

SIMULATION ET OPTIMISATION DE LA GESTION STRATEGIQUE - CAS D'AMENAGEMENTS A BUTS MULTIPLES DU SUD DE LA FRANCE

Pouget J.C.*, Astier J.***, Le Goulven P.*, Rocquelain G.*

* IRD MSE - BP 5045 - 34032 Montpellier Cedex 1

** BRLi - BP 4001 - 30001 Nîmes Cedex

RESUME

Pour améliorer la gestion de systèmes de réservoirs, il est important de définir des stratégies qui prennent en compte la variabilité hydrologique. Une des stratégies est d'utiliser les modèles de simulation pour régler des consignes de gestion sur de longues chroniques de données hydro-climatiques, considérées comme représentatives. La vérification des objectifs se fait a posteriori. L'optimisation de la gestion stratégique nécessite, elle, une formalisation a priori des objectifs, qui passe par l'attribution de coûts à l'eau suivant la position où elle se trouve. Cette optimisation vise à définir, sachant un état des réserves, les meilleures allocations des ressources à moyen terme, donc en avenir incertain. La longueur de l'horizon décisionnel considéré est fonction des stockages en jeu.

Afin de tester l'application de ces stratégies, nous avons développé un environnement d'aide à la décision qui permet de simuler la gestion opérationnelle des systèmes, en intégrant les niveaux de décision stratégiques et tactiques, et d'évaluer leurs performances. Les modèles d'optimisation de la gestion stratégique utilisent des algorithmes de programmation linéaire, avec des horizons décisionnels plus ou moins complexes. Dans le projet européen WARSYP, par exemple, il a été introduit des algorithmes d'optimisation portant sur un arbre de scénarios, généré pour représenter la stochasticité des apports et des demandes.

Nous présenterons l'application de différentes stratégies à la gestion du système Montagne Noire - Lauragais. Les aménagements, qui comprennent 6 réservoirs et des connexions inter-bassins, servent à l'alimentation en eau potable, à l'irrigation, aux loisirs, à la navigation sur le Canal du Midi, etc. Nous évaluerons la robustesse de différentes options : longueur et modes de génération de l'horizon décisionnel, sensibilité aux paramètres de gestion, etc.

INTRODUCTION

Les systèmes de réservoirs sont constitués d'éléments de stockage tant superficiels que souterrains, d'éléments de captage, de transport naturels, artificiels, d'utilisation et de consommation d'eau. La complexité de ces systèmes tient à l'implication d'un grand nombre d'acteurs avec différents objectifs et stratégies.

Nous allons détailler ces stratégies pour la gestion opérationnelle de ces systèmes, qui peuvent allier simulation et optimisation des ouvrages. Nous présenterons ensuite brièvement les bases de l'environnement d'aide à la décision que nous avons développé afin d'approcher la réalité de la gestion des systèmes d'eau.

Nous illustrerons notre propos avec la modélisation du système Montagne Noire - Lauragais et des tests de sensibilité sur différents aspects de l'optimisation de la gestion stratégique.

LA GESTION OPERATIONNELLE - SIMULATION ET OPTIMISATION

La gestion opérationnelle consiste pour un ensemble d'ouvrages existant à régler le fonctionnement des organes de commande, fonctionnement qui va conditionner les flux d'eau dans le système [VALIRON 1988]. Mais, dans le fonctionnement de systèmes où la décision de lâchers sur des réservoirs peut influencer grandement le respect d'objectifs sur un futur plus ou moins lointain suivant les stockages en jeu, il est important de définir des stratégies qui prennent en compte l'aléa climatique.

Etablissement des consignes de gestion par simulation

Une des stratégies est d'utiliser les modèles de simulation pour tester des consignes de gestion sur de longues chroniques de données hydro-climatiques, considérées comme représentatives. La vérification des objectifs se fait a posteriori, notamment par l'analyse d'apparition de défaillances et leur répartition (fiabilité), de l'ampleur des déficits (vulnérabilité) et de la durée des pénuries (flexibilité). Les consignes de gestion vont être modifiées, au fur et à mesure des simulations, pour améliorer la satisfaction des objectifs. Il y a

apprentissage, par l'utilisateur du modèle de simulation, de la réponse du système, par un processus du type essais-erreurs. L'objectif est de se rapprocher de la réalité de l'application des consignes d'où la nécessité de simuler au pas de temps journalier ou décadaire pour ne pas lisser des phénomènes.

