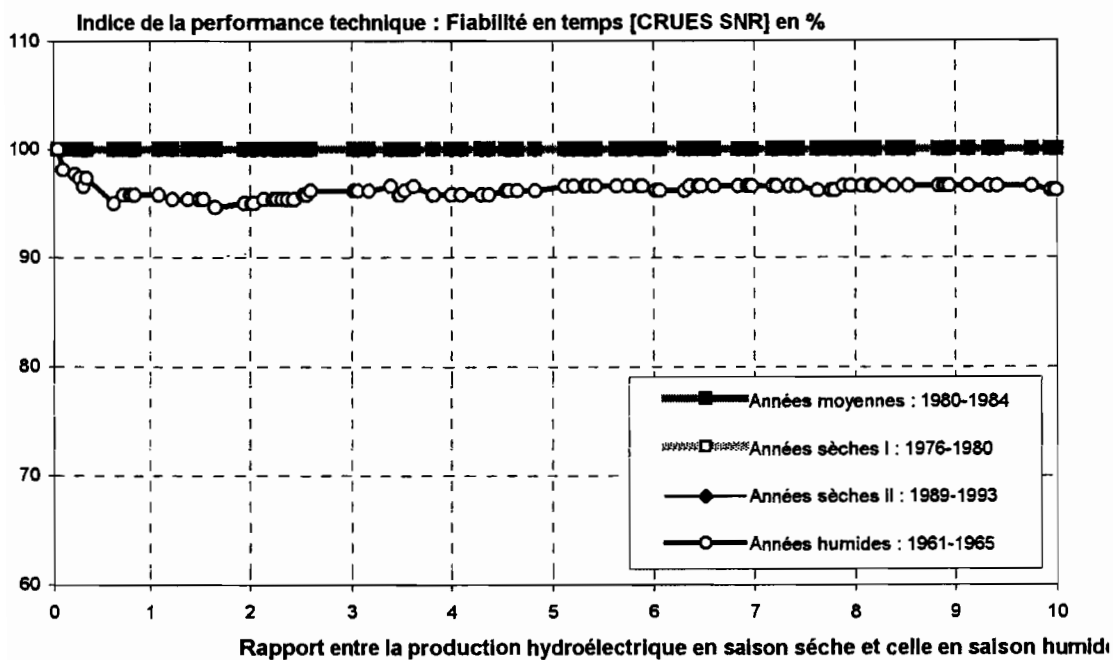
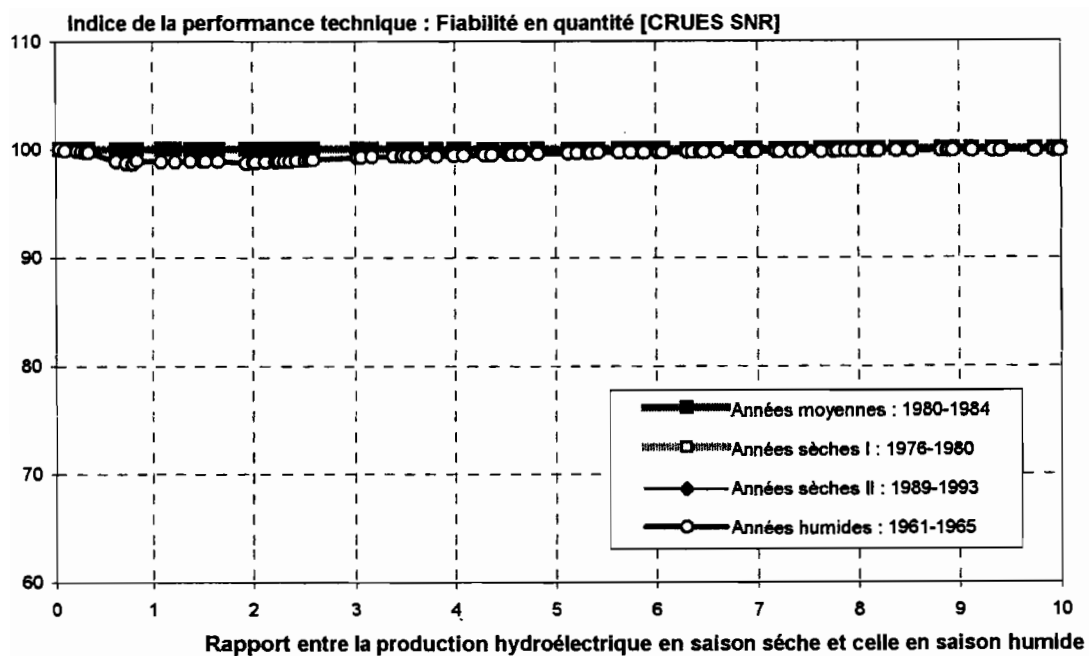


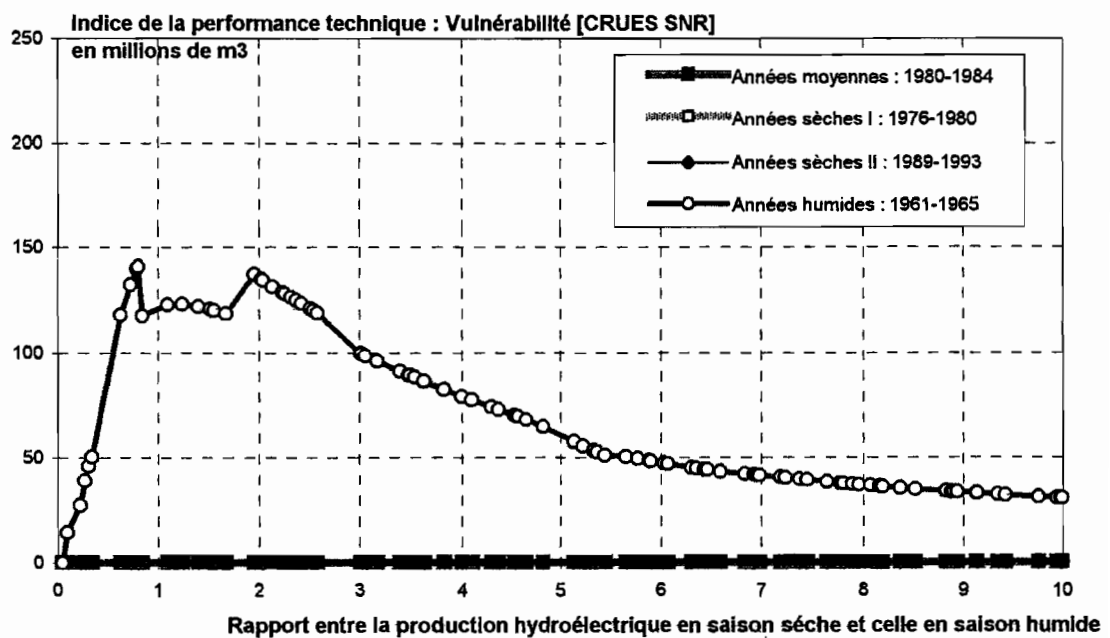
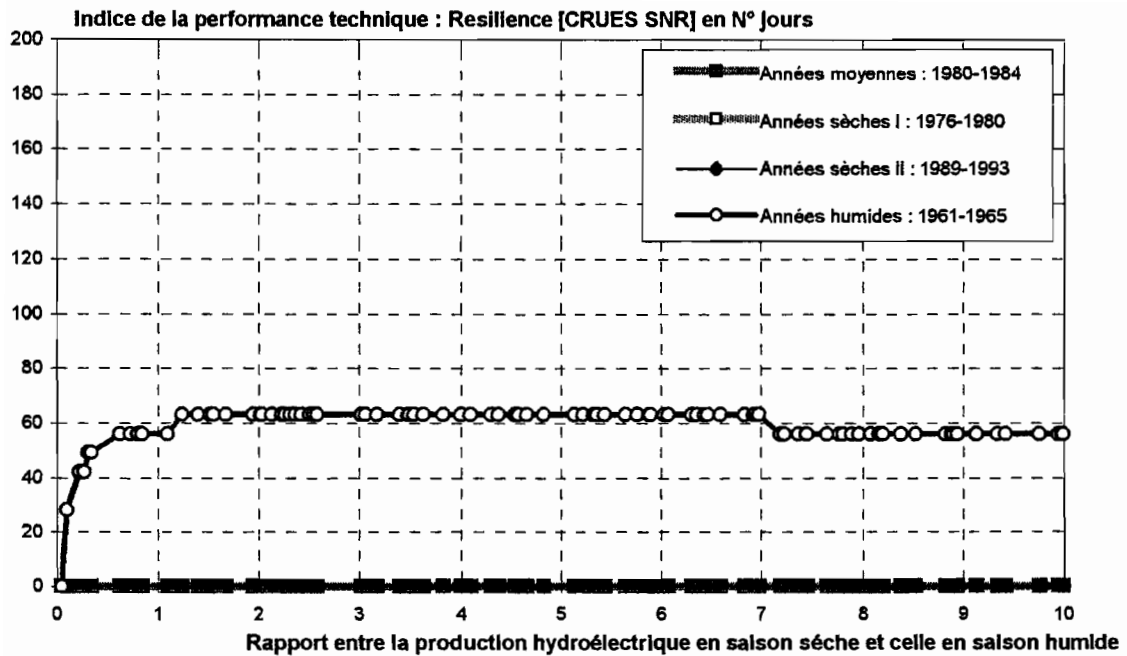


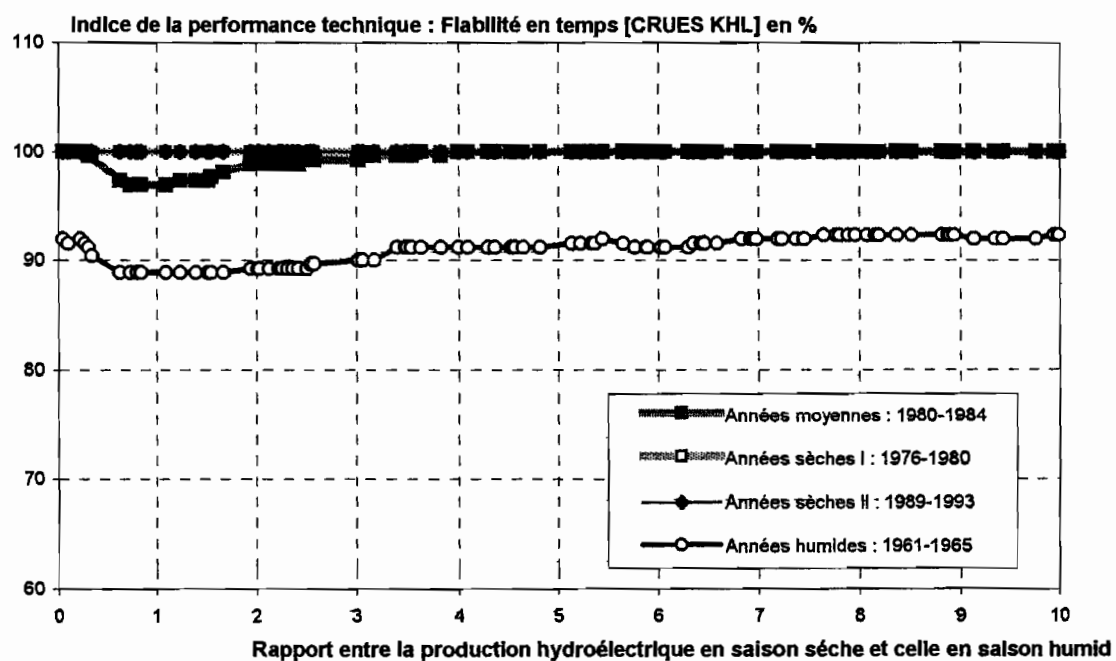
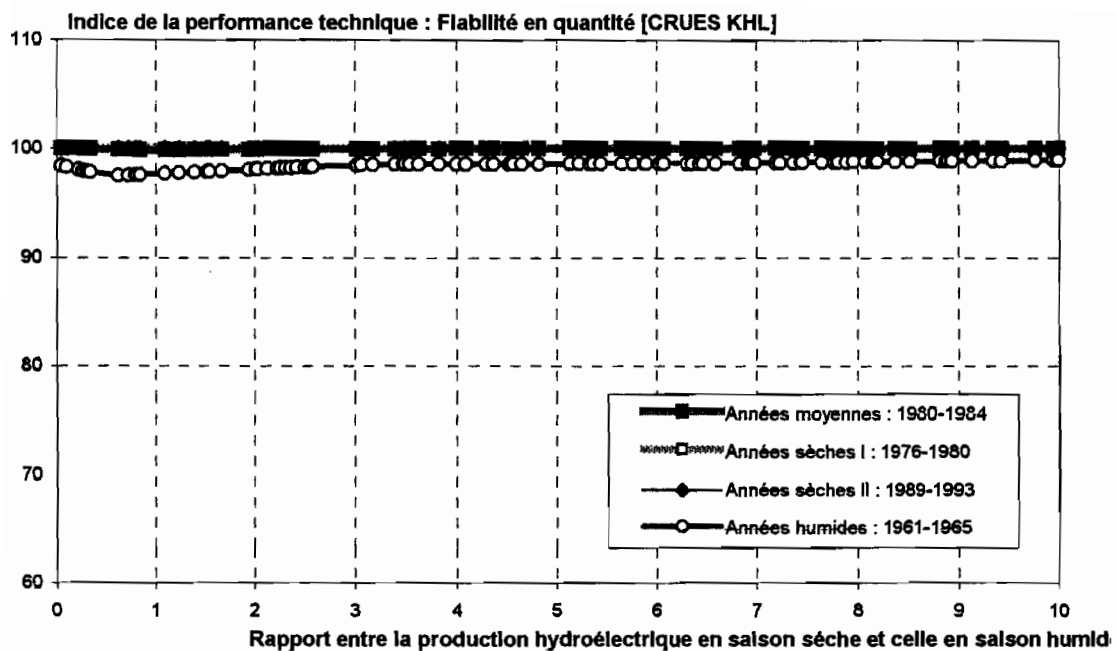


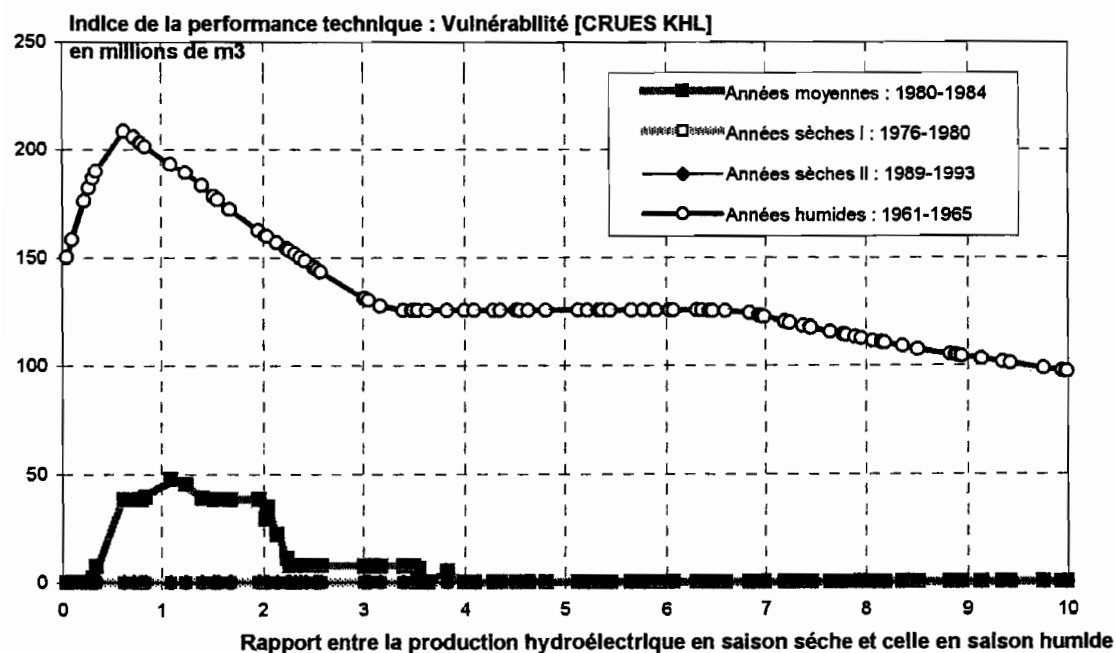
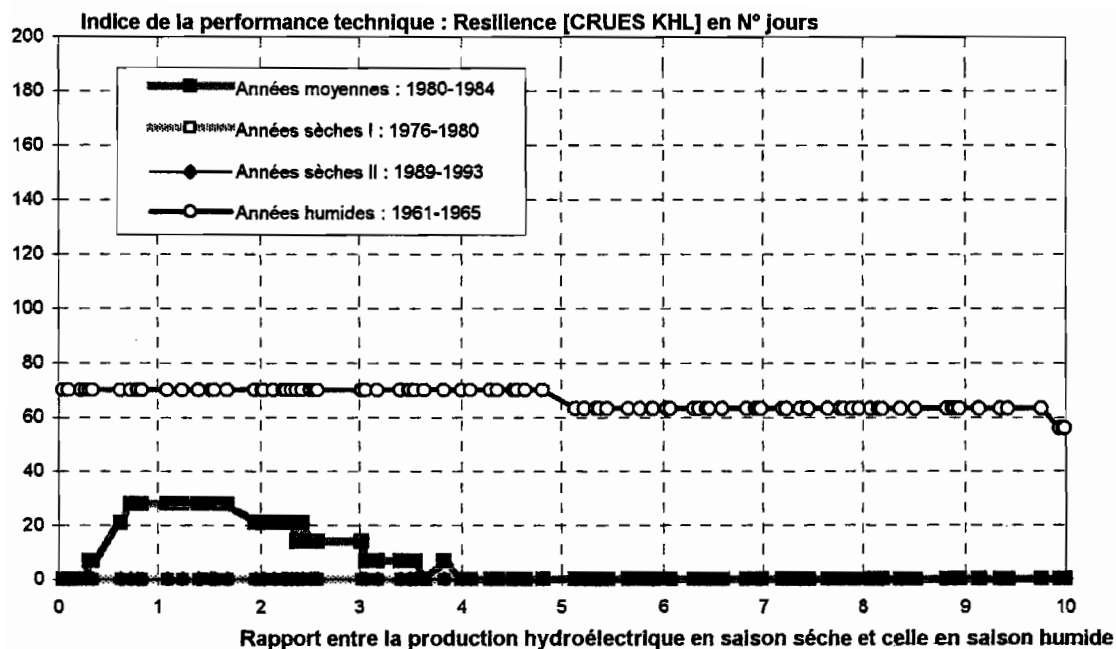






