

Séminaire 2015

Hydrologie – Rapport Bibliographique

« Basses eau et étiages des rivières :
Origines, caractérisation et réglementation »



Auteurs : Julien **AUGAS**, Jérémie **GORTAIS**, Clément **HERBER**, Melania **MERCADANTE**,
Adrien **PIALOT**, Tristan **PODECHARD**



Table des matières

INTRODUCTION.....	3
I - CARACTERISTIQUES DES PHENOMENES D'ETIAGE.....	4
1 - DEFINITIONS ET ORIGINES	4
a) Définitions.....	4
b) Origines	5
2 - DES ETIAGES AUX CARACTERISTIQUES DIFFERENTES	5
a) L'étiage de la Loire	6
b) L'étiage du Rhône.....	7
c) Des étiages différents aux problèmes similaires	8
II - MESURE DES ETIAGES	10
1 - INTRODUCTION.....	10
2 - JAUGEAGE ET COURBE DE TARAGE	10
3 - MESURE AUTOMATIQUE DES HAUTEURS D'EAU	11
4 - SECTIONS DE CONTROLE NON STATIONNAIRE	12
III - MODELISATION	13
1 - GENERALITES SUR LA MODELISATION HYDROLOGIQUE.....	13
2 - APPLICATION AUX ETIAGES	15
3 - INCERTITUDES ET LIMITES DES MODELES	18
IV - INDICATEURS ET REGLEMENTATION.....	20
1 - INTRODUCTION.....	20
2 - LES INDICATEURS	20
a) Les différents indicateurs de débit.....	20
b) Estimation du QMNA5 et incertitudes.....	20
3 - LES SEUILS D'ALERTE	22
a) Débit seuil.....	22
b) Débit objectif d'étiage (DOE)	22
c) Débit d'alerte et débit de crise.....	22
d) Débit cible minimal biologique.....	23
e) Débit cible usage.....	23
f) Piézométrie seuil	23
4 - REGLEMENTATION.....	23
V - CONCLUSION	25
VI - BIBLIOGRAPHIE.....	26
1 - SITES INTERNET	26
2 - OUVRAGES.....	26



Table des illustrations

FIGURE 1 : REPRESENTATION DES BASSES ET DES HAUTES EAUX	4
FIGURE 2 : CARTE DES ETIAGES EN REGION PAYS DE LA LOIRE	6
FIGURE 3 : DEBITS MOYENS MENSUELS EN MAI COMPARES AUX ETIAGES HISTORIQUES SUR LE BASSIN DU RHONE.....	8
FIGURE 4 : DEBITS SEUILS (Qc) DETERMINANTS POUR LES ARRETES. (<i>CLAIRE LANG DELUS, 2011</i>)	23



Introduction

Généralement sous-estimée et parfois négligée par les spécialistes, l'analyse des étiages se révèle être le parent pauvre de l'hydrologie. La raison tient principalement dans le caractère peu impressionnant de ce phénomène par rapport aux crues dont les conséquences peuvent être dévastatrices.

Or, la compréhension des basses eaux est primordiale notamment dans le secteur de la gestion des ressources, de l'alimentation en eau ou encore lors de problèmes de pollution.

Les projections hydroclimatiques pour le XXI^{ème} siècle qui s'accordent sur une augmentation globale de la sévérité des sécheresses en France renforcent la nécessité de mieux comprendre ce phénomène afin de pouvoir y remédier. Ainsi, depuis peu, de plus en plus de scientifiques ont décidé d'agir en s'intéressant aux périodes d'étiage.

La caractérisation des étiages fait l'objet de nombreuses discussions et se heurte à un certain nombre de difficultés. En effet, leurs aspects différents suivant leur ampleur et leur genèse particulièrement longue en font encore des phénomènes difficiles à définir. Des pistes de solution ont donc vu le jour telle que l'introduction d'indicateurs afin d'établir une base commune dans leur détermination.

Il en est de même sur le plan technique. La mesure des débits des basses eaux n'est pas aisée. Les données sont peu précises et la notion d'incertitudes est essentielle. La France bénéficie cependant d'un exceptionnel réseau de suivi des débits de par son ancienneté et son étendue.

Dans ce contexte, la modélisation des basses eaux a un enjeu important. La prévision à long terme de ces phénomènes a pour but d'améliorer la gestion quantitative de la ressource. Pour répondre à ce besoin, des méthodes de prévisions probabilistes ont été récemment développées.

Concernant l'aspect réglementaire en matière d'étiage, les grands principes ont été fixés par la loi sur l'Eau du 3 janvier 1992. Elle instaure notamment le SDAGE (Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux) et le SAGE (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux). De plus, cette loi donne plus de libertés aux préfets pour la mise en place d'actions réglementaires au niveau local.

Les autorités ont compris la nécessité d'agir comme en témoignent les plans de soutien d'étiage qui ont été établis à partir du début des années 90. L'essence même de ces plans est la solidarité entre les usagers de l'amont à l'aval du cours d'eau.

Dans ce cadre, notre rapport aura pour but d'apporter des réponses sur cette problématique en organisant notre plan autour de cinq axes.

Nous aborderons tout d'abord la caractérisation des étiages et des basses eaux. Nous ferons ensuite un état des lieux des outils et des mesures existants. Ensuite, nous ferons un tour d'horizon des modèles prévisionnels développés en termes de basses eaux. Dans la dernière partie, nous exposerons les différents indicateurs statistiques pour la détermination des débits d'étiage ainsi que les mesures réglementaires mises en place en matière de basses eaux.



I - CARACTERISTIQUES DES PHENOMENES D'ETIAGE

1 - Définitions et Origines

a) Définitions

Le régime hydrologique d'un cours d'eau résume par définition l'ensemble de ses caractéristiques hydrologiques et son mode de fonctionnement. Il se caractérise par les variations de son débit.

Il est possible de définir le régime d'un cours d'eau en adoptant une classification basée d'une part, sur la fluctuation des débits et d'autre part, sur le mode d'alimentation : pluvial, nivale, glaciaire. Une des classifications les plus utilisées est celle de Pardé (1933), elle distingue trois types de régime :

- **le régime simple** : une seule alternance annuelle des hautes et basses eaux avec en général un seul mode d'alimentation

- **le régime mixte** : deux maxima et minima annuels ainsi que plusieurs modes d'alimentation

- **le régime complexe** : plusieurs extrema et modes d'alimentation

Nous allons nous intéresser au phénomène des basses eaux et tout particulièrement à celui de l'étiage. Celui-ci caractérise la période de l'année où un cours d'eau atteint son niveau le plus bas. La durée d'étiage d'un cours d'eau est ainsi dépendante du régime hydrologique de ce dernier.

Etymologiquement parlant, le terme étiage provient du mot « étier » désignant un chenal contenant de l'eau de mer dans le but d'alimenter les marais salants. L'étiage correspondrait ainsi à l'état de l'étier une fois que l'eau s'est retirée. Une des plus grandes sources de confusion consiste à assimiler l'étiage avec les basses eaux saisonnières habituelles, alors que le phénomène d'étiage est l'exacerbation des basses eaux. A ce sujet, Pardé (1963) qualifie l'étiage de « maigre prononcé » afin de rendre compte de son caractère exceptionnel.

Les basses eaux se définissent comme la période durant laquelle le débit mensuel est inférieur au débit moyen interannuel, c'est-à-dire à son module. Ce dernier correspond à une moyenne de débits annuels calculés sur une longue période de mesures. Il n'est pas représentatif de l'état d'étiage d'un cours d'eau, mais permet de donner une estimation du débit moyen de ce cours d'eau. Le graphique suivant (cf figure 1) permet d'illustrer simplement la définition des basses eaux.

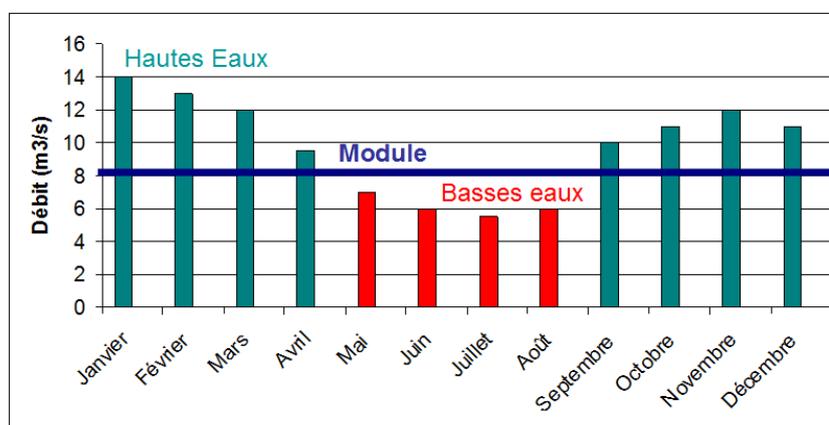


Figure 1 : Représentation des basses et des hautes eaux



L'étiage peut aussi se définir comme une période de dix jours consécutifs de très faible débit. Malgré cette définition officielle, l'étiage est relativement mal caractérisé et fait actuellement toujours l'objet de discussion. On peut utiliser pour le caractériser le débit journalier caractéristique d'étiage (DCE) ou le débit mensuel minimal sur une année (QMNA).

Le débit caractéristique d'étiage (DCE) se définit comme un débit exceptionnellement faible. Il est calculé statistiquement à partir de chroniques de débits journaliers. C'est le débit journalier minimal de la chronique qui est dépassé plus de dix jours consécutifs. En raison de son mode de calcul, le DCE peut être également représenté par l'acronyme DC355, c'est-à-dire le débit dépassé 355 jours par an.

