

# Données topographiques et modélisation hydraulique pour l'amélioration des courbes de tarage à haut débit : application sur l'ensemble du parc hydrométrique de EDF-DTG

Alexandre HAUET<sup>1</sup>, Véronique MARY<sup>1</sup>, Cécile ROSSET<sup>1</sup>, Sophie MARCUCCI<sup>1</sup>, Sarah SOUBEYRAN<sup>1</sup>, Pierre GARCIA-AZNAR<sup>1</sup>, Thomas MORLOT<sup>1</sup>, Nicolas DU BOISBERRANGER<sup>2</sup>, Claire ARRIGHI<sup>2</sup>, Daniel RIOU<sup>3</sup>

<sup>1</sup> EDF-DTG, 21 Avenue de l'Europe, BP 41, 38040 Grenoble, France, e-mail : alexandre.hauet@edf.fr

<sup>2</sup> Antea Group, 400 av du Passe-Temps, 13676 Aubagne Cedex, France

<sup>3</sup> FIT-ESIC, 170 rue des Artisans, 84420 PIOLENC, France

**RÉSUMÉ.** – Afin d'améliorer la compréhension de l'hydraulique ainsi que l'extrapolation haute des courbes de tarage, EDF-DTG a lancé une campagne de relevés topographiques (réalisée par FIT-ESIC) ainsi que la modélisation hydraulique (réalisée par Antea) pour 170 stations hydrométriques de son parc. Pour chaque station, on réalise (i) une étude permettant de préciser le contexte morphologique, géologique et hydrologique, ainsi qu'un recueil des études hydrauliques et hydrologiques existantes ; (ii) des relevés topographiques, incluant le nivellement des échelles limnimétrique et le relevé de sections en travers importantes pour l'hydraulique (contrôles hydraulique, section de l'échelle, ouvrages ou singularités...) et (iii) une modélisation 1D des écoulements, permettant le calcul d'une courbe de tarage modélisée jusqu'au débit centennal. On illustre l'apport de ces données et modélisation par un exemple de réévaluation d'un débit de crue sur le Ceron à Saint Georges de Luzeçon.

Mots-clés : courbe de tarage, extrapolation, modélisation hydraulique.

## Topographic data and hydraulic modeling for the extrapolation of rating curves: application on the hydrometric network of EDF-DTG

**ABSTRACT.** – In order to improve the extrapolation of the rating curves, EDF DTG has started a campaign of topographic measurement and hydraulic modeling for 170 hydrometric stations of its network. For each station, a study describing the morphology, the geology and the hydrology is realized. Topographic data, including the leveling of the staff gauge and the survey of some cross-sections of interest, are measured. A 1D hydraulic model is built and used to compute a modeled rating curve up to the 100 years flood discharge. The reassessment of a flood discharge on the hydrometric station of the Ceron at Saint Georges de Luzeçon is detailed as an example.

Key-words: rating curve, extrapolation, hydraulic modeling.

### I. CONTEXTE

EDF-DTG (Électricité de France – Division Technique Générale) gère un parc d'environ 300 stations hydrométriques. Ces stations, dont certaines sont exploitées depuis la création de l'entreprise en 1946, ont pour but de fournir en temps réel des valeurs du débit en des lieux d'intérêt, et également de constituer des chroniques de débits. EDF-DTG utilise les historiques de débit pour caler des modèles hydrologiques (modèle MORDOR), et pour la réalisation d'études hydrologiques comme les études SCHADEX [Paquet et al., 2014] permettant le calcul de débits de temps de retours extrêmes servant au dimensionnement des barrages (structure, évacuateurs de crue, etc.). Les données temps réel sont utilisées pour la réalisation de prévisions hydrométéorologiques permettant l'anticipation et la gestion des phénomènes extrêmes (crues ou étiage), ainsi que l'optimisation de la ressource en eau.