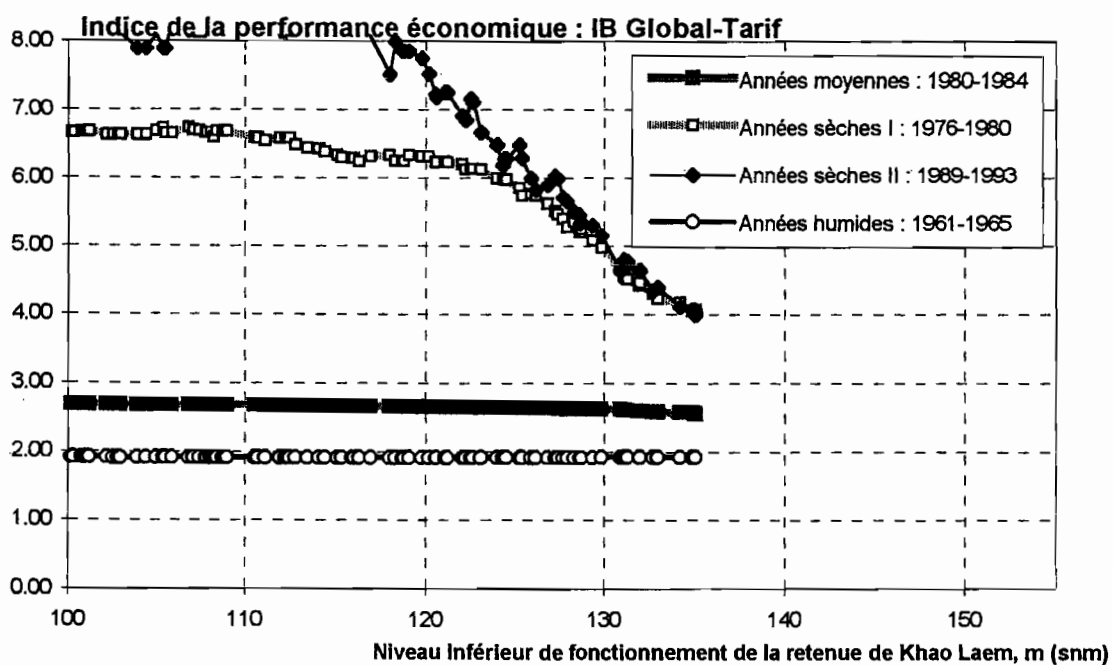
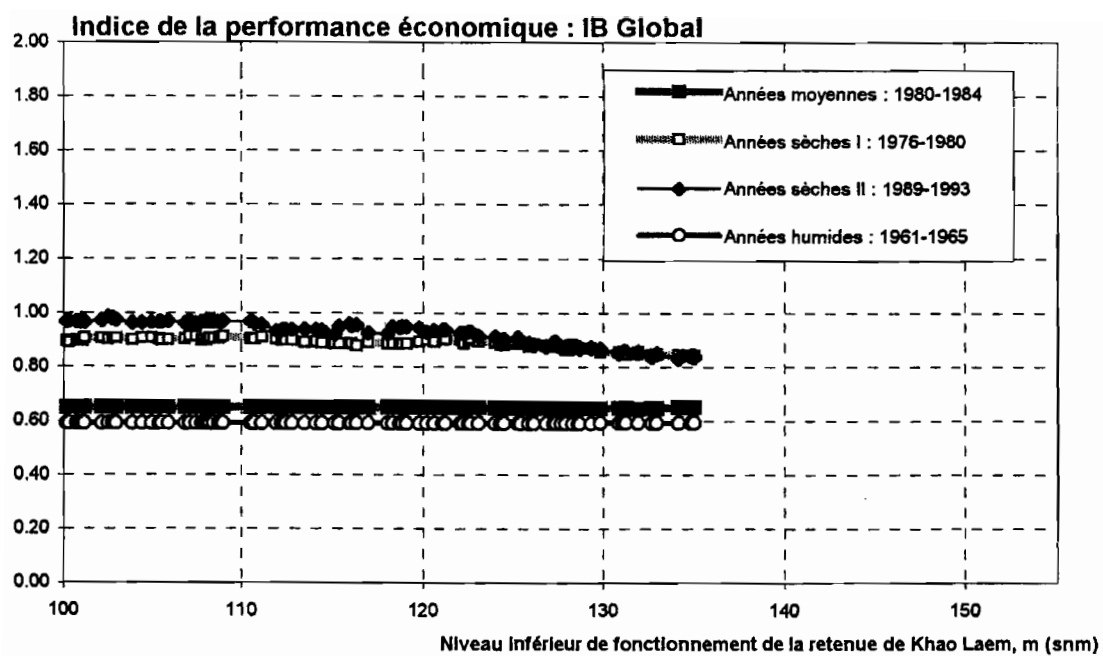


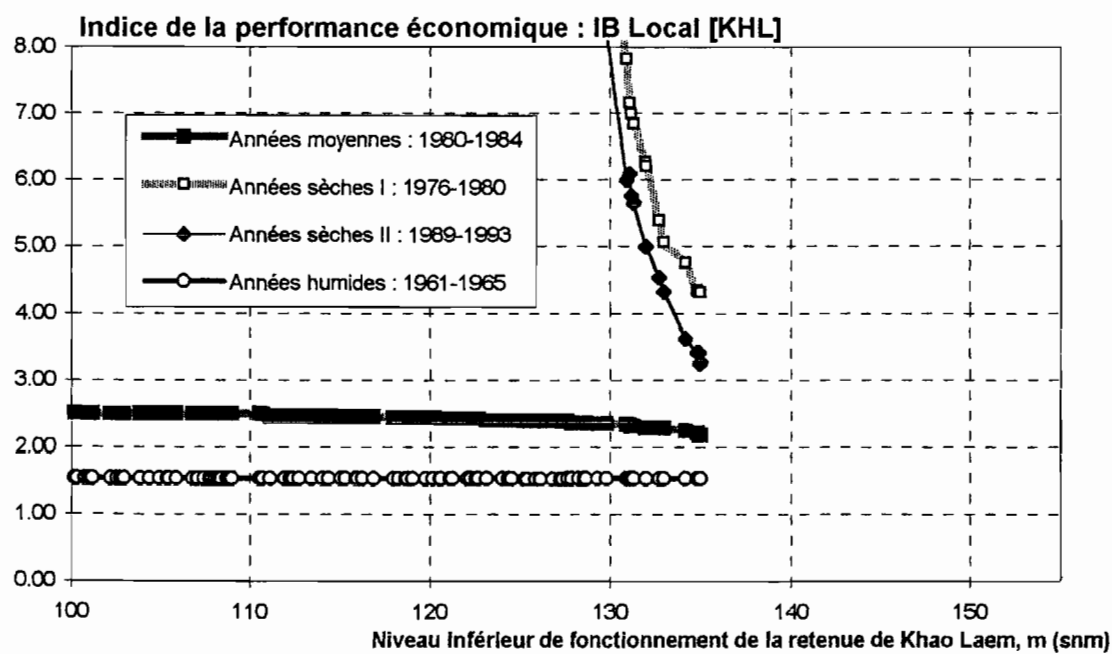
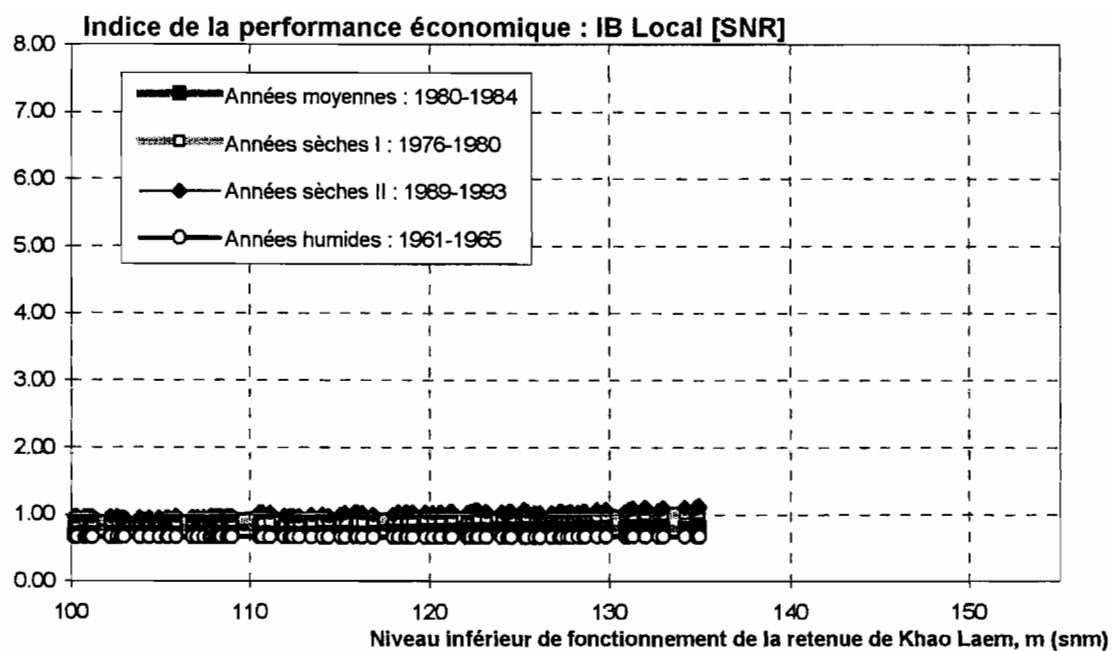


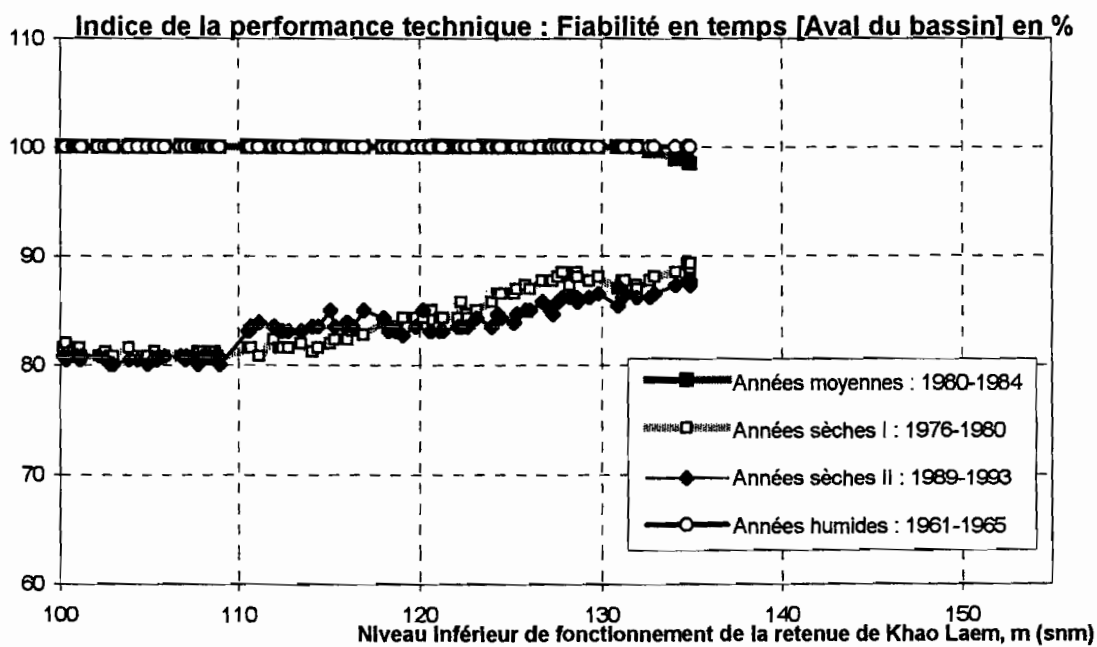
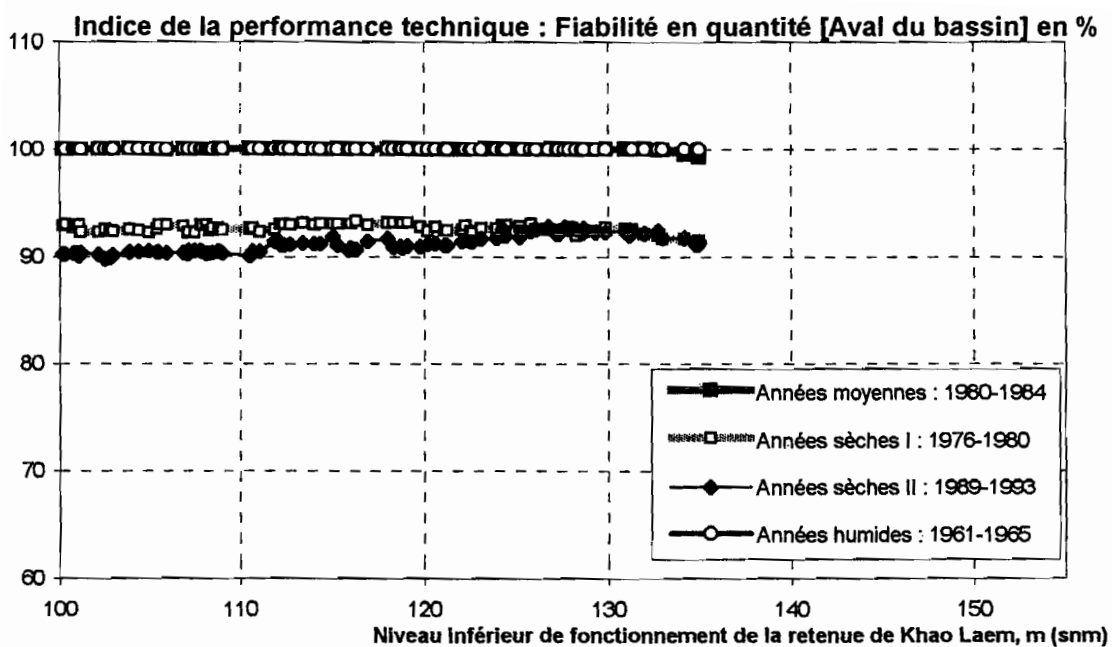


