

# Un environnement de modélisation pour tester l'allocation de ressources en eau

## HyD2002 et ses applications

Jean-Christophe POUGET\*, Francesc BELLAUBI\*\*, Aurélien DE SA\*\*\*, Zaigham HABIB\*\*\*\*, Patrick LE GOULVEN\*

\*Unité DIVHA, IRD / MSE Montpellier, [www.mpl.ird.fr/hydrologie/divha](http://www.mpl.ird.fr/hydrologie/divha)

\*\*En Master IAM-Montpellier auprès de l'IWMI,

\*\*\*Société d'ingénierie pour l'eau et l'environnement – Montpellier

\*\*\*\*Consultante indépendante au Pakistan, en thèse avec le CIRAD et le Cemagref, Pakistan

**Résumé** — Le développement de méthodes et d'outils pour l'aide à la gestion et la planification des ressources en eau est un projet fondateur de l'unité DIVHA. L'environnement de modélisation actuel, HyD2002, voulu très générique, permet de représenter différents types d'aménagements et de simuler divers modes d'allocation en présence d'usages et de règles multiples. Nous présenterons le principe de conception à partir d'un exemple d'aménagements à buts multiples dans le sud de la France. Nous détaillerons les divers modes de gestion pouvant être simulé. Le modèle de base d'HyD2002 permet de simuler l'application de consignes de gestion sur de longues chroniques d'apports, considérées comme représentatives de l'aléa hydrologique. L'évaluation se fait a posteriori par une analyse intensité-durée-fréquence des écarts par rapport aux objectifs. Les consignes de gestion sont ainsi testées par de nombreuses simulations. Afin de réduire ces tâtonnements, il apparaît séduisant d'avoir recours à l'optimisation numérique. Mais les limitations sont nombreuses et la simulation reste essentielle pour évaluer les gains réels dans une gestion opérationnelle. Différentes applications de l'outil sont présentées : aide à la planification des eaux en Guadeloupe, réhabilitation de l'alimentation en eau du château de Versailles, tests de diverses allocations des ressources dans le bassin de l'Indus au Pakistan et dans le bassin du Walawe au Sri Lanka. Différentes évolutions de l'outil, au niveau des modèles d'allocation, et au niveau de la nécessaire collaboration avec des modèles d'offre et de demande, sont envisagées afin de faciliter l'analyse de l'équité et de la viabilité d'alternatives de gestion.

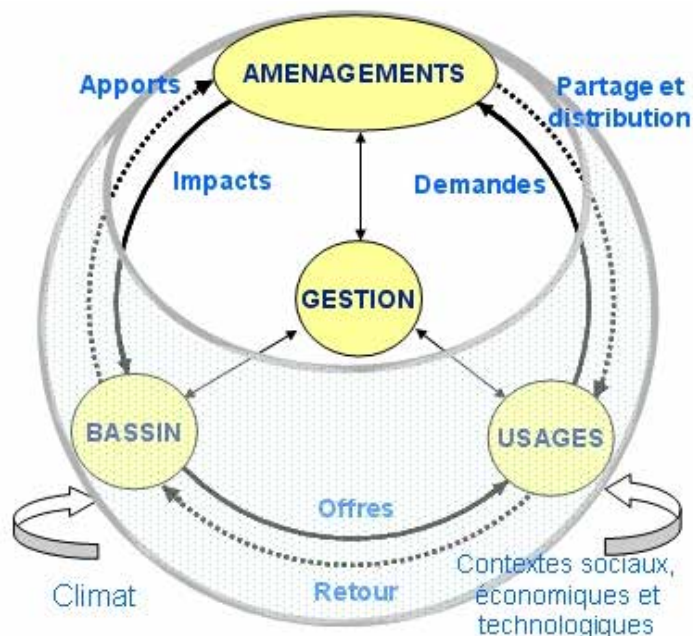
**Abstract** — **A modeling environment to test the water resources allocation.** The development of methods and tools to support water resources planning and management decisions is a core project of the DIVHA laboratory. The current modeling environment, HyD2002 makes it possible to represent various types of water projects and to simulate various operation modes to serve a variety of interests or purposes. The principle of design is presented with an example of a multiple-purpose project in the south of France. The various modes of management simulation are detailed. The basic model of HyD2002 can simulate the application of management rules on long chronicles of inflows, regarded as representative of the hydrological risk. The performances evaluation is done a posteriori by a reliability-vulnerability-flexibility analysis of the result variations compared to the objectives. The management rules are tested by many simulations. In order to reduce this investigation phase, it appears tempting to use numerical optimization. But the limitations are numerous and simulation remains essential to evaluate the real profits in an operational management. A number of applications of the tool are presented : water resources planning in Guadeloupe, rehabilitation of the water supply of the Versailles castle, tests of various resources allocations in the Indus basin in Pakistan and in the Walawe basin in Sri Lanka. Several evolutions, relative to allocation models, and on the necessary collaboration with offer and demand models, are expected in order to facilitate the analysis of equity and viability of management alternatives.

## Introduction

Dans la gestion des ressources en eau, on peut identifier 3 composantes (figure 1) :

- le bassin, c'est le milieu qui conditionne l'offre en eau avec sa variabilité spatio-temporelle ;
- les usages, ce sont les sociétés qui conditionnent les demandes en eau et leur priorité ;
- les aménagements, ce sont les ouvrages destinés à mobiliser et partager la ressource.

La gestion tient une position centrale car elle recouvre différents aspects : techniques, réglementaires, économiques, participatifs qui peuvent porter sur les 3 composantes.



**Figure 1.** Les composantes de la gestion des ressources en eau.

Les modèles d'allocation des ressources en eau mettent l'accent sur la composante *Aménagements*. Ces modèles traitent de la confrontation offre-demande et du partage des ressources en eau au niveau régional, sur un ou plusieurs bassins versants. Les systèmes considérés sont constitués d'éléments de stockage (superficiels et souterrains), de captage, de transport (naturels et artificiels), d'utilisation et de consommation d'eau.

Les modèles d'allocation sont utilisés comme outils d'aide à :

- la planification des aménagements, à savoir la définition des ouvrages à réaliser pour répondre aux divers besoins constatés ou prévus, et de l'échéancier dans le temps des réalisations ;
- la gestion opérationnelle, à savoir le réglage du fonctionnement des ouvrages afin de satisfaire les objectifs du système en place.

L'environnement de modélisation HyD2002 a été développé au sein de l'unité DIVHA (Dynamiques, impacts et valorisation des hydro-aménagements) afin de représenter différents types d'aménagements et de tester divers modes d'allocation. Nous présentons d'abord les bases de la représentation et de la simulation dans cet environnement. Différentes applications de l'outil sont ensuite exposées. Nous concluons par les différentes évolutions envisagées.