La très grande majorité des stations hydrométriques exploitées par EDF-DTG repose sur la conversion d'une mesure in situ de la hauteur d'eau en débit, par un modèle de relation hauteur / débit appelé courbe de tarage, et pouvant être exprimée selon l'équation (1) :

$$Q = a \cdot (h - h_0)^b \quad (1)$$

où Q est le débit (m<sup>3</sup>/s), h est la hauteur à l'échelle limnimétrique (m), h<sub>0</sub> est la hauteur à l'échelle limnimétrique pour un débit nul (m), et a et b sont des coefficients calés grâce à des mesures ponctuelles de débit, appelées jaugeages. Les équipes hydrométriques d'EDF-DTG s'assurent par des campagnes régulières de jaugeages de la validité dans le temps et de la mise à jour des courbes de tarage.

Alors que l'importance des jaugeages (nombre de jaugeages par station en fonction de la stabilité du contrôle hydraulique, répartition sur la gamme de débit) dans la qualité du tracé des courbes de tarage est admise par tous, la collecte de données géographiques et topographiques est souvent négligée. Ainsi, pour le parc hydrométrique de EDF-DTG, des lacunes importantes ont été constatées concernant le positionnement précis des échelles limnimétriques (c'est parfois la localisation de l'armoire limnimétrique, voire du parking le plus proche qui est renseignée...), ce qui a un impact par exemple sur le calcul de la surface du bassin versant dont la station est l'exutoire ; sur l'altitude

absolue (en mNGF par exemple) du zéro de l'échelle limnimétrique ; sur la collecte de profils en travers des sections de l'échelle limnimétrique ou du contrôle hydraulique ; etc. alors que ces informations sont une donnée de base du dossier station, tel que décrit dans la Charte Qualité Hydrométrie [Forray et al., 1998], [Perret et al., 2017]. Concernant des caractéristiques hydrauliques, on a constaté qu'il n'y avait pas de relevé systématique de l'altitude du paramètre  $h_p$ , même lorsque celui-ci est physiquement bien identifiable (cas de seuil ou passe bas débit par exemple), de l'altitude des limites de débordement en lit majeur, ou bien de relevé détaillé des structures contrôlant le débit (seuils complexes).

Si la confiance accordée à la courbe de tarage sur la gamme jaugée est solide, les extrapolations, particulièrement à haut débit, sont délicates. Pour les stations EDF-DTG, les extrapolations de courbe de tarage à haut débit viennent de calculs hydrauliques simplistes, la plupart du temps un simple ajustement de l'équation (1) sur les jaugeages de crue. Les maximums jaugés étant souvent assez loin des limites d'extrapolation des courbes de tarage (selon une étude de [Lang et al., 2006] sur 325 stations en France, seule 10% sont jaugées au delà de la crue décennale, moins de 1% au dessus de la centennale), les méthodes d'extrapolation basées sur les jaugeages sont très incertaines, et peuvent porter des biais importants. Les maximums jaugés représentent souvent des écoulements encore contenus dans les lits mineurs. Il n'y donc pas de prise en compte de l'effet de la géométrie et de la rugosité des lits majeurs ou du changement possible du contrôle hydraulique en fonction du débit (noyage de seuil de contrôle, mise en charge d'ouvrages tels que les ponts sur lesquels sont souvent installés les capteurs de mesure de hauteur d'eau, effet de contrôles hydrauliques en aval comme des barrages ou des confluences, etc.).

## II. PROJET CT'EXTRA

### II.1. Description générale du projet

Afin de compléter les données géographiques et topographiques des stations, et afin d'améliorer la compréhension de l'hydraulique ainsi que l'extrapolation haute des courbes de tarage, EDF-DTG a lancé une campagne de relevés topographiques et de modélisation hydraulique pour 170 de ses stations hydrométriques. Ce projet, nommé CT'Extra pour Courbe de Tarage : Extrapolation (et à prononcer « c'est extra », en hommage à Léo Ferré) a débuté en mars 2015, pour une durée prévue de 3 ans. Le périmètre est de 170 stations réparties sur le territoire français, pour lesquelles l'extrapolation porte un enjeu important. La prestation est réalisée par les sociétés d'ingénierie Antea Group et FIT-ESIC. Le détail de la prestation est décrit dans la partie II.2. Antea Group est le responsable principal de la prestation. Antea Group est en charge de la modélisation hydraulique 1D des sites, et pilote les relevés topographiques associés à la modélisation. Ces relevés sont effectués par FIT-ESIC.