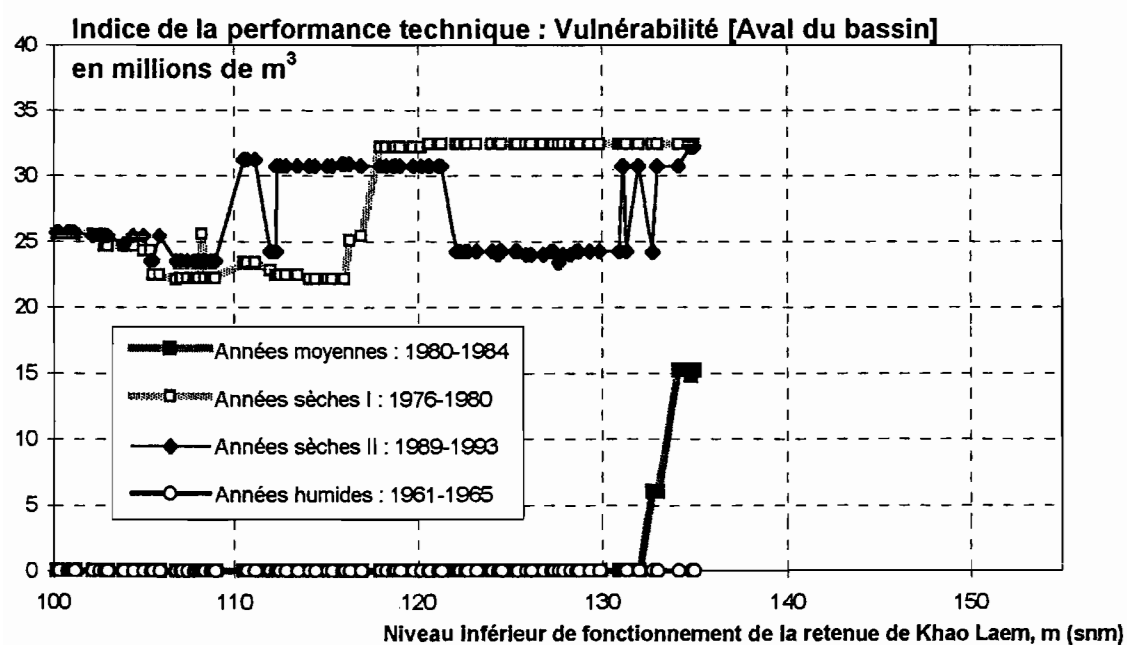
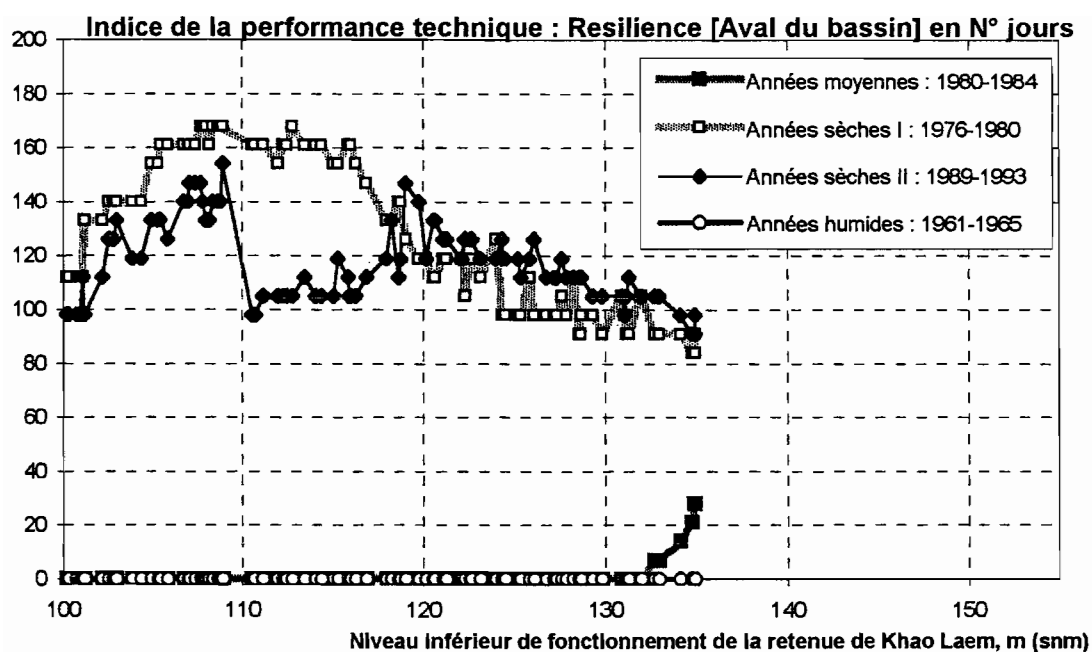
E-2 CONTRAINTES DE GESTION DES RETENUES

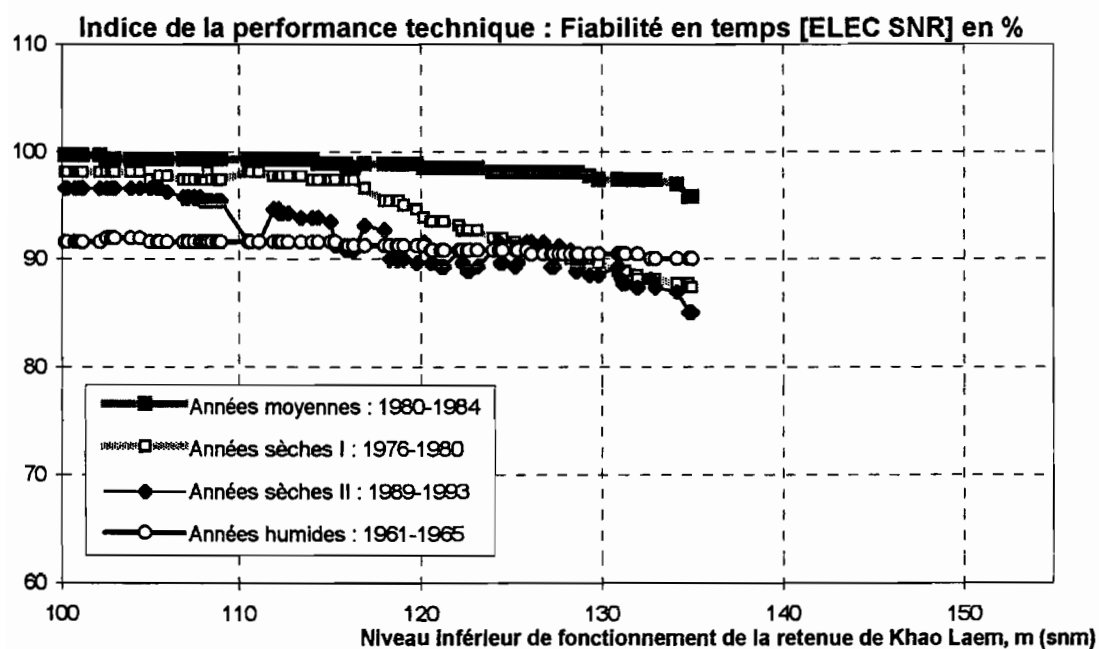
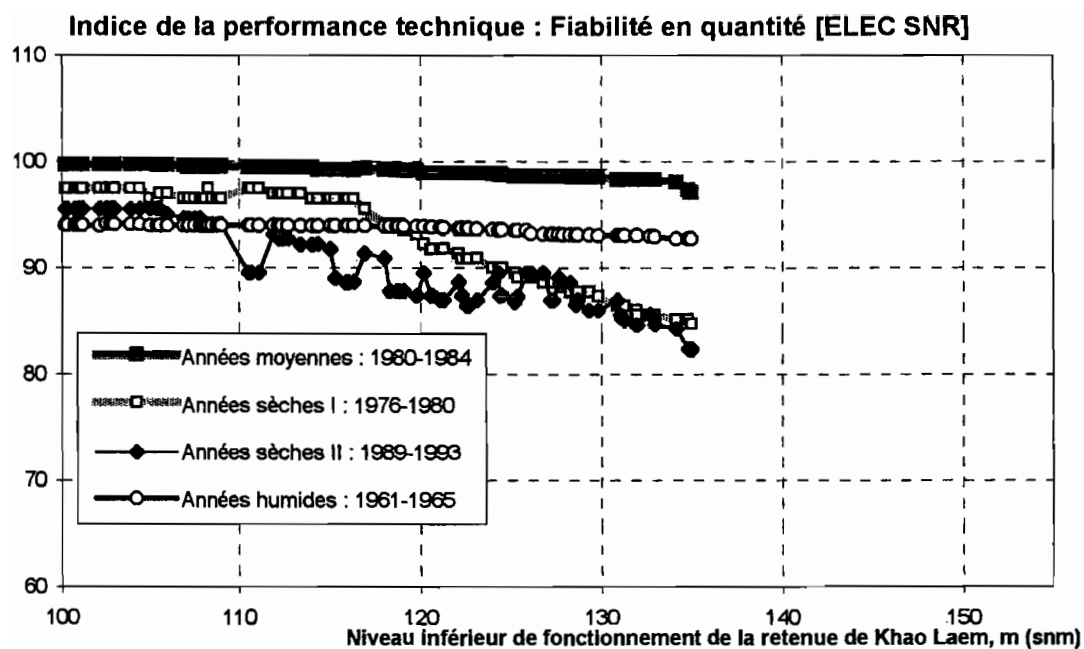
E-2.1 Niveau inférieur de fonctionnement de retenue de Khao Laem

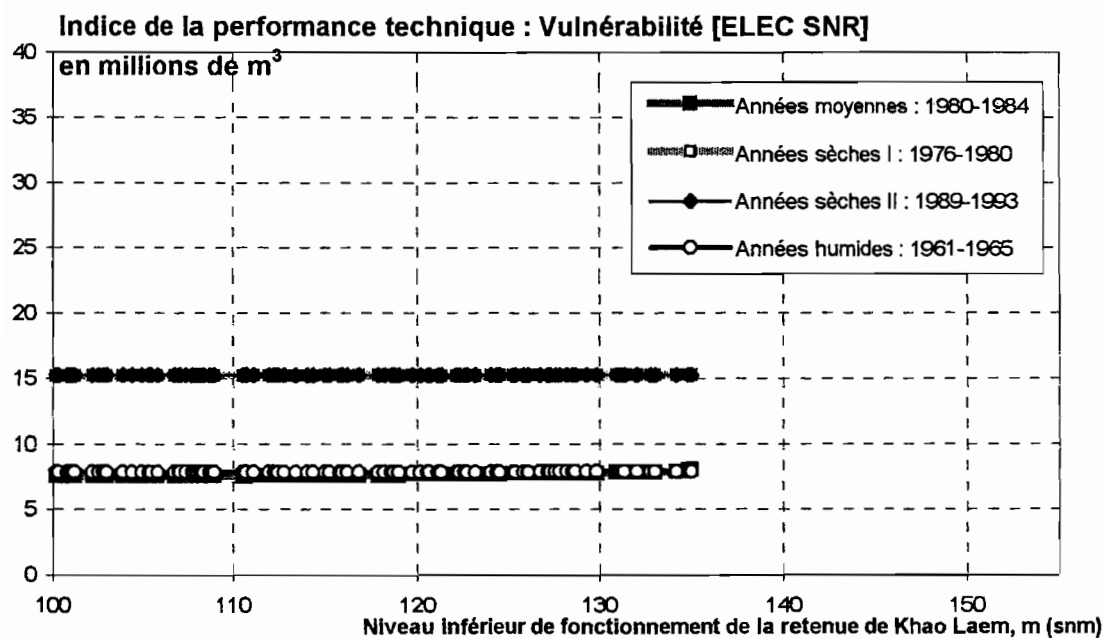
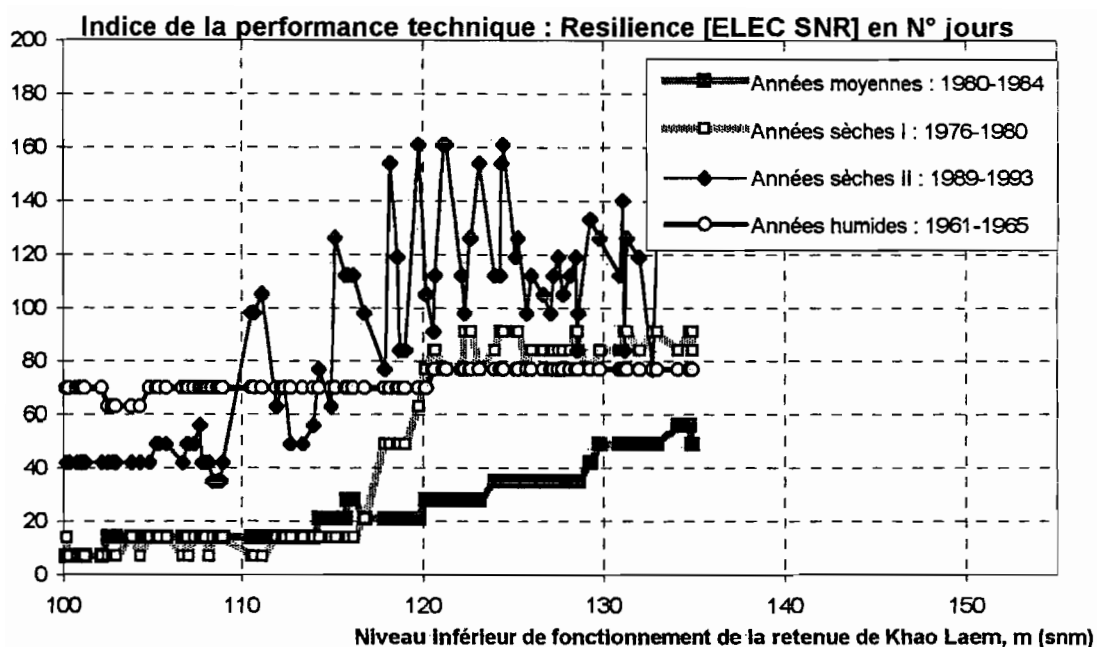


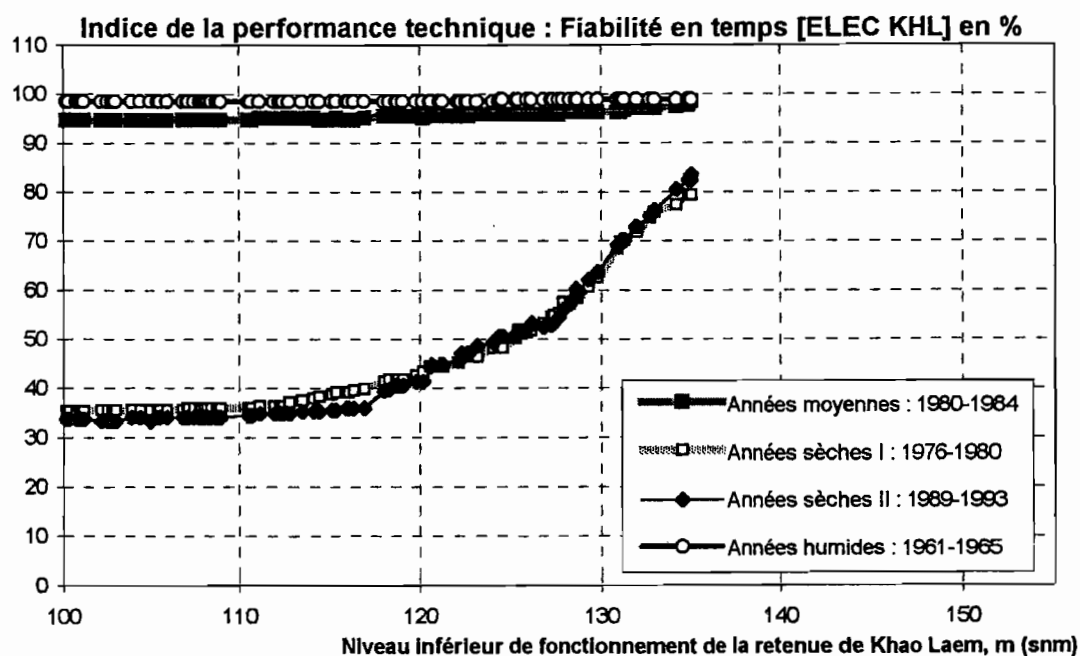
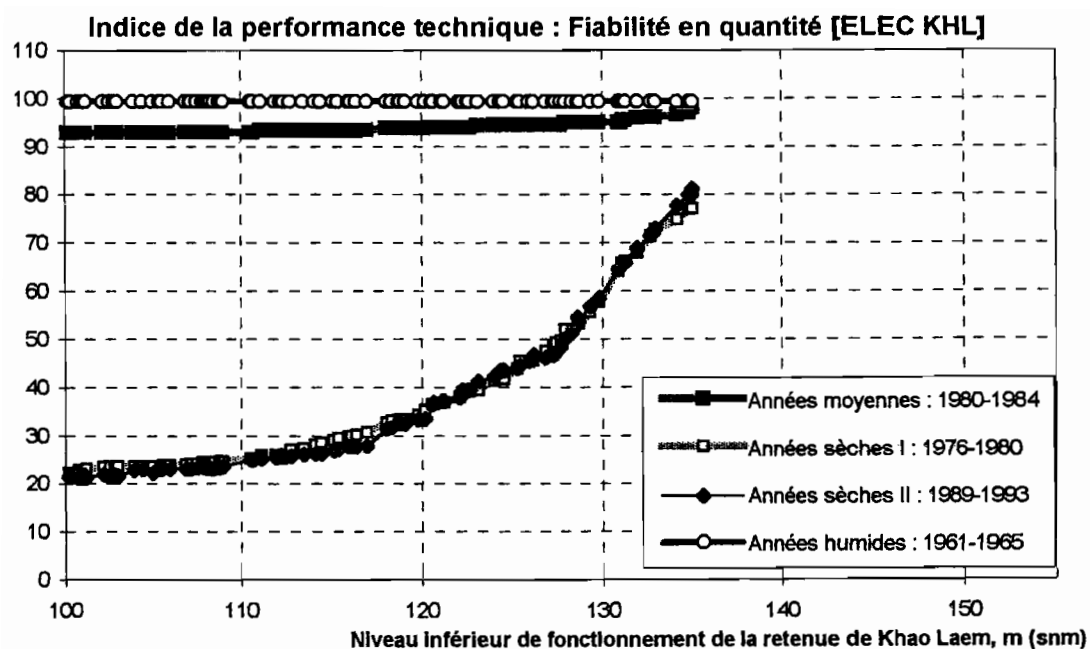


