

Modélisation robuste de l'impact agrégé de retenues collinaires sur l'hydrologie de surface

Robust modelling of the aggregated impact of small headwater dams on surface hydrology

C. Cudennec, M. Sarraza and S. Nasri

Volume 17, Number 2, 2004

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/705529ar>

DOI: <https://doi.org/10.7202/705529ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (print)

1718-8598 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Cudennec, C., Sarraza, M. & Nasri, S. (2004). Modélisation robuste de l'impact agrégé de retenues collinaires sur l'hydrologie de surface. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 17(2), 181–194. <https://doi.org/10.7202/705529ar>

Article abstract

In response to the increasing demand from the food industry for fresh produce, many farms located in the administrative county of Morbihan (Brittany, France) have intensified their vegetable crop production (e.g. peas, beans, spinach) due to their high value. To obtain the best yields and to respect contracts signed with industrial partners, irrigation has been widely used by the farming community to support this production. Since 1989, 500 to 600 ha/year of irrigated farmland have been developed with financial support from state, regional and county agencies. The official purpose of this financing program is to irrigate 50% of the fields cultivated for vegetable crops. Water use for irrigation was estimated to be 6 million m³ in 1999. The demand for irrigation coincides with the period of low water levels in the stream. Thus, there is strong competition with drinking water demands and ecological flow requirements. Moreover, the potential use of groundwater to fulfill these demands is not possible. One of the solutions is to build small headwater dams to store winter flows and use this resource during the growing season. In order to help local public authorities assess their strategy, we need to develop a robust quantification method to study the impact of this development.

The 302 km² Yvel watershed is the site of a highly developed region of small headwater dams because the geological substratum is composed mainly of schist with low groundwater reserves, precipitation is less than the regional average, and the industrial demand for vegetable crops is high. For all these reasons, this watershed is particularly vulnerable. Moreover, from a regional policy point of view, the downstream part of the watershed is located within the Morbihan county whereas the upstream part is located within the Côtes d'Armor and Ille et Vilaine counties, which do not provide any financial support for irrigation development. The current concentration of headwater irrigation dams reflects these regional development incentives as dams are mostly built in the downstream part of the watershed.

To study the impact of small headwater dams on watershed hydrology, we propose a conceptual tool built around a geomorphological instantaneous unit hydrograph (GIUH) modelling approach. The GIUH structure, which is based on the effective watershed normalized area function and an estimated mean flow velocity, allows for the explicit accounting of dams and, thus, can be used for a priori assessment studies. It can also be used in a semi-distributed perspective, where spatial discretization is determined from rainfall variabilities instead of gauging station constraints. These two points allowed us to study three regional irrigation development scenarios: construction of 100, 200 and 300 future headwater irrigation dams. Using two observed rainfall events, we showed that the simulated hydrograph shape at the watershed outlet can be significantly modified. In conclusion, in situ observations and simulation results suggest that: (1) headwater dams do not have any impact when reservoirs are full - lamination is locally observed and thus, does not have any impact on the watershed hydrograph; (2) a spatially homogeneous implementation of headwater dams modifies the watershed hydrograph according to a contributing watershed area ratio; similar behaviour is observed for low water level periods; and (3) localized implementation can be studied through modelling with enough precision to give relevant information to decision makers.

Modélisation robuste de l'impact agrégé de retenues collinaires sur l'hydrologie de surface

Robust modelling of the aggregated impact of small headwater dams on surface hydrology

C. CUDENNEC^{1*}, M. SARRAZA², S. NASRI³

Reçu le 19 septembre 2002, accepté le 24 avril 2003**.

SUMMARY

In response to the increasing demand from the food industry for fresh produce, many farms located in the administrative county of Morbihan (Brittany, France) have intensified their vegetable crop production (e.g. peas, beans, spinach) due to their high value. To obtain the best yields and to respect contracts signed with industrial partners, irrigation has been widely used by the farming community to support this production. Since 1989, 500 to 600 ha/year of irrigated farmland have been developed with financial support from state, regional and county agencies. The official purpose of this financing program is to irrigate 50% of the fields cultivated for vegetable crops. Water use for irrigation was estimated to be 6 million m³ in 1999. The demand for irrigation coincides with the period of low water levels in the stream. Thus, there is strong competition with drinking water demands and ecological flow requirements. Moreover, the potential use of groundwater to fulfill these demands is not possible. One of the solutions is to build small headwater dams to store winter flows and use this resource during the growing season. In order to help local public authorities assess their strategy, we need to develop a robust quantification method to study the impact of this development.

The 302 km² Yvel watershed is the site of a highly developed region of small headwater dams because the geological substratum is composed mainly of schist with low groundwater reserves, precipitation is less than the regional average, and the industrial demand for vegetable crops is high. For all these reasons, this watershed is particularly vulnerable. Moreover, from a regional policy point of view, the downstream part of the watershed is located within the Morbihan county whereas the upstream part is located within the Côtes

1 C. CUDENNEC, RD Mission en Tunisie, BP 434, 1004 El Menzah 4, Tunisie.

Tél. (216) 71 750 809, Fax : (216) 71 750 254.

E-mail : Christophe.Cudennec@ird.fr ou Christophe.Cudennec@agrocampus-rennes.fr

2 AQUASCOP, 1 av. Bois-l'Abbé, 49070 Beaucozéz, France.

3 INRGREF, rue 7050, BP 10, Ariana, Tunisie.

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 30 décembre 2004.

d'Armor and Ille et Vilaine counties, which do not provide any financial support for irrigation development. The current concentration of headwater irrigation dams reflects these regional development incentives as dams are mostly built in the downstream part of the watershed.

