

ADEAUMIS, un outil pour estimer la demande en eau d'irrigation à l'échelle régionale

Exemple d'utilisation en temps de crise

Delphine Leenhardt^a et Jean-Luc Trouvat^b

Comment améliorer l'estimation de la demande en eau d'irrigation sur un périmètre irrigué en cours de saison, particulièrement dans le Sud-Ouest de la France où l'irrigation tient une place stratégique ? Pour répondre à cette question, les auteurs expliquent comment ils sont parvenus à réaliser et à tester un outil d'aide à la décision – ADEAUMIS – en adoptant une démarche participative qui a impliqué chercheurs, ingénieurs et gestionnaire. Après une description de la démarche méthodologique et la simulation d'une période de crise, les résultats sont commentés ainsi que les perspectives de développement pour une utilisation en routine.

Avec l'augmentation de la croissance démographique et des activités humaines polluantes, la ressource en eau douce est menacée et la gestion de l'eau devient un enjeu partout dans le monde, même là où les ressources peuvent être considérées comme suffisantes (*Le Monde diplomatique*, 2002). La Gascogne ne fait pas exception. Le développement de l'irrigation y est important et représente plus de 90 % des consommations en eau en période estivale, alors même que les rivières gasconnes, au régime pluvial, s'assèchent en été. L'existence conjointe de rivières vivantes et d'une pratique importante de l'irrigation repose sur un système de réalimentation des rivières appelé « système Neste » (encadré 1, p. 39) et sur sa gestion, déléguée par l'État à une société d'aménagement régionale, la Compagnie d'aménagement des coteaux de Gascogne (CACG). En 1998, des difficultés de gestion ont été causées par un retard des cycles végétatifs et un tarissement précoce des cours d'eau. Cette situation climatique atypique a conduit le gestionnaire de la ressource en eau à répondre positivement à une offre de recherche concernant l'utilisation de modèles agronomiques à l'échelle régionale.

Du côté de la recherche agronomique, la gestion de l'eau était abordée surtout à l'échelle parcellaire, que ce soit par expérimentation ou par modélisation. Deux directions de recherche ont été amorcées à l'INRA de Toulouse à partir

des années 1996-1997. La première consistait à étudier la mise au point d'outils pour aider à la gestion de l'eau à l'échelle locale, en mobilisant les modèles de culture (modèles biophysiques dynamiques simulant l'évolution de la culture et du bilan hydrique à un pas de temps journalier) et en intégrant des avancées méthodologiques sur la conceptualisation des décisions d'irrigation à un niveau intermédiaire entre les échelles organisationnelles de la parcelle (pas de contrainte de matériel) et de l'exploitation dans son ensemble (prise en compte des facteurs généraux de production et des contraintes aussi bien matérielles, humaines qu'économiques).

Cette première direction de recherche a débouché sur le développement d'outils comme MODERATO (Bergez *et al.*, 2001). La seconde consistait à étudier les conditions d'utilisation des modèles dynamiques de culture, généralement développés à l'échelle parcellaire, à des questions de gestion de l'eau posées à une échelle régionale. Un élément majeur de ce changement d'échelle était constitué par la possibilité de couplage des modèles agronomiques avec des systèmes d'information géographiques (SIG). Bien que ceux-ci existaient depuis plus de 30 ans, leur utilisation en agriculture et pour la gestion des ressources naturelles ne datait que de 10 ans (Burrough, 1986). Parallèlement, les premiers efforts d'interface entre SIG et modèle (datant du milieu des années 1980) n'avaient pas réellement

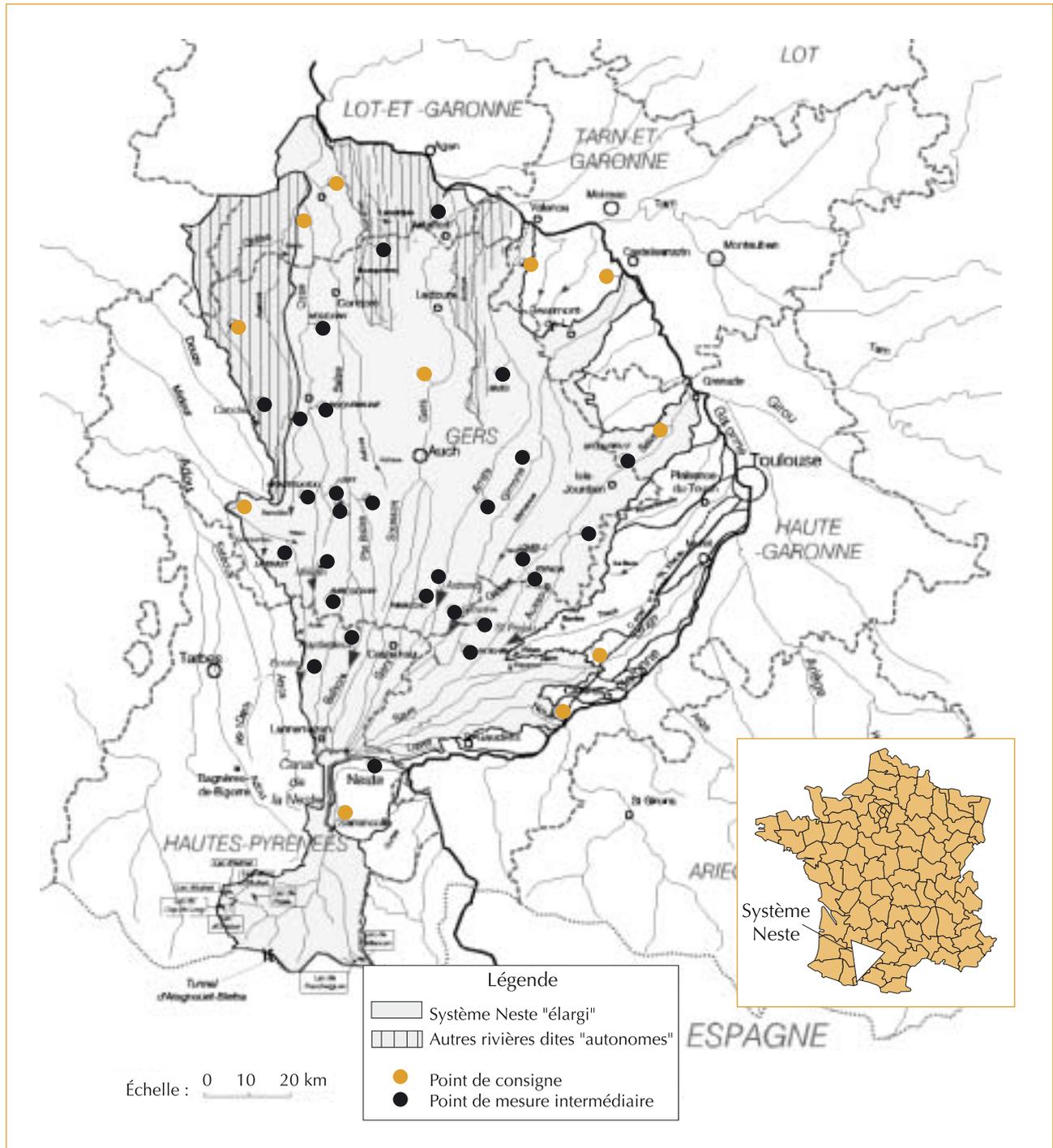
Les contacts

^a INRA, UMR ARCHE, BP 27, 31326 Castanet-Tolosan Cedex
^b CACG, Chemin de l'Alette, BP 449, 65004 Tarbes Cedex

▼ Figure 1 – Situation géographique du système Neste (source CACG).

concerné les modèles dynamiques de simulation (Nyerges, 1991). De plus, il apparaissait dans ces travaux une totale absence de prise en compte et de modélisation des décisions de l'agriculteur (Hartkamp *et al.*, 1999).