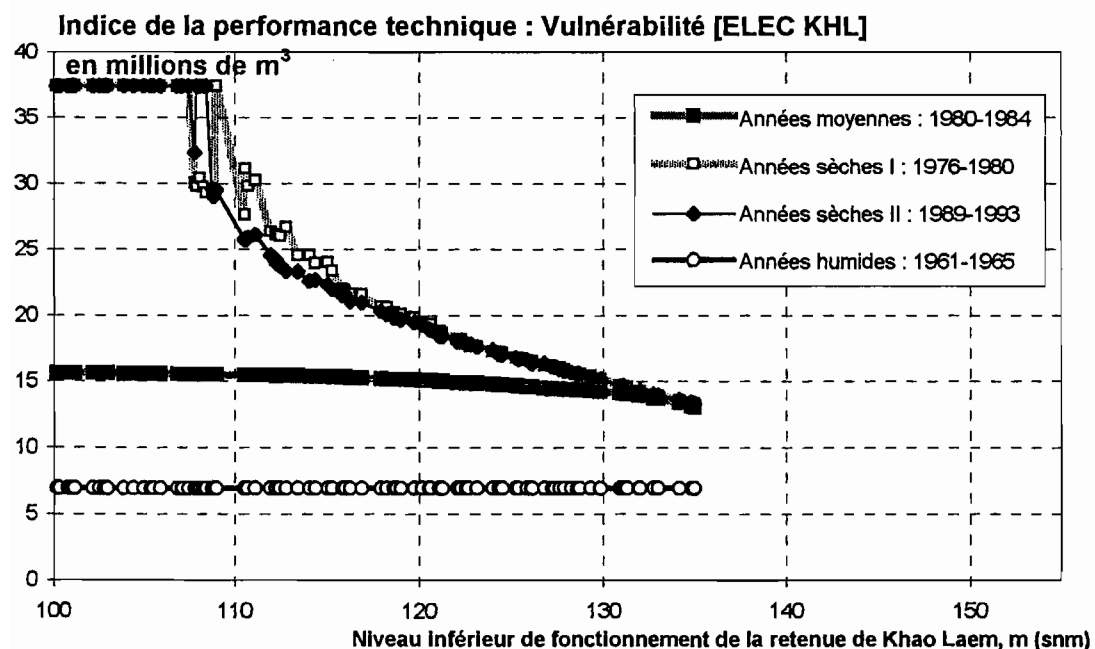
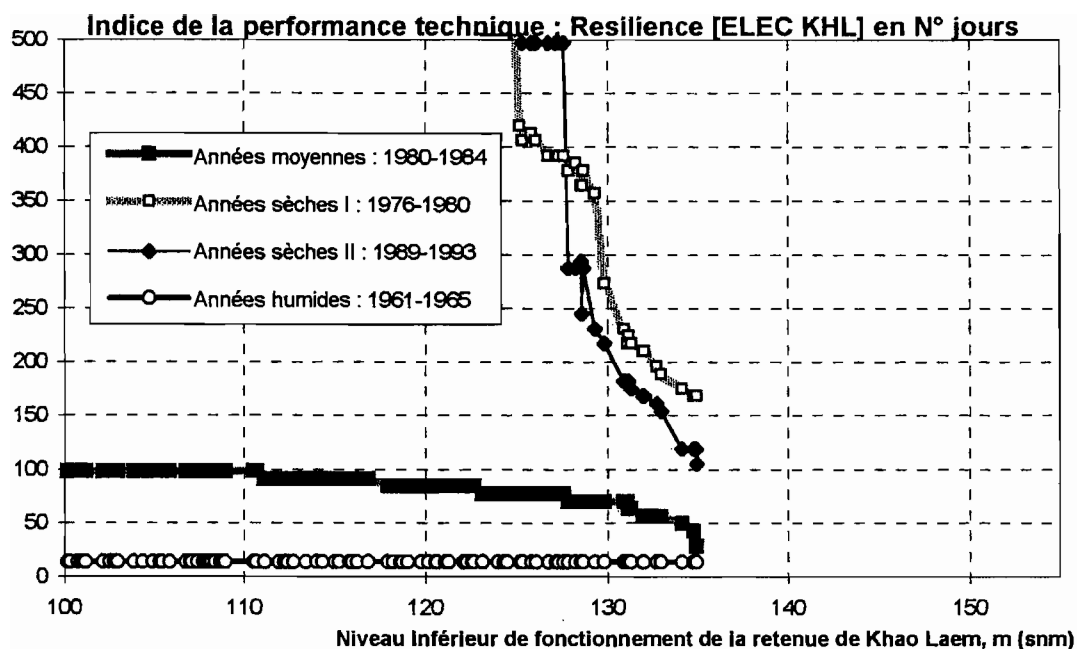


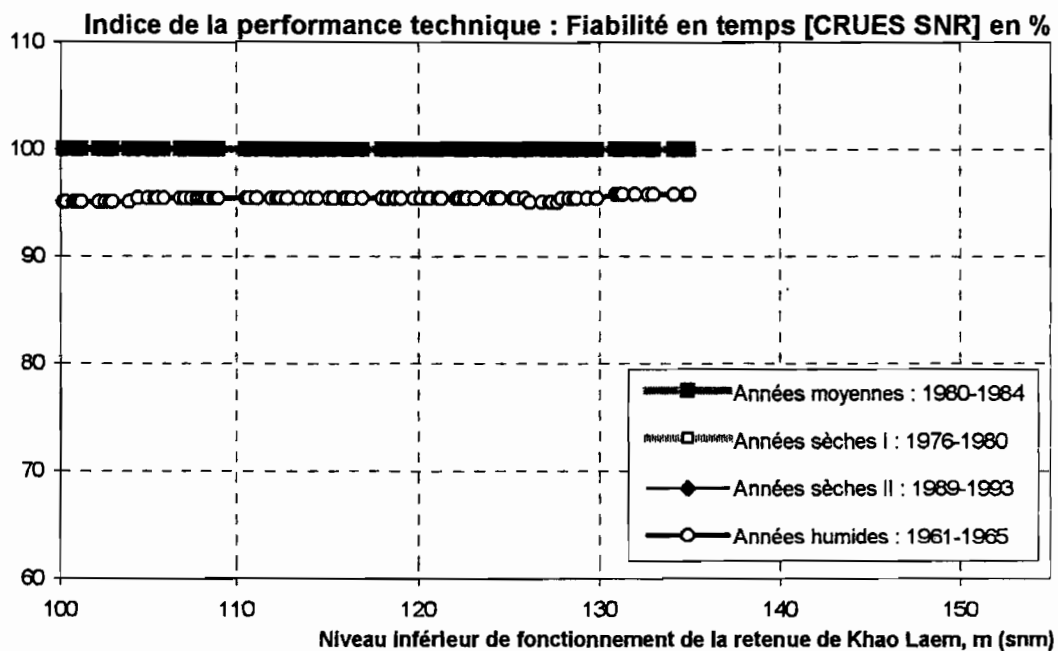
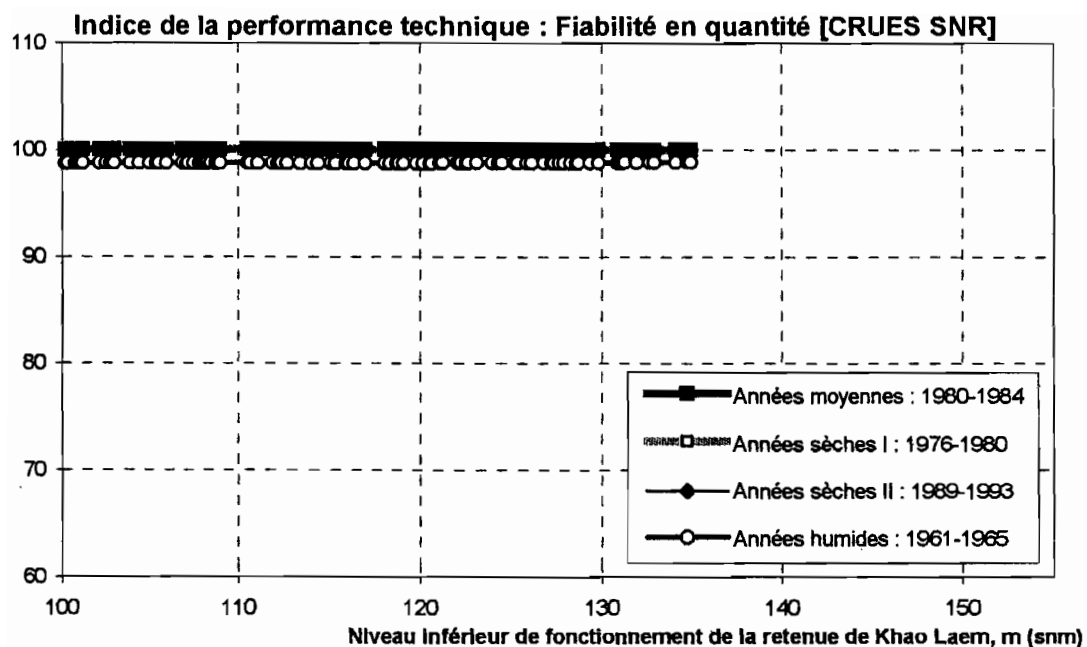


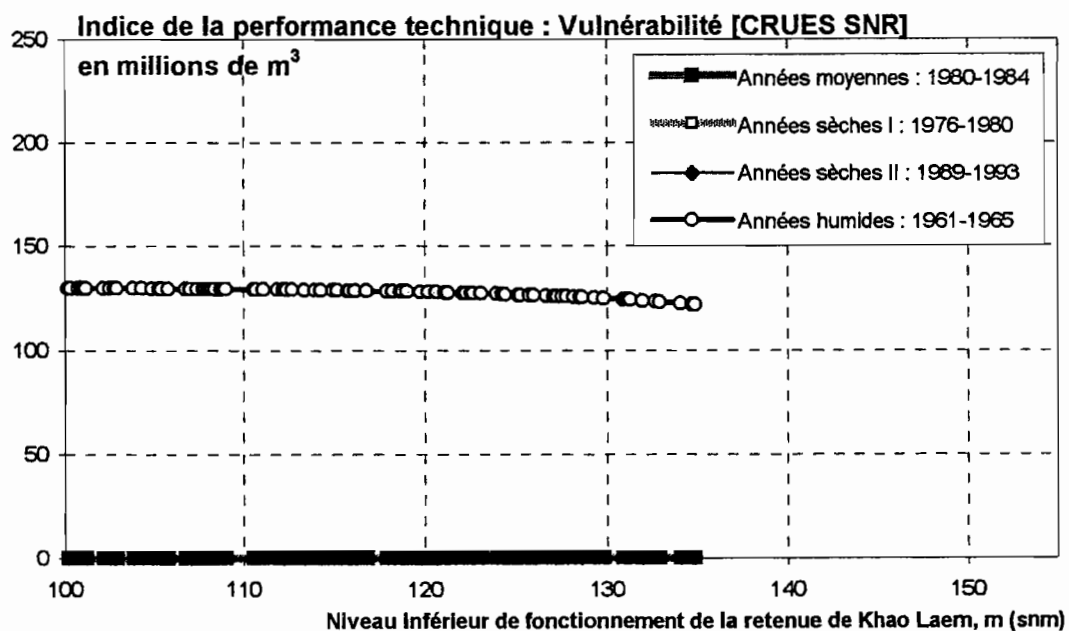
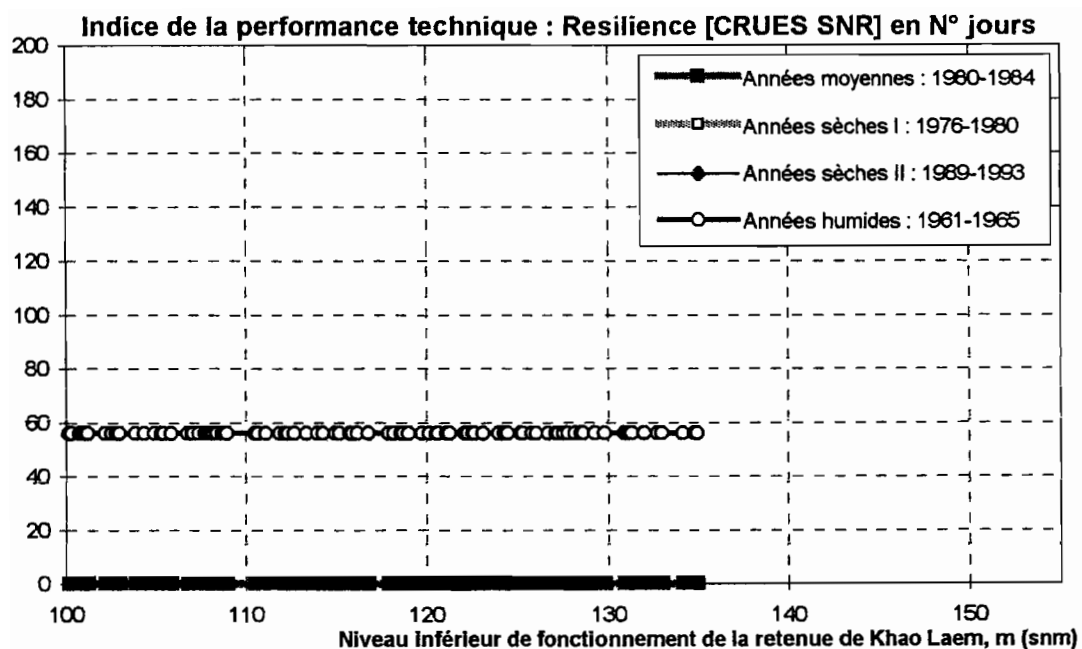


