

Tarissement et prévision de l'étiage

Essai de prédétermination des paramètres de modèles conceptuels.

C. Lang, E. Gille, D. François

*Centre d'Etudes Géographiques de l'Université de Metz – Université Paul VERLAINE ,
France*

Résumé: Le retour d'expérience de la sécheresse hydrologique de 2003 a incité de nombreux services gestionnaires à se pourvoir d'outils pour la prévision des étiages. A ce titre, le CEGUM travaille avec l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse sur la prévision et la simulation des étiages sévères par une modélisation conceptuelle pluie-débit à court et long terme. Cette recherche fonde la prévision des débits d'étiage sur l'analyse des tarissements. Cette démarche permet, en outre, de limiter les problèmes d'équifinalité afférents à l'assignation empirique de valeurs dans les phases de calage. En effet, la modélisation recourt à l'« optimisation assistée », car elle utilise les valeurs des coefficients de tarissement pour initialiser le paramètre de vidange linéaire des réservoirs d'eau gravitaire. Or, ce paramètre ne peut être calculé de la même façon pour un modèle mensuel et pour un modèle journalier, en raison de la gestion différente des flux et des réservoirs. Nous proposons donc de présenter sur le poster deux méthodes de calcul des coefficients de tarissement pour différencier ces deux pas de temps, et leur utilisation dans les modèles pluie-débit. La première méthode utilise les données moyennes mensuelles pour quantifier la vidange mensuelle des aquifères. La méthode de calcul de la pente de décroissance des débits, à partir du régime des cours d'eau, intègre donc à la fois la pluie et la recharge des nappes. Les coefficients de tarissement peuvent être directement utilisés pour la prévision à long terme. La seconde méthode utilise les hydrogrammes de données journalières à partir desquels sont extraits les phases de tarissement. Un outil d'extraction automatique de toutes les phases de débits décroissants consécutifs non influencés par les pluies a été élaboré. Cet outil produit une statistique des coefficients de tarissement (calculés par la loi de Maillet), et propose également une courbe maîtresse de tarissement. Enfin, la connaissance des coefficients de tarissement aboutit à la proposition d'une méthode de séparation des écoulements dont nous déduisons les coefficients d'écoulement de crue. De la même manière que pour les tarissements, ces coefficients sont intégrés dans le modèle pour estimer l'écoulement de crue. La connaissance des coefficients de tarissement et d'écoulement de crue permet, au final, d'encadrer le paramétrage des modèles.

Mots clés: étiage, prévision, tarissement, modèle, écoulement de base

Introduction

Les mesures de plus en plus restrictives des législateurs, notamment en terme de qualité et d'évaluation de la ressource en eau, contraignent les services gestionnaires à se doter d'outils d'aide à la gestion de plus en plus performants. Pour l'ensemble du bassin Rhin - Meuse, les services disposent actuellement d'un référentiel statistique précis et d'une résolution spatiale très dense qui permet une bonne évaluation des situations d'étiage (catalogues des débits caractéristiques d'étiage, AERM, 1998, et base de donnée cartographique DECLIC, CEGUM-AERM, 2002). Cependant, les conditions climatiques particulières de l'année 2003, qui ont provoqué des étiages sévères et engendré des difficultés de gestion, rappellent que des progrès doivent être réalisés en terme de prévision. En effet, le retour d'expérience effectué à l'automne 2003 par le ministère de l'écologie et du développement durable, a montré que cette crise aurait pu être anticipée dès la fin de l'hiver, incitant de nombreux services à se pourvoir d'outils de prévision des débits d'étiage. A ce titre, l'Agence de l'Eau Rhin - Meuse a confié au CEGUM le projet PRESAGES (Prévision et Simulation pour l'Annonce et la Gestion des Etiages Sévères). L'objectif est d'élaborer des outils de prévision des débits d'étiage à court et moyen terme pour une soixantaine de cours d'eau du bassin Rhin - Meuse. Le CEGUM propose l'utilisation des modèles pluie - débit au pas de temps mensuel, pour la prévision à long terme, et au pas de temps journalier pour la prévision à court terme. Bien que cette recherche ait une finalité purement opérationnelle, nous excluons pour cette étude tous les modèles qui ne conceptualisent pas le cycle de l'eau (type boîte noire ou modèles mathématiques). Le CEGUM souhaite en effet approfondir ses recherches concernant les étiages (recherches commencées depuis 1978) et appréhender le comportement des bassins versants en période d'étiage. Cependant, pour rendre les résultats issus de la modélisation interprétables, il est nécessaire de limiter les problèmes d'équifinalité afférents à l'assignation empirique de valeurs dans les phases de calage. C'est pourquoi nous proposons d'effectuer un travail préalable à partir des valeurs de précipitations et de débits, qui permet d'estimer le coefficient de vidange des nappes (paramètre déterminant pour la prévision des débits d'étiage) et les coefficients d'écoulement de crue. Ces coefficients sont ensuite repris pour paramétrer des modèles mensuels et journaliers. Dans la mesure où toute procédure d'optimisation n'est pas abandonnée, nous utilisons pour décrire notre démarche le terme d'« optimisation assistée ».

