

Le Goulven P., Bouarfa S., Kuper M., 2004. Gestion intégrée de l'eau au sein d'un bassin versant. Actes de l'atelier du PCSI, 2-3 décembre 2003, Montpellier, France

Constitution et structuration territoriales des ressources, des impacts et des risques hydrologiques au sein du bassin du Merguellil

Perspectives de modélisation hydrologique pour la transposition d'approches de gestion

Christophe CUDENNEC*, Roger CALVEZ*, Jean-Christophe POUGET**, Ahmadi KINGUMBI***, Patrick LE GOULVEN**

*IRD, US DIVHA Tunis, Tunisie

**IRD, US DIVHA Montpellier, France

***ENIT, Laboratoire d'hydraulique, Tunis, Tunisie

Résumé — Des quantifications, compréhensions et modélisations des ressources en eau et des usages de l'eau font, depuis plusieurs années, l'objet de travaux sur une zone de la plaine de l'oued Merguellil, à l'aval du barrage El Haouareb, et en quelques sites localisés du bassin versant à l'amont du barrage. En outre, deux modélisations ambitieuses sont en cours pour quantifier précisément, sur l'ensemble du bassin versant, la relation de l'hydrologie de surface avec l'hydrogéologie d'une part et avec l'atmosphère d'autre part. Nous identifions ici certaines difficultés liées à la complexité naturelle et à la rareté des données d'observation, qui deviennent des contraintes fortes lorsque l'objectif de la modélisation est l'aide à la gestion. Nous proposons une alternative de modélisation dont la vocation est d'être plus robuste, pour intégrer les connaissances mais supporter les lacunes et incertitudes, et ainsi gagner en opérationnalité et en généralité.

Abstract — **Territorial generation and structuration of hydrological resources, impacts and hazards.** Quantification, understanding and modelling of water resources and of water uses are studied for several years within an area of the Merguellil plain, downstream of the El Haouareb dam, and at some localized places in the drainage basin upstream of the dam. Moreover, two ambitious models are being developed over the whole basin in order to precisely quantify the relationship of the surface hydrology firstly with the hydrogeology and secondly with the atmosphere. Here we identify some difficulties related to the complexity of nature and to the scarcity of observation data, which become strong constraints when the aim of the modelling is to support decision. We propose an alternate modelling whose purpose is to be more robust, in order to integrate available knowledge but inversely accept lack of knowledge, and thus progress in terms of operability and of genericity.

Introduction

La région méditerranéenne est aujourd'hui confrontée à des problèmes aigus de gestion de l'eau. Des décisions stratégiques doivent être prises aujourd'hui pour minimiser, voire résoudre, les problèmes d'aujourd'hui et de demain. Les problèmes en question sont d'ordre purement hydrologiques (événements extrêmes, bilans, interaction entre hydrologie de surface et hydrogéologie, variabilité spatio-temporelle, non-stationnarité, effets d'échelles), mais aussi étroitement liés à l'usage des territoires (occupation du sol, conservation des eaux et des sols, besoins en eau, besoins de sécurité). En outre, en raison de la diversité des usages de l'eau, des interactions amont-aval, et des échelles naturelles et humaines sollicitées, la gestion de l'eau renvoie à des questions plus larges de géographie, de sociologie et d'économie ; et bien sûr de politique agricole, vu le poids de l'usage agricole de l'eau.

La Tunisie met actuellement en œuvre une stratégie nationale de mobilisation, de transfert et de maîtrise des consommations de l'eau. La composante mobilisation de l'eau — dans les sols, dans des ouvrages de stockage et dans les aquifères —, s'appuie sur une panoplie d'aménagements et d'actions (aménagements de versants, lacs collinaires, barrages collinaires, grands barrages, infiltration forcée). Sur un même bassin versant, plusieurs aménagements sont implantés pour augmenter l'efficacité de la mobilisation de l'eau et pour rendre cette ressource disponible en de multiples endroits du territoire, afin d'entretenir le dynamisme du monde rural et de contribuer à la production alimentaire régionale et nationale. Néanmoins, ces aménagements sont agencés en cascade de l'amont vers l'aval. Il est donc désormais important de tirer les enseignements des aménagements réalisés pour évaluer l'impact local de chaque type d'aménagement et l'impact agrégé de tous les aménagements d'un bassin versant. Or, cette question de l'impact multi-échelles et multi-usages est complexe, qu'il soit bénéfique ou préjudiciable. La modélisation hydrologique devrait permettre d'aborder cette question et d'en établir un diagnostic. Ce diagnostic devrait aider aux décisions stratégiques à venir en matière d'aménagement et de mise en place de structures de gestion. La modélisation devrait par ailleurs pouvoir alimenter l'aide à la décision à échéance plus courte pour la gestion tactique (Pouget *et al.*, 2004a).

Capitalisation des travaux approfondis localement

Le bassin du Merguellil a été retenu par l'Etat tunisien comme zone pilote pour une étude de gestion intégrée de l'eau en milieu semi-aride. Ce projet national répond au souci stratégique de traiter le problème de l'eau en Tunisie par une action simultanée sur l'offre et la demande.

Il a pour ambition d'analyser en profondeur un cas complexe (figure 1) opposant une zone amont encore en cours d'aménagement (banquettes, lacs et barrages collinaires, forages pour l'eau potable) et une zone aval fortement agricole pratiquant des productions irriguées à partir d'une nappe en accès libre, dont le niveau baisse régulièrement (Leduc *et al.*, 2004). Les deux zones sont articulées par le grand barrage d'El Haouareb (Kingumbi *et al.*, 2004), mais quelques nappes présentent des extensions différentes de celle du bassin versant de surface, si bien que l'exutoire du barrage n'est pas la seule sortie possible pour les écoulements du bassin.