La rencontre entre chercheurs (INRA) et gestionnaire (CACG) s'est organisée autour d'une question « régionale » de gestion de l'eau : mieux estimer en cours de campagne d'irrigation les volumes prélevés et restant à prélever pour



Encadré 1

(Source : Préfecture du Gers)

Le système Neste

Au XIX^e siècle, on eut l'idée de détourner une partie des eaux de la Neste (ruisseau de montagne affluent de la Garonne) et de l'utiliser pour alimenter artificiellement les cours d'eau gascons. **Ainsi, entre 1848 et 1862, fut construit le canal de la Neste, d'une longueur de 28 km**, pour acheminer l'eau de manière gravitaire (grâce à une faible pente) de Sarraucolles, lieu de prise du canal, jusqu'au plateau de Lannemezan où la plupart des cours d'eau gascons prennent leur source. Afin de répondre au développement des activités humaines et aux besoins de l'alimentation en eau potable et de salubrité, **la capacité du canal de la Neste a été portée de 7 à 14 m³/s vers 1950**. Parallèlement, une partie des réservoirs de haute montagne, gérés par la Société hydroélectrique du Midi et stockant les eaux de printemps pour la période estivale ont été mis à disposition de la réalimentation de la Neste (pour un volume de 48 Mm³).

La Compagnie d'aménagement des coteaux de Gascogne, créée en 1960, devient gestionnaire de ce réseau d'alimentation d'eau que l'on appelle désormais le système Neste. Les besoins allant toujours croissants, les décennies suivantes voient la construction de nouveaux réservoirs situés, eux, en tête de rivière. Il s'agit de Miélan sur l'Osse (1967), Astarac sur l'Arrats (1976), Puydarrieux sur la Baïse (1987), Lunax sur la Gimone (1991), ainsi que d'autres barrages de moindre taille (Baradée, Tillac...) portant l'ensemble des réserves (montagnes + coteaux) à 105 Mm³.

l'irrigation sur l'ensemble du périmètre irrigué. Avec également la collaboration de partenaires spécialistes de télédétection et météorologie, un travail de co-construction a eu lieu dans le but d'améliorer le modèle de gestion stratégique de la CACG, tout en respectant les contraintes spécifiques du gestionnaire, notamment la date d'opérationnalité de l'outil.

Dans cet article, nous précisons la question du gestionnaire, en la replaçant dans son contexte de gestion de l'eau, puis nous décrivons succinctement l'outil ADEAUMIS qui a résulté de cette collaboration. Nous insistons, dans une dernière partie, sur l'appropriation d'ADEAUMIS par le gestionnaire qui a eu lieu au cours de l'été, sec et caniculaire, de 2003.

La question du gestionnaire**Le contexte de gestion de l'eau****LE TERRITOIRE IRRIGUÉ**

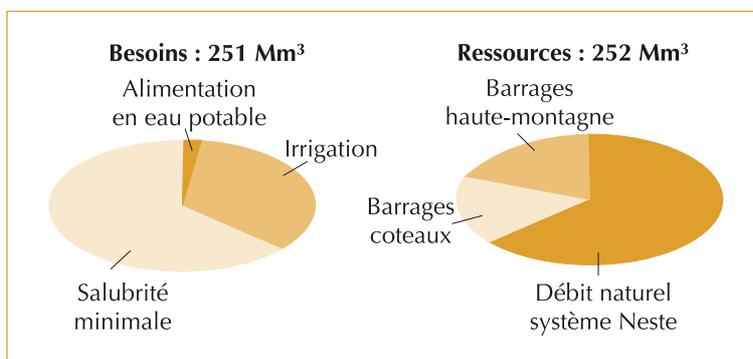
Situé dans le sud-ouest de la France, le système Neste (figure 1 et encadré 1) est un espace irrigué de 12 000 km², au système de distribution de l'eau original. En effet, l'ensemble du bassin est approvisionné en eau par les rivières de Gascogne, utilisées comme canaux naturels et réalimentées par (i) des retenues de tête et, (ii) en amont, par des réservoirs de haute-montagne, externes au bassin. Les lâchers des réservoirs pyrénéens et les apports naturels de la Neste sont dérivés, via le canal de la Neste, vers l'ensemble des rivières.

Cette ressource, essentiellement superficielle, doit satisfaire différents usages : l'irrigation de 50 000 ha environ (75 Mm³ en année moyenne et jusqu'à 100 Mm³ en année sèche), l'alimentation en eau potable (200 000 habitants) et le respect du débit objectif d'étiage (DOE) des rivières.

D'un point de vue climatique, les précipitations sont très irrégulières, que ce soit d'année en année ou d'un mois sur l'autre. C'est pourquoi le maïs, le soja ou le pois sont irrigués. Le maïs constitue la principale culture irriguée de la zone, tant par la surface qu'elle occupe que par les volumes en eau qu'elle consomme (Agreste, 2000).

La gestion des retenues suit un cycle annuel avec une période de déstockage estivale débutant au 1^{er} juin et pouvant durer jusqu'en février. Sur le système Neste, le problème majeur reste le maintien de l'équilibre du bilan en volume, pour une année décennale sèche (figure 2).

▼ Figure 2 – Bilan en volume besoins-ressources du système Neste en année décennale sèche (1992) sur la période du 1^{er} juin au 1^{er} décembre.



1. Sur le système Neste, on définit comme défaillance, une situation où le volume des ressources en eau (stockées et naturelles) est insuffisant et ne permet pas la satisfaction des usages contractuels (prélèvements d'irrigation sans restriction de quota, eau potable et salubrité minimale des rivières).

LES RELATIONS GESTIONNAIRE-IRRIGANTS

Le système Neste, géré par concession d'État à une société d'aménagement régionale, la CACG, doit être piloté de manière la plus précise possible en raison d'un bilan ressource/usage de l'eau tout juste en équilibre. En pratique, cette gestion consiste à réajuster le niveau de satisfaction des usages (autorisations de prélèvements d'eau, définition du niveau de salubrité en rivière et des éventuelles mesures de restrictions) compte tenu de l'hydraulicité réelle et d'un risque de défaillance¹ admissible. On parle de gestion stratégique pour cette gestion des volumes. Pour gérer ce système, la CACG dispose d'outils contractuels, techniques et de concertation.