Les consignes de gestion peuvent être plus ou moins complexes. Elles font généralement référence à des priorités de distribution de demandes et une hiérarchisation de la mobilisation des ressources. La mobilisation s'effectue en respectant les courbes de remplissage et de vidange des réservoirs. La définition du niveau objectif tiendra notamment compte de la constitution d'un creux pour l'amortissement des crues.

Cet établissement des consignes de gestion par simulation demande le savoir-faire du gestionnaire du système pour équilibrer la satisfaction des objectifs et peut être difficile à mettre en oeuvre lors de changements structuraux importants ou sur des cas complexes.

Approche intégrée de la gestion opérationnelle

La *figure 1* présente les nombreuses collaborations que peut impliquer la gestion au niveau de l'ensemble d'un bassin. Trois couches de décision peuvent être identifiées [JAMIESON 1986] : les décisions stratégiques, tactiques et de contrôle local. Elles peuvent correspondre à divers gestionnaires, un gestionnaire central, des gestionnaire de sous-systèmes, des gestionnaires d'ouvrages. Les décisions stratégiques définissent ce qui doit être fait à moyen terme en termes d'allocations de ressources ; des modèles d'optimisation sur des mois futurs sont utilisés. Les décisions stratégiques conditionnent les modèles de gestion tactique qui correspondent à des décisions à court terme, en journalier généralement.

Les décisions tactiques servent à régler le fonctionnement des organes de commande, qui correspond à un contrôle en temps réel, généralement asservi par des automatismes. Des boucles de rétro-action peuvent exister entre ces modes de décision pour prendre en compte des écarts entre directives et réalité.

Cette approche intégrée de la gestion opérationnelle couple en fait modèles d'optimisation et de simulation, en détaillant plus ou moins les processus physiques à divers moments du procédé de prise de décision [Journal of Hydrology 1996].

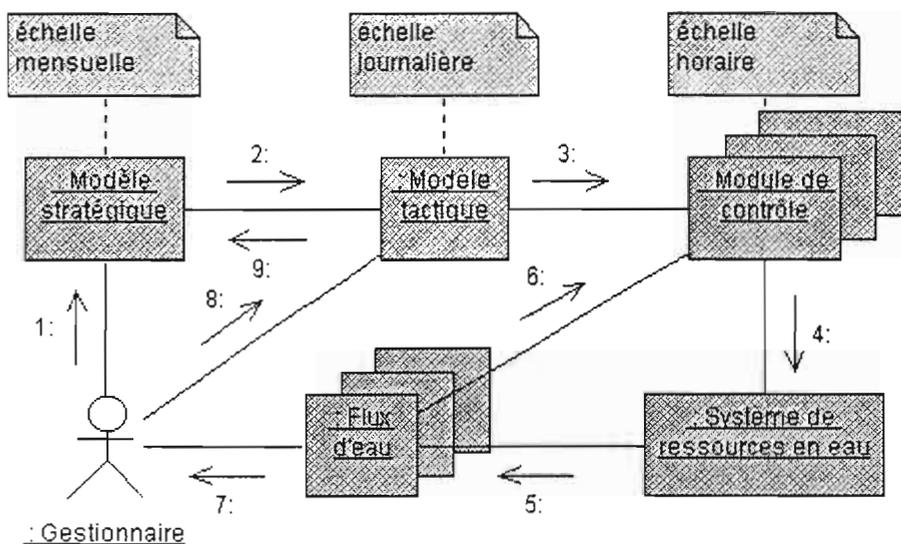


Fig. 1 - Collaborations possibles dans la gestion opérationnelle d'un bassin

L'optimisation va impliquer de transformer le système d'eau réel en un réseau fictif d'arcs (arcs de surface, biefs naturels, etc) et de noeuds (réservoir, jonction, demande consommatrice et non consommatrice, aquifère, etc). Le problème consiste à minimiser une fonction objectif composée de termes pénalisation et de coûts sur un horizon décisionnel, sachant les conditions formulées dans les équations relatives aux divers composants. Les termes de pénalisation sont relatifs aux déficits ou aux déviations par rapport à des niveaux objectifs (courbe objectif d'un réservoir, niveaux de demandes en eau, etc). Les termes de coûts sont relatifs au transit de surface et aux pompages de surface ou dans les aquifères. Le stockage dans les réservoirs et les

aquifères et la limitation des déficits cumulés des demandes nécessitent un couplage multipériodes, qui conduit à l'adoption d'un modèle complexe de résolution d'équations linéaires [WARSYP 2000].