Le QMNA est très employé en Europe et il s'agit de l'indicateur statistique le plus utilisé en France. Le QMNA permet de caractériser de manière globale l'état d'étiage d'un cours d'eau et possède même une valeur réglementaire dans le cadre de l'application de la police de l'eau. Notamment le QMNA5 qui est l'indicateur de référence en matière d'étiage et qui correspond au débit mensuel minimal pour une période de retour de 5 ans, donc un débit qui a une chance sur cinq de se produire chaque année. Le QMNA5 figure dans la loi sur l'eau et correspond au débit d'étiage de référence pour l'application de la police de l'eau.

b) Origines

L'étiage est une des conséquences de la combinaison de différents événements avec notamment une période de déficit pluviométrique important combinée à des températures élevées.

L'association courante entre les termes « étiage » et « sécheresse » est dangereuse. En effet, les étiages ne sont pas systématiquement générés par une période de sécheresse atmosphérique marquée par un déficit pluviométrique important, seuls les plus sévères le sont.

En l'absence de pluie, les cours d'eau étant uniquement alimentés par les eaux souterraines, un appauvrissement des nappes phréatiques au cours des années précédentes peut aussi contribuer à la faiblesse des écoulements superficiels.

L'étiage peut être aggravé par des températures élevées qui vont accélérer le processus d'évaporation mais aussi par les différents pompages et prélèvements de surface ou souterrains. Ces derniers sont néanmoins très réglementés lors de cette période. Nous aborderons ces restrictions dans la partie sur les outils réglementaires.

Les périodes d'étiage se mettent en place lentement. En deçà d'un débit seuil déjà très bas, la décroissance semble dépendre sur un même cours d'eau des caractéristiques hydrologiques du bassin. La pente de la courbe de tarissement est d'autant plus forte que les réserves en eau souterraines sont faibles.

Afin de décrire au mieux la survenance des étiages, il est tout aussi intéressant d'analyser ces phénomènes quantitativement (niveau atteint) que qualitativement (processus, durée de mise en place). Un étiage qui s'étale sur une longue période sera souvent plus préoccupant qu'un très faible débit sur une courte période (< 10 jours consécutifs) d'après Claire Lang Delus (2011).

2 - Des étiages aux caractéristiques différentes

Les étiages peuvent avoir des origines diverses mais aussi se manifester de différentes manières. Les étiages sont définis différemment selon les cours d'eau, suivant leur position géographique et leurs usages de l'eau. En effet, la question du soutien d'étiage devient un enjeu grandissant pour la gestion de l'eau.



Les débits caractéristiques d'étiage par unité de surface sont variables. Ils présentent des minimums très différents selon les cours d'eau considérés. A titre d'exemple, il est inférieur à $0,5 \text{ L/s/km}^2$ sur la Seine ou la Moselle et ressort à $4-5 \text{ L/s/km}^2$ dans des bassins où la fusion nivale alimente des réserves souterraines abondantes (M. Dacharry, 1996).

Dans ce cadre, nous allons nous intéresser aux caractéristiques d'étiage de deux grands fleuves français : la Loire et le Rhône.

a) L'étiage de la Loire

La Loire, plus long fleuve de France s'étend sur 1006 km. Pour nos besoins, nous allons centrer notre analyse sur les caractéristiques d'étiage de la Loire au sein de la région Pays de la Loire.

Dans cette région, les cours d'eau sont soumis à un régime pluvial-océanique, c'est-à-dire des hautes eaux en hiver et des basses eaux en été. La période des étiages s'étend donc généralement de juin à octobre inclus.

La carte suivante présente l'état des lieux des étiages dans les Pays de la Loire (cf figure 2).

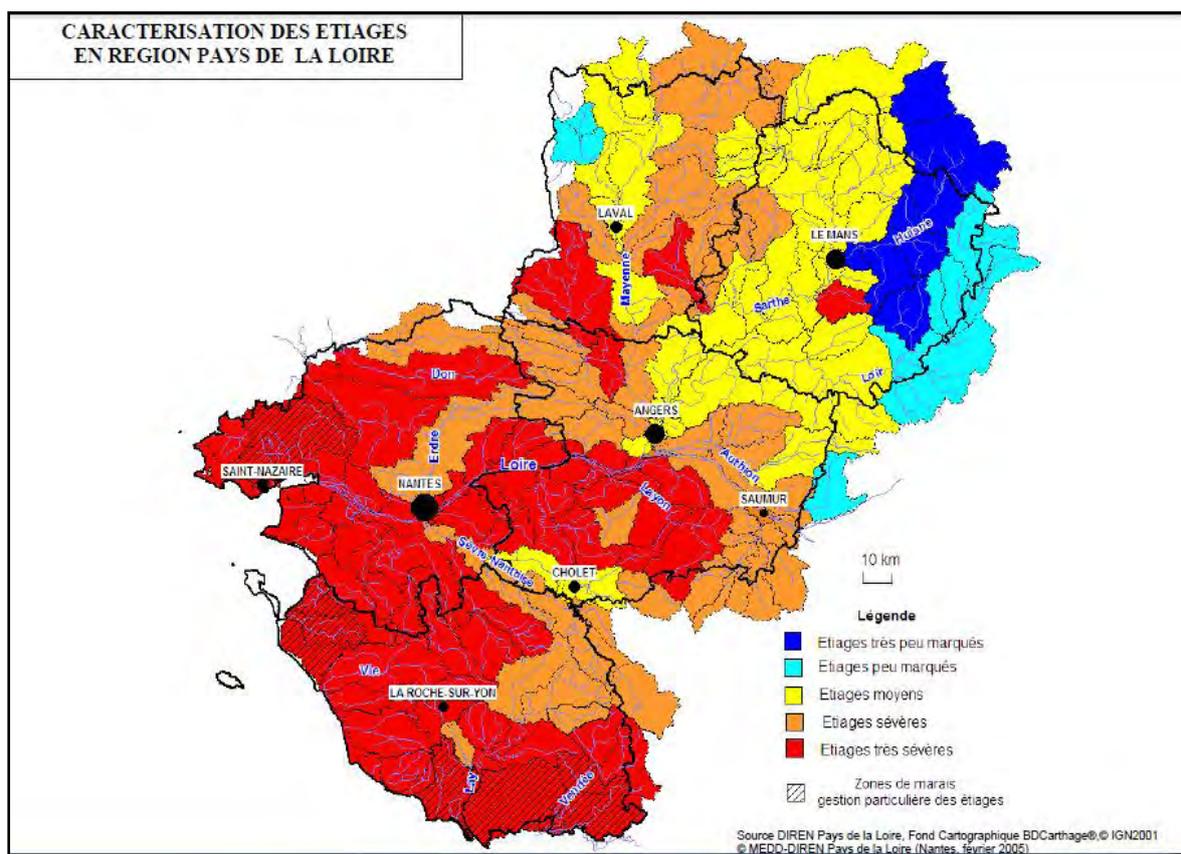


Figure 2 : Carte des étiages en région Pays de La Loire
Source : DIREN Pays de la Loire, Fond Cartographique, IGN2001

Nous constatons que sur une grande partie du territoire, les étiages sont sévères, c'est-à-dire qu'ils peuvent conduire provisoirement à la rupture d'un continuum écologique aquatique. Les étiages sont moins prononcés sur la partie Nord-Est de la région qui correspond aux zones sédimentaires du Bassin Parisien.



Au Sud, les marais ont été distingués car la gestion de l'étiage réalisée par le maillage des réseaux hydrauliques relève en premier lieu d'une problématique de gestion des niveaux d'eau.

Il est également important de préciser que certains cours d'eau voient leur débit soutenu par des barrages en raison du respect d'un débit réservé ainsi qu'éventuellement pour un soutien d'étiage ou pour l'irrigation. C'est notamment le cas pour la Vendée, l'Yon aval ou encore la Moine à l'aval de Cholet.

Par ailleurs, certains cours d'eau sont réalimentés par la Loire comme par exemple pour l'Authion. La gestion humaine intervient donc dans les étiages.

La région est donc globalement impactée par les phénomènes d'étiages. A une plus grande échelle, c'est toute l'étendue du fleuve qui constitue une problématique importante en témoignent les barrages de Naussac (48) et de Villerest (42) situés sur le bassin amont qui permettent un débit de soutien d'étiage.

b) L'étiage du Rhône

Le Rhône, long de 810 km, alimente actuellement 2,3 millions d'habitants grâce à sa nappe alluviale d'excellente qualité et produit à lui seul 20% de l'énergie hydroélectrique française.

Son régime hydraulique est caractérisé par des maxima automnaux liés aux pluies méditerranéennes, et printaniers en raison de la fonte des glaces. Les minima sont observés en période estivale.

Le Rhône traverse trois régions françaises aux caractéristiques climatiques et topographiques différentes. En résulte, une grande diversité dans son bassin versant tout comme dans les valeurs de ses débits de référence d'étiage : sur les bassins alpins, les valeurs spécifiques du QMNA5 dépassent généralement 4L/s/km^2 voire 10L/s/km^2 (DIREN Rhône-Alpes, 2001); sur le reste du territoire, elles sont presque toujours inférieures à 2L/s/km^2 à l'exception de quelques bassins d'altitude (hautes Cévennes, Forez) ou de plaine.

L'étude entreprise par l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée Corse en 2013 sur la gestion quantitative du Rhône à l'étiage, a permis de mettre en évidence que le Rhône alpestre dont la surface contributive représente seulement 8% de la surface totale du bassin, apporte 40% des débits du fleuve au mois d'août à Beaucaire (30).

L'analyse historique des débits du Rhône sur la période 1920-2011 synthétisée en page suivante (cf. figure 3) permet d'identifier les débits historiques d'étiage du Rhône.

