



HAL
open science

HYDROM A1 : Analyse exploratoire des stations hydrométriques susceptibles d'être concernées par un effet d'hystérésis sur la courbe de tarage

E. Perret, M. Lang, Jérôme Le Coz, Benjamin Renard

► **To cite this version:**

E. Perret, M. Lang, Jérôme Le Coz, Benjamin Renard. HYDROM A1 : Analyse exploratoire des stations hydrométriques susceptibles d'être concernées par un effet d'hystérésis sur la courbe de tarage. [Rapport de recherche] irstea. 2018, pp.27. hal-02608481

HAL Id: hal-02608481

<https://hal.inrae.fr/hal-02608481>

Submitted on 16 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Action 2 – Prévision des inondations

HYDROM A1 : Analyse exploratoire des stations hydrométriques susceptibles d'être concernées par un effet d'hystérésis sur la courbe de tarage

DECEMBRE 2018

Emeline PERRET
Michel LANG
Jérôme LE COZ
Benjamin Renard

Irstea, centre de Lyon-Villeurbanne
Unité de recherche RiverLy
5 rue de la Doua
69616 VILLEURBANNE

www.irstea.fr



Contenu

Introduction.....	3
1. Hystérésis en écoulement transitoire	4
1.1 Courbes de tarage avec prise en compte de l'hystérésis	4
1.2 Formule de Jones.....	5
1.2.1 Expression.....	5
1.2.2 Cas d'un chenal large rectangulaire	6
1.2.3 Analyse des ordres de grandeurs	6
2. Le Diagnostic.....	7
2.1 Procédure automatisée d'estimation du risque.....	7
2.1.1 Extraction de la pente.....	7
2.1.2 Evaluation du gradient.....	8
2.1.3 Récapitulatif.....	11
2.2 Cartographie du risque	12
3. Vérification du diagnostic.....	15
3.1 Vérification des informations générales de la station : pente, rugosité et contrôle.....	15
3.1.1 Vérification de la pente à l'aide de profils en long IGN.....	15
3.1.2 Vérification à l'aide des gestionnaires des stations.....	16
3.2 Vérification à l'échelle d'une station.....	17
3.2.1 Méthode	17
3.2.2 Etude de cas particuliers.....	18
4. Conclusions et Perspectives	25
Références.....	27

Introduction

Le phénomène d'hystérésis

Dans ce rapport, nous nous intéressons au phénomène d'hystérésis qui se produit suite à la propagation d'un écoulement transitoire. Dans ce cas, la célérité de l'onde de pression (correspondant au niveau d'eau) devient inférieure à celle de l'onde de vitesse, et donc inférieure à celle de l'onde de débit (voir Figure 0.1). Si une station hydrométrique est soumise à cet effet d'hystérésis, sa relation entre le débit Q et la hauteur d'eau h peut être affectée en cas de crue, c'est-à-dire devenir non-univoque et prendre une forme de boucle. Pour une même hauteur d'eau, le débit sera plus fort lors de la montée de crue que lors de la décrue. Le maximum de débit Q_{max} sera atteint avant le maximum de hauteur d'eau h_{max} . Lorsque l'effet d'hystérésis est présent, les modèles classiques reliant la hauteur d'eau au débit ne sont plus adaptés et des modèles plus complexes doivent être envisagés (ex : modèle hauteur-gradient-débit).

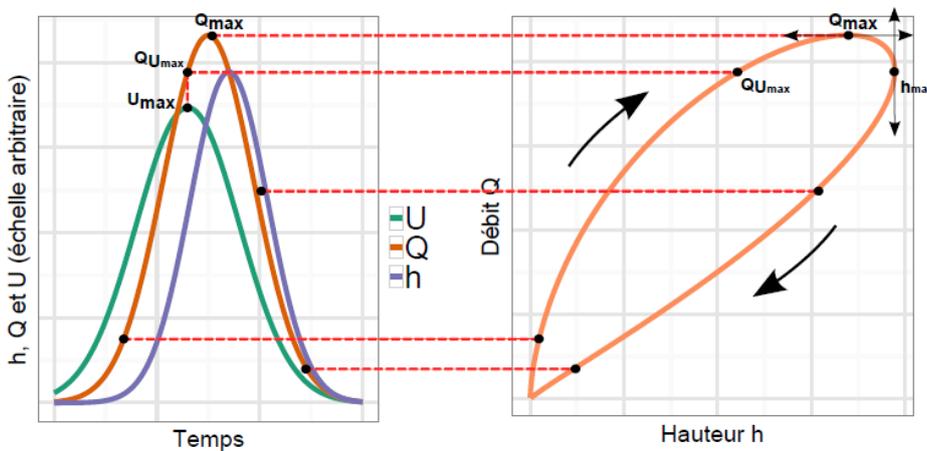


Figure 0.1 – Représentation graphique du phénomène d'hystérésis due à un écoulement transitoire (figure tirée de la thèse de Mansanarez (2016)).

En pratique, l'effet d'hystérésis est souvent ignoré car peu observé lors de l'analyse des données post-crue. En effet, la stratégie de jaugeages adoptée en crue ne permet pas de constater de boucle dans la relation $h-Q$. Les jaugeages sont principalement effectués lors de la décrue (après le pic) pour des raisons de sécurité et la dynamique de montée de crue est souvent non-renseignée. La courbe de tarage est alors établie sur la base des jaugeages de la décrue, ce qui peut entraîner une sous-estimation des débits lors de la montée de crue. L'évolution des techniques de jaugeages vers des méthodes non-intrusives et donc moins dangereuses pour l'hydromètre (radars, vidéos) permettra sans doute de pallier ce manque d'information dans les prochaines années.

Des exemples de cas d'études sur des stations étrangères ont montré l'importance de prendre conscience de cet effet d'hystérésis (Mansanarez, 2016). Le considérer comme négligeable peut engendrer une mauvaise prédiction des crues (retard dans l'estimation du pic de débit et sous-estimation du débit de pointe). Il est donc essentiel d'évaluer si ce risque existe sur nos stations françaises et ainsi mieux évaluer l'aléa inondation.

Objectifs et déroulement de l'étude

Ce travail a pour but de recenser les stations potentiellement impactées par le phénomène d'hystérésis sur l'ensemble des stations hydrométriques présentes dans la banque Hydro : on parlera d'un diagnostic des stations à risque. L'idée est d'évaluer à quel point le risque est important en utilisant la formule de Jones (1915). Cette dernière sera détaillée dans la suite.

Une procédure automatisée permettant de calculer pour chaque station l'erreur relative commise en négligeant l'hystérésis sera proposée. Ce calcul utilisera majoritairement des données extraites de la banque hydro. L'ensemble de ces erreurs seront cartographiées à l'échelle de la France. Des phases de vérification et d'amélioration du diagnostic préliminaire seront ensuite effectuées avant de passer à une phase d'approfondissement qui sera détaillée dans les perspectives de ce rapport. Le bien-fondé du diagnostic sera discuté avec les UHs concernées par les stations détectées à risque. Ces dernières pourront être étudiées de manière individuelle et de façon plus complète si les jaugeages et données le permettent. En cas de manque de jaugeages, il faudra probablement envisager de mettre en place des suivis et des campagnes de terrain sur les zones détectées à risque pour aboutir à un diagnostic final.

1. Hystérésis en écoulement transitoire

1.1 Courbes de tarage avec prise en compte de l'hystérésis

En règle générale, la formule de Manning-Strickler (modèle classique) est utilisée pour évaluer les courbes de tarage en contrôle chenal en faisant l'hypothèse d'un régime permanent uniforme ($S_0 \approx S_f$) :

$$Q = K_s A R_h^{2/3} \sqrt{S_f} \approx K_s A R_h^{2/3} \sqrt{S_0} \quad 1.1$$

avec K_s [$m^{1/3} \cdot s^{-1}$] : le coefficient de Strickler (qui informe sur la rugosité du chenal) ; A [m^2] : la section mouillée ; R_h [m] : le rayon hydraulique ; S_f : la pente d'énergie et S_0 : la pente du chenal.

Cette hypothèse n'est plus valable lorsque l'on s'intéresse à des écoulements en régime non-permanent et non-uniforme. À chaque instant, le tirant d'eau et le débit vont varier. Il est alors nécessaire de revenir aux équations de Barré de Saint-Venant pour exprimer S_f . Ces équations pour un écoulement à surface libre unidirectionnel non-permanent et non-uniforme s'expriment comme suit :

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad 1.2$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gA(S_0 - S_f) \quad 1.3$$

avec g [$m \cdot s^{-2}$] : la gravité.

$\partial Q / \partial t$ réfère à la raideur de l'hydrogramme et est souvent négligé dans les études de propagation de crue mais considéré pour des études de types rupture de barrage.

En détaillant les termes de l'équation dynamique (équation 1.3) :

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial t} (AU) = A \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial A}{\partial t} = A \frac{\partial U}{\partial t} - U \frac{\partial Q}{\partial x} \\ &= A \frac{\partial U}{\partial t} - U \frac{\partial}{\partial x} (AU) = A \frac{\partial U}{\partial t} - U \frac{\partial}{\partial x} (AU) \\ &= A \frac{\partial U}{\partial t} - AU \frac{\partial U}{\partial x} - U^2 \frac{\partial A}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) &= 2U \frac{\partial Q}{\partial x} - U^2 \frac{\partial A}{\partial x} = 2AU \frac{\partial U}{\partial x} + U^2 \frac{\partial A}{\partial x} \end{aligned}$$

il est possible d'exprimer la pente d'énergie comme suit :

$$S_f = S_0 - \frac{1}{g} \left(\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} \right) - \frac{\partial h}{\partial x} \quad 1.4$$

avec U [m. s⁻¹] : la vitesse moyenne de l'écoulement.

Dans le cas de la propagation de crues dans des chenaux à fortes pentes et lorsque que les champs d'inondation sont peu larges, l'onde de crue est supposée cinématique. Elle ne s'atténue pas. La variation du débit est suffisamment faible pour considérer l'écoulement comme une succession d'états où l'écoulement est permanent uniforme (Degoutte). La pente de la ligne d'eau peut être assimilée à la pente du chenal.

Dans le cas de la propagation de crues dans des chenaux à faibles pentes, il est possible de faire l'hypothèse de l'onde diffusive, c'est-à-dire de négliger les termes d'inertie dans l'équation dynamique au profit du terme de pression et de la pente du chenal. L'onde de crue s'atténue alors au cours de sa propagation.

Pour prendre en compte le cas de l'onde diffusive, nous retiendrons le modèle non-univoque suivant pour évaluer les courbes de tarage en écoulement transitoire :

$$Q = K_s A R_h^{2/3} \sqrt{S_0 - \frac{\partial h}{\partial x}} \quad 1.5$$

Cette équation peut être réécrite de la manière suivante :

$$Q = Q_0 \sqrt{1 - \frac{1}{S_0} \frac{\partial h}{\partial x}} \quad 1.6$$

Le débit réel peut donc s'exprimer comme le débit en régime permanent uniforme ($Q_0 = K_s A R_h^{2/3} S_0$) multiplié par un terme correctif prenant en compte l'aspect transitoire.