1. L' " OPTIMISATION ASSISTÉE "

1.1 Les modèles conceptuels

Durant les trente dernières années, les recherches consacrées à la modélisation hydrologique ont connu un essor considérable, favorisé notamment par les progrès de l'informatique. De ce fait, le nombre de modèles ne cesse de s'accroître, et comme le souligne Ambroise (1998), « il y a presque autant de modèles que d'hydrologues ». Plusieurs auteurs ont ainsi proposé des classifications des modèles utilisés en hydrologie (Ambroise, 1998 ; Makhlof, 1994 ; Cosandey et Robinson, 2000). Sans prétendre à une liste exhaustive, nous recensons : les modèles linéaires (ou modèles statistiques), les modèles stochastiques (ou modèles probabilistes), les modèles mécanistes (ou modèles physiques), les modèles empiriques et les modèles conceptuels.

Les réflexions menées pour ce projet nous ont orienté vers les modèles conceptuels, dont nous retenons la définition suivante (Glossaire International d'Hydrologie) : « représentation mathématique simplifiée de tout ou partie des processus du cycle hydrologique par un ensemble de concepts hydrologiques exprimés en langage mathématique et reliés entre eux dans des séquences temporelle ou spatiale correspondant à celles que l'on observe dans la nature. Les modèles conceptuels sont utilisés pour simuler le comportement d'un bassin ». Il s'agit donc d'une « simplification » des modèles physiques au sens où l'on décrit le concept physique du système. Parfois qualifiés de « modèles réservoirs » dans la littérature, ils sont en effet fondés sur une représentation conceptuelle du bassin versant à partir de réservoirs alimentés par la pluie, ponctionnés par l'évapotranspiration et qui génèrent des écoulements selon des lois de vidange. L'approche conceptuelle répond donc pleinement aux exigences fixées par cette étude, et offre une vaste gamme de modèles qui ont fait l'objet de nombreuses synthèses (Mouhely S., 2000).

Une dizaine de modèles conceptuels ont été comparés pour cette étude afin de relever les principales différences émanant de leurs fonctionnements. Outre les variantes liées au nombre de réservoirs ou au nombre de paramètres utilisés, on observe, au sein des modèles qualifiés de conceptuels, des modèles « conceptuellement plus réalistes » que d'autres. Il existe ainsi des modèles qui se calent à l'aide de paramètres adimensionnels, (type ABCD, Makhlof, 1994), et des modèles qui conceptualisent l'ensemble du cycle de l'eau à partir de paramètres ayant une signification physique (type ORCHY, Gille E., Lang C., 2003, ou modèles GR, CEMAGREF). Notre choix s'est porté sur ce dernier type.

Le modèle ORCHY, conçu pour la compréhension du régime hydrologique des cours d'eau, est utilisé pour la modélisation mensuelle car il constitue un outil particulièrement adapté pour l' « optimisation assistée ».

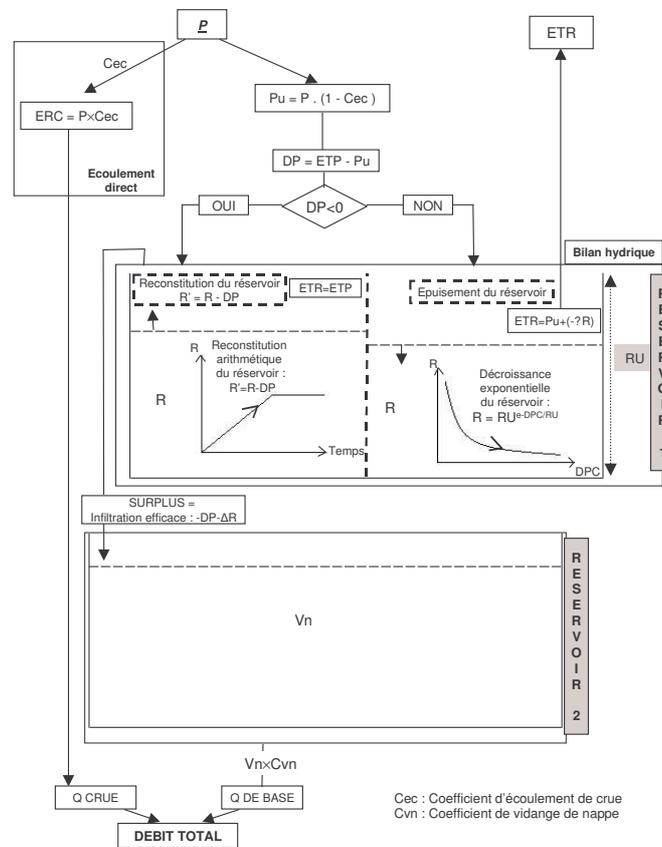


Figure 1. Architecture du modèle ORCHY

Pour éprouver cette démarche, nous utilisons également un modèle journalier du CEMAGREF (GR3J) qui a montré des résultats satisfaisants dans de nombreuses publications (Makhlouf, 1994). Un aménagement de ce modèle a cependant été nécessaire (Figure 2).

Soulignons toutefois que notre choix se porte prioritairement sur ces modèles, car l'objet de cette recherche résulte autant d'une volonté opérationnelle, qui exige des prévisions de débits d'étiage de qualité, que d'une volonté scientifique qui aspire à une meilleure compréhension du cycle hydrologique en période de basses - eaux.