To study the impact of small headwater dams on watershed hydrology, we propose a conceptual tool built around a geomorphological instantaneous unit hydrograph (GIUH) modelling approach. The GIUH structure, which is based on the effective watershed normalized area function and an estimated mean flow velocity, allows for the explicit accounting of dams and, and thus, can be used for *a priori* assessment studies. It can also be used in a semi-distributed perspective, where spatial discretization is determined from rainfall variabilities instead of gauging station constraints. These two points allowed us to study three regional irrigation development scenarios: construction of 100, 200 and 300 future headwater irrigation dams. Using two observed rainfall events, we showed that the simulated hydrograph shape at the watershed outlet can be significantly modified.

In conclusion, *in situ* observations and simulation results suggest that : (1) headwater dams do not have any impact when reservoirs are full - lamination is locally observed and thus, does not have any impact on the watershed hydrograph; (2) a spatially homogeneous implementation of headwater dams modifies the watershed hydrograph according to a contributing watershed area ratio; similar behaviour is observed for low water level periods; and (3) localized implementation can be studied through modelling with enough precision to give relevant information to decision makers.

Key words: *headwater dams; prospective scenario; geomorphological unit hydrograph; semi-distributed rainfall runoff model.*

RÉSUMÉ

En raison du développement de l'industrie légumière, les retenues collinaires à vocation d'irrigation se multiplient dans le département du Morbihan (Bretagne, France). Même si de tels aménagements hydrauliques ont une influence individuelle faible, leur multiplication et leur concentration géographique peuvent avoir des conséquences dommageables sur l'hydrologie de surface. Nous proposons d'utiliser une fonction de transfert de type Hydrogramme Unitaire Géomorphologique, basée sur l'identification de la fonction aire normalisée du bassin versant contribuant effectivement à l'écoulement et sur l'estimation d'une vitesse moyenne d'écoulement dans les thalwegs. Le déterminisme de cette fonction de transfert permet de semi-distribuer l'afflux pluviométrique. Il nous permet en outre de proposer une méthodologie de simulation explicite de l'effet agrégé des retenues collinaires, connaissant leur mode de fonctionnement hydraulique local. Puis, pour le bassin versant pilote de l'Yvel (302 km²), nous étudions *a priori* l'impact de l'implantation de retenues collinaires selon un scénario géographique de développement préférentiel et pour différents degrés d'intensification.

Mots clés : *retenues collinaires ; scénario prospectif ; hydrogramme unitaire géomorphologique ; modèle pluie-débit semi-distribué.*

1 – INTRODUCTION

Sous l'impulsion de l'industrie agro-alimentaire, de nombreuses exploitations agricoles du département français du Morbihan ont développé les productions légumières à forte valeur ajoutée (petit pois, haricot, épinard...). Pour assurer un fort rendement et respecter les engagements contractuels passés avec les industriels, l'irrigation de ces cultures a été largement développée. Depuis 1989, 500 à 600 ha/an font l'objet d'aides financières nationales, régionales et départementales pour l'équipement en infrastructures d'irrigation. L'objectif affiché par le programme de subventionnement de la chambre d'agriculture est d'irriguer 50 % des surfaces productrices de légumes à vocation de transformation industrielle. Le prélèvement en eau pour cet usage a été estimé à 6 millions de m³ pour l'année 1999. Le besoin coïncide avec la période d'étiage des cours d'eau. Il y a donc concurrence avec l'alimentation en eau potable et le maintien d'un débit réservé. Par ailleurs, les ressources souterraines sont très faibles et donc peu exploitables. Par conséquent la solution est l'implantation de retenues collinaires qui stockent les écoulements hivernaux en vue de leur utilisation en été. Devant la multiplication des retenues collinaires dans des zones géographiques de prédilection, présentant parfois une certaine vulnérabilité en raison des caractéristiques géologiques, écologiques et humaines, les autorités départementales ont posé la question de la quantification de l'impact sur la ressource en eau de surface. Cette préoccupation s'inscrit en outre dans le cadre réglementaire français de la loi sur l'eau de 1992. En effet, le schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE), mis en place pour répondre à cette loi, demande qu'une étude d'incidence soit réalisée dès qu'un bassin versant est équipé ou en projet d'équipement d'un ensemble d'ouvrages ayant une importance significative sur le régime des eaux. Plus précisément, le schéma directeur recommande de mener des réflexions complémentaires sur les retenues collinaires et les eaux closes, afin de parvenir à proposer des définitions précises et des principes pour leur création et leur gestion.

2 – INFLUENCE DES RETENUES COLLINAIRES

2.1 Caractérisation des retenues collinaires

En France, les retenues collinaires ont officiellement « pour but de stocker les eaux excédentaires d'hiver et non les résurgences, sources et autres écoulements permanents [...] et ne devront pas drainer les nappes alluviales » (DIREN dans SAGOT *et al.*, 1994). Par conséquent, il s'agit pratiquement de retenues artificielles non traversées par un cours d'eau permanent, localisées en tête de thalweg. Notons, que cette définition est plus stricte que celle que le MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE (1963) proposait dans un guide officiel, dont

le but était de développer ces ouvrages en France à partir du savoir-faire étranger et essentiellement méditerranéen. Parce que le développement des retenues collinaires a commencé avant la promulgation de la loi de 1992 et parce que toutes les mises en conformité n'avaient pas été réalisées, 68 % seulement des retenues du Morbihan respectaient la définition en 1994 (SAGOT *et al.*, 1994). Parmi les écarts à la règle, on pouvait observer 13 % de retenues implantées sur un cours d'eau ou une déviation. Les 19 % restant correspondent à des retenues alimentées au moins partiellement par des eaux souterraines. Cependant, les retenues implantées depuis respectent le cahier des charges puisque l'obtention de subventions en dépend. Le respect d'un débit réservé n'est pas prévu, contrairement à ce que l'on observe dans d'autres régions de France. Les retenues sont donc implantées et dimensionnées pour le seul objectif de leur remplissage, puis de leur déversement automatique. Par conséquent les retenues collinaires ont chacune une influence locale sans conséquence majeure à l'échelle d'un grand bassin versant. Cependant, leur multiplication peut avoir un effet cumulé sensible dont la quantification est problématique.

