



DDT DU TERRITOIRE DE BELFORT

Révision - extension du plan de
prévention du risque inondation
de la Savoureuse

Rapport – Modélisation hydraulique des écoulements de la crue de référence

41090 | Décembre 2019 | MZO/ARQ



setec
hydratec





1, Rue de la Course
67000 STRASBOURG
Email : hydratec.strasbourg@hydra.setec.fr
T : 03 88 75 54 36

Directeur d'affaire : M. Trautmann
Responsable d'affaire : Q. Araud
N°affaire : 41090
Fichier : 41090_RAP_Modelisation_v5.docx

Version	Date	Etabli par	Vérifié par	Nb pages	Observations / Visa
1	17/01/2019	MZO	ARQ	77	1° envoi
2	26/03/2019	MZO	ARQ		Prise en compte des remarques DREAL / CEREEMA / DDT
3	17/06/2019	ARQ	TTT		Prise en compte des remarques du COTECH
4	28/11/2019	MZO	ARQ	95	Prise en compte des remarques des élus
5	17/12/2019	MZO	ARQ	95	

TABLE DES MATIÈRES

1	OBJET DU PRESENT DOCUMENT	8
2	CONSTRUCTION DU MODELE HYDRAULIQUE	9
2.1	Présentation du logiciel	9
2.1.1	L'interface	9
2.1.2	Le moteur de calcul	11
2.1.3	Le module hydraulique	12
2.1.4	Cartographie des zones inondables	24
2.2	Modélisation de la Savoureuse et de ses affluents.....	25
2.3	Hydrologie.....	28
2.4	Conditions limites aval.....	32
2.5	Conditions initiales.....	33
3	CALAGE DU MODELE	34
3.1	Données de calage et repères de crue	34
3.1.1	Données	34
3.1.2	Synthèse des repères de crue	42
3.1.3	Hydrologie aux stations de suivi	50
3.2	Ajustement de la topographie.....	50
3.3	Résultats du calage	54
3.3.1	Crue de calage : février 1990.....	54
3.3.2	Crue de calage : Janvier 2007	70
3.3.3	Test de sensibilité.....	90
3.3.4	Synthèse du calage.....	90
4	CRUE DE REFERENCE	93

ANNEXES

Annexe 1 Cartographie de la zone inondable pour la crue de février 1990

Annexe 2 Cartographie de la zone inondable pour la crue de Janvier 2007

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 2-1 : présentation de l'interface du logiciel	10
Figure 2-2 : Présentation détaillée de l'interface du logiciel	11
Figure 2-3 : Schématisation de la vallée : coupe transversale	13
Figure 2-4 : Schématisation d'un domaine filaire maillé	15
Figure 2-5 : Exemple de restitution des hauteurs d'eau et vitesses d'écoulement, PPRI Gardons aval (DDTM30, 2013)	24
Figure 2-6 : Représentation du linéaire modélisé	26
Figure 2-7 : découpage de la modélisation	27
Figure 2-8 : Hydrogrammes mesurés aux stations hydrométriques lors de la crue de février 1990	28
Figure 2-9 : Hydrogrammes d'apport au modèle retenus pour la crue de février 1990	29
Figure 2-10 : Hydrogrammes mesurées aux stations pour la crue historique de 2007	29
Figure 2-11 : Hydrogrammes d'apport au modèle retenus pour la crue de janvier 2007	30
Figure 2-12 : cartographie des apports intermédiaires	31
Figure 2-13 : profils en long dans l'Allan lors du test de sensibilité réalisé sur l'évènement de 1990	32
Figure 2-14 : conditions aux limites par rapport aux singularités hydrauliques	33
Figure 3-1 : Photos de la crue de février 1990 dans la vallée de la Savoureuse (source : archives départementales)	38
Figure 3-2 : Passerelle des Lettres dans Belfort en février 1990 (source : étude EGIS, Aménagement des berges de la Savoureuse, 2015)	39
Figure 3-3 : vue amont du pont Carnot dans Belfort en février 1990 (source : étude EGIS, Aménagement des berges de la Savoureuse, 2015)	39
Figure 3-4 : Passerelle des Arts dans Belfort, en février 1990 (source : étude EGIS, Aménagement des berges de la Savoureuse, 2015)	40
Figure 3-5 : Vue amont du pont Denfert-Rochereau dans Belfort, en février 1990 (source : étude EGIS, Aménagement des berges de la Savoureuse, 2015)	40
Figure 3-6 : vue amont du pont Richelieu dans Belfort, en février 1990 (source : étude EGIS, Aménagement des berges de la Savoureuse, 2015)	41
Figure 3-7 : MNT au droit du repère de la route de Chaux à Rougegoutte (ROS-ROUG-10)	46
Figure 3-8 : repères de crues recensés sur Vieux Charmont	47
Figure 3-9 : MNT au droit de la rue Brognard	48
Figure 3-10 : vérification des hydrogrammes à Belfort pour la crue de février 1990	55
Figure 3-11 : vérification des hydrogrammes à Vieux Charmont pour la crue de février 1990	55
Figure 3-12 : vérification des hydrogrammes à Chaux, Rosemontoise, crue de février 1990	56
Figure 3-13 : vérification des hydrogrammes à Courcelles les Montbéliard	56
Figure 3-14 : MNT au droit du repère de la route de Chaux à Rougegoutte	61

Figure 3-15 : profil en long de la Savoureuse, février 1990 (amont 1)	62
Figure 3-16 : profil en long de la Savoureuse, février 1990 (amont 2)	63
Figure 3-17 : profil en long de la Savoureuse, février 1990 (intermédiaire)	64
Figure 3-18 : profil en long de la Savoureuse, février 1990 (aval)	65
Figure 3-19 : profil en long du Rhône, février 1990	67
Figure 3-20 : profil en long de la Rosemontoise (amont), février 1990	68
Figure 3-21 : profil en long de la Rosemontoise (aval), février 1990	69
Figure 3-22 : hydrogrammes des apports reconstitués (2007)	70
Figure 3-23 : hydrogrammes d'apport pour la crue de janvier 2007	72
Figure 3-24 : comparaison des hydrogrammes modélisé et mesuré à la station de Giromagny pour la crue de 2007	73
Figure 3-25 : comparaison des hydrogrammes modélisé et mesuré à la station de Belfort pour la crue de 2007	74
Figure 3-26 : comparaison des hydrogrammes modélisé et mesuré à la station de Vieux Charmont pour la crue de 2007	75
Figure 3-27 : comparaison des hydrogrammes modélisé et mesuré à la station de La chapelle sous Chaux pour la crue de 2007	76
Figure 3-28 : comparaison des hydrogrammes modélisé et mesuré à la station de Chaux pour la crue de 2007	77
Figure 3-29 : comparaison des hydrogrammes modélisé et mesuré à la station de Courcelles les Montbéliard en janvier 2007	78
Figure 3-30 : profil en long de la Savoureuse, Janvier 2007 (amont 1)	82
Figure 3-31 : profil en long de la Savoureuse, Janvier 2007 (amont 2)	83
Figure 3-32 : profil en long de la Savoureuse, Janvier 2007 (intermédiaire)	84
Figure 3-33 : profil en long de la Savoureuse, Janvier 2007 (aval)	85
Figure 3-34 : profil en long du Rhône, Janvier 2007	87
Figure 3-35 : profil en long de la Rosemontoise (amont), Janvier 2007	88
Figure 3-36 : profil en long de la Rosemontoise (aval), Janvier 2007	89
Figure 3-37 : résultats du calage amont	91
Figure 3-38 : Résultats du calage aval	92
Tableau 1 : analyse des repères de crue de 1990	44
Tableau 2 : analyse des repères de crue de 2007	49
Tableau 3 : Ajustements topographiques	53
Tableau 4 : résultats du calage aux repères de crue (1990)	59
Tableau 5 : répartition des hydrogrammes pour la crue de 2007	71
Tableau 6 : résultats du calage aux repères de crue (2007)	79
Tableau 7 : valeurs usuelles de Strickler	90

1 OBJET DU PRESENT DOCUMENT

Le présent rapport traite de la modélisation hydraulique des écoulements de la crue de référence.

La modélisation hydraulique concerne les cours d'eau de la Savoureuse, du Rhône et de la Rosemontoise à partir des stations hydrométriques de la DREAL. Suite aux différents échanges, il a été choisi de modéliser un peu plus en amont de ces stations. La Figure 2-6 représente le linéaire total modélisé. Ce linéaire a été étendu pour pouvoir connaître précisément les aléas sur la commune de Lepuix et pour prendre en compte les écoulements sur la Rosemontoise qui ont lieu en amont de la commune de Rougegoutte et qui pourraient influencer les aléas sur cette commune.

La modélisation hydraulique se déroule en trois grandes étapes :

- Construction du modèle hydraulique ;
- Calage du modèle hydraulique sur une crue historique ;
- Modélisation de la crue de référence.

Les hydrogrammes de crue qui seront utilisés sont ceux qui ont été définis lors de l'étude hydrologique.

Afin de représenter au mieux l'état topographique en 1990 et en 2007, les évolutions cartographiques ont été étudiées et font l'objet d'un rapport spécifique. Elles seront intégrées dans le modèle hydraulique lors de la phase de calage.

2 CONSTRUCTION DU MODELE HYDRAULIQUE

2.1 PRESENTATION DU LOGICIEL

Le logiciel utilisé est hydra, développé par Setec hydratec.



2.1.1 L'interface

Hydra est une plateforme de modélisation hydrologique et hydraulique permettant :

- De faire appel dans un même modèle aux fonctionnalités propres aux réseaux d'assainissement, aux systèmes fluviaux et maritimes afin de répondre aux problématiques complexes d'interconnexion des réseaux de collecte des eaux pluviales et des débordements de surface dans la gestion des inondations des grandes métropoles,
- De disposer de fonctionnalités ergonomiques, fluides et intuitives pour la construction et l'exploitation des modèles,
- D'être totalement compatible avec les standards du monde SIG, aussi bien en entrée (construction des modèles) qu'en sortie (exploitation des résultats),
- De s'intégrer dans un environnement logiciel libre afin d'offrir la possibilité aux utilisateurs de développer des applications métier spécifiques autour cette plateforme.

Les périmètres concernés couvrent une gamme géographique très étendue selon les natures des phénomènes modélisés : quelques dizaines de mètres pour les études hydrauliques locales à plusieurs centaines de km² pour les études globales et intégrées de grands systèmes hydrographiques.