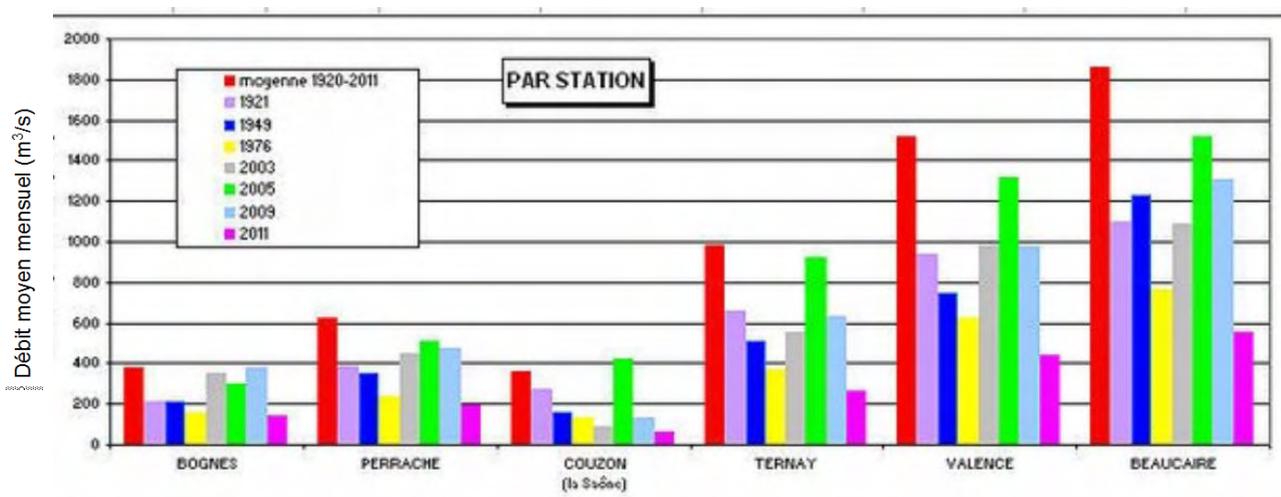


Figure 3 : Débits moyens mensuels en Mai comparés aux étiages historiques sur le bassin du Rhône

Source : <http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr>

Sur la séquence étudiée, l'année 2011 est l'épisode d'étiage le plus exceptionnel enregistré sur le Rhône en raison d'une forte sécheresse climatique. Cette année-là, la période des basses eaux s'est étalée sur près de 10 mois.

L'étude établit également un bilan entre ressource disponible et ressource utilisée sur chaque tronçon du fleuve. Un indicateur d'empreinte des prélèvements permettant de rendre compte de l'importance des usages et d'estimer leur emprise sur les débits a été mis en place. Il correspond au rapport des usages sur les débits désinfluencés (i.e. le débit qui s'écoulerait en l'absence de régulations et de prélèvements).

Cet indicateur permet de mettre en évidence les mois les plus impactés par les usages. Il s'agit des mois de mai et de juin avec une empreinte enregistrée de l'ordre de 10 % à Valence (26) et de 20 % plus en aval à Beaucaire (30). Ces pertes sont dues principalement au stockage de grands barrages hydroélectriques alors que plus en aval, dans le secteur de Beaucaire, elles résultent de prélèvements agricoles et de transferts hydroélectriques sur le bassin de la Durance (Agence de l'eau- Rhône Méditerranée Corse, 2013).

Les résultats de cette étude permettront de déterminer les volumes maximum prélevables tous usages confondus et les valeurs de débits « planchers » afin de satisfaire les usages et les besoins des milieux aquatiques.

c) Des étiages différents aux problèmes similaires

Les caractéristiques d'étiages sont propres à chaque cours d'eau et en chaque lieu. Ainsi, en milieu alpin, ce phénomène sera visible en hiver lors des périodes de gel alors que sur l'arc méditerranéen, il aura lieu pendant la saison estivale en raison de la sécheresse.

Nous avons pu constater précédemment que la Loire et le Rhône n'ont pas les mêmes indicateurs d'étiage. Ces derniers sont variables selon les propriétés du sol, les conditions climatiques mais aussi selon l'activité anthropique du secteur.

En effet ce dernier paramètre est prépondérant : les besoins de l'homme pour son alimentation, l'industrie et l'activité agricole influencent directement le fonctionnement naturel d'un cours d'eau. Les débits sont ainsi directement impactés. La notion de débit désinfluencé permet de palier à cette modification des valeurs des débits. Celle-ci est pertinente pour l'analyse de l'évolution des étiages.



L'étude hydrologique des débits d'étiage doit donc tenir compte des effets des changements passés ou futurs à l'intérieur du bassin versant. Bien que cette précaution soit indispensable, souvent par manque d'information, les analyses sont basées sur des données historiques ne représentant plus la réalité ou supposant négligeable l'impact des ouvrages présents sur les cours d'eau.

Il convient ainsi de mettre en place une gestion locale de la ressource afin de préserver les milieux aquatiques et assurer les usages prioritaires.



II - Mesure des étiages

1 - Introduction

Beaucoup, voire la totalité, des hydrologues utilisent des séries chronologiques (ou chroniques) de débits de cours d'eau dans leurs travaux – débits qui ne peuvent être mesurés en continu. En effet, ces chroniques de débits (hydrogramme) résultent de la transformation de mesures continues de hauteur d'eau (limnigramme) via une courbe de tarage qui relie donc hauteurs d'eau et débits pour une section donnée du cours d'eau. La courbe de tarage est établie en réalisant des jaugeages – mesures associant des couples de points (Hauteur, Débit) – ponctuellement. Ces mesures sont obtenues par différentes techniques de jaugeage (courantomètre, ADCP, volumétrie, dilution, moulinet...) présentant chacune avantages et inconvénients (Le Coz et al., 2013).

En période d'étiage, et qui plus est lorsque la section de contrôle n'est pas aménagée (canal, seuil, déversoir...), on rencontre les plus fortes incertitudes sur les courbes de tarage. Dans ce cas, la géométrie de la section d'écoulement est souvent instable – encore plus vrai pour les phénomènes de crue – et peu sensible dans le sens où les variations de débits seront biaisées par l'incertitude associée sur la mesure du niveau de l'eau au niveau de la section de contrôle. A cela il faut rajouter les incertitudes sur les jaugeages d'étiages (Dubreuil et al., 1972).

Dans des situations d'étiages, il est donc possible d'atteindre des incertitudes de l'ordre de 100% sur les valeurs de débits. Nous nous attacherons donc dans cette partie à quantifier et lister ces incertitudes (Le Coz et al., 2013).

2 - Jaugeage et courbe de tarage

Comme nous l'avons expliqué précédemment, chaque jaugeage est entaché d'une incertitude qui dépend de la technique employée, mais aussi de la personne qui l'a fait (Othu, 2012). Des jaugeages réalisés dans de très bonnes conditions d'application présentent des incertitudes de l'ordre de 7%. Cette valeur est utopique et n'est bien sûr pas valable en situation d'étiage où les faibles vitesses d'écoulement et/ou les très faibles profondeurs engendrent des incertitudes beaucoup trop élevées liées aux limites même des appareillages. Les quantifier précisément est impossible du fait d'un manque certain d'études sur le sujet (Ministère de l'environnement, 1998). Néanmoins, dans certains cas d'étiages, liés à l'hydromorphologie du cours d'eau, il est possible d'obtenir des jaugeages de qualité. Nous présenterons, à travers trois exemples concrets, trois techniques différentes, qui sont : le seuil-jaugeur, le moulinet et le jaugeage chimique :

- **Cours d'eau d'une largeur inférieure à 3m et à pente relativement faible.** En période d'étiage, le jaugeage chimique ne peut être utilisé du fait d'un écoulement de type fluvial qui ne permettra pas un assez bon brassage du traceur. Le moulinet ne pourra pas non plus être utilisé du fait des vitesses d'écoulement trop faibles, la vitesse minimum mesurable par ce type d'appareil est généralement de 5cm/s. L'intérêt du seuil-jaugeur est alors multiple. Il peut être installé de manière permanente, en prenant soin de disposer de solides ancrages, afin d'obtenir des mesures tout au long de l'année ou bien de façon temporaire pour faire un jaugeage. A noter que, la méthode des seuils-jaugeurs portables est très utilisée dans les campagnes d'étiage sur des débits inférieurs à 100 l/s. Les incertitudes sont assez faibles, car associées à la lecture de la hauteur d'eau au-dessus du seuil étant donné qu'elle est reliée par une relation univoque avec le débit Q . Chaque seuil (paroi mince, seuil épais, Parshall...) a sa propre relation.
- **Cours d'eau d'une largeur inférieure à 3m et à pente relativement forte.** Ici le moulinet ne sera pas utilisé du fait de conditions d'écoulements souvent torrentiels avec un profil de vitesse trop variable dans la section. D'autant plus en période d'étiage, le jaugeage chimique avec un traceur salin ou



fluorescent sera la meilleure option. Les incertitudes restent cependant assez mal connues (Tison, 2012).

- **Cours d'eau d'une largeur quelconque et à faible pente.** On s'assura dans la section que les vitesses d'écoulement soient supérieures à 5cm/s. On choisira dans ce cas le moulinet hydrométrique afin d'explorer le champ des vitesses. Le nombre de verticale ainsi que le nombre de points sur cette verticale impacteront directement la qualité du jaugeage au final.

Dans quasiment tous les autres cas, il faudra se contenter d'une qualité médiocre des débits d'étiages.

De manière plus générale, au niveau de la section de contrôle choisie, on cherchera à établir une relation univoque – appelé la courbe de tarage – entre la hauteur d'écoulement H et le débit mesuré Q. Cette relation se présente sous la forme d'une équation hydraulique classique de type puissance de la forme :

$$Q = a(H - H_0)^b$$

Avec :

- H_0 la hauteur d'eau pour laquelle $Q=0$;
- a et b des paramètres de formes.