### II.2. Détail des phases de la prestation

Pour chaque station, la prestation est composée de 4 phases, détaillées dans les sections suivantes.

#### II.2.1. Phase 1 : recueil des données utiles à la prestation

EDF-DTG fournit à Antea Group le cahier station, les jaugeages à utiliser pour le calage des modèles, des photographies du site en différentes conditions hydrauliques, la courbe

de tarage en vigueur, ainsi qu'une description des risques associés à la station (particulièrement le risque de variation de débit dû aux ouvrages hydroélectriques en amont).

Antea Group réalise une étude permettant de préciser le contexte morphologique (par exemple grâce aux bases de données de profils en long de rivière de l'IGN, <http://geodesie.ign.fr>), géologique et hydrologique, ainsi qu'un recueil des études hydrauliques et hydrologiques existantes. Les ouvrages ou singularités morphologiques pouvant affecter le contrôle hydraulique à haut débit sont identifiés.

#### II.2.2. Phase 2 : Visite de reconnaissance sur site.

Antea Group et FIT-ESIC se rendent sur chaque station et définissent ensemble la localisation précise des profils topographiques à réaliser pour le modèle hydraulique. FIT-ESIC détermine l'emplacement d'un point dur (clou topographique) permettant le repositionnement de l'échelle limnimétrique à l'identique en cas d'arrachement de celle-ci. Les prestataires choisissent les moyens de mesures topographiques adaptés au site, assurant des mesures en toute sécurité. Antea Group définit la gamme de valeurs du coefficient de rugosité a priori, selon la morphologie des lits majeurs et mineurs, et la gamme de valeurs des coefficients de seuil le cas échéant. Antea définit, selon les observations du milieu naturel, le type de contrôles hydrauliques potentiellement actifs selon les gammes de débits (seuil ou chenal). Tous les éléments ayant un impact potentiel sur les écoulements, essentiellement à haut débit (comme les ouvrages, les singularités morphologiques, etc), sont identifiés et noté comme sections à relever. Antea définit la hauteur jusqu'à la quelle les profils topographiques doivent remonter en berge (selon les débits cible et la courbe de tarage fournie), et identifie les zones débordant en écoulement en lit majeur. Enfin, selon la pente et les caractéristiques de la station, particulièrement les conditions aval telles que des confluences ou des contrôles particuliers (barrages), Antea définit la longueur du tronçon à modéliser.

Un rapport détaillant le recueil de données (phase 1) et proposant la position des profils topographiques et du point dur est remis à EDF-DTG. La suite de la prestation n'est engagée que sur validation de ce rapport par EDF-DTG.

#### II.2.3. Phase 3 : Réalisation des relevés topographiques.

Selon les prescriptions établies dans le rapport précédemment cité, FIT-ESIC réalise la mise en place du point dur topographique et les relevés des sections. FIT-ESIC réalise également un levé des échelles limnimétriques si celles-ci sont constituées de plusieurs éléments, afin de vérifier le positionnement relatif des différents éléments. Cette phase est la plus risquée de la prestation. Afin de garantir la sécurité des intervenants, la procédure suivante est mise en place :

- Établissement d'un Plan de Prévention (PdP) sur chaque site par EDF-DTG, signé par les prestataires. L'analyse de risque de ce PdP est alimentée par le cahier station et la connaissance des sites par EDF-DTG et par les constatations réalisées par les prestataires lors des visites de reconnaissance.
- En cas de risque de variation de débit dû à un ouvrage hydroélectrique en amont, établissement de document (type Convention d'Informations Réciproques Relative) garantissant la sécurité par l'exploitant hydroélectrique.
- La semaine précédant les mesures, validation de l'intervention par EDF-DTG en fonction des prévisions hydrométéorologiques et de toute autre information d'intérêt.