Les simplifications introduites par l'utilisation d'algorithmes de programmation linéaire sont acceptables au regard de l'incertitude sur le futur à prendre en compte pour la satisfaction des objectifs. Dans le projet européen *WARSYP* par exemple, un des objectifs était de traiter l'incertitude sur le futur par la représentation avec un arbre de scénarios stochastiques. L'avantage de ces méthodes, même si c'est une de leur principales difficultés, réside dans la formalisation des objectifs.

On note l'importance du recours à un modèle de simulation, reproduisant l'approche intégrée des prises de décisions stratégiques et tactiques, notamment pour la phase de test du mode d'optimisation de la gestion stratégique. La robustesse de différentes options peut être évaluée : mode uniquement déterministe avec un horizon prévisionnel plus ou moins grand (on peut se placer dans le cas irréaliste mais optimal où le futur est connu, puisque l'on va simuler sur des données historiques), complexité plus ou moins grande d'un arbre de scénarios stochastiques, etc.

Les bases d'un environnement d'aide à la décision

Notre développement vise un environnement pour l'aide à la gestion des ressources des eaux au sens large, allant de la planification à long terme jusqu'à l'optimisation de la gestion opérationnelle [POUGET 1999]. Cet environnement doit être assez ouvert pour recourir, suivant les prises de décision, à différentes technologies, optimisations et simulations plus ou moins complexes de processus physiques. Plusieurs types d'utilisateurs peuvent faire appel à des degrés divers aux trois grandes fonctionnalités de l'environnement, présentées sur la *figure 2* :

- *la construction de systèmes d'eau*, de nouveaux systèmes d'eau peuvent être construits, on peut ajouter de nouveaux composants ou modifier la structure physique ou les consignes de gestion de systèmes existants ;
- *la simulation et/ou l'optimisation de la gestion opérationnelle*, il est possible de simuler le fonctionnement des systèmes d'eau sur une longue période de données hydro-météorologiques, à des pas de temps variables et suivant différents modes de gestion, intégrant des priorités de desserte en eau et des règles de mobilisation des ressources ;
- *l'évaluation des performances*, la fiabilité, la vulnérabilité et la flexibilité des systèmes peuvent être étudiées par rapport à la satisfaction de divers objectifs.