1.2 Formule de Jones

1.2.1 Expression

La formule de Jones n'est autre qu'une approximation de l'équation 1.6 qui permet d'éviter l'estimation du gradient longitudinal de hauteur ($\partial h / \partial x$). En effet, ce paramètre est peu mesuré en règle générale sauf dans le cas où deux stations sont voisines l'une de l'autre. Dans ce cas, on mesure directement la pente de la ligne d'eau qu'on assimile à la pente d'énergie. Le gradient temporel ($\partial h / \partial t$) est quant à lui plus simple à obtenir puisque directement tiré de la mesure en continu de la hauteur d'eau au niveau de la station. L'analyse de l'équation de continuité (équation 1.2) permet de mettre en avant le lien existant entre ces deux gradients :

$$\begin{aligned} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial A}{\partial Q} \frac{\partial Q}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial A}{\partial Q} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial x} &= 0 \\ \frac{1}{\frac{\partial Q}{\partial A}} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial h}{\partial x} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial h}{\partial t} \end{aligned} \quad 1.7$$

avec c [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] : la célérité de l'onde cinématique de crue (sans atténuation). Par définition, c s'exprime de la façon suivante :

$$c = \frac{\partial Q}{\partial A} = \frac{\partial x}{\partial t} \quad 1.8$$

Pour des stations voisines, le suivi du front d'onde est possible et par conséquent l'estimation de la célérité de l'onde cinématique l'est également. Ce cas de figure est rare. Le recours à des hypothèses pour le calcul de c est donc indispensable. En supposant le chenal prismatique (c'est-à-dire $\partial A = B\partial h$, avec B [m]: la largeur du chenal) et ses berges verticales sur la plage de variation de h , on obtient alors :

$$c = \frac{\partial Q}{\partial A} \approx \frac{1}{B} \frac{\partial Q_0}{\partial h} \quad 1.9$$

La formule de Jones résulte de la combinaison de l'équation 1.6 avec l'équation 1.7:

$$Q = Q_0 \sqrt{1 + \frac{1}{cS_0} \frac{\partial h}{\partial t}} = \alpha Q_0 \quad 1.10$$

avec α : un coefficient multiplicatif permettant de passer du débit permanent uniforme au débit réel.

D'autres méthodes et formules plus récentes existent pour prendre en compte ce phénomène d'hystérésis (Lee, 2017). L'efficacité de la formule de Jones reste néanmoins indiscutable (Mansanarez, 2016). De plus, elle a l'avantage de faire intervenir des paramètres facilement mesurables ou estimables (S_0 , $\partial h/\partial t$ et c). Elle semble donc appropriée pour réaliser notre diagnostic préliminaire du risque d'hystérésis à l'échelle de l'ensemble des stations de la banque hydro.

1.2.2 Cas d'un chenal large rectangulaire

L'hypothèse d'un contrôle hydraulique de type chenal large rectangulaire est souvent faite en pratique pour établir les courbes de tarage. Lorsque la largeur du chenal est suffisamment grande par rapport à la hauteur d'eau, le rayon hydraulique peut s'exprimer comme suit : $R_h \approx h - h_0$, avec h_0 [m] l'offset du contrôle hydraulique. Dans le cas d'un chenal large rectangulaire, la célérité peut s'exprimer comme suit (équation 1.9) :

$$c = \frac{1}{B} \frac{\partial Q_0}{\partial h} \text{ avec } Q_0 = K_s B (h - h_0)^{5/3} \sqrt{S_0}$$

$$c = \frac{5}{3} K_s \sqrt{S_0} (h - h_0)^{2/3} \quad 1.11$$

La formule de Jones devient :

$$Q = K_s B (h - h_0)^{5/3} \sqrt{S_0} \sqrt{1 + \frac{1}{\frac{5}{3} K_s (h - h_0)^{2/3} S_0^{3/2}} \frac{\partial h}{\partial t}} = \alpha Q_0 \quad 1.12$$

avec le coefficient correcteur α valant :

$$\alpha = \sqrt{1 + \frac{1}{\frac{5}{3} K_s (h - h_0)^{2/3} S_0^{3/2}} \frac{\partial h}{\partial t}} \quad 1.13$$

1.2.3 Analyse des ordres de grandeurs

L'analyse des ordres de grandeurs de l'équation 1.12 permet d'identifier les conditions dans lesquelles nous pouvons rencontrer ce phénomène d'hystérésis (où ? quand ?). L'hystérésis est d'autant plus importante que la

pente du chenal S_0 est faible et que la crue est caractérisée par un fort gradient temporel de hauteur d'eau $\partial h/\partial t$. Une rugosité de fond forte (K_s faible) entraîne aussi, à moindre échelle, une hystérésis plus intense. Par rapport à S_0 et $\partial h/\partial t$, la rugosité joue un rôle moins important car $1/K_s$ varie sur une plus faible gamme. Pour mettre en avant le phénomène d'hystérésis, on s'intéressera particulièrement aux stations à faible pente et soumises à des crues majeures et rapides.

2. Le Diagnostic

Pour chaque station en service de la banque Hydro, le risque d'hystérésis est évalué au moyen du terme multiplicatif α de la formule de Jones. Si ce dernier est significativement supérieur à 1, alors le risque existe. L'erreur relative ϵ commise en négligeant le phénomène d'hystérésis pour le calcul du débit sera également examinée :

$$\epsilon = \frac{Q - Q_0}{Q_0} = \alpha - 1 \quad 2.1$$

Dans la suite, la procédure automatisée pour le calcul des paramètres α et ϵ est présentée. Deux hypothèses principales sont à retenir. Premièrement, le diagnostic est réalisé en supposant qu'en crue, le contrôle hydraulique est un contrôle chenal large rectangulaire pour l'ensemble des stations. En effet, à l'heure actuelle, les types de contrôles hydrauliques par station et selon la gamme de hauteur considérée ne sont référencés dans aucune base de données. L'équation 1.12 est donc retenue pour l'analyse. Deuxièmement, nous nous plaçons dans des conditions favorables et critiques pour observer le phénomène d'hystérésis, à savoir nous faisons l'hypothèse d'un fond du lit rugueux pour l'ensemble des stations étudiées ($K_s = 25$). De la même manière que pour les contrôles, nous n'avons pas accès facilement à la valeur de K_s pour chaque station. Le risque diagnostiqué sous ces hypothèses est ensuite cartographié et analysé.

2.1 Procédure automatisée d'estimation du risque

2.1.1 Extraction de la pente

Le coefficient α dépend principalement de S_0 , la pente du chenal. Malheureusement, la pente moyenne du cours d'eau n'est pas une donnée renseignée dans la banque hydro. C'est pourquoi pour un premier diagnostic, les valeurs des pentes des cours d'eau choisies (et leur intervalle de confiance) ont été extraites du Réseau Hydrographique Théorique français (RHT) développé par l'équipe Dynam à Irstea Lyon-Villeurbanne (Pella, 2012). Pour information, le RHT a été réalisé à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) de la BD Alti au pas 50 m, re-conditionné par le Réseau Hydrographique Etendu (RHE), qui est une simplification du réseau hydrographique de référence de l'IGN (BD Carthage). Les informations relatives au RHT sont disponibles via le lien suivant : [rht](#). Différents attributs environnementaux peuvent être déduits de ce dernier (attributs topographiques, hydrologiques et climatiques). Nous nous limitons ici à la pente des chenaux avec leurs intervalles de confiance. La pente du chenal est approximée par la pente des berges du lit mineur sur un tronçon élémentaire. La Figure 2.1 présente la carte des pentes obtenues pour l'ensemble des stations hydrométriques considérées (soit 2601 stations).

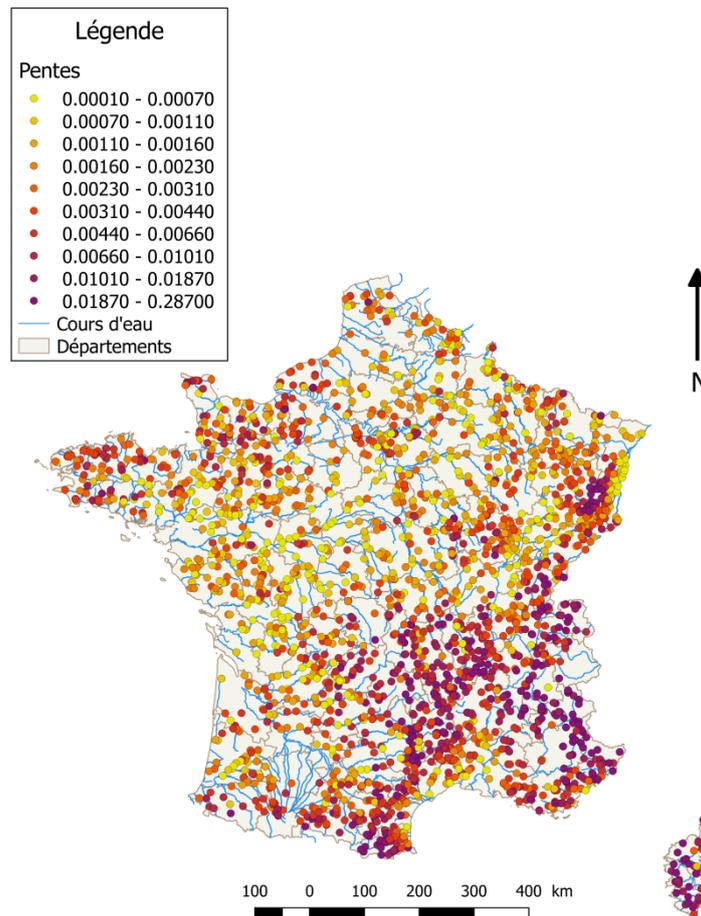


Figure 2.1 - Carte des pentes extraites du réseau hydrographique théorique français.

2.1.2 Evaluation du gradient

Le gradient $\partial h/\partial t$ est le deuxième paramètre clé pour l'estimation du risque et le calcul du paramètre α . Une procédure pour évaluer les gradients les plus significatifs rendant compte du risque d'hystérésis a été mise en place et est basée sur l'analyse des données présentes dans la banque Hydro.

2.1.2.1 Sélection des évènements significatifs pour le diagnostic

La sélection des évènements significatifs pour le diagnostic se fait sur la base de l'analyse des données de la banque hydro. Nous nous concentrons sur l'étude des gradients de montée pour les crues les plus fortes de chaque station, dans la mesure où ce sont ces valeurs qui ont le plus de chance d'être concernées par le phénomène d'hystérésis et de présenter un biais. Ceci étant, une étude complémentaire sur des valeurs moins fortes, mais avec un gradient important, pourrait être utile à titre d'approfondissement du diagnostic.

Pour chaque station, un traitement CRUCAL est effectué à l'aide d'Hydro 2 et les débits maximaux annuels (Q_{max}) sont extraits sur l'ensemble de la chronique de débit disponible. Le Q_{max} annuel est évalué sur la base d'une année hydrologique (supposée la même pour tous les bassins versants) débutant le 1^{er} septembre et finissant le 31 août. Les cinq Q_{max} annuels les plus forts accompagnés de leurs dates sont retenus. Le découpage en année hydrologique peut entraîner la sélection d'un même évènement si une crue se déroule autour du 31 août. Une phase de vérification pour repérer ces éventuels doublons est nécessaire. En définitive, cinq évènements de crue sont donc analysés par stations pour effectuer le diagnostic.

Les limnigrammes $h(t)$ associés aux épisodes de crue retenus sont ensuite extraits de la banque Hydro à l'aide d'une procédure HTEMPS. La durée des limnigrammes est choisie de manière arbitraire, à savoir de 10 jours avant le pic de crue jusqu'à 20 jours après le pic de crue ; soit une durée de 30 jours.

2.1.2.2 Calcul du gradient et modalité de lissage

À partir des limnigrammes retenus, les gradients $\partial h/\partial t$ sont calculés. Des fluctuations sur le limnigramme (bruit de mesure) sont parfois présentes ce qui peut engendrer de fortes valeurs de gradients (ex : Figure 2.2 a et b). Il faut veiller à ne pas les prendre en compte car elles ne sont pas liées à la propagation de la crue. Une phase de lissage est donc nécessaire pour pallier ce bruit et pour se focaliser uniquement sur les gradients relatant la dynamique de montée de crue. Une fois le lissage effectué, la valeur maximale du gradient de l'évènement est retenue. Puis, α et ϵ sont calculés avec les équations **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** et 2.1, respectivement.

