

# Application des méthodes de la dynamique des systèmes à la gestion intégrée des ressources en eau

Exemple du bassin versant  
du Mae Klong (Thaïlande)

**Ekasit Kositsakulchai**  
Hydrologue

**Pierre Chevallier**  
Hydrologue

**François Molle**  
Hydro-agronome

**Patrick Le Goulven**  
Hydrologue

**François Valette**  
Modélisateur

**Eric Cadier**  
Hydrologue

**Alain Dezetter**  
Hydrologue

Les ressources en eau continentale de la planète sont limitées et inégalement réparties. Les pays émergents ou en développement sont, plus encore que les pays industrialisés, confrontés à une demande d'usages multiples de cette ressource qui, d'une part, implique la mise en place de procédures réglementaires ou

conventionnelles entre les usagers et, d'autre part, s'exprime de plus en plus en termes de valorisation économique (Bogardi, 1994 ; Kundzewicz, 1997). L'utilisation de la modélisation des systèmes complexes facilite l'approche de ces questions. Parmi les outils développés dans ce domaine, les méthodes de la dynamique des systèmes (de Rosnay, 1975 ; Forrester, 1981 ; Aracil, 1984) apportent des solutions particulièrement intéressantes et adaptées à la gestion des hydro-aménagements.

L'étude présentée ici est réalisée dans le cadre d'un programme mené en partenariat entre l'IRD et l'université Kasetsart de Bangkok (Doras Project, 1996). Elle concerne le bassin versant du Mae Klong (31 000 km<sup>2</sup>) qui borde la façade centre-ouest du pays (fig. 1). Formé de deux rivières, la Khwae Yai (14 200 km<sup>2</sup>) et la Khwae Noi (12 800 km<sup>2</sup>) qui traversent une région de petites montagnes calcaires, le Mae Klong entre au niveau de la confluence dans la plaine de Bangkok où il est parallèle à deux autres fleuves importants, le Tha Chin et le Chao Phraya, ce dernier traversant l'agglomération urbaine de la capitale. Ces trois fleuves sont essentiels pour le développement agricole et économique de la Thaïlande et seul le Mae Klong offre encore une ressource excédentaire par rapport à la demande des usagers (Kositsakulchai, 1997 ; Kositsakulchai *et al.*, 1999).

## ■ Le bassin du Mae Klong

### *Ressources en eau et usages*

Le bassin du Mae Klong se trouve dans une région de savane tropicale soumise à un climat de mousson dans lequel on distingue trois saisons : une saison humide de mai à octobre, une saison sèche et fraîche de novembre à janvier, et une saison sèche et chaude de février à avril (fig. 2). La distribution spatiale des précipitations offre un fort gradient spatial des reliefs du nord-ouest (plus de 4 000 mm annuel) vers les plaines proches de la mer au sud-est (un peu moins de 1 000 mm). Ces précipitations sont soumises à une assez grande variabilité interannuelle. Les écoulements de surface présentent une forte alternance avec 90 % du volume écoulé entre juin et novembre. Mais il faut compter

aussi avec un important emmagasinement dans les nappes souterraines, tant dans les montagnes qui présentent des réservoirs karstiques que dans la plaine inondable de l'aval.