Cette plateforme permet de piloter un moteur de calcul robuste et performant, fruit de 30 ans de développements et d'exploitation, capable de traiter l'ensemble des domaines suivants ainsi que leurs interactions :

- Hydrologie : calculs des lames d'eau précipitées temps réel et prévisions pluviométriques par exploitation d'images radars, modélisation des ruissellements de surface et dans les branches amont de réseaux de collecte,
- Modélisation des écoulements et des propagations de crue dans les réseaux d'assainissement, les cours d'eau et les plaines inondables,
- Modélisation des interactions entre les débordements de cours d'eau, les débordements de réseaux d'assainissement et les écoulements de surface dans les zones urbaines,

- Modélisation des échanges nappes-rivière, des remontées de nappe et des conséquences sur les débordements de surface.
- Modélisation des submersions marines, intégrant les effets de marées, de surcotes, de vents et les franchissements d'ouvrages par la houle,
- Modélisation des phénomènes transitoires rapides et leurs conséquences : rupture de barrage, fermeture rapide de vannes dans les canaux et formation d'intumescences, formation de mascarets dans les régions estuariennes ...
- Modélisation courantologique dans les cours d'eau, les estuaires et régions côtières, simulation des impacts de rejets polluants sur la qualité du milieu récepteur : cours d'eau, estuaires, régions côtières,
- Modélisation du transport solide et analyse d'impact des aménagements sur le transport hydro sédimentaire et ses conséquences sur les phénomènes d'incision et d'ensablement dans les cours d'eau.
- Analyse locale fine d'ouvrages hydrauliques tels que : seuils déversant, chenaux de décharge, vannages ...
- Optimisation de gestion des ouvrages et des grands systèmes hydrologiques et hydrauliques.

L'interface se présente sous forme d'un Plugin de `QGIS`, SIG (système d'information géographique) libre, multi plateforme, publié sous licence GPL, dialoguant avec une base de données. Les objets de modélisation sont décrits et stockés dans cette base de données, et affichés dans QGIS sous forme de couches.

QGIS dans ce contexte est utilisé comme pré et post-processeur graphique, l'ensemble de ses fonctions restant accessibles à l'utilisateur.

Des outils spécifiques permettent de créer ces objets et d'éditer leurs caractéristiques.

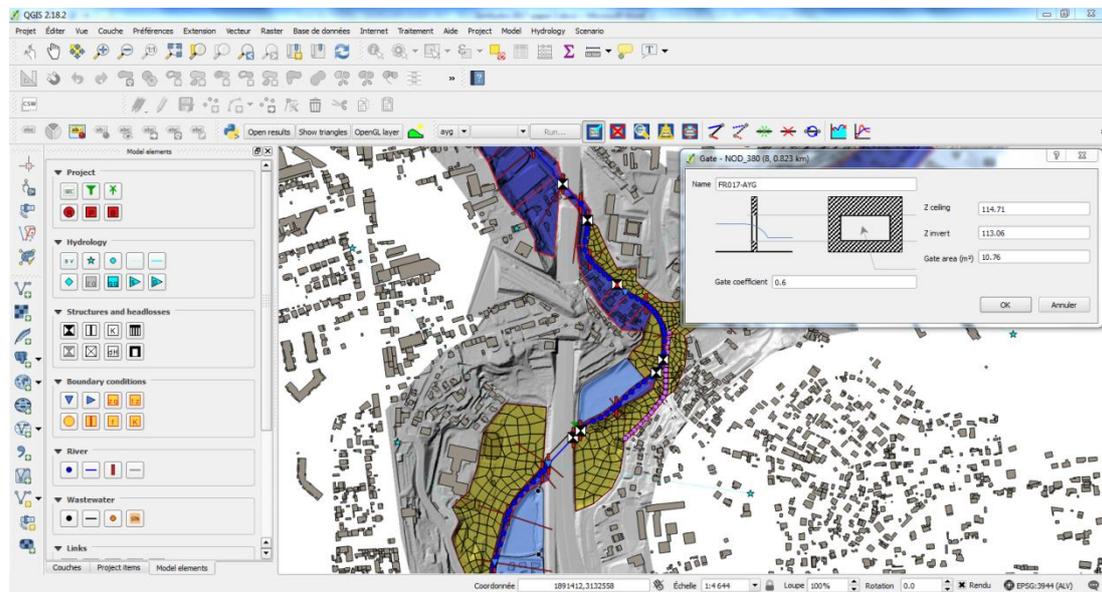


Figure 2-1 : présentation de l'interface du logiciel

L'interface permet de paramétrer les scénarios de calcul, de lancer les calculs et d'effectuer les traitements des résultats : profils en long de lignes d'eau et de débits, hydrogrammes / limnigrammes sur les nœuds de calcul, cartographie des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement, points de débordement des réseaux, ...

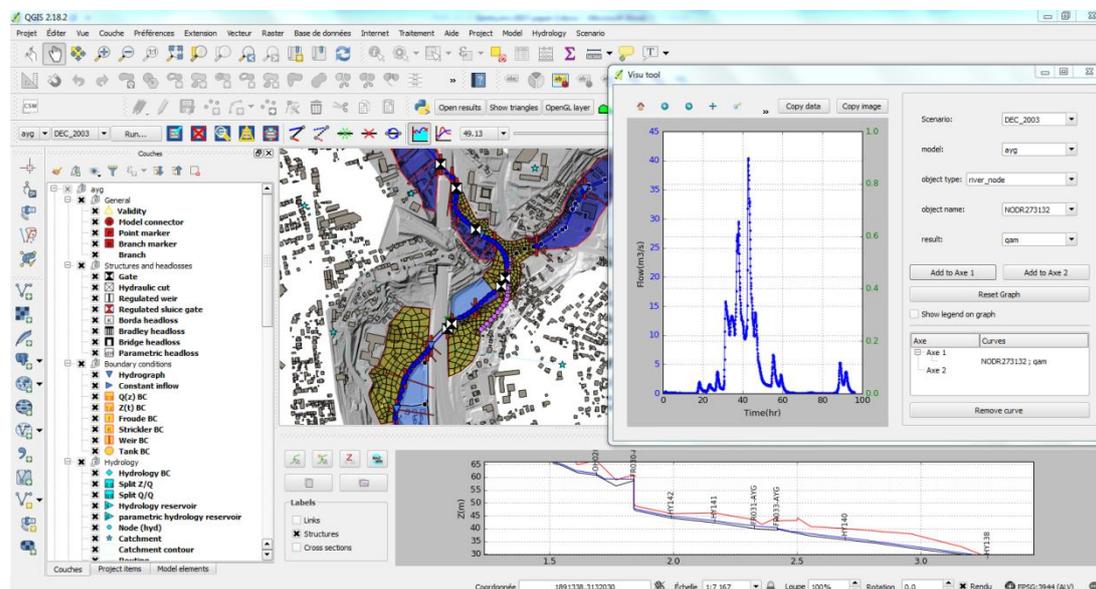


Figure 2-2 : Présentation détaillée de l'interface du logiciel

2.1.2 Le moteur de calcul

Le moteur de calcul est totalement indépendant de l'interface et de l'application Qgis. Il est développé en langages compilés C et Fortran et se compose de fichiers exécutables au format binaire .exe.

Une simulation est lancée via le plug-in de l'interface, qui génère des fichiers d'exports des données tabulaires de la base de données sous-jacente et lance les exécutables en séquence.

Après calcul, les exécutables produisent des fichiers résultats au format binaire et CSV qui sont exploités par les différents outils d'exploitation du plug-in ou des programmes externes spécifiques.

La formulation sous-jacente du moteur de calcul Hydra est fondée sur le concept de discrétisation des équations en volumes finis avec fondamentalement deux familles de termes :

- Les termes de volumes et d'inertie attachés aux nœuds de calcul élargis aux objets de stockage.
- Les termes d'échanges de flux (débits, quantités de mouvements) entre les nœuds.

A chaque pas de temps les équations discrétisées expriment l'égalité entre les variations des termes de volumes et d'inertie et les flux rentrant et sortant dans chaque nœud.

2.1.3 Le module hydraulique

Hydra propose différents domaines de modélisation, interconnectés entre eux par le biais de liaisons hydrauliques spécifiques.

a) Le domaine filaire (ou multifilaire selon les cas)

La schématisation filaire repose sur la résolution des équations de Barré de Saint Venant à lits composés, avec des lois de partage entre les différents lits qui sont conçues pour reproduire au mieux les cotes d'eau dans le lit mineur, les temps de propagation et la déformation des ondes de crues influencées par l'action de laminage joué par le lit majeur. A chaque nœud de calcul sont associées plusieurs variables : la cote d'eau dans la section composée et les débits longitudinaux dans chaque lit. Outre les équations des tronçons de vallée Hydra propose un large choix de singularités spécialement adaptés aux types d'ouvrages et d'obstacles rencontrés dans les vallées fluviales.

b) Rivières

Le domaine filaire modélise l'écoulement le long d'un bief de rivière ou de vallée inondable, caractérisé par une direction privilégiée d'écoulement le long de son axe longitudinal. Le bief de vallée, dénommé « branche », est composé d'une succession de tronçons de rivière entrecoupés de singularités hydrauliques formant obstacle à l'écoulement.

Le domaine filaire modélisé par Hydra se présente comme une juxtaposition de sous-réseaux arborescents. Un sous-réseau consiste en un assemblage de branches de calcul connectées les unes aux autres par des confluences ou des liaisons latérales. A chaque branche est associé un système de repérage curviligne kilométrique qui lui est propre, avec des PK croissants de l'amont vers l'aval de la branche. Une branche est jalonnée d'une succession ordonnée de modules hydrauliques. Chaque module est délimité par un PK amont et un PK aval. On distingue :

- **Les tronçons élémentaires de rivière ou de vallée** régis par les équations de Barré de St Venant ; les équations distinguent pour chaque section de vallée 7 zones d'écoulements contrastés dans la direction transversale (voir figure ci-après) :
 - le lit moyen où coule l'eau en l'absence de débordement,
 - le lit majeur actif, c'est-à-dire la fraction de la plaine inondable qui participe à l'écoulement longitudinal en vallée après débordement, en distinguant la rive gauche et la rive droite,
 - le lit d'expansion qui simule les poches de stockage et d'accumulation dans le lit majeur.

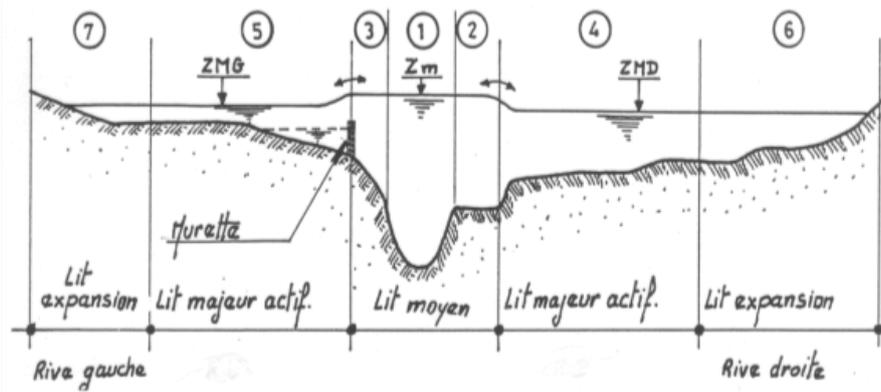


Figure 2-3 : Schématisation de la vallée : coupe transversale

Le modèle filaire se construit à partir de profils en travers. L'hydraulicien synthétise avec 14 points, les profils en travers levés par le géomètre. Il interpole des profils supplémentaires pour rester fidèle à la géométrie du lit du fleuve.

c) Equations

Les équations résolues sont données ci-après.