Plusieurs méthodes de lissage ont été testées : un lissage directement sur les données brutes de hauteur d'eau avant de calculer $\partial h/\partial t$ (voir Figure 2.2 d et e pour illustration) et des lissages a posteriori du gradient calculé à partir des données brutes (voir Figure 2.2 c). Les lissages sont réalisés sous R et sont de type :

- « Smooth Spline » (ou spline cubique) : lissage à l'aide d'une succession de polynômes de degré 3 où le paramètre de lissage *spar* permet d'ajuster l'intensité du lissage. Divers tests ont été effectués pour évaluer la valeur optimale de ce paramètre (voir Figure 2.3). La valeur de 0.4 semble être un bon compromis pour à la fois évincer les problèmes de bruit et ne pas trop impacter la valeur de $\partial h/\partial t$ lors de la montée de crue.
- « Lowess » (LOcally WEighted Scatterplot Smoother) : méthode de régression non paramétrique reposant sur la méthode des « k plus proches voisins ». L'ajustement se fait localement (en prenant en compte le voisinage du point x_i considéré) et avec pondération (les points les plus proches de x_i ont plus de poids). Le paramètre de lissage *span* permet d'ajuster l'intensité du lissage. Il définit la proportion de points au voisinage de x_i pris en compte lors de l'ajustement. Un *span* de 0.2 a été choisi dans cette étude.
- ou « moyenne glissante d'ordre 3 » : moyenne arithmétique sur 3 points voisins.

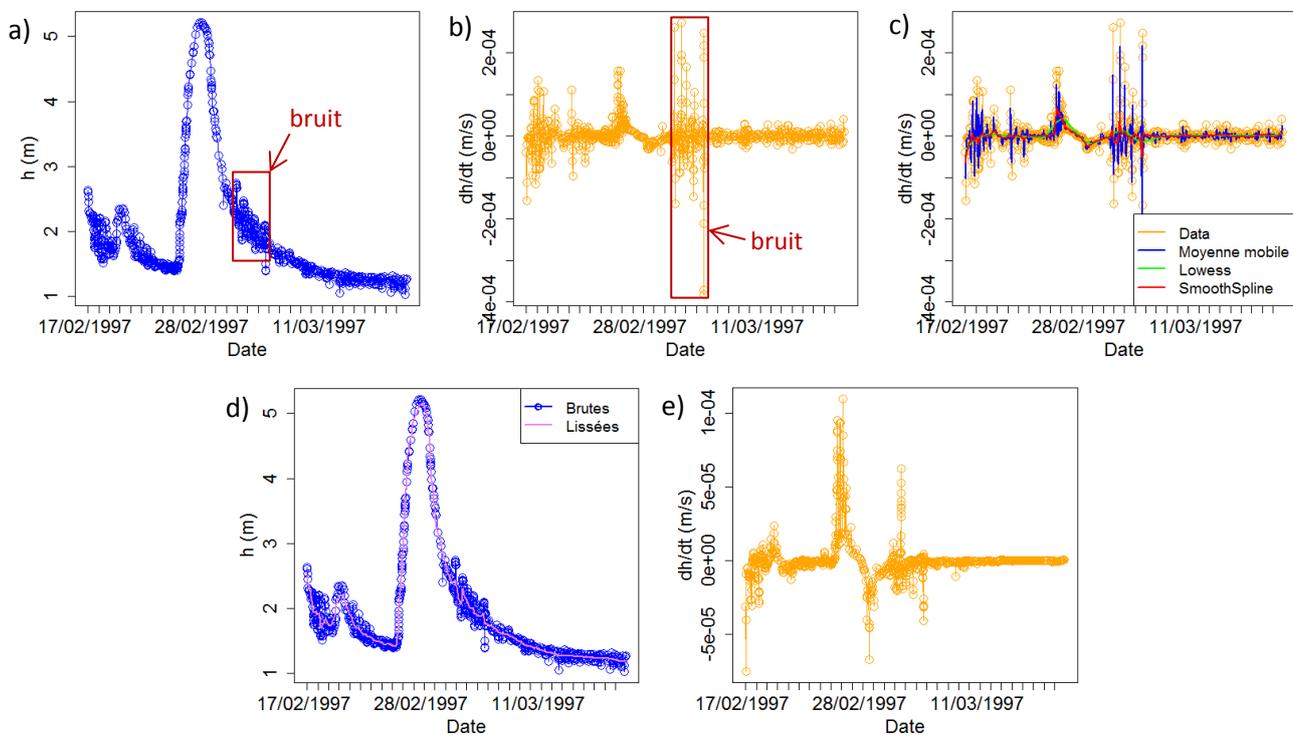


Figure 2.2 - Exemple d'évènement de crue sélectionné par la procédure d'évaluation du risque (code station : A8500610; crue de mars 1997) et illustration des méthodes de lissage. a) limnigramme brut, b) gradient brut, c) gradient brut lissé avec les différentes techniques de lissage (moyenne mobile, lowess et smooth spline), d) limnigramme lissé avec une spline cubique (*spar*=0.4) et e) gradient calculé à partir du limnigramme lissé.

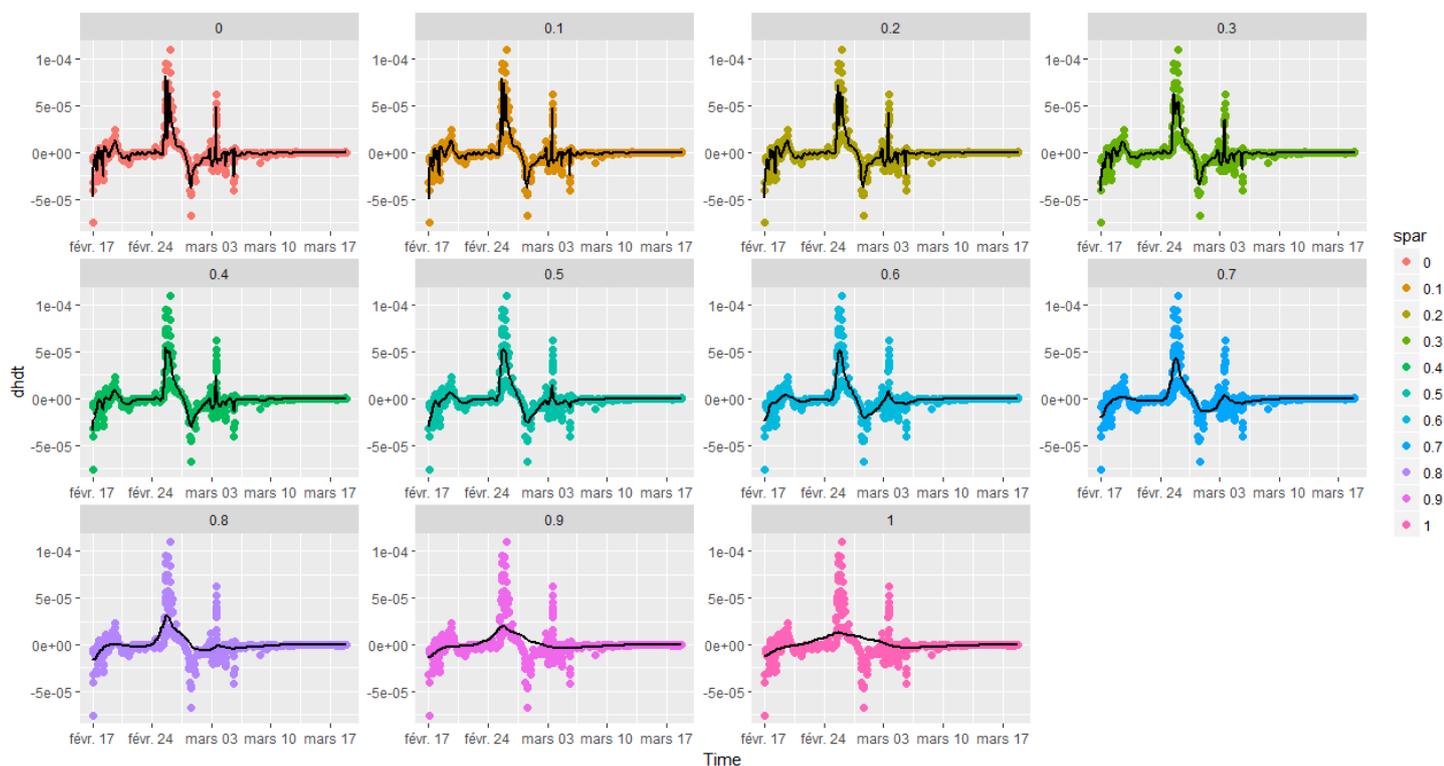


Figure 2.3 - Importance du choix du paramètre de lissage pour le calcul du gradient (méthode smooth spline). Gradient calculé à partir du limnigramme de la crue de mars 1997 sur la station A8500610.

Le résultat final du diagnostic est différent selon la modalité de lissage adoptée. Le Tableau 2.1 montre le nombre de stations recensées comme pouvant être sujettes à des erreurs d'au moins 10% en termes de débit lors de la non prise en compte du phénomène d'hystérésis. Ce nombre varie selon la méthode de lissage choisie. Par exemple, en utilisant le gradient calculé à partir d'un limnigramme lissé, 117 stations sont concernées contre 60 stations en utilisant le gradient calculé avec le limnigramme brut puis lissé avec la technique Lowess.

Tableau 2.1 - Nombre de stations recensées comme étant sujettes à des erreurs d'au moins 10% sur l'estimation de leur débit en négligeant le phénomène d'hystérésis selon les modalités de lissage retenues. Le nombre total de station traitée est de 2601.

1- Opération sur le limnigramme	2 - Opération sur le gradient	3 - Stations où $\epsilon > 10\%$
-	-	168
Lissage « smooth spline »	-	117
-	Lissage « moyenne glissante d'ordre 3 »	126
-	Lissage « smooth spline »	82
-	Lissage « Lowess »	60

La moyenne glissante d'ordre 3 ne sera pas retenue pour le calcul du gradient maximal car ne semble pas être efficace pour évincer les problèmes de bruit (voir Figure 2.2 c). Avec la technique « lowess », le lissage du bruit est satisfaisant mais la valeur du gradient durant la montée de crue est souvent trop atténuée. On ne gardera donc pas cette technique trop filtrante. La technique « smooth spline » semble être moins radicale et plus adaptée.

En revanche, il faut avoir conscience que les problèmes de bruit ne sont pas toujours présents sur les données (voir l'exemple Figure 2.4). Le lissage n'est pas toujours nécessaire, il peut au contraire parfois nous faire passer à côté d'un risque potentiel (faux négatifs). Sur l'exemple de la Figure 2.4, la valeur du gradient maximal passe de $2.5 \cdot 10^{-4}$ m/s sans lissage à $1.2 \cdot 10^{-4}$ m/s avec un lissage « smoothspline » sur le gradient brut ce qui peut impacter fortement la valeur d' ϵ (15.3% sans lissage contre 8.2% avec le lissage). Avec la technique du calcul du gradient à partir d'un limnigramme lissé, le gradient maximal vaut dans ce cas $2.02 \cdot 10^{-4}$ m/s et $\epsilon = 12.6$ %. Cette dernière méthode est donc choisie pour le diagnostic car permet un lissage du bruit lorsque nécessaire (Figure 2.2 e) tout en limitant l'atténuation des gradients lors de la montée de crue lorsque le lissage n'est pas nécessaire.