## Les bases de l'environnement de modélisation

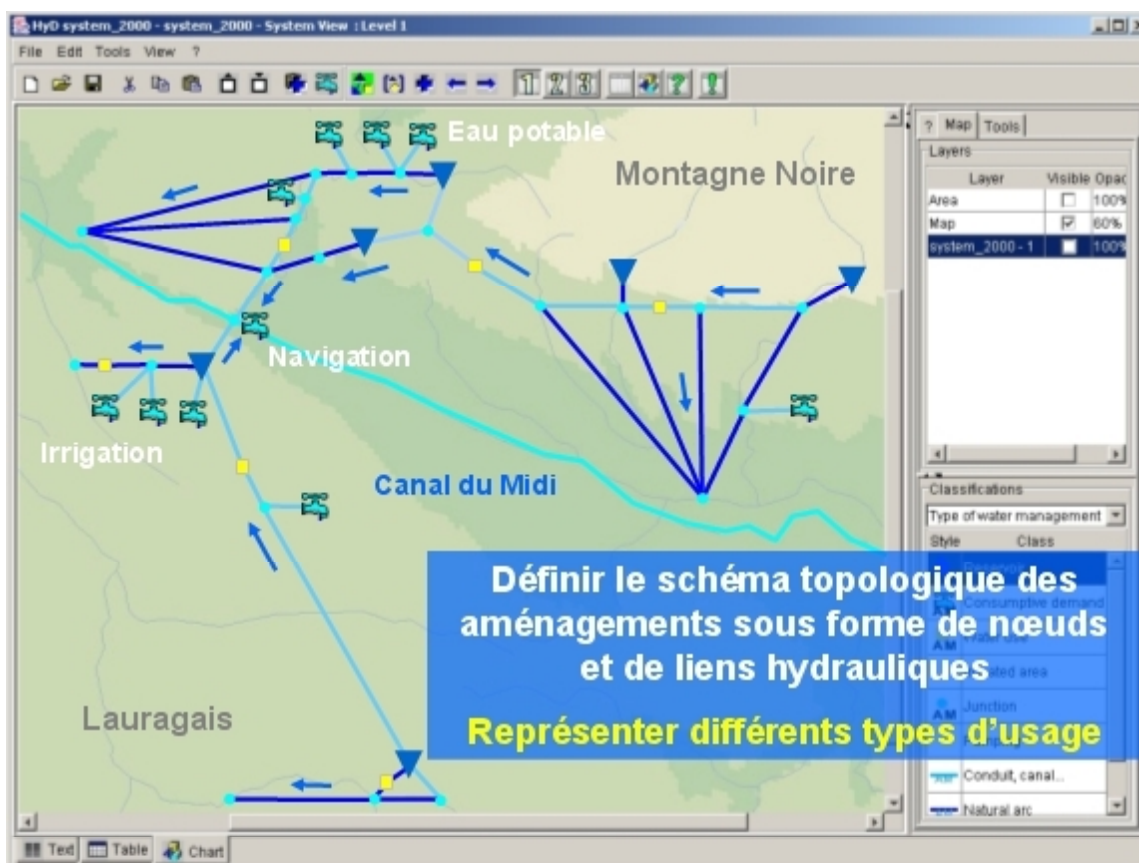
### Représenter différents types d'aménagements

Considérons un premier exemple avec des aménagements étudiés dans le cadre du projet européen WARSYP (Pouget *et al.*, 2001). Le projet est situé dans le sud ouest de la France entre la Montagne Noire et les pieds des Pyrénées, sur la ligne de partage des eaux entre l'océan atlantique et la méditerranée. L'aménagement de cette zone a débuté au XVII<sup>e</sup> siècle afin d'alimenter le canal du Midi en mobilisant l'eau de la Montagne Noire.

Actuellement, les aménagements comprennent 6 réservoirs (Saint Ferréol 6,4 hm<sup>3</sup>, Lampy 1,7 hm<sup>3</sup>, Cammazes 18,8 hm<sup>3</sup>, Ganguise 24,7 hm<sup>3</sup>, Montbel 60 hm<sup>3</sup>, Galaube 8 hm<sup>3</sup>) et des connexions inter-bassins au niveau du seuil de Naurouze. Ces aménagements servent à l'alimentation en eau potable, à l'irrigation, aux loisirs, à la navigation sur le Canal du Midi, au maintien de débits réservés dans les cours d'eau. Les besoins urbains et industriels couvrent 45 millions de m<sup>3</sup> par an. Les projets prévoient l'extension de la zone irriguée (3 000 ha par an) et l'augmentation de la desserte en eau potable (2 hm<sup>3</sup> par an).

Ces aménagements sont modélisés par l'ajout successif de différents composants. Le schéma topologique du système est ainsi défini par :

- des nœuds : *réservoirs*, *demandes consommatrices* pour les besoins en eau potable, agricoles et de navigation, *demandes non-consommatrices* afin de représenter certains soutiens d'étiage, *jonctions* pour les apports, confluences, captages d'eau, etc ;
- des liens hydrauliques : *arcs de surface* pour les canaux, les conduites, *arcs naturels* pour les biefs de rivière.



**Figure 2.** Système Montagne Noire - Lauragais.

Tous ces objets sont décrits par leurs caractéristiques structurales (courbe de remplissage de réservoir, capacité de transit, etc) et des propriétés de gestion qui représentent notamment des objectifs à satisfaire (niveau objectif de réservoir, priorités de demandes, etc.).

## Simuler divers modes de gestion

### Les objectifs à satisfaire

Considérons un exemple très simple afin d'illustrer les objectifs à satisfaire (figure 3). Différentes demandes sont représentées avec une hiérarchisation des priorités de desserte entre les besoins. Une demande peut être découpée en plusieurs niveaux de priorité. Ainsi la desserte de 90 % de la *Demande consommation 1*, qui pourrait être de l'eau potable, est définie comme hautement prioritaire, les 10 % restant l'étant beaucoup moins. Ces priorités sont bien sûr toute relatives.

Au niveau du réservoir, différentes zones de gestion peuvent être identifiées : une zone haute que l'on veut conserver vide pour l'amortissement des crues, une zone de fonctionnement normal, une zone de restriction sur les demandes desservies. Suivant la zone, l'excédent, ou le déficit de volume d'eau par rapport à un stockage objectif est considéré comme plus ou moins pénalisant au bon fonctionnement du système.

Une décision de gestion d'un réservoir va influencer sur la satisfaction des objectifs dans le futur, sur un horizon de plusieurs mois à plusieurs années suivant la taille des réserves. Il faut prendre en compte la variabilité hydrologique pour régler les consignes de gestion des aménagements.