Ainsi, en mars généralement, un contrat annuel doit être établi entre le gestionnaire et tout préleveur. Les droits (volume d'eau garanti) et devoirs (respect du débit et du volume souscrit) du préleveur γ sont fixés. L'unité de débit souscrit est le litre par seconde (l/s). Le quota (volume d'eau garanti par unité de débit souscrit) est finalisé en juin par la « Commission Neste » en fonction du niveau de remplissage des réserves. Cet organe de concertation, qui rassemble les représentants des élus (5 départements, 2 régions), des administrations, de la profession agricole, des irrigants et des autres partenaires (agence de l'Eau, EDF, usagers, pêcheurs, associations), peut également réviser ce quota en cours de saison si nécessaire. En année normale, le quota est de 4 000 m³ par litre/seconde souscrit par l'irrigant.

Dans ces limites de débit et de volume, l'utilisateur utilise son droit d'eau à sa guise, le gestionnaire n'intervenant pas dans les choix techniques de l'irrigant (assolements, pratiques d'irrigation...) : aucune information relative aux systèmes de culture irriguée n'est donc mentionnée dans le contrat.

LE MODÈLE DE GESTION STRATÉGIQUE

Le modèle de gestion stratégique utilisé sur le système Neste fait partie des outils « techniques » dont dispose également le gestionnaire. Il fonctionne à partir du superviseur de gestion RIO, conçu par la CACG. Ses principes sont détaillés par Trouvat (2001) et Leenhardt *et al.* (2004a).

En cours de période de réalimentation, l'objectif du modèle est de déterminer le niveau d'allocation de l'eau aux différents usages (niveau de salubrité à maintenir, restrictions sur les usages). Le modèle effectue une prévision de déstockage

de des réservoirs jusqu'en fin de campagne. Le résultat est comparé à des courbes-types de vidange, tracées pour différents risques de défaillance (figure 6, p. 47). Le calcul de ces courbes statistiques ainsi que les prévisions de déstockage effectuées en cours d'étiage s'appuient sur un module d'estimation des prélèvements d'eau par l'irrigation. Il s'agit d'un modèle de bilan hydrique dont les entrées sont les cultures irriguées de l'assolement, des données climatiques décennales de stations météorologiques voisines, une estimation de réserve utile du sol dominant et des coefficients culturaux décennaux moyens de la culture.

Ce module calcule le besoin en eau d'irrigation, lequel est corrigé par des coefficients empiriques intégrant le comportement d'irrigants et des effets de quotas (les irrigations effectives sont inférieures aux besoins en eau des cultures). Les besoins en eau des cultures sont calculés par unités de surface puis multipliés par la surface irriguée, estimée à partir du débit souscrit (Leenhardt *et al.*, 2004a).

Un besoin d'amélioration issu de l'analyse d'une défaillance

LA CRISE DE 1998

Le modèle de gestion stratégique a été mis en difficulté lors de l'année 1998. En effet, un printemps pluvieux a décalé les dates de semis des cultures et une période froide en juin a rallongé le cycle de culture. Enfin, les cours d'eau ont tari précocement, ce qui a conduit le gestionnaire à déstocker de façon importante très tôt dans la saison pour respecter le DOE à l'aval du système.

Fin juillet, les spécifications du bilan hydrique standard utilisé par le modèle de gestion indiquaient que, d'un point de vue statistique, l'essentiel des besoins d'irrigation était passé. Or, il s'est avéré que le cycle cultural ayant été retardé de 15 jours, ces besoins de pointe restaient encore à satisfaire. Le modèle décisionnel de RIO a donc minimisé le risque de défaillance et n'a pu donner d'indicateur de crise que tardivement dans la saison.

C'est sur la base des informations de terrain, et non plus sur les recommandations du modèle de gestion que le gestionnaire a anticipé sur la situation de crise en déclenchant les procédures adaptées.

SPÉCIFICATIONS POUR UN NOUVEL OUTIL

L'analyse conjointe de la « crise de 1998 », des besoins du gestionnaire et des caractéristiques du modèle de gestion stratégique ont conduit à définir le cahier des charges du nouvel outil ADEAUMIS. En particulier, le choix de développer un outil de modélisation s'appuyait d'une part, sur la volonté du gestionnaire d'améliorer progressivement le système existant et d'autre part, sur l'objectif scientifique d'étudier les conditions d'utilisation à une échelle régionale de modèles agronomiques développés à l'échelle parcellaire.

Les prélèvements en eau d'irrigation étant déterminés par le développement des cultures, il semblait nécessaire de mieux représenter celui-ci, tant par le positionnement de son démarrage (dates de semis) que par sa longueur (durée du cycle cultural), variables d'une année sur l'autre selon les conditions climatiques. Or, dans le modèle de gestion préexistant, les données climatiques utilisées sont des statistiques calculées sur des données passées et un cycle cultural moyen est

fourni en entrée du modèle de bilan hydrique. Pour pallier ces insuffisances, le nouvel outil devait donc baser le démarrage et le développement des cultures sur les facteurs climatiques de l'année en cours. (tableau 1, ligne 1)

En outre, comme la variable à estimer est le prélèvement d'irrigation, le calcul du besoin en eau des cultures ne s'avérait pas indispensable, d'autant qu'il impliquait, dans le cas du modèle de gestion stratégique, des coefficients empiriques dont la détermination dépend du modèle utilisé (tableau 1, ligne 2).

Enfin, une grande variabilité de comportement des agriculteurs nous semblait plausible. Cette hypothèse, vérifiée par la suite soit par enquêtes (Salles, 2003) soit par analyse des consommations (Leenhardt *et al*, 2004b), invalidait l'hypothèse de correspondance entre débit souscrit et surface irriguée. C'est pourquoi, nous avons envisagé la possibilité d'estimer la surface irriguée en mobilisant des données d'observation de la terre (tableau 1, ligne 3).

RIO		Cahier des charges pour ADEAUMIS
Représentation statistique du développement des cultures	→	Simulation du développement réel des cultures pour l'année en cours
Utilisation de séries climatiques historiques		Utilisation des données climatiques de l'année
Développement des cultures indexé à des coefficients culturaux fixes et invariables		Simulation du développement des cultures en fonction des sommes de températures
Date de semis unique et invariable		Représentation des dates de semis de l'année en cours
Estimation du besoin des cultures	→	Estimation directe des prélèvements par les agriculteurs
Correction statistique pour tenir compte du comportement des agriculteurs		Connaissance et simulation des stratégies d'irrigation
Estimation de surface irriguée à partir du débit souscrit	→	Amélioration des estimations par utilisation de données satellitaires
Estimation de l'assolement à dire d'expert		
Données et modèles doivent être disponibles dès le début de mois de juin au plus tard pour pouvoir faire les premières estimations qui permettent de fixer les quotas d'eau d'irrigation attribués aux agriculteurs par le gestionnaire		

▲ Tableau 1 – Descriptif du modèle de gestion stratégique du superviseur RIO et cahier des charges pour ADEAUMIS.

Dans tous les cas, ce nouvel outil devait satisfaire les contraintes temporelles du gestionnaire, à savoir être opérationnel dès le début de juin pour pouvoir engager la gestion courante (validation des quotas attribués aux agriculteurs, premières estimations de besoins).