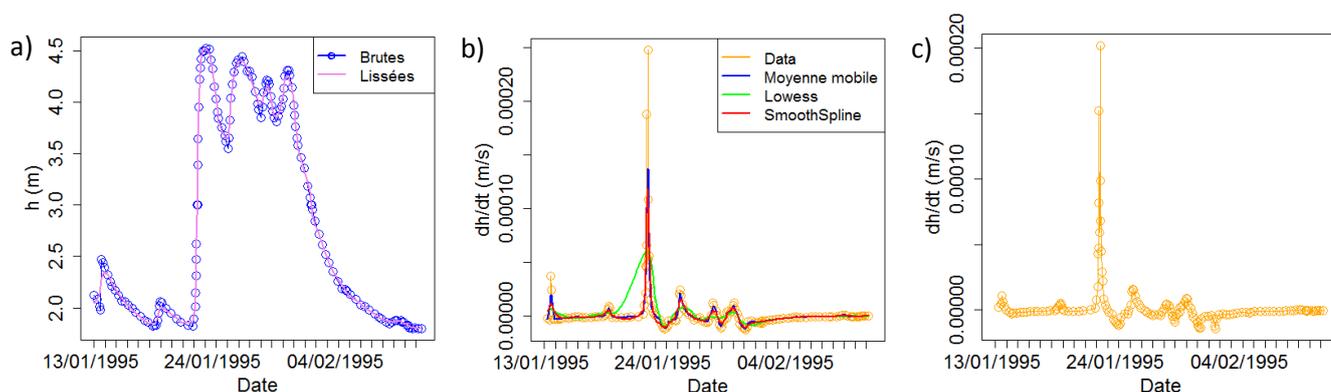


Figure 2.4 – Exemple d'événement de crue, avec mesure de hauteur d'eau non-bruitée, sélectionné par la procédure d'évaluation du risque (code station : A9862010 ; crue de janvier 1995) : a) limnigramme brut et lissé, b) gradient brut et lissé avec les différentes techniques de lissage (moyenne mobile, lowess et smooth spline) et c) gradient calculé à partir du limnigramme lissé.

2.1.3 Récapitulatif

La Figure 2.5 récapitule l'ensemble des étapes nécessaires pour évaluer le risque d'hystérésis. Une fois cette procédure appliquée sur l'ensemble des stations de la banque Hydro, un premier diagnostic est obtenu. Comme vu précédemment (partie 1.2.3), le gradient et la pente du chenal sont les deux paramètres clés pour le calcul de α et ϵ . Les étapes 1 et 6 de la Figure 2.5 sont donc critiques et devront faire l'objet d'une phase de vérification pour s'assurer d'un bon diagnostic. Cette dernière sera détaillée dans la suite.

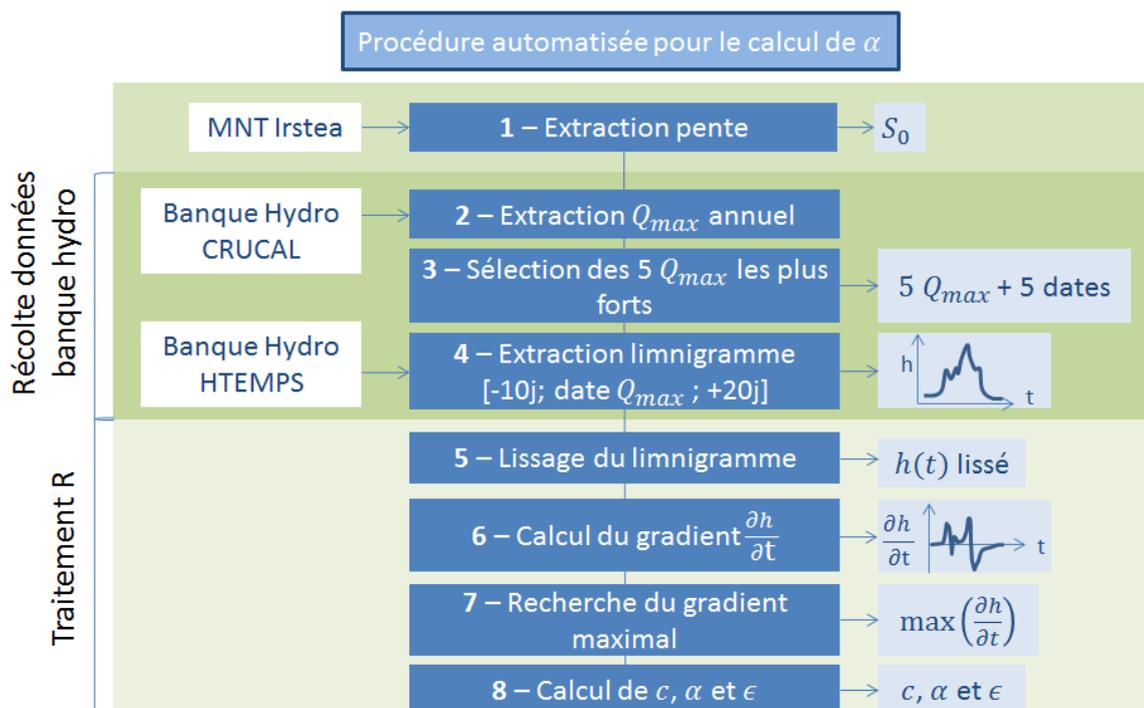


Figure 2.5 – Procédure automatisée pour évaluer le risque d’hystérésis pour chaque station de la banque Hydro.

2.2 Cartographie du risque

Le paramètre ϵ est cartographié dans le but d’avoir un aperçu du risque d’hystérésis sur l’ensemble des stations de la banque Hydro. Les hydromètres pourront alors avoir une carte sur laquelle s’appuyer pour améliorer l’estimation des débits sur leur station. La carte que l’on présente dans cette partie est construite à l’aide du diagnostic préliminaire. Des phases de vérification sont encore attendues afin d’obtenir un diagnostic définitif. On retiendra, pour chaque station, l’événement de crue induisant le maximum d’erreur relative commise si l’on ne prend pas en compte l’hystérésis.

Nous avons fait le choix d’utiliser une approche par classes pour la cartographie. De ce fait, le paramètre ϵ est divisé en trois intervalles reflétant divers degrés de risque : aucun risque d’hystérésis, risque faible et fort risque. L’une des difficultés majeures de cette approche est de définir les bornes de ces classes. Comme le phénomène d’hystérésis est rarement mesuré ni même observé en France, nous n’avons aucune indication pour définir ces limites. Dans un premier temps, le choix des bornes a été fait arbitrairement :

- sans risque : erreur relative ϵ inférieure ou égale à 1%,
- risque faible : $1\% < \epsilon \leq 10\%$
- risque fort : $\epsilon > 10\%$ (lorsque l’erreur relative liée à l’hystérésis devient supérieure à l’incertitude de mesure de la plupart des jaugeages).

Dans un second temps, nous avons défini des classes en utilisant la distribution de l’ensemble des valeurs de l’erreur relative ϵ (Figure 2.6):

- risque très faible (voire inexistant) : erreur relative ϵ inférieure au 90^{ème} centile, $\epsilon_{90\%} = 2.7\%$,
- risque faible : $\epsilon_{90\%} = 2.7\% < \epsilon \leq \epsilon_{95\%} = 5.7\%$
- risque fort : $\epsilon > \epsilon_{95\%} = 5.7\%$.

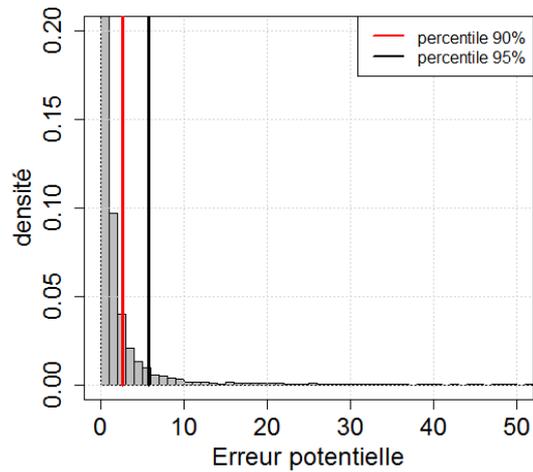


Figure 2.6 – Distribution de l’erreur relative commise en négligeant l’hystérésis.

Pour finir, nous avons choisi d’utiliser plus largement les informations récoltées lors de notre diagnostic. Comme nous avons fait une analyse sur 5 événements de crue par station, il est dommage de se limiter à l’événement le plus critique. Nous avons donc choisi d’analyser le risque, pour chaque station, comme le nombre de fois où ϵ dépasse un certain seuil :

- 0 : pas de risque
- 1-2 : risque faible
- 3-5 : risque fort

Avec cette approche, la question du choix de la valeur du seuil se pose à nouveau. Il est possible de raisonner avec des seuils définis a priori (risque fort d’hystérésis quand $\epsilon > 10\%$) ou à partir des centiles de la distribution (risque quand $\epsilon > \epsilon_{95\%} = 5.7\%$).

La Figure 2.7 montre les cartes obtenues avec les différentes approches de cartographie. La carte issue de la méthode utilisant le nombre de dépassement de ϵ par rapport à seuil est épurée et permet de pointer les stations où le risque d’hystérésis semble le plus fréquent. La tendance de répartition des stations à risque est globalement la même sur toutes les cartes. Seul le degré de sensibilité du risque change. En revanche, elle ne reflète pas ce à quoi on s’attendait au départ : à savoir, un risque d’hystérésis plus prononcé à l’approche des estuaires et sur les grands fleuves/rivières (ex : Saône, Seine). Cela nous amène à questionner le bien-fondé de notre diagnostic. En comparant la Figure 2.1 et la Figure 2.7, on remarque que la carte des pentes est très corrélée à celles du risque. Les stations détectées à risque sont celles à pentes faibles comprises entre 1.10^{-4} et 2.10^{-4} . Les valeurs des pentes que l’on choisit pour le diagnostic conditionnent fortement les résultats. Pour un bon diagnostic, il faut donc veiller à avoir une bonne estimation de la pente. Ceci est en adéquation avec l’analyse des ordres de grandeur faite en partie 1.2.3.