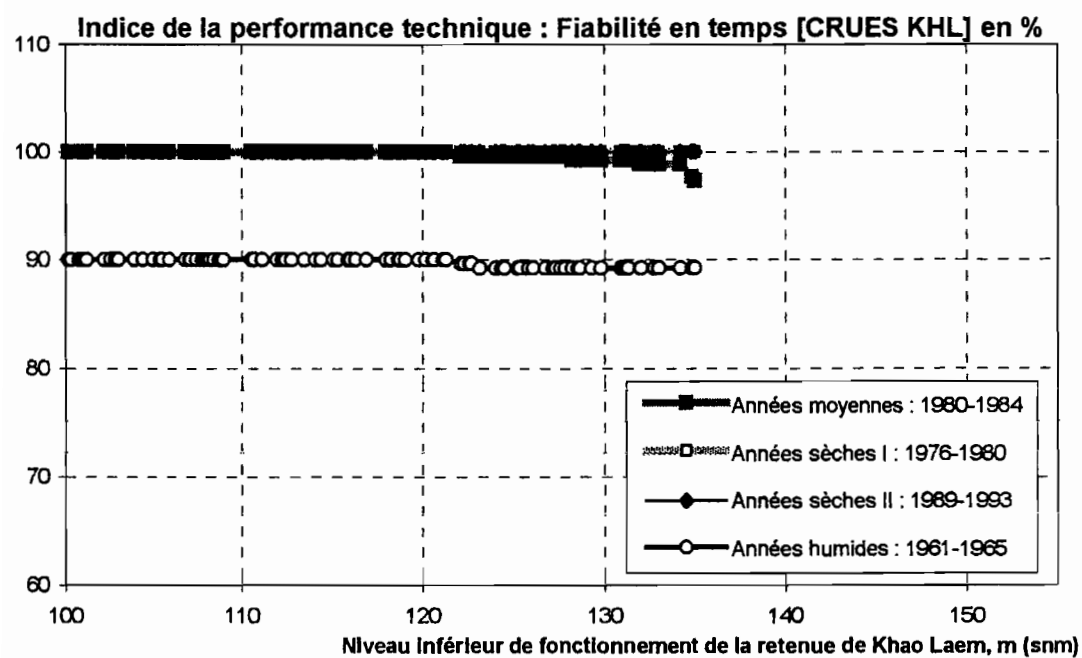
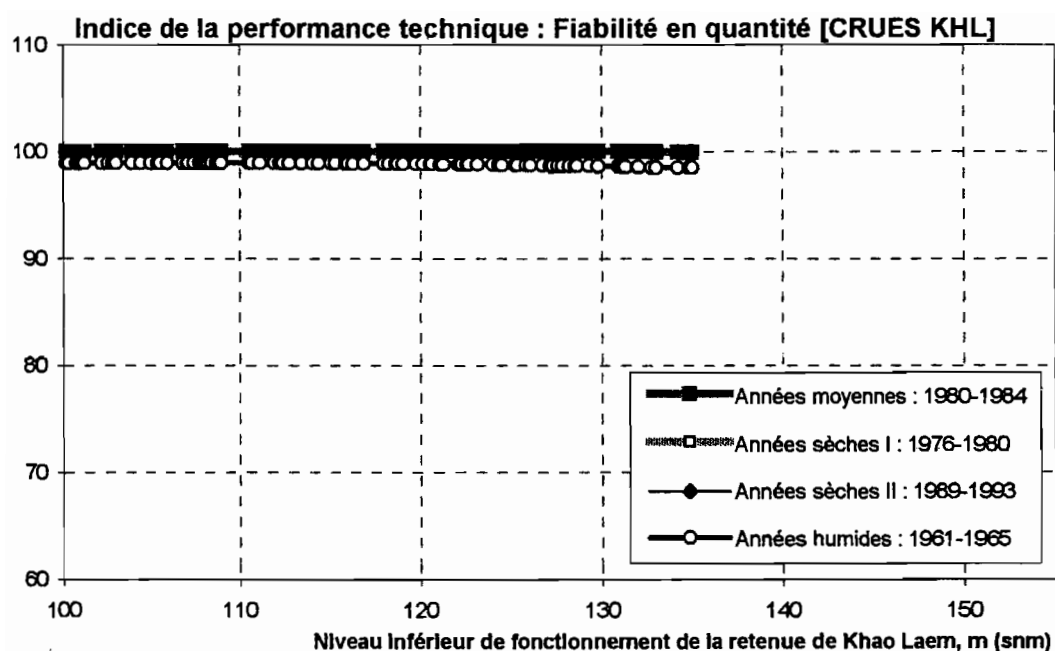


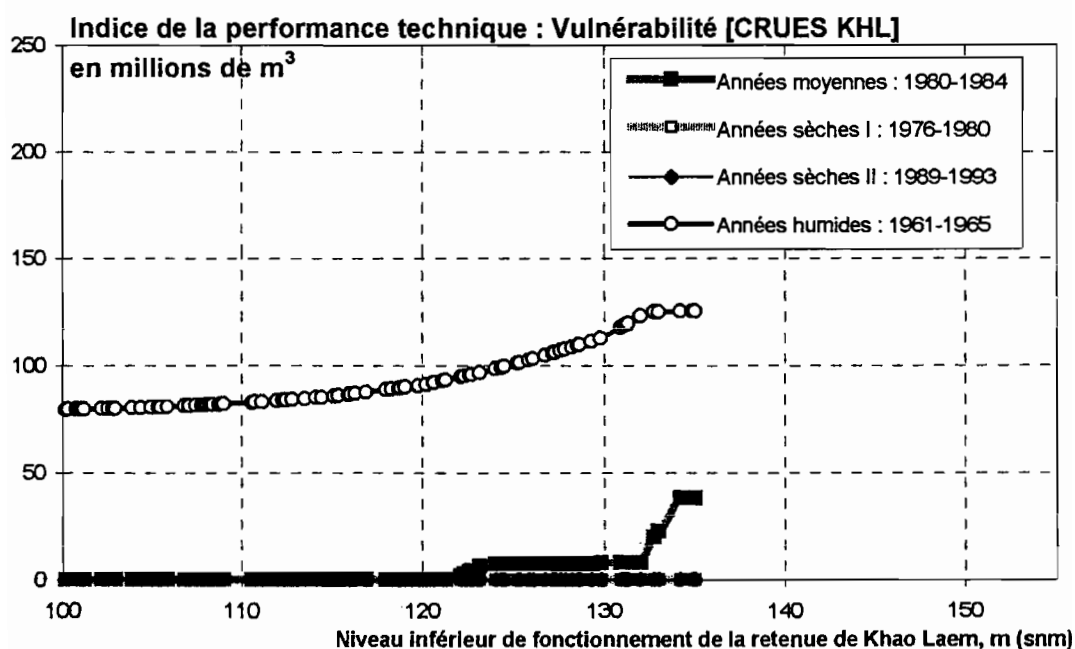
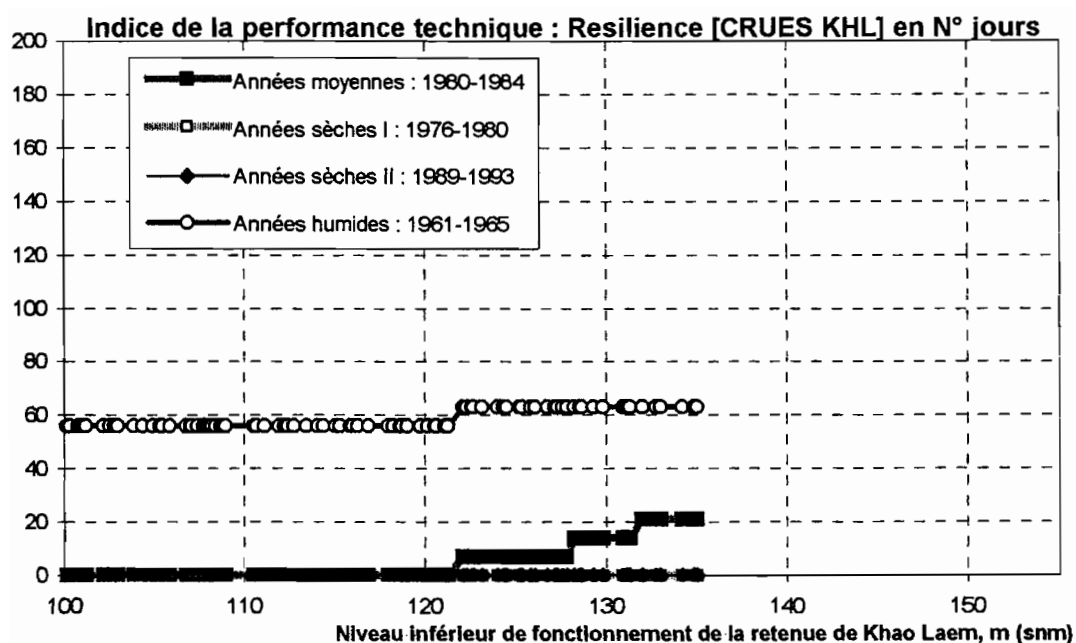




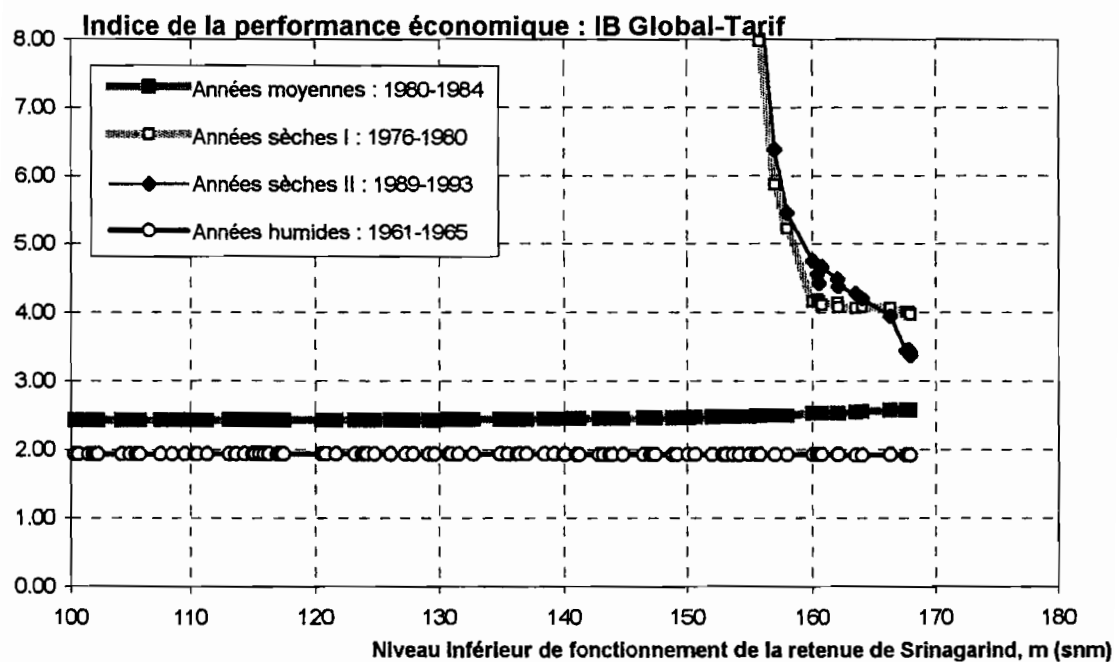
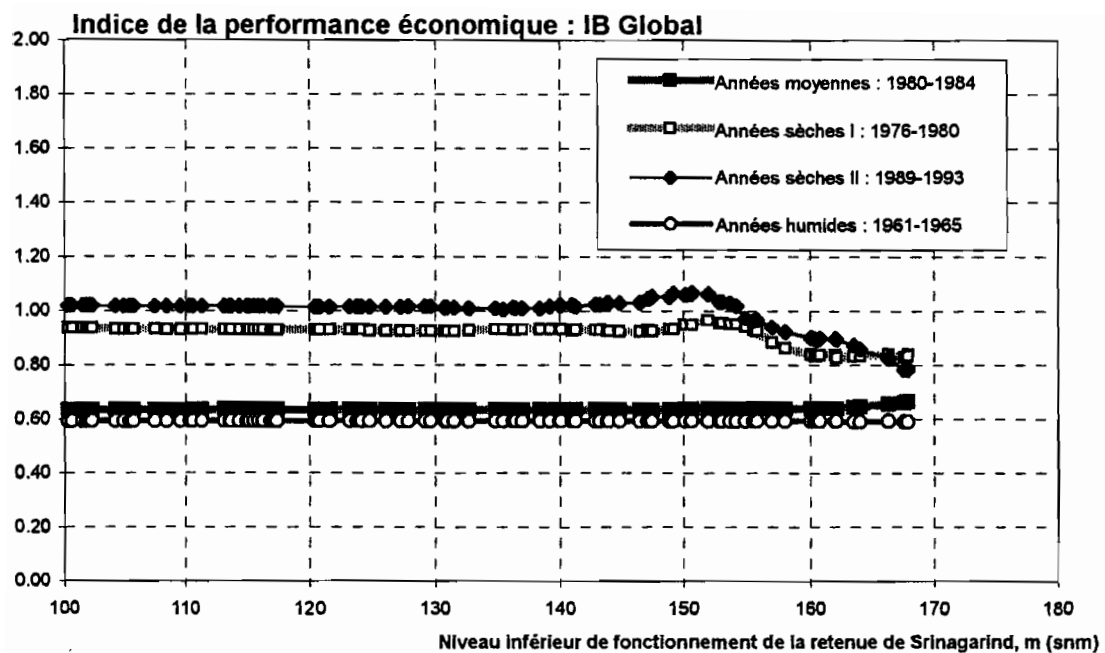


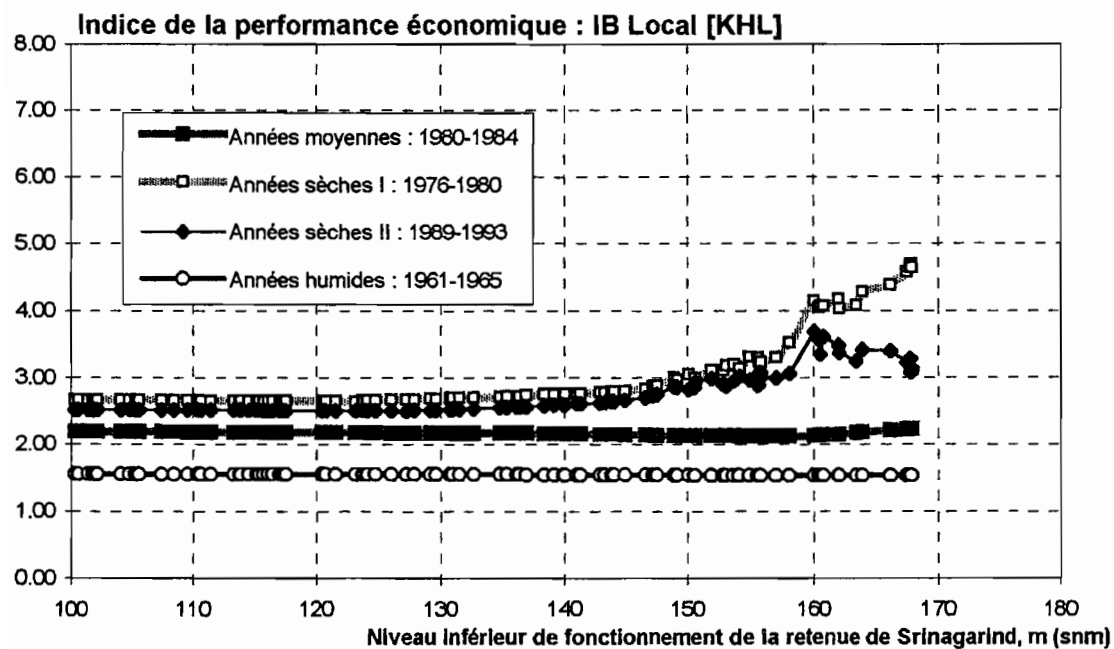
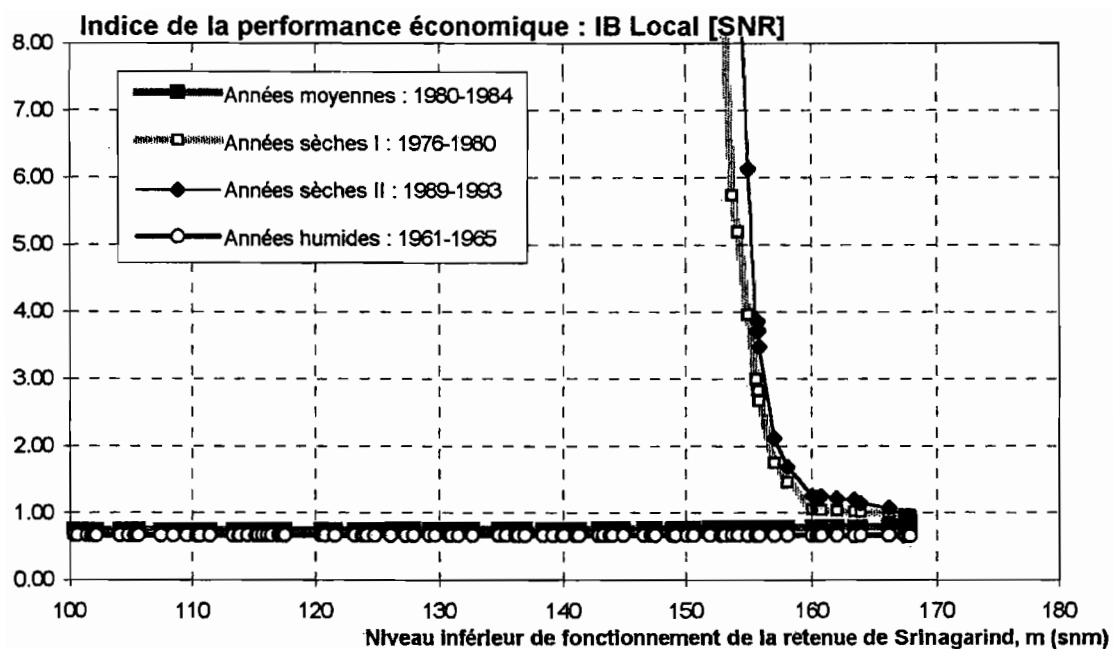