Description de l'outil ADEAUMIS

ADEAUMIS a été décrit en détail par Leenhardt *et al.* (2004a et b). Nous présentons ici les grandes lignes de l'outil, constitué d'un modèle de calcul et d'une base de données spatialisées, sa mise en œuvre à l'échelle du périmètre irrigué et des éléments de validation et de discussion.

Le modèle de calcul

Le modèle ADEAUMIS permet de calculer le prélèvement unitaire (c'est-à-dire par unité de surface) en eau d'irrigation. Ce calcul est fait par activation, à l'aide d'un modèle biodécisionnel, de règles de décision représentant les pratiques d'irrigation des agriculteurs. Le module décisionnel s'inspire du concept développé par Bergez *et al.* (2001) dans MODERATO. Les règles de décisions sont représentées sous la forme « Si un indicateur atteint un certain seuil, alors une action est déclenchée ».

Ici, les indicateurs sont des variables climatiques (pluie, évapotranspiration potentielle) ou des stades culturaux ; l'action déclenchée est l'irrigation, avec une dose spécifique, variable selon le stade du maïs. Le module biophysique correspond à un modèle de développement phénologique de la culture, basé sur les sommes de température. Il permet de simuler les stades culturaux utilisés comme indicateurs dans les règles de décision du module décisionnel. En définitive, une fois paramétré (c'est-à-dire seuils et doses d'irrigation spécifiés pour les règles de décision, seuils de sommes de température pour la culture) et initialisé (par la date de semis), le modèle biodécisionnel utilise comme données d'entrée uniquement des variables climatiques.

Mise en œuvre à l'échelle du périmètre irrigué

L'ensemble de la zone d'étude (le périmètre irrigué) est stratifié en unités de simulation (u) homogènes vis-à-vis des paramètres et données d'entrée du modèle biodécisionnel décrit ci-dessus. Le modèle est alors activé sur chacune de ces unités. Le résultat recherché, la demande

en eau d'irrigation sur l'ensemble du périmètre, D , est obtenu en réalisant une somme, sur les unités de simulation, des prélèvements unitaires, p , pondérés par la surface irriguée, s :

$$D = \sum_u p(u).s(u)$$

Les paramètres et données d'entrée du modèle biodécisionnel ainsi que les estimations de surfaces irriguées sont intégrés dans une base de données spatialisée. Compte tenu des méthodes d'estimation mobilisées pour acquérir ces différentes informations (cf. paragraphe suivant), la base de stratification utilisée pour définir les unités de simulation n'est pour l'instant que climatique.

La base de données spatialisées

La base de données associée au modèle de calcul, et permettant l'utilisation de celui-ci comporte des données relatives :

- aux données climatiques,
- aux cultures et pratiques culturales,
- aux surfaces irriguées.

Les données climatiques sont des données journalières de pluie, ETP et températures minimum et maximum, interpolées en points de grille régulière à partir des données mesurées aux stations météorologiques automatiques et synoptiques de Météo-France. Ces stations permettent un accès aux données climatiques deux jours après la mesure. La grille a une maille de $0,125^\circ$ (soit environ 12,5 km) de côté. La méthode d'interpolation utilisée est une pondération en fonction de la distance.

La culture du maïs étant de loin la culture irriguée la plus importante, le modèle a donc été paramétré pour le maïs. Les paramètres considérés sont les sommes de températures nécessaires pour passer d'un stade à l'autre. Ces paramètres ont été spécifiés pour une variété tardive, largement dominante sur le secteur d'étude.

Des données relatives aux dates de semis ont été calculées pour l'ensemble de la zone et intégrées dans la base. Le calcul est basé sur une règle de décision de semis appliquée en chacun des points de la grille climatique entre le 7 avril et le 31 mai. La règle de décision spécifie que si la pluie des 3 derniers jours est inférieure à 9 mm et celle du jour est inférieure à 5 mm, alors il est

possible de semer le jour suivant. Parmi la série des jours possibles pour le semis ainsi déterminés, on retient la date médiane comme jour de semis utilisé pour les simulations.

Les données relatives aux pratiques d'irrigation correspondent aux spécifications d'un corps de règles de décision d'irrigation (RDD) : une règle de déclenchement de l'irrigation, une règle de retour de l'irrigation, une règle d'attente en cas de pluie et une règle d'arrêt de l'irrigation. La spécification des indicateurs, seuils et valeurs d'apports d'eau résultent d'une synthèse de don-

nées d'enquêtes auprès d'agriculteurs (tableau 2). Sans les exprimer explicitement, ces RDD intègrent un certain nombre de contraintes matérielles : par exemple les doses et fréquences d'irrigations sont fortement liées au contexte d'équipement. Le pas de temps de raisonnement de l'agriculteur étant le jour, cela nous a conduit à utiliser des données météorologiques journalières.

Les surfaces irriguées ont été acquises selon des méthodes permettant une estimation précoce de leur valeur, de manière à être compatibles avec

Règle	Si	Condition			Alors	Action	
		Indicateur	Opérateur	Seuil			Volume d'eau apporté
Déclenchement	et et et	Jour	≥	15 juin	Irrigation	20 mm	
		Stade cultural	≥	10-11 feuilles			
		Pluie des 5 derniers jours	<	10 mm			
		ETP des 5 derniers jours	>	15 mm			
Retour (sans pluie)		Temps depuis la dernière irrigation	≥	10 jours	Irrigation	28 mm avant floraison, 34 mm pendant et après floraison, 32 mm à partir du début de la sénescence	
Attente (en cas de pluie)		Cumul des pluies journalières (au-delà de 2 mm) sur les 5 derniers jours *	≥	16 mm	Pas d'irrigation avant min (7, $CP_5/5$) jours		
Arrêt	et et	Stade cultural	≥	50 % d'humidité du grain	Fin de l'irrigation		
		Pluie des 7 derniers jours	>	20 mm			
		ETP des 7 derniers jours	<	25 mm			
	Sinon						Dernière irrigation

* Ce cumul est noté CP_5 .

▲ Tableau 2 – Spécification des règles de décision utilisées pour décrire une stratégie d'irrigation moyenne sur le secteur des Baïses.

2. Recensement général de l'agriculture.

l'utilisation de l'outil de gestion stratégique. Trois méthodes ont été testées (Leenhardt *et al.*, 2004a et b), mais nous ne présentons ici que la méthode ayant fourni les valeurs les plus proches des estimations de surfaces irriguées faites à partir du RGA² de 2000. Il s'agit de la méthode actuellement utilisée par la CACG et basée sur l'observation d'une corrélation entre débit souscrit Q et surface irriguée SI : $SI = Q/e$. Le coefficient e représente un niveau d'équipement moyen en matériel d'irrigation. Le débit souscrit total Q est accessible par sommation des débits souscrits par les irrigants de la zone d'étude, lesquels sont spécifiés dans les contrats passés avec le gestionnaire.