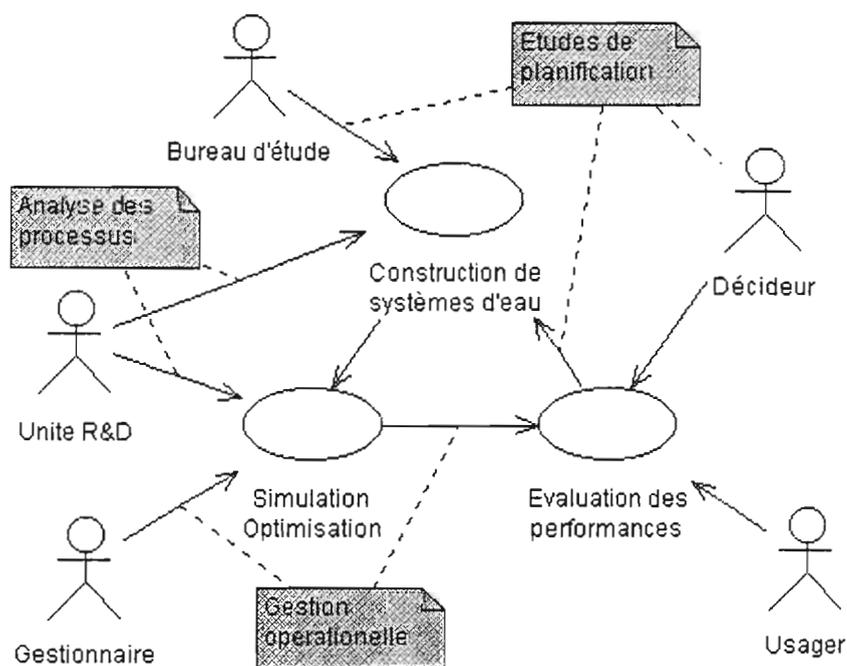


Fig. 2 - Les grands cas d'utilisation

Le développement est donc basé sur la représentation et la simulation de fonctionnement de bassins aménagés, qui constituent des systèmes fortement structurés. L'approche objets permet une modélisation aisée de cette structure, qui fonde l'architecture du développement et assure la continuité de l'évolution. Au gré des besoins, diverses versions de modèles opérationnels peuvent être produits, où de nouveaux types de composants de systèmes d'eau, de nouvelles fonctionnalités d'analyse peuvent être ajoutés, des processus physiques plus ou moins complexes peuvent être détaillés, etc [LE GOULVEN 2000].

APPLICATION AU SYSTEME MONTAGNE NOIRE - LAURAGAIS

Description

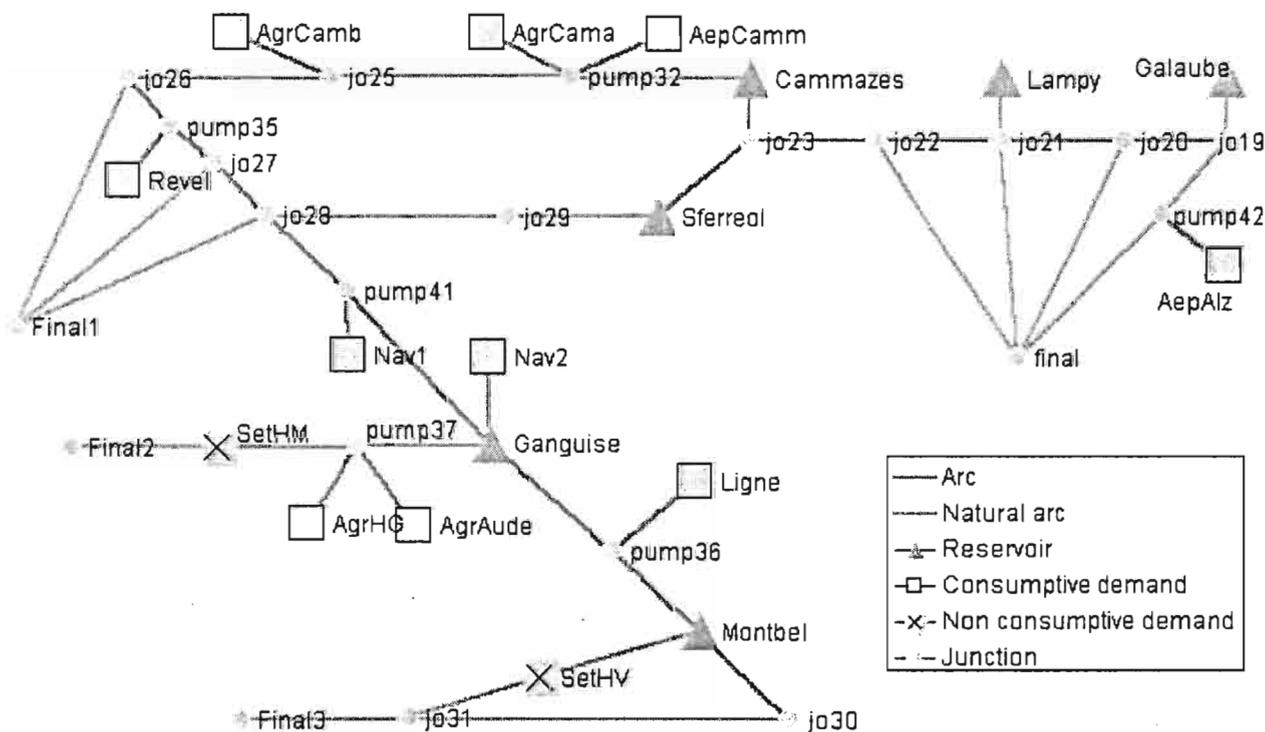
Le système est situé dans le sud ouest de la France entre la Montagne Noire et les pieds des Pyrénées. Ce système possède donc un versant atlantique et un versant méditerranéen, il recouvre ainsi 2 agences de bassin (Rhône-Méditerranée-Corse et Adour-Garonne) et 8 organismes de gestion.