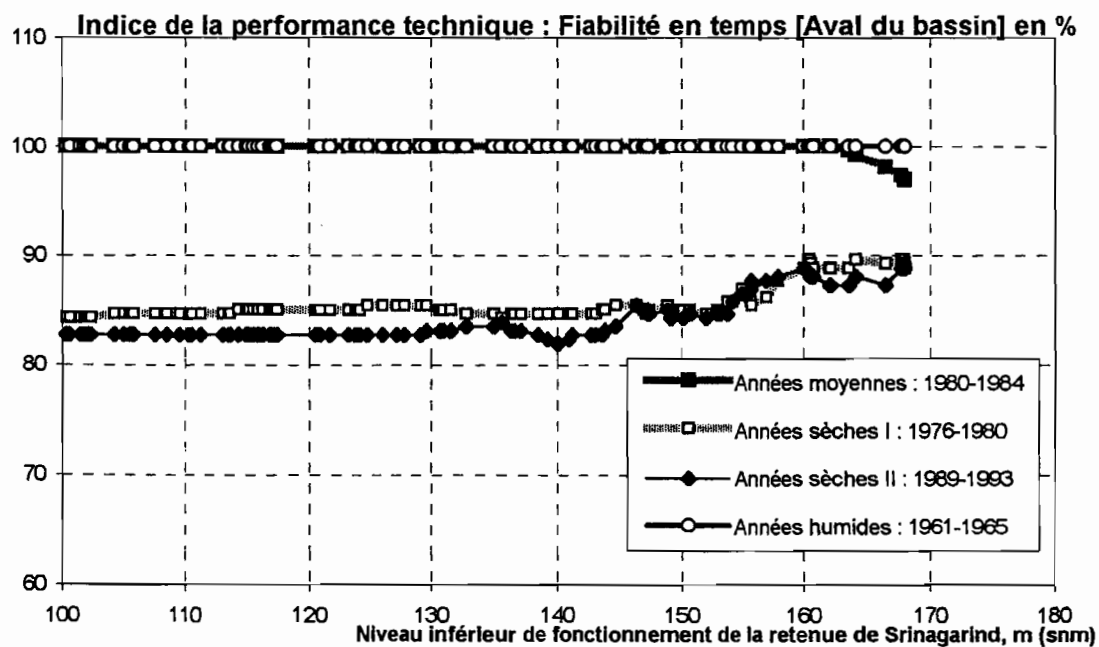
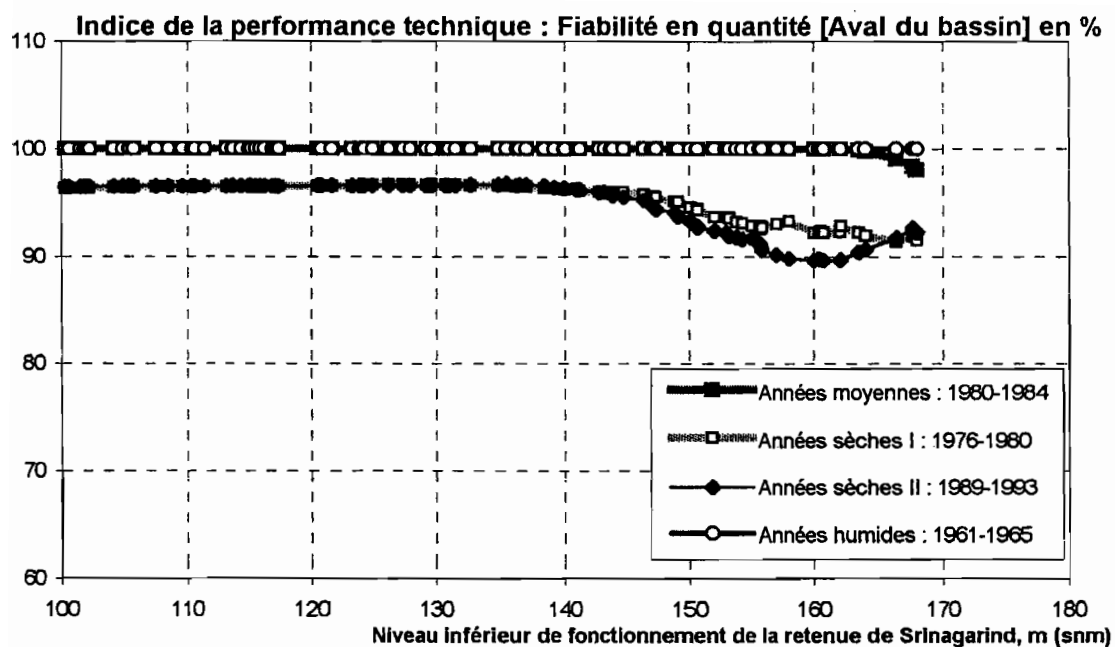


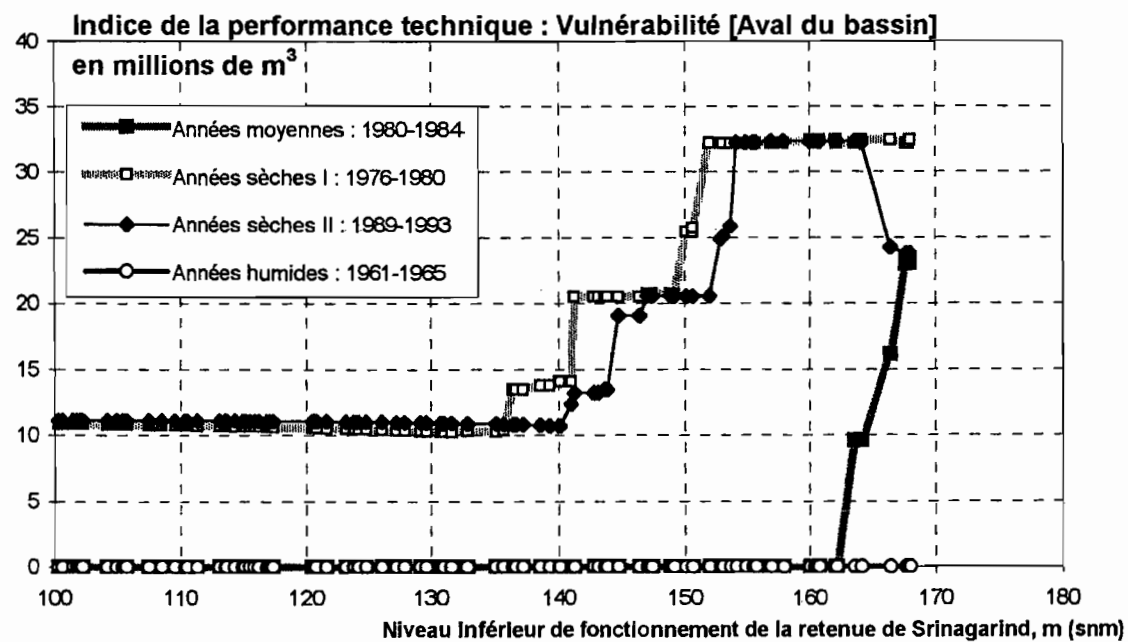
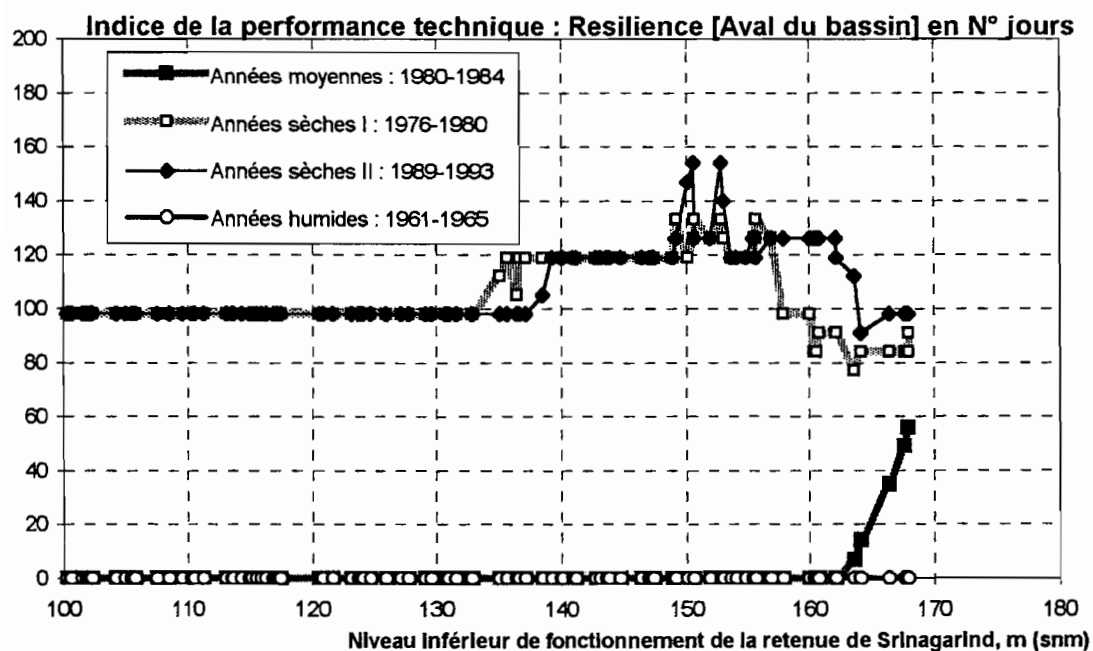


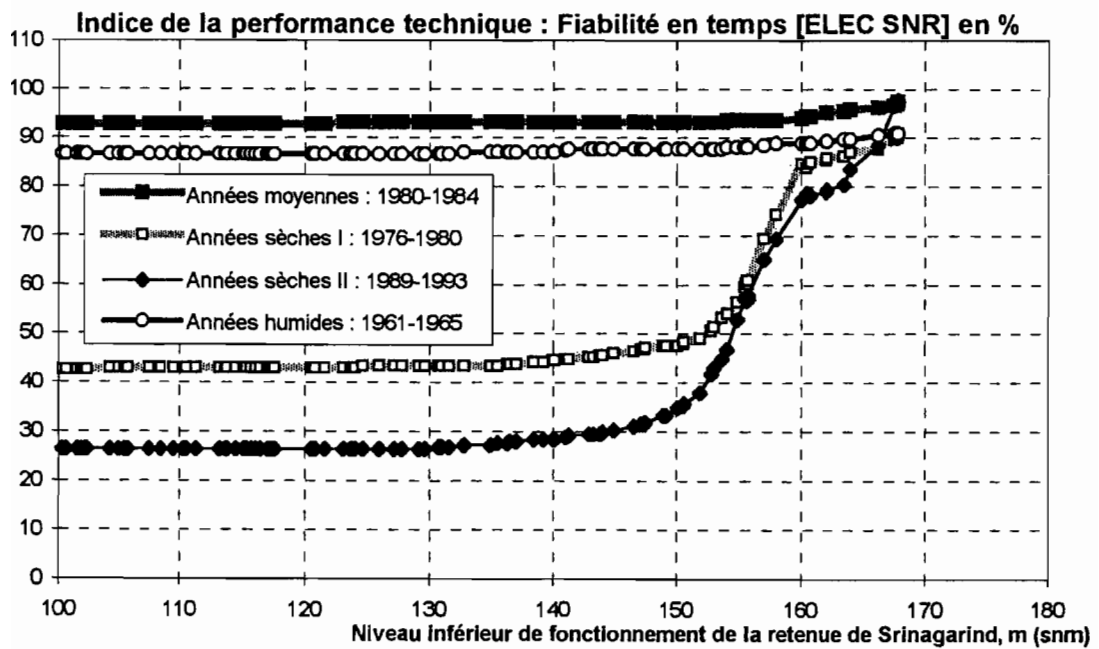
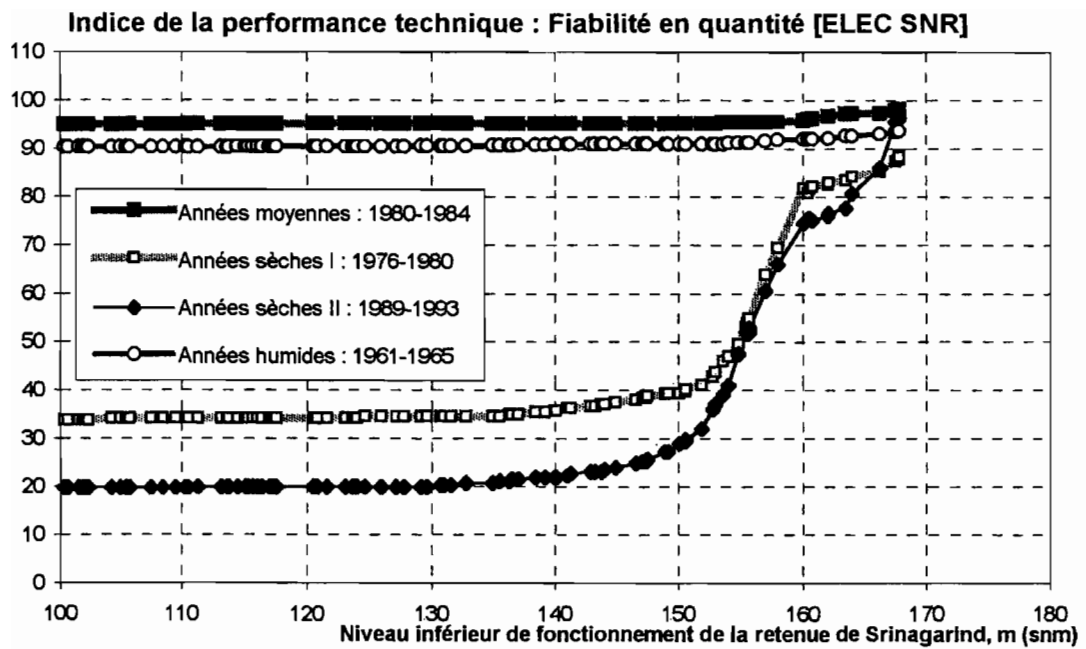
**E-2.2 Niveau inférieur de fonctionnement
de retenue de Srinagarind**