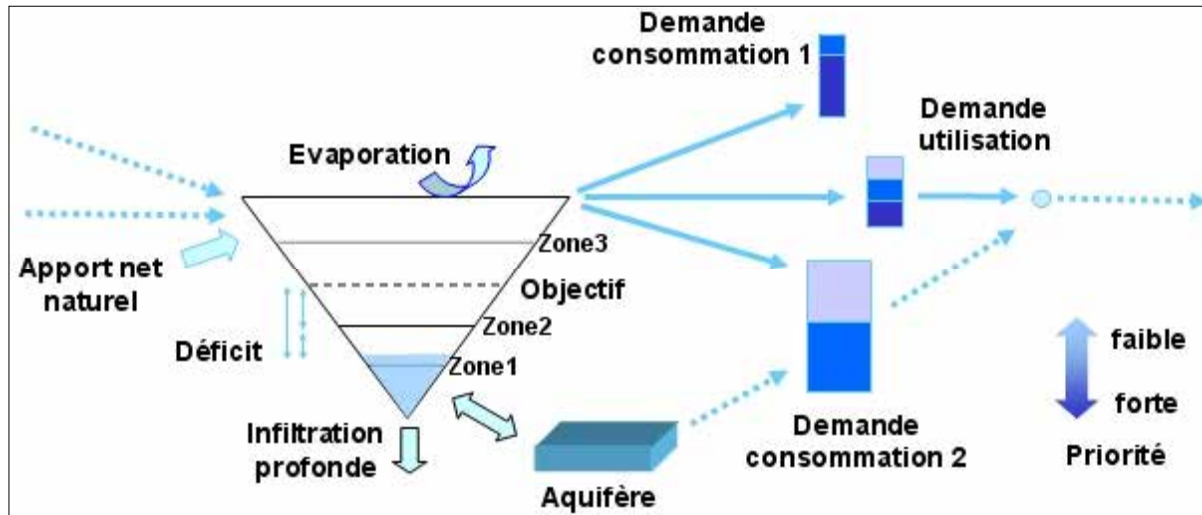


Figure 3. Un exemple très simple.

### Simulation du fonctionnement

HyD2002 permet de simuler et tester l'application de consignes de gestion sur de longues chroniques d'apports, considérées comme représentatives de l'aléa hydrologique. La vérification des objectifs se fait a posteriori. Les consignes de gestion vont être modifiées, au fur et à mesure des simulations, pour améliorer ou positionner la satisfaction des objectifs. Le mode de décision employé, pas de temps par pas de temps, s'apparente à une simulation de la gestion tactique des aménagements. Les simulations peuvent s'effectuer au pas de temps mensuel, décadaire ou journalier suivant le but de l'étude et les données disponibles.

Il existe d'autres environnements d'aide à l'allocation des ressources en eau : MODSIM (Labadie *et al.*, 2001), MikeBasin ([www.dhisoftware.com/mikebasin](http://www.dhisoftware.com/mikebasin)), Ribasim ([www.wldelft.nl/soft/ribasim](http://www.wldelft.nl/soft/ribasim)), Aquatool ([www.upv.es/aquatool](http://www.upv.es/aquatool)), etc. Ces environnements génériques diffèrent par les possibilités de représentation, en terme de type d'objets et de consignes de gestion, et par les algorithmes de calcul utilisés dans les modèles. Ces calculs reposent tous sur le principe de la conservation des volumes et de respect des contraintes de transit, mais ils peuvent faire appel ou non à de l'optimisation numérique pour la prise en compte des priorités de gestion.

Les types d'objets proposés par HyD2002 sont représentés sur le diagramme de la figure 4. L'environnement possède un modèle de base qui n'a pas recours à des algorithmes d'optimisation. L'idée de l'environnement, comme nous le verrons dans le paragraphe *Utilisation de l'optimisation*, est de pouvoir utiliser et ainsi tester des modes d'allocation plus complexes.

Le principe du modèle de base d'HyD2002 repose sur l'identification de 2 types d'objets flux dans les liens hydrauliques : un objet *flux\_ressources* constitué à partir de la liste des parts de ressources mobilisées qui transitent dans cet arc, un objet *flux\_demandes* constitué à partir de la liste, triée par priorité, de fractions de demandes alimentées par ce lien. Ces objets *flux\_demandes* permettent de faire "remonter" les demandes à satisfaire sur les ressources de manière dynamique. Le calcul consiste à parcourir le réseau d'amont vers l'aval en définissant les *flux\_ressources*, qui donnent alors les flux effectivement desservis, à partir des *flux\_demandes* et dans le respect de contraintes physiques (conservation des volumes, limite de transit, etc) et de gestion (priorités des demandes, consignes de remplissage des réservoirs, etc) liées aux objets traités.

Les consignes de gestion considérées sont plus ou moins complexes suivant les systèmes étudiés et la finalité de leur étude. Les applications présentées par la suite illustrent les multiples possibilités de représentation.

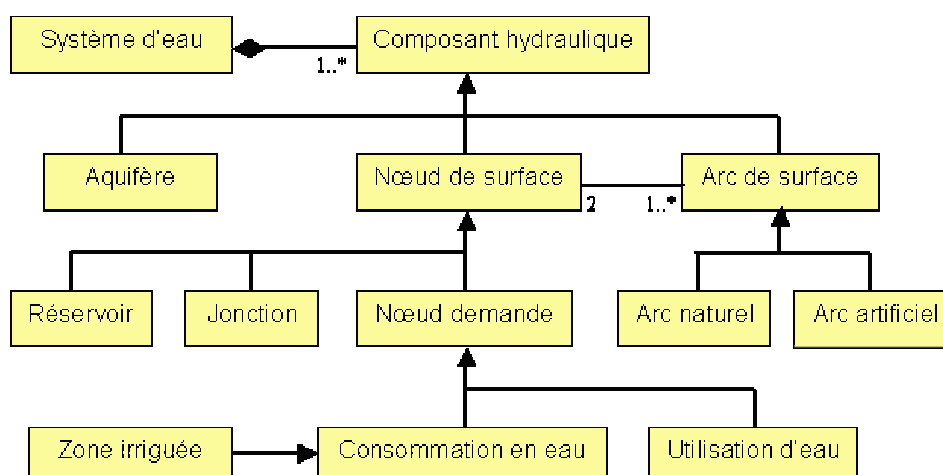


Figure 4. Types d'objets dans Hyd2002.

### Utilisation de l'optimisation

L'optimisation numérique vise à minimiser une fonction objectif sous la contrainte du respect des équations qui garantissent la conservation de la masse à tous les nœuds et la limitation de transit dans tous les arcs. La fonction objectif est une équation correspondant à la somme de termes relatifs aux déviations (déficits ou excédents) par rapport à des niveaux objectifs (courbe objectif d'un réservoir, niveaux de demandes en eau, etc), déviations pondérées par un coefficient de pénalité (ou de coût). Les coefficients de pénalités représentent les ordres de priorité relatifs.