Les aménagements comprennent 6 réservoirs (Saint Ferréol 6.4 hm³, Lampy 1.7 hm³, Cammazes 18.8 hm³, Ganguise 24.7 hm³, Montbel 60 hm³, Galaube 8 hm³) 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 m³ par an. Les projets prévoient l'extension de la zone irriguée (3000 ha par an) et l'augmentation de la desserte en eau potable (2 hm³ par an).

Modélisation

Nous avons modélisé le système sous forme d'arcs - arcs de surface pour les canaux, les conduites, arcs naturels pour les biefs de rivière - et de noeuds - réservoirs, demandes consommatrices pour les demandes en eau potable, agricoles et de navigation, demandes non consommatrices pour modéliser certains soutiens d'étiage, jonctions pour les confluences, captages d'eau, apports intermédiaires, etc -.



Nous avons adopté la même priorité pour toutes les demandes dites écologiques au niveau des arcs naturels, à savoir une valeur de pénalité de 1 pour le non respect du débit réservé.

Nous différencions les demandes de navigation, agricoles et d'eau potable, avec une priorité croissante. Nous distinguons 3 niveaux pour chaque demande.

Demandes	Pénalité 1	Pénalité 2	Pénalité 3
Navigation : Nav1	1	1.5	2
Agriculture : AgrCama, AgrCamb, AgrHG, AgrAude, Ligne + Navigation : Nav2	2	3	4
Eau potable : AepAlz, AepCamm, Revel	4	6	8
Soutien d'étiage : SetHV, SetHM	5	7.5	10

Pour chaque réservoir, nous distinguons 2 zones et un volume objectif égal à la capacité de stockage maximale de mai à septembre avec des pénalités négatives plus grandes dans cette période. Les pénalités positives et négatives sont relativement faibles (de l'ordre de 0.001, 0.01). Ces pénalités sont les mêmes pour tous les réservoirs, à l'exception de Saint Ferréol où les pénalités sont augmentés par un facteur 10 pour tenir compte de la demande de loisir pour ce plan d'eau.

Les simulations

Nous avons simulé l'application de décisions tactiques conditionnées par l'optimisation de la gestion stratégique sur les chroniques d'apports (65 ans) considérées comme représentatives.

Pour chaque mois, l'outil génère un fichier de description du système, exécute le modèle d'optimisation et lit les débits dans les arcs dans un fichier de résultats pour le premier mois de l'optimisation. L'outil simule le fonctionnement du système conditionné par ces débits stratégiques optimisés au pas pas de temps tactique avec les données historiques d'apport.

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 prédictible. Ces simulations fournissent une référence de comparaison.

Ces tests ont été en particulier utilisés pour calibrer les coefficients de pénalités et pour déterminer la longueur de l'horizon décisionnel. Les résultats sont exactement les mêmes si nous considérons un horizon décisionnel de 1 ou 2 ans. Aussi nous ne présentons que les résultats des simulations basées sur un horizon déterministe avec un horizon décisionnel de 12 mois.

Nous ne présentons que les résultats globaux sur les déficits de demande en eau où nous distinguons demande consommatrice (C), demande non consommatrice (NC) et demande écologique (E) et les valeurs suivantes :

- 1- déficit total : pourcentages de déficit sur la totalité de la période simulée ;
- 2- déficit max annuel : pourcentages de déficit sur l'année avec le maximum de déficit pour les demandes consommatrices ;
- 3- plus long déficit : pourcentages de déficit sur la période la plus longue avec des déficits consécutifs pour les demandes consommatrices, nous donnons le premier mois et le nombre de mois consécutifs ;
- 4- déficit max mensuel : pourcentages de déficit sur le mois avec le maximum de déficit pour les demandes consommatrices.

Pour 2-3-4, nous nous référons au déficit maximum pour les demandes consommatrices et nous présentons les valeurs correspondantes pour les demandes non consommatrices et écologiques.