Validation et discussion

La validation d'ADEAUMIS a été réalisée en confrontant données estimées et données observées pour les années 1998 et 2000 sur une partie du système Neste : le secteur des Baïses (500 km²). Cette validation a été conduite par étapes : d'abord en validant les méthodes d'estimation des données relatives aux dates de semis et surfaces irriguées, puis en évaluant les estimations de volumes prélevés par irrigation. Nous ne reviendrons pas sur ces évaluations qui sont détaillées dans Leenhardt *et al.* (2004b). Les principales conclusions sont les suivantes :

- il y a une bonne adéquation globale entre les volumes simulés et consommés, mais cette affirmation doit être modérée par le fait qu'on n'a accès qu'à une estimation des volumes réellement consommés ;
- une telle adéquation est permise par (i) un équipement généralement confortable des exploitations conduisant à une certaine homogénéité des pratiques d'irrigation (malgré une diversité des conduites, on ne peut identifier statistiquement qu'une seule stratégie d'irrigation ; Maton *et al.*, 2004) ; (ii) la prédominance du maïs au sein de la sole irriguée et le fait que l'irrigation du soja (deuxième culture irriguée) est le plus souvent calquée sur celle du maïs ;
- les règles de décision utilisées dans le modèle biodécisionnel permettent globalement de bien restituer la dynamique des prélèvements sur l'ensemble du système ; toutefois, elles pourraient être améliorées pour mieux prendre en compte l'anticipation des orages par les agriculteurs et leur propension à irriguer rapidement lors de périodes chaudes en début de cycle ;

– le débit souscrit n'est pas un bon indicateur de la surface irriguée (Salles, 2003). De fait, il existe une vraie disparité du rapport entre surface irriguée et débit souscrit au sein des systèmes collectifs, permise par le fait que le quota en volume est attribué au collectif et non aux individus. Aussi, même si la méthode d'estimation de la surface irriguée basée sur les débits souscrits fournit des résultats acceptables dans nos conditions d'étude, des efforts doivent être conduits pour développer une méthode d'estimation précoce des surfaces irriguées.

Appropriation d'ADEAUMIS par le gestionnaire

L'appropriation d'ADEAUMIS par le gestionnaire s'est faite en plusieurs étapes : d'abord en participant à la conception, à la construction et à la validation sur 1998 et 2000 d'ADEAUMIS, puis en rejouant le scénario de 1998 qui avait alors posé des problèmes de gestion, enfin, en utilisant ADEAUMIS en temps réel en 2003. Nous détaillons ici ces deux dernières étapes.

Test *a posteriori* sur l'année 1998

Le premier test d'ADEAUMIS a consisté à vérifier qu'ADEAUMIS permettait de mieux prendre en charge la situation atypique de 1998. Ce test a été fait sur le secteur des Baïses uniquement.

En conséquence, le gestionnaire s'est remis en situation du 1^{er} août 1998 et a utilisé les estimations de volumes en eau prélevés à cette date par ADEAUMIS, comme il aurait utilisé les sorties de son modèle de gestion stratégique.

La figure 3 montre qu'au 1^{er} août 1998, le modèle de gestion stratégique de la CACG estimait (en se mettant en condition d'année décennale sèche) que 14,71 Mm³ avaient été prélevés et qu'il restait à fournir $N = 6,64 \text{ Mm}^3$ (21,35 – 14,71). L'essentiel des prélèvements était donc considéré comme passé. Par contre, avec ADEAUMIS, les prélèvements au 1^{er} août 1998 sont estimés à 7,81 Mm³, valeur proche des données observées à partir des relevés de compteurs (7,87 Mm³). Avec une telle estimation des prélèvements passés, le gestionnaire considère alors qu'il peut avoir à fournir $N' = 13,54 \text{ Mm}^3$ si l'on se situe en année décennale sèche pour laquelle les besoins totaux en eau d'irrigation sont estimés à 21,35 Mm³.

L'utilisation d'ADEAUMIS en 1998 aurait donc permis au gestionnaire de détecter le retard des irrigations et de mieux estimer les prélèvements à venir. Ce test a permis au gestionnaire de s'assurer de la crédibilité d'ADEAUMIS.

2003 : première utilisation en temps réel

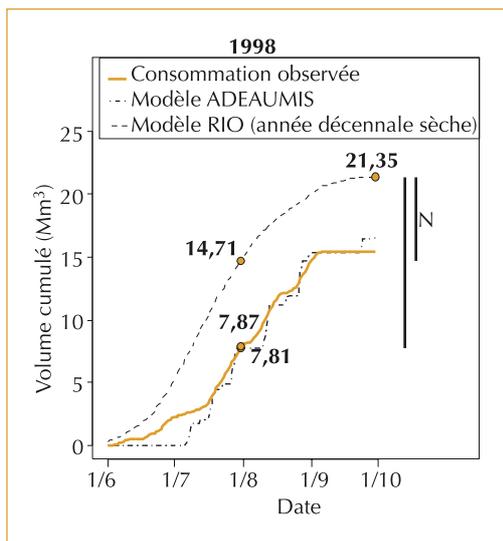
CONTEXTE CLIMATIQUE DE L'ANNÉE 2003 SUR LE SYSTÈME NESTE

Dès février, la pluviométrie est déficitaire alors que des températures nettement excédentaires accentuent ce début de sécheresse. À partir de fin mai et jusqu'à fin août, le Sud-Ouest connaît de fortes chaleurs, notamment en juin et la première quinzaine d'août. Les températures battent tous les records depuis 50 ans (à Toulouse, on a enregistré 60 jours durant lesquels elles furent supérieures ou égales à 30 °C, avec 31 nuits supérieures ou égales à 20 °C). Dans le même temps, les cumuls de précipitations sont très irréguliers et faibles. Sur la période mars-août, le déficit pluviométrique atteint ou approche des records (supérieur à 60 % sur une grande partie de Midi-Pyrénées [CACG, 2003]). Dans ce contexte, les cours d'eau tarissent rapidement et fortement dès la première quinzaine de juin, sollicitant les réserves disponibles de manière précoce, prolongée et intense.

Le caractère exceptionnel de la situation climatique depuis le printemps laissant augurer une gestion de la ressource en eau difficile, le gestionnaire a souhaité valoriser ADEAUMIS. Nous présentons ici d'abord les problèmes qu'il a fallu résoudre pour cette première utilisation en temps réel du modèle, puis les apports qu'en a tirés le gestionnaire en termes d'estimation des prélèvements d'eau par irrigation, et de décisions de gestion.

LES PROBLÈMES POSÉS PAR UNE APPLICATION EN TEMPS RÉEL

En 2003, la procédure d'ADEAUMIS disponible est la maquette ayant servi à la validation des années antérieures. En l'absence de version opérationnelle de l'outil, les intrants de l'année ne sont donc pas directement disponibles. En particulier, l'alimentation de la base de données spatialisée reste nécessaire dans un délai très court : c'est pourquoi le gestionnaire a privilégié des hypothèses simples, corroborées par des observations de terrain pour évaluer les intrants nécessaires.



◀ Figure 3 – Comparaison des consommations simulées par RIO et ADEAUMIS (traits pointillés) et des consommations observées (trait continu) pour l'année 1998.