L'optimisation peut porter sur des décisions d'allocation à moyen terme d'où l'appellation d'optimisation de la gestion stratégique. Les équations à considérer portent alors sur un horizon décisionnel de plusieurs mois à plusieurs années suivant la taille des réservoirs dans le système :

$$\sum_{t \in \text{Horizon}} [ \sum_{i \in \text{Réservoir}} ( \sum_{m \in \text{Zone}} ( \lambda + imt \cdot \text{Excédent } imt ) ) + \sum_{i \in \text{Réservoir}} ( \sum_{m \in \text{Zone}} ( \lambda - imt \cdot \text{Déficit } imt ) ) + \sum_{d \in \text{Demande}} ( \sum_{n \in \text{Niveau}} ( \delta dnt \cdot \text{Déficit } dnt ) ) + \dots ]$$

Les limitations sont nombreuses : nécessité de paramétrer avec des coefficients de pénalités dont la calibration n'est pas évidente, hypothèses sur les apports futurs, passage du stratégique au tactique.

Les utilisations et les méthodes d'optimisation sont diverses. MODSIM utilise par exemple la relaxation de Lagrange pour calculer la distribution des flux sur un pas de temps (Labadie *et al.*, 2001). Autre exemple, la Compagnie d'aménagement des coteaux de Gascogne (CACG) utilise, comme première étape de la gestion stratégique, la programmation dynamique stochastique pour l'optimisation du fonctionnement du système « Neste » ramené à un réservoir et une sortie.

Dans la gestion opérationnelle de ce système complexe (barrages, canaux, cours d'eau, 50 000 ha d'irrigation, 200 000 habitants alimentés en eau potable), la CACG distingue en effet :

- la *gestion stratégique* qui est une gestion des aléas ; elle consiste, en temps réel, à adapter la demande aux ressources disponibles... ; l'intervalle entre 2 décisions peut varier de la journée au mois ;
- la *gestion tactique* qui est une gestion de la distribution de l'eau ; elle consiste à adapter les lâchers effectués à partir des ouvrages pour répondre au mieux à la demande.

Le couplage entre les 2 types de gestion passe par le découpage du réseau hydrographique de l'ensemble stratégique considéré en ensembles tactiques (Labadie *et al.*, 2001)

L'approche adoptée sous Hyd2002 utilise l'optimisation de la gestion stratégique par programmation linéaire et considère la même représentation des systèmes entre gestion stratégique et gestion tactique. Par exemple, sur le système Montagne Noire Lauragais, présenté sur la figure 2, de nombreux modes d'application de décisions tactiques conditionnées par l'optimisation de la gestion stratégique ont été

simulés sur 65 années de chroniques d'apport (Pouget *et al.*, 2001). En particulier, différentes simulations ont été menées avec des optimisations de la gestion stratégique sur des horizons déterministes constitués des valeurs historiques des apports. Ces simulations nous placent dans le cas irréaliste d'un futur complètement connu. Ces simulations fournissent une référence dans les tests effectués. Ces tests portent sur le passage du stratégique au tactique (simulations au pas de temps décennales et journaliers), sur le choix de modes de prédiction pertinent pour l'horizon déterministe, etc.

Dans le cas de l'optimisation de la gestion stratégique sur des horizons décisionnels déterministes, le recours au format standard MPS (Mathematical Programming System) permet d'utiliser différents solveurs de programmation linéaire (De Sa, 2002). Les simplifications introduites pour la résolution par la programmation linéaire paraissent acceptables au regard de l'incertitude sur le futur. La prise en compte de cette incertitude peut rendre ces techniques très complexes. Par exemple, dans le cas du programme européen WARSYP ([www.mpl.ird.fr/hydrologie/warsyp](http://www.mpl.ird.fr/hydrologie/warsyp)), l'objectif était d'utiliser l'optimisation sur un arbre de scénarios générés pour représenter la stochasticité des apports et des demandes. On note l'importance du recours à un modèle de simulation, reproduisant l'intégration des prises de décision stratégiques et tactiques, notamment pour la phase de test du mode d'optimisation de la gestion stratégique.

## Evaluer la satisfaction des objectifs

### Différents types de résultats

L'évaluation des performances de différents modes de gestion est basée sur des analyses des résultats de simulation, notamment en termes intensité, durée, fréquence de la non-satisfaction des objectifs. On peut ainsi étudier la fréquence d'apparition de défaillances (fiabilité), l'ampleur des déficits (vulnérabilité) et la durée des pénuries (flexibilité). HyD2002 fournit différents indicateurs globaux de la desserte. Il est possible de comparer des résultats synthétiques entre plusieurs composants, de détailler le fonctionnement d'un objet particulier, de comparer graphiquement des alternatives de gestion (figure 5).

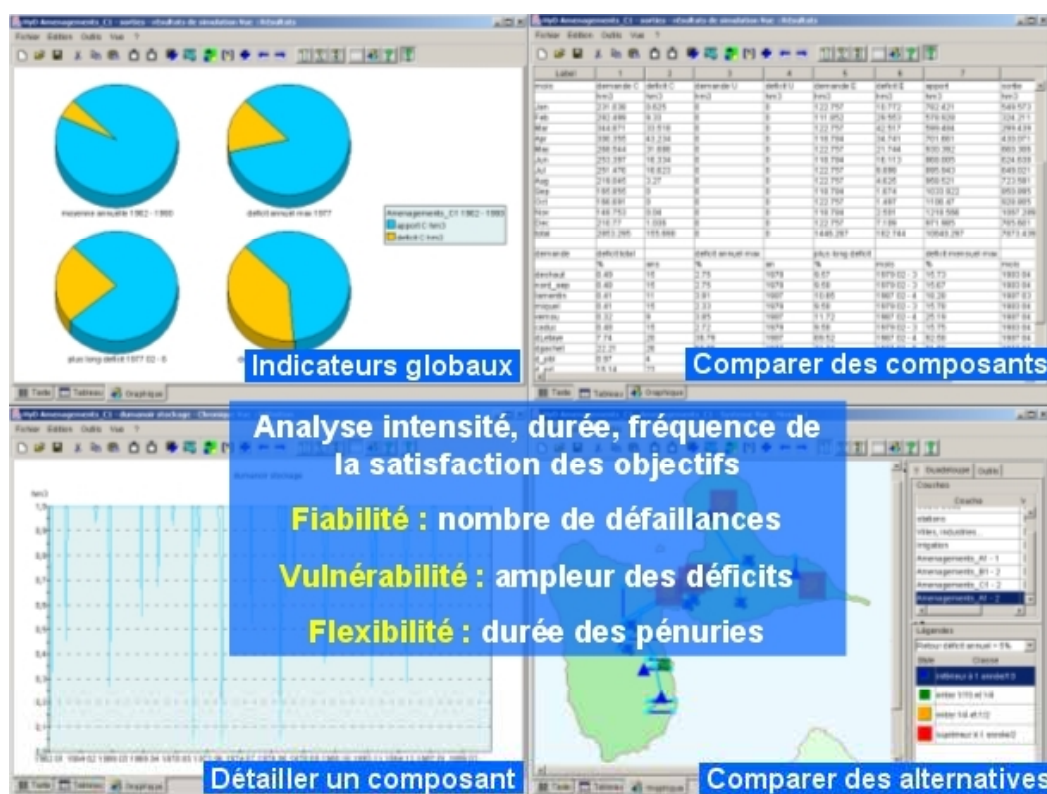


Figure 5. Différents types de résultats.