On comprend donc que le calage de la courbe de tarage qui résulte d'une régression de type puissance de nos points de jaugeage est par définition incertain. De plus, les données de jaugeages pour les très faibles débits d'étiage sont la plupart du temps inexistantes ce qui implique une extrapolation de la courbe de tarage en dehors du domaine des débits jaugés induisant nécessairement des erreurs significatives. Une solution généralement utilisée en ces périodes consiste à effectuer un grand nombre de jaugeages et à interpoler entre ces mesures toutes les fois où cela est possible (Ministère de l'environnement, 1998).

Enfin, cette relation supposée univoque ne l'est pas nécessairement. En effet, elle est susceptible de varier dans le temps en fonction de la stabilité de la section de contrôle. Nous traiterons de ce problème dans la prochaine sous-partie.

3 - Mesure automatique des hauteurs d'eau

Aussi, un problème récurrent en hydrométrie est la mesure automatique de la hauteur d'eau dans la section de contrôle par un capteur étalonné. L'incertitude qui en résulte peut être de deux ordres : la dérive ou panne d'un capteur et, dans une moindre mesure, la limite de précision des différents capteurs (Lacaze et al., 2010).

Si la panne d'un capteur implique obligatoire une réparation ou un remplacement, la dérive de celui-ci peut être corrigé par l'hydromètre référant de la station. En effet, en assurant un suivi de l'évolution des hauteurs d'eau mesurées par le capteur avec les hauteurs d'eau sur l'échelle limnimétrique de la station il est possible de diagnostiquer d'éventuels écarts et donc d'insérer une correction sous la forme d'un biais dans les hauteurs mesurées par le capteur (Lacaze et al., 2010).

Le problème majeur rencontré en période d'étiage est qu'une correction appliquée ou pas à la mesure du capteur peut entraîner parfois une variation de $\pm 0.50\%$ du débit après transformation de la courbe de tarage. Dans ces très faibles hauteurs d'eau, une petite variation n'entraîne pas nécessairement une variation du débit (Ministère de l'environnement, 1998).



4 - Sections de contrôle non stationnaire

En hydrologie, une hypothèse contraignante sur la transformation d'une chronique de hauteur d'eau via une courbe de tarage est de supposer que la relation hauteur-débit ne change pas au cours du temps, sinon sur l'ensemble de la période d'enregistrement du moins par période stationnaire. Le changement d'une période stationnaire à une autre est relatif à un événement brutal et spontané modifiant drastiquement la géométrie de la section de contrôle (épisode de crue, travaux...).

En réalité, on observe également des phénomènes bien plus lents entraînant un détarage – qui s'éloigne de la courbe de tarage valide – continu. Ce détarage continu peut être temporaire ou bien définitif. En période d'étiage, deux situations peuvent être rencontrées (Le Coz et al., 2013) :

- un détarage cyclique expliqué par exemple par la croissance saisonnière de végétation au niveau de la section de contrôle ;
- un détarage progressif induit par un envasement de la section de contrôle par un apport sédimentaire récurant.

On comprend donc que le tarage d'une telle station est compliqué. La courbe de tarage univoque cède la place à un faisceau de plusieurs courbes ou à une surface de tarage (Dubreuil et al., 1972).



III - Modélisation

1 - Généralités sur la modélisation hydrologique

La modélisation du comportement hydrologique des bassins versants est incontournable lorsqu'il est question de la ressource en eau, de l'aménagement du territoire, ou de l'une des différentes facettes du risque hydrologique : elle doit pouvoir décrire les étapes de la transformation pluie-débit et en particulier les processus liés à la formation des crues et l'apparition des étiages.

Un modèle hydrologique n'est que la représentation de phénomènes complexes : à chaque stade de la modélisation des approximations sont réalisées (perception du phénomène, formalisation en un cadre conceptuel, traduction dans un langage de programmation).

- **Les différents modèles**

Il existe dans la littérature de nombreux modèles hydrologiques ayant chacun leurs spécificités et leur domaine d'application. La classification de ces différents modèles peut s'effectuer selon différents critères :

- **Classification selon la représentation des processus :**

Différents types d'approches ont été développées pour représenter la relation pluie-débit : les approches empiriques, les approches conceptuelles et les approches à base physique. Le choix d'un type d'approche de représentation des processus conditionne particulièrement les autres caractéristiques d'un modèle hydrologique: un modèle hydrologique empirique ne nécessite pas de discrétisation spatiale des processus par exemple et est donc généralement global (G. Raouf, 2006).

Modèle empirique

Un modèle empirique est construit autour de relations mathématiques directes établies entre les entrées et les sorties observées sur le bassin versant considéré. Ce type de modèle ne cherche pas à décrire les processus impliqués dans la relation pluie-débit et est donc souvent caractérisé comme un modèle "boîte noire". Les processus sont donc décrits sous forme d'équations simplifiées ou d'équations issues de raisonnements empiriques (G. Raouf, 2006).

Parmi ces modèles empiriques on peut citer les modèles linéaires ou les modèles stochastiques, qui décrivent certaines grandeurs (variables d'entrée ou de sortie comme la pluie, le débit...) de manière probabiliste. Il en résulte des fonctions de distribution des probabilités associées à ces grandeurs. L'approche probabiliste est utilisée soit parce que le phénomène étudié est aléatoire soit parce que l'on cherche à représenter des permanences difficilement explicables physiquement (B. Hingray, 2009).

Modèle conceptuel

Un modèle conceptuel cherche à représenter les écoulements de la relation pluie-débit sans utiliser les lois physiques régissant les processus concernés. Ce type de modèle considère le bassin versant comme un ensemble de réservoirs interconnectés censés représenter les différents compartiments hydrologiques. L'utilisation de différents réservoirs permet une séparation des composantes de la relation pluie-débit, ils sont fondés sur une représentation conceptuelle du cycle de l'eau : les réservoirs sont alimentés par la pluie, et génèrent évaporation et écoulement selon des lois de vidange (G. Raouf, 2006).

La mise en oeuvre de ce type de modèle est facilité par le nombre réduit de paramètres, mais les facteurs expliquant la variabilité des écoulements sont généralement moins bien compris.



Modèle à base physique

Un modèle à base physique représente les processus de la relation pluie-débit en utilisant les lois physiques régissant ces processus. Ils proposent donc de décrire les mécanismes internes au système à partir de lois physiques connues (modèle « boîte blanche »). Par exemple les modèles déterministes supposent que les variables d'entrée et les paramètres du système sont parfaitement déterminés ou déterminables (B. Hingray et al., 2009).

Ce type de modèle a l'avantage de permettre le calcul des différents termes du bilan d'eau du bassin versant étudié. Toutefois ce sont des modèles qui exigent une quantité importante en données d'entrée et nécessitent la spatialisation de ces données et des processus représentés (G. Raouf, 2006).

- **Classification selon la représentation de l'espace :**

- Dans un **modèle global**, le bassin versant est représenté comme une seule entité spatiale homogène. La variabilité spatiale des processus étudiés n'est donc pas explicitement prise en compte (G. Raouf, 2006).
- Dans un **modèle semi-distribué**, certains processus sont modélisés en divisant le bassin versant en plusieurs entités spatiales. Ce découpage de l'espace peut être réalisé grâce à des critères hydrologiques (découpage en sous bassin versant), ou des critères topographiques (découpage par bandes d'altitude). Ce modèle permet de prendre en compte la variabilité spatiale des processus étudiés (G. Raouf, 2006).
- Le modèle **distribué** prend explicitement en compte la variabilité spatiale des processus, des variables d'entrée, des conditions aux limites et des caractéristiques du bassin versant. Son principal avantage est de pouvoir prendre en compte l'évolution du système (changement d'occupation du sol par exemple) et donc de pouvoir tester des scénarios futurs. Mais dans la réalité les données nécessaires pour l'implémentation de ce modèle n'est généralement pas disponible sur le bassin d'application, ce qui rend ce type de modèles peu opérationnel. On préférera donc utiliser des modèles semi-distribués qui tiennent compte de la variabilité spatiale à travers des classes hydrologiques ayant des comportements supposés similaires (G. Raouf, 2006).

Le choix d'un modèle plutôt qu'un autre est fortement lié aux composantes hydrologiques à reproduire, à l'échelle nécessaire, aux données disponibles...

- **Classification selon la discrétisation temporelle :**

Les modèles peuvent fonctionner pour différents pas de temps, on distinguera donc les modèles événementiels et les modèles continus.

Les **modèles événementiels** visent à reproduire la réponse du bassin versant en termes de débits lors d'un événement pluvieux. Ce genre de modèle, qui n'est activé qu'au moment des pluies, nécessite de connaître les conditions initiales du bassin versant en fonction des paramètres climatiques antécédents (G. Raouf, 2006).

Les **modèles continus** permettent quant à eux de suivre l'évolution des variables d'état et/ou de sortie à plus long terme. Dès lors, certains phénomènes comme l'évaporation et l'évapotranspiration ne peuvent plus être négligés dans les modèles continus. Ces modèles nécessitent également des conditions limites (précipitations,



températures, rayonnement solaire, vent...) supplémentaires par rapport aux modèles événementiels afin d'expliquer l'évolution des stocks d'eau sur le bassin pour une ou plusieurs années (G. Raouf, 2006).

La plupart des modèles à destination de la simulation d'étiage utiliseront donc un modèle continu avec un pas de temps mensuel. Ce pas de temps convient pour évaluer la disponibilité de l'eau pour l'irrigation et l'utilisation urbaine, mais n'est pas adapté pour estimer et évaluer les étiages au regard des processus écologiques et environnementaux qui se déroulent dans les rivières à des échelles temporelles bien plus réduites. Pour cela, il sera conseillé de prendre un modèle basé sur un pas de temps journalier (D Barma et al., 2012).