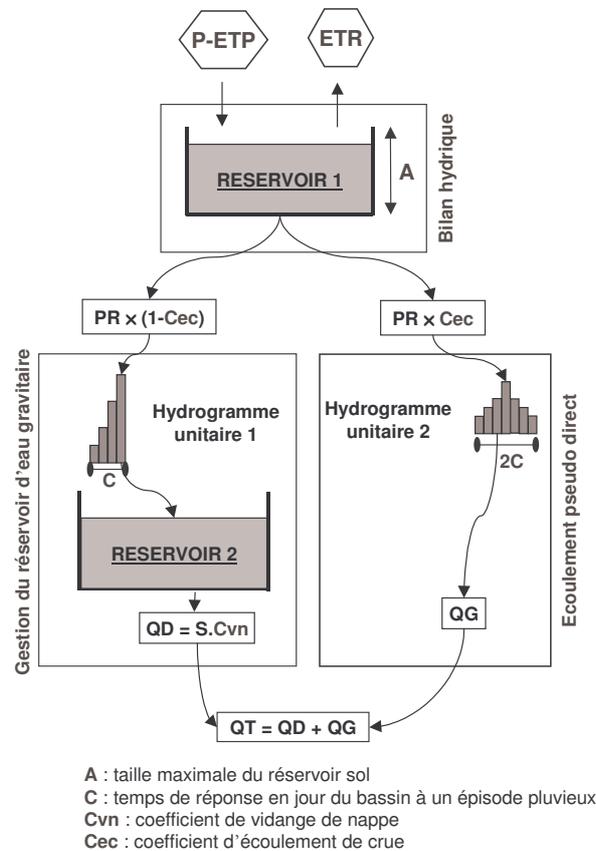


Figure 2. Architecture de GR3j d'après Makhoulf (1994) aménagé

1.2 Les paramètres des modèles

Notre recherche se fonde sur la prédétermination de deux paramètres fondamentaux, afin de s'affranchir au mieux de la procédure itérative à laquelle les opérateurs ont classiquement recours :

- le paramètre de vidange du réservoir d'eau gravitaire
- le paramètre de l'écoulement de crue

D'autres paramètres de calage sont utilisés :

- taille du réservoir sol (ORCHY et GR3J)
- durée de l'hydrogramme unitaire (GR3J)

Des essais d'explication de la taille du réservoir sol, par la physiographie des bassins versants, n'ont pas aboutis (Makloulf, 1994). Ce paramètre reste donc à caler de manière itérative. La durée de l'hydrogramme unitaire pourrait faire l'objet d'un travail spécifique pour sa prédétermination, mais il nous a été facile de l'estimer à partir de la taille des bassins versants. Dans d'autres modèles, des paramètres de calage supplémentaires (par exemple l'interception) apparaissent, mais ils ne nous semblent pas déterminants dans les résultats des simulations. Nous nous concentrons donc davantage sur la prédétermination des

paramètres de vidange des nappes et d'écoulement de crue, en observant en premier lieu de quelle manière ils sont utilisés dans les modèles.

1.2.1 Prédétermination du paramètre gérant la vidange du réservoir d'eau gravitaire

Le paramètre de vidange du réservoir d'eau gravitaire peut être estimé par l'analyse des tarissements. En effet, nous considérons que lors d'une période non influencée par les précipitations, la décroissance des débits (tarissement) correspond uniquement à la vidange du, ou des réservoirs d'eau gravitaire.

L'analyse des tarissements fait l'objet d'une bibliographie abondante. En effet, Boussinesq et Maillet (Tallaksen, 1995) ont pu démontrer que les courbes de décroissance des débits, qui expriment la relation entre le débit et le temps en régime non influencé par les pluies, correspondent généralement soit à des fonctions quadratiques (formule de Tison), soit à des fonctions exponentielles (formule de Maillet). Les autres lois proposées dans la bibliographie correspondant souvent à des dérivées ou des combinaisons de ces formulations de base. Or les lois de vidange utilisées dans les modèles conceptuels, se rapprochent très fortement des lois de tarissement. Parmi les différents types de vidanges proposés, on recense en effet des formulations linéaires, quadratiques et exponentielles (Michel, 2003). La formulation exponentielle étant peu répandue, nous ne l'abordons pas dans cette étude, d'autant plus qu'aucun des modèles utilisés pour cette recherche ne s'y réfère. Nous nous intéressons donc plus particulièrement aux vidanges de types linéaire et quadratique.

1.2.1.1 La vidange linéaire

La vidange linéaire reprend la formule de Maillet (1) qui permet le calcul du coefficient de tarissement α :

$$Q_t = Q_0 \times e^{-\alpha t} \quad (1)$$

où : Q_t correspond au débit au temps t
 Q_0 correspond au débit du début de la phase de tarissement
 t correspond au temps
 α correspond au coefficient de tarissement

Ce coefficient de tarissement peut facilement être transformé en coefficient de vidange des nappes par application de la formule suivante (2) :

$$Cv = 1 - e^{-\alpha} \quad (2)$$

Dans un modèle, la vidange linéaire prend la forme (3) :

$$Q = R \times Cv \quad (3)$$

où : R correspond au niveau du réservoir d'eau gravitaire

1.2.1.2 La vidange quadratique

La vidange de type quadratique, utilisée dans de nombreux modèles, correspond globalement à la fonction de Tison (4) proposée pour ajuster les courbes de tarissement.

$$Q_t = \frac{Q_0}{(1 + at)^2} \quad (4)$$

La formulation utilisée dans GR3J est la suivante (5) :

$$Q_b = \frac{R^2}{(R + B)} \quad (5)$$

où : Q_b correspond au débit de base,
 R au niveau de remplissage du réservoir d'eau gravitaire,
 B à la capacité du réservoir d'eau gravitaire.