II.2.4. Phase 4 : Modélisation hydraulique.

Antea Group réalise un modèle hydraulique 1D du site, sur une gamme de débit allant jusqu’au débit centennal Q100 (calculé par EDF-DTG). Le choix du modèle 1D est justifié par le fait que :

- Les stations hydrométriques de EDF-DTG sont, dans leur grande majorité, installées dans des tronçons d’écoulement simples, où le modèle 1D suffit ;
- Le modèle est utilisé jusqu’au débit centennal ou jusqu’au débordement en écoulement complexe (écoulement urbain par exemple ou dépassement des digues)
- Le modèle 1D reste suffisamment simple pour être critiqué par les hydromètres de EDF-DTG.

Le modèle hydraulique Mascaret est utilisé [Besnard et Goutal, 2011] en régime permanent, pour 20 débits équité-partis entre 0 et Q100. Les conditions aux limites du modèle sont analysées et testées. Si un ouvrage hydroélectrique est situé en aval de la station, on regardera l’influence des cotes de retenue possibles du lac sur la hauteur d’eau à l’échelle. Le modèle est calé grâce aux jaugeages de EDF-DTG, tout en s’assurant que les valeurs de coefficient de rugosité ou de débitance de seuil restent dans la gamme évaluée sur site en phase 2.

A l’issue de cette phase, un rapport détaillant les relevés topographiques effectués et les résultats de la modélisation est remis à EDF-DTG pour validation. Au sein d’EDF-DTG, le rapport est relu par le technicien gestionnaire de la station, par l’ingénieur hydrométrie du service opérationnel considéré et par un ingénieur du service d’appui centralisé (service qui assure également le pilotage du projet). Des corrections ou précisions peuvent être demandées aux prestataires, jusqu’à validation finale.

II.3. Planning et budget

Le projet CT’Extra consiste en la réalisation en masse d’un grand nombre de sites (170) sur un temps court (3 ans). Le planning global est le suivant :

- Réalisation de 40 sites en année 1. Le nombre restreint de sites a permis à Antea Group et à FIT-ESIC d’ajuster et d’optimiser leurs prestations.
- Réalisation de 70 sites en année 2.
- Réalisation de 60 sites en année 3, ce planning allégé la dernière année permettant de prendre en compte les retards possibles sur l’année 2.



III. RÉSULTATS

III.1. Rendus

Pour chaque station, les rendus sont les suivants :

- Rapport de phases 1 et 2 et rapports de phases 3 et 4 ;
- Données topographiques :
  - Semis de points relevés en coordonnées Lambert 93, en altitude NGF, et en altitude relative au 0 de l’échelle limnimétrique ;
  - Points projetés sur les sections en travers en coordonnées Lambert 93, en altitude NGF, et en altitude relative au 0 de l’échelle limnimétrique ;
  - Fichier KMZ (type Google Earth) des points relevés.
  - Fichier type AutoCAD des ouvrages (seuils, ponts, etc.) et profils en travers relevés.
  - Tableau de relevé des éléments d’échelle limnimétrique avec les décalages constatés.
- Modélisation hydraulique :
  - Fichier de modèle 1D Mascaret calé sur les jaugeages.
  - 20 couples débit / hauteur à l’échelle modélisée pour une gamme de débit de 0 à Q100.

III.2. Exemple : Le Cernon à Saint Georges de Luzençon

Les apports possibles des relevés topographiques et de la modélisation hydraulique sont illustrés par la station DTG de Saint Georges de Luzençon.