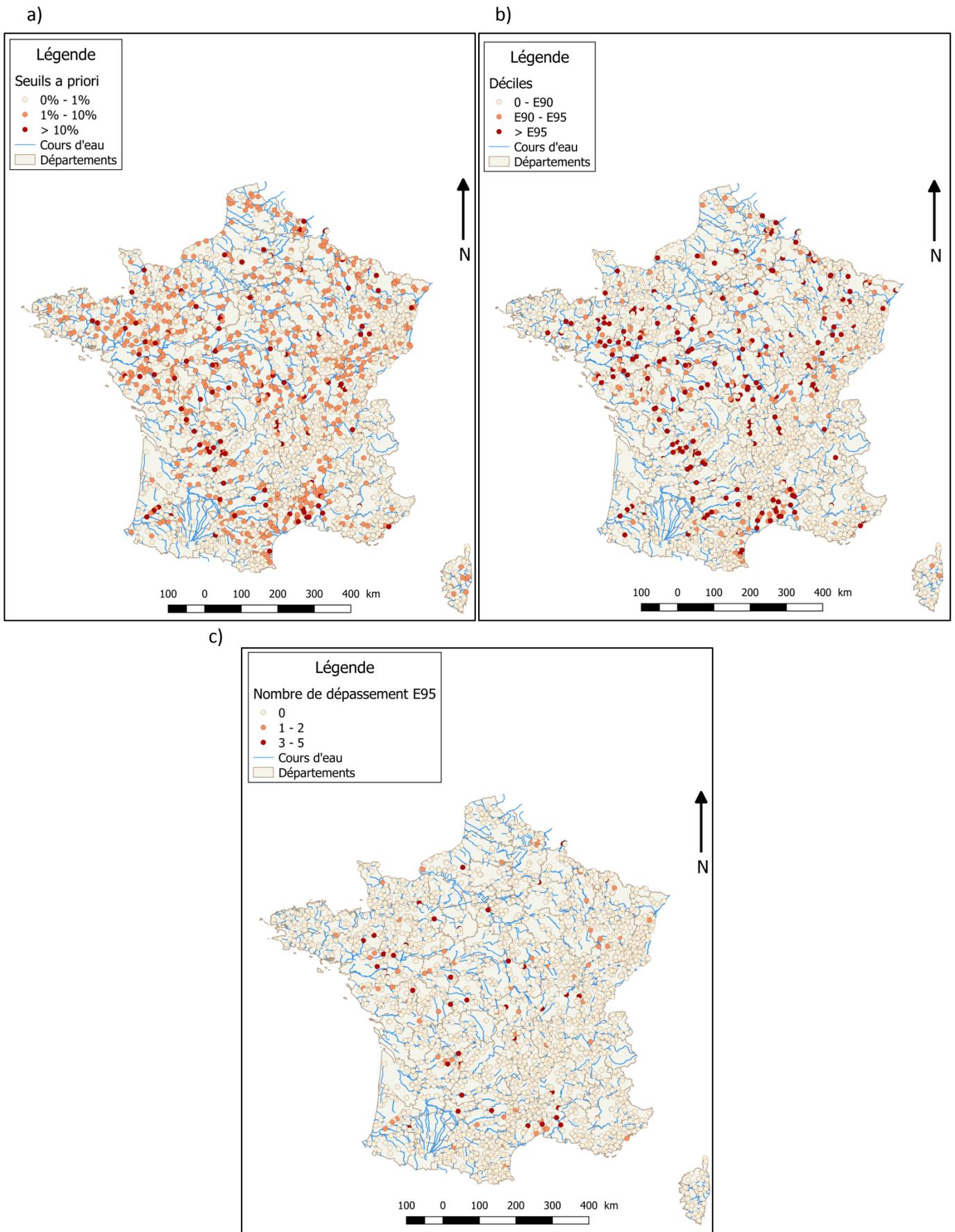


Figure 2.7 – Carte du risque d’hystérésis sur 2601 stations de la banque Hydro. a) seuils des classes définis a priori, b) méthode utilisant la distribution des erreurs relatives pour l’évaluation du risque et c) méthode analysant le nombre de fois où ϵ dépasse le seuil $\epsilon_{95\%}$.

3. Vérification du diagnostic

3.1 Vérification des informations générales de la station : pente, rugosité et contrôle

3.1.1 Vérification de la pente à l'aide de profils en long IGN

Dans la partie précédente, nous avons observé que le résultat du diagnostic dépendait fortement des valeurs de pentes utilisées. Il est donc nécessaire de vérifier leur validité. À première vue, la carte des pentes (Figure 2.1) ne semble pas être en adéquation avec les reliefs de la France ce qui nous paraît douteux. Il est donc nécessaire de procéder à une étape de vérification de ces valeurs. En guise de première vérification, quelques pentes provenant du RHT d'Irstea sont comparées aux pentes issues des profils en long IGN disponibles via le lien suivant : geodesie.ign.fr (Figure 3.1). Ce travail est long et fastidieux, c'est pourquoi nous nous sommes limités à quelques stations. De plus, ces profils n'ont pas été remis à jour depuis 1990 et il est souvent difficile de trouver l'emplacement exact des stations sur ces derniers. La valeur de la pente trouvée doit être analysée avec précaution. Cette comparaison est donc faite de manière indicative pour vérifier si les pentes du RHT Irstea ont un sens.

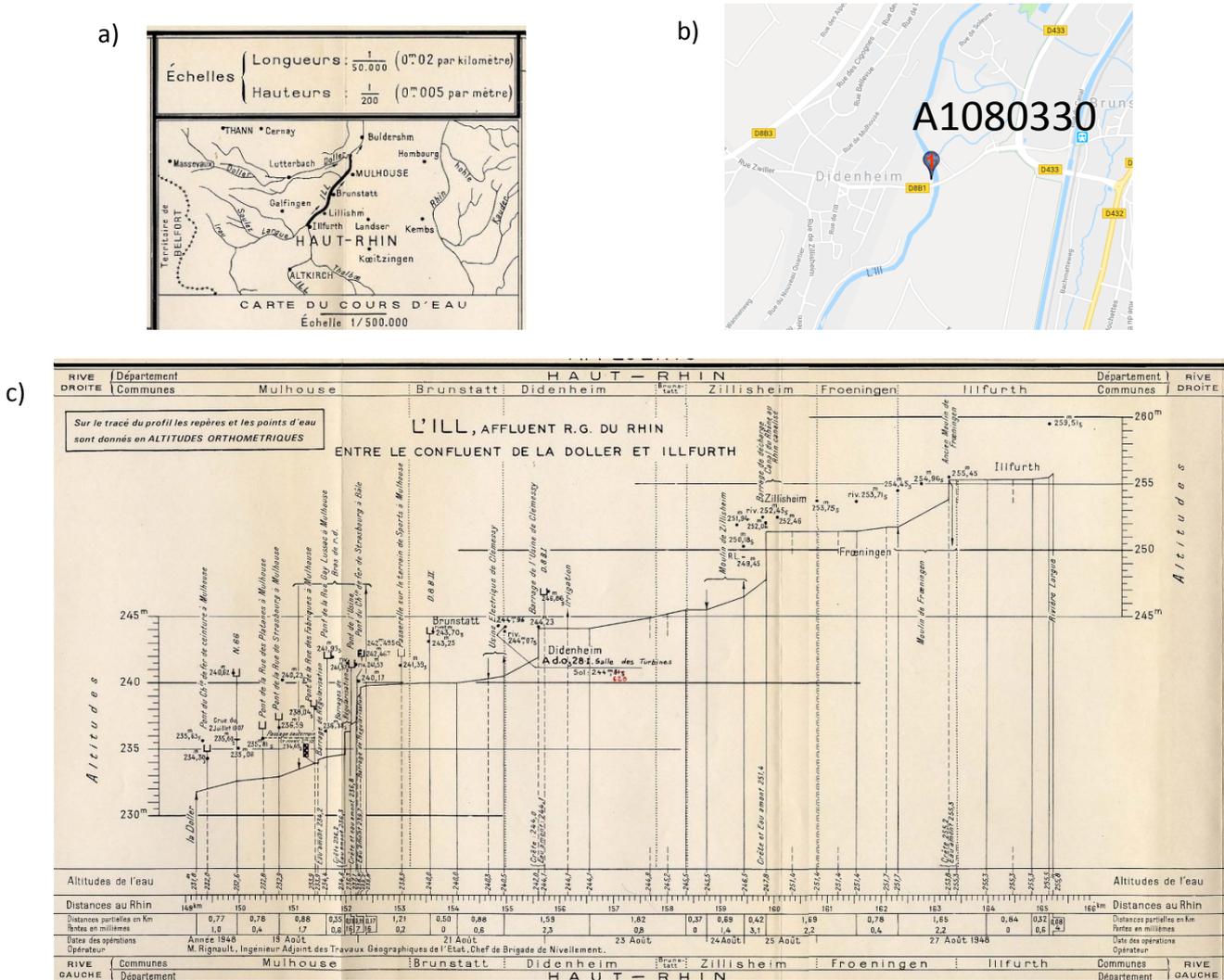


Figure 3.1 – Exemple de profil en long IGN utilisé pour évaluer la pente de la station A1080330 : a) localisation du profil, b) localisation de la station A1080330 et c) Profil en long IGN. La pente du RHT Irstea est de $1.4 \cdot 10^{-3}$ (intervalle de confiance : $[0.2 \cdot 10^{-3} ; 3.8 \cdot 10^{-3}]$) et la pente du profil IGN est de $0.8 \cdot 10^{-3}$.

Globalement, les pentes issues de l'analyse du profil en long IGN sont comprises dans l'intervalle de confiance des pentes extraites à partir du RHT d'Irstea. Ceci est discutable pour les fortes pentes qui sont souvent surestimées pour le RHT. Il est difficile d'obtenir une valeur de S_0 correcte, sachant qu'au cours du temps elle peut varier. Les chroniques de hauteur d'eau utilisée pour le diagnostic peuvent parfois couvrir plusieurs dizaines d'années. Pour une station, S_0 pour un événement n'est peut-être pas le même que pour un autre événement 10 ans plus tard. Ceci est d'autant plus vrai pour les rivières à fortes pentes où le transport sédimentaire peut parfois être très présent. L'idée n'est donc pas forcément d'avoir la valeur exacte de la pente mais d'utiliser une valeur représentative de la dynamique de la station étudiée. Les pentes IGN étant similaires aux pentes extraites du RHT, on peut déduire dans un premier temps que ces dernières sont cohérentes et adaptées pour notre étude. Une vérification plus poussée sera faite dans un deuxième temps auprès des gestionnaires et présentée dans la suite.

3.1.2 Vérification à l'aide des gestionnaires des stations

Pour chaque station détectée à risque, il est important de vérifier si les hypothèses que l'on a faites (contrôle hydraulique = contrôle chenal en crue, rugosité = 25) et les valeurs que l'on a retenues pour la pente sont valables en se référant au gestionnaire de la station. En prenant en compte son expertise, une nouvelle erreur relative « corrigée » commise en négligeant l'hystérésis peut être recalculée : ϵ_{corr} . Cela permet d'écarter des « faux positifs » (c'est-à-dire des stations qui en réalité ne sont pas à risque) et d'obtenir un nouveau diagnostic. À l'aide d'un développement limité de l'équation 1.13,

$$\alpha \approx 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\frac{5}{3} K_s (h - h_0)^{2/3} S_0^{3/2}} \frac{\partial h}{\partial t} \right)$$

il est possible d'exprimer simplement ϵ_{corr} en fonction d' ϵ (provenant du premier diagnostic) et des informations générales de la station (anciennes et nouvelles informations) :

$$\epsilon_{corr} = \frac{K_s}{K_{s,corr}} \left(\frac{S_0}{S_{0,corr}} \right)^{3/2} \epsilon$$

avec $K_{s,corr}$ [$m^{1/3} \cdot s^{-1}$] et $S_{0,corr}$ la nouvelle rugosité et pente du chenal estimée/mesurée par le gestionnaire, respectivement.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
	X	Y	code station	Type de contrôle	Rugosité	Pente	Gradient maximal	Epsilon - diagnostic préliminaire	Risque?	Rugosité corrigée	Pente corrigée	Epsilon corrigé nouveau diagnostic	Risque? nouveau diagnostic
2	990470.795	2297972.35	A0220200	Chenal	25	0.0086	5.93E-05	0.236206478	Non	25	0.0086	0.236206478	Non
3	991482.005	2302425.57	A0220570	Chenal	25	0.0016	7.75E-05	17.55455386	Oui	30	0.0031	5.424328513	Non
4	988842.868	2300367.87	A0220650	Section	25	0.0174	4.03E-05	0.066074097	Non	25	0.0174	NA	NA
5	988763.398	2306155.84	A0230200	Chenal	25	0.0016	3.50E-05	2.266653718	Non				
6	992106.497	2301808.27	A0230201	Chenal	25	0.0016	5.24E-05	1.457818306	Non				
7	997817	2391064.52	A0520031	Chenal	25	7.00E-04	4.57E-06	0.384040216	Non				
8	980767	2288849.65	A1000030	Chenal	25	0.0084	8.94E-05	0.196706545	Non				
9	968395.518	2303362.2	A1050310	Chenal	25	0.0042	9.17E-05	0.210826784	Non				
10	970790.313	2303092.5	A1072010	Chenal	25	0.0053	0.00012041	0.355117	Non				
11	972634.763	2313875.68	A1080330	Chenal	25	0.0014	6.86E-05	0.861499695	Non				
12	966338.127	2284942	A1102010	Chenal	25	0.0105	9.24E-06	0.032306985	Non				
13	958417	2303466.19	A1122010	Chenal	25	0.0043	0.0003621	0.953508958	Non				
14	962340.53	2296049.77	A1122020	Chenal	25	0.0036	0.00013541	0.734902734	Non				

$$\epsilon_{corr} = \frac{K_s S_0^{3/2}}{K_{s,corr} S_{0,corr}^{3/2}} \epsilon$$

Figure 3.2 – Feuille Excel permettant de calculer un diagnostic corrigé avec l'aide de l'expertise de terrain. Les valeurs « corrigées » ne correspondent pas aux valeurs réelles et sont mises ici à titre d'exemples pour illustrer le calcul de la nouvelle erreur corrigée et évaluer le nouveau risque.