Equations de Barré-de-Saint-Venant :

Continuité :
$$\frac{\partial}{\partial t} \left(S_m + \frac{S_M}{s} \right) + \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{q_l}{s} + q_a$$

Quantité de mouvement :
$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{d}{dx} \left(\beta \frac{Q^2}{S_m + S_M} \right) + g(S_m + S_M) \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{Q |Q|}{D^2} = 0$$

t : temps

s : coefficient de sinuosité

S_m : surface de la section mouillée du lit mineur

S_M : surface de la section mouillée du lit majeur actif

D : débitance = $S_m K_m R_m^{2/3} + \sqrt{s} S_M K_M R_M^{2/3}$

avec

- K_m et K_M : Stricklers des lits mineur et majeur
- R_m et R_M : rayons hydrauliques des lits mineur et majeur

β : coefficient d'échange de quantité de mouvement entre lits mineur et majeur

$$\beta = \left(\frac{1}{S_M} + \frac{r^2}{S_m} \right) \left(\frac{S_m + S_M}{1 - \eta^2} \right)$$

$$\text{avec } \eta = \frac{Q_m}{Q_M} = \frac{S_m K_m R_m^{2/3}}{S_M K_M R_M^{2/3}}$$

q_l : débit d'échange latéral

$$q_l = \mu \sqrt{2g} (Z - Z_d)^{3/2} \text{ en régime dénoyé}$$

$$q_l = \mu \sqrt{2g} (Z - Z_d) (Z - Z_1)^{1/2} \text{ en régime noyé}$$

• Les **singularités hydrauliques** sont classées dans cette catégorie tous les ouvrages hydrauliques apportant une modification à l'écoulement le long d'un tronçon de rivière, et plus généralement, le long d'une branche 1D. Par extension une singularité est définie dans Hydra comme toute loi d'écoulement régie par des équations autres que celles du tronçon de vallée. Une singularité peut :

- être courte (localisée en un seul PK) ou longue (étendue entre un PK début et un PK fin le long d'une branche de calcul),

- se caractériser par une discontinuité de débit (hydrogramme d'apport ou dérivation), ou de cote piézométrique, ou les deux à la fois,
- être de type passif (ouvrage statique) ou actif (organe réglable).

Chaque branche est constituée en définitive d'une succession de points de calcul. A chaque point sont calculés une cote Z et un débit longitudinal Q le long de la branche. Ce débit est positif lorsque le courant s'écoule de l'amont vers l'aval de la branche, c'est-à-dire dans le sens croissant des PK. Il est négatif dans le cas contraire.

Chaque sous-réseau comprend une et une seule condition à la limite aval, définie au nœud aval par une relation de la forme : $f(Q,Z) = 0$

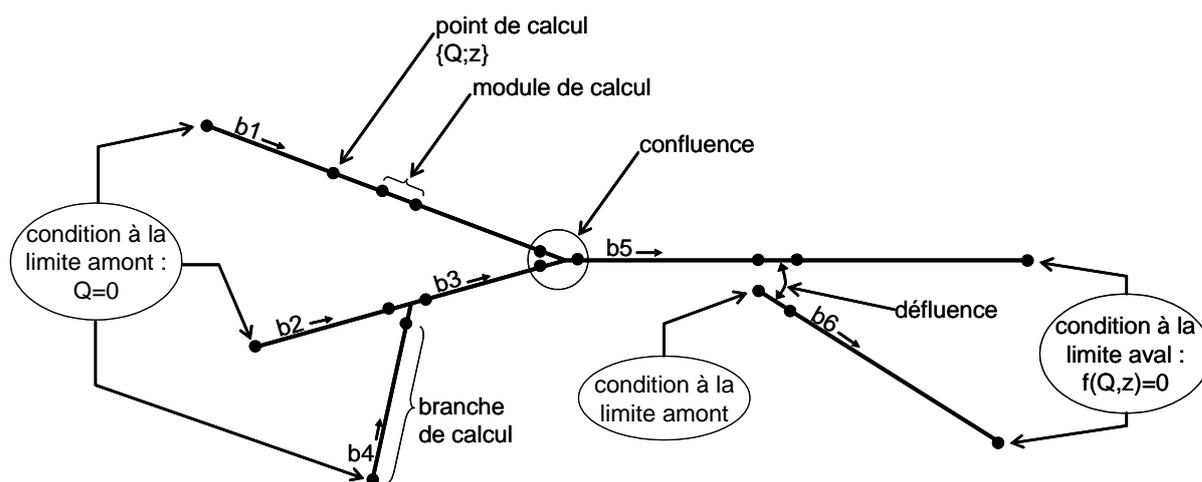


Figure 2-4 : Schématisation d'un domaine filaire maillé

d) Le domaine casier

Le domaine casier est classiquement utilisé pour représenter les zones de stockage caractérisées par de faibles vitesses d'écoulement, situées à l'écart des écoulements dynamiques. Les limites des éléments casiers s'appuient généralement sur des limites physiques contraignant les écoulements (digues, remblais, ...). Il peut également être utilisé pour schématiser le lit majeur actif lorsque les objectifs de la modélisation ne nécessitent pas une représentation détaillée des conditions écoulement (vitesses, hauteurs d'eau, ...).

Le domaine « casier » comprend une collection de surfaces polygonales, ou casiers, chaque casier est converti en interne en un nœud de calcul caractérisé par :

- une cote d'eau Z ,
- une capacité de stockage décrite par une surface au miroir ou une courbe $S(z)$.

L'équation de base d'un casier exprime la loi de conservation de la masse :

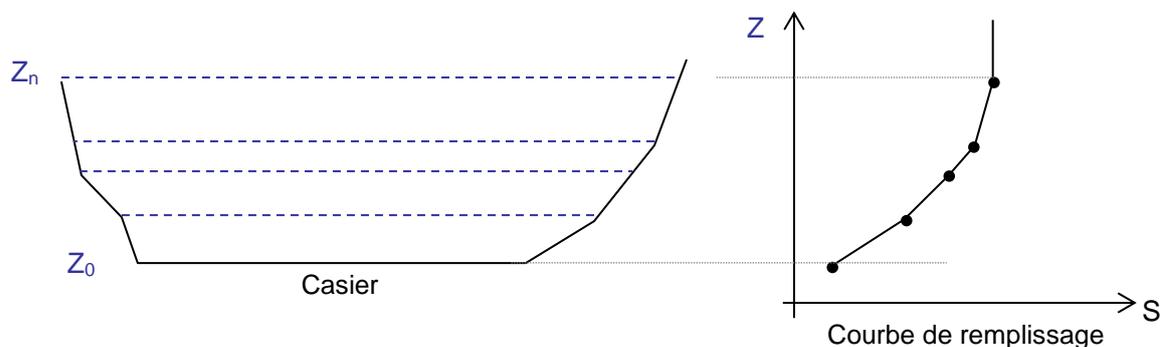
$$S \frac{dZ_c}{dt} = \sum_i q_{li}(z_c, z_i)$$

où :

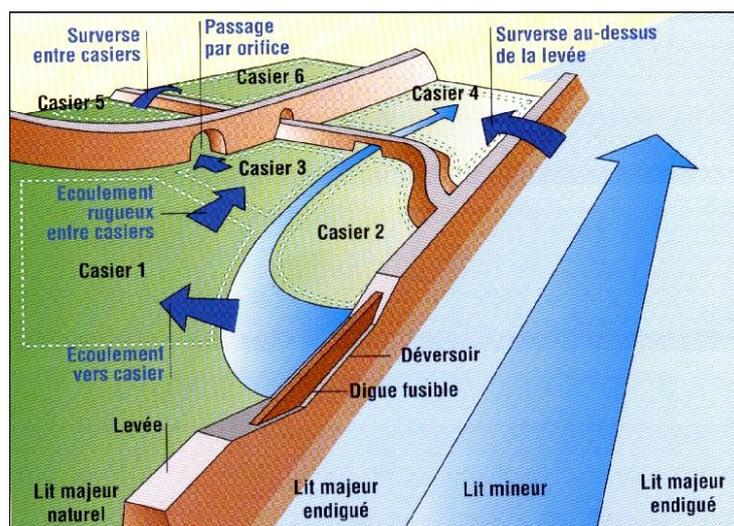
- S : surface au miroir du casier

- Z_c : cote d'eau (supposée uniforme dans le casier)
- q_{li} : débit échangé avec un autre domaine. Les liaisons latérales disponibles sont de plusieurs types suivant la nature physique de la liaison : seuil, orifice, frottement sur le fond, écoulement poreux.

Chaque casier est défini géographiquement par ses contours qui correspondent, en général à des obstacles physiques influençant l'écoulement : levées, coteaux, routes, talus ... puis numériquement par sa superficie et par une courbe $\alpha(Z)$ où α est le pourcentage de la superficie du casier situé sous la cote Z .



La planimétrie générale du terrain est ainsi entrée dans le modèle ce qui définit le volume d'eau susceptible d'être stocké dans la zone inondée.



Les entrées et sorties d'eau pour un casier sont analysées et dimensionnées : des liaisons numériques sont définies pour représenter dans le modèle les échanges d'eau entre casiers.

e) Le domaine bi-dimensionnel (2D)

Schématisation et équations

Le domaine « pavé » comprend une collection de mailles quadrangulaires ou triangulaires, ou pavés, chaque pavé étant converti en interne en un nœud de calcul caractérisé par :

- une cote d'eau Z ,
- les composantes u_x et u_y de la vitesse d'écoulement,

- une capacité de stockage décrite par une cote moyenne de fond Z_f et une surface S .

La modélisation bidimensionnelle repose sur la résolution des équations de Barré de Saint Venant à deux dimensions à l'aide d'une méthode de volumes finis : les inconnues sont la cote d'eau et la composante de la vitesse dans chaque direction, calculées au centroïde de la maille.

Les équations de base s'expriment sous la forme :

Continuité :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (uh) + \frac{\partial}{\partial y} (vh) = 0$$

Dynamiques selon x et y

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \left(\frac{\partial z}{\partial x} + j_x \right) = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + u \frac{\partial v}{\partial y} + g \left(\frac{\partial z}{\partial y} + j_y \right) = 0$$

Avec :

h : hauteur d'eau

u, v : composante de la vitesse

g : accélération de la gravité

z : cote de la surface libre

x, y : abscisse et ordonnée du point où sont définis (h, u, v)

j : gradient de perte de charge engendré par le frottement

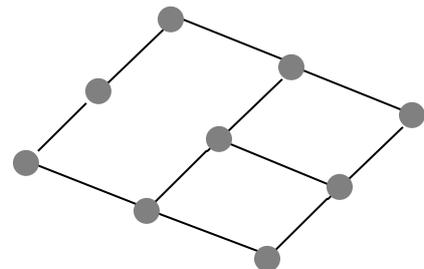
Les équations précédentes sont transformées dans le module 2D en intégrales de surface et sont discrétisées par la **méthode des volumes finis**.

Pour ce domaine le nombre de variables indépendantes au centroïde de chaque élément est égal à trois : h, u et v .

Le maillage proposé dans le module bidimensionnel est quadrangulaire et triangulaire. La densité et la taille moyenne des mailles sont adaptées en fonction de la cohérence de la précision des levés topographiques et des attendus du projet.