## Exemple de résultats globaux

A titre d'exemple, dans les tests sur le système Montagne Noire - Lauragais, la comparaison en première analyse entre les simulations portaient sur les résultats globaux de déficits. Les tableaux récapitulatifs distinguent demandes consommatrices, demandes non-consommatrices (demandes objectifs) et demandes écologiques (débits réservés) et les valeurs caractéristiques suivantes :

- déficit total : pourcentages de déficit sur la totalité de la période simulée ;
- déficit max annuel : pourcentages de déficit sur l'année avec le maximum de déficit ;
- plus long déficit : pourcentages de déficit sur la période la plus longue avec des déficits consécutifs ;
- déficit max mensuel : pourcentages de déficit sur le mois avec le maximum de déficit.

## Les applications

### Aménagement des eaux en Guadeloupe

#### Contexte

La complexité croissante des systèmes d'eau en Guadeloupe, notamment pour l'irrigation, et la forte variabilité spatio-temporelle des précipitations ont conduit l'ORSTOM à proposer l'élaboration d'un outil d'aide à la décision dans l'aménagement des eaux (Pouget *et al.*, 1992). Le développement de cet outil, dénommé Hydram, a été cofinancé par le Conseil général de la Guadeloupe afin d'aider à la planification des eaux sur l'île. Hydram a ainsi été utilisé dans l'élaboration du Schéma d'utilisation des eaux de la Guadeloupe (Dezetter *et al.*, 1994).

Les services techniques du Conseil général de la Guadeloupe dispose de l'environnement de modélisation HyD, nouvelle version de l'outil correspondant à la généralisation des modes de gestion et utilisant le langage objets Java.

#### Modélisation

Le tutoriel du guide utilisateur d'HyD2002 ([www.mpl.ird.fr/hydrologie/divha/hyd2002.htm](http://www.mpl.ird.fr/hydrologie/divha/hyd2002.htm)) utilise l'exemple de la Guadeloupe afin d'illustrer l'utilisation de l'outil dans l'aide à la planification.

HyD2002 permet de représenter et évaluer les performances des aménagements existants, qui mobilisent l'eau du nord de la Basse-Terre pour l'irrigation et la desserte en eau potable de la Grande-Terre. L'outil permet de tester différentes alternatives pour répondre à l'évolution des besoins ceci afin de planifier la mobilisation de nouvelles ressources, la construction de nouveaux réservoirs.

Il est à noter qu'une étude de sensibilité a montré qu'il était préférable de simuler le fonctionnement des aménagements au pas de temps décadaire afin d'éviter des lissages si les tests sont effectués en mensuel. La variabilité hydrologique est représentée par 29 années de chroniques de pluies et d'écoulements au pas de temps décadaire. La reconstitution de chroniques d'apports naturels concomitantes aux différents points de mobilisation est un travail préalable important.

Les besoins d'irrigation sont modélisés par des objets *Consommations en eau* dont la demande est constituée par la chronique des cumuls des besoins théoriques pour l'ensemble des cultures pour chaque zone irriguée. Ces besoins théoriques sont calculés à partir de la surface irriguée, sa localisation, la pluie et l'évaporation sur la zone étudiée, et le type de culture (maraîchage, 4 assolements de canne à sucre, fourrage).

Les besoins en eau potable sont modélisés par des objets *Consommations en eau* qui représentent les stations de traitement en tête des réseaux d'adduction des communes. Les demandes sont donc sensibles au rendement de ces réseaux. Les alternatives correspondant aux tranches de production des stations pour un rendement de 50 % et de 65 % sont ainsi testées.

Dans la hiérarchisation des objectifs, toutes les demandes d'un même type sont définies avec les mêmes priorités. Ainsi pour les besoins en eau potable, 90 % de la demande est définie comme hautement prioritaire, les 10 % restant ont la même priorité que la moitié la plus prioritaire des besoins d'irrigation. Différentes alternatives sont effectuées en jouant sur les priorités des débits réservés.

La mobilisation relative des ressources est calculée au prorata des capacités de transit définies dans les liens hydrauliques en amont des jonctions convergentes correspondantes. Comme la capacité de transit est définie comme variable mois par mois, il est possible de fixer la part de demandes alimentées par une ressource pour une certaine période de l'année et de ne pas mobiliser cette ressource le reste de l'année en définissant comme nulle la capacité de transit du lien correspondant.