Si après correction la station est toujours à risque ($\epsilon_{corr} > \epsilon_{95\%}$ par exemple), alors une étude plus poussée de cette-dernière devra être réalisée. Une feuille Excel est disponible pour évaluer la valeur ϵ corrigée (voir Figure 3.2). Les informations suivantes sont nécessaires au calcul : information sur le contrôle (chenal ou section), $K_{s,corr}$ et $S_{0,corr}$. Il est important de noter que si le contrôle n'est pas de type chenal, la formule de Jones utilisée pour

cette étude n'est plus applicable. Évaluer le risque d'hystérésis avec cette formule n'a donc plus aucun sens, sauf en cas de crue forte où un contrôle via un seuil peut repasser en mode chenal si le seuil est noyé.

Cette approche peut être appliquée également pour détecter les « faux négatifs » : les stations potentiellement à risque qui n'ont pas été repérées lors du diagnostic. Encore une fois, l'expertise des hydromètres est indispensable pour nous informer si, au vu de leurs caractéristiques, certaines stations peuvent être soumises au phénomène d'hystérésis.

À la suite de cette première phase de vérification, qui est actuellement en cours, un nouveau diagnostic « corrigé » sera obtenu.

3.2 Vérification à l'échelle d'une station

Pour chaque station à risque restante, le calcul de l'erreur relative ϵ liée à l'hystérésis est réexaminé en analysant la validité des chroniques de hauteur d'eau choisies ainsi que la cohérence de la méthode de lissage utilisée pour le calcul du gradient. Une fois la fiabilité du calcul assurée et afin de valider le diagnostic final, ces stations sont analysées de manière individuelle.

3.2.1 Méthode

Test de validation à partir de jaugeages disponibles

Pour attester si une station est effectivement à risque, le moyen le plus simple est d'utiliser les jaugeages des événements de crue (s'ils existent) et de vérifier la présence d'une boucle dans la relation hauteur-débit (Figure 0.1). Il faut un minimum de jaugeages pour détecter l'hystérésis. Attention, il faut tout de même avoir à l'esprit que lorsque l'influence de l'hystérésis est faible (ϵ de quelques pourcents) il est souvent difficile de la distinguer de l'incertitude liée aux jaugeages.

Si la boucle est clairement visible, la méthode *BaRatin SGD* (pour « Stage-Gradient-Discharge ») peut alors être utilisée pour estimer la courbe de tarage de l'événement et son incertitude (Mansanarez, 2016). À partir de jaugeages (et leurs incertitudes) et d'a priori sur le contrôle hydraulique de la station, cette méthode permet d'évaluer les paramètres d'une courbe de tarage avec effet d'hystérésis en utilisant une approche statistique de type bayésienne. Le modèle de courbe de tarage implémenté dans l'outil *BaRatin SGD* est celui de Jones (équation 1.12). Deux options sont disponibles :

- 1/ une option où les paramètres suivants sont évalués par l'outil : K_s , h_0 , B , S_0 et M (exposant théorique 5/3 remplacé par un paramètre M à estimer). La célérité de l'onde de crue, c , est dans ce cas calculée à l'aide de ces paramètres et de la même approximation que celle faite dans l'équation 1.11,
- 2/ une autre où c est considérée comme constante et où les paramètres suivants sont donc estimés : le produit $K_s B$, h_0 , M , S_0 et c .

Une quinzaine de jaugeages est nécessaire pour obtenir de bons résultats dont 5 effectués autour des points remarquables de la relation $h-Q$ (Mansanarez, 2016); le reste pouvant être réparti lors de la décrue comme cela est fait généralement. Les cinq points remarquables décrivent 1/le minimum de hauteur d'eau, 2/ le maximum de gradient $\partial h/\partial t$, 3/le maximum de débit, 4/ le maximum de hauteur d'eau et 5/le minimum de gradient $\partial h/\partial t$.

Une fois les paramètres de la courbe de tarage estimés, il est possible de calculer $\alpha_{BaRatinSGD}$ et $\epsilon_{BaRatinSGD}$ et de les comparer à ceux estimés par le diagnostic ($\alpha_{Diagnostic}$ et $\epsilon_{Diagnostic}$). Pour l'ensemble des stations, si le risque évalué par la méthode BaRatin SGD est similaire à celui estimé par le diagnostic alors la méthode de diagnostic développée peut être validée. A l'issue de cette étape de comparaison, le diagnostic final pourra donc

être validé ou non. A l'heure actuelle, nous n'avons pas assez de données pour effectuer cette phase de vérification. Nous avons lancé un appel à données auprès des gestionnaires des stations pour pallier ce manque.

Cas où les jaugeages sont en nombre insuffisant

Si les jaugeages disponibles ne permettent pas de suivre la dynamique induite par le phénomène d'hystérésis lors d'un événement (crue et décrue), alors aucune validation n'est possible à court terme. Dans ce cas, il faudra envisager de mettre en place un suivi sur les stations potentiellement à risque détectées par le diagnostic corrigé et prévoir des campagnes de terrain lors des prochaines crues. La stratégie de jaugeage à adopter devra de préférence suivre celle préconisée par Mansanarez (2016) dans sa thèse.

3.2.2 Etude de cas particuliers

Cas d'une station étrangère : Ebro

La station à Ascó sur l'Ebre en Espagne (Figure 3.3) est utilisée pour illustrer notre méthode de vérification. Cette station est bien documentée et connue pour être fortement affectée par l'effet d'hystérésis. Elle se situe sur une zone à enjeux où de nombreux barrages contrôlent les crues et régulent l'écoulement. Grâce aux chasses de ces barrages, programmées en avance et assimilées à des crues artificielles, des campagnes de jaugeages peuvent être mises en place pour observer l'hystérésis. L'événement de Juin 2012 où de nombreux jaugeages ADCP (25 jaugeages) ont été réalisés est retenu.



Figure 3.3 – Localisation de la station à Ascó sur l'Ebre en Espagne.

Pour effectuer ses prédictions, l'outil BaRatin SGD a besoin d'information a priori sur les distributions des paramètres du modèle. Ces dernières sont récapitulées dans le Tableau 3.1. L'option 1 dans BaRatin SGD est choisie ici pour une meilleure comparaison avec le diagnostic, à savoir le modèle avec une célérité c variable (voir partie 3.2.1). Une incertitude de 10% est attribuée aux mesures ADCP. K_s est estimée a priori grâce aux abaques de Chow (1959) qui préconise un $K_s = 30 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ pour ce genre de chenal (partiellement végétalisé). Une incertitude de $\pm 10 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ lui est affectée. L'analyse du profil en travers de la section montre que l'hypothèse d'un chenal large rectangulaire est cohérente pour cette station ($B = 130 \text{ m} \pm 20 \text{ m}$). Malheureusement, nous n'avons aucune information précise par rapport à la valeur de la pente du chenal ; seulement une estimation plutôt ancienne renseignée dans l'étude de Sanchez (2013) qui, lui-même, qualifie cette-dernière d'incertaine. Une forte incertitude lui est donc associée.

Tableau 3.1 – Récapitulatif des distributions a priori des paramètres à estimer avec *BaRatin SGD*. $N(m_g; \sigma_g)$ correspond à une loi gaussienne de moyenne m_g et d'écart-type σ_g .

Paramètres du modèle	Distribution a priori
K_s ($m^{1/3}s^{-1}$)	$N(30 ; 5)$
h_0 (m)	$N(0 ; 0.5)$
M	$N(1.67 ; 0.025)$
B (m)	$N(130 ; 10)$
S_0	$N(0.001 ; 0.0005)$

La Figure 3.4 montre la courbe de tarage pour l'événement de Juin 2012 construite à partir des paramètres estimés par *BaRatin SGD*. Le modèle reproduit la boucle dessinée par les jaugeages avec une incertitude totale faible. L'erreur relative entre débit jaugé et débit calculé n'excède pas les $\pm 10\%$. L'effet d'hystérésis est donc bien détecté. La courbe jaune correspond à la courbe de tarage utilisée par les gestionnaires avant l'événement. Elle rappelle la nécessité de prendre en compte l'hystérésis et les erreurs qui peuvent être associées à sa non prise en compte.

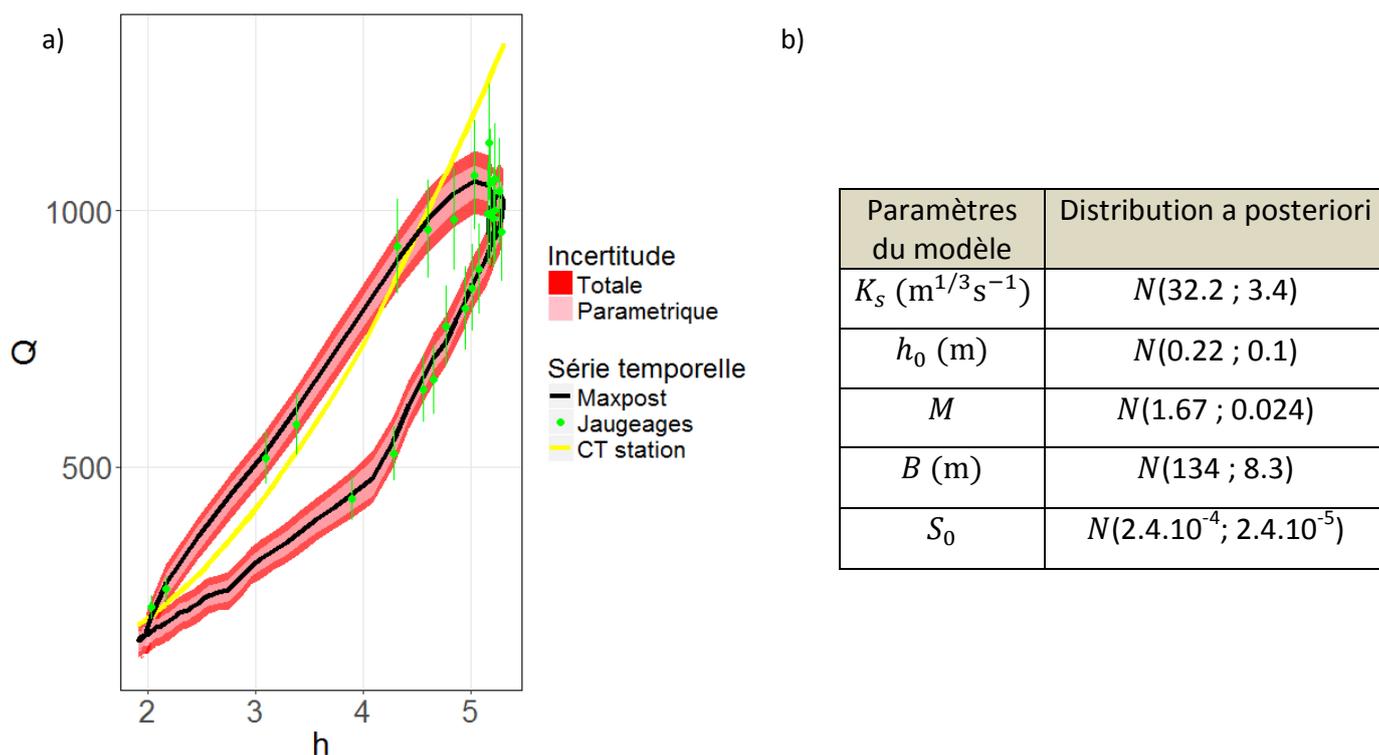


Figure 3.4 – a) Courbe de tarage pour l'événement de Juin 2012 sur la station à Ascó sur l'Ebre en Espagne accompagnée de b) la distribution des paramètres du modèle estimée a posteriori grâce à l'outil *BaRatin SGD*.