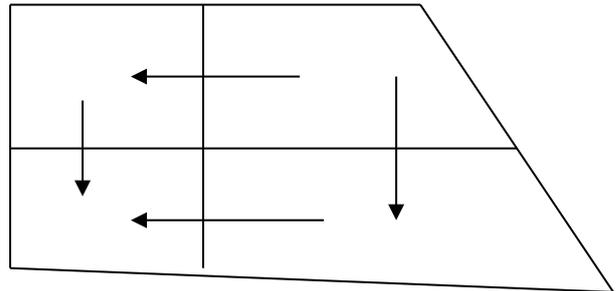
Le maillage proposé présente deux particularités :

- Il est déstructuré, c'est-à-dire que les frontières de chaque maille ont des directions quelconques : elles s'appuient sur les rives du cours d'eau, le long des obstacles dans le lit majeur,
- Il est possible de partager une frontière entre plus de deux éléments (cf. ci-contre).



Cette souplesse permet de facilement traiter les situations géométriques les plus complexes.

Les frontières entre deux mailles contigües sont traversées par des liaisons d'échanges hydrauliques qui découlent de la discrétisation des deux équations ci-dessus.



La grande majorité de ces liaisons sont intérieures au domaine 2D : elles sont régies par des lois d'échange satisfaisant les équations de Barré de St Venant en deux dimensions ; les vitesses sont calculées au centroïde de l'élément.

A chaque frontière on peut également renseigner une loi d'échange spécifique du type de celles disponibles pour le domaine casier, dans le cas d'un obstacle régi par une loi de singularité hydraulique spécifique.

On peut également spécifier des liaisons régies par des lois de singularités hydrauliques.

La méthode des volumes finis offre une grande souplesse dans la définition du maillage, ce qui lui confère un avantage certain compte tenu des nombreuses lignes de fractures (obstacles en ligne) présentes dans les plaines alluviales.

Le maillage s'appuie notamment sur des limites physiques contraignant les écoulements (digues, remblais, ...), la taille des mailles étant définie par le modélisateur en fonction de la précision attendue et de la morphologie de la vallée.

Les singularités ponctuelles au droit des franchissements routiers ou ferrés sont schématisées par des liaisons spécifiques reliant les mailles amont et aval :

- des lois d'orifice pour les buses et les ponceaux de décharge,
- des lois de seuil pour les routes, chemins, digues, murets, ... submersibles.

Prise en compte du bâti

Hydra permet différentes approches pour la **prise en compte du bâti** dans la modélisation mise en œuvre :

- Cas des **grands bâtiments**, et / ou des **bâtiments susceptibles de modifier sensiblement la répartition des écoulements en aval : le maillage 2D s'appuie sur le bâti** :
 - les mailles contenues dans le bâti peuvent être extrudées (on ne tient pas compte du volume potentiellement stocké sur cette surface),

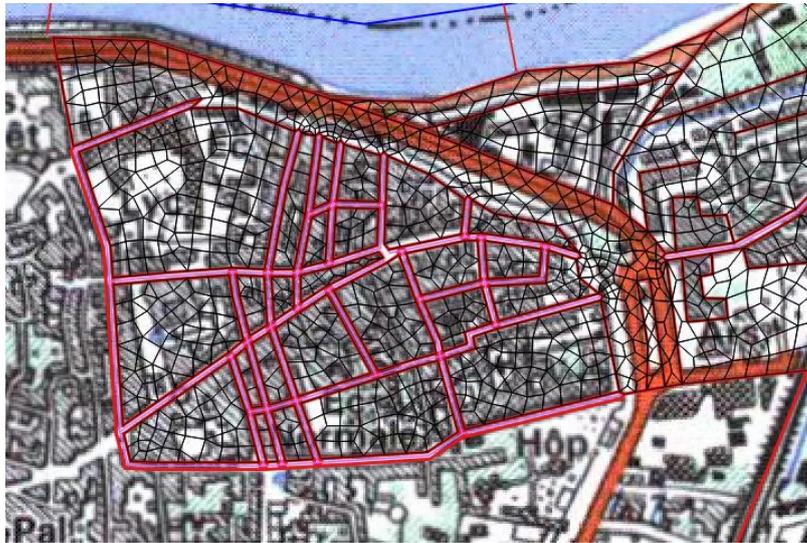


- les mailles contenues dans le bâti sont conservées, mais les largeurs disponibles pour l'écoulement sur la frontière du bâti sont fixées à une largeur faible forfaitaire, traduisant les possibilités de pénétration de l'eau via les portes et autres orifices majeurs.



- Cas des **bâtiments de dimensions réduites présentant une implantation relativement diffuse** : le maillage ne s'appuie pas sur les contours précis de chacun des bâtiments ; les largeurs disponibles pour l'écoulement sur la frontière des mailles sont corrigées pour tenir compte de l'obstacle créé par le bâti sur la dynamique des écoulements (cf. partie sud de l'illustration précédente).
- Cas d'une **urbanisation régulière** (structurée par un **réseau de voiries régulier**, notamment dans les centres-villes et les zones pavillonnaires) : un schéma de modélisation bidimensionnelle spécifique est mis en œuvre :
 - les rues sont des éléments de modélisation à part entière sur lesquelles sont résolues les équations appliquées à la schématisation 1D,
 - les îlots bâtis encadrés par les rues sont couverts par un maillage 2D,
 - les largeurs disponibles pour l'écoulement sur la frontière des mailles (dans les îlots) ou aux frontières rues / mailles 2D sont corrigées pour tenir compte de l'obstacle créé par le bâti sur la dynamique des écoulements.

Sur le schéma ci-dessous, les rues sont matérialisées en rose (caractérisées par leur largeur, leur pente entre deux nœuds de calcul et un coefficient de frottement).



f) Prise en compte des singularités

Hydra dispose d'un panel de singularités hydrauliques ponctuelles permettant de **schématiser** ces différentes situations. Des singularités ou liaisons binodales sont également disponibles, afin de tenir compte des échanges de débits entre deux points différents d'un bief par exemple (ou entre deux biefs, ou un bief et un casier).

Les ponts sont modélisés par une perte de charge prenant en compte la taille et l'emplacement des culées et des éventuelles piles du pont.

Les liaisons latérales

Les liaisons latérales symbolisent des relations de transfert de débit entre des nœuds de calcul attachés aux éléments des différents domaines. L'équation associée à chaque liaison est de la forme :

$f(Q_L, Z_1, Z_2)$ où Q_L est le débit d'échange entre les nœuds 1 et 2,

Z_1 et Z_2 sont les cotes d'eau aux nœuds 1 et 2 respectivement,

f est une fonction spécifique à la nature hydraulique de la liaison : seuil, orifice, poreuse, ...

Dans le cas d'une liaison uninodale, la relation est de la forme : $g(Q_L, Z_1) = 0$. La liaison s'apparente alors à une condition à la limite appliquée au nœud 1.

Les principales liaisons hydrauliques binodales sont les suivantes :

- **La loi de surverse (overflow)** : débordement au-dessus d'une levée ou d'un talus. La liaison est calée au niveau de l'arase du point bas de la levée ou de la banquette. Les débits susceptibles d'entrer dans le val sont calculés par une loi de type déversement simple fonction de la cote d'arase, de la largeur de la zone basse et du coefficient de seuil.

- **La loi d'orifice (gate)** : La liaison simule un passage par une ouverture quelconque : buse, dalot ou pont. Elle est représentée par les dimensions de l'orifice et les coefficients de seuil et d'orifice.
- **L'écoulement rugueux (strickler)** : de casier à casier, l'eau coule sans obstacle précis, mais les forces de frottement de l'eau sur le terrain sont représentées. La liaison est définie par sa cote, sa largeur, un coefficient de rugosité et la distance entre casiers. La loi d'écoulement est régie pour cette liaison par l'équation :

$$Q_{ij} = K * H_{ij}^{5/3} * l * \text{racine} ((Z_i - Z_j)/L)$$

Où Q_{ij} est le débit d'échange entre les casiers, H_{ij} est la hauteur d'eau moyenne, l la largeur de la liaison, Z_i et Z_j les cotes moyennes dans les casiers i et j respectivement et K est le coefficient de frottement de Strickler¹ sur le fond.

- **La brèche** : La liaison représente l'ouverture d'une brèche dans le calcul lorsque le niveau d'eau, calculé à un pas de temps, dépasse un niveau altimétrique prédéfini (généralement le niveau de la levée ou de la digue). Ce type de liaison est défini par un seuil de déclenchement, une largeur, un seuil bas, un coefficient de seuil et un temps d'ouverture.

Deux nœuds de calcul peuvent être reliés par plusieurs liaisons.

Les ouvrages sur domaines 1D

Ce paragraphe présente les principes généraux de modélisation des principaux types d'ouvrages hydrauliques sur les domaines 1D.

Certains points particuliers sont présentés plus en détail dans les chapitres spécifiques à chacun des modèles.

➤ **Ouvrages de franchissement**

Les ouvrages de franchissement sont définis par les cotes de radier et de sous-poutre et la section totale.

Les pertes de charge sont calculées par une loi de seuil tant que l'ouvrage n'est pas en charge, et par une loi d'orifice dans le cas contraire.

¹ Coefficient de Strickler : traduit le frottement du lit. Le frottement est d'autant plus important que le coefficient est faible.

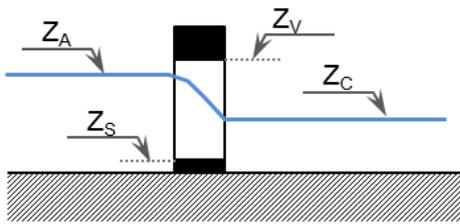
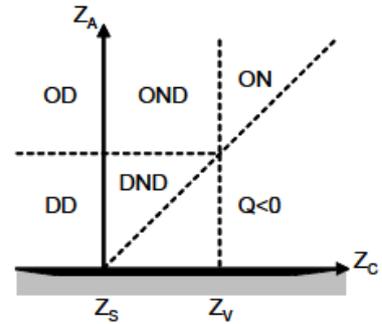


Schéma de fonctionnement



Régimes possibles d'écoulement

Régime d'écoulement	Désignation	Expression pour f
Déversoir dénoyé	DD	$f = C_D (Z_A - Z_S)^{3/2}$
Déversoir noyé – dénoyé	DND	$f = C_D (Z_A - Z_C)^{3/2} + C_N (Z_C - Z_S) (Z_A - Z_C)^{1/2}$
Orifice dénoyé	OD	$f = C_D (Z_A - Z_S)^{3/2} - C_D (Z_A - Z_V)^{3/2}$
Orifice noyé – dénoyé	OND	$f = C_D (Z_A - Z_C)^{3/2} - C_D (Z_A - Z_V)^{3/2} + C_N (Z_C - Z_S) (Z_A - Z_C)^{1/2}$
Orifice noyé	ON	$f = C_N (Z_A - Z_C)^{1/2} (Z_V - Z_S)$
avec $C_D = \frac{2}{3} \mu_D L \sqrt{2g}$ $C_N = \mu_N L \sqrt{2g}$		μ_D : coefficient en régime dénoyé (généralement = 0.6) μ_N : coefficient en régime noyé (généralement = 0.6)

➤ Ouvrages souterrains

Les collecteurs souterrains sont modélisés par des sections paramétriques fermées ; Hydra utilise la méthode de la fente de Preissmann pour résoudre les équations de Barré de Saint Venant.