1.2.1.3 Choix de la loi de vidange

Les rivières dont les phases de tarissement s'ajustent mieux à la loi de Tison qu'à la loi de Maillet sont largement minoritaires. Des tests ont en effet été réalisés pour soixante cours d'eau du bassin Rhin-Meuse. De plus, la loi de vidange linéaire est particulièrement simple à insérer dans un modèle. C'est pourquoi ORCHY est conçu avec cette loi de vidange, et GR3J aménagé de sorte qu'il utilise un coefficient de vidange linéaire.

1.2.2 Prédétermination du paramètre gérant l'écoulement de crue

Dans un modèle, le paramètre d'écoulement de crue correspond à un coefficient qui permet de router immédiatement une partie de la pluie (ou de la pluie utile) pour produire l'écoulement (pseudo) direct. Il est possible d'estimer sa valeur en utilisant une méthode de séparation des écoulements (6) :

$$Cec = \frac{Vec}{Vp} \quad (6)$$

Où : Cec correspond au coefficient d'écoulement de crue
 Vec au volume d'écoulement de crue
 Vp au volume précipité

Nous proposons donc de calculer préalablement le coefficient de vidange des nappes et le coefficient d'écoulement de crue. Un outil

d'analyse des tarissements a été conçu : il permet le calcul des coefficients de vidange des nappes et d'écoulement de crue.

Cependant, selon le pas de temps du modèle (mensuel ou journalier), le coefficient de vidange ne représente pas la même décroissance, car l'échelle mensuelle globalise des phases de tarissement et de recharge de la nappe. Il ne convient donc pas d'utiliser la même valeur pour paramétrer le coefficient de vidange d'un modèle mensuel et celui d'un modèle journalier. L'analyse des tarissements est donc menée selon deux approches distinctes, qui permettent de proposer un coefficient de tarissement adapté à l'échelle mensuelle, et un coefficient approprié au pas de temps journalier.

2. RÉALISATION D'UN OUTIL D'EXTRACTION DES PHASES DE TARISSEMENT

Il est nécessaire de préciser au préalable que les lois de tarissement sont, à l'origine, destinées au tarissement des sources et à l'estimation des volumes d'eau des aquifères ; leur application au débit des rivières, puis leur mise en relation avec les lois de vidange utilisées dans les modèles peut donc être discutée.

L'analyse du tarissement d'un cours d'eau soulève également la question du choix des phases de tarissement. Celle-ci constitue un point plus ambigu mais déterminant dans les valeurs d'alpha que l'on obtient.

2.1 Conséquences du choix des phases sur le coefficient de vidange des nappes

Il s'agit de retenir les périodes de décroissance des débits non influencées par les précipitations. Cependant, dans les régions au climat de type océanique telles qu'en Lorraine, la fréquence des épisodes pluvieux nous contraint, soit à considérer des périodes influencées par les pluies, soit à retenir des phases de tarissement sans pluie, mais par conséquent extrêmement courtes. Les ouvrages et autres articles traitant du tarissement, présentent systématiquement l'une ou l'autre de ces deux approches : dans le premier cas, les auteurs proposent de relier graphiquement les débits minimums d'épisodes indépendants (Larras, 1972 ; Pointet, 2004). Garçon (1999) parle de « courbe enveloppe de tarissement », qu'il définit comme « l'enveloppe inférieure d'un hydrogramme », c'est-à-dire la courbe tangente aux points les plus bas. Nous conservons le terme de « courbe enveloppe » pour cette première approche. De nombreux autres auteurs, tels que Rutledge (1994), sélectionnent par contre des courbes de tarissement qui prennent en compte uniquement des débits consécutifs décroissants. Afin d'éviter toute confusion, nous décidons de qualifier de « courbe de séquence » les phases sélectionnées par cette seconde méthode. Or, les écarts entre les coefficients de tarissement calculés à partir des courbes enveloppes et

ceux calculés sur les courbes de séquence sont notables. Les valeurs d'alpha calculées pour un même cours d'eau peuvent varier du simple au triple selon la méthode d'extraction des phases qui est retenue.

Ces observations nous amènent à nous interroger sur la méthode d'extraction la plus adaptée à l'utilisation que nous souhaitons faire des coefficients de tarissement. En effet, ces deux méthodes ne représentent sensiblement pas la même décroissance, car la méthode des courbes enveloppes intègre les pluies et les recharges éventuelles, alors que les courbes séquences s'en affranchissent totalement.