- **Calage et validation**

La phase de calage du modèle consiste à déterminer des jeux de paramètres afin de minimiser au maximum les écarts entre débits simulés et débits observés. La période de calibration doit être suffisamment longue pour être représentative de la variabilité climatologique de la zone, incluant des périodes d'étiage. L'optimisation est d'autant plus délicate que le nombre de paramètres est important, d'où l'avantage des modèles fondamentalement plus simples (D. Barma et al., 2012).

La validation, en vue de confirmer la robustesse du modèle et la reproductibilité des résultats, doit être entreprise si l'on dispose de suffisamment de données (chroniques de pluie et de débit). Elle doit être effectuée sur une période différente de celle utilisée pour la calibration, sans quoi les conclusions seront erronées vis à vis de la capacité du modèle à représenter les étiages (D. Barma et al., 2012).

La validation du modèle passe par des critères d'évaluation de la performance du modèle. Le critère habituellement utilisé est celui de Nash-Sutcliffe, une formulation dérivée de la méthode des moindres carrés. Ce critère permet de comparer les performances de modèles entre eux, mais aussi les résultats pour différents bassins versants. Toutefois il s'agit d'un critère global qui mesure les erreurs du modèle sur une moyenne, alors que les étiages sont une phase très particulière d'écoulement. Un critère peut donc conduire à conclure que le modèle est bon, alors pour les phénomènes marginaux comme les étiages il fournit des résultats très éloignés de la réalité (C. Lang, 2007).

Pour palier à ces écarts sur la modélisation des débits d'étiage on peut introduire la racine carrée des débits mis en jeu, ou leur logarithme, ce qui aura tendance à augmenter l'influence des faibles débits et diminuer celle des forts débits (P. Krause et al., 2005).

Dans la mesure du possible, il est conseillé de valider et évaluer la robustesse de la calibration du modèle en utilisant différents jeux de données, à l'aide d'un critère approprié (Nash-Sutcliffe logarithmique dans le cas des étiages) et d'intégrer à cette évaluation une analyse des incertitudes afin d'estimer la fiabilité et la robustesse du modèle, et particulièrement sa capacité à estimer les débits d'étiage (C. Lang, 2007).

2 - Application aux étiages

Sur certaines régions où la ressource en eau est un point clé de l'économie (agriculture, tourisme et loisirs, barrages hydroélectriques, alimentation en eau potable...), il est nécessaire de mettre au point des modèles adaptés à la simulation des étiages (D. Barma et al., 2012).

A l'instar de la prévision des crues, la prévision des étiages peut devenir un outil opérationnel d'amélioration de l'exploitation des ouvrages, au plan écologique et économique et en matière de souplesse de la navigation et de qualité de la gestion hydraulique, par une meilleure anticipation et un meilleur accompagnement des périodes de basses eaux (R. Pushpalatha, 2013).



La modélisation et la prévision des étiages passent tout d'abord par une bonne connaissance du bassin versant, dont le modèle permet de reproduire et/ou expliquer le fonctionnement du système (R. Pushpalatha, 2013).

Ces connaissances sont nécessaires afin de déterminer l'importance de différents facteurs sur les régimes d'écoulement de la rivière, comme les interactions nappe-rivière, les changements d'occupation du sol, l'évapotranspiration... et de sélectionner le modèle en conséquence (D. Barma et al., 2012).

Le modèle utilisé doit également bénéficier de données avec une résolution spatiale et temporelle suffisante pour décrire les principaux phénomènes physiques influençant les étiages (pluie, débit, évaporation potentielle, type de sol, occupation du sol et utilisation de la ressource, types de cultures et méthodes agricoles pratiquées, volumes prélevés...). La profondeur des chroniques de données de pluie et de débit doit être suffisante pour représenter la variabilité climatologique de la zone étudiée (D. Barma et al., 2012).

Ces différents modèles peuvent être plus ou moins complexes mais un consensus se dégage pour considérer que les modèles type réservoirs sont les plus robustes et les moins gourmands en données d'entrée (EPTB Charente, 2010).

Pour les prévisions d'étiage on utilise donc essentiellement les modèles conceptuels (modèle MORDOR d'EDF par exemple) : le bassin versant est assimilé à une succession de réservoirs interconnectés dont les échanges sont plus ou moins complexes.

Dans ce rapport nous nous concentrons sur les eaux de surface lors d'un étiage (hauteur d'eau et réglementation associée), mais il ne faut pas oublier que sur ces périodes les échanges nappes-rivières sont prépondérants, l'hydraulique souterraine alimentant la majorité du débit du cours d'eau.

D'un point de vue modélisation, il est difficile de faire abstraction de cette composante, les modèles mis au point à ce jour faisant intervenir les différents stocks d'eau d'un bassin versant, notamment les réservoirs aquifères du sous-sol.

Ainsi, dans les modèles conceptuels on fera apparaître tous les éléments du sol et du sous-sol ayant un rôle dans le cycle de l'eau de la zone étudiée (réservoir superficiel à capacité limitée, réservoir karstique, réservoir du sous-sol,...). Les différents éléments interagissent entre eux à travers différentes relations mathématiques : transfert, vidange, remplissage, influence,...

Toute la difficulté consiste en l'estimation du stock de ces différents réservoirs et surtout de la relation mathématique à mettre en œuvre dans les relations avec chacun des autres éléments du modèle (G. Raouf, 2006).

Exemple du modèle CYCLEAUPE développé par le bureau Eaucéa en 2005

La modélisation hydrologique sur le bassin de la Charente grâce au modèle CycleauPE (Cycle de l'eau pour la Prévision des Etiages) a été développée initialement pour permettre la prévision des débits durant l'étiage aux points nodaux de Vindelle, comme appui à la gestion des lâchers de soutien d'étiage depuis les barrages de Lavaud et Mas Chaban, et de Foulpougne, pour préciser les débits disponibles pour la Charente aval (EPTB Charente, 2010).

De récents travaux ont permis de compléter l'approche prédictive de l'hydrologie en Charente aval avec l'incrémentation de nouveaux points de simulation sur les affluents ainsi que sur l'axe Charente jusqu'à l'estuaire.

Le modèle "CycleauPE Charente" se structure en 13 modules, décrivant 13 sous bassins versants hydrologiques ou hydrogéologiques où les données météorologiques sont supposées uniformes.



Chaque module de CycleauPE est un modèle pluie-débit à réservoirs, c'est-à-dire qu'il simule les débits en fonction des seules données météorologiques de pluie et d'évapotranspiration, en modélisant les différents compartiments par des réservoirs qui sont régis par des relations mathématiques (vidange, remplissage, transfert, influence, etc.).

Le modèle hydrologique CycleauPE est une plateforme de simulation et de prévision des débits journaliers, exploitant plusieurs sous modèles, eux-mêmes en relation les uns avec les autres.

La particularité de CycleauPE par rapport à un modèle réservoir traditionnel est la très grande attention portée à l'étiage (période la plus complexe) et l'absence de relation "purement mathématique" sans lien avec un comportement physique identifiable. Cela en fait un puissant outil de communication auprès des usagers de la ressource (par exemple test de l'impact de restriction).

La production du bassin versant vers la rivière dépend dans ce modèle des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle, qui font réagir les différents réservoirs, qui eux-mêmes se vidangent, chacun à leur rythme, dans la rivière.

Ce modèle présente également la particularité d'intégrer les débits de la Touvre qui sont issus de la vidange du karst de La Rochefoucauld, via les sources de la Touvre (deuxième plus grosse résurgence de France). Leur modélisation revêt donc des particularités bien spécifiques des aquifères karstiques qui la distinguent des autres sous bassins.

D'autres fonctions sont prises en compte pour coller au mieux à la réalité comme la consommation pour l'irrigation qui est estimée au pas de temps journalier sur la base du modèle Eaucéa intégrant la contrainte agroclimatique et les restrictions d'usage réglementaires.

Les prélèvements d'irrigation sur le karst sont affectés au réservoir profond, ce qui amortit considérablement l'impact journalier de ces prélèvements.

Dans une optique d'amélioration de la gestion de la ressource en eau ce modèle a également été utilisé pour des modélisations à moyen terme de scénarii climatiques afin d'étudier l'impact des changements globaux sur les réponses hydrologiques en période d'étiage. Un important travail a dû être fourni afin d'adapter la plateforme CycleauPE à des simulations longue période (1960-2040 soit 81 années) et pour des scénarios multiples, l'outil de base servant à de la prévision en phase de gestion opérationnelle n'étant pas du tout adapté.

Pour optimiser les calculs, le moteur CycleauPE qui gère les équations, les relations entre modules et les paramètres, a été conservé mais transformé afin de pouvoir intégrer de grandes quantités de données d'entrée et en ressortir de nombreuses données de résultats.

Pour mémoire, les hydrogrammes journaliers des 13 modules pour 81 années de simulations et 7 scénarios climatiques représentent environ 2,7 millions de valeurs de débits journaliers. A cela, on peut rajouter les 5,4 millions de données en entrée des modèles (pluie et ETP).

Modélisation hydraulique :

L'étude hydrologique présentée précédemment permet d'estimer les débits d'étiage en fonction des données d'entrée du système, mais elle ne renseigne en rien sur l'impact de ces débits sur l'allure de la surface libre du cours d'eau. C'est pourquoi, afin d'obtenir une modélisation complète des étiages, la partie hydrologique doit être accompagnée d'une étude hydraulique qui simulera l'allure des écoulements dans le cours d'eau (D. Barma et al. 2012).

Pour cela il faut connaître les caractéristiques géométriques précises de la rivière étudiée (excellente description des lits mineurs, lits majeurs, ruptures de pente, trous d'eau...).