Une perte de charge à l'entonnement est ajoutée, sous la même forme que les ouvrages de franchissement.

➤ Seuils et vannages

Les seuils frontaux et latéraux sont modélisés par des lois de seuil.

Les vannages sont modélisés par des lois mixtes seuil (tant que l'ouvrage n'est pas en charge) / orifice.

Ces ouvrages peuvent être asservis à une cote ou un débit de consigne.

Cette représentation simplifiée est mise en œuvre lorsque la capacité du cours d'eau est faible et lorsque ses berges ne constituent pas un obstacle à l'écoulement des eaux en lit majeur (absence de digues) ; elle permet d'intégrer simplement à un maillage global du lit majeur la présence de petits cours d'eau ou fossés dont le rôle peut être important dans la dynamique d'écoulement des débordements du cours d'eau principal et le ressuyage du lit majeur. L'intégration d'un cours d'eau par cette schématisation dans un modèle existant est très simple puisqu'elle ne nécessite pas de reprendre le maillage. De même, l'étude relative à une restauration de cours d'eau secondaire, la suppression ou l'ajout de fossés en lit majeur se fait par simple modification des caractéristiques des éléments 1D existants (section des profils, rugosité, ...) ou ajout de nouveaux éléments 1D venant se superposer au maillage du lit majeur existant.

Cette représentation est aussi très utile dans le cas de réseaux souterrains couplés avec des écoulements de surface. Les débordements potentiels des réseaux sont représentés par des liaisons entre les biefs filaires souterrains et les mailles de surface, au droit des regards.

2.1.4 Cartographie des zones inondables

La cartographie des zones inondées pour les différents scénarios hydrologiques modélisés est réalisée avec Hydra, par croisement entre la ligne d'eau calculée et le MNT. Hydra soustrait le MNT à la grille de la ligne d'eau calculée pour restituer une grille des hauteurs de submersion, à un pas d'espace identique à celui du MNT, ainsi que les courbes d'iso-hauteurs de submersion suivant les intervalles définis par l'utilisateur.

Hydra produit les classes d'iso-hauteurs de submersion sous forme vectorielle (fichiers Shape) et sous forme de grille au format ArcGis ASCII (dalles *.asc).

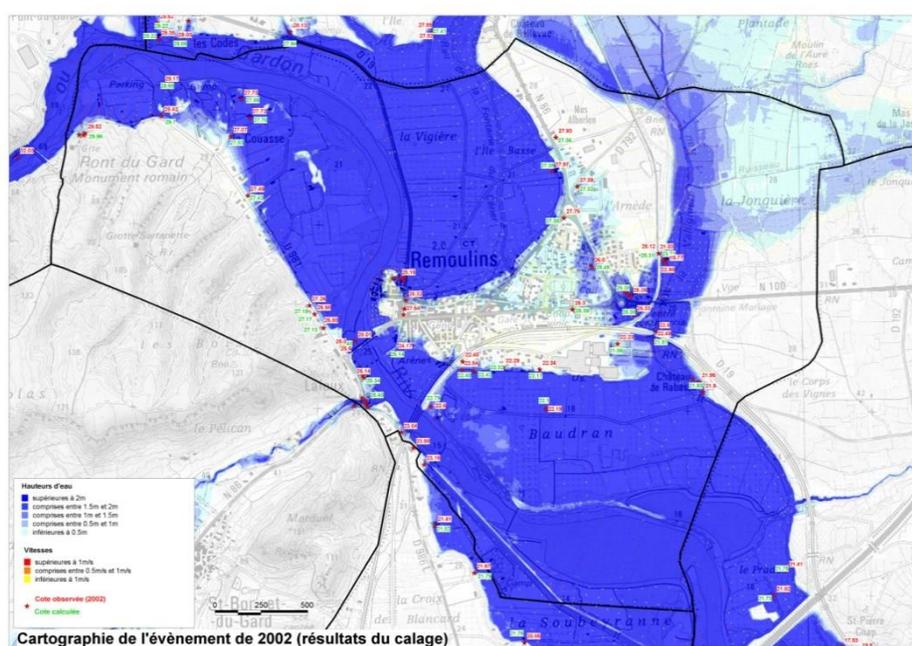


Figure 2-5 : Exemple de restitution des hauteurs d'eau et vitesses d'écoulement, PPRI Gardons aval (DDTM30, 2013)

2.2 MODELISATION DE LA SAVOUREUSE ET DE SES AFFLUENTS

La modélisation de la Savoureuse et de ses affluents s'étend :

- De Lepuix à Sochoux pour la Savoureuse ;
- De La Chapelle-sous-Chaux à Sermamagny pour le Rhône ;
- De Vescemont à Valdoie pour la Rosemontoise.

La figure suivante reprend ce linéaire modélisé. Ce linéaire a été modifié et étendu en amont suite aux entretiens avec les communes. En effet, des écoulements ont lieu en rive gauche de la Rosemontoise sur la commune de Vescemont et sont repris par quelques fossés ce qui peut contribuer à l'inondation de Rougegoutte. Enfin, afin de connaître précisément les aléas dans le centre de la commune de Lepuix, le linéaire modélisé a été étendu à cette commune.

Le modèle hydraulique a une structure filaire / multifilaire avec des zones de stockage et une modélisation de type 2D. Ce panachage de modélisation permet de bien prendre en compte les différentes spécificités du secteur d'étude.

La modélisation filaire sera réservée à la partie amont de la zone d'étude où les enjeux sont peu importants et les débordements moindres et dans une direction privilégiée.

La modélisation multifilaire permet de prendre en compte les écoulements qui ont lieu dans lit majeur lorsque celui-ci est déconnecté de la rivière (bief perché), des liaisons permettant de représenter les échanges entre les deux lits.

Les zones de stockage (casiers) représentent les différents étangs présents sur la zone d'étude mais également les bassins de stockage.

Enfin, le reste du secteur d'étude est représenté en 2D.

La Figure 2-7 représente le découpage des différentes zones.

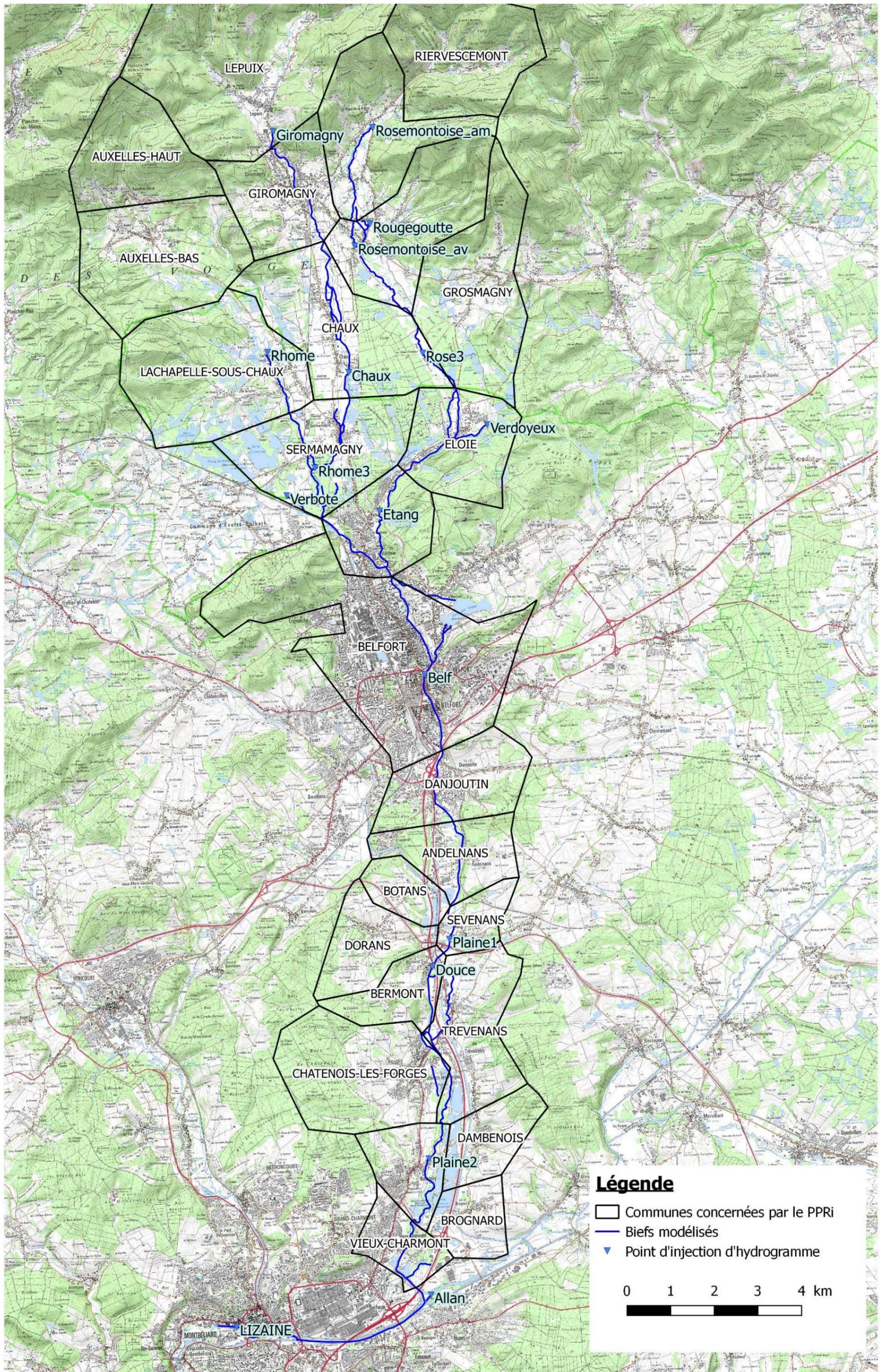
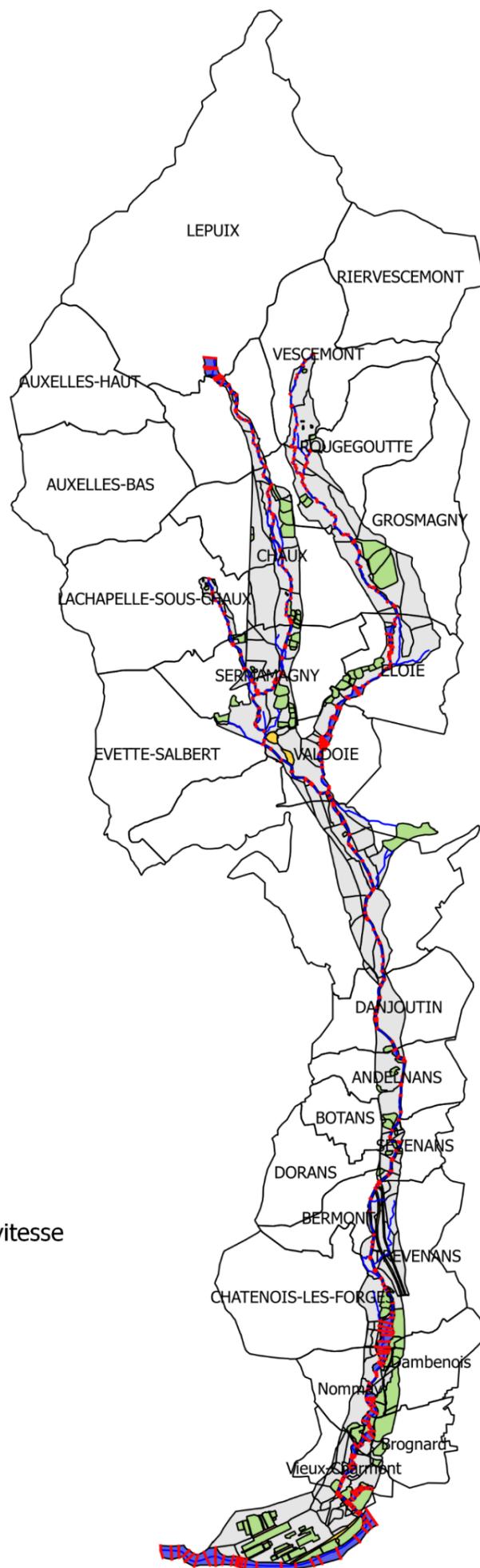