2.2 Quantification de l'influence des retenues collinaires

L'évaluation de l'impact quantitatif de retenues collinaires est une question relativement nouvelle en France et les études à ce sujet sont donc rares. Nous en avons identifié trois qui s'intéressent aux bassins versants d'affluents de la Garonne (DELBREILH, 1993) ou du Rhône (EPTEAU, 1994 ; SRAE RHÔNE-ALPES et CIPEA, 1991). Dans ces trois études, la même hypothèse, à savoir une atténuation des débits proportionnelle à la superficie du bassin versant captée par les retenues, est utilisée lors de calculs de bilans hydrologiques. Il nous semble que cette démarche est très pertinente pour les débits d'étiage. Par contre une modélisation analytique semble être nécessaire à l'échelle de l'événement hydrologique et l'enjeu est alors double. Il s'agit d'une part de pouvoir prendre en compte de façon explicite le rôle des aménagements hydrauliques, afin d'intégrer l'existant ainsi que les projets d'implantation pour l'étude *a priori* de leur impact. Il s'agit d'autre part de pouvoir intégrer les hétérogénéités et variabilités spatiales et étudier des scénarios géographiques d'aménagement préférentiel. Le modèle utilisé doit donc être robuste et à base physique affirmée. Nous proposons de nous appuyer sur une modélisation pluie-débit dont la fonction de transfert est de type hydrogramme unitaire géomorphologique.

3 – PROPOSITION MÉTHODOLOGIQUE DE PRISE EN COMPTE DES RETENUES COLLINAIRES DANS UNE MODÉLISATION À BASE GÉOMORPHOLOGIQUE

À partir du concept classique d'hydrogramme unitaire (DOOGE, 1959 ; SHERMAN, 1932), et afin de gagner en déterminisme, la notion d'hydrogramme unitaire géomorphologique a été proposée. Le principe de base est que l'hydrogramme unitaire d'un bassin versant correspond à la fonction de densité de probabilité

des temps d'arrivée à l'exutoire, qui peut elle-même être déduite d'une description de l'hydrographie du bassin versant. Deux familles d'hydrogrammes unitaires géomorphologiques ont alors été développées. La première s'appuie sur la topologie de hiérarchie du réseau hydrographique (GUPTA *et al.*, 1980 ; RODRIGUEZ-ITURBE et VALDES, 1979). La seconde s'appuie sur les fonctions géomorphologiques du bassin versant suivantes : 1) la fonction aire normalisée, qui est la fonction de densité de probabilité de l'aire contributive en fonction de la distance hydraulique à l'exutoire ; 2) la fonction largeur normalisée, qui est la proportion du nombre de biefs du réseau hydrographique exprimée en fonction de la distance hydraulique à l'exutoire. Cette deuxième fonction est souvent utilisée dans la littérature comme approximation de la première, surtout avec le développement des graphes hydrologiques extraits de modèles numériques de terrain qui assimilent maille et bief. La formulation de l'hydrogramme unitaire géomorphologique à partir de ces fonctions est alors la suivante (KARLINGER et TROUTMAN, 1985 ; ROBINSON *et al.*, 1995 ; SNELL et SIVAPALAN, 1994) :

$$u(t) = \int_0^{\infty} a(x) \cdot p(x, t) \cdot dx \quad (1)$$

avec x la distance hydraulique et t le temps d'arrivée jusqu'à l'exutoire ;

$a(x)$ la fonction aire ou largeur normalisée ;

$p(x, t)$ la fonction de densité de probabilité du temps de parcours t de la distance hydraulique x .

L'hydrogramme de crue résultant d'un événement de précipitation sur le bassin versant de surface S est alors obtenu par convolution entre l'hydrogramme unitaire géomorphologique $u(t)$ et la chronique d'intensité de pluie nette moyenne sur le bassin $i_{\text{nette}}(t)$ obtenue par application d'une fonction de production à l'intensité de pluie brute :

$$Q(t) = S \cdot \int_0^t i_{\text{nette}}(t - \tau) \cdot u(\tau) \cdot d\tau \quad (2)$$

L'estimation de la fonction $p(x, t)$ peut relever de différentes méthodes d'approximation des processus d'hydraulique fluviale comme une translation suivie du passage par un réservoir linéaire conceptuel (FOROUD et BROUGHTON, 1981), la prise en compte des dispersions hydrodynamique locale et géomorphologique globale (KARLINGER et TROUTMAN, 1985 ; SNELL et SIVAPALAN, 1994), ou l'utilisation d'un spectre de plusieurs vitesses d'écoulement (MAIDMENT *et al.*, 1996). Néanmoins l'hypothèse d'une vitesse moyenne de parcours, proposée dès 1976 par KIRKBY (1976), est fréquemment admise dans la littérature (RODRIGUEZ-ITURBE et RINALDO, 1997), en particulier lorsque la robustesse de la modélisation est volontairement recherchée ou incontournable compte tenu du peu de données disponibles. La valeur de cette vitesse peut être estimée facilement à partir de quelques couples hyétogramme-hydrogramme (non nécessairement d'ailleurs au point exutoire étudié) et l'expression de l'hydrogramme unitaire géomorphologique est alors homothétique de la fonction géomorphologique qui lui sert de support.

Ayant un objectif de robustesse, nous proposons ici d'utiliser cette dernière expression de l'hydrogramme unitaire géomorphologique, obtenue à partir de la

fonction aire et de l'estimation d'une vitesse moyenne de parcours pour chaque événement. Ainsi, en considérant le réseau de tous les thalwegs, l'hydrogramme unitaire proposé décrit le transfert rapide et concentré à travers le bassin versant. Les transferts au sein du versant doivent quant à eux être décrits par la fonction de production à associer. Cette signification physique des fonctions mathématiques nous permet de faire la proposition suivante : les effets des aménagements hydrauliques des versants doivent être pris en compte dans la fonction de production, et ceux des aménagements des thalwegs dans la fonction de transfert, y compris les retenues collinaires qui nous intéressent. Cette signification physique permet en outre d'atténuer certains points critiquables du concept d'hydrogramme unitaire comme la globalité et la stationnarité.