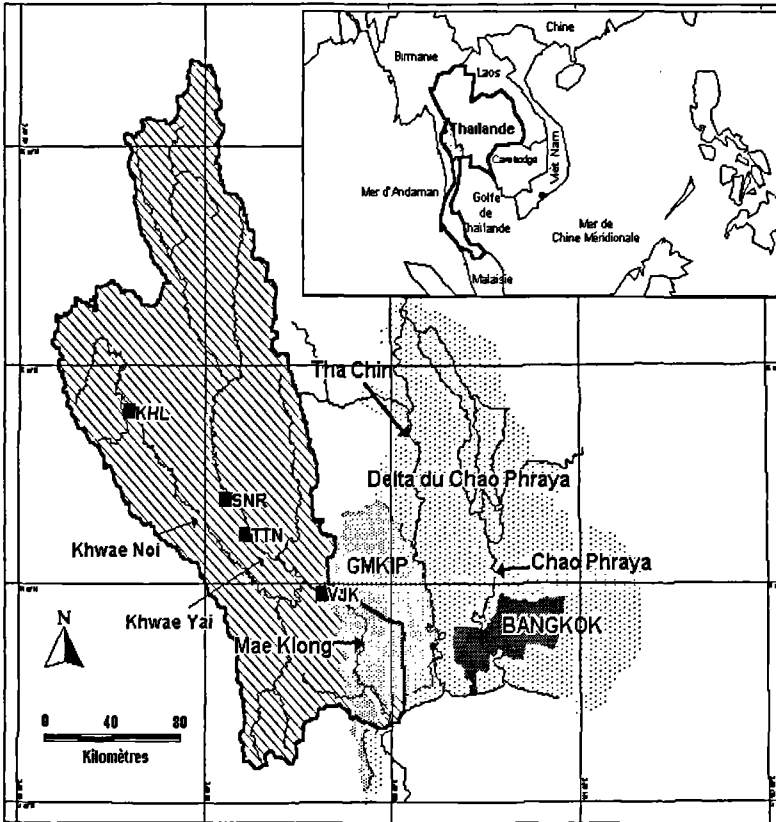


Figure 1

Bassin versant du Mae Klong et carte de situation.

GMKIP : *Greater Mae Klong Irrigation Project* ;

KHL : réservoir de Khao Leam ; SNR : réservoir

de Srinagarind ; TTN : barrage régulateur de Tha Thung Na ;

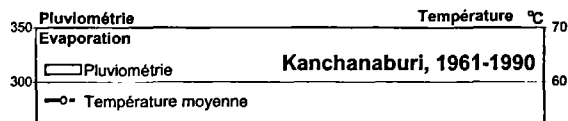
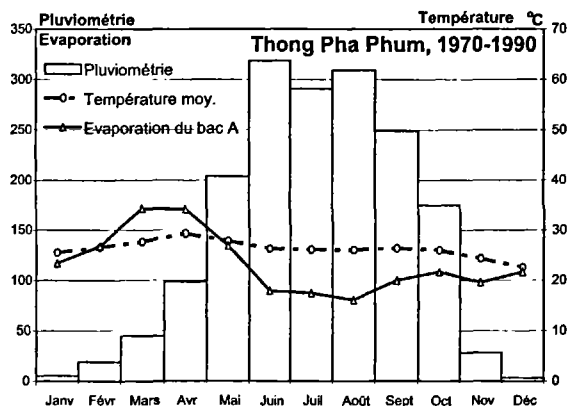
VJK : barrage de dérivation de Vajiralongkom

On note cinq grandes catégories d'usages :

– la *production hydroélectrique* : deux grandes unités de production électrique sont installées sur les deux branches du fleuve dans la zone montagneuse : Khao Leam à l'Ouest et le

ont un volume total de 22 milliards de mètres cubes pour une puissance installée de 1,0 GW et une production moyenne annuelle de 1,7 TWh ;

– *l'irrigation* : un ouvrage de dérivation construit à Vajiralongkorn à l'entrée de la plaine d'irrigation permet d'irriguer une surface agricole supérieure à 300 000 ha dans le bassin du Mae Klong ("Greater Mae Klong irrigation project", fig. 1) et de détourner des débits vers le bassin voisin déficitaire du Tha Chin ;



– *l'alimentation en eau potable* : l'accroissement de la population et de la demande de la zone métropolitaine de Bangkok a pour conséquence une demande en eau potable toujours plus abondante à laquelle les bassins du Chao Phraya et du Ta Chin ne peuvent plus répondre ; il est prévu que les prélèvements sur le Mae Klong augmentent progressivement dans les 12 prochaines années pour passer d'environ  $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  à  $45 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  ;