Grâce aux paramètres du modèle estimés a posteriori, il est possible de calculer l'erreur relative commise en négligeant le phénomène d'hystérésis :

$$\epsilon_{BaRatinSGD} = 39.6\%$$

Le diagnostic, lui, affiche un $\epsilon_{\text{Diagnostic}}$ de 6.5% en prenant $S_0 = 0.001$ (l'estimation a priori) et $K_s = 25 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ (le cas le plus critique). Cette station est signalée à risque par les deux approches si l'on choisit le critère de risque $\epsilon > \epsilon_{95\%}$. En revanche, le diagnostic n'a pas permis de rendre compte de l'intensité de l'impact de l'hystérésis sur l'estimation des débits. L'écart entre ces deux valeurs est significatif et est dû principalement à la mauvaise estimation de la pente durant le diagnostic (erreur d'au moins un ordre de grandeur). Avec une pente corrigée de $2.4 \cdot 10^{-4}$ (estimation par BaRatin SGD), le diagnostic aurait affiché un risque à hauteur de 47%. Une bonne estimation de la pente est donc essentielle pour un bon diagnostic.

Cas de la station Isère Campus

La station hydrométrique du Campus de Grenoble (opérée par ENSE3 et EDF), qui n'est pas dans la Banque Hydro, a été identifiée comme potentielle candidate au phénomène d'hystérésis ; notamment lors de la crue de mai 2015. Au droit de la station, la pente du chenal est faible : $S_0 = 6 \cdot 10^{-4}$. Durant cette crue, la hauteur d'eau augmentait jusqu'à 5 mm/min (voir Figure 3.5 b). Le diagnostic nous indique un risque d'hystérésis de 3.1 % sur cet événement. Compte tenu, des critères utilisées en partie 2.2, cette station n'est pas considérée à risque (faible risque d'hystérésis). Des événements de crue plus rapides auraient néanmoins pu engendrer une erreur plus forte.

Malheureusement, un seul jaugeage a été effectué durant la crue. Aucune vérification du diagnostic théorique en utilisant l'outil *BaRatin SGD* ne peut donc être faite. Même si l'incertitude liée au jaugeage en crue est certainement plus forte que 3.1%, l'erreur liée à l'hystérésis peut être significative si l'on regarde à l'échelle de l'ensemble de la courbe de tarage : l'incertitude de la courbe de tarage varie entre 3 et 17% selon l'étude de Kiang (2018). Des campagnes de mesure doivent être envisagées pour réévaluer le risque d'hystérésis sur cette station.

Outre l'aspect « évaluation du risque », cette étude nous a permis de vérifier l'approximation faite pour le calcul de la célérité de l'onde de crue : $c \approx \partial Q_0 / (B \partial h)$. Grâce à la station EDF du Cheylas située à environ 32km en amont de la station Isère Campus, nous sommes capables de calculer la vitesse du front d'onde de la crue en comparant les deux hydrogrammes. La crue a parcourue environ 32km en 4h, soit une célérité de 2.2 m/s. La célérité calculée par l'équation 1.11 est quant à elle de 2.35 m/s. Notre approximation est donc cohérente et acceptable.

La Figure 3.7 présente la relation h-Q durant la crue. Une boucle est clairement identifiée. Pourtant le diagnostic n'informe pas d'une quelconque hystérésis durant cet événement de décembre 2012 : $\epsilon = 0.23\%$ (avec $S_0 = 0.0019$, selon l'extraction du RHT Irstea et $K_s = 25$). BaRatin SGD a donc été utilisé pour essayer d'expliquer cette contradiction.

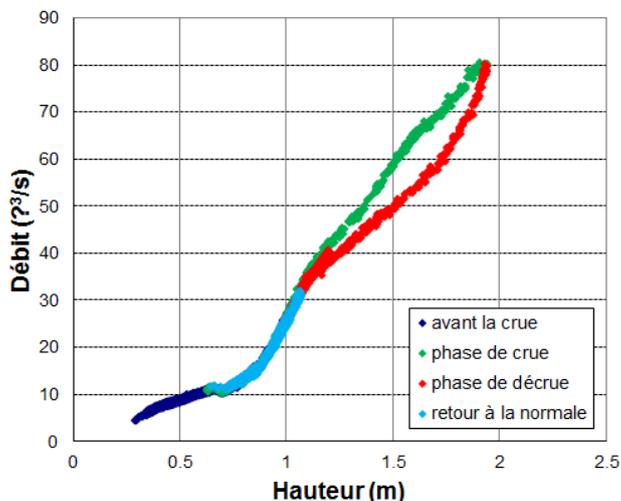


Figure 3.7 – Relation hauteur-débit durant la crue de décembre 2012 (01/12/2012 au 31/12/2012). Le débit présenté ici déduit de la mesure en continue des vitesses par ultrasons. Le passage de cette mesure sur une corde horizontale à la vitesse moyenne sur la section n'ayant pas été documenté pour ce rapport, le débit résultant est exprimé en unité arbitraire [m^3/s].

La Figure 3.8 présente la courbe de tarage estimée avec BaRatin SGD et le Tableau 3.2 montre les distributions a priori et a posteriori des paramètres du modèle. La courbe de tarage est en forme de boucle, en revanche sa forme et son intensité n'approchent pas celles dessinées par les jaugeages. De plus, les paramètres finaux du modèle estimés grâce à BaRatin SGD semblent irréalistes et incohérents par rapport à l'expertise terrain. Il semblerait que le modèle tend à approcher les jaugeages au détriment de la cohérence des paramètres du modèle. Si l'on impose des paramètres beaucoup plus réalistes dans l'outil, la boucle n'est plus représentée. Une relation univoque est alors obtenue. Pour conclure définitivement, il faudrait raisonner sur les débits reconstitués à la station avec la relation vitesse ultrasons/vitesse moyenne calée à partir des jaugeages.

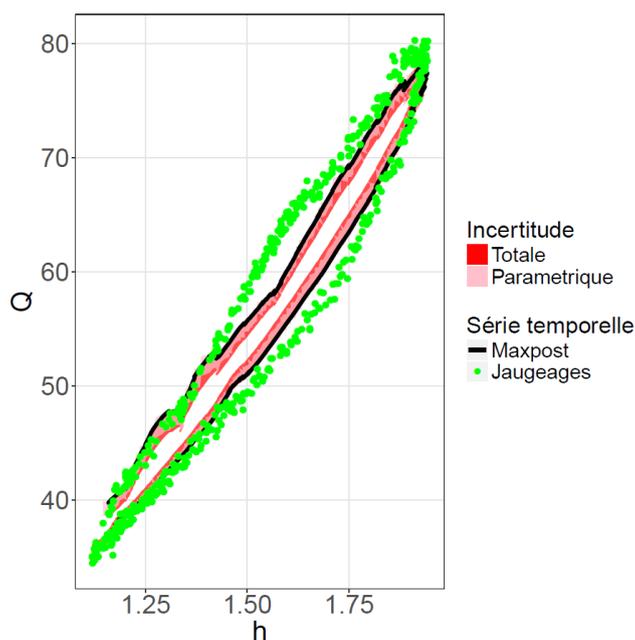


Figure 3.8 - Courbe de tarage obtenue après utilisation de BaRatin SGD.

Tableau 3.2 – Distributions a priori et a posteriori des paramètres du modèle estimé avec l’outil BaRatin SGD

Paramètres du modèle	Distribution a priori	Distribution a posteriori
$K_s (m^{1/3} s^{-1})$	$N(30 ; 5)$	$N(40 ; 2.2)$
$h_0 (m)$	$N(0 ; 0.3)$	$N(-0.42 ; 0.032)$
M	$N(1.67 ; 0.025)$	$N(1.8 ; 0.025)$
$B (m)$	$N(20 ; 5)$	$N(38.7 ; 1.3)$
S_0	$N(0.002 ; 0.0005)$	$N(1.2.10^{-4} ; 1.7.10^{-5})$

Ces résultats montrent que, dans ce cas, l’hystérésis que l’on observe n’est peut-être pas une hystérésis au sens de Jones, c’est-à-dire due à la propagation d’une onde de crue. En effet, il est important de rappeler qu’il existe différents types d’hystérésis (Wolfs, 2014). Ici, la boucle reflèterait plutôt la présence d’une influence aval (à la confluence). Cette influence n’est pas prise en compte dans la formule de Jones, qui est capable de retranscrire uniquement l’hystérésis induite par un écoulement transitoire. Dans ce sens, notre diagnostic théorique est donc juste puisque nous nous limitons dans notre étude à ce type d’hystérésis. La carte issue du diagnostic n’affichera pas les stations soumises à une influence aval comme étant à risque si celles-ci ne sont pas, en plus, soumises à des effets transitoires.

Cas de la station sur la Seine au pont de Mantes

Grâce aux archives de la crue de la Seine de 1910, une station candidate au phénomène d’hystérésis a été détectée : la station à Mantes-la-Jolie (Pont de Mantes, voir Figure 3.9). Ce site fut fortement jaugé lors des événements de 1910. Il est situé en aval de la confluence Seine/Oise et en amont de la confluence Seine/Epte. Les caractéristiques du site et les mesures effectuées lors de cet événement sont répertoriés dans des rapports d’époque, disponibles à cette adresse : [Lien archives](#) (ex : rapport de Mr Willemin).



Figure 3.9 - Localisation de la station à Mantes la Jolie sur la Seine

L’événement de 1910 se décompose en 3 phases (voir Figure 3.10 a) que l’on nommera crue 1 (maximum au 31 janvier), crue 2 (maximum au 15 février) et crue 3 (maximum au 4 mars). Un total de 46 jaugeages est disponible dont 17 associés à la première crue qui fut la plus significative ($Q_{max} = 3257 m^3 \cdot s^{-1}$). En analysant visuellement les jaugeages (Figure 3.10 b), on remarque que l’hystérésis est bien détectée pour la crue 1, mais est moins visible pour la crue 2 et 3. Nous limiterons donc l’analyse à la première crue. Au niveau de la station, la géométrie est assez complexe (voir Figure 3.9) : une île sépare la rivière en deux bras. D’après les documents des archives, lorsque la hauteur d’eau atteint 5.26 m, le débordement survient. On suppose donc pour $h > 5.26 m$ que le

contrôle hydraulique est de type chenal large rectangulaire. Selon une estimation via google map, la largeur de ce chenal (deux bras + îles) est d'environ 380 m.

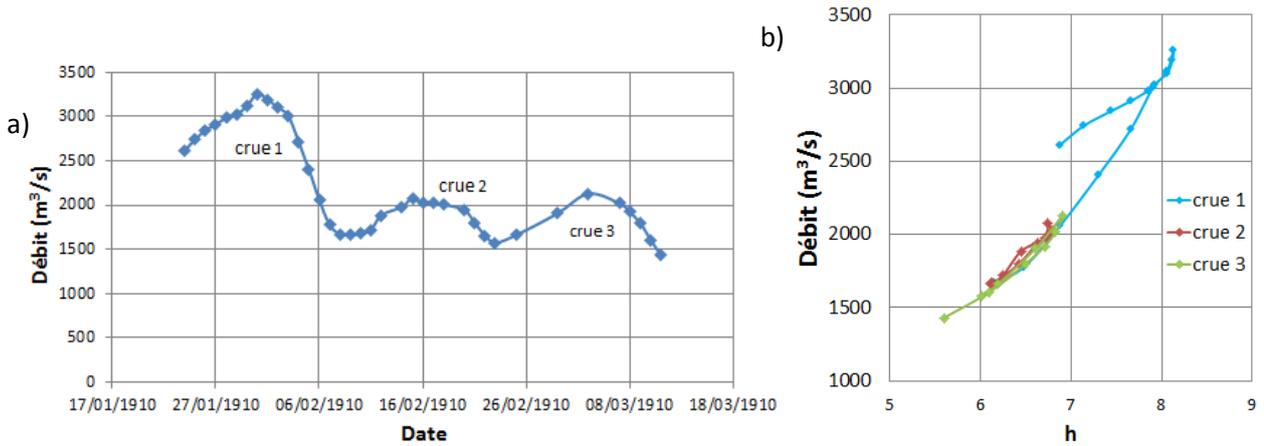


Figure 3.10 – a) Hydrogramme au Pont de Mantes de la crue de 1910 et b) courbes de tarage associées aux divers événements de crues.