Acquisition des données d'entrée

Les données climatiques en points de grille n'étant pas fournies en temps réel au gestionnaire, les postes Météo-France dont les valeurs de pluie, température et ETP faisaient déjà l'objet d'acquisitions journalières à J + 1 sont utilisés. Cette simplification, par utilisation des stations directement plutôt que des points de grille, avait été vérifiée comme étant acceptable au cours des tests réalisés sur les années 1998 et 2000. Comme indiqué ci-avant, la surface irriguée est calculée à partir des débits souscrits. Les valeurs de débits utilisées sont celles de 2003.

En ce qui concerne l'assolement irrigué, on a pris les mêmes hypothèses que dans les versions testées en 1998 et 2000 : on a considéré qu'il était composé à 100 % d'une variété tardive de maïs. Les dates de semis ont été estimées par sous-secteur agricole sur la base d'expertises de terrain. Les valeurs des paramètres de règles de décision (RDD) d'irrigation intégrés pour 2003 sont identiques à celles utilisées pour 1998 et 2000.

Construction de scénarios climatiques

En cours de campagne, ADEAUMIS ne peut plus être utilisé comme précédemment, c'est-à-dire avec des séries climatiques complètes. Deux phases sont à distinguer :

– jusqu'à la date de calcul j, les données climatiques enregistrées permettent une estimation journalière des prélèvements agricoles passés ;

– à partir de $j + 1$, les prévisions de besoins dépendent d'un scénario climatique défini par le gestionnaire.

En 2003, la stabilité météorologique estivale a facilité cette seconde étape : les prévisions n'intègrent aucune pluie à venir ; les valeurs de température et ETP de la semaine à venir (de $j + 1$ à $j + 7$) sont prises égales à celles du jour j , des valeurs moyennes mensuelles étant considérées au-delà de $j + 7$.

Changement d'échelle

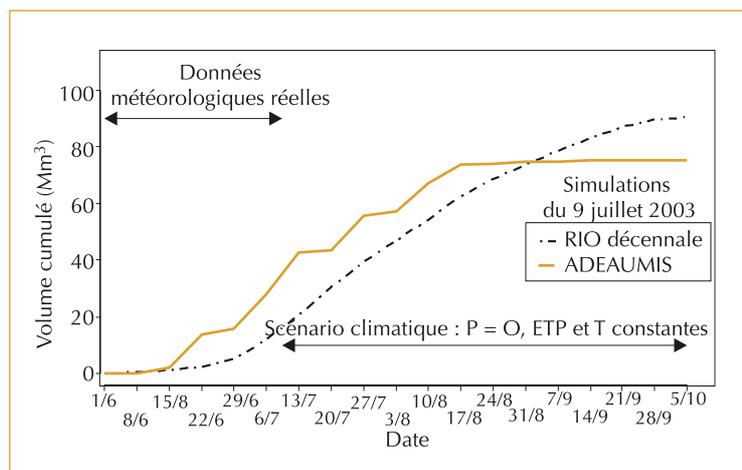
En l'état du modèle, la définition des RDD restait spécifique au secteur des Baïses. Dans l'urgence, l'analyse 2003 s'est appuyée sur l'hypothèse forte que ce sous-secteur était représentatif de l'ensemble du système géré. Les estimations de consommations agricoles (D) sont donc calculées pour la région des Baïses puis extrapolées au système Neste par simple prorata des débits souscrits (Q) entre les deux secteurs géographiques :

$$D_{Neste} = D_{Baïse} \cdot (Q_{Neste} / Q_{Baïse})$$

LES RÉSULTATS OBTENUS

Un des rôles du gestionnaire consiste à suivre des indicateurs de défaillance et, en cas de pénurie, à alerter l'administration et les différents partenaires avant une éventuelle prise de décision (mise en place de restrictions des usages). Le principal indicateur est le volume cumulé des retenues du système Neste, comparé de façon hebdomadaire aux courbes de vidange-type (cf. page 40 « Le modèle de gestion stratégique ») tracées pour différents risques de défaillance.

▼ Figure 4 – Prélèvements cumulés sur le système Neste en 2003, simulés par RIO (année décennale sèche) ou par ADEAUMIS (données climatiques réelles jusqu'au 09/07 puis scénario sec).



Deux dates clés, 9 et 29 juillet, s'individualisent en 2003 : le volume global stocké y devient inférieur à la courbe de vidange-type correspondant à un risque de défaillance de $1/3$, pour la première date, puis de $1/2$ pour la seconde date. Des prévisions de consommations en eau d'irrigation ont donc été calculées par ADEAUMIS à ces deux dates, puis comparées à une courbe statistique correspondant à des prélèvements décennaux secs. Cette courbe de comparaison est celle utilisée dans le modèle de gestion stratégique RIO ; elle résulte d'un calcul de bilan hydrique appliqué sur le système Neste sur 31 années (1961-1991).

Simulation du 9 juillet 2003

La première simulation (figure 4) montre clairement que le cycle cultural est globalement en avance de 15 jours par rapport à la dynamique standard utilisée dans le modèle de gestion stratégique. Le volume cumulé des besoins (75 Mm^3) atteint un niveau inférieur aux besoins décennaux secs (90 Mm^3) avec un arrêt des irrigations prévu au 10 août environ. Si une telle situation reste tendue au niveau de la gestion des retenues, elle n'en représente pas pour autant une année exceptionnelle du point de vue des consommations agricoles.

Du point de vue du gestionnaire, c'est la confrontation entre ce niveau de consommation et les ressources disponibles qui importe : vu les conditions climatiques, les ressources naturelles font déjà défaut, les déstockages ont été rapides et les courbes indicateur annoncent un risque marqué de défaillance (plus d'une chance sur trois de ne pas pouvoir satisfaire l'ensemble des besoins).

La difficulté de décision porte sur la fiabilité du scénario joué. En particulier, l'arrêt des irrigations prévu par ADEAUMIS au 10 août est-il crédible ? Si tel est le cas, le déstockage prévu jusqu'en fin d'été reste compatible avec la satisfaction des besoins de salubrité minima. Sinon, le maintien des DOE dans les rivières (à assurer jusqu'en fin février) ne pourra être garanti.

Le gestionnaire, comme la profession, estime qu'à cette date, le scénario climatique choisi (non déterministe) garde un poids trop important sur les prévisions effectuées : toute décision est alors différée.