Les résultats suivants R1.1 correspondent à une simulation mensuelle basée sur des optimisations sur des horizons décisionnels avec des valeurs historiques. R1.1 constitue la référence et un optimum pour le respect des différents objectifs. Nous notons que les déficits sont très faibles. Si nous détaillons les résultats pour chaque demande, nous observons que seul Nav1, la demande de priorité la plus faible, a connu un déficit de plusieurs mois pendant la sécheresse de 1989-90.

Référence : R1.1 - Horizon= valeurs historiques - Pas tactique= mois

-	périodes	% déficit C	% déficit NC	% déficit E
déficit total	1931 - 1995	0.10	0.05	0.70
déficit max annuel	1990	5.40	0.00	3.60
plus long déficit	oct 1989 - 10	5.00	7.15	5.25
déficit max mensuel	sep 1990	22.55	0.00	12.45

Tests du passage stratégique à tactique

Les résultats suivants R1.2, R1.3 correspondent respectivement à des simulations décennales et journalières basées sur des optimisations mensuelles sur des horizons décisionnels avec des valeurs historiques. Nous notons que les résultats des demandes consommatrices et non consommatrices sont très similaires à R1.1, mais les déficits écologiques sont supérieurs. Ceci pose le problème de l'application des résultats de l'optimisation dans le fonctionnement tactique. Actuellement la solution adoptée semble trop pénaliser la demande écologique : les débits réservés sont moins respectés. Des travaux supplémentaires sont nécessaires pour la mise en oeuvre opérationnelle, avant même d'utiliser des optimisations plus complexes.

R1.2 - Horizon= valeurs historiques - Pas tactique= décade

-	périodes	% déficit C	% déficit NC	% déficit E
déficit total	1931 - 1995	0.95	0	10.15
déficit max annuel	1990	10.45	0	17.45
plus long déficit	nov 1939 - 21	1.4	0	6.65
déficit max mensuel	juil 1990	13.45	0	5.4

R1.3 - Horizon= valeurs historiques - Pas tactique= jour

-	périodes	% déficit C	% déficit NC	% déficit E
déficit total	1931 - 1995	1.25	0	12.75
déficit max annuel	1990	6.85	0.05	21.6
plus long déficit	jan 1979 - 91	1.25	0	12.25
déficit max mensuel	mai 1990	39.95	0	35.4

Tests des modes de prédiction de l'horizon

Les résultats suivants R1.4, R1.5 correspondent aux simulations mensuelles basées sur des optimisations avec différents modes de prédiction des valeurs d'apports sur l'horizon décisionnel. Avec R1.4, nous considérons simplement les valeurs des premiers quartiles résultant de la classification par mois des différentes chroniques d'apports naturels. Ainsi, pour chaque mois de la simulation, l'horizon décisionnel de l'optimisation stratégique est constitué, pour chaque apport, avec les mêmes 12 valeurs saisonnières. Avec R1.5, nous avons utilisé un modèle de génération de scénario pour définir, pour chaque mois, les 12 valeurs mensuelles correspondant au scénario le plus probable, au regard d'une analyse par des réseaux neuronaux. Comme pour les tests précédents, nous notons que les résultats des demandes consommatrices et non consommatrices sont très similaires à R1.1, mais les déficits écologiques sont supérieurs. Nous notons que la prédiction utilisant les réseaux neuronaux ne semblent pas améliorer les résultats par rapport à des simples indicateurs saisonniers. Mais ce type de prédiction pourrait être très utile dans la gestion opérationnelle avec un couplage avec des prévisions météorologiques.

R1.4 - Horizon= valeurs premier quartile

-	périodes	% déficit C	% déficit NC	% déficit E
déficit total	1931 - 1995	0.55	0.05	9.2
déficit max annuel	1990	6.25	0	24.5
plus long déficit	déc 1989 - 7	17.25	0	52.3
déficit max mensuel	sep 1949	21.9	0	15.8

R1.5 - Horizon= valeurs générés par réseaux neuronaux

-	périodes	% déficit C	% déficit NC	% déficit E
déficit total	1932 - 1996	1.30	0.00	15.55
déficit max annuel	1990	8.75	0.00	24.10
plus long déficit	sep 1989 - 16	8.00	0.00	29.55
déficit max mensuel	sep 1947	28.80	0.00	6.95

Tests sur la régulation des canaux

L'examen des écoulements dans les arcs artificiels (canaux, conduites, etc) montre un besoin de mieux réguler leur fonctionnement. Nous obtenons ainsi des écoulements nuls durant plusieurs mois dans les canaux de la Montagne Noire.