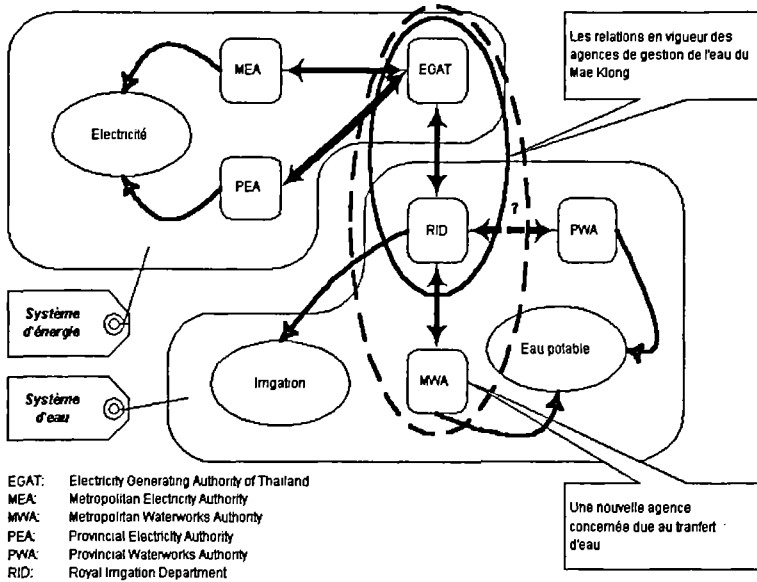
– *la protection contre les intrusions salines marines* : la région toute proche de la mer est la région économiquement la plus riche du bassin du Mae Klong. Equipée dès le début du 20<sup>e</sup> siècle d'un réseau d'irrigation dense, il s'y est développé une riche agriculture de vergers et de maraîchage qu'on ne peut préserver qu'en maintenant un débit réservé dans le fleuve d'environ  $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  afin d'empêcher les intrusions d'eau de mer ;

– *le tourisme et la préservation environnementale* : enfin le bassin du Mae Klong renferme un certain nombre d'attractions touristiques et fait l'objet d'opérations de tourisme écologique qui perdraient beaucoup de leur intérêt si on ne préservait pas la ressource en eau.

Ainsi les ressources en eau du Mae Klong comme celles de tous les cours d'eau de Thaïlande sont largement exploitées. Par exemple, au niveau du barrage de dérivation de Vajiralongkorn (noté VJK sur la carte de la figure 1), le débit réservé est de  $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , et il y a compétition toute l'année entre les lâchures turbinées (pour la production hydroélectrique) et les besoins des usages agricoles. La distribution mensuelle des usages de l'eau arrivant au barrage montre que la marge de manœuvre est particulièrement faible en début d'année. Or la demande pour l'alimentation en eau potable est encore négligeable sur la période considérée, mais deviendra vite une contrainte importante dans les années à venir.

## *L'interaction entre les opérateurs*

Pour répondre à ces différentes demandes, plusieurs opérateurs interviennent, avec des intérêts parfois divergents. On peut y différencier deux sous-systèmes : un système d'énergie où l'Egat (*Agence nationale de production d'électricité de Thaïlande*) joue le rôle central et un système d'eau piloté par le RID (*Département royal de l'irrigation*) et par les agences provinciales et métropolitaine de l'eau potable (fig. 3).



**Figure 3**  
 Les principaux opérateurs des systèmes d'eau et d'énergie dans le bassin du Mae Klong.

La principale question que ces diverses agences doivent résoudre mutuellement, est de minimiser les conflits qui pourraient résulter de désaccords sur la distribution de la ressource en eau en tenant compte du facteur économique.

Il s'agit à la fois de contrôler les retenues d'eau et les lâchers des barrages pour satisfaire une production électrique tout au long de l'année et d'assurer l'irrigation des cultures dans les périmètres irrigués, plus particulièrement au cours de la saison sèche. L'ensemble de ces opérations doit tenir compte des contraintes de débits réservés et d'une préfiguration de l'augmentation des prélèvements pour l'alimentation en eau potable de Bangkok.

Cependant, on note déjà que l'agriculture est devenue largement prioritaire sur la production électrique dans le bassin déficitaire en eau du Chao Phraya, où la marge de manœuvre d'Egat est dès maintenant pratiquement nulle.

## Modélisation pour la gestion intégrée des ressources en eau

Le cadre de modélisation qui émerge de cet ensemble complexe doit être abordé en deux étapes successives : d'abord, l'évaluation de la ressource en eau de surface disponible, puis le schéma de gestion de cette ressource en fonction de la demande des divers opérateurs intervenant sur le bassin.