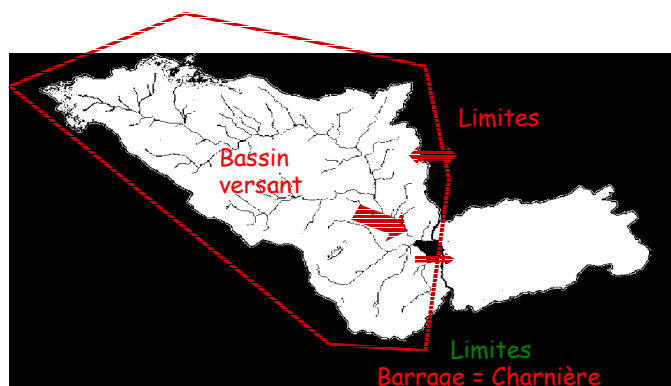


Figure 1. Schéma du territoire d'étude du projet Mergusie. Bassin versant, zone aval de plaine, barrage charnière et incertitudes sur les limites hydrogéologiques.

Au sein de l'Ensemble ressource-usage (ERU) d'El Haouareb

Le projet s'est jusqu'à présent focalisé sur l'observation, la compréhension et la modélisation en certains sites privilégiés localisés : d'une part le barrage et une zone à son aval (dite l'Ensemble ressource-usage, ERU, d'El Haouareb) et d'autre part quelques sites ponctuels au sein du bassin versant. Les travaux menés à l'aval d'analyse et de modélisation des ressources et des usages, et de valorisation en outils et préconisations de gestion, pourraient être relus sous deux angles nouveaux. Le premier, épistémologique, pour bien tirer les leçons de l'expérience scientifique et proposer une méthode d'approche de la confrontation ressources-usages (vocabulaire, systèmes, hypothèses, échelles et niveaux, structures, variables...). La notion d'ERU pourrait être au cœur de cette méthode d'approche. Le deuxième angle, technique, pour chercher la généralité et la transposabilité des outils de gestion développés sur le site aval, vers d'autres sites. Puis la méthode d'approche, ainsi que la généralité et la transposabilité des outils, devraient être testées sur le bassin versant à l'amont du barrage, dans son ensemble, mais aussi et surtout au niveau des ERU qui peuvent y être identifiés. Ce premier exercice de transposition serait riche puisqu'il imposerait de se confronter à une forte variabilité des échelles, des processus et des dynamiques, des ressources et des usages. Il devrait permettre des retours d'expérience pour gagner petit à petit les qualités recherchées (généralité et transposabilité), en vue d'une application à d'autres sites.

Au sein du bassin versant

Mais la mobilisation de la ressource au sein du bassin versant est très liée à l'hydrologie *sensu stricto* et à l'aménagement du territoire, puisqu'elle correspond en grande partie au stockage d'écoulements intermittents, non seulement en quelques nappes locales mais aussi en de multiples ouvrages et aménagements de surface. Il s'agit là d'une grande différence avec l'ERU El Haouareb dont la ressource est constituée exclusivement par une nappe libre et accessible, et dont la taille conséquente implique une dynamique bien plus lente. L'application au bassin versant des méthodes et concepts issus de l'aval demande au préalable, ou du moins en parallèle, une compréhension et une quantification des dynamiques hydrologiques et de la mobilisation de la ressource. Or, au sein du bassin versant, les efforts ont jusqu'à présent été ciblés sur l'étude, la modélisation et l'optimisation d'interactions ressources-usages à des niveaux fins (Pabiot, 1999 ; Lebdi *et al.*, 2001) et sur le suivi météorologique de quelques processus en quelques sites (Dridi, 2000 ; Dridi *et al.*, 2001). Ces connaissances locales et ce suivi météorologique du bassin versant de l'oued Merguellil à l'amont du barrage d'El Haouareb (1200 km²) — qui présente aujourd'hui des banquettes sur plus de 14 % de la superficie, 38 lacs collinaires, 5 barrages collinaires, un grand barrage et des nappes souterraines importantes — doivent désormais être capitalisés pour progresser dans la compréhension et la quantification des impacts. La modélisation (d'abord cognitive pour aider à comprendre, puis prospective pour aider à décider) des flux, ressources et risques hydrologiques au sein d'un territoire aménagé et en évolution, doit y contribuer. La modélisation de la situation actuelle et la prise en compte explicite des impacts des aménagements et de leur agrégation devraient permettre ensuite d'envisager des aides à la décision tactique (gestion de la ressource à court terme) et stratégique (gestion de la ressource à plus long terme ; planification territoriale et hydraulique des aménagements ; régulation des usages, en particulier par la politique agricole).

Modélisation hydrologique pour la gestion intégrée de l'eau au sein du bassin versant

Déduction d'enjeux de modélisation à partir des problématiques sociétales et des spécificités hydrologiques

La gestion de l'eau renvoie pour une grande partie à des questions d'échelles spatiales, temporelles, fréquentielles, d'intensité, anthropiques et sociales. En effet, lorsque l'on s'intéresse à un aspect particulier, une ou quelques échelles, dites caractéristiques, deviennent pertinentes, ce qui correspond à la notion d'émergence. Mais la gestion intégrée de l'eau englobe, par définition, de nombreux aspects, si ce n'est tout. Elle est donc concernée par une multiplicité d'échelles emboîtées. Or certaines échelles sont imposées pour l'observation, la compréhension et la décision-action, par exemple par le réseau de capteurs (localisation, densité, pas de temps, ancienneté...), par le lieu d'intérêt (risque, aménagement,

contrôle, usage...) ou par le territoire d'influence d'un acteur ou groupe d'acteurs (institution, collectivité, groupe social ou ethnique, individu...) ; et ces échelles sont rarement cohérentes.