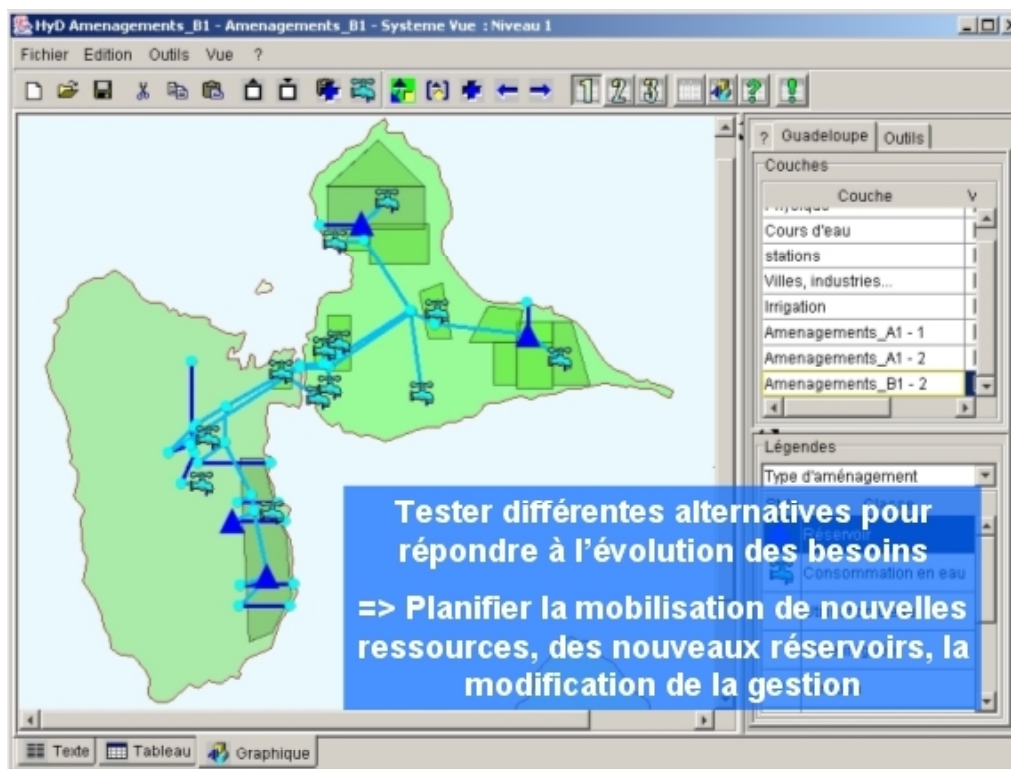


Figure 6. Aide à l'aménagement des eaux de la Guadeloupe.

## Alimentation du château de Versailles

### Contexte

La Société d'ingénierie pour L'eau et L'environnement (SIEE) a été missionnée par le Conseil général des Yvelines afin de réaliser l'étude de la réhabilitation de l'alimentation en eau du château de Versailles. Il s'agit notamment d'étudier les possibilités de reconnexion du réseau d'alimentation, ce qui inclut la réhabilitation mais aussi la création de réseau et d'ouvrages de stockages.

### Modélisation

A. De Sa a utilisé HyD2002 afin de représenter le système d'adduction envisagé. Les seules demandes à considérer, hormis les débits réservés, sont les besoins d'alimentation des fontaines et bassins du château. Des chroniques de 20 années d'apports naturels mensuels ont été constituées pour les différents points de mobilisation envisagés.

Dans le cas d'une reconnexion de tous les biefs (figure 7), le réseau potentiel devient ramifié. La définition des règles de mobilisation entre les différents biefs est considérée comme trop complexe au niveau d'une étude de faisabilité, cette définition relevant plus de la gestion opérationnelle. La méthode retenue a donc consisté à diviser le système d'eau en deux sous-systèmes, sur lesquels a été conservée la demande en eau totale du château. Cela a permis de déterminer quels débits pourraient être délivrés par les différentes branches du système, puis de cumuler ces apports pour les confronter à la demande et en déduire le taux de satisfaction global.



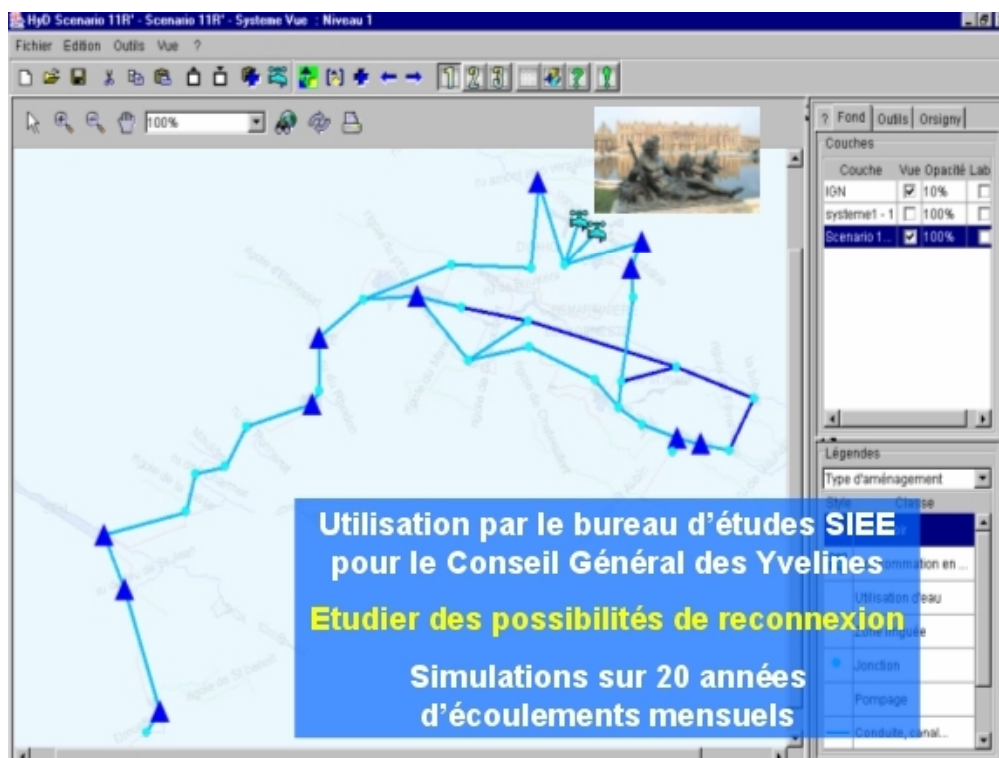


Figure 7. Système d'alimentation du Château de Versailles.

## Bassin de l'Indus au Pakistan

### Contexte

Dans le cadre d'une thèse, co-encadrée par le Cemagref et le CIRAD, et intitulée "*Scope for reallocation of river waters for agriculture in the Indus basin*", Z. Habib a utilisé HyD2002 afin de tester diverses allocations des ressources de l'Indus au Pakistan. Ce bassin, contrôlé en partie par l'Inde en amont, est très anthropisé : plus de 75 % de l'eau de surface est mobilisée pour l'agriculture (20 millions d'hectares en 2001) et d'autres usages, de nombreux canaux de dérivation ont été construits afin de transférer de l'eau entre les rivières de l'ouest et de l'est.

### Modélisation

Le schéma topologique du bassin (figure 8) est défini par :

- des *arcs de surface* qui représentent les divers canaux de dérivation, et des *arcs naturels* qui modélisent différents biefs de l'Indus et de ses affluents ;
- des nœuds de surface : les deux *réservoirs* amont de Tarbela (12 km<sup>3</sup>) et Mangla (7,5 km<sup>3</sup>) ; des nœuds *jonctions* qui représentent les confluences et les diverses prises sur les cours d'eau ; des *demandes consommatrices* (carrés verts sur la figure 8.) qui représentent les besoins d'irrigation à l'entrée des canaux principaux des périmètres (les chroniques de besoins mensuels ont été élaborées préalablement), des *demandes non-consommatrices* (carrés jaunes sur la figure 8) qui représentent la variation saisonnière des débits objectifs à transiter dans les canaux.

C'est la définition de ces demandes objectives et des priorités associées qui conditionne la répartition de l'eau dans le système : part des apports dérivés vers l'ouest et équité entre les provinces du nord et du sud. Des simulations mensuelles sur la période 1978-1999 permettent ainsi de comprendre et comparer différents modes d'allocation : répartitions observées, politique de gestion officielle, etc.