### *Ressource en eau de surface*

La ressource en eau de surface dépend à la fois de l'aléa climatique (principalement des précipitations) et de la nature du milieu récepteur. Les données disponibles sur le bassin versant du Mae Klong sont assez sommaires (très peu de postes d'observation compte-tenu de la surface).

Aussi c'est sur un modèle pluie-débit simple et robuste que le choix s'est porté : une version adaptée au pas de temps hebdomadaire du modèle GR3 développé par le Cemagref (Edijatno et Michel, 1989 ; Edijatno *et al.*, 1999). Le modèle original journalier porte le nom de GR3J ; par analogie, nous avons appelé la version modifiée hebdomadaire GR3S.

Pour mieux tenir compte des données disponibles (postes pluviométriques et stations hydrométriques de contrôle) et des caractéristiques particulières de chaque zone, le modèle a été calé sur six sous-bassins du bassin principal du Mae Klong et les débits résultants, étendus par extrapolation aux dix sous bassins couvrant la totalité de la zone étudiée, ont été combinés entre eux (fig. 4).

Pour être cohérent avec la plateforme de modélisation adoptée dans la suite, le modèle a été réécrit dans l'environnement Vensim® utilisant la dynamique des systèmes. Au regard de la qualité des données de base, on peut considérer que le résultat obtenu après calage est satisfaisant (fig. 5).

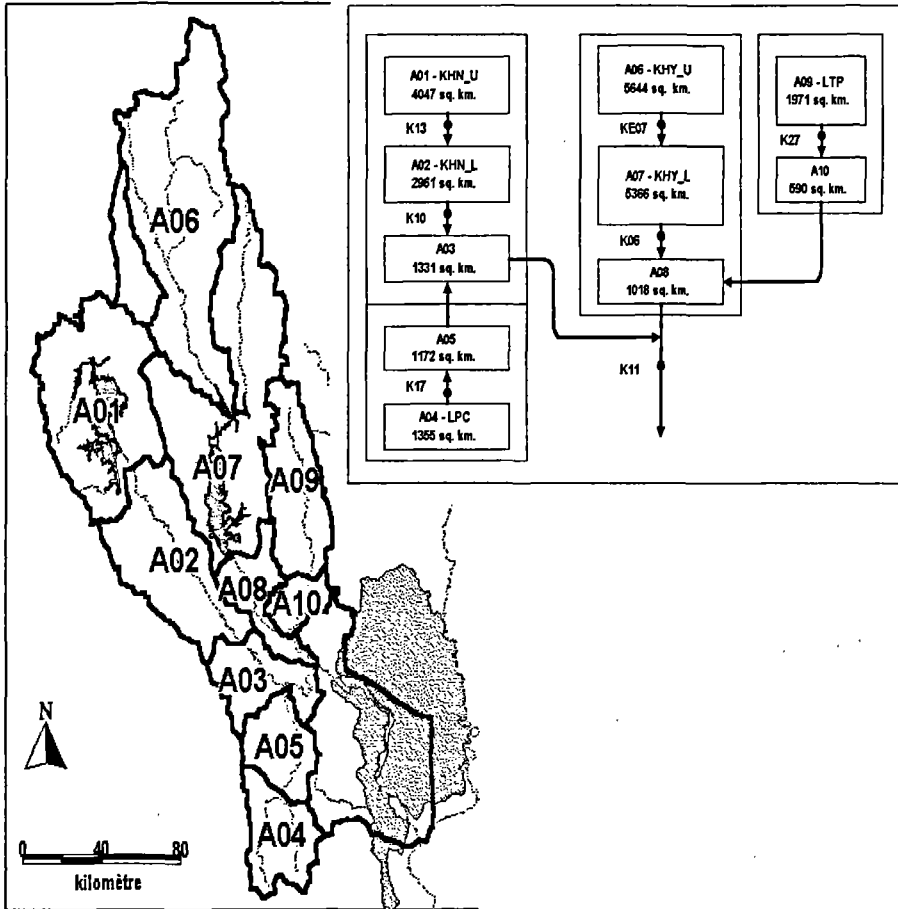


Figure 4

Découpage en sous-bassins du bassin versant du Mae Klong pour l'application du modèle global GR3S.