En outre, l'hydrologie de surface (pouvant englober les eaux peu profondes) est fondamentalement liée à l'organisation territoriale : relief, substrat, occupation du sol et anthropisation au sens large. Dans le bassin du Merguellil — comme dans la plupart des bassins de gestion —, l'hétérogénéité de l'organisation territoriale se combine aux effets d'échelles et à la variabilité des forçages atmosphériques pour générer une multiplicité de processus interférents, simultanés, non-linéaires et eux-mêmes variables dans l'espace, dans le temps et en fréquence. Cette complexité rend donc particulièrement difficile la compréhension des dynamiques naturelles. Par ailleurs, les variables ne sont pas sous contrôle, si bien que les observations peuvent résulter de plusieurs influences en interférence. Cela rend délicate l'évaluation des impacts des non-stationnarités, en l'occurrence des éventuels changements de forçages ou de territoires, naturels ou anthropiques, et qu'ils soient effectifs, à venir ou antérieurs. Or, il s'agit là d'informations qui font cruellement défaut pour expliciter les héritages traditionnels empiriques ; pour tirer les leçons d'expériences de gestion, d'aménagement et de développement ; et pour aider les acteurs d'aujourd'hui à décider au mieux, eu égard à la durabilité, aux arbitrages sectoriels et géographiques, et à l'anticipation des crises et conflits.

Un défi majeur est donc d'intégrer les connaissances disponibles pour générer des informations pertinentes aux niveaux et échelles de gestion, en particulier au niveau spatial des bassins de gestion (tableau I). Cela demande de généraliser et d'agréger des connaissances locales, de désagréger et décliner des connaissances globales — c'est-à-dire de changer d'échelle — ; d'adapter ou de développer des outils et concepts pour des situations de manque de données (bassins versants peu ou pas instrumentés, chroniques lacunaires, configurations instrumentales changeantes) ; ainsi que de transposer des connaissances similaires.

Tableau I. Enjeux de modélisation pour l'aide à la gestion intégrée.

<ul style="list-style-type: none">- Transposabilité intra- et inter-bassins, généralité.- Assimilation de données variées, incertaines, incomplètes.- Adaptation aux configurations changeantes.- Changement d'échelle, agrégation, déglobalisation.- Agrégation d'impacts locaux, diagnostic des impacts du passé, simulation de scénarios prospectifs.- Simulation de variables internes. Tests de sensibilité et validation sur ces variables internes.- Explication des interactions, couplages.- Raisonnement en fréquence et évaluation de risques (locaux, agrégés, conjoncturels, multi-sectoriels).

Or un bassin donné, pour une question donnée, présente une hiérarchie dans les processus influents, dans les variables clés et dans les résultats attendus. Cette hiérarchie n'est pas toujours évidente et la modélisation peut elle-même aider à l'identifier ou à l'affiner en aidant à tester les influences. Concernant le bassin du Merguellil, et pour les enjeux formulés ci-dessus, nous identifions les priorités suivantes :

- intégration de la variabilité spatio-temporelle événementielle de la pluie ;
- intégration de processus de surface non-conservatifs (en particulier l'irrigation par épandage et l'infiltration en lit d'oued) ; couplage hydrologie de surface-hydrogéologie ;
- intégration de l'impact hydraulique et hydrologique des aménagements de versants et de thalwegs (retenues et barrages collinaires) dans la modélisation de la situation actuelle ;
- transposition vers des points non jaugés, en particulier vers les ouvrages hydro-agricoles ;
- intégration de la non-stationnarité passée du bassin versant et proposition d'une méthode pour simuler la non-stationnarité future (scénarios d'aménagement) ;
- articulation
 - avec un modèle de gestion de retenues ;
 - avec un modèle économique ;
- raisonnement en fréquence pour expliciter les risques (hydrologiques, agricoles, économiques) et chercher à les mutualiser.

Ces priorités sont présentées dans un ordre qui correspond à une hiérarchie apparente dans les influences et qui correspondrait à l'ordre idéal d'appréhension. Cependant, la hiérarchie proposée n'est pas sûre, dans un contexte de forte complexité et de rareté des données. En outre, les opportunités, les

contraintes et les disponibilités des données peuvent conduire à s'éloigner de l'idéal. Deux approches de modélisation hydrologique cognitive sont actuellement en cours pour le bassin versant du Merguellil. La première s'attache à décrire précisément la dynamique hydrogéologique en s'appuyant sur le meilleur couplage possible avec l'hydrologie de surface (Thèse en cours d'A. Kingumbi, avec le modèle MODCOU). La seconde s'attache quant à elle à décrire précisément l'interface hydrologie de surface-atmosphère (Thèse en cours de M. Sakka, avec le modèle SWAT).

Ces approches de modélisation sont exigeantes en connaissances fines et distribuées. Elles devraient permettre à terme d'améliorer les connaissances et les quantifications sur les deux grandes interfaces surface-souterrain et surface-atmosphère. Elles peuvent en outre, ensuite, éventuellement alimenter l'aide à la décision.

Nous proposons une approche parallèle, dont l'objectif est délibérément de sacrifier une partie de l'objectif d'exhaustivité dans la production de connaissance, pour gagner d'ores et déjà en robustesse et en réponse à la demande sociétale d'aide à la décision pour la gestion intégrée.