Figure 2-6 : Représentation du linéaire modélisé



Légende

□ Communes concernées par le PPRI

— Biefs modélisés

— Profils en travers

Découpage de la modélisation

■ Zone en remblais non modélisée

■ Modélisation 2D

■ Zone de stockage ou de très faible vitesse

■ Modélisation filaire

Figure 2-7 : découpage de la modélisation

Le modèle intègre par ailleurs toutes les singularités hydrauliques pouvant influencer l'écoulement des eaux en lit mineur et en lit majeur : seuils, vannages, ponts, buses de décharge, digues, infrastructures en remblai (routes, voies ferrées...). Les ouvrages peuvent le cas échéant être automatisés (asservissement selon la cote d'eau ou débit amont, comme pour le remplissage des bassins de stockage par exemple) ou pilotés par un module de régulation externe.

En particulier, les obstacles que constituent les digues et remblais routiers sont explicitement intégrés à la modélisation :

- Le fait que le contour des différents domaines de modélisation (2D, casiers, bord de lit majeur) s'appuie sur leur tracé ;
- La mise en œuvre de liaisons de déversement plus hautes que le terrain naturel pour les franchir.

La condition limite aval du modèle est définie par la courbe de tarage de la station hydrométrique de Courcelles-les-Montbéliard sur l'Allan, analysée dans le cadre de l'étude EDD réalisée par hydratec en 2014.

2.3 HYDROLOGIE

Pour rappel, les hydrogrammes de crue ont été estimés lors de la phase hydrologique. Les figures suivantes rappellent ces hydrogrammes qui seront injectés au niveau des points d'entrée.

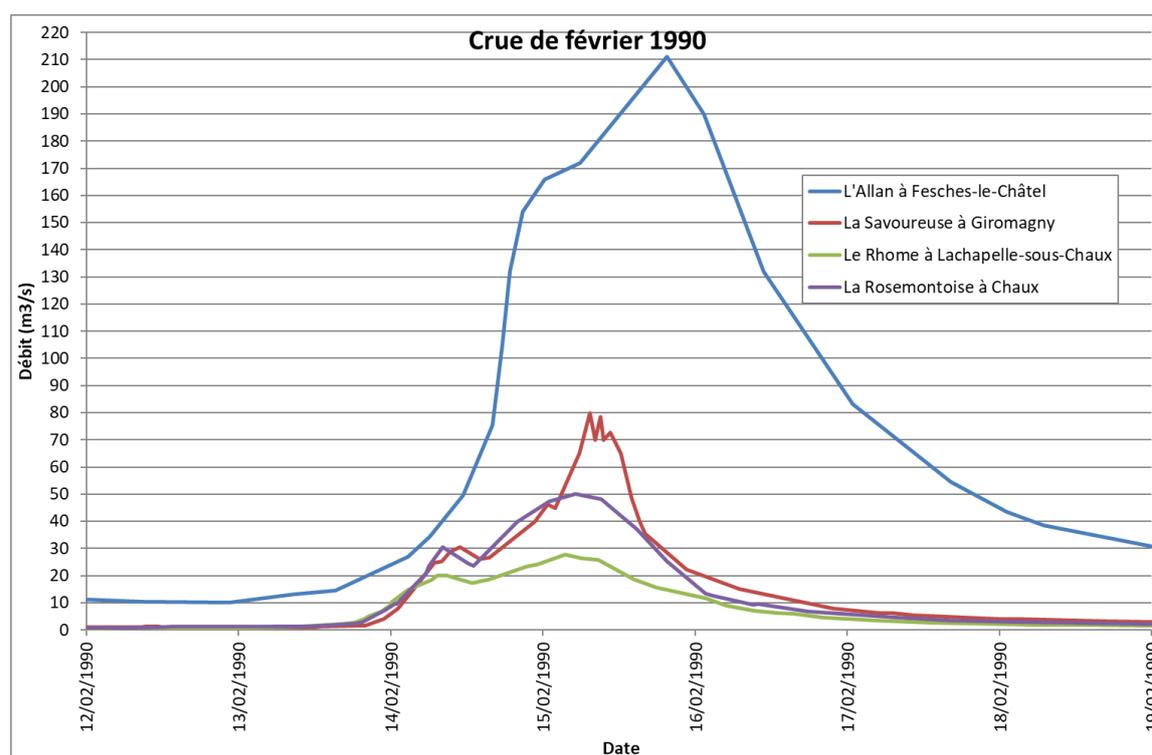


Figure 2-8 : Hydrogrammes mesurés aux stations hydrométriques lors de la crue de février 1990

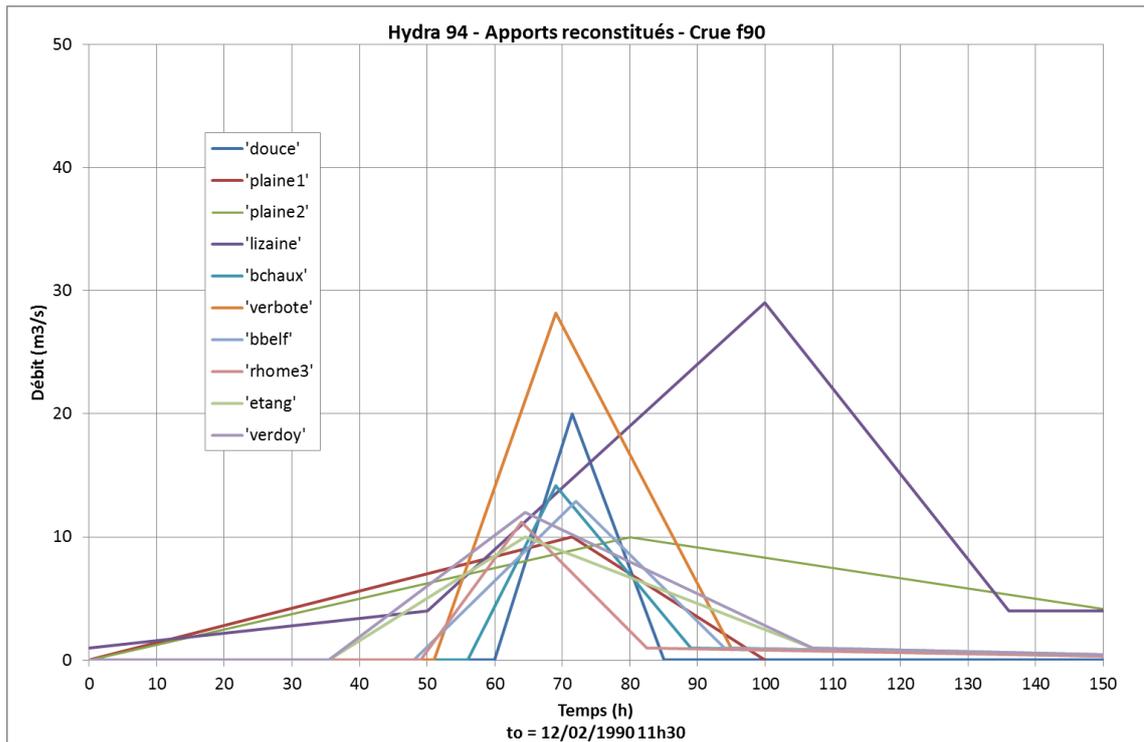


Figure 2-9 : Hydrogrammes d'apport au modèle retenus pour la crue de février 1990