Ces modélisations hydrauliques, comme les modélisations hydrologiques, présentent des limites liées à la précision et incertitudes des mesures (pentes, profils en travers, cotes...), à la complexité des biefs, aux équations utilisées, au régime d'écoulement (permanent, transitoire), aux conditions limites qui ne sont pas forcément connues avec précision (batillage de la marée, cote de la surface libre dans une retenue hydroélectrique, au coût de l'étude,...)(D. Barma et al., 2012)

Mais ces études hydrauliques ne sont pas systématiquement réalisées, tout dépend de l'usage qui sera fait des résultats de la modélisation hydrologique. S'il s'agit d'un modèle pour la gestion globale de la ressource sur un bassin versant pour assurer les différents usages qui en dépendent, la modélisation hydrologique à elle seule donnera suffisamment d'indications en termes de débit pour savoir quelle actions préconiser à l'échelle du bassin versant. Au contraire, s'il s'agit d'une étude ayant pour but de protéger des zones humides sensibles à la sécheresse, une modélisation hydraulique donnera une meilleure idée de l'impact de l'étiage sur les différents écosystèmes liés à la rivière (assèchement critique nuisible à la mortalité piscicole et végétale...) (D. Barma et al., 2012).

3 - Incertitudes et limites des modèles

Les modèles présentent en effet des limites, notamment celles liées aux données d'entrée du système et les incertitudes qui les accompagnent. On distinguera différents types d'incertitudes, notamment :

- **Données de calage du modèle :**

En effet, le modèle choisi se trouve souvent dans l'incapacité de représenter les processus physiques réels comme le ruissellement. De plus, les paramètres qui ont été optimisés lors de l'étape de calage sont eux-mêmes soumis aux incertitudes liées aux données d'entrée utilisées (D. Barma et al., 2012).

- **Pertes au sein des rivières :**

Les pertes constatées au niveau des rivières ont plusieurs sources :

L'eau peut s'infiltrer à travers le lit de la rivière et percoler vers un aquifère souterrain sous-jacent, ce qui représente généralement une perte permanente.

L'eau peut également s'infiltrer à travers les berges et être évapotranspirée par les végétaux de la ripisylve. Ces données d'entrée sont cruciales pour le modèle, mais il existe peu de mesures de l'évaporation et de l'évapotranspiration.

La plupart des modélisations appliquent donc des pertes à travers des fonctions basées sur les pertes moyennes calculées sur une ou plusieurs années. Toutefois, les pertes varient fortement en fonction de la saison et du climat qui l'accompagne, des variations du niveau des nappes, des modifications du profil et du parcours de la rivière. Ces pertes varient également au cours d'une journée, les journées chaudes entraînant une évapotranspiration élevée, au niveau de la ripisylve mais aussi au niveau de la surface libre de l'écoulement (R. Pushpalatha, 2013).

Ces phénomènes de pertes sont donc extrêmement complexes à modéliser, la plupart des modèles associent aux pertes un terme unique pour les représenter. Des modèles plus complets et précis iront dissocier les différentes pertes (infiltration, évapotranspiration, évaporation), mais aussi les gains potentiels (pluie, alimentation par les réservoirs souterrains) (R. Pushpalatha, 2013).



Évidemment, les mesures de ces pertes sont souvent approximatives, ce qui introduit des erreurs et des incertitudes importantes, réduisant la capacité des modèles à représenter précisément les phénomènes d'étiage (R. Pushpalatha, 2013).

- Etat initial du bassin versant :

Les données nécessaires pour l'estimation de l'état initial du bassin, comme l'humidité du sol ou le niveau de remplissage des réservoirs, vont influencer sur la réponse hydrologique.

Dans le cas des étiages, l'humidité du sol est une donnée clé, elle peut être estimée par différents indicateurs (indice des pluies antérieures, indice d'humidité des sols comme le HU2 ou le SWI), mais les erreurs possibles sur ces paramètres peuvent rapidement conduire à des erreurs importantes (B. Hingray et al., 2009).

Les modèles continus réalisent un bilan en eau du bassin versant et n'utilisent donc pas en entrée l'humidité du bassin mais les éléments permettant de la calculer : les pluies antérieures et l'évapotranspiration (potentielle ou réelle). Il s'agit le plus souvent d'une information d'évapotranspiration potentielle car l'évapotranspiration réelle n'est que très rarement disponible. Ainsi l'incertitude sur cette donnée est très forte (B. Hingray et al., 2009).

Les modèles événementiels, eux, doivent être initialisés : le modélisateur doit caler une relation entre cet état initial et une variable externe comme un indice d'humidité (HU2 ou SWI) ou le débit initial. L'incertitude de cette relation et l'incertitude sur la variable externe influe directement et fortement sur les résultats du modèle (B. Hingray et al., 2009).

- Incertitudes sur les débits d'étiage :

Une autre limite de ces modèles est atteinte pour la calibration, en se basant sur des chroniques de débit au niveau de certaines stations de mesure. En effet, on considère que l'erreur effectuée sur la mesure de débit varie habituellement entre 5 et 15%, mais nous avons vu qu'en période de basses eaux cette incertitude de mesure doit être revue largement à la hausse. Lors de la calibration du modèle, on essaie donc de caler un modèle sur une mesure elle-même incertaine (D. Barma et al., 2012).

- **Données anthropiques :**

- Insuffisance des données sur les prélèvements :

Les prélèvements, actuels et historiques (pour l'agriculture, l'industrie ou la consommation humaine), sont une donnée clé des modèles de gestion de l'eau qui ont une influence importante sur la calibration du modèle. Mais les informations sur les prélèvements sont rarement précises du fait de la mauvaise qualité des moyens de mesure mis en place, et ne sont disponibles que sur des plages temporelles très limitées, ou seulement pour un sous-ensemble précis d'utilisateurs de la ressource (D. Barma et al., 2012).

- Irrigation et consommation humaine :

Les données sur l'irrigation peuvent être déduites des prélèvements historiques mesurés, mais lorsque ces données ne sont pas disponibles elles doivent être estimées en utilisant des modèles de consommation hydrique des cultures. Cela permet de simuler des caractéristiques intéressantes du point de vue de l'étude des étiages : par exemple la demande en eau des cultures en fonction des espèces cultivées, de leur stade de croissance, ou encore l'humidité du sol en réponse au climat et aux pratiques agricoles (D. Barma et al., 2012).

Ces incertitudes sur les données anthropiques s'accompagnent également d'imprécisions et d'erreurs sur l'occupation du sol, que ce soit en terme de variation spatiale ou temporelle, entraînant d'autres incertitudes liées à la complexité des autres paramètres du modèle comme l'évapotranspiration (D. Barma et al., 2012).



Les incertitudes associées à toutes ces données doivent, si possible, être déterminées et maîtrisées avant de les exploiter afin de produire des résultats qui pourront être étudiés avec un regard critique et dont on connaîtra les limites.

Malgré les incertitudes des modèles, les progrès réalisés en termes d'acquisition de données et de puissance de calcul informatique permettent d'affiner de plus en plus les modèles hydrologiques. Toutefois, en ce qui concerne les étiages, le nombre de types de modèles, de variables, de paramètres et de facteurs à prendre en compte devient très vite limitant pour reproduire les chroniques observées et fournir des prévisions fiables pour la gestion de l'eau.

IV - Indicateurs et réglementation

1 - Introduction

Les phénomènes d'étiages sont difficiles à caractériser, car un simple regard sur un cours d'eau n'est pas suffisant afin de déterminer ou non si celui-ci est en période d'étiage. Heureusement, il est possible d'étudier statistiquement ces phénomènes, notamment par l'utilisation de débits de référence que l'on appellera indicateurs statistiques. Ces indicateurs permettent alors d'identifier plus rapidement un état d'étiage, en les comparant avec les données de débits journaliers du cours d'eau en question. Il existe plusieurs types d'indicateurs et certains possèdent même une valeur réglementaire : lorsque le débit passe en dessous de ces indicateurs des mesures restrictives de l'utilisation de l'eau sont prises.

2 - Les indicateurs

a) Les différents indicateurs de débit

QMNA

Le QMNA est l'indicateur le plus utilisé en France et en Europe. Il a été décrit précédemment dans la partie I-1-a)

VCNd

Aussi très utilisé en France, cet indicateur correspond au plus faible débit moyen annuel de « d » jours consécutifs. En général, les étiages sont souvent caractérisés par une moyenne s'étalant sur plusieurs jours, comme les VCN ou les QMNA. Le VCN3 est largement répandue dans la littérature et caractérise une situation d'étiage sévère ayant lieu sur une courte période. Il permet aussi d'apporter une information sur la présence de possible perturbation biologique d'une rivière (Hydratec, 2007).

DCx

Les DCx s'apparentent au DCE, à la différence qu'il s'agit de débits caractéristiques calculés sur une durée inférieure à 12 mois. Par exemple, le débit caractéristique de durée 335 (11 mois) jours est un indicateur statistique qui est aussi très utilisé. Il correspond à un débit non dépassé pendant 30 jours de l'année ou au débit dépassé 335 jours dans l'année (Roche et al, 2012). De la même manière il est possible de calculer des débits caractéristiques sur d'autres périodes de temps comme par exemple le DC305 ou DC285. Dans certains ouvrages il est aussi question de débits caractéristiques exprimés en pourcentage. Ainsi un débit caractéristique de 90% correspondra au débit non dépassé sur 10% des valeurs de l'année.

b) Estimation du QMNA5 et incertitudes

Le QMNA5 correspond au débit mensuel minimal pour une période de retour de 5 ans et sert de valeur de référence lorsqu'il est question d'étiage



- **Estimation en site jaugé**

. En France, une des méthodes d'estimation du QMNA5 d'un site se fait par l'utilisation d'une relation simple entre la valeur du QMNA5 que l'on recherche (« site cible ») avec le QMNA5 connue d'une station hydrométrique voisine, que l'on appellera « site de référence » ou « site d'appui ». On estime alors le QMNA5 au site cible par la relation (Catalogne & Sauquet, 2012) :

$$QMNA5_{cib} = L(QMNA5_{ref})^k$$

Avec $QMNA5_{cib}$, valeur que l'on cherche à estimer et $QMNA5_{ref}$, valeur connue du débit caractéristique au site de référence.