### Modèle de gestion d'un système aménagé

Pour représenter l'ensemble des flux dans l'hydrosystème aménagé du bassin du Mae Klong, les outils offerts par les méthodes de la dynamique des systèmes sont particulièrement intéressants (Graham *et al.*, 1986 ; Lee, 1993). La plateforme du logiciel commercial Vensim® (Ventana Systems, 1997) a été utilisée.



La figure 5 montre un exemple de représentation simplifiée dans le grapheur proposé par le logiciel.

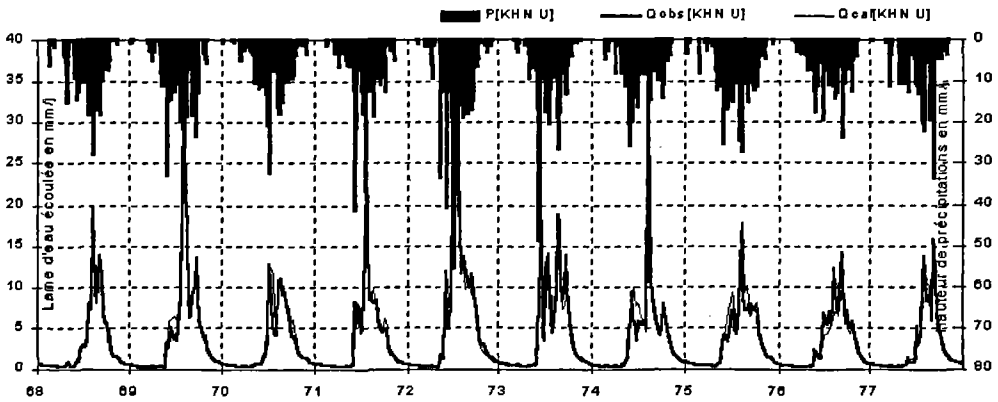
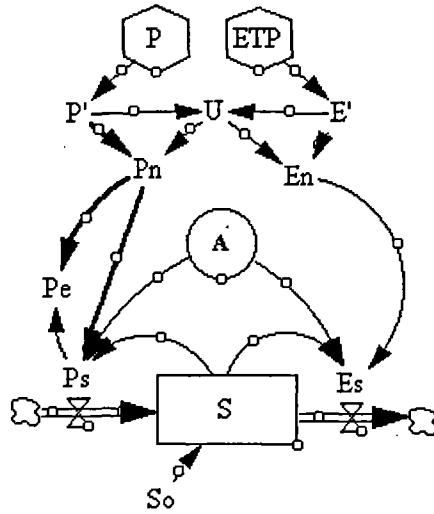


Figure 5  
 Représentation graphique dans le schéma Vensim®  
 et résultats sur le bassin de la retenue de Khao Leam :  
 comparaison débits observés / débits calculés  
 sur la période 1968-1977.