Simulation du 29 juillet 2003

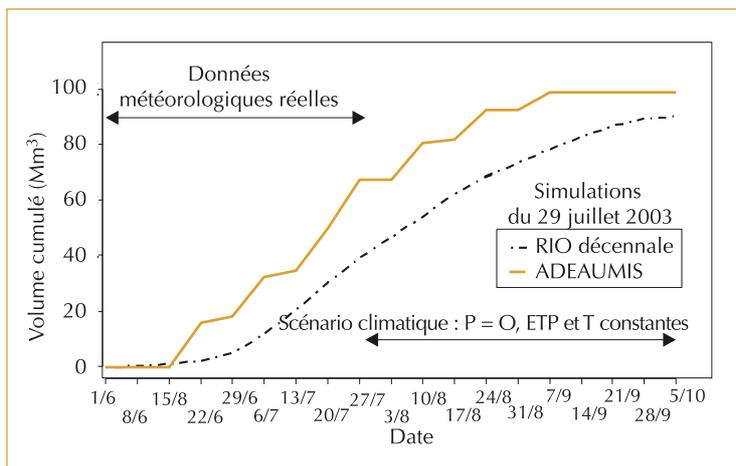
Le 29 juillet, la tendance climatique s'est légèrement détériorée avec des niveaux de température et d'ETP plus critiques (à Auch, l'ETP journalière atteint 7,5 mm alors que les températures maximales approchent 40 °C) ainsi qu'un rythme de déstockage des retenues accentué : le risque de défaillance est devenu évident (passage en dessous de la courbe indicateur 1/2). De plus, les informations de terrain (conseillers techniques notamment) témoignent d'une probable modification de la conduite de l'irrigation : le caractère exceptionnel de la sécheresse diminuant significativement les réserves en eau du sol, des tours d'eau supplémentaires seraient nécessaires pour diminuer le stress hydrique des plantes et sécuriser la production irriguée. C'est pourquoi, afin d'obtenir des prévisions de prélèvement réalistes par ADEAUMIS, le seuil de température définissant le stade phénologique de fin d'irrigation du maïs est modifié (par une valeur largement supérieure).

Cette adaptation de la RDD d'irrigation a pour effet de repousser la date de fin d'irrigation au 7 septembre (figure 5). Les besoins calculés (100 Mm³) deviennent alors supérieurs aux besoins décennaux (90 Mm³), ce qui confirme le caractère extrême de la situation. Parallèlement, les premiers relevés de compteurs de rivière effectués à cette date valident le niveau d'estimation des prélèvements obtenu par le modèle ADEAUMIS (70 Mm³ environ au 29/07).

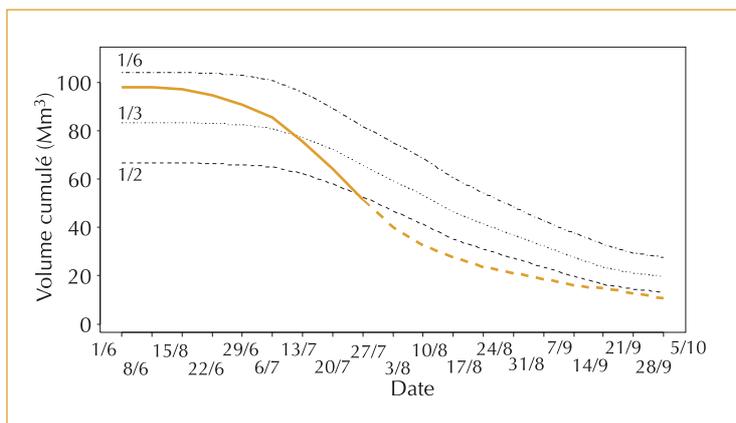
L'intégration de ces résultats d'ADEAUMIS dans le calcul des prévisions de déstockage des retenues (figure 6) fait apparaître un volume résiduel mi-septembre trop faible (16 Mm³) pour assurer les besoins de salubrité à venir [le volume défini par la courbe indicateur 1/2 étant de 20 Mm³]³ : des réductions de quotas deviennent inéluctables. Dès lors, la procédure de crise est déclenchée avec réunion de la Commission Neste. Les discussions portent sur :

- la date prévisible de fin des irrigations,
- l'estimation du niveau de consommation par rapport au quota initial.

3. Suite à la sécheresse de 2003, un arrêté Cadre (arrêté interdépartemental fixant un plan de crise sur le bassin de la Neste en période d'étiage), signé le 23/07/2004, définit une nouvelle courbe d'alerte (CR2). Déduite de la courbe de vidange-type correspondant à un risque de défaillance de 1/2, elle intègre la nécessité de préserver un stock d'eau de 15 Mm³ au 15 septembre pour les besoins de salubrité automnale ; dès que le volume résiduel stocké devient inférieur à CR2, une mesure d'interdiction des prélèvements est prise pour une durée minimale de 5 jours consécutifs.



▲ Figure 5 – Prélèvements cumulés sur le système Neste en 2003, simulés par RIO (année décennale sèche) ou par ADEAUMIS (données climatiques réelles jusqu'au 29/07 puis scénario sec).



▲ Figure 6 – Courbes de défaillances (traits pointillés fins) et courbe de déstockage (trait brun continu et pointillé gras) pour le système Neste en 2003.

Les courbes de défaillances représentent les volumes minima qu'il faut avoir en stock pour satisfaire la demande avec un risque de défaillance donné (par exemple 1 année sur 6, sur 3 ou sur 2). Ces courbes sont établies en fonction des ressources disponibles. La courbe de déstockage représentée ici est une courbe observée jusqu'au 29 juillet (trait continu brun), puis simulée (trait pointillé). Les simulations intègrent les estimations de prélèvements d'irrigations faites avec ADEAUMIS.

Les principaux enjeux sont le maintien de la salubrité des rivières par un soutien d'étiage prolongé et la révision du quota d'eau attribué à l'irrigation.

Les restrictions envisageables sont, pour l'irrigation, une réduction de quota, applicable au quota résiduel (*i.e.* non consommé) et, pour la salubrité, une diminution jusqu'au DCR (débit de crise). Les décisions prises le 4 août, issues d'un compromis entre ces enjeux sont :

- un nouveau quota fixé à 3 700 m³/l/s contre 4 000 m³/l/s sur l'ensemble du système Neste avec des restrictions à 3 000 m³/l/s sur le Bouès et la Nère ;

- l'objectif de salubrité maintenu à 80 % du DOE.

L'ensemble des prélèvements agricoles, hors cultures spécialisées, a été suspendu à partir du 21 août.

Conclusion et perspectives

Le développement d'ADEAUMIS répond à une question finalisée de gestionnaire de la ressource en eau : comment améliorer l'estimation de la demande en eau d'irrigation sur un périmètre irrigué en cours de saison ? Une démarche participative a impliqué chercheurs, ingénieurs et gestionnaire. L'analyse de la question du gestionnaire et du contexte, confronté aux connaissances des chercheurs, a permis de définir le cahier des charges de l'outil. Différentes démarches d'évaluation ont permis de vérifier l'intérêt de l'outil pour la gestion de l'eau : d'abord une validation par confrontation simulé-observé sur les années 1998 et 2000, puis une vérification de la crédibilité de l'outil en rejouant le scénario d'une année difficile (1998) et enfin une mise à l'épreuve en temps réel en 2003.

Les résultats positifs obtenus ont conduit le gestionnaire et ses partenaires à une poursuite des travaux au travers d'un projet labellisé par le réseau de recherche et d'innovation technologique « Eau et technologie de l'environnement » et financé par le ministère de l'Industrie. Il s'agit désormais de rendre l'outil vraiment opérationnel, afin qu'il soit facilement utilisable en routine et non plus seulement en temps de crise. D'autre part, ce projet a pour but d'améliorer la méthodologie de choix de méthodes et modèles dans la construction d'un tel outil. Pour cela, une analyse de sensibilité d'ADEAUMIS va être conduite et permettra, d'une manière générale, d'apprécier les aspects de l'outil à améliorer, et plus spécifiquement, de savoir par exemple s'il est important pour la prise de décision de représenter dans le modèle différentes stratégies d'irrigation.