4 – APPLICATION À UN BASSIN VERSANT REPRÉSENTATIF

4.1 Le bassin versant pilote de l'Yvel

Nous avons choisi comme site d'étude pilote le bassin versant de l'Yvel (figure 1) au niveau de la station de jaugeage du Pont de Loyat (Coordonnées Lambert 248979/1043554), qui présente une superficie de 302 km². Ce bassin versant se situe dans une zone de développement des retenues collinaires, et donc de vulnérabilité, en raison de son sous-sol majoritairement schisteux limitant les ressources en eaux souterraines, d'une pluviométrie inférieure à la moyenne départementale et d'une demande de la filière industrielle légumière. De plus, ce bassin versant illustre un problème complémentaire de politique territoriale : l'aval se situe dans le département du Morbihan tandis que l'amont est implanté dans les deux départements voisins des Côtes d'Armor et de l'Ille et Vilaine qui n'ont pas la même politique incitative en matière d'irrigation. Cette différence structurelle est confirmée par l'implantation très nettement préférentielle des cultures légumières dans le sud du bassin versant.

4.2 Modélisation du fonctionnement actuel du bassin versant

Nous avons recensé à partir de photographies aériennes et d'observations de terrain les étangs et les retenues collinaires existant sur le bassin versant (SARRAZA, 1997). 199 étendues d'eau ont ainsi été répertoriées, dont 17 retenues collinaires, toutes localisées précisément par rapport au réseau hydrographique. En terme de fonctionnement hydraulique, nous pouvons noter les points suivants :

- La quasi totalité de ces étendues d'eau se déverse par des trop pleins.
- Leur petit volume ne permet pas d'en suivre le fonctionnement de manière exhaustive.
- Les étangs de bas de versant, ne coupant pas le thalweg, n'ont aucune influence sur le transfert dans les cours d'eau.

Les retenues collinaires et les étangs coupant les thalwegs stockent tous les écoulements provenant de l'amont, sauf en cas de déversement l'hiver.

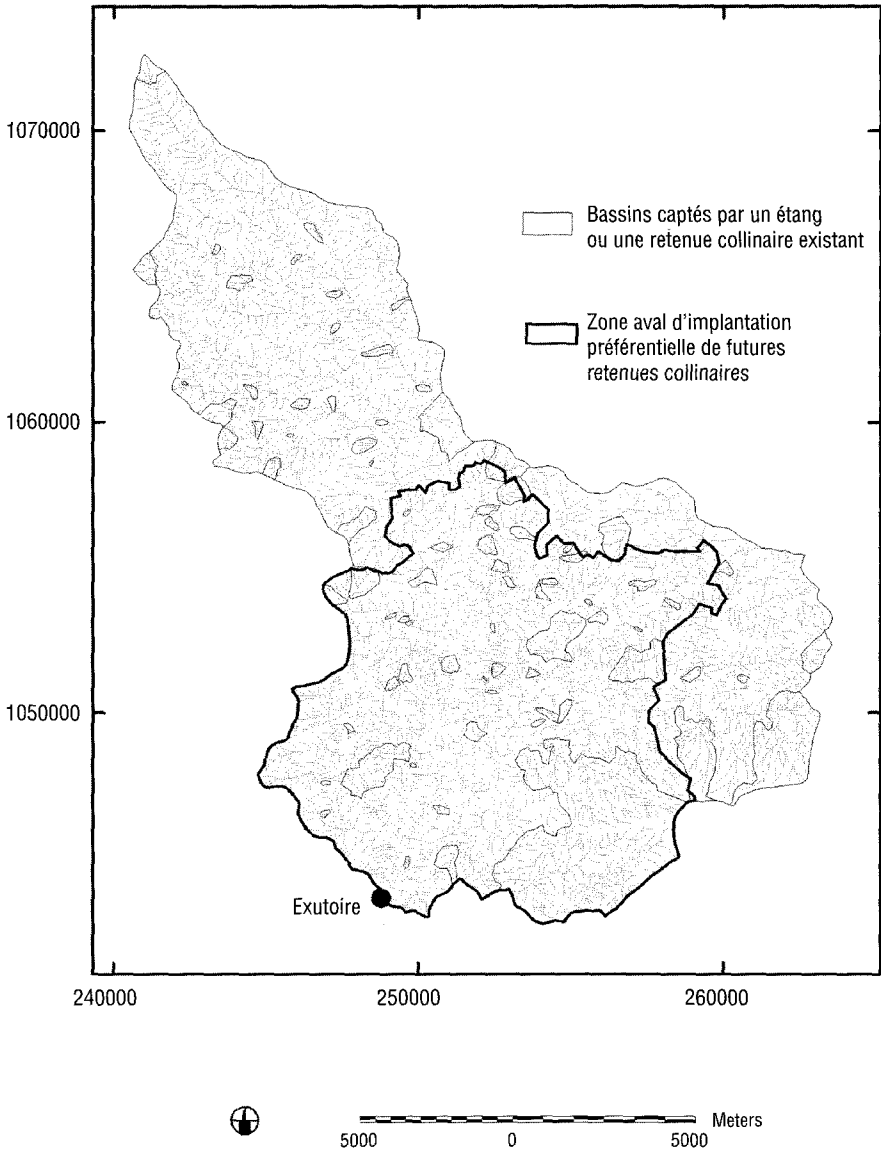


Figure 1 Présentation du bassin versant de l'Yvel (Système de projection Lambert).

Presentation of the Yvel watershed (Lambert system).