Pour tester la sensibilité des couts de transit dans ces résultats, nous avons simulé le fonctionnement du système avec des couts de transit nuls à la place des valeurs très faibles précédemment utilisées (0.001). Nous notons que les résultats globaux R1.6 sont très similaires aux résultats de référence R1.1. Mais si nous détaillons les résultats, nous observons un nombre plus grand d'années avec des déficits. En particulier le déficit de la demande en eau potable Alzeau est inattendu au regard de sa priorité.

R1.6 - Horizon= valeurs historiques - cout de transit = 0

-	périodes	% déficit C	% déficit NC	% déficit E
déficit total	1931 - 1995	0.25	0	0.75
déficit max annuel	1943	6.25	0	0.25
plus long déficit	aout 1943 - 1	29	0	2.5
déficit max mensuel	aout 1943	29	0	2.5

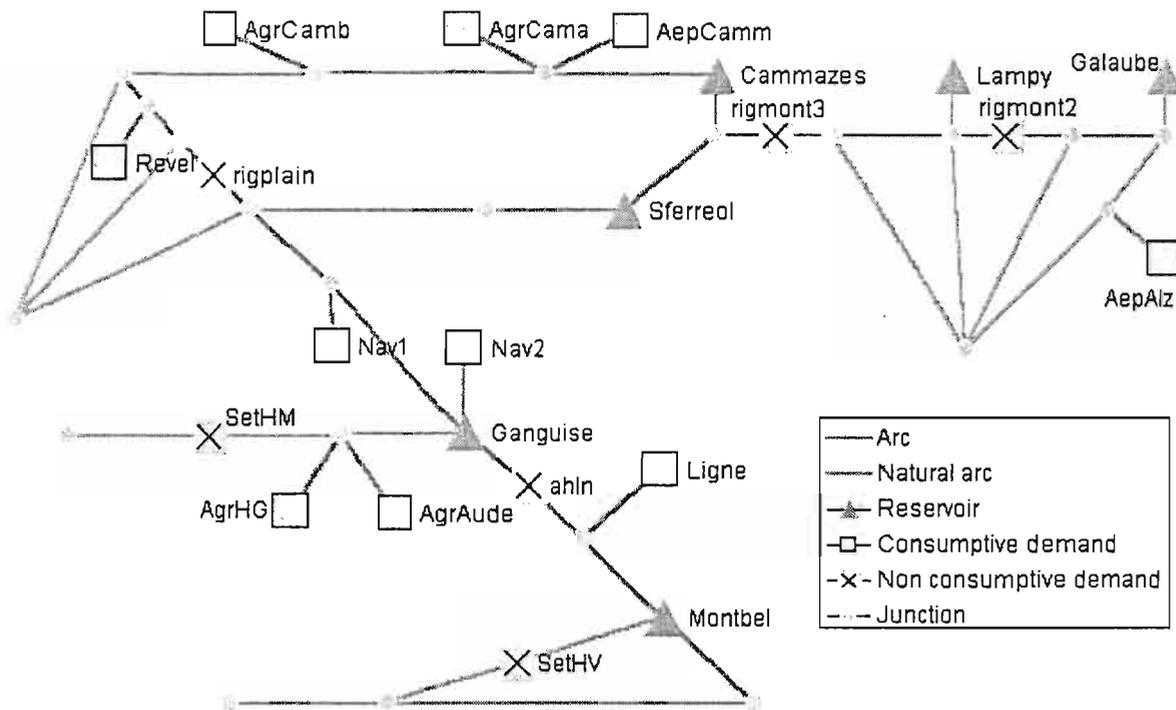
Ainsi une solution est d'introduire de nouvelles demandes non consommatrices sur certains canaux ou conduites pour réguler les écoulements. Nous avons ajoutés 4 nouvelles demandes non consommatrices (voir la figure suivante) :

- ahln, correspondant à la régulation de l'adduction de la Ganguise à partir du réservoir de Montbel ;
- rigplain, rigmont3, rigmont2, correspondant aux régulations des écoulements sur les canaux de la Montagne Noire. Nous avons réglé ces demandes en utilisant les simulations précédentes.