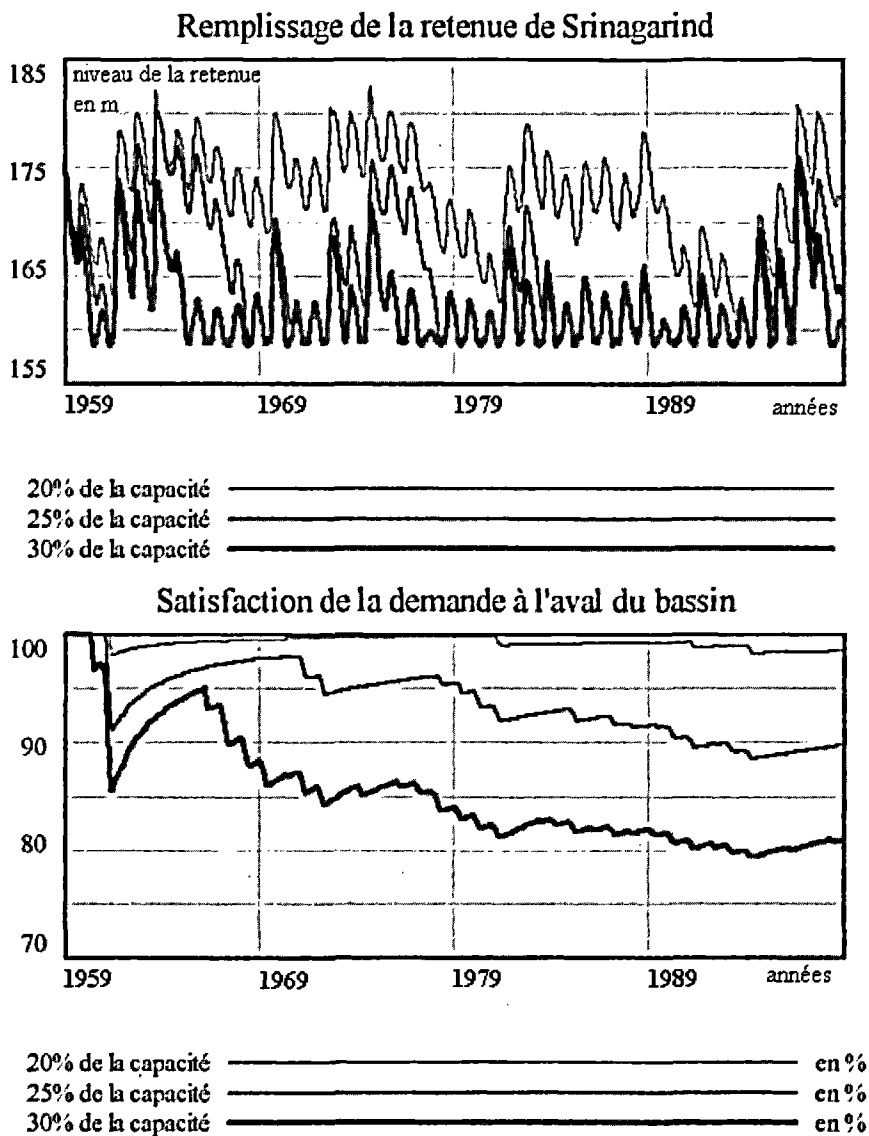
La représentation complète d'un système tel que le Mae Klong est complexe : elle a fait l'objet d'une thèse de doctorat (Kositsakulchai, 2001). Cette représentation rassemble et fait varier au cours du temps, d'une part, l'ensemble des flux d'eau de surface qui dépendent des conditions climatiques et 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 (Egat et Rid). Le pas de temps de la semaine a été choisi comme étant celui qui correspond à la planification la plus fine des opérateurs électriques et agricoles.

### *Exemple de simulation*

A titre d'exemple, et parmi les très nombreuses possibilités offertes par un tel outil, la figure 6 propose le résultat d'une simulation choisie pour optimiser la gestion de la retenue de Srinagarind (voir fig. 1) sous certaines conditions, en montrant les conséquences que cela peut avoir sur la demande agricole dans les périmètres irrigués à l'aval. Les données utilisées pour le forçage climatique correspondent à la période 1959-1998.

Si l'opérateur utilise la retenue en se limitant à une production électrique moyenne sur l'année correspondant à 20 % de la capacité installée de l'usine hydroélectrique, le niveau de l'eau ne passe jamais en dessous de la cote critique de 159 m et on peut considérer que la satisfaction des besoins agricoles est toujours garantie. Si l'opérateur force un peu plus la production en imposant une production électrique égale à 30 % de la capacité de l'usine tout en faisant en sorte que le niveau de la retenue reste encore au-dessus de la cote critique de 159 m, on s'aperçoit qu'avec le temps le taux de satisfaction de la demande agricole se stabilise autour de 80 %.

Le décideur peut ensuite traduire ces simulations en coût économique en faisant, par exemple, la part des apports liés à la vente d'électricité et celle du manque à gagner qui résulte d'une limitation de la production agricole. Dans la réalité, l'analyse devrait également tenir compte des pressions politiques et culturelles, locales, régionales et nationales.