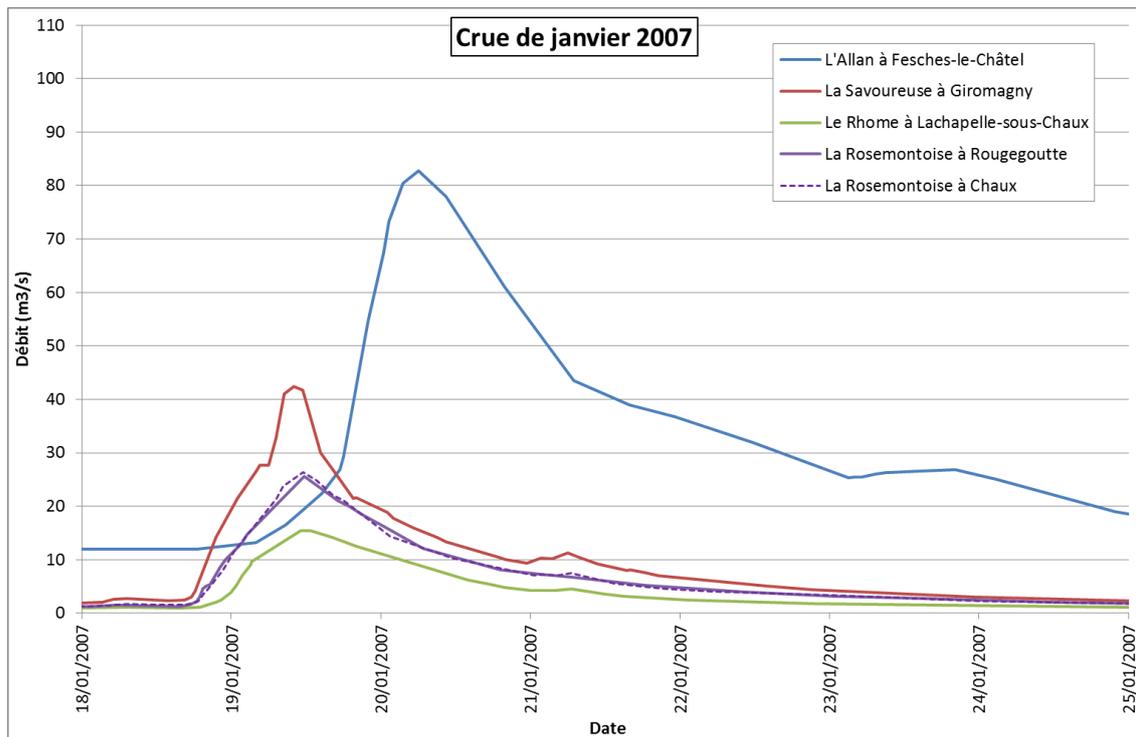


Figure 2-10 : Hydrogrammes mesurées aux stations pour la crue historique de 2007

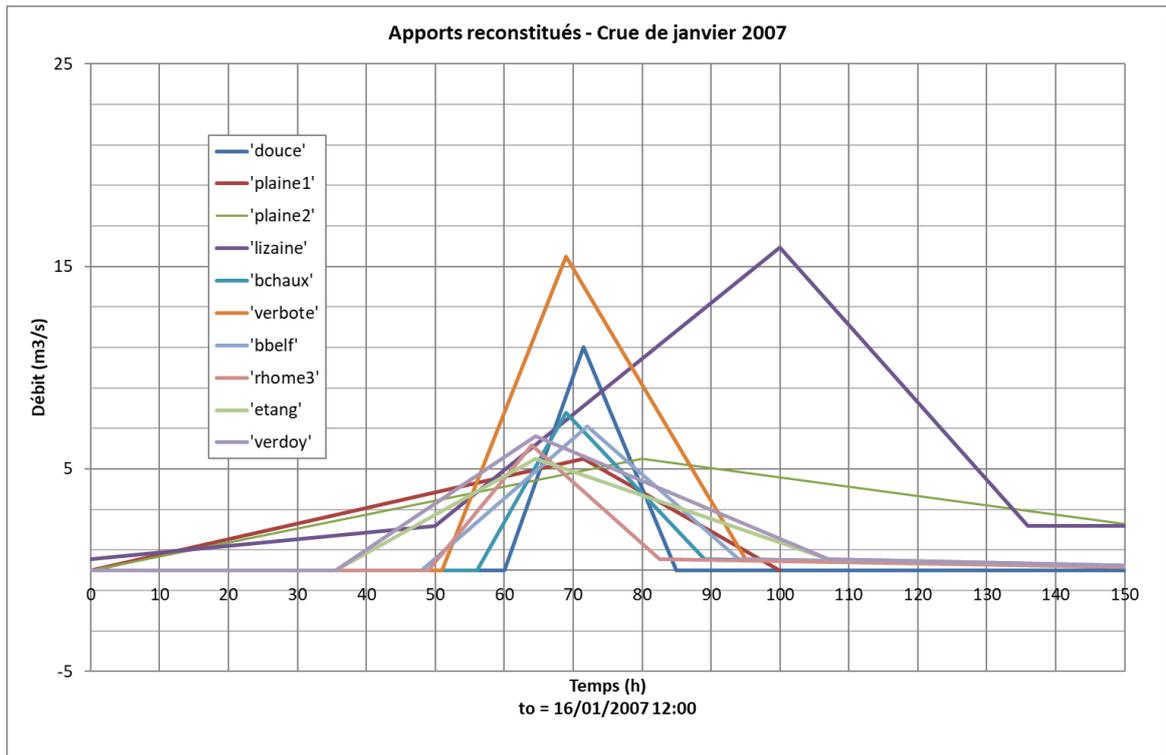


Figure 2-11 : Hydrogrammes d'apport au modèle retenus pour la crue de janvier 2007

Pour mémoire, les apports intermédiaires injectés dans les différents cours d'eau permettent de modéliser les eaux collectées par la Savoureuse sur des sous bassins versants de la zone d'étude. Ils peuvent correspondre à des affluents clairement identifiés (Douce, Verboté, Verdoyeux...) ou de simples ruissellements directement interceptés par la rivière.

La forme des apports intermédiaires, décrits dans le rapport hydrologie, est basée sur l'étude d'Hydratec de 1994. Les apports intermédiaires de la crue de 2007 avaient été construits par similitude. Les différents points d'injection et leur dénomination sont représentés sur la figure ci-après.

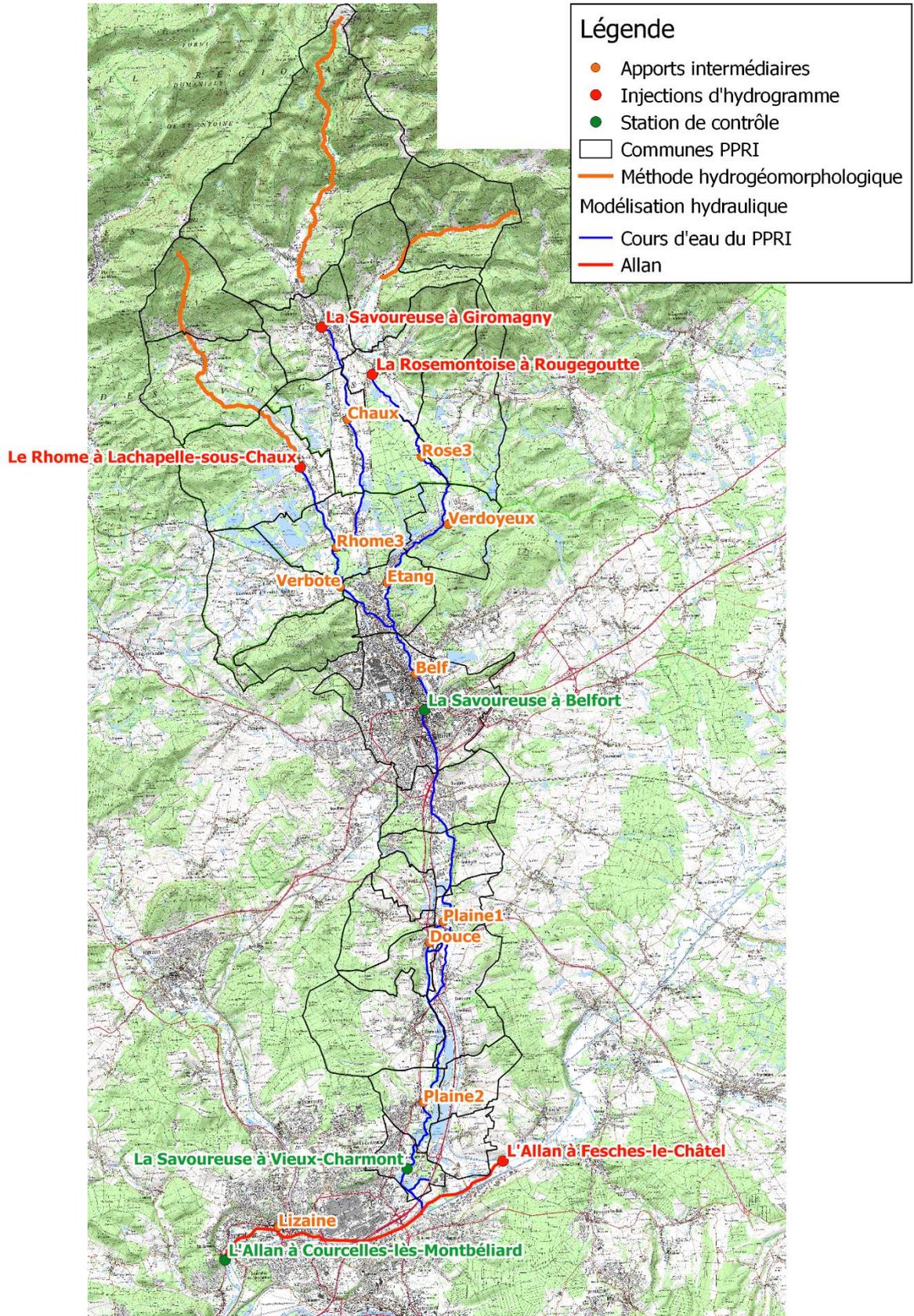


Figure 2-12 : cartographie des apports intermédiaires

2.4 CONDITIONS LIMITES AVAL

Dans un premier temps, la condition limite à l'aval du modèle a été fixée sur le seuil de Montbéliard localisé à proximité du stade de la Banane. Ce choix était justifié par l'emprise du modèle initialement à notre disposition construit par hydratec dans le cadre de l'étude de dangers de digues de PMA réalisée en 2014.

Ce choix pose cependant la question de l'influence de la condition limite aval sur la modélisation de la Savoureuse et ses incidences potentielles sur la modélisation numérique et sur les résultats sur les zones considérées dans ce PPRI. Pour quantifier cette incertitude, une étude de sensibilité a été menée sur la condition à la limite aval. La courbe de tarage, issue de la modélisation hydratec et représentant le fonctionnement théorique du seuil calculé par une loi de seuil classique, a été imposée en sortie de modèle. Une dérive dans la courbe de tarage a été volontairement introduit, atteignant 50 cm au pic de la crue de 1990.

Les profils en long ainsi calculés sont représentés sur la Figure 2-13. Il ressort de cette analyse que l'erreur de 50 cm sur la condition limite aval ne se propage pas jusqu'à la confluence Allan Savoureuse. En effet, le système hydraulique de déversoir et de vanne de régulation permet de tenir le niveau du bief de rivière du canal du Rhône au Rhin lors de la traversée de Montbéliard. Ce seuil garantit toute influence de la condition à la limite sur la confluence Savoureuse – Allan.

Dès lors, la modélisation fine des lits mineur et majeur de l'Allan à l'aval du seuil de régulation jusqu'à la station hydrométrique de Courcelles les Monbéliard n'est pas nécessaire. Toutefois, ce linéaire a quand même été modélisé de manière simplifiée pour propager les hydrogrammes calculés et ainsi permettre la comparaison de l'hydrogramme en sortie de modèle avec l'hydrogramme réellement mesuré à la station hydrométrique.

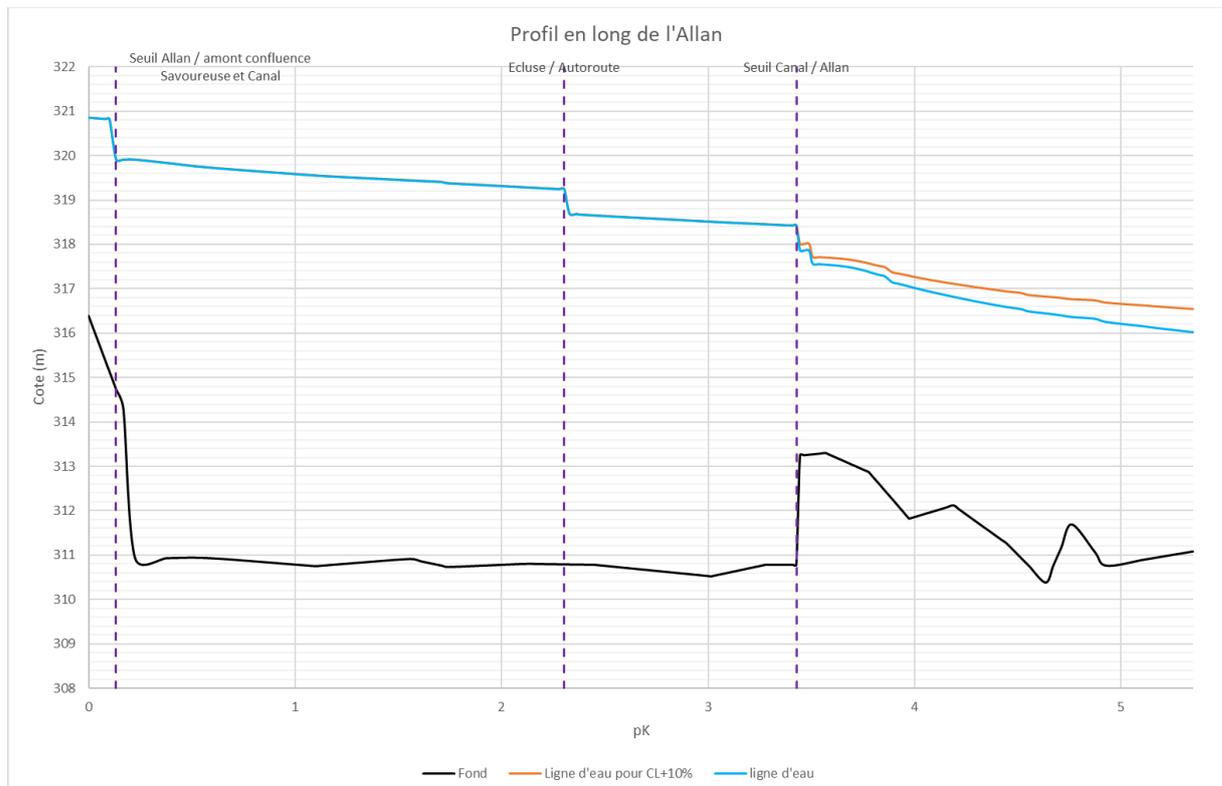


Figure 2-13 : profils en long dans l'Allan lors du test de sensibilité réalisé sur l'évènement de 1990