Les résultats suivants R2.1 correspondent à la simulation mensuelle basée sur des optimisations sur des horizons décisionnels avec des valeurs historiques. Pour comparer avec la référence R1.1, nous avons considéré uniquement les résultats de SetHV et SetHm comme demandes non consommatrices. Ces résultats, R1.1 et R2.1, sont très similaires.

R2.1 - Horizon= valeurs historiques - Pas tactique= mois

-	périodes	% déficit C	% déficit NC	% déficit E
déficit total	1931 - 1995	0.1	0	0.65
déficit max annuel	1990	3.90	0	3.4
plus long déficit	déc 1989 - 5	10.25	0	5.00
déficit max mensuel	sep 1990	13.10	0	15.85



Pour observer l'importance de l'optimisation, nous présentons les résultats suivants R2.2 correspondant à une simulation mensuelle avec des valeurs historiques et sans optimisation. Le fonctionnement du système est basé sur des règles de satisfaction des objectifs, mois par mois, sans optimisation stratégique.

R2.2 - simulation tactique - sans optimisation

-	périodes	% déficit C	% déficit NC	% déficit E
déficit total	1931 - 1995	2.75	0.27	1.7
déficit max annuel	1949	32.45	0	7.35
plus long déficit	avr 1949 - 7	38.35	0	9.80
déficit max mensuel	aout 1949	46.4	0	7.8

CONCLUSION

L'application présentée soulève volontairement certaines difficultés pour la mise en oeuvre opérationnelle de l'optimisation : passage du stratégique au tactique, choix de modes de prédiction pertinents. Il convient de faciliter la modélisation et la calibration pour la rendre accessible à des non spécialistes de l'optimisation. Les tests menés montrent le besoin de travailler plus étroitement avec les opérateurs pour les convaincre de l'intérêt de l'utilisation de l'optimisation. A cette fin, il est essentiel de disposer d'un outil d'aide à la décision

associant simulation et optimisation pour pouvoir quantifier les gains d'utilisation de méthodes plus complexes.

Les perspectives en matière de recherche et développement sont très grandes pour aboutir à des modèles de plus en plus intégrés. Nous n'avons évoqué dans notre application que l'aléa lié aux apports et non celui lié aux demandes. Il apparaît ainsi important de prendre en compte les stratégies d'agriculteurs ; la méthodologie d'optimisation sur des arbres de scénarios stochastiques développée dans WARSYP pourrait être ici utilisée avec profit. L'intégration des contraintes de qualité constitue un objectif majeur. De même, suivant les systèmes étudiés, l'intégration d'un fonctionnement plus fin des nappes souterraines, ou des temps de transfert dans les biefs, peut devenir incontournable pour une réelle gestion intégrée.

NOTE

Ce travail est le produit d'une collaboration entre l'IRD et BRLi au sein du programme européen WARSYP, Water Resource Systems Planning, axé sur l'optimisation de la gestion stratégique des systèmes d'eau. Voir www.mpl.ird.fr/warsyp

BIBLIOGRAPHIE

- JAMIESON, D.G., 'An integrated, multi-functional approach to water resources management', *Hydrol.Sci.Bull.*, dec. 86, Vol. 31, NO. 4, p 501-514
- Journal of Hydrology 1996. *Journal of Hydrology*, 'Special issue : Decision-support systems', VOL.177, NOS. 3-4, 1 avril 1996.
- LE GOULVEN, P. & al. 'Dynamiques, Impacts et Valorisation des Hydro-Aménagements (DIVHA)', Dossier de demande de création d'unité IRD, fév 2000, 53 p.
- POUGET, J.C., 'Conception d'un environnement générique d'aide à la gestion des ressources en eau : de l'analyse à la maquette', Rapport relatif au projet européen WARSYP, convention IRD/ORSTOM - BRLi, juin 1999, 45 p. + annexes
- VALIRON, F., *Gestion des eaux : automatisation.informatisation.télégestion*, Presses de l'Ecole nationale des Ponts et chaussées, 1988, ISBN 2-85978-112-9, 551 p.
- WARSYP 2000. Projet européen WARSYP, 'Water Resource Systems Planning', Rapport final, Madrid, 31 mai 2000, 210 p.