Toute la réflexion menée autour du choix des phases de tarissement nous a conduit à faire le lien avec les méthodes de gestion différentes des réservoirs d'eau gravitaire des modèles mensuels et journaliers : pour les modèles mensuels, on intègre toute la pluie du mois et la recharge éventuelle, alors que pour les modèles journaliers, chaque épisode est géré séparément. C'est pourquoi les coefficients de vidange issus des courbes de séquences sont adaptés aux modèles journaliers. Par contre les coefficients calculés à partir des courbes enveloppes conviendraient davantage aux modèles mensuels (Lang, 2004). Le tracé des courbes enveloppes, réalisé pour quelques bassins, a rapidement montré les limites de cette méthode, essentiellement du fait de l'importante subjectivité qu'elle impose. La sélection des phases de tarissement, résultant d'un tracé tout à fait personnel, les valeurs des coefficients de tarissement vont d'abord dépendre des choix de l'opérateur. D'autre part, la pente des périodes de tarissement peut varier de manière considérable d'une année à l'autre. Or, l'objectif de cette démarche est d'aboutir à une valeur représentative du rythme de vidange de la rivière. L'importante fluctuation des coefficients de tarissement nous oblige à nous interroger sur la représentativité d'une valeur moyenne calculée à partir d'épisodes dont les critères de sélection sont mal définis. La méthode des courbes enveloppes n'apportant pas satisfaction, nous avons préférés calculer la pente des phases de débits mensuels consécutivement décroissants (cf. 2.3).

2.2 Détermination des coefficients de tarissement utilisés pour les modèles journaliers

La méthode des courbes séquences constitue une approche très analytique pour laquelle les choix de l'opérateur sont minimes. Un outil d'extraction automatique des phases de tarissement a été réalisé : il opère la sélection de tous les débits décroissants consécutifs non influencés par les pluies. L'outil propose toutefois plusieurs options qui permettent à l'opérateur de paramétrer précisément les phases à extraire :

- un seuil de pluie significative ; nous le fixons pour cette étude à 1 mm, seuil au-dessous duquel les précipitations ne sont pas significatives pour l'écoulement (Laborde, 1981) ;
- une durée minimum des phases à extraire fixée à 5 jours afin d'obtenir un coefficient significatif ;

- un temps de ressuyage après la fin des dernières précipitations ; nous proposons de le calculer systématiquement par la formule de Linsley et al. (Rutledge, 1999) couramment appliquée : $T = A^{0.2}$,
- la possibilité d'« optimiser » les phases extraites par l'outil, en éliminant les débits qui ne s'alignent pas avec la fin de la phase.
 - les 3 derniers débits de la phase sont utilisés pour calculer la pente de la phase en question
 - la droite est extrapolée pour les valeurs antérieures ; les débits dont la valeur s'écarte à plus de x % sont systématiquement éliminés (x est paramétré à 2%)

L'outil extrait ainsi toutes les phases de tarissement répondant aux critères imposés, puis calcule les coefficients de tarissement afférents à chacune de ces phases. Le nombre important de phases extraites par cette méthode a permis de réaliser des statistiques sur les valeurs d' α . Cependant, l'objectif premier est d'aboutir à une valeur moyenne, représentative du rythme de tarissement du bassin. Nous préférons adopter une méthode de construction de courbe maîtresse de tarissement plutôt que le calcul d'une simple moyenne réalisée sur toutes les valeurs. Cette méthode de construction de la courbe moyenne est fondée sur la méthode des corrélations (Tallaksen, 1995). Pour cette approche, les auteurs proposent de corrélérer le premier débit d'une phase de tarissement, Q_0 , avec le débit situé à n jours, Q_t (dans la plupart des cas 10 jours). Nous décidons de l'appliquer systématiquement pour toutes les valeurs de t de 1 à 10 jours (au-delà de 10 jours le nombre d'épisodes répertoriés devient trop faible pour que les corrélations soient significatives) et non plus à une seule valeur, pour proposer au final, une valeur de coefficient de tarissement moyenne.

2.3 Détermination des pentes de décroissance des débits mensuels utilisées pour les modèles mensuels

Les valeurs des paramètres de vidange, à l'échelle mensuelle, sont désignées par le terme « pente de décroissance », car elles ne caractérisent pas uniquement le tarissement. Cependant, on remarque que les débits mensuels s'ajustent également à une loi de Maillet, en s'alignant sur un graphique à échelle semi-logarithmique.

L'outil de calcul des phases de tarissement des débits journaliers a été adapté à cette échelle pour le calcul de la pente de décroissance des débits mensuels. Une courbe maîtresse a été élaborée comme pour l'échelle journalière, afin d'aboutir à une valeur moyenne. Ce procédé automatisé et objectif permet d'obtenir des coefficients proches des courbes enveloppes (car ils intègrent des recharges et des vidanges des nappes). A cette échelle, le seuil de précipitations et le temps de ressuyage n'ont plus de signification et par conséquent, ces paramètres ont été supprimés. Les phases extraites correspondent à la période de passage des hautes eaux aux basses eaux.

2.4 Méthode de séparation des écoulements pour l'estimation des coefficients d'écoulement de crue

Les résultats issus de l'analyse des tarissemments sont ensuite exploités pour proposer une méthode de séparation des écoulements, afin d'estimer les volumes d'écoulement de crue. L'objectif est d'aboutir à des valeurs de coefficients d'écoulement de crue représentatives des différents bassins, afin de les injecter dans les modèles.