Une approche de modélisation à vocation d'interface entre connaissance et décision

Un moyen pour aller dans le sens de la robustesse est d'identifier les structures dominantes dans l'intégration et l'agrégation, et de proposer une modélisation qui s'appuie explicitement sur ces structures (Le Moigne, 1999). Or, quelle que soit l'échelle spatiale et quel que soit le contexte géographique, le réseau des chemins préférentiels d'écoulement — géomorphologiques sous influence anthropique (chemins additionnels et obstacles) — est structurant et intégrateur. Développer une modélisation hydrologique « pluie-débit » en appuyant le squelette conceptuel sur cette structure hydrographique peut être un bon cadre pour formaliser les connaissances disponibles et accepter les lacunes, imperfections et incertitudes ; intégrer des hétérogénéités et des variabilités ; s'affranchir d'une cause majeure de non-linéarité qu'est le hiatus versant-réseau ; et intégrer explicitement l'impact de pratiques et d'aménagements (Cudennec, 2000; Gatot *et al.*, 2001; Cudennec *et al.*, 2002, 2004a, 2004b). Puis, à partir de cette formalisation structurée des connaissances et des informations disponibles sur les bassins à gérer, aussi rares soient-elles, il s'agit de créer une plus-value en générant des informations pertinentes. Ces informations doivent ensuite permettre d'évaluer les conséquences des décisions ; d'arbitrer et de répartir les usages et les allocations de ressources ; de sensibiliser, réglementer, et inciter les acteurs et usages. Il s'agit là de nuancer l'exigence assignée à une modélisation cognitive afin de mieux la prolonger et la valoriser en un outil de diagnostic, de prospection et de prévision.

Intégration de la variabilité spatio-temporelle événementielle de la pluie

La structure hydrographique intègre la variabilité spatiale des écoulements produits par les versants pour produire le débit à l'exutoire. Il est donc possible de traduire cette intégration en introduisant une information sur la variabilité lors de la mise en œuvre de la modélisation, par intégration d'une matrice de variabilité spatio-temporelle dans la convolution. En l'occurrence, la source principale de variabilité des écoulements est la variabilité spatio-temporelle de la pluie. Nous avons ainsi caractérisé la variabilité spatio-temporelle d'événements observés, à partir des quelques données ponctuelles disponibles, avons appliqué une fonction de production simple, et pris en compte la variabilité de la pluie nette ainsi obtenue dans la convolution. L'amélioration des hydrogrammes simulés a été immédiate (Cudennec *et al.*, 2002), comme l'illustre la figure 2 pour le sous-bassin de Skhira.

Ces travaux ont été récemment repris pour les resituer et les généraliser dans une problématique de données rares (réseau pluviométrique peu dense par rapport aux échelles caractéristiques des événements pluvieux, robustesse en cas de configuration instrumentale dégradée, bassin peu ou pas jaugé) (Cudennec *et al.*, soumis).

Intégration de processus non-conservatifs

La traduction de la fonction de distribution des longueurs des chemins hydrauliques, qu'elle soit expérimentale ou théorique, en fonction de distribution des temps de parcours de l'eau peut être simplement appuyée sur une vitesse moyenne. Il s'agit là d'une hypothèse fréquemment faite dans la littérature. Néanmoins, il peut être envisagé de rendre cette vitesse variable dans le temps — selon les

événements (Cudennec *et al.*, 2004b), ou au fil d'un événement — ou au sein du bassin versant. Ces deux derniers points ont déjà été identifiés comme délicats (Beven et Wood, 1993 ; Snell et Sivapalan, 1994) car ils se heurtent à des problèmes d'échelle, d'hystérésis et d'absence d'observations pertinentes. Mais la structure géomorphologique peut permettre de tester des hypothèses sur ces points.

Dans le même ordre d'idée, la fonction de transfert devrait pouvoir être rendue non-conservative afin de tenir compte de phénomènes d'échanges entre les cours d'eau et les lits, les berges, les nappes ou l'atmosphère. Mathématiquement, cela est concevable au sein du calcul de convolution, sous réserve d'avoir quantifié ou supposé les sources d'échanges. Les résultats corollaires de la modélisation avec MODCOU peuvent aider dans ce sens.