L et k sont deux paramètres déterminés ajustement d'une régression linéaire entre les logarithmes des débits jaugés au site cible $q_{cib}(t)$ et ceux observés à la même date au site d'appui $q_{ref}(t)$. Cet ajustement se fait avec la relation suivante :

$$\ln(q_{cib}) = \ln(L) + k \cdot \ln(q_{ref})$$

On estime que 4 à 5 jaugeages (en période de basses eaux) sont nécessaires au site cible afin d'estimer une valeur correcte.

- **Estimation en site non jaugé**

Lorsque l'on ne possède pas de données de débit, on emploiera alors des informations régionales ou bien des variables descriptives du bassin versant (Catalogne 2012). Il existe trois grandes familles d'approche :

- L'approche par identité des débits spécifiques. Il s'agit de l'approche la plus simpliste, la surface drainée est considéré comme l'unique source de variabilité hydrologique. L'estimation se traduit alors par la relation : $QMNA5_{cib} = \frac{S_{cib}}{S_{ref}} QMNA5_{ref}$. Avec S_{cib} surface du site cible et S_{ref} surface du site de référence.
- L'approche par interpolation spatiale. Cette approche regroupe les différentes techniques qui fournissent une estimation par une combinaison linéaire pondérée des sites de référence voisins.
- L'approche par régression multiple qui représente l'approche d'estimation la plus répandue en hydrologie. « Dans cette approche la dépendance de la variabilité spatiale de l'information hydrologique étudiée vis-à-vis des variations régionales de géologie, climat, altitude, etc. est décrite sous la forme de relations établies par régressions linéaires multiples entre la variable étudiée et différents descripteur du bassin. » (Catalogne, 2012),

- **Incertitudes**

On estime qu'il existe trois facteurs qui peuvent entraîner une forte variation de l'estimation du QMNA avec cette méthode :

- La fréquence annuelle des jaugeages
- Le nombre de jaugeages
- Le choix du site de référence



Il est possible de quantifier l'influence de ces trois facteurs individuellement en comparant les QMNA5 prédits et ceux observés à un même site. La méthodologie, étant plus technique, ne sera cependant pas explicitée ici mais des exemples peuvent être trouvés dans des rapports (Catalogne et Sauquet, 2012).

3 - Les seuils d'alerte

a) Débit seuil

Peu utilisés en France, les indicateurs se référant à des valeurs de débits seuils sont plutôt pratiques dans de nombreuses situations. Ils peuvent s'exprimer sous deux formes différentes :

- Sous forme de débit déficitaire. Il représente le volume manquant sous un certain seuil fixé. Il peut être utile pour déterminer l'état d'un réservoir et sa capacité à conserver un débit à l'aval.
- Sous forme de durée déficitaire, et on parle alors de QCNd. Le QCNd correspond au débit journalier annuel non dépassé pendant d jours consécutifs. Le QCN3 (3 jours consécutifs) est notamment utilisé pour connaître la ressource minimum d'un cours d'eau (qui possède un fort impact sur la qualité de l'eau).

b) Débit objectif d'étiage (DOE)

Le DOE, débit objectif d'étiage est le débit de référence d'un bon état écologique d'un cours d'eau. Il s'agit « d'un débit moyen mensuel, au-dessus duquel il est considéré que, dans la zone d'influence du point nodal, l'ensemble des usages est possible en équilibre avec le bon fonctionnement du milieu aquatique » (eau-poitou-charente). Cela signifie donc qu'au-dessus de ce débit, à un point nodal donné, l'impact de l'ensemble des usages (activités, prélèvements, rejets, ...) d'un cours d'eau ne perturbe que très peu l'équilibre écologique de ce cours d'eau. Le DOE est un indicateur de référence utilisé par la police de l'eau, et il est en général comparé au QMNA 5 d'un cours d'eau. Lorsque le QMNA 5 est supérieur au DOE, cela signifie que les différents usages permettent toujours d'assurer l'équilibre du milieu aquatique, mais lorsqu'il passe en dessous, l'impact des usages est trop fort et il perturbe l'état d'équilibre du cours d'eau. Les DOE sont établis sur la base de débits moyens mensuels (SDAGE 2006, modifié par arrêté en 2009)

c) Débit d'alerte et débit de crise

Le débit d'étiage seuil d'alerte (DSA), correspond à une valeur seuil de débit d'étiage à partir de laquelle sont prises les premières mesures de restriction pour les usages d'un cours d'eau (Réseau eau de FNE, 2010). Le DSA est en général une valeur de débit inférieur ou égale au débit d'objectif d'étiage (DOE). Lorsque le débit d'un cours d'eau passe en dessous du DSA, il est alors nécessaire de réduire les volumes d'eau prélevés afin de ne pas se retrouver en situation de crise. Ces mesures de restriction sont prises par le préfet et conformément à un plan de crise.

Lorsque le débit de crise (DCR) est franchi, toutes les mesures de restriction de prélèvement et d'alimentation en eau potable doivent être prises (Réseau eau de FNE, 2010). En effet le débit de crise correspond à un débit seuil où la survie des espèces présentes dans le cours d'eau ne peut plus être assurée. Atteindre un tel seuil d'étiage représente alors une menace pour l'activité écologique du cours d'eau, qui peut durer plusieurs années.

Ces différents débits seuils peuvent être classés sur une échelle de sévérité des étiages du plan cadre sécheresse. Ainsi sur la figure 4, les seuils sont représentés avec des valeurs de débits caractéristiques correspondant.

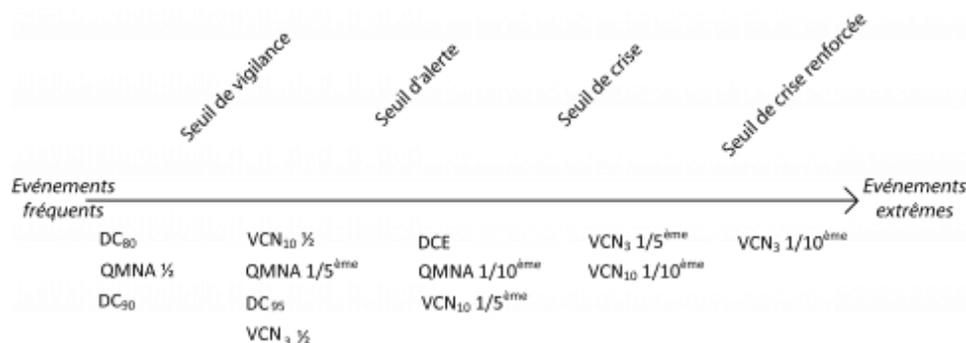


Figure 4 : Débits seuils (Qc) déterminants pour les arrêtés. (Claire Lang Delus, 2011)

Cependant il faut noter que les débits caractéristiques servant de « limite » entre les différents stades d'étiage sont définis par les cadres interdépartementaux et peuvent donc varier d'un bassin à l'autre, et ne correspondent alors pas toujours exactement au seuil au-dessus de la droite.

d) Débit cible minimal biologique

Le débit-cible « minimum pour la vie biologique » ou débit minimal biologique (DMB) exprime le débit, en dessous duquel la survie des espèces piscicoles n'est pas assurée (Hydratec, 2007). Ces débits sont aujourd'hui mal connus, même si la loi pêche de 1984 prévoyait le DMB à un dixième du module d'un cours d'eau (pour certains cours d'eau connaissant de fortes variations de débits, il peut être très fréquent d'avoir un débit d'un dixième du module, ce qui rend ce débit-cible peu applicable).

e) Débit cible usage

Le débit-cible « usage » correspond au seuil à partir duquel il existe des perturbations de fonctionnement d'une installation (qualité de l'eau pour l'AEP, débit suffisant pour le refroidissement d'une station,...) (Réseau eau de FNE, 2010).

f) Piézométrie seuil

De la même manière que pour les débits, il existe des indicateurs pour la piézométrie. Les indicateurs piézométriques les plus employés sont ceux de piézométrie d'objectif d'étiage (POE), de piézométrie de seuil d'alerte (PSA) et de piézométrie de crise (PCR). Ces indicateurs piézométriques sont respectivement analogues au DOE, au DSA et au DCR. Ils représentent de la même manière des seuils témoignant de l'équilibre écologique d'un cours d'eau et peuvent ainsi, comme pour les débits, donner lieu à des mesures restrictives.

4 - Réglementation

La réglementation française pour la gestion en eau superficielle en temps de sécheresse impose la définition à l'échelle locale de débit seuil, 4 exactement, qui correspondent à des arrêtés préfectoraux de restrictions graduels. Ces arrêtés sont pris sur un périmètre donné, pour une durée déterminée, en assurant l'usage prioritaire de l'eau et en respectant l'égalité entre les usagers, tant en amont qu'en aval des bassins versants.