Les nombreuses procédures de décomposition des hydrogrammes proposées en bibliographie (Ven Te Chow, 1988, Chapmann, 1999) se fondent toutes sur une part d'incertitude. En effet, les techniques développées ne permettent pas à partir d'un hydrogramme, de déterminer avec précision la part du débit de base dans l'écoulement total. De ce fait, les différentes investigations qui ont pu être menées se fondent sur des raisonnements divergents. S'opposent par exemple les auteurs qui considèrent que le débit de base répond instantanément aux impulsions pluviométriques, à ceux qui proposent une réponse différée du débit de base par rapport à la pluie. Aux oppositions d'ordre théorique s'ajoutent des différences dans les techniques de tracé du débit de base (méthodes empiriques, statistiques, manuelles...).

En définitive, à part sur des bassins versants expérimentaux bien équipés (piézomètre, source équipée...), il est presque impossible de valider la séparation des écoulements proposée. Les valeurs de débit de base font donc toujours l'objet d'une importante part d'incertitude.

Pour ces raisons, nous proposons de fonder la procédure de décomposition des hydrogrammes sur l'analyse préalable des tarissemments. En effet, la rigueur imposée dans la sélection des débits de tarissement nous autorise à considérer que tous les points retenus de cette manière correspondent uniquement à du débit de base.

Pour l'analyse des tarissemments une durée minimum de cinq jours consécutifs est imposée, afin de retenir des phases suffisamment longues pour le calcul du coefficient de vidange. Pour l'estimation du débit de base, nous ne fixons pas de seuil minimum pour la durée des phases, l'objectif étant de retenir un maximum de points pour lesquels on est sûr qu'il s'agit d'un débit de tarissement, et donc d'un débit de base.

Ces points vont constituer les points d'ancrage pour le tracé du débit de base. La gestion de celui-ci, entre les points d'ancrage, peut être réglée de diverses manières (filtres,...), mais nous proposons de procéder simplement par interpolation linéaire, puisqu'il est difficile de déterminer avec exactitude de quelle manière les recharges sont réalisées. Les phases de tarissement ne sont pas toujours suffisantes pour tracer le débit de base, donc la procédure intègre également les points bas inférieurs au tracé de l'interpolation (Figure 3). Dans tous les cas, la modélisation est une méthode plus adaptée pour obtenir une estimation du débit de base vraisemblable.

En utilisant cette procédure, nous ne préjugeons pas de proposer une méthode de séparation des écoulements représentative de l'évolution

réelle du débit de base des cours d'eau étudiés. En effet, l'objectif est d'aboutir à une estimation globale des volumes d'écoulement de crue et de base. Cette méthode qui peut paraître très sommaire par comparaison avec d'autres procédures proposées (Chapmann, 1999), présente toutefois plusieurs avantages. D'une part, l'utilisation de l'analyse des tarissements garantie la justesse de la trame initiale. De plus, cette procédure est simple à mettre en œuvre, et elle aboutit à des décompositions qui apparaissent graphiquement satisfaisantes, et proches d'autres méthodes (Rutledge, 1998, Ven Te Chow, 1988).

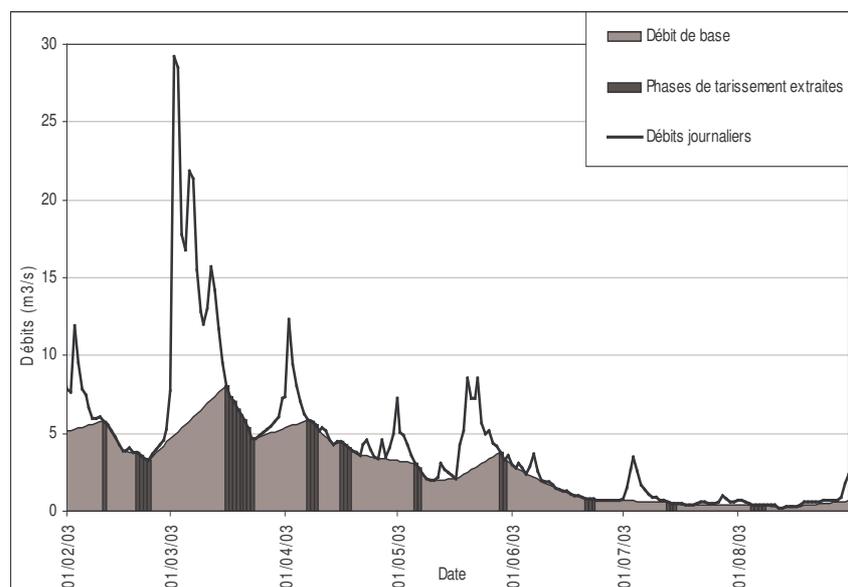


Figure 3. Exemple de séparation des écoulements (Moselotte à Vagney – 2003)

Cet outil permet d'obtenir des valeurs de coefficient de tarissement et de coefficient d'écoulement de crue pour chaque événement de la période étudiée. Pour la modélisation nous utilisons des valeurs moyennes, mais une démarche plus analytique pourra être menée, notamment sur l'explication des valeurs de coefficient de tarissement extrêmes.

3. APPLICATION À DES BASSINS TESTS

Les méthodes sont appliquées à quatre bassins versants tests choisis pour leurs contextes morphostructuraux et hydroclimatiques représentatifs des principales entités hydrogéologiques du bassin Rhin-Meuse (Figure 3).