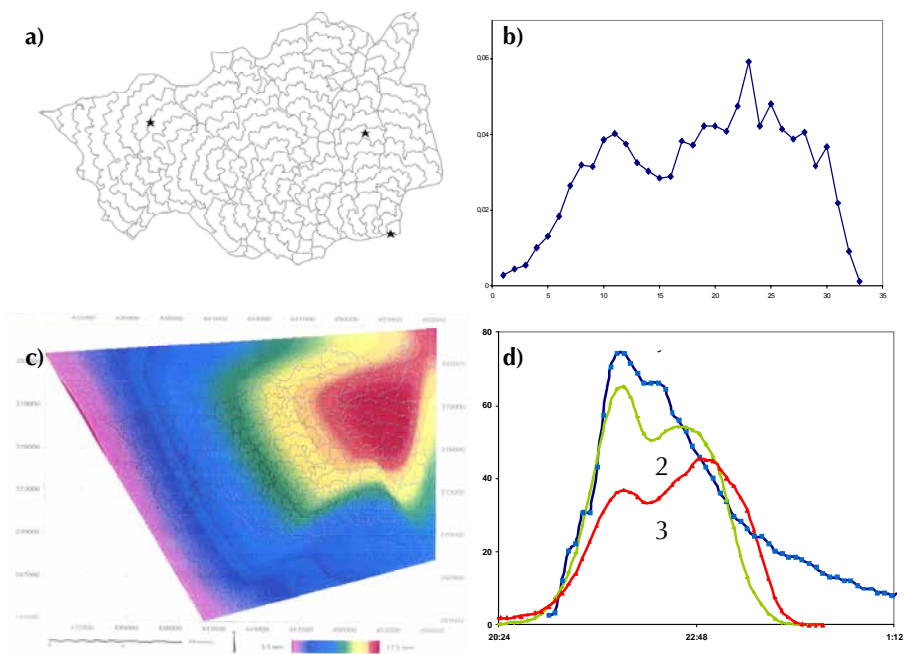


Figure 2. Exemple d'intégration de la variabilité spatio-temporelle du champ pluviométrique, sur le bassin versant de Skhira (192 km²), sous-bassin du Merguellil ; a) identification des zones isochrones ; b) identification de la fonction de transfert ; c) superposition du champ pluviométrique au pas de temps t ; d) confrontation des observations (1) et des simulations avec (2) et sans (3) prise en compte du champ pluviométrique.

Intégration de l'impact hydraulique et hydrologique des aménagements de versants et de thalwegs dans la modélisation de la situation actuelle

La conceptualisation proposée schématise le bassin versant sous la forme d'un réseau hydrographique qui intègre les écoulements produits par les versants, compte tenu de leur diversité et de leur répartition territoriale, en articulant une fonction de transfert en réseau avec une ou des fonctions de versant, selon un schéma éventuel d'intégration des variabilités.

Il est donc possible de répercuter l'impact d'aménagements de versants dans les fonctions de versant aux endroits pertinents, et l'impact d'aménagements de thalwegs/cours d'eau au sein de la fonction de transfert (figure 3). L'enjeu est double. D'une part d'être suffisamment explicite pour construire des scénarios prospectifs vraisemblables. D'autre part d'évaluer les impacts agrégés et de raisonner à un niveau multi-échelles et multi-usages.

Pour cela, plusieurs modalités de prise en compte des répartitions territoriales sont envisageables, comme l'identification de plusieurs fonctions de transfert par secteurs géographiques, ou par types de versants. Ces modalités mathématiques devraient elles-mêmes permettre d'assimiler et de valoriser les informations disponibles de différentes natures (interpolations entre observations ponctuelles, images de télédétection, cartographie de caractéristiques d'écoulements) et de précisions différentes. Néanmoins, une telle démarche ne peut être réalisée qu'à la condition d'avoir une estimation des écoulements produits par les versants, et des influences des aménagements au fil des chemins préférentiels.



Figure 3. Exemples d'aménagements. a) banquettes. b) retenue collinaire. c) barrage collinaire.

Des propositions ont déjà été faites dans ce sens pour des retenues à l'impact hydraulique simple (Cudennec *et al.*, 2004b) et pour des terrassements de versant au fonctionnement local bien connu (Gatot *et al.*, 2001). L'enjeu est désormais de prendre en compte des aménagements à l'impact moins identifiable, et en outre en association au sein d'un bassin-versant : aménagements différents, en parallèle et en série, avec des impacts variables selon la conjoncture et le calendrier, contrôlables ou non... Une telle approche peut s'appuyer sur une compréhension ou une modélisation hydraulique de l'aménagement en tant que tel s'il est bien connu. Un tel travail vient d'être mené pour un versant typique de l'aménagement en tabias traditionnelles (Nasri *et al.*, 2004).

Mais il est également envisageable de procéder par inversion de la fonction de transfert. En effet, celle-ci doit permettre de déconvoluer les débits et d'estimer la chronique d'écoulement en sortie de versant (Lechat, 1999 ; Cudennec, 2000). Une telle identification de chroniques d'écoulement en sortie de versant, associée aux informations sur les entrées météorologiques, permettrait d'isoler le système versant et d'en envisager la modélisation en propre, en l'occurrence une fonction de production de « pluie nette ». En multipliant les sites d'études et donc les types de versant, on peut envisager de construire petit à petit une « bibliothèque » de fonctions de production de versants types (thèse en cours de H. Boudhraa).

Transposition événementielle vers des points non jaugés, en particulier vers les ouvrages hydro-agricoles

L'objectif de transposition peut s'envisager entre lieux d'un même bassin versant, entre bassins versants comparables, voire entre un bassin versant et un ensemble de bassins versants alimentant une zone (par exemple le lac du barrage ou la zone d'alimentation d'une des nappes). Plus précisément, dans le cadre du projet Mergusie, une telle transposition est souhaitée, afin de générer des chroniques d'apports au niveau des lieux d'enjeux et de gestion, en particulier les ouvrages hydro-agricoles, supports de ressources en eau de surface (retenues et barrages collinaires), dans le but d'alimenter en données d'entrée des modèles de gestion et d'optimisation uni- et multi-sites (travaux de J.C. Pouget et thèse de G. Lacombe).