III.2.1. Description de la station

La station de Saint Georges de Luzençon se situe sur le Cernon dans le département de l’Aveyron, dans la commune de Saint-Georges-de-Luzençon, 2,2 km en amont de la confluence, en rive droite, avec le Tarn (Figure 1). Son bassin versant a une superficie de 201 km².

La station est située en amont direct d’un pont routier, dans une zone de faible pente (5/1000). L’écoulement est contraint entre des digues verticales. L’échelle limnimétrique est constituée de deux éléments : un premier élément monté sur un pieu dans le lit mineur de la rivière, un second sur la digue rive gauche, comme illustré en Figure 2.

A bas débit, l’écoulement est contrôlé par les dépôts de sables et galets sous le pont, visibles en Figure 2. La station est située dans une zone où des crues particulièrement violentes, de type cévenoles, peuvent se produire. EDF DTG



Figure 1 : Localisation de la station DTG de Saint Georges de Luzençon



Figure 2 : Échelles limnimétrique à la station

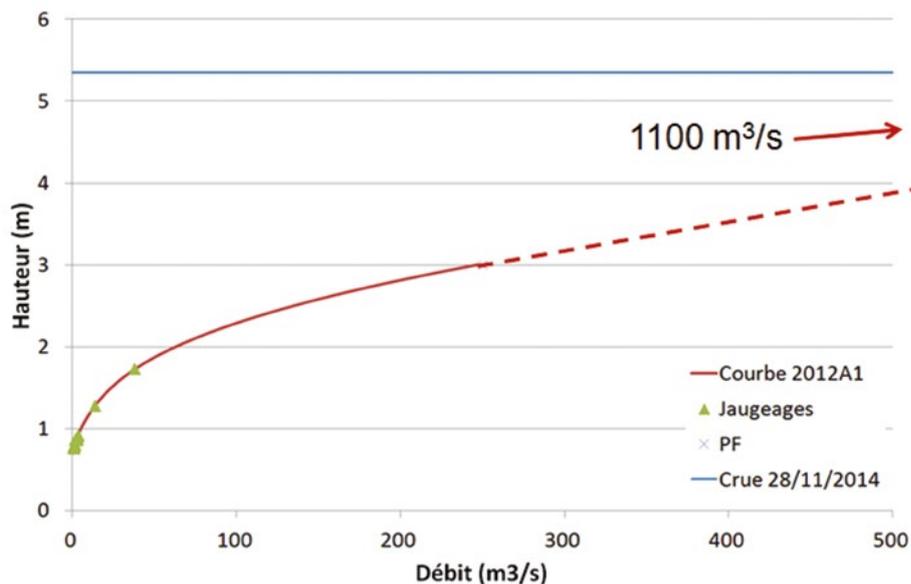


Figure 3 : Courbe de tarage en vigueur au moment de la crue du 28/11/2014.

exploite cette station depuis 2003. La courbe de tarage en vigueur avant la modélisation est illustrée en Figure 3, avec les jaugeages dont le plus important atteint une hauteur de 1.73 m pour un débit de  $37.6 \text{ m}^3/\text{s}$ . La courbe était extrapolée jusqu'à une hauteur de 3m, selon une régression linéaire en logarithme du débit et de la hauteur ( $h-h_0$ ), représenté par le Point Fictif (PF) sur la Figure 3.

### III.2.2. La crue du 28/11/2014

Le 28/11/2014, un épisode pluvieux intense touche le bassin du Cernon. La station DTG de Saint Georges de Luzeçon enregistre une hauteur maximale de 5,35m, soit plus de 2m au-dessus de l'extrapolation de la courbe de tarage. En extrapolant la courbe avec un ajustement puissance simple, un débit de  $1100 \text{ m}^3/\text{s}$  environ est calculé (Figure 3) pour la pointe de crue, soit plus de  $5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$  de débit spécifique, valeur beaucoup trop élevée pour ce type de bassin. Le gestionnaire de la station se pose des questions : le pont est-il passé en charge ? Y'a-t-il eu une influence aval de la confluence avec le Tarn ?