Les bassins versants de la Moselotte à Zainvillers et de la Fecht à Wintzenheim sont situés dans les Vosges cristallines et caractérisent les bassins granitiques côté lorrain (Moselotte) et côté alsacien (Fecht). Le bassin versant de la Mortagne à la station d'Autrey-Ste-Hélène représente

les Vosges gréseuses. Enfin, la station de l'Esche à Jezainville contrôle un bassin versant représentatif du plateau lorrain, constitué des calcaires du Dogger et des argiles du Callovien. En plus de ces différences lithologiques, ces bassins se situent dans des contextes climatiques assez contrastés, notamment en terme de pluviométrie (tableau 1).

Cours d'eau	Station	Précipitations moyennes annuelles (1971-2000)
Mortagne	Autrey-Ste-H.	1133
Moselotte	Vagney	1883
Esche	Jezainville	736
Fecht	Wintzenheim	1581

Tableau 1 : Pluviométrie moyenne des bassins tests



Figure 4. Situation des bassins tests

3.1 Application de l'outil

3.1.1 Prédétermination des coefficients de vidange utilisés dans les modèles

Les coefficients de vidange calculés à partir des données journalières de la période 1971-2003 sont présentés dans le tableau 2.

Cours d'eau	Station	Nombre de phases extraites	Coefficients de tarissement journaliers
Mortagne	Autrey-Ste-H.	110	0.0234
Moselotte	Vagney	95	0.0751
Esche	Jezainville	89	0.0397
Fecht	Wintzenheim	74	0.0550

Tableau 2 : Coefficients de tarissements journaliers

Les coefficients de tarissement moyens sont cohérents avec les caractéristiques hydrogéologiques des bassins versants. La Mortagne a un coefficient relativement faible représentatif de l'aquifère particulièrement puissant des grès du Trias inférieur. Bien que les calcaires du Dogger soient en partie karstifiés, induisant une circulation rapide, la valeur du coefficient de tarissement est néanmoins inférieure à celle des bassins situés dans les Vosges granitiques. Ces derniers sont principalement alimentés par des nappes superficielles peu capacitatives.

Les pentes de décroissance calculées à partir des débits mensuels sont rassemblées dans le tableau 3.

Cours d'eau	Station	Pente de décroissance des débits mensuels	Pente des régimes
Mortagne	Autrey-Ste-H.	0.0071	0.0067
Moselotte	Vagney	0.0127	0.0102
Esche	Jezainville	0.0154	0.0151
Fecht	Wintzenheim	0.0153	0.0126

Tableau 3 : Pente de décroissance des débits mensuels

L'interprétation des valeurs de pente, à l'échelle mensuelle est différente. En effet, les stations des Vosges granitiques ont des valeurs plus modérées et même inférieures à celles du bassin de l'Esche. L'abondance des précipitations, et certaines années la fonte nivale, tempèrent la décroissance des débits mensuels. On peut noter que les pentes moyennes du régime hydrologique s'approchent de celles calculées par cette méthode. Cependant, ces dernières sont toujours plus élevées et correspondent au choix objectif de débits mensuels consécutivement décroissants.

3.1.2 Prédétermination des coefficients d'écoulement de crue utilisés dans les modèles

La méthode de séparation des écoulements calcule pour chaque jour un débit de base et un débit d'écoulement direct. Au pas de temps mensuel, on peut calculer un coefficient d'écoulement de crue à partir de l'équation 6. Ils sont présentés dans le tableau 4.

Les valeurs des coefficients d'écoulement de crue sont en accord avec la physiographie et le contexte climatique des bassins versants. Les cours d'eau des Vosges granitiques présentent les coefficients les plus élevés, liés à une pluviométrie plus de deux fois supérieure à celle du plateau. Si la moyenne annuelle du coefficient d'écoulement de crue est comparable pour l'Esche et la Mortagne, les valeurs mensuelles sont beaucoup plus contrastées sur l'Esche. L'occupation du sol et la nature gréseuse des terrains expliquent en grande partie le caractère modéré et stable de l'écoulement de crue sur la Mortagne. A l'inverse, la partie amont du bassin de l'Esche est argileuse et cultivée, d'où des coefficients d'écoulement de crue proches de ceux rencontrés dans les Vosges.

Cours d'eau	Mortagne	Moselotte	Esche	Fecht
Station	Autrey-Ste-H.	Vagney	Jezaïnville	Wintzenheim
J	0.27	0.59	0.42	0.46
F	0.33	0.59	0.44	0.5
M	0.28	0.69	0.31	0.57
A	0.24	0.64	0.25	0.51
M	0.14	0.34	0.09	0.27
J	0.11	0.28	0.05	0.14
J	0.07	0.21	0.03	0.11
A	0.06	0.14	0.02	0.08
S	0.07	0.21	0.01	0.07
O	0.09	0.44	0.05	0.19
N	0.16	0.54	0.08	0.28
D	0.26	0.61	0.24	0.41

Tableau 4 : Coefficient d'écoulement de crue

3.2 Résultats de l' « optimisation assistée »

Les paramètres de vidange des réservoirs d'eau gravitaire, calculés pour les pas de temps mensuel et journalier, et les coefficients mensuels d'écoulement de crue, ont été intégrés sans modification dans ORCHY et GR3J pour la période 1971-2003 (pour GR3J, ceux-ci ont été affectés à chaque jour en fonction du mois en cours).