Il est à noter que seule l'allocation des eaux de surface est considérée. Vu la complexité et le manque d'informations sur les aquifères, la mobilisation des eaux souterraines n'est pas modélisée. Cette mobilisation est importante sur certains périmètres, les résultats obtenus sur les déficits pour l'irrigation sont donc relativisés en fonction.

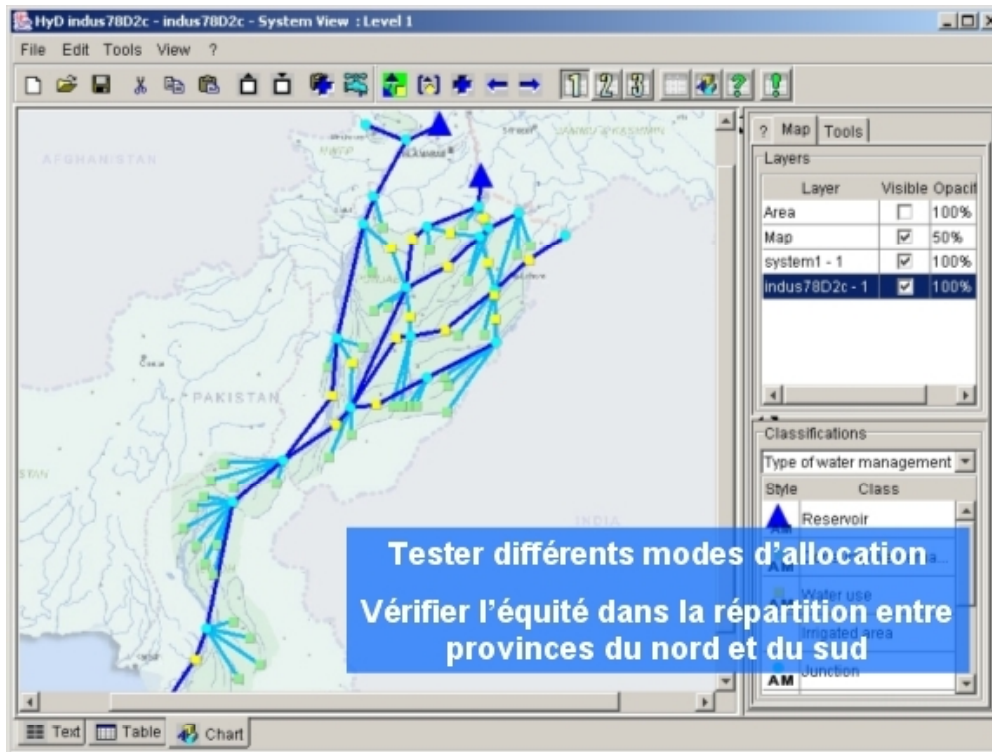


Figure 8. Bassin de l'Indus au Pakistan.

## Bassin du Walawe au Sri Lanka

### Contexte

Le bassin versant du Walawe, situé dans la région sud du Sri Lanka, est un des "benchmark basins" retenus par l'IWMI (International Water Management Institute - [www.iwmi.cgiar.org](http://www.iwmi.cgiar.org)). Le grand développement de l'irrigation a commencé dans les années 60 avec la construction du barrage de Uda Walawe (260 hm<sup>3</sup>).

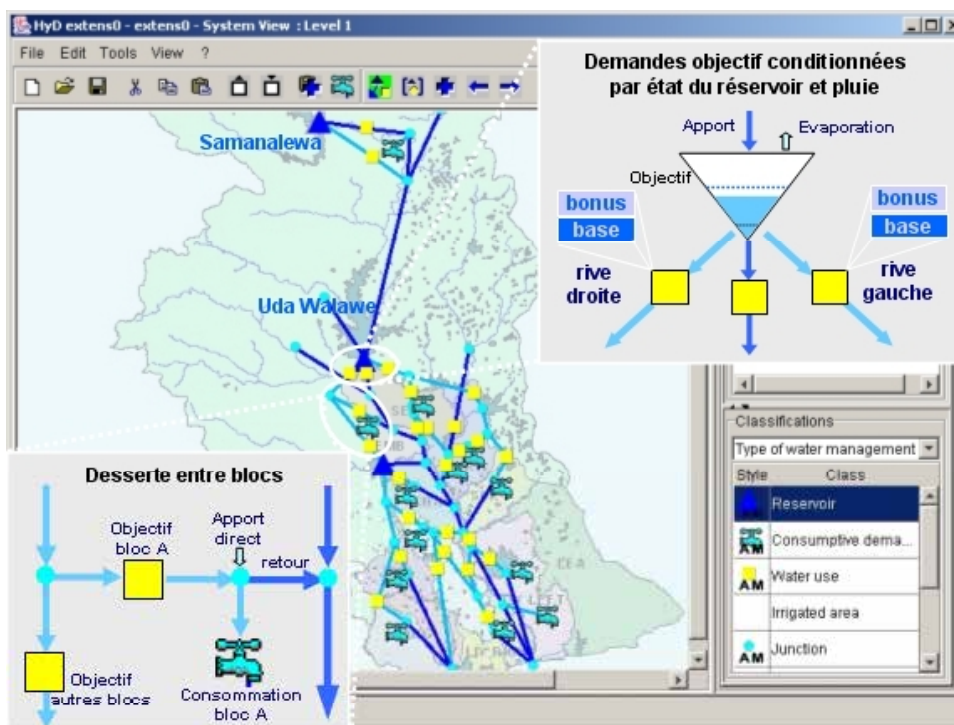


Figure 9. Bassin du Walawe au Sri Lanka.

Ce réservoir dessert par des canaux des périmètres irrigués situés en rive droite (5 blocs – 12 000 ha) et en rive gauche (3 blocs – 6 400 ha) du fleuve. 65 % de la surface irriguée est occupée par du riz paddy et de la canne à sucre. La diversification des cultures, notamment la banane, constitue une stratégie de développement du bassin. Construit en 1992 dans la zone amont, relativement humide, le barrage de Samanalewa (280 hm<sup>3</sup>) a comme seul usage la génération d'électricité. De nombreux projets sont en cours ou projetés : extension de l'irrigation en rive gauche, alimentation en eau d'un bassin voisin, etc.

F. Bellaubi a utilisé HyD2002 dans le cadre d'un stage de Master de l'Institut agronomique méditerranéen (IAM Montpellier) auprès de l'IWMI. L'objectif est de comprendre l'allocation actuelle de l'eau dans le bassin et de tester différentes extensions prévues.