ADEAUMIS est générique en ce sens qu'il n'est pas spécifique d'un type de ressource en eau. Il est paramétrable : les seuils des règles de décision peuvent être facilement modifiés, ce qui rend le modèle transférable dans des zones où le comportement des irrigants est sensiblement différent ; de même, les dates de semis peuvent être calculées (là encore les règles de calcul sont paramétrables en fonction des conditions locales) ou spécifiées (ce qui est intéressant quand une remontée d'information du terrain existe). Cette paramétrisation des règles d'irrigation ou de semis permet également d'utiliser cet outil pour tester des scénarios portant sur les pratiques agricoles.

ADEAUMIS résulte d'une combinaison d'outils et de méthodes d'acquisition de données qui peut évoluer vers des combinaisons de modèles et outils plus complexes si le besoin s'en fait sentir. Une étude de sensibilité est en cours pour identifier, en fonction des utilisations envisagées, quelles données d'entrée devraient bénéficier de méthodes d'acquisition plus précises et sur quel support (unité de simulation) le modèle doit être mis en œuvre.

Conçu pour être utilisé pour la gestion stratégique du système Neste, ADEAUMIS pourrait également être utilisé pour la planification (par le biais de tests de scénarios) ou pour la gestion en temps réel.

En effet, la version opérationnelle d'ADEAUMIS s'appuie sur la définition d'un scénario climatique. Si, sur quelques semaines, le scénario reste purement hypothétique, par contre sur deux jours, des prévisions météorologiques déterministes restent possibles. Des prévisions de besoins en eau déterministes peuvent ainsi être calculées par le modèle et directement couplées aux algorithmes de régulation des lâchers de barrages.

Cette étude a permis d'aborder un certain nombre de problèmes de recherche posés par la spatialisation des modèles de culture : quel modèle de simulation utiliser ? Comment et à quelle unité d'espace acquérir les données d'entrée des modèles ? Comment valider à l'échelle régionale ? Les réponses apportées avec ce projet ne peuvent être considérées comme des réponses définitives aux questions posées mais comme une contribution au problème de la spatialisation des modèles de culture (Favre *et al.*, 2004). □

Résumé

Dans le contexte du Sud-Ouest de la France, où la gestion de l'eau peut être difficile lors d'années atypiques, le modèle ADEAUMIS a été développé pour estimer la demande en eau d'irrigation sur l'ensemble d'une région dès le début de la campagne d'irrigation. Il associe un modèle biodécisionnel et une base de données géographique.

Au terme d'une simulation du scénario de crise rencontré en 1998, la crédibilité d'ADEAUMIS a été établie et a conduit le gestionnaire à utiliser ce modèle dès 2003 pour l'aider dans ses décisions, particulièrement sensibles lors de cet été sec et caniculaire.

ADEAUMIS est une combinaison d'outils et de méthodes d'acquisition de données qui peut évoluer vers des combinaisons de modèles et outils plus complexes. À ce stade, ADEAUMIS est en voie d'intégration dans les outils de gestion stratégique du système Neste et pourrait également être utilisé pour la gestion en temps réel. Une utilisation pour la planification est à l'étude.

Abstract

The ADEAUMIS model has been developed in the context of southwestern France, where water management can be difficult during atypical years. It aims at estimating water demand for irrigation for the entire region. The estimation can be carried at any time, starting at the beginning of the irrigation period. To do so, ADEAUMIS couples a bio-decisional model and a geographical database.

The credibility of ADEAUMIS was established by replaying the 1998 scenario. As a result, the water manager has used ADEAUMIS to help his decision making process since the hot and dry 2003 summer.

ADEAUMIS is a combination of tools and methods for collecting input data which can evolve toward more complex tools and methods. At the present, ADEAUMIS is being integrated into the tools used for the strategic water management of the Neste system, and may be used for tactical water management. Its use for long-term planning of water resources is under study.

Bibliographie

- AGRESTE, 2000, *Recensement Agricole 2000, Cartes thématiques Midi Pyrénées*, CD Rom.
- BERGEZ, J.-E. ; DEBAEKE, P. ; DEUMIER, J.-M. ; LACROIX, B. ; LEENHARDT, D. ; LEROY, P. ; WALLACH, D., 2001, MODERATO: an object-oriented decision tool for designing maize irrigation schedules, *Ecological Modelling*, 137, p. 43-60.
- BURROUGH, P.-A., 1986, *Principles of geographical information systems for land resource assessment*, Oxford Univ. Press, New York.
- CACG, 2003, *Compte-rendu de gestion 2003*, Service de Gestion des Eaux, rapport interne.
- FAIVRE, R. ; LEENHARDT, D. ; VOLTZ, M. ; BENOÎT, M. ; PAPY, F. ; DEDIEU, G. ; WALLACH, D., 2004, Spatialising crop models, *Agronomie*, 24, 4, p. 205-217.
- HARTKAMP, A.-D. ; WHITE, J.-W. ; HOOGENBOOM, G., 1999, Interfacing geographic information systems with agronomic modeling : a review, *Agronomy Journal*, 91, p. 761-772.
- LEENHARDT, D. ; TROUVAT, J.-L. ; GONZALES, G. ; PÉRARNAUD, V. ; PRATS, S. ; BERGEZ, J.-E., 2004a, Estimating irrigation demand for water management on a regional scale. I. ADEAUMIS, a simulation platform based on bio-decisional modelling and spatial information, *Agricultural Water Management*, 68, p. 207-232.
- LEENHARDT, D. ; TROUVAT, J.-L. ; GONZALES, G. ; PÉRARNAUD, V. ; PRATS, S. ; BERGEZ, J.-E., 2004b, Estimating irrigation demand for water management on a regional scale. II. Validation of ADEAUMIS, *Agricultural Water Management*, 68, p. 233-250.
- Le Monde diplomatique, 2002, *La ruée vers l'eau, Manière de voir*, n° 65, 98 p.
- MATON, L. ; LEENHARDT, D. ; GOULARD, M. ; BERGEZ, J.-E., 2004, Assessing the irrigation strategies over a wide geographical area from structural data about farming systems, *Agricultural Systems* (sous presse).
- NYERGES, T.L., 1991, GIS for environmental modelers : an overview, in *Proc. Int. Conf./Workshop on Integrating Geographical Information Systems and Environmental Modeling, 1st, Boulder, CO*. 15-19 Sept. 1991.
- SALLES, D, 2003, Gestion collective et stratégies individuelles. Gestion de l'eau et pratiques d'irrigation dans le système irrigué Neste, in *71^e congrès de l'ACFAS, 20-5-2003, Rimouski (Canada)*.
- TROUVAT, J.-L., 2001, *Analyse des besoins pour l'estimation de la demande en eau d'irrigation. Cas du modèle de gestion stratégique du Système Neste*, note technique, juin 2001, CACG, Tarbes.