Dans ce cas, le laminage est alors faible en raison de leur petit volume et l'effet des retenues est négligeable. L'impact des étendues d'eau sur le réseau hydrographique, et par conséquent des retenues collinaires potentielles, n'est donc sensible qu'en période estivale où l'on peut considérer qu'elles retiennent tout l'écoulement produit par leur bassin versant d'alimentation. La fonction de transfert au niveau de l'exutoire global est alors celle du bassin versant amputé

des zones d'alimentation des étangs et retenues (figure 1). Le réseau hydrographique à considérer est donc le réseau effectif non capté. La figure 2 présente la fonction aire correspondante observée sous système d'information géographique, par analyse d'une image vecteur représentant la géométrie et la topologie du réseau. La vitesse moyenne d'écoulement \bar{v} est estimée en confrontant le temps de réponse à l'abscisse du mode de cette fonction. En adaptant cette vitesse à chaque événement, l'hydrogramme unitaire géomorphologique reste invariant, et donc linéaire, à l'échelle intra-événementielle ; mais devient non-stationnaire à l'échelle inter-événementielle. Ainsi, le mode de la fonction aire a pour abscisse 23 000 m et le temps de réponse de l'événement unimodal des 9 et 10 août 1994 (figure 3.a) est de 23 heures, ce qui donne une vitesse moyenne \bar{v} de l'ordre de $0,28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. L'événement multimodal des 2, 3 et 4 juillet 1995 (figure 3.b) présente quant à lui des temps de réponse égaux à 21, 16 et 21 heures pour chacun des trois pics de débit successifs. Cela correspond à une vitesse moyenne \bar{v} variant entre $0,3$ et $0,37 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ et que nous avons prise égale à $0,33 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ en moyenne pour l'événement.

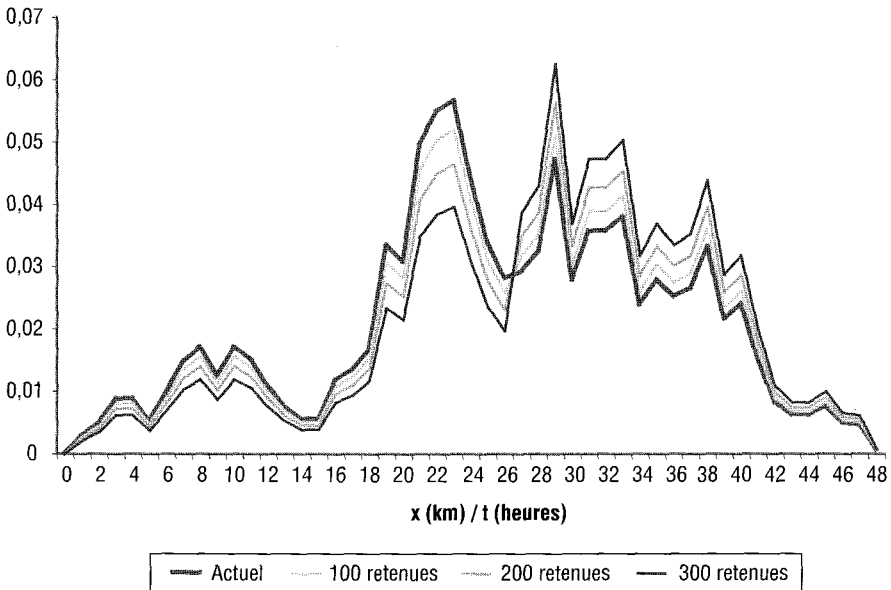


Figure 2

Fonction aire normalisée (en fonction de x) actuelle du bassin versant effectif de l'Yvel ; fonctions prospectives correspondant à l'implantation de 100, 200 et 300 retenues collinaires dans la zone préférentielle aval ; et déduction des hydrogrammes unitaires géomorphologiques (en fonction de t) après estimation d'une vitesse moyenne d'écoulement (exemple avec $\bar{v} = 0,28 \text{ m/s}$).

Actual normalized area function (in terms of x) of the effective Yvel watershed; prospective functions corresponding to the implementation of 100, 200 and 300 headwater dams in the downstream preferential area; and related geomorphological unit hydrographs (in terms of t) through a mean flow speed estimation (example with $\bar{v} = 0.28\text{m/s}$).