### Modélisation

La modélisation du bassin retenue, présentée sur la figure 9, emploie de nombreuses *demandes non consommatrices* (carrés jaunes) afin de représenter différents objectifs et consignes de mobilisation et de répartition des ressources. Ces demandes sont caractérisées par la variation mensuelle des volumes à transiter, par la définition de différents niveaux de priorité sur ces volumes, et par un conditionnement possible de la desserte suivant ces niveaux de demande.

Ainsi, le questionnement des gestionnaires du réservoir de Uda Walawe a conduit à la définition de demandes objectifs identifiant 2 niveaux afin de représenter la décision d'allocation dans les canaux de tête en rive droite et en rive gauche. Le niveau de plus faible priorité n'est pas desservi en dessous d'un certain volume du réservoir et si la pluie est supérieure à une certaine quantité.

L'encadré *Desserte entre blocs* de la figure 9 présente le recours à des demandes objectifs définies en tête de bloc afin de modéliser la répartition de l'eau dans les canaux. Ces demandes identifient plusieurs tranches de volumes correspondant aux besoins effectifs en irrigation et à des surplus, qui varient suivant les bonnes ou mauvaises saisons. Ces surplus représentent des confort de gestion : on amène plus d'eau que nécessaire. Mais ces *conforts* sont inégalement répartis dans la saison et entre les blocs, d'où leur définition afin d'approcher la différence d'allocation constatée entre les blocs.

Dans un bloc, une *demande consommatrice* représente le besoin effectif en irrigation, calculé à partir de l'évapotranspiration des cultures et d'une efficacité d'application. L'eau, amenée par les canaux depuis le réservoir et par apport naturel direct sur les périmètres, et non consommée par l'irrigation du bloc retourne dans les cours d'eau et peut alimenter d'autres besoins à l'aval (système d'irrigation en cascade). Il est à noter que les pertes dans les canaux sont considérées comme participant également à l'alimentation des blocs, elles ne sont donc pas définies explicitement dans le modèle.

Les tests effectués (calage, modifications de l'allocation, variantes d'évolution) s'appuient sur des simulations au pas de temps mensuel sur 40 années de chroniques d'apports.

### Les évolutions envisagées

Les bassins aménagés étudiés par l'unité DIVHA et les questions techniques et sociales posées par leur gestion orientent les évolutions de l'environnement de modélisation HyD, qui permet de capitaliser ces expériences. L'étude des grands fleuves africains (Sénégal, Niger, Limpopo) nécessite d'intégrer les temps de propagation dans l'environnement de modélisation et d'améliorer la représentation et les relations entre gestion stratégique et gestion tactique. Ces évolutions correspondent à la généralisation à plusieurs réservoirs du modèle d'aide à la gestion du barrage de Manantali sur le fleuve Sénégal (Bader *et al.*, 2003). L'étude des petits bassins du pourtour méditerranéen (Tunisie, Algérie, Maroc) privilégie les points suivants : anthropisation des bassins par les petits aménagements ; salinisation des eaux ; les connexions entre eaux superficielles et souterraines ; les usages agricoles de l'eau par pompage. L'étude des bassins andins (Equateur, Pérou, Bolivie, Chili) oriente la modélisation sur : la gestion de la ressource au fil de l'eau ; les conflits entre amont et aval ; les règles traditionnelles, les lois et règlements ; les usages agricoles de l'eau par canaux de surface.

Dans les exemples présentés dans ce papier, comme dans les applications classiques des modèles d'allocation, les tests portent sur des alternatives où sont fixés des états d'aménagements et des règles de gestion. Le fonctionnement des aménagements est simulé sur des chroniques représentant la variabilité

hydrologique. La vérification des objectifs porte sur une analyse fréquentielle des chroniques générées. Or, sur de nombreux projets, il convient d'étudier des dynamiques d'évolution des systèmes (urbanisation, stratégies de développement agricole, etc), afin d'évaluer des scénarios de développement et la durabilité de ces systèmes (baisse des nappes, dégradation de la qualité, etc.). Ces études impliquent le recours à divers types de modèles et nécessitent éventuellement la simulation synchronisée de modèles d'allocation, avec des modèles hydrologiques et des modèles d'usages. Un objectif général consiste à faciliter la construction, sur chaque cas d'étude, d'un environnement de modélisation qui puisse faire appel à plusieurs modèles, éventuellement couplés, afin d'explorer et de discuter des alternatives de gestion, en tenant compte à la fois des évolutions socio-économiques et de l'aléa hydrologique (Pouget *et al.*, 2004).

## Références bibliographiques

BADER J.C., LAMAGAT J.P., GUIGUEN N., 2003. Gestion du barrage de Manantali sur le fleuve Sénégal : analyse quantitative d'un conflit d'objectifs. *Hydrological Sciences- Journal des Sciences hydrologiques*, 48 (4) : 525-538.

DE SA A., 2002. Assessment and improvement of Decision Support Systems, for compliance with present requirements of water systems management, Rapport de stage IRD - SIEE, MSc Environmental Water Management, Cranfield University, Silsoe, aout 2002, 42 p.

DEZETTER A., POUGET J.C., CABALLERO L., 1994. Applications d'HYDRAM au Schéma d'utilisation des eaux de la Guadeloupe pour l'eau potable et l'irrigation. Rapport final Convention 92-93 ORSTOM - Conseil général de la Guadeloupe, Pointe à Pitre, avril 1994.

HURAND P., 2001. La gestion opérationnelle d'un système hydrographique complexe : « le système Neste ». Article, Compagnie d'aménagement des coteaux de Gascogne, 29 p.  
<http://www.cacg.fr/pages/publi/publications.asp>

LABADIE J.W. et al. 2000. MODSIM : Decision support system for river basin management, Documentation and user manual, Colorado State University, 68 p. <http://modsim.engr.colostate.edu/>

POUGET J.C., DEZETTER A. MORELL M., 1992. Gestion des Ressources en Eau en milieu insulaire tropical - Le cas de la Guadeloupe, Colloque L'avenir de l'Eau. XXII<sup>e</sup> journées de l'Hydraulique, SHF, Paris, 15-17 septembre.1992, 11 p.

POUGET J.C., ASTIER J., LE GOULVEN P., ROCQUELAIN G., 2001. Simulation et optimisation de la gestion stratégique - Cas d'aménagements à buts multiples du Sud de la France, PHI-V UNESCO, 2001, Documents Techniques en Hydrologie, n°51, p. 249-257.

POUGET J.C., CUDENNEC C., LEDUC C., LE GOULVEN P., LE GRUSSE P., POUSSIN J.C., 2004. Co-construction d'un outil de gestion intégrée sur le bassin du Merguellil (Tunisie) - Articulation et cohérence de modèles. Actes du Séminaire PCSI « Gestion intégrée de l'eau au sein d'un bassin versant », Montpellier, France, décembre 2003, 9 p.