Les résultats de la modélisation mensuelle se sont avérés satisfaisants, car aucune modification des paramètres prédéterminés n'a été nécessaire. Le calage de la capacité du réservoir sol a permis d'affiner les simulations. Le critère de Nash calculée avec la racine carrée des valeurs (Mouehly, 2000) valident notre démarche pour l'échelle mensuelle (Tableau 4). L'objectif de cette recherche étant d'aboutir à un modèle pour la prévision des débits d'étiage, nous nous sommes concentrés essentiellement sur les période de basses-eaux. Un calcul spécifique du critère de Nash a été réalisé pour cette période (mai à septembre inclus) afin d'évaluer la performance du modèle pour les débits d'étiage. Ceux-ci sont particulièrement bien reproduits par le modèle mensuel.

Station	Modélisation journalière		Modélisation mensuelle	
	Critère de Nash global	Critère de Nash basses eaux	Critère de Nash global	Critère de Nash basses eaux
Autrey-Ste-H.	68	73	71	97
Vagney	60	73	79	95
Jezainville	60	75	52	91
Wintzenheim	63	64	74	96

Tableau 4 : Coefficient d'écoulement de crue

De même, à l'échelle journalière, seuls les paramètres qui n'ont pas été prédéterminés ont été définis de manière itérative. Par contre, si le calage est satisfaisant, certaines années sont difficiles à ajuster particulièrement pour les bassins vosgiens, car l'influence nivale n'est pas prise en compte dans le modèle. Les valeurs du critère de Nash sont relativement satisfaisantes et témoignent de l'efficacité de l'« optimisation assistée ».

Conclusion

La démarche d'« optimisation assistée » a été mise en œuvre, au départ, pour initialiser le calage du modèle par des valeurs de paramètre justifiées. Au terme de ce travail, il n'a pas été nécessaire de modifier les coefficients calculés et introduits tels quels dans les modèles. L'« optimisation assistée » montre donc tout son intérêt pour les modèles qui utilisent des paramètres ayant une signification physique. Elle permet également de valider la conception même du modèle. D'autre part, en diminuant le nombre de paramètres à caler, elle facilite l'estimation du, ou des paramètres restants. Ces derniers permettent à l'opérateur de finaliser le calage.

Pour l'hydrologue, les modèles calés avec des paramètres calculés par l'analyse des tarissements et des coefficients d'écoulement de crue constituent un outil d'interprétation et de compréhension du fonctionnement du bassin versant.

Cette recherche est menée dans le cadre de l'étude PRESAGES financée par l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse.

BIBLIOGRAPHIE

- Ambroise B., 1998. La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant. Editions HGA.
- Agence de l'Eau Rhin – Meuse, 1998, Catalogue des débits d'étiage
- CEGUM-Agence de l'Eau Rhin-Meuse, 2002, Mise en œuvre de la méthode DECLIC
- Cosandey et Robinson, 2000. Hydrologie continentale. Armand Colin.
- Chapman T., 1999. A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation. *Hydrological processes*, 13, 701-714.
- Garçon R., Carré C., Lyaudet P., 1999, Exemple de prévision et de simulation opérationnelle des débits d'étiage pour le besoins d'EDF. *La Houille Blanche*, Vol. 54, n°6, pp 37-42.
- Gille E., Lang C., 2003. Problématique d'optimisation des paramètres de calage d'un modèle global pluie - débit. *Revue Mosella*, T. XXVIII, n°1-2, pp 157-172.
- Laborde J-P, Analyse des données et cartographie automatique en hydrologie : éléments d'hydrologie lorraine. Thèse, INPL, 1984.
- Lang C., 2004. Etiages et tarissements : approche quantitative et modélisation appliquées à quatre bassins tests. Mémoire de DEA.
- Larras J., 1972. Prévision et prédétermination des étiages et des crues. Eyrolles.
- Makhlouf Z., 1994. Compléments sur le modèle pluie – débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de doctorat de l'université Paris XI Orsay.
- Michel C., 2003. The exponential store : a correct formulation for rainfall-runoff modelling. *Journal of hydrology* 48, 109-124
- Mouhely S., 2000. Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de doctorat de l'école nationale du génie rural des eaux et des forêts.
- Pointet 2004. Les relations nappes-rivières, observations à partir des étiages de petites rivières. Etiages et crue extrême régionaux en Europe – Perspectives historiques. Colloque d'Hydrotechnique, Lyon, 28-29 janvier 2004.
- Rutledge A.T., Daniel C.C., 1994. Testing an automated method to estimate ground-water recharge from streamflow records. *Ground water*, vol. 32, n°2.
- Rutledge A.T., 1998. Computer programs for describing the recession of ground-water discharge and for estimating mean ground- water recharge and discharge from streamflow records-update. *Water-Resources Investigations Report* 98-4148.

Tallaksen L.M., 1995. A review of baseflow recession analysis. *Journal of hydrology*, 165, 349-370.

Glossaire international d'Hydrologie : www.cig.enscm.fr/~hubert/glu/indexfr.htm

Site des modèles GR : www.cemagref.fr/webgr/