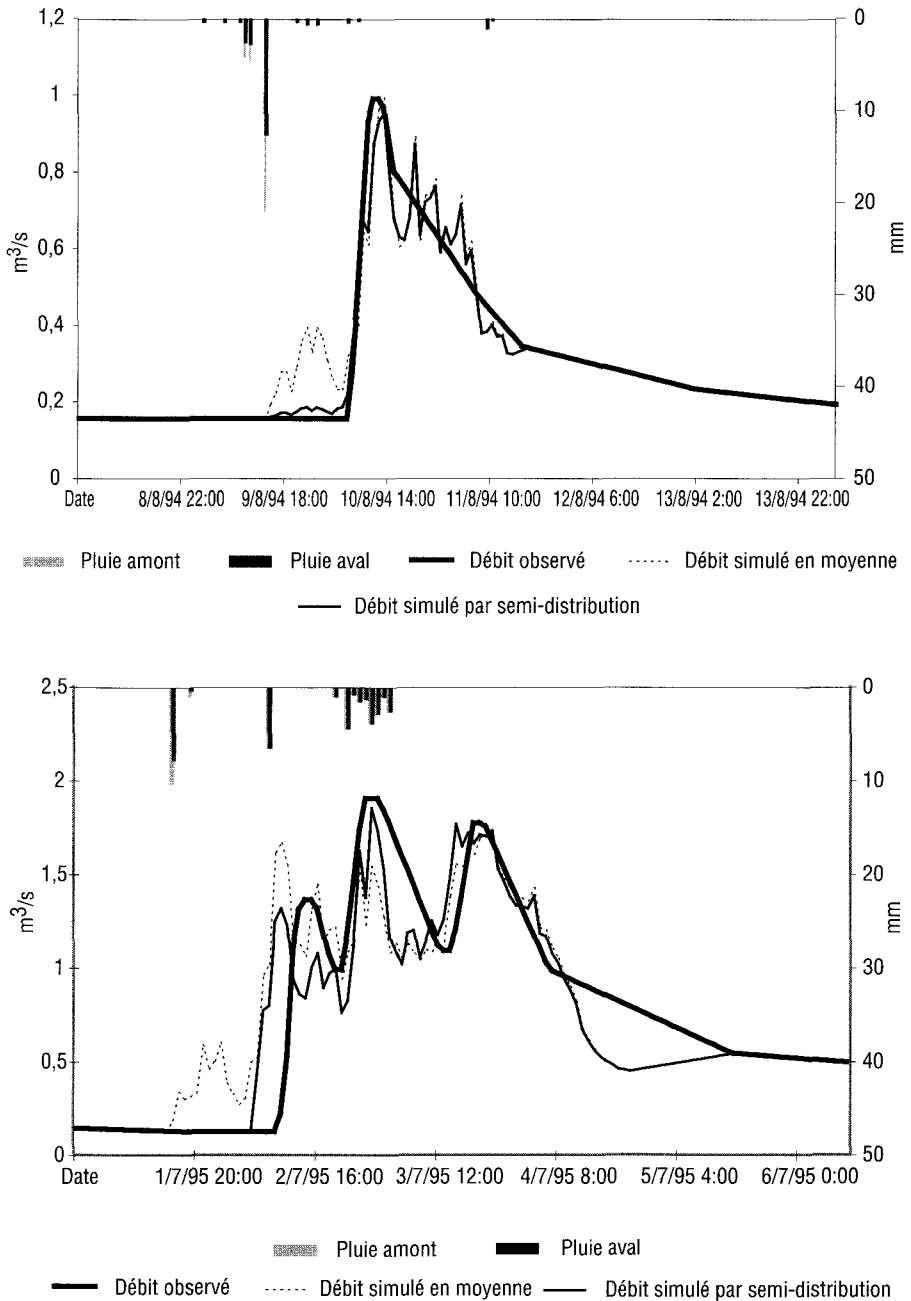


Figure 3 Simulation de deux hydrogrammes, en moyenne et avec semi-distribution de la pluie nette. a) Événement des 9-10 août 1994. b) Événement des 2-4 juillet 1995.

Simulation of two hydrographs with average and semi-distributed effective rainfall. a) August 9-10, 1994 event. b) July 2-4, 1995 event.

En termes de fonction de production, l'aménagement des versants n'étant pas à l'étude, nous nous sommes limité à la séparation du débit de base et de l'écoulement rapide et à l'estimation d'un coefficient d'écoulement avec l'objectif prioritaire de reproduire les pics de débit. Cependant les événements pluvieux estivaux présentent des champs pluviométriques variables selon un gradient fréquemment orienté du Sud au Nord, c'est-à-dire de l'aval vers l'amont, lié au gradient d'altitude. Pour en tenir compte, nous avons semi-distribué la modélisation selon deux zones correspondant aux lieux dont la distance hydraulique à l'exutoire est inférieure ou supérieure à un seuil géométrique $X = 18$ km, correspondant à un seuil temporel T après application de la vitesse moyenne \bar{v} . La mise en œuvre de cette semi-distribution, détaillée par CUDENNEC *et al.* (2002), revient à préciser l'équation (2) de la façon suivante :

$$Q(t) = S \cdot \left[\int_0^T \overline{i_{nette,aval}}(t - \tau) \cdot u(\tau) \cdot d\tau + \int_T^t \overline{i_{nette,amont}}(t - \tau) \cdot u(\tau) \cdot d\tau \right] \quad (3)$$

où $\overline{i_{nette,aval}}$ et $\overline{i_{nette,amont}}$ sont les intensités de pluie nette moyenne sur les zones respectivement aval et amont du schéma de semi-distribution. La modification de la forme de l'hydrogramme qui en résulte, aboutit nécessairement à une modification du coefficient d'écoulement à utiliser pour reproduire les pics de débit.

Nous avons ainsi pu mettre en œuvre la modélisation pluie-débit pour des événements observés présentant des pics de crue bien individualisés (SARRAZA, 1997). La figure 3 met en évidence l'intérêt de cette semi-distribution pour les événements des 9-10 août 1994 et des 2-4 juillet 1995, que nous considérons comme crues de projet. Le phasage des pics des hydrogrammes réels et simulés est acceptable pour l'événement de 1994 et pour le pic central de l'événement de 1995. Par contre, la simulation des deux autres pics de l'hydrogramme de 1995 est précoce. Cela vient de l'usage d'une vitesse moyenne par événement qui est très simplificateur par rapport à la non-linéarité de la réponse à la pluie. L'erreur de date est néanmoins moins forte qu'elle ne le serait avec une vitesse moyenne inter-événement. En outre, la figure 3 met en évidence l'intérêt de la semi-distribution de la pluie, en particulier au début de chacun des deux événements, où elle permet de corriger la surestimation des débits produits par l'aval du bassin versant peu sollicité par une pluie localisée en amont. Enfin, la forme générale des hydrogrammes simulés est très vraisemblable, malgré des oscillations inhérentes à l'utilisation d'une fonction géomorphologique irrégulière avec un opérateur linéaire.