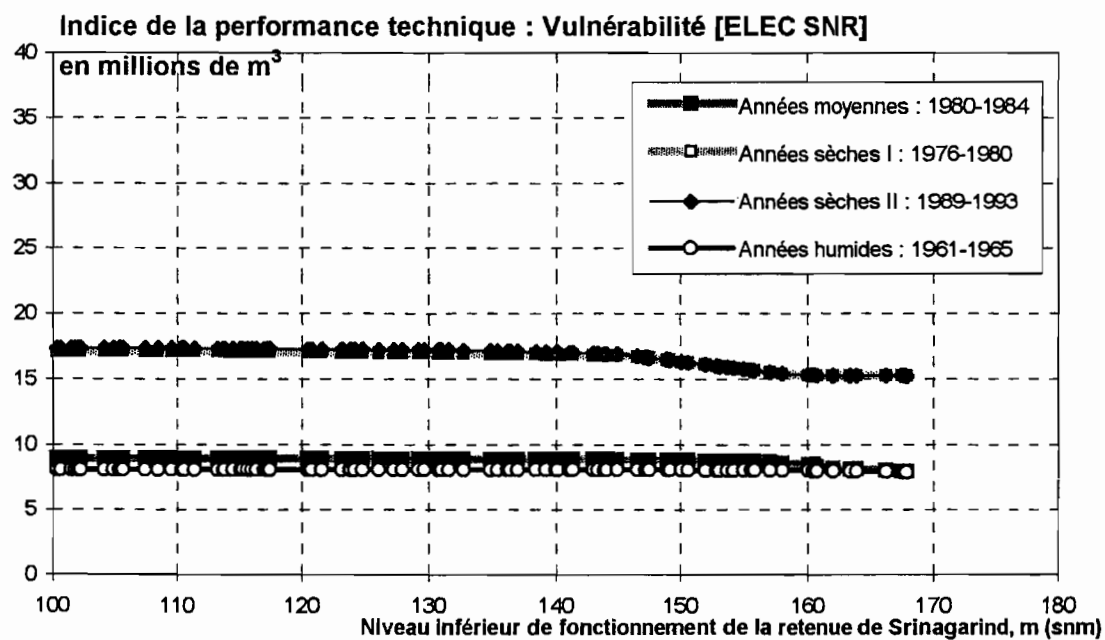
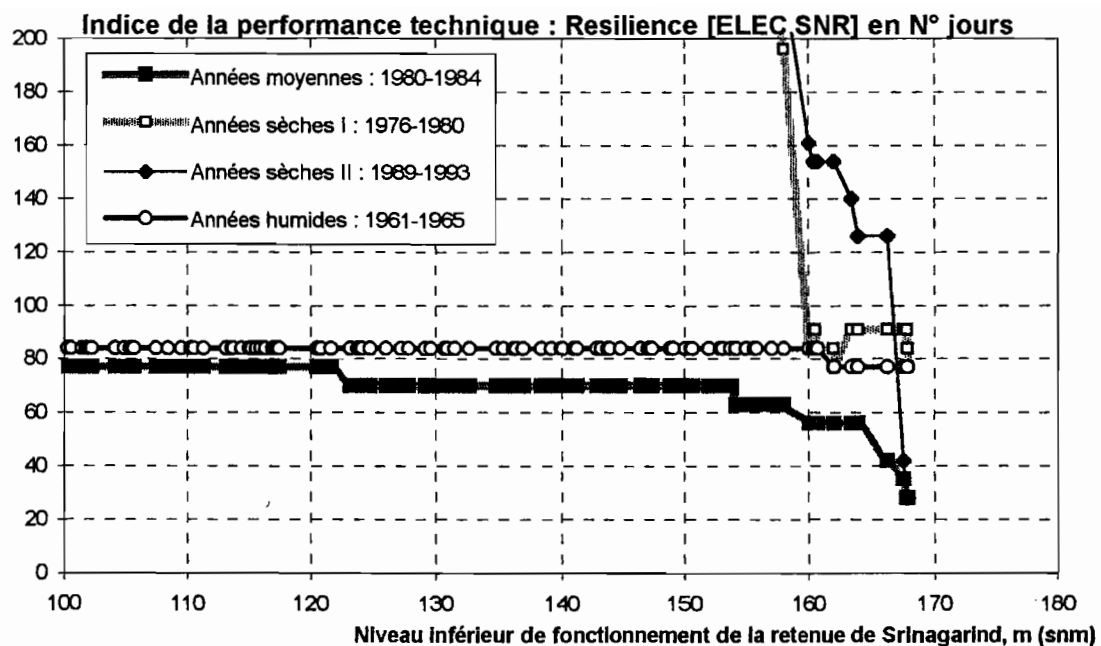


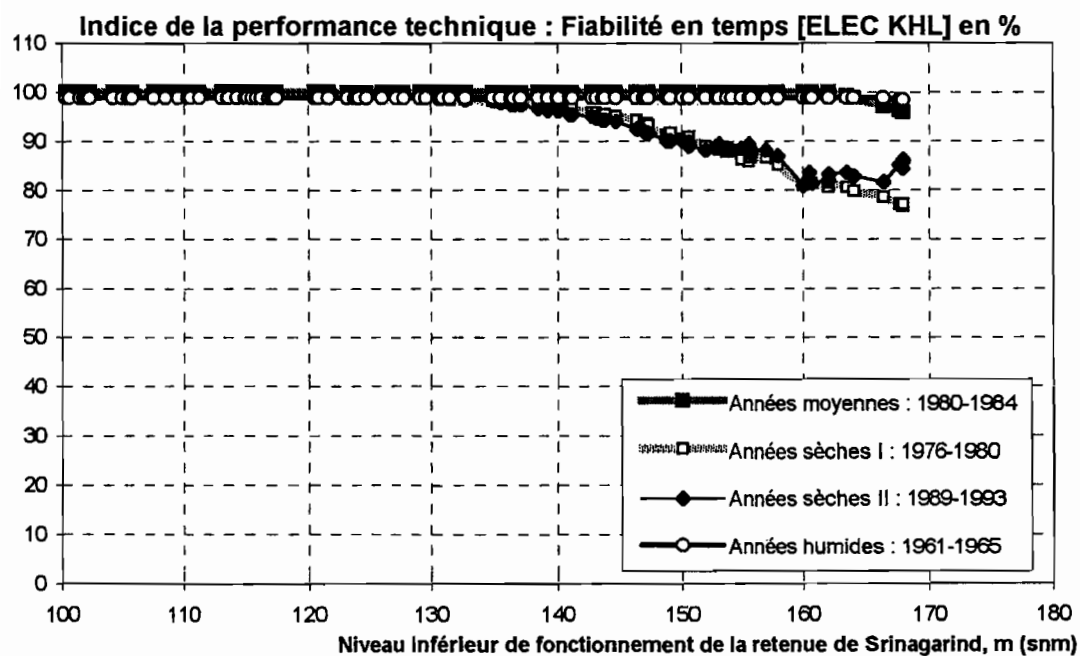
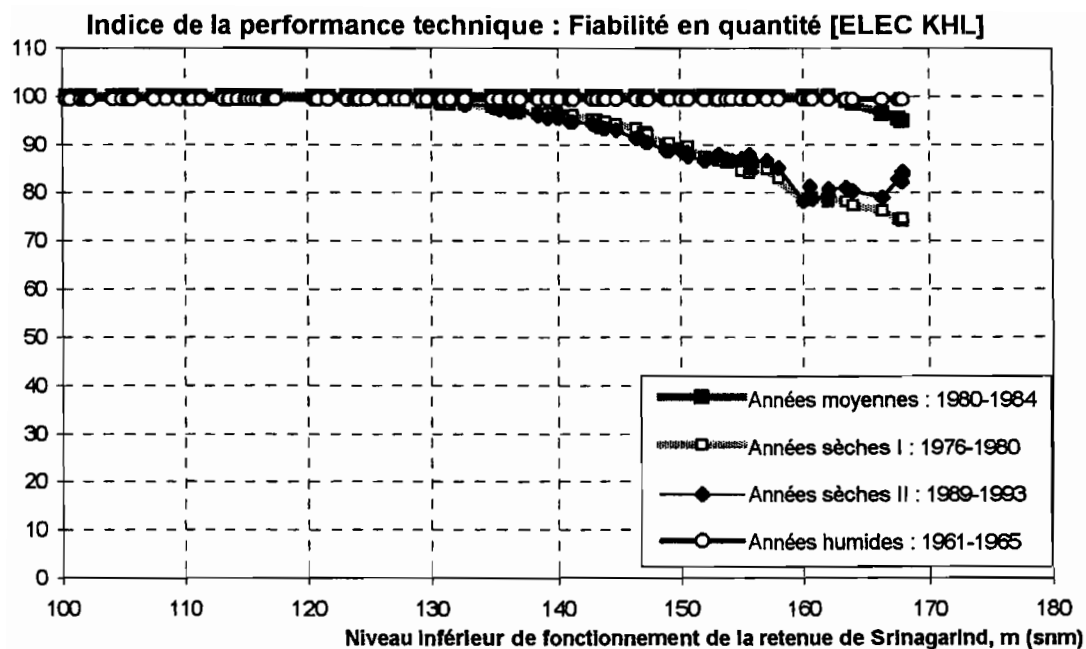


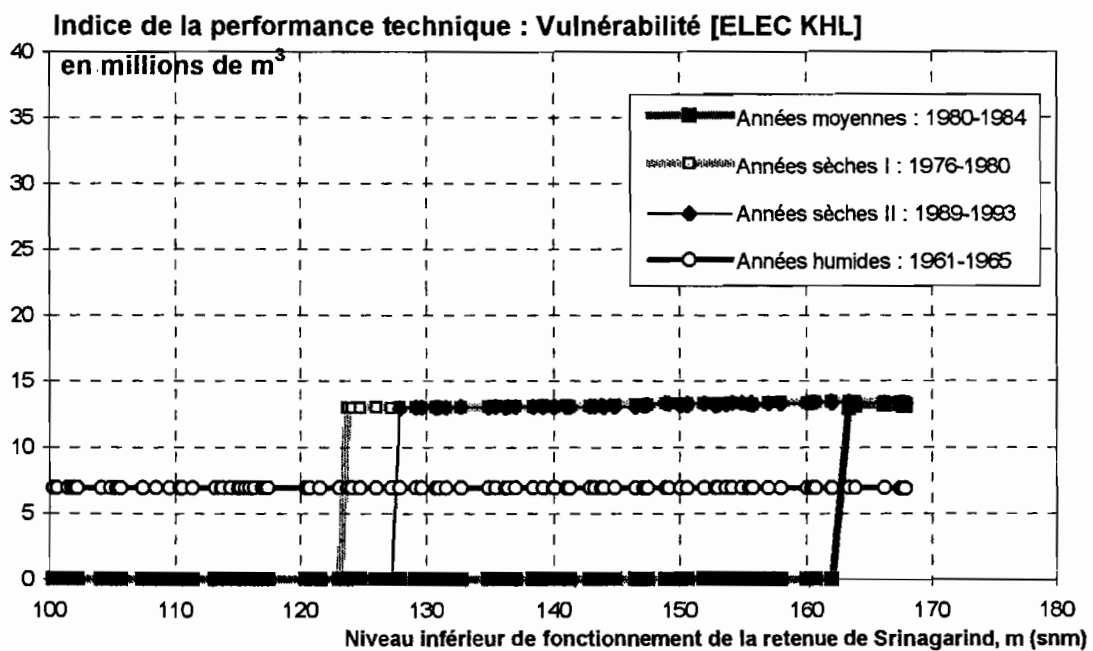
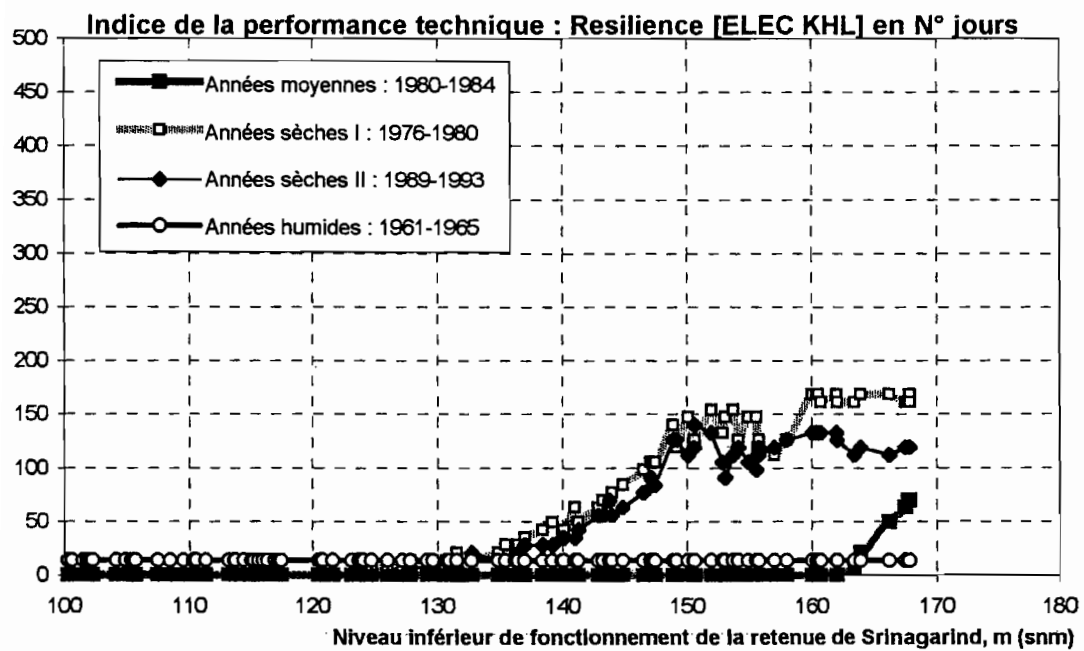


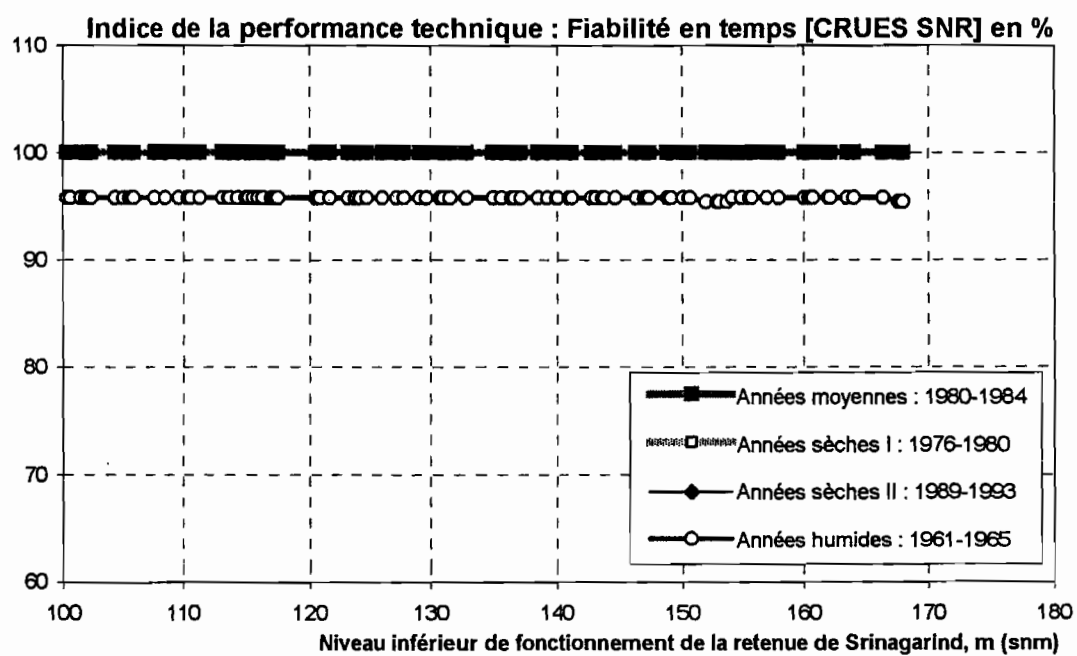
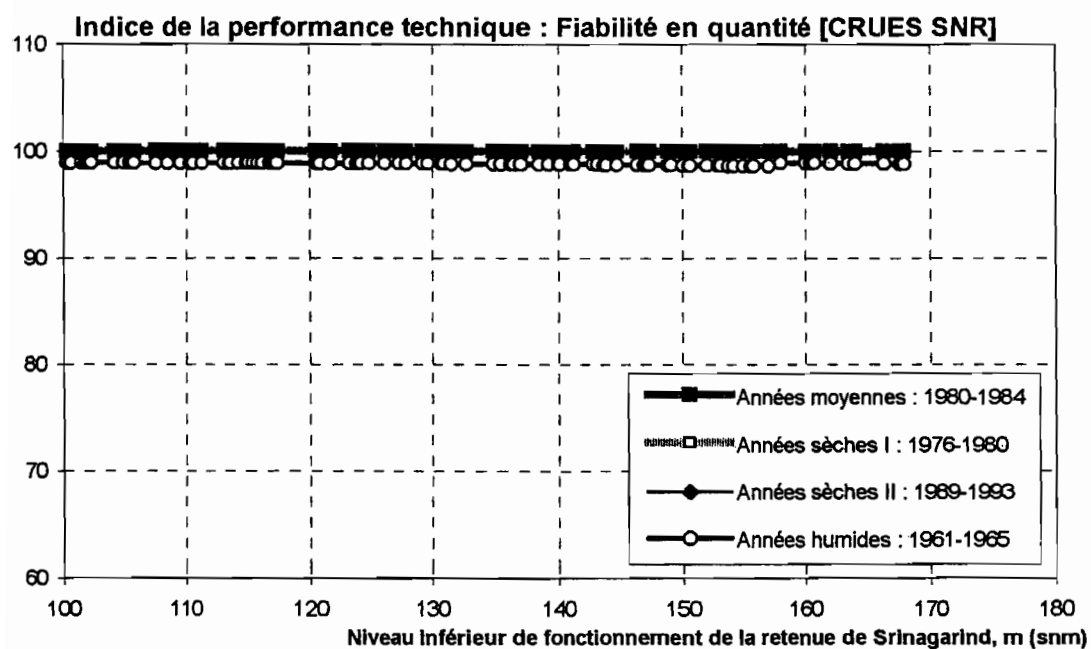