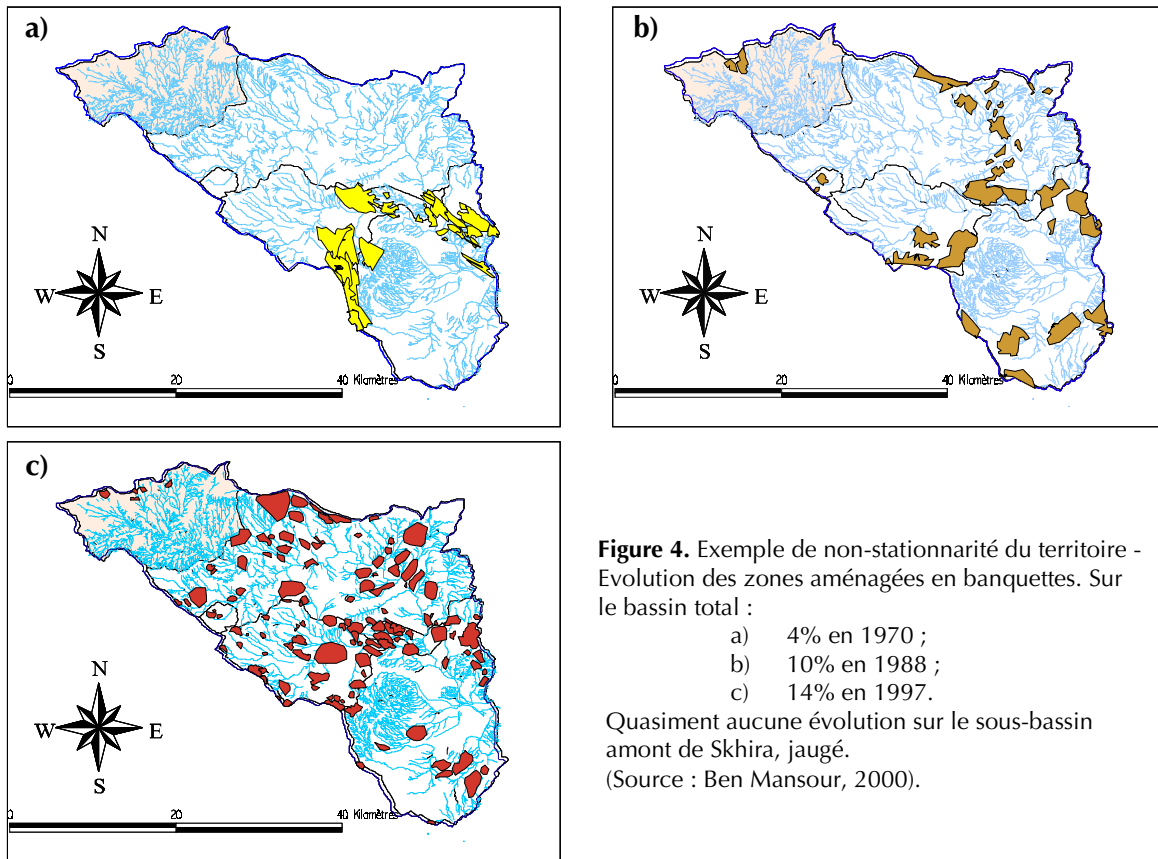
La transposition devrait être facilitée par l'application des méthodes d'inversion. En effet, la reprise des chroniques d'écoulement en sortie de versants dans le sens direct, avec une fonction de transfert correspondant à un autre exutoire, même non jaugé, permettrait d'y proposer un hydrogramme simulé.

De manière plus ambitieuse, on peut envisager de s'appuyer sur la bibliothèque de fonctions de production (construite par modélisation directe de versant d'une part et par déconvolution des hydrogrammes mesurés d'autre part), à combiner selon un schéma de prise en compte des hétérogénéités territoriales, pour appréhender tout bassin versant composite et tout scénario d'aménagement à venir.

Intégration structurelle et fréquentielle de la non-stationnarité passée du bassin versant, et proposition d'une méthode pour simuler la non-stationnarité future (scénarios d'aménagement)

La structure de modélisation étant déduite de l'observation géographique, et non pas calée, des évolutions temporelles et fréquentielles dans les variabilités et hétérogénéités (changements de vent dominant, changements d'occupation du sol...), *i.e.* des non-stationnarités, peuvent être intégrées pour des observations du passé et des scénarios d'avenir. En particulier, pour ce qui est des non-stationnarités

liées à l'aménagement du territoire et à l'agriculture, très importantes (figure 4 pour l'exemple des aménagements en banquettes anti-érosives ; Ben Mansour, 2000), on peut envisager de s'appuyer sur la bibliothèque de fonctions de production, comme cela est envisagé pour la transposition géographique, pour simuler des scénarios prospectifs. Néanmoins, il s'agit là d'une question extrêmement délicate, comme toujours en hydrologie.



Articulation de modèles aval

Certains modèles utilisés et envisagés par des partenaires dans le cadre du projet pourraient être enrichis par une articulation (plus ou moins formelle) avec une telle modélisation hydrologique. Il en va ainsi des modèles de gestion et d'optimisation de retenues qui nécessitent des séries d'entrées alors qu'il n'y a pas toujours de données. Inversement, une telle articulation peut enrichir la modélisation hydrologique elle-même puisqu'elle permettrait d'intégrer les lâchers et les prélèvements agricoles dans les processus de circulation, de stockage et de pertes d'eau. Il en va également de certains modèles économiques de quantification des valorisations des ressources en eau par les usages, d'évaluation des coûts des impacts, d'internalisation des externalités environnementales.