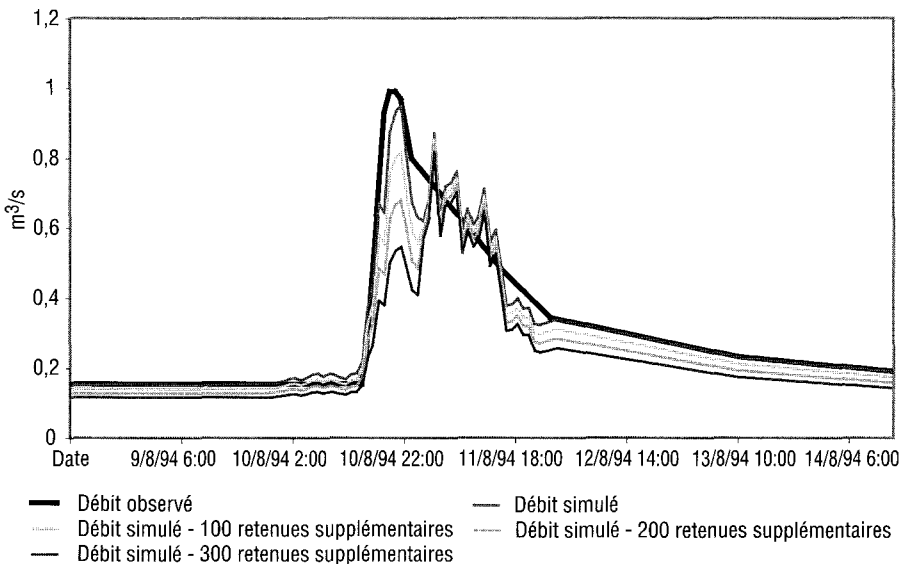
4.3 Un scénario prospectif

À partir des modélisations d'événements réels, nous proposons de simuler *a priori* le développement de nouvelles retenues collinaires, sans présumer de l'implantation exacte de chacune, sur la base des règles suivantes :

- La superficie totale à prendre en compte dans la convolution doit être diminuée de la surface drainée par les retenues envisagées. Nous considérons qu'une retenue type draine 20 hectares.
- D'après la densité de drainage du bassin versant ($57 \text{ m} \cdot \text{ha}^{-1}$), la longueur hydraulique tronquée au niveau de chaque retenue est de 1 140 m. Mais

nous supposons que l'implantation des retenues est homogène dans l'espace, au moins zone par zone. Par conséquent toutes les classes de la fonction de densité de chaque zone sont affectées proportionnellement à leur effectif, ce qui ne change pas *in fine* la fonction de transfert de la zone puisqu'elle est normée.

Par conséquent, la fonction de transfert est identique si les retenues envisagées sont réparties de façon homogène sur le bassin versant. Un scénario de développement de retenues collinaires moyen sur le bassin versant aboutit donc à un hydrogramme affiné de l'hydrogramme actuel. La fonction de transfert doit par contre être modifiée, si les retenues envisagées sont localisées dans une partie du bassin versant, en appliquant des affinités différentielles dans la fonction aire et donc dans l'hydrogramme unitaire géomorphologique qui en découle. La diminution de la surface contributive doit en outre être répercutée dans le calcul de convolution, et également dans une atténuation du débit de base. Nous avons ainsi développé le scénario de la zone aval ($x < 26$ km) de la figure 1, identifiée comme région préférentielle de développement des retenues collinaires en raison des conditions climatiques, économiques et politiques. La figure 2 présente les modifications de la fonction de transfert pour 100, 200 et 300 retenues collinaires en projet. Il apparaît que la zone amont du bassin versant devient prééminente. La figure 4 présente quant à elle les hydrogrammes simulés correspondants, pour les événements des 9-10 août 1994 et des 2-4 juillet 1995. Ces simulations mettent en évidence l'atténuation du début de l'hydrogramme due à l'aménagement de l'aval du bassin versant, et par conséquent une modification profonde de la forme de l'hydrogramme. Cette modification de forme résulte de la modification des influences relatives des zones aménagées à l'aval et non-aménagées à l'amont, sous influence du zonage pluviométrique. Cela revient donc à des affinités différentielles ; ce qui conserve le caractère oscillatoire fort dû à l'irrégularité de l'opérateur linéaire, ainsi que les paramètres temporels et donc la date des pics de débit.



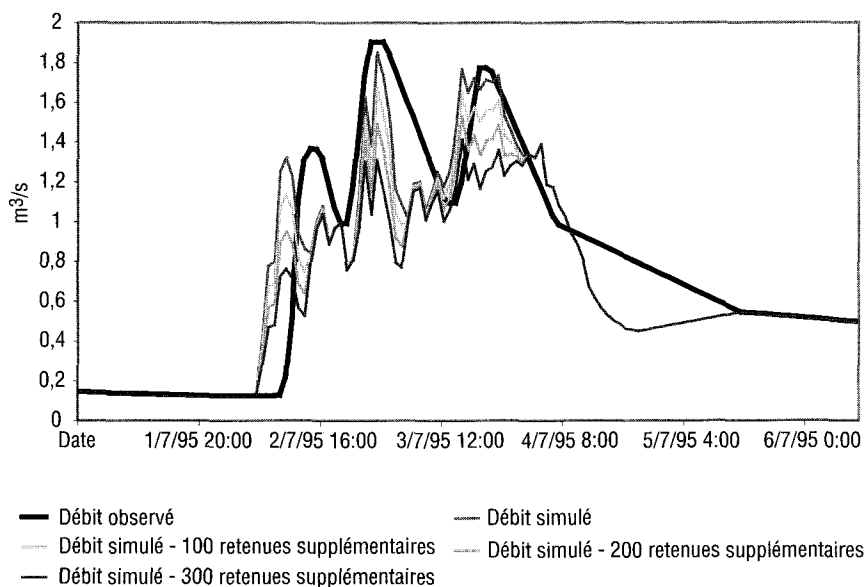


Figure 4 Hydrographes simulés avec les fonctions de transfert actuelle et prospectives. a) Événement des 9-10 août 1994. b) Événement des 2-4 juillet 1995.

Simulated hydrographs with the actual and prospective transfer functions. a) August 9-10, 1994 event. b) July 2-4, 1995 event.