### III.2.3. Relevés topographiques et modélisation hydraulique

L'analyse de la station de Saint Georges de Luzeçon dans le cadre du projet CT'Extra a été réalisée en 2015. La visite de terrain a montré qu'il était intéressant de relever 5 sections caractéristiques, comme illustré en Figure 4 :

- Le profil P1, à 78 m en amont de la station,
- Le pont POH2, situé en aval immédiat de la station, ainsi que le profil au droit de l'échelle limnimétrique,
- Les éléments de l'échelle limnimétrique,
- Le profil P3, à une distance de 141 m en aval de la station,
- Une passerelle POH4, à 218 m en aval de la station,
- Un seuil POH5, à 804 m en aval de la station.
- Chaque ouvrage (POH2, POH4 et POH5) est encadré par deux profils.

Les relevés de l'échelle n'ont montré aucun décalage.

La condition aval a été placée à la confluence avec le Tarn, 1.5km environ en aval de POH5. La condition aval a été choisie pour représenter le niveau possible du Tarn lors d'une crue centennale. Ce niveau a été estimé à 10m au dessus du niveau d'eau en régime normal, par analogie avec la station hydrométrique

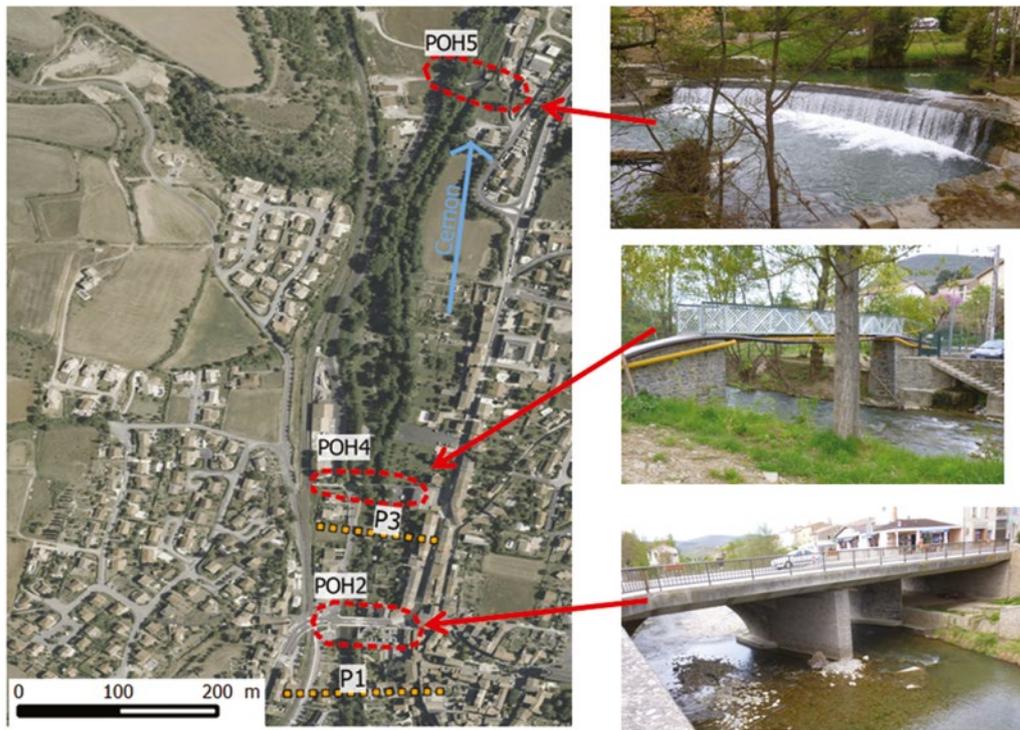


Figure 4 : Localisation des sections relevées

EDF-DTG de Millau, située à 12 km en amont de la confluence avec le Cernon. On a donc une condition aval fixe à 345 mNGF.