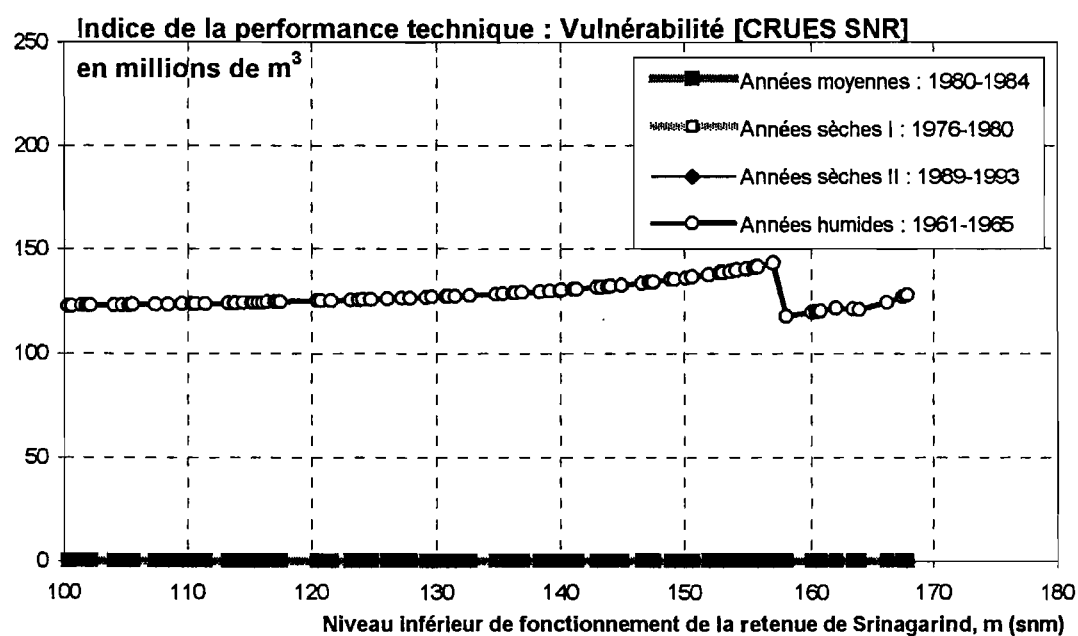
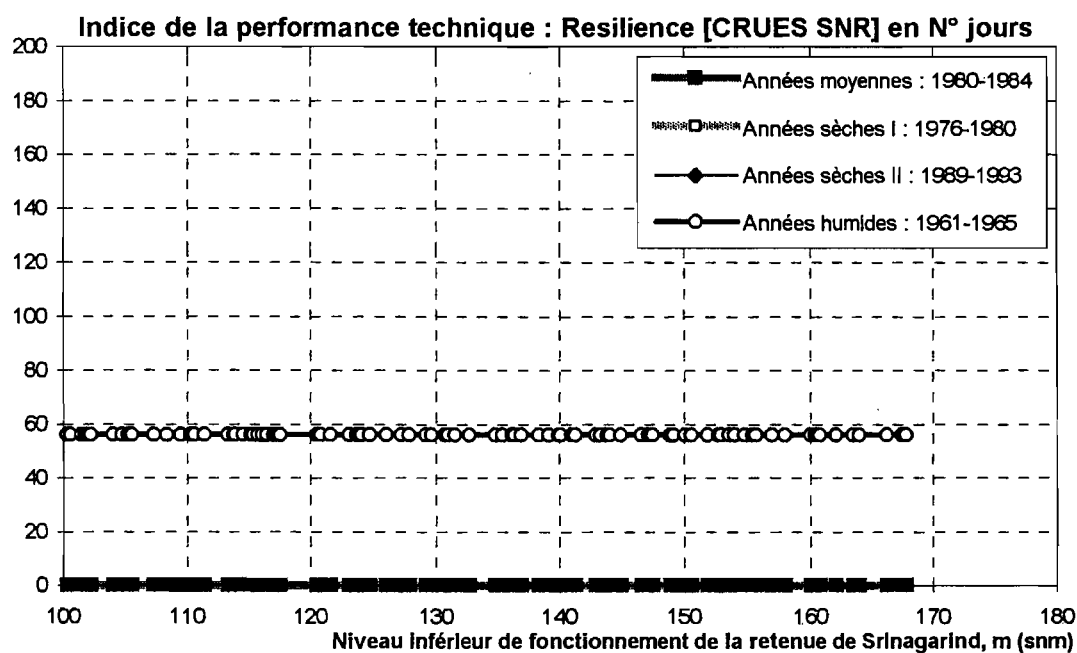


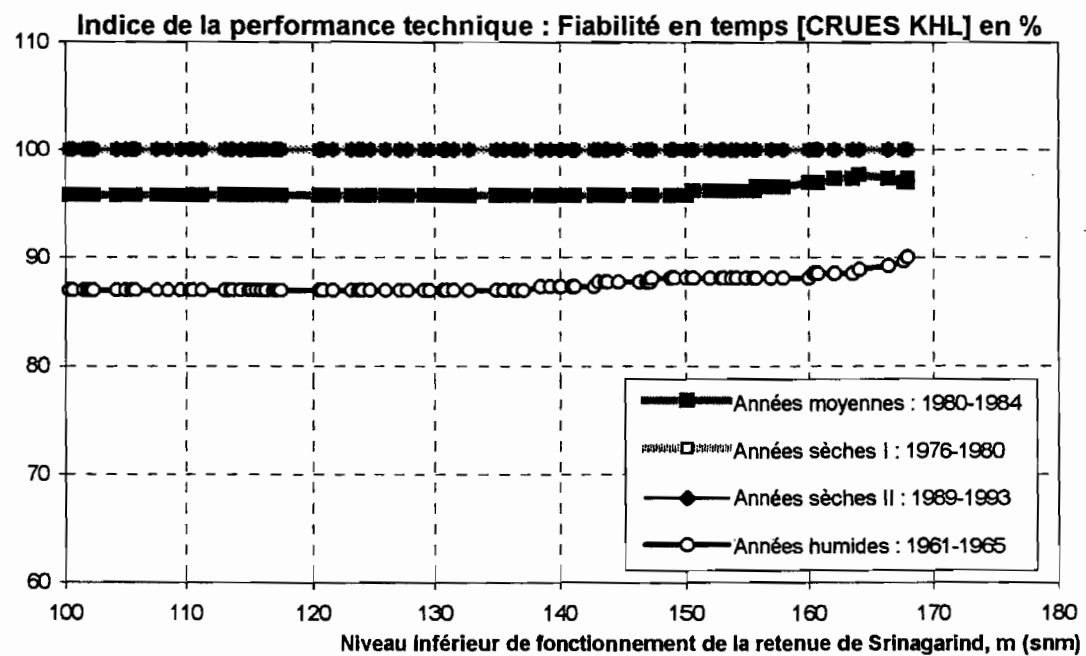
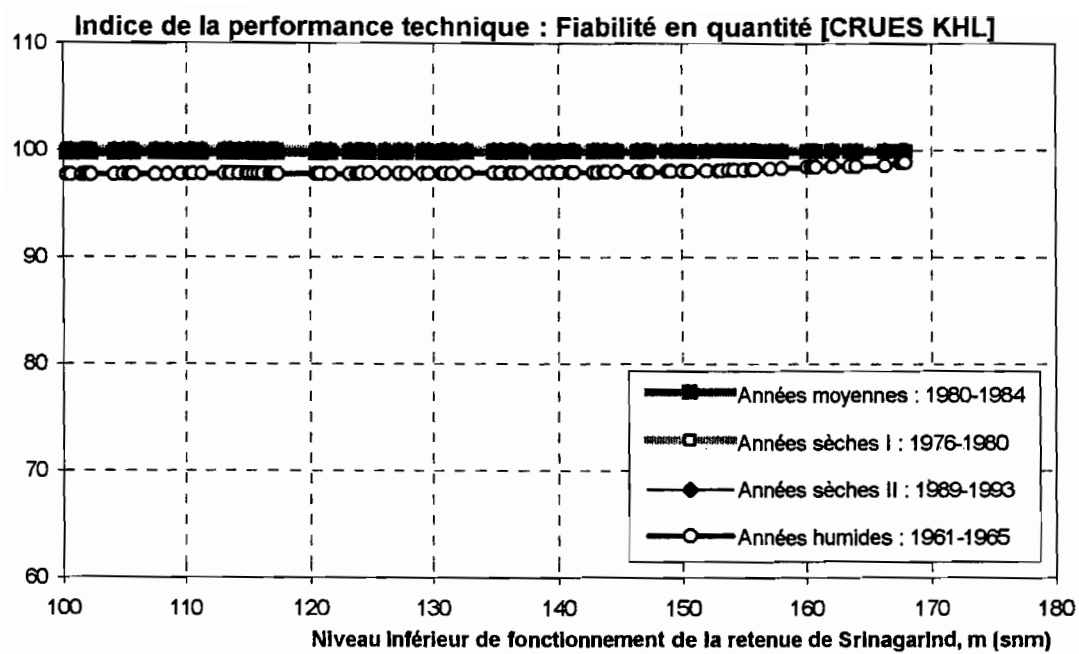


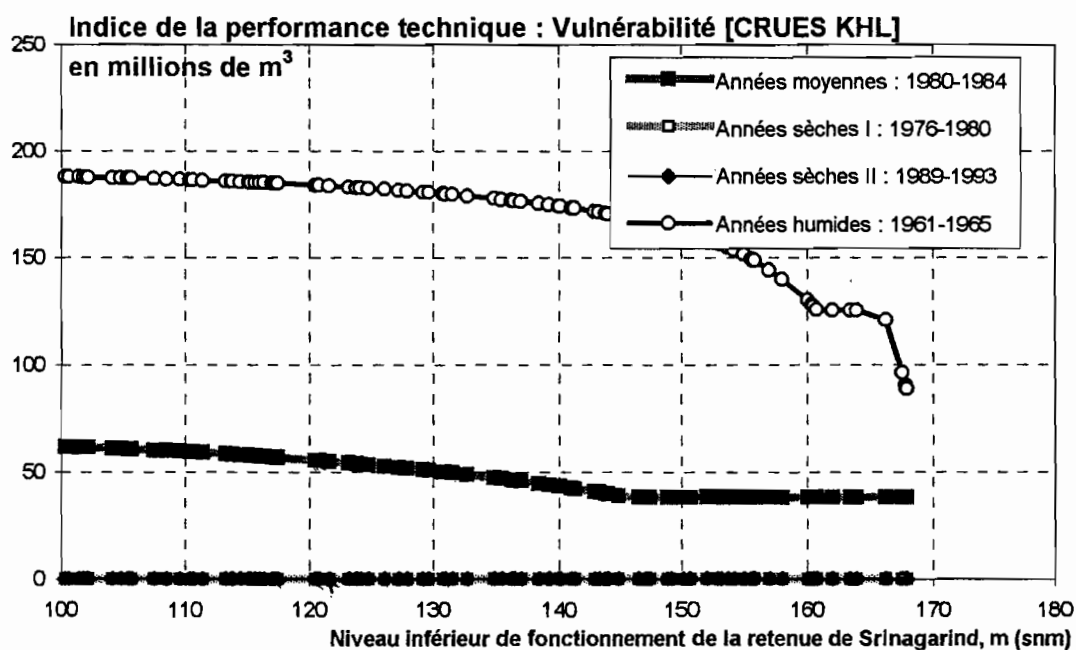
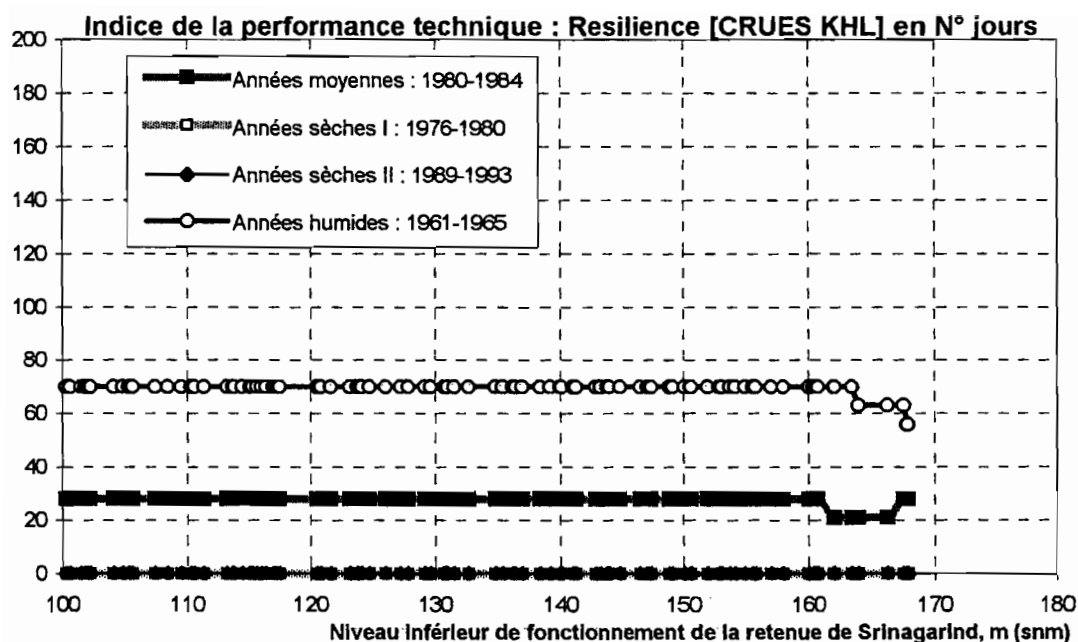












KOSITSAKULCHAI, Ekasit, 2001, *Modélisation de la dynamique de l'hydrosystème du bassin du Mae Klong (Thaïlande) : une esquisse de système interactif d'aide à la décision pour la gestion de l'eau*. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc (USTL).

Résumé : La modélisation de la gestion intégrée de la ressource en eau dans le bassin versant du Mae Klong (31 000 km²) s'appuie sur l'approche systémique. La variabilité de la ressource et l'intensification des usages (production hydroélectrique, irrigation, alimentation en eau potable, protection contre les intrusions salines, tourisme écologique) incitent à une gestion prudente des hydrosystèmes aménagés. Pour aborder des conditions dynamiques complexes, les modèles de simulation qui prennent en compte des règles de gestion parfaitement définies jouent un rôle crucial. L'analyse systémique, d'une part, et l'outil de modélisation Vensim®, basé sur les méthodes de Dynamique des Systèmes, d'autre part, constituent des moyens d'analyse et de représentation des systèmes complexes. Deux types de modèles sont mis en œuvre : un modèle pluie-débit pour estimer les ressources en eau en plusieurs points de contrôle du bassin versant et un modèle de décision intégrant la conduite opérationnelle des ouvrages, les contraintes réglementaires et l'évaluation économique.

Mots clés : Gestion intégrée de l'eau – Modélisation du bassin versant – Analyse systémique – Dynamique des Systèmes – Simulation

KOSITSAKULCHAI, Ekasit, 2001, *Modeling of hydrosystem dynamics of Mae Klong river basin, Thailand: a prototype of decision support system for water management*. University of Montpellier II - Sciences and Techniques of Languedoc.

Abstract : Modeling of integrated water resources management of Mae Klong river basin (31 000 km²) is based on the system approach. The variability of water resource and the increasing competition of water uses (irrigation, hydropower, urban water supply, seawater intrusion protection, and recreation) entail a cautious water management in highly developed hydrosystems. In order to tackle such a complex dynamical situation, simulation models that take into consideration existing management rules play a crucial role. The system thinking coupling with System Dynamics modeling tool, Vensim®, offer double advantages in helping to learn and to represent complex systems. Firstly, a lumped rainfall-runoff model was developed in order to evaluate inflows at various control points in the basin. Moreover, an water management decision model was elaborated. The latter model incorporates technical aspects of multi-purpose multi-reservoir operation, governing rules and economic evaluation.

Keywords : Integrated water resources management – River basin modeling – System Analysis – System Dynamics – Simulation