5 – CONCLUSION

Devant la question de la quantification de l'impact sur la ressource en eau de surface de la multiplication actuelle et future de retenues collinaires nous faisons des propositions. La première est d'identifier le bassin versant de l'Yvel (302 km²) comme représentatif de la problématique, en raison de son contexte agricole, hydrologique et politique. La deuxième consiste à proposer un cadre de modélisation et de prise en compte explicite des retenues. L'utilisation d'un hydrogramme unitaire à base géomorphologique est robuste par rapport à la faible disponibilité de données, tout en permettant d'explicitier l'influence des ouvrages dans la modélisation, et donc d'ouvrir la possibilité d'études d'impact *a priori*. La linéarité de l'opérateur contribue à cette robustesse. *A contrario*, la linéarité est simplificatrice et génère des oscillations dans les simulations. Mais elles sont acceptables par rapport à notre objectif d'opérationnalité pour l'aide à la décision. Le support géomorphologique facilite en outre une semi-distribution déterminée par les variabilités, et non pas contrainte par l'existence de stations de jaugeage. Ces deux points permettent d'étudier différents scénarios, dont le plus vraisemblable que nous présentons ici, qui associe des semi-distributions différentes pour la prise en compte de la variabilité du champ pluviométrique et de la zone d'aménagement.

L'observation *in situ* et la modélisation nous ont permis de mettre en évidence trois points majeurs. Premièrement, les retenues collinaires n'ont aucun impact lorsqu'elles sont pleines et déversent systématiquement. Le laminage qu'elles engendrent localement n'a aucune influence à l'échelle du bassin versant. Deuxièmement, l'hypothèse d'un développement homogène dans l'espace a pour conséquence une atténuation des hydrogrammes par une affinité correspondant à la proportion de surface captée. C'est également le cas pour les débits d'étiages. Troisièmement, l'hypothèse d'un développement localisé dans certaines zones peut être envisagée. La fonction de transfert peut alors être modifiée en conséquence et l'influence sur les hydrogrammes de crue peut être simulée.

En outre il apparaît qu'une telle démarche peut être généralisée quel que soit le degré de variabilité des forçages atmosphériques (CUDENNEC *et al.*, 2002). Elle peut par ailleurs être appliquée à des retenues plus conséquentes, dans la mesure où les implantations précises et les règles de gestion hydraulique peuvent être intégrées explicitement. Enfin, une telle démarche peut servir à préparer l'implantation de retenues à vocation de minimisation des crues, comme cela est envisagé dans l'actuel projet de loi français sur la prévention des risques naturels.

6 – REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Conseil général du Morbihan et l'ODEM (Observatoire départemental de l'Environnement du Morbihan) de leur avoir permis de réaliser cette étude, ainsi que les deux réviseurs anonymes pour leurs préconisations.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 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 Publi.*, 271: 187-192.
- DELBREILH N., 1993. Approche de l'impact sur l'environnement d'un ensemble de retenues collinaires – Cas de la Séoune. CNRS, Centre d'écologie des ressources renouvelables, Toulouse, *Rapport scientifique*.
- DOOGE J.C.I., 1959. A general theory of the unit hydrograph. *J. Geophys. Res.*, 64, 241-256.
- EPTEAU, 1994. Étude de l'impact des retenues collinaires sur le régime général des eaux. Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, Lyon, *Rapport scientifique*.
- FOROUD N., BROUGHTON R.S., 1981. Flood hydrograph simulation model. *J. Hydrol.*, 49, 139-172.
- GUPTA V.K., WAYMIRE E., WANG C.T., 1980. Representation of an instantaneous unit hydrograph from geomorphology. *Water Resour. Res.*, 16, 855-862.
- KARLINGER M.R., TROUTMAN B.M., 1985. Assessment of the instantaneous unit

- hydrograph derived from the theory of topologically random networks. *Water Resour. Res.*, 21, 1693-1702.
- KIRKBY M.J., 1976. Tests of the random network model and its application to basin hydrology. *Earth Surf. Proc.*, 1, 197-212.
- MAIDMENT D.R., OLIVERA F., CALVER A., EATHERALL A., FRACZEK W., 1996. Unit hydrograph derived from a spatially distributed velocity field. *Hydro. Proc.*, 10, 831-844.
- MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, 1963. Retenues collinaires. LA DOCUMENTATION FRANÇAISE, Paris.
- ROBINSON J.S., SIVAPALAN M., SNELL J.D., 1995. On the relative roles of hillslope processes, channel routing, and network geomorphology in the hydrologic response of natural catchments. *Water Resour. Res.*, 31, 3089-3101.
- RODRIGUEZ-ITURBE I., VALDÈS J.B., 1979. The geomorphologic structure of hydrologic response, *Water Resour. Res.*, 15, 1409-1420.
- RODRIGUEZ-ITURBE I., RINALDO A., 1997. Fractal river basins ; chance and self-organization. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, Cambridge.
- SAGOT F., HUBAUD M.O., DANIEL F., 1994. Étude des caractéristiques des retenues collinaires pour l'irrigation dans le Morbihan. ODEM, Vannes, *Rapport scientifique*.
- SARRAZA M., 1997. Impact de la multiplication des retenues collinaires sur la ressource en eau ; cas du bassin versant de l'Yvel. ENSAR - ODEM, Rennes, *Rapport scientifique*.
- SHERMAN L.K., 1932. Streamflow from rainfall by the unit hydrograph method. *English News Record*, 108, 501-505.
- SNELL J.D., SIVAPALAN M., 1994. On geomorphological dispersion in natural catchments and the geomorphological unit hydrograph. *Water Resour. Res.*, 30, 2311-2323.
- SRAE RHONE ALPES, CIPEA, 1991. Étude de l'impact des retenues collinaires sur les étiages dans le bassin du Doux. Lyon, *Rapport scientifique*.