La modélisation est effectuée en régime permanent, pour 20 débits équirépartis jusqu'à un Q100 de 375 m<sup>3</sup>/s. Le calage donne un coefficient de débitance du seuil POH5 de 0.42 (conforme à la littérature), et des coefficients de Strickler de 25 et 15 pour le lit mineur et le lit majeur respectivement (valeurs conformes aux observations de terrain).

### III.2.4. Courbe de tarage modélisée.

Le modèle hydraulique montre que :

- Sur toute la gamme modélisée, le seuil POH5 est dénoyé, assurant une déconnexion hydraulique avec le Tarn.

- Le pont en aval direct des échelles n'est pas mis en charge sur la gamme modélisée.
- La passerelle POH4 est mise en charge à partir d'un débit de 350 m<sup>3</sup>/s, ayant un impact sur les hauteurs d'eau à la station.
- Un débordement en lit majeur en rive droite est constaté à partir de 260 m<sup>3</sup>/s.

La courbe de tarage modélisée, comparée à la courbe en vigueur au moment de la crue du 28/11/2014 est illustrée en Figure 5. Le débit de pointe de la crue du 28/11/2014 est estimé, avec la courbe modélisée, à 335 m<sup>3</sup>/s. Par une analyse en volume sur le barrage de Pinet en aval sur le Tarn, ce débit a été confirmé.

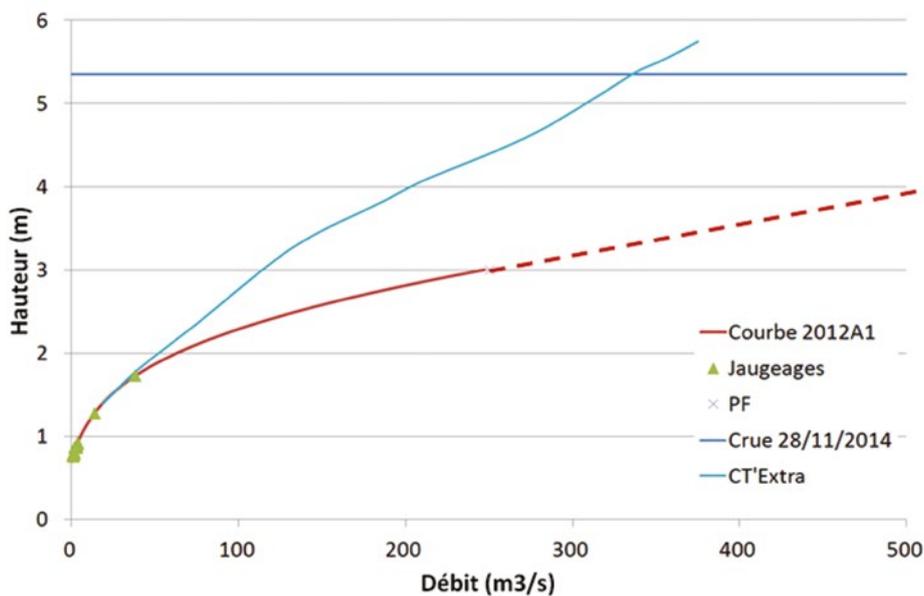


Figure 5 : courbe de tarage modélisée

#### IV. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le projet CT'Extra, consistant en des relevés topographiques et en une modélisation hydraulique 1D de 170 stations hydrométrique de EDF-DTG est en cours. Débuté en 2015, ce projet se terminera en 2018. Les trois années de projet comprennent la réalisation des prestations par les bureaux d'ingénierie et la validation par EDF-DTG. Les résultats peuvent être valorisés ainsi :