■ Figure 6  
Remplissage de la retenue de Srinagarind  
sous diverses options de production électrique  
et satisfaction de la demande agricole sous les mêmes hypothèses  
(calculs effectués sur la base des précipitations  
de la période 1959-1998).

## Conclusion

Cette présentation brève de quelques résultats d'un travail plus important vise surtout à mettre en évidence les avancées suivantes :

- la modélisation de la ressource en eau de surface avec un modèle pluie-débit semi-global est satisfaisante au pas de temps hebdomadaire ;
- le modèle de gestion développé a su prendre en compte les différentes contraintes dues à la fois aux modes opérationnels des aménagements, mais aussi aux réglementations et aux impératifs économiques ;
- les méthodes de la dynamique des systèmes (en l'occurrence ici le langage Vensim®) sont bien adaptées à la résolution de ce type de problème et offrent une remarquable souplesse d'exécution permettant de faire évoluer l'instrument de modélisation pour résoudre de nouvelles questions.

Il faut cependant noter que le produit développé n'est pas encore un système d'aide à la décision destiné à un usage opérationnel, mais plutôt un outil de recherche destiné à tester différents scénarios de développement.

Néanmoins, on peut penser qu'un outil de gestion dérivé de la réflexion conduite par les scientifiques pourrait être mis en œuvre auprès des opérateurs de l'eau pour les aider à optimiser les interactions entre le « système énergétique » (production électrique) et le « système eau » (irrigation, alimentation en eau potable), tout en respectant des contraintes réglementaires de débits réservés à des fins économiques, environnementales ou touristiques.

## Bibliographie

- Aracil J., 1984 – *Introduction à la dynamique des systèmes*. Lyon, Presses Universitaires de Lyon, coll. Science des systèmes, 414 p.
- Bogardi J. J., 1994 – "The concept of integrated water resources management as a decision making problem". In Bogardi J. J., Nachtnebel H. P. (éd.): *Multicriteria decision analysis in water resources management*, Unesco, Paris, International hydrological programme (PHI) : 9-22.
- Doras project, 1996 – *Agricultural and irrigation patterns in the Central plain of Thailand : preliminary analysis and prospects for agricultural development*. Bangkok, 224 p.
- Edijatno, Oliveira Nascimento N. (de), Yang X., Makhlof Z., Michel C., 1999 – GR3J : a daily watershed model with three free parameters. *Hydrological Sciences Journal*, 44 (2) : 263-277.
- Edijatno, Michel C., 1989 – Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche*, (2) : 113-121.
- Forrester J. W., 1968 – *Principles of systems*. Cambridge, Massachusetts, Whright-Allen Press Inc., coll. Text and Workbook, chapters 1 through 10.
- Graham L. P., Labadie J. W., Hutchinson I. P. G., Ferguson K. A., 1986 – Allocation of augmented water supply under a priority water rights system. *Water Resources Research*, 22 (7) : 1083-1094.
- Kositsakulchai E., 1997 – *Diagnostic de l'allocation de la ressource en eau au niveau du bassin du Mae Klong, Thaïlande : analyse et modélisation*. Mémoire DEA, ENGREF, 133 p.
- Kositsakulchai E., 2001 – *Modélisation intégrée de l'hydrosystème du Mae Klong - Thaïlande*. Thèse doct., Sciences, univ. Montpellier-II.
- Kositsakulchai E., Kumnuansilp U., Molle F., Chevallier P., 1999 – Analysis of water and power management of the Mae Klong River basin. A regional management analysis within a national scope. *Engineering Journal Kasetsart*, 37 (13) : 67-85.
- Kundzewicz Z., 1997 – Water resources for sustainable development. *Hydrological Sciences Journal*, 42 (4) : 467-480.
- Lee J., 1993 – A formal approach to hydrological model conceptualization. *Hydrological Sciences Journal*, 38 (5) : 391-401.
- Rosnay J. (de), 1975 – *Le macroscope. Vers une vision globale*. Paris, Le Seuil, coll. Points Essais, 80, 315 p.
- Ventana Systems Inc., 1997 – *Vensim - Ventana simulation environment*. Belmont, Massachusetts, Ventana.