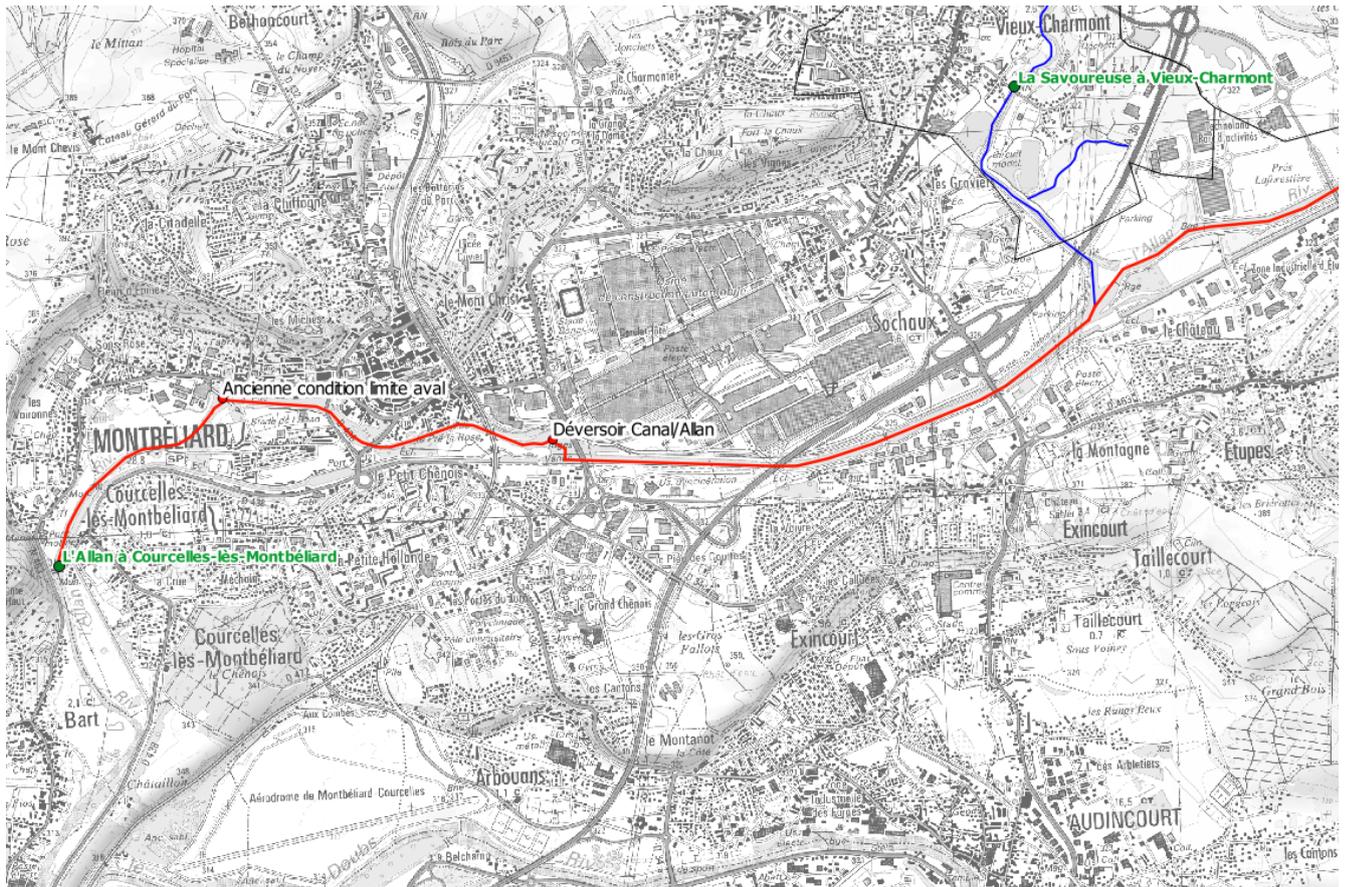


Figure 2-14 : conditions aux limites par rapport aux singularités hydrauliques

2.5 CONDITIONS INITIALES

Les conditions initiales fixées dans le modèle dans les casiers représentant les différentes gravières et plans d'eau sont fixées par leurs cotes mesurées sur le MNT, considérant que ces dernières sont représentatives de leur niveau moyen en fonctionnement normal.

3 CALAGE DU MODELE

3.1 DONNEES DE CALAGE ET REPERES DE CRUE

3.1.1 Données

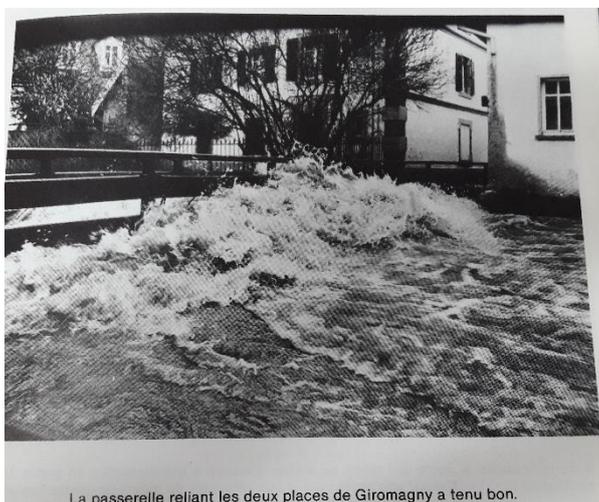
La crue de février 1990 est la crue la plus importante qu'ait connu le secteur d'étude. Elle a même une période de retour de 100 ans sur la Savoureuse ; elle a donc été retenue comme la crue de référence pour l'élaboration du PPRi. Les hydrogrammes d'apport ont été définis lors de l'étude hydrologique et sont rappelés dans le paragraphe 2.3.

Les données topographiques utilisées sont le MNT disponible sur la vallée, les levés terrestres tels que les profils en travers et les ouvrages qui ont été réalisés entre autres par DHI en 2007.

Le secteur d'étude a fortement évolué depuis 1990. Lors des entretiens avec les acteurs locaux, les évolutions topographiques ont donc été répertoriées et ont fait l'objet d'un rapport. Pour la crue de calage de février 1990, la topographie appliquée au modèle hydraulique approche donc au maximum celle de 1990.

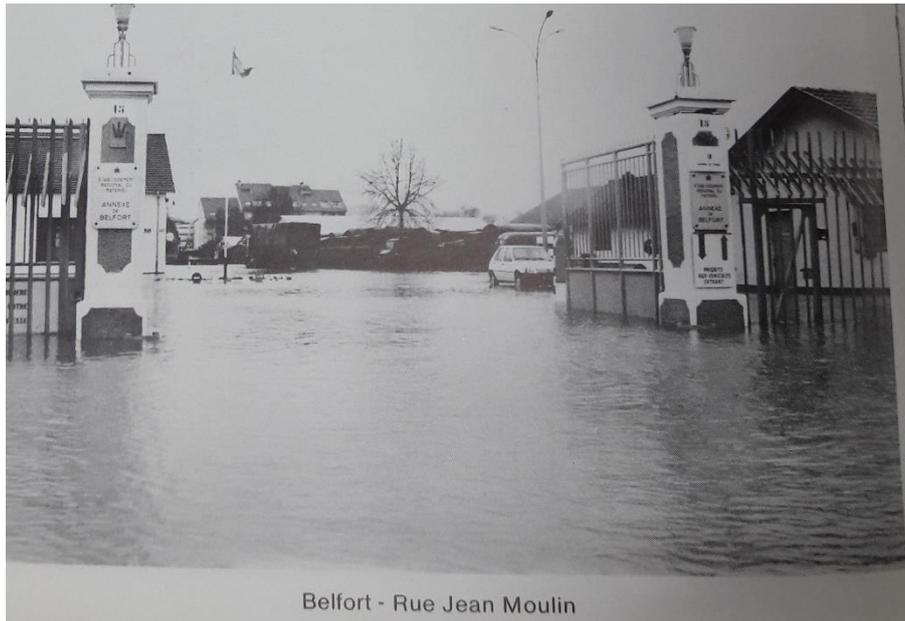
Plusieurs repères de crue ont été identifiés dans les études précédentes et serviront de points de calage. Les données issues des stations hydrométriques (débit et hauteur d'eau) seront également exploitées. Les archives départementales ont également été consultées afin de collecter des informations sur les zones touchées lors des débordements des cours d'eau. Lors des entretiens avec les acteurs locaux (Communauté de Communes, communes...), des photos ont également pu être collectées.

Les figures suivantes présentent quelques-unes de ces informations qui ont pu être collectées.



La passerelle reliant les deux places de Giromagny a tenu bon.





Belfort - Rue Jean Moulin



Le vieux pont d'Andelnans a craqué en son milieu.



Rue du Magasin à Belfort. Il a fallu pousser les voitures pour aussi les sauver des eaux.



C'est à Valdoie, devant la mairie, que l'eau de la Savoureuse a montré son danger le plus fort. Les militaires du 35e RI ont dû soutenir les efforts des pompiers de tout le département.



Figure 3-1 : Photos de la crue de février 1990 dans la vallée de la Savoureuse (source : archives départementales)



Figure 3-2 : Passerelle des Lettres dans Belfort en février 1990 (source : étude EGIS, Aménagement des berges de la Savoureuse, 2015)



Figure 3-3 : vue amont du pont Carnot dans Belfort en février 1990 (source : étude EGIS, Aménagement des berges de la Savoureuse, 2015)



Figure 3-4 : Passerelle des Arts dans Belfort, en février 1990 (source : étude EGIS, Aménagement des berges de la Savoureuse, 2015)



Figure 3-5 : Vue amont du pont Denfert-Rochereau dans Belfort, en février 1990 (source : étude EGIS, Aménagement des berges de la Savoureuse, 2015)