- Identification de décalage d'éléments d'échelles limnimétrique, donnant lieu à des travaux de repositionnement.
- Mise à jour de la localisation précise des échelles limnimétriques, donnant lieu à la mise à jour du système d'information géographique et du calcul de la surface des bassins versants drainés par les stations.
- Connaissance du  $h_0$ , permettant de fixer cette valeur dans le tracé des courbes de tarage et donc de diminuer l'incertitude à bas débit.
- Utilisation des courbes de tarage modélisées pour les hauts débits pour le tracé des courbes de tarage opérationnelles, permettant de diminuer l'erreur et l'incertitude à haut débit.
- Plus globalement, l'analyse en modélisation hydraulique permet de prendre du recul sur le fonctionnement hydraulique des stations hydrométriques, et de comprendre des éléments essentiels comme la modification des contrôles hydrauliques selon les gammes de débits.

Vu le nombre important de stations impliquées dans le projet, la valorisation décrite ci-dessus n'est pas réalisée systématiquement après la réception des résultats de modélisation. Les éléments de précision des courbes de tarage sont utilisés pour les retracés de courbe suite à des détarages. Les éléments géographiques (mise à jour du SIG et des surfaces de bassin versant) seront valorisés en masse sur l'année 2018, en fin de projet CT'Extra.

Les parties hautes de courbe de tarage sont relativement peu affectées par les modifications de section, et il est donc possible d'utiliser les travaux de modélisation pour recalculer les chroniques historiques avec un tronçon haut débit modélisé figé. Cette hypothèse est valide hors crue morphogène importante. Ce travail de réanalyse peut avoir un impact sur les études hydrologiques, particulièrement celles

ayant pour objectif les débits extrêmes, telles les études SCHADEX [Belleville et al., 2017]. On peut en tirer un dimensionnement plus juste des ouvrages.

Il faut bien entendu rester critique sur les résultats de modélisation hydraulique : ceux-ci sont imparfaits, ils représentent un état hydraulique au moment des relevés topographiques, et sont sensibles aux jaugeages de calage. Ils nécessitent d'être critiqués par les gestionnaires des stations ayant une vision terrain, et pouvant apporter des éléments essentiels sur des hypothèses du modèle à partir de leur expérience vécue de crues passées (participation en débit des lits majeurs, mise en charge constatée d'ouvrages, etc.). Néanmoins, nous pensons que l'approche par modélisation permet de prendre en compte des informations essentielles, négligées dans les approches d'extrapolations classiquement utilisées à EDF-DTG.

#### V. RÉFÉRENCES

- BELLEVILLE, A., GARAVAGLIA, F., SEVREZ, D., MARY, V., TILLOY, A. (2017) – Réanalyse des chroniques patrimoniales de débit – Évaluation de l'impact et valorisation.. *colloque SHF Hydrométrie 2017, 14-15 mars 2017, Villeurbanne*.
- BESNARD, A. ET GOUTAL, N. (2011) – Comparaison de modèles 1D à casiers et 2D pour la modélisation hydraulique d'une plaine d'inondation – Cas de la Garonne entre Tonneins et La Réole. *La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau*, **3**, 42-47.
- FORRAY, N., AUER, J. C., BROCHOT, J. F., ERAUD, Y., FAVRIAU, A., GHIO, M., LALLEMENT, C., LANG, M., ODIER, M., AND SCHERER, C. (1998) – *Charte qualité de l'hydrométrie. Code de bonnes pratiques*.
- LANG, M., PERRET, C. RENOUF, E., SAUQUET, E. ET PAQUIER, A. (2006) – Incertitudes sur les débits de crue.. *La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau*, **6**, 33-41.
- PAQUET, E., AUBERT, Y., ARNAUD, P., ROYET, P., FINE, J-A. (2014) – Prédétermination des crues et cotes de projet par les méthodes SHYPRE et SCHADEX - Application à un aménagement fictif sur le Tech.. *La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau*, **5**, 65-72.
- PERRET, C., ET AL. (2017) – *Charte qualité de l'hydrométrie. Guide de bonnes pratiques. Ministère de l'Environnement*, 98 p.