Les 4 seuils sont nommés « vigilance », « alerte », « crise » et « crise renforcée ». Le seuil « vigilance » est une référence permettant de travailler sur la prévention envers les particuliers et les professionnels. Ce seuil se base sur le DOE local. Le seuil « alerte » correspond au niveau en dessous duquel apparaît un



dysfonctionnement du milieu aquatique. Les premières mesures de limitations de prélèvement sont prises, ce seuil est déterminé par le premier palier du débit d'alerte. Le seuil « crise » renforce les limitations de prélèvement, allant même jusqu'à la suspension pour certains usages et est appliqué lorsque le débit descend sous le second palier du débit d'alerte. Enfin, le seuil « crise renforcée » correspond au niveau où les usages prioritaires pour l'Homme, comme l'eau potable, la santé, la salubrité et la sécurité civile, et la survie des espèces présentes dans le milieu aquatique sont tous deux mises en danger. Ce seuil est obtenu lorsque le débit est inférieur au débit de crise. (Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie)

a) Commission de gestion

Une commission nationale porte le nom de « Commission de suivi hydrologique » et a été créée afin de mieux coordonner les actions des différents acteurs dépendant du prélèvement de l'eau superficielle. Cette commission est composée de :

- sept représentants de l'Etat : voies navigables, industrie, agriculture, tourisme, collectivités territoriales, santé, environnement ;
- quatre représentants des collectivités territoriales : un membre du comité de bassin Loire Bretagne, un membre du comité de bassin Rhône-Méditerranée, l'association des Maires de France (AMF) et l'association nationale des collectivités concédantes et régies (FNCCR) ;
- douze représentants des usagers : fédération professionnelle des entreprises de l'eau (FP2E), assemblée des chambres françaises de commerce et d'industrie (ACFCI), EDF, fédération nationale de la propriété privée rurale (FNPPR), assemblée permanente des chambres d'agriculture (APCA), France nature environnement (FNE), centre national de prévention et de protection (CNPP), fédération nationale de pêche en France (FNPF), association nationale des industries agroalimentaires (ANIA), UFC Que Choisir, union nationale des associations familiales (UNAF), représentant de la conchyliculture ;
- des experts : office national de l'eau et des milieux aquatiques (ONEMA), bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), Météo-France, voies navigables de France (VNF), agence de sûreté nucléaire (ASN).

b) Outil de surveillance

Afin de visualiser en temps réel l'évolution de la sécheresse sur le territoire national, les préfets ont l'obligation de reporter leurs arrêtés concernant la gestion de l'eau sur le site internet www.propluvia.developpement-durable.gouv.fr. Ainsi, l'ensemble des restrictions à l'échelle de portions de département peut être visualisé et ainsi informer le public.

c) D'un point de vue européen

La réglementation actuelle pour la gestion de l'eau à l'échelle européenne se base sur le texte signé en 2000 appelé « Directive-cadre sur l'eau ». Cette directive avait pour objectif d'atteindre un bon état écologique sur l'ensemble de l'Union Européenne d'ici à 2015 en se basant, non pas sur des frontières artificielles, mais sur des bassins hydrographiques naturels. Ce bon état écologique se définit comme un retour à une situation de référence naturelle. Cette réglementation impose un contrôle indirect de l'Union Européenne sur la gestion de l'étiage car l'obtention d'une situation de référence naturelle implique des phénomènes d'étiages moins intenses qu'en absence de gestion afin de préserver l'écologie du milieu.



V - Conclusion

Les problèmes croissants de pénurie d'eau, les changements climatiques et l'augmentation de la population mondiale et de ses besoins ont amené la communauté scientifique à se pencher sur l'étude des étiages. Que ce soit pour leur définition au sens statistique ou de la description de leurs caractéristiques, en passant par les mesures et incertitudes liées aux grandeurs qui interviennent dans les modélisations hydrologiques, on s'aperçoit que les étiages sont des phénomènes naturels extrêmement complexes à représenter. En effet, les données mesurées présentent une grande incertitude ce qui ne facilite pas la comparaison ni l'intégrité de ces données. Les modélisations pâtissent par la suite de ces incertitudes durant la phase de calage.

De plus, un autre problème non négligeable affecte les études hydrologiques des débits d'étiage : il s'agit de l'influence des modifications passées et futures du bassin versant. Cette précaution qui semble nécessaire de prendre en compte est encore trop peu souvent considérée dans le travail d'analyse qui est basé principalement sur des données historiques ne représentant plus la réalité.

Partant de ce constat, les autorités ont des difficultés à établir des seuils et des prescriptions d'usage de la ressource à travers des moyens fondés scientifiquement. Dans l'optique d'une meilleure compréhension des étiages, de nombreux travaux de recherche ont été entrepris pour mieux les modéliser et proposer des indicateurs plus cohérents.

Ainsi, les connaissances s'accumuleront à l'avenir sur le phénomène d'étiage, principalement à cause des questions du changement climatique et de l'augmentation de la population mondiale sur les ressources en eau. Elles permettront en outre d'avoir une meilleure vision de la problématique et d'apporter aux gestionnaires de l'eau des pistes de réflexion pour une utilisation raisonnée de la ressource au cours de ces événements, et de limiter les conflits d'usage pour cette ressource convoitée.



VI - Bibliographie

1 - Sites Internet

Agence de l'eau- Rhône Méditerranée Corse

<http://www.eaurmc.fr/>

DREAL : Pays de la Loire

<http://www.pays-de-la-loire.developpement-durable.gouv.fr/caracterisation-des-etiages>
(3 décembre 2009)

Etablissement Public Loire : Etablissement Public Territorial de Bassin

<http://www.eptb-loire.fr/>

L'eau dans le bassin Rhône-Méditerranée

<http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/situation-hydrologique/infos-secheresse>

Site gouvernemental du Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie

www.developpement-durable.gouv.fr

Agence européenne de l'environnement - Prévention

http://ec.europa.eu/environment/pubs/pdf/factsheets/water_scarcity/fr.pdf

Outil gouvernemental récapitulant les arrêtés préfectoraux

www.propluvia.developpement-durable.gouv.fr

Hydratec bilan besoins-ressources en eaux superficielles dans le bassin Seine Normandie - Rapport de phase 2 - juillet 2007

http://www.eau-seine-normandie.fr/fileadmin/mediatheque/Expert/Etudes_et_Syntheses/etude_2008/Besoin_ressources/Partie5_RAP_Phase2-2.pdf

La gestion de crise - SDAGE Loire Bretagne

www.fne.asso.fr/breves_pdf/eau/la-gestion-de-crise.pdf

Glossaire- Réseau eau de FNE - mars 2010

www.fne.asso.fr/breves_pdf/eau/glossaire-et-bibliographie.pdf

<http://www.eau-poitou-charentes.org/Debit-d-Objectif-d-Etiage-DOE.html>

Valorisation des jaugeages épisodiques pour l'estimation du débit de référence d'étiage QMNA5 - ONEMA, IRSTEA - Clotaire CATALOGNE, Eric SAUQUET - Décembre 2012

http://www.onema.fr/IMG/pdf/2012_029-2.pdf

2 - Ouvrages

BARMA D. & LOWE L., 2012, *Low-flow hydrological monitoring and modelling gap*

BARMA D. & VARLEY I., 2012, *Modelling practices guidelines (Australia)*

CATALOGNE C., 2012, *Amélioration des méthodes de prédétermination des débits de référence d'étiage en site peu ou pas jaugeés*

CATALOGNE C. & SAUQUET E., 2012, *Valorisation des jaugeages épisodiques pour l'estimation du débit de référence d'étiage QMNA5*



DACHARRY M., 1996, *Dictionnaire Français d'Hydrologie*

DIREN Rhône-Alpes, 2001, *Les débits d'étiage en Rhône-Alpes*

DUBREUIL P. , LAMAGAT J.P. et VUILLAUME G., 1972, *Tarage et calcul des débits des stations hydrométrique non univoque*

EPTB Charente, 2010 , *Charente - Assistance à la gestion de l'étiage*

GIRET A, 2013, *Crués et étiages en France au XXe siècle: Entre nature et aménagements*, Edition l'Harmattan, ISBN : 978-2-343-00153-1, 282 pages

GIUNTOLI I, MAUGIS P., RENARD B., 2012 « *Evolutions observées dans les débits des rivières en France* » (ONEMA), ISBN : 979-10-91047-07-4.

GNUOMA R. , 2006, *Aide à la calibration d'un modèle hydrologique distribué au moyen d'une analyse des processus hydrologiques : application au bassin versant de l'Yzeron*

HINGRAY B., PICOUET C. et MUSY A., 2009, *Hydrologie 2 - Une science pour l'ingénieur*, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 600 p.

KRAUSE P., BOYLE D.P. et BÄSE F., 2005, *Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment*

LACAZE Y., CHESNEAU S., CHALEON C., 2010, « *Quantification de la fiabilité de l'information hydrométrique en période d'étiage* », *La Houille Blanche*, N°4 (Décembre 2010), pp. 80-89

LANG C., 2007, *Etiages et tarissements : vers quelles modélisations ?*, Thèse

LANG DELUS C., 2011, *Les étiages : définitions hydrologique, statistique et seuils réglementaires*, *Cybergeo: European Journal of Geography*

LANG H. & MUSY A., August 1990, "Hydrology in Mountainous Regions: Hydrological Measurements; the Water Cycle v.1", Proceedings of two Lausanne Symposia, IAHS Publ. no. 193

LE COZ J. , RENARD B. , LANG M., 2013, *Analyse bayésienne des courbes de tarage non-stationnaires et des incertitudes associées*, Sujet de Thèse, Irstea

Ministère de l'environnement, 1998, *Charte qualité de l'hydrométrie*

National Water Commission (Australian Government), 2012, *Investigating low flows for improved water planning & management*

OTHU, 2012. *Méthode d'estimation des incertitudes sur les courbes de tarage*, Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine.

PUSHPALATH R., 2013, *Low-flow simulation and forecasting on French river basins: a hydrological modelling approach*. AgroParisTech (Paris), Irstea (Antony), Thèse

ROCHE P.A., MIQUEL J., GAUME E., 2012, *Hydrologie quantitative*, Edition Springer

SIVADE E, 2012, « *Le Rhône, une ressource indispensable pour aujourd'hui et pour demain* », Journée Connaissance du Fleuve Rhône, Lyon,

TISON G., 1964, *La mesure des débits d'étiage par jaugeage chimique*, Chargé de cours associé à l'université de Gand