Raisonnement en fréquence pour expliciter et chercher à mutualiser les risques (hydrologiques, agricoles, économiques)

Etant donnée la conceptualisation hydro-géomorphologique de la modélisation proposée, plusieurs variables internes peuvent être significatives, comme des variables d'état ou de contrôle des aménagements, des variables d'état de ressource, des flux d'interface, des débits intermédiaires... Ces variables peuvent servir à expliciter les inter-dépendances entre lieux, usages et acteurs ; à étudier

l'allocation et la redistribution des ressources dans l'espace et le temps et la pertinence par rapport aux usages ; à coupler d'autres modèles (de flux associés, d'hydraulique, d'hydrogéologie, d'agronomie, d'écologie, de comportement d'acteurs-agents, d'économie...). Ainsi, la modélisation cognitive peut être élargie et valorisée en une modélisation opérationnelle ou en indicateurs pour évaluer et préconiser la redistribution des ressources naturelles et mobilisées, et pour mieux évaluer les enjeux, à différentes échéances temporelles, et à différents niveaux d'inter-dépendance entre amont et aval. En outre, une prise de recul fréquentielle sur ces variables devrait permettre une analyse holistique des risques, des situations d'émergence de crise, des dérives non-stationnaires « à risque » (comme la synchronisation progressive de bassins affluents par aménagement différentiel), des interactions positives (aggravatrices) et négatives (compensatrices), des résiliences, des articulations sectorielles. Cela pourrait permettre l'établissement de tableaux de bord d'indicateurs et de règles d'optimisation, et donc de préconiser des schémas structurels et non-structurels de mutualisation des risques pour pallier la dérive des transferts de risques (vers l'avenir, les extrêmes, l'aval, les autres usages, l'Etat providence, le fatalisme...), incompatibles avec durabilité et gouvernance (figure 5).

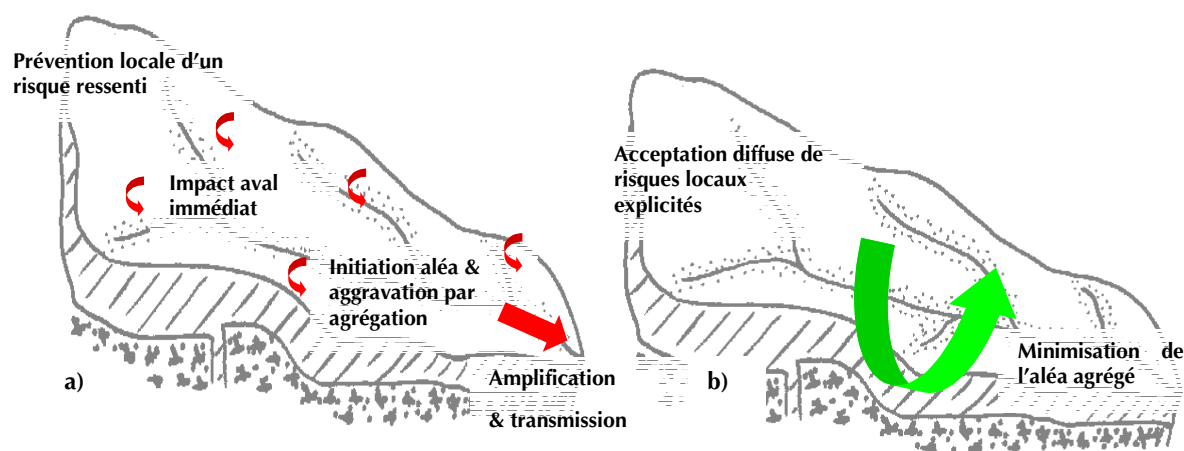


Figure 5. Gestion territoriale des risques liés à l'eau ; a) transfert ; b) mutualisation (fond schématique inspiré de Auzet, 1999).

Conclusion : évaluation, transposabilité, généricité

Compte tenu de la rareté des données d'écoulement, il est inenvisageable de procéder à une évaluation complète et sûre des concepts, hypothèses, méthodes et résultats. Néanmoins, les variables internes, envisagées ci-dessus, peuvent servir de points de validation internes du modèle, pour éviter de se limiter aux sorties globales. En outre, la comparaison avec les résultats d'autres modèles (par exemple MODCOU et SWAT) peut permettre de donner des éléments d'évaluation.

Enfin, la transposition des concepts, hypothèses, méthodes et résultats à d'autres bassins devrait pouvoir permettre d'étayer leur évaluation. Inversement, la transposabilité et la généricité font partie des objectifs du projet MERGUSIE (en Tunisie et ailleurs). Par conséquent, il est nécessaire de les avoir d'ores et déjà à l'esprit. En outre (figure 6), de même que la transposition des modèles et méthodes de gestion ressources-usages développés sur la zone aval du Merguellil vers le bassin versant doit produire des retours d'expérience, les premières transpositions du bassin du Merguellil vers d'autres bassins devraient donner des éléments d'évaluation et de réajustement méthodologique pour améliorer la généricité. Quoi qu'il en soit, il faut également que les outils et environnements de modélisation utilisés et développés soient eux-mêmes génériques et adaptables pour permettre d'améliorer les modèles en tant que tels, les articulations et couplages, et les adaptations lors des transpositions (Pouget *et al.*, 2004b).

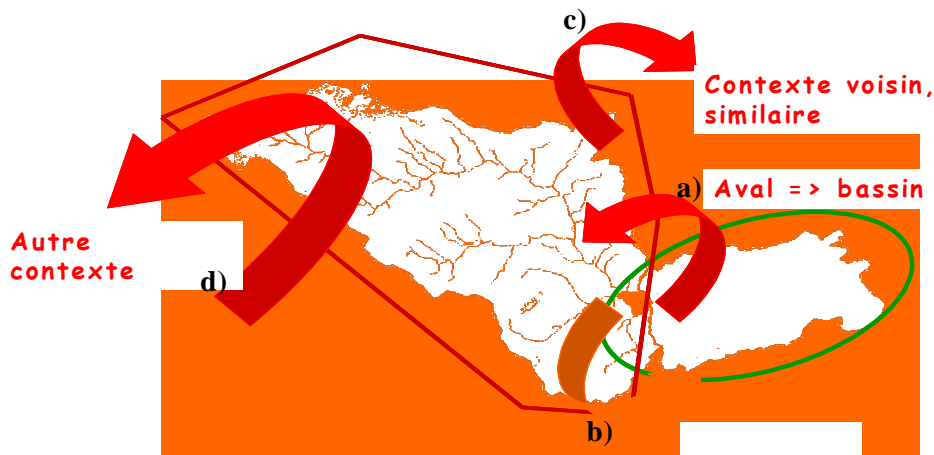


Figure 6. Enjeux de transposabilité et de généricité ; a) de l'aval vers le bassin ; b) retour de d'expérience de la transposition de l'aval vers le bassin ; c) vers un contexte voisin et/ou similaire ; d) vers un autre contexte.