Les distributions a priori des paramètres du modèle à estimer avec *BaRatin SGD* sont précises et sont basées sur les informations trouvées dans les rapports de l'époque. Ces dernières accompagnées des distributions a posteriori sont répertoriées dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**. Les deux options de *BaRatin SGD* sont testées : à savoir celle où la célérité de l'onde de crue est supposée constante et est un paramètre à estimer, et celle où c est variable et dépend des paramètres estimés. Une incertitude de 10% est affectée aux jaugeages de l'époque. La Figure 3.11Figure 3.8 présente les courbes de tarage obtenues selon les deux options. Les résultats semblent meilleurs avec l'option avec c constante, ce qui est contradictoire avec les conclusions de la thèse de Mansanarez (2016). Cependant, dans les deux cas, la boucle est bien détectée et les paramètres estimés sont similaires et cohérents.

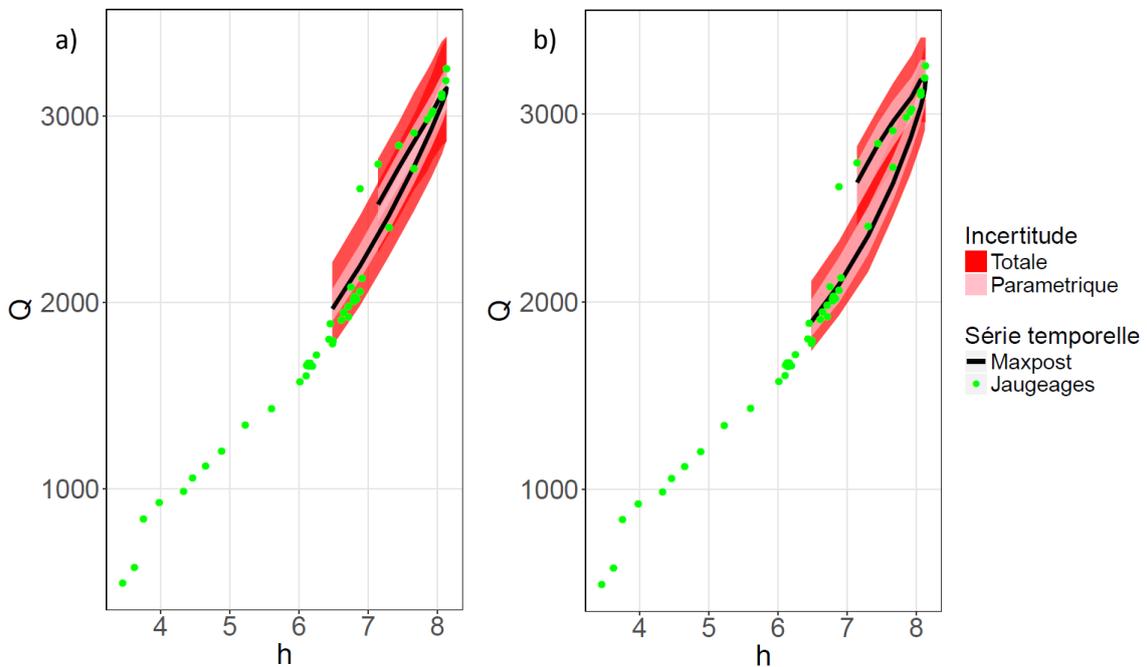


Figure 3.11 - Courbe de tarage obtenue grâce à l'utilisation de *BaRatin SGD* pour l'événement de 1910 à la station sur la Seine au pont de Mantes. a) option où : K_s, h_0, M, B, S_0 sont estimés et c est variable et b) option où $K_s B, h_0, M, S_0, c$ sont estimés (c constante).

Tableau 3.3 - Distributions a priori et a posteriori des paramètres du modèle estimé avec l'outil *BaRatin SGD* pour le cas de la crue de la Seine en 1910 au pont de Mantes : a) option où : K_s , h_0 , M , B , S_0 sont estimés et c est variable et b) option où $K_s B$, h_0 , M , S_0 , c sont estimés (c constante).

a)	Paramètres du modèle	Distribution a priori	Distribution a posteriori
	K_s ($m^{1/3}s^{-1}$)	$N(45 ; 5)$	$N(46 ; 5.3)$
	h_0 (m)	$N(0.8 ; 0.1)$	$N(0.81 ; 0.1)$
	M	$N(1.67 ; 0.025)$	$N(1.67 ; 0.025)$
	B	$N(380 ; 10)$	$N(381 ; 10)$
	S_0	$N(7.10^{-5} ; 4.10^{-5})$	$N(4.4.10^{-5} ; 1.3.10^{-5})$

b)	Paramètres du modèle	Distribution a priori	Distribution a posteriori
	$K_s B$ ($m^{4/3}s^{-1}$)	$N(18000 ; 1500)$	$N(17735 ; 1476)$
	h_0 (m)	$N(0.8 ; 0.1)$	$N(0.82 ; 0.1)$
	M	$N(1.67 ; 0.025)$	$N(1.67 ; 0.025)$
	S_0	$N(7.10^{-5} ; 4.10^{-5})$	$N(4.3.10^{-5} ; 8.6.10^{-6})$
	c	$N(0.8 ; 0.5)$	$N(0.77 ; 0.26)$

L'erreur relative commise en négligeant l'hystérésis est évaluée à 6% en utilisant les paramètres estimés a posteriori avec *BaRatin SGD* contre 2% pour celle déduite du diagnostic ($S_0 = 7.10^{-5}$, $h_0 = 0.8$ m et $K_s = 25$). Cette station est un bon exemple pour montrer les limites de l'utilisation du diagnostic. Ce dernier n'a pas permis de la détecter comme étant à risque. L'erreur relative reste néanmoins faible pour un événement d'une telle intensité. En utilisant d'autres événements, le risque d'hystérésis sur cette station n'aurait sans doute pas été mis en avant. Cet exemple montre une nouvelle fois la nécessité d'analyser les stations individuellement et d'avoir un nombre suffisant de jaugeages pour évaluer le risque de façon plus précise.

4. Conclusions et Perspectives

Une méthode pour diagnostiquer le risque d'hystérésis dû à la propagation d'une onde de crue à l'échelle de l'ensemble des stations de la banque Hydro a été développée. Cette dernière est basée sur la formule de Jones (1915) qui permet de calculer l'erreur relative commise en négligeant le phénomène d'hystérésis (en terme de débit) à l'aide d'informations facilement estimables ou mesurables (pente du chenal, gradient temporel de hauteur d'eau, rugosité du chenal). Elle utilise des données extraites de la banque Hydro ainsi que du Réseau Hydrographique Théorique (RHT) français proposé par l'équipe Dynam d'Irstea Lyon-Villeurbanne. Les résultats du diagnostic affichent une forte sensibilité aux valeurs de pente choisies et à la méthode de lissage du gradient utilisée. Des cartes préliminaires cartographiant le risque d'hystérésis ont été proposées. Elles sont présentées dans ce rapport à titre indicatif. Une procédure de vérification expliquée dans ce document est en cours afin de les rendre plus fiables.

La phase de vérification constitue la principale perspective de ce travail. Elle doit se faire en coordination avec les UHs et les gestionnaires des stations. L'idée est dans un premier temps de récolter des données complémentaires

de type « pente du chenal » et « rugosité » pour chaque station détectée à risque (et idéalement pour l'ensemble des stations) et de proposer un premier « diagnostic corrigé ». Nous recommandons que ce genre de données soient directement renseignées dans la banque hydro puisque très utile pour la plupart des études hydraulique. Dans notre cas, cela nous permettrait d'éviter une étape de correction du diagnostic et d'effectuer les calculs directement sur des données vérifiées. Le nouveau diagnostic sera ensuite amélioré en étudiant de manière individuelle les stations encore détectées à risque avec l'outil *BaRatin SGD*. Pour cela, des données supplémentaires sont nécessaires comme un nombre minimum de jaugeages durant l'événement de crue qui a permis de les diagnostiquer à risque. Si les jaugeages sont disponibles, la validation du risque peut se faire assez rapidement, sinon il faudra envisager de mettre en place des campagnes de mesure afin d'assurer le suivi de ces zones. Une stratégie de jaugeage en crue pourra être proposée pour vérifier l'existence d'hystérésis.

L'émergence des techniques de mesure de débit en continu (ex : mesure de la vitesse par ultrasons et temps de transit) rend plus probable et facile l'observation de l'effet d'hystérésis. Généralement, les stations équipées de ce genre d'appareil sont situées dans des zones à enjeux et où la relation hauteur-débit a été détectée comme étant non-univoque (ex : zones régulées par des ouvrages de navigation). Analyser ces données de débit en continu pourrait permettre d'examiner la cause de la non-univocité et donc vérifier si le risque d'hystérésis dû à la propagation d'onde de crue est présent ou non.

Ce travail de diagnostic a été réalisé en considérant un scénario critique (rugosité forte et étude des cinq événements majeurs qui se sont produits sur la station). Le diagnostic pourrait être également réalisé en utilisant des épisodes de crues à périodes de retour plus faibles. De ce fait, l'impact du phénomène d'hystérésis sur l'estimation des crues de référence pourrait être évalué.

Si des stations présentent un effet d'hystérésis marqué, il sera possible d'exploiter la chronique de débits corrigés, et de réaliser une analyse de la distribution des crues en comparant les estimations de quantiles (crues de période de retour 2, 5, 10, 50 ans) avec et sans prise en compte de l'hystérésis. Cela donnera une idée de l'impact de ce phénomène sur l'estimation de crues de référence.

En résumé, les perspectives de ce travail reposent principalement sur la récolte de données existantes auprès des gestionnaires de station, sur l'acquisition de nouvelles données et sur l'expertise des hydromètres.

Références

- Chow, V.T. (1959). *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill, NewYork.
- Degoutte, G. Aide mémoire d'hydraulique à surface libre.
- Jones, B.E. (1915). A method of correcting river discharge for a changing stage. *US Geological Survey Water Supply*, 375, 117-130.
- Kiang, J.E., Gazoorian, C., McMillan, H., Coxon, G., Le Coz, J., Westerberg, I.K., Belleville, A., Sevrez, D., Sikorska, A.E., Petersen-Øverleir, A., Reitan, T., Freer, T., Renard, B., Mansanarez, V. and Mason, R. (2018). A Comparison of Methods for Streamflow Uncertainty Estimation. *Water Resources Research*, 54(10), 7149-7176. doi: 10.1029/2018WR022708
- Lee, K. and Muste M. (2017). Refinement of the Fread method for improved tracking of stream discharge during unsteady flows. *Journal of Hydraulic Eng.*, 143(6), 06017003.
- Masanarez, V. (2016). *Non-unique stage-discharge relations: Bayesian analysis of complex rating curves and their uncertainties*. (PhD Thesis), Grenoble Alps University.
- Pella, H., Lejot, J., Lamouroux, N., Snelder, T. . (2012). Le réseau hydrographique théorique (RHT) français et ses attributs environnementaux. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 3, 317-336.
- Sanchez, R., Moreno, M.L. and Ferrer, C. (2013). L'influence de l'hystérésis dans le développement des relations niveau-débit. *Houille Blanche - Revue internationale de L'Eau*, 6, 48-52. doi: 10.1051/lhb/2013050
- Wolfs, V. and Willems, P. (2014). Development of discharge-stage curves affected by hysteresis using time varying models, model trees and neural networks. *Environmental Modelling & Software*, 55, 107-119. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.01.021>