Références bibliographiques

AUZET A.V., 1999. Les cheminements de l'eau naturels et/ou influencés. *In* L'influence humaine dans l'origine des crues, Leblois E. (Coord.), Cemagref Ed., 19-46.

BEN MANSOUR H., 2000. Apport de la télédétection pour l'étude de la dynamique des aménagements de conservation des eaux et du sol (banquettes) et impact sur le régime hydrologique du bassin versant du Merguellil. Mémoire de DAA, ENSAR, Rennes, 62 p.

BEVEN K., WOOD E.F., 1993. Flow routing and the hydrological response of channel networks. *In* Channel network Hydrology, Beven K., Kirkby M.J. (eds), Chichester, Wiley, Chap 5., p. 99-128.

CUDENNEC C., 2000. Description mathématique de l'organisation du réseau hydrographique et modélisation hydrologique. Thèse de doctorat de l'ENSAR, Rennes, 198 p.

CUDENNEC C., GOGIEN F., BOURGES J., DUCHESNE J., KALLEL R., 2002. Relative roles of geomorphology and water input distribution in an extreme flood structure. *IAHS Publ.*, 271 : 187-192.

CUDENNEC C., FOUAD Y., SUMARJO GATOT I., DUCHESNE J., 2004a. A geomorphological explanation of the unit hydrograph concept. *Hydrological Processes*, 18 (4) : 603-621.

CUDENNEC C., SARRAZA M., NASRI S., 2004b. Modélisation robuste de l'impact agrégé de retenues collinaires sur l'hydrologie de surface. *Revue des Sciences de l'Eau*, 17 (2) : 181-194.

CUDENNEC C., SLIMANI M., LE GOULVEN P. Accounting for rainfall space-time variability within rainfall-runoff modelling in a semiarid data-scarce context. *Soumis à Hydrological Sciences Journal*.

DRIDI B., 2000. Impact des aménagements sur la disponibilité des eaux de surface dans le bassin versant du Merguellil (Tunisie centrale). Thèse de doctorat de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg, 194 p.

DRIDI B., BOURGES J., AUZET A.V., COLLINET J., KALLEL R., GARRETA P., 2001. Impact des aménagements sur la ressource en eau dans le bassin du Merguellil (Tunisie). *PHI - V / DTH n° 51*, UNESCO, Paris, 267-274.

GATOT I., PÉREZ P., DUCHESNE J., 2001. Modelling the influence of irrigated terraces on the hydrological response of a small basin. *Environmental Modelling & Software*, 16 : 31-36.

- KINGUMBI A., BESBES M., BOURGES J., GARETTA P., 2004. Evaluation des transferts entre barrage et aquifères par la méthode de bilan d'une retenue en zone semi-aride. Cas d'El Haouareb en Tunisie centrale. *Revue des Sciences de l'Eau*, 17(2) : 213-225.
- LECHAT M., 1999. Estimation de la pluie nette par inversion de la fonction de transfert. Mémoire de DAA, ENSAR - LCPC, Rennes, 125 p + annexes.
- LEDUC C., CALVEZ R., BÉJI R., NAZOUMOU Y., LACOMBE G., AOUADI C., 2004. Evolution de la ressource en eau dans la vallée du Merguellil (Tunisie centrale). *In* La modernisation de l'agriculture irriguée dans les pays du Maghreb, Séminaire Wademed, Rabat, Maroc, 19-21 avril 2004.
- LE MOIGNE J.L., 1999. La modélisation des systèmes complexes. Dunod, Paris, 178 p.
- LEBDI F., LE GOULVEN P., PABIOT F., 2001. Optimisation des règles de gestion de petits réservoirs dans les régions semi-arides. PHI - V / DTH n° 51, UNESCO, Paris, 195-206.
- NASRI S., ALBERGEL J., CUDENNEC C., BERNDTSSON R., 2004. Hydrological processes in macrocatchment water harvesting in the arid region of Tunisia: the traditional system of tabias. *Hydrological Sciences Journal*, 49 (2) : 261-272.
- PABIOT F., 1999. Optimisation de la gestion d'un barrage collinaire en zone semi-aride. Mémoire de DAA, ENSAR, Rennes, 95 p.
- POUGET J.C., BELLAUBI F., DE SA A., HABIB Z., LE GOULVEN P., 2004a. Un environnement de modélisation pour tester l'allocation de ressources en eau - HyD2002 et ses applications. *In* Séminaire PCSI Gestion intégrée de l'eau au sein d'un bassin versant (ce volume).
- POUGET J.C., CUDENNEC C., LEDUC C., LE GOULVEN P., LE GRUSSE P., POUSSIN J.C., 2004b. Co-construction d'un outil de gestion intégrée sur le bassin du Merguellil (Tunisie). Articulation et cohérence de modèles. *In* Séminaire PCSI Gestion intégrée de l'eau au sein d'un bassin versant (ce volume).
- SNELL J.D., SIVAPALAN M., 1994. On geomorphological dispersion in natural catchments and the geomorphological unit hydrograph. *Water Resources Research*, 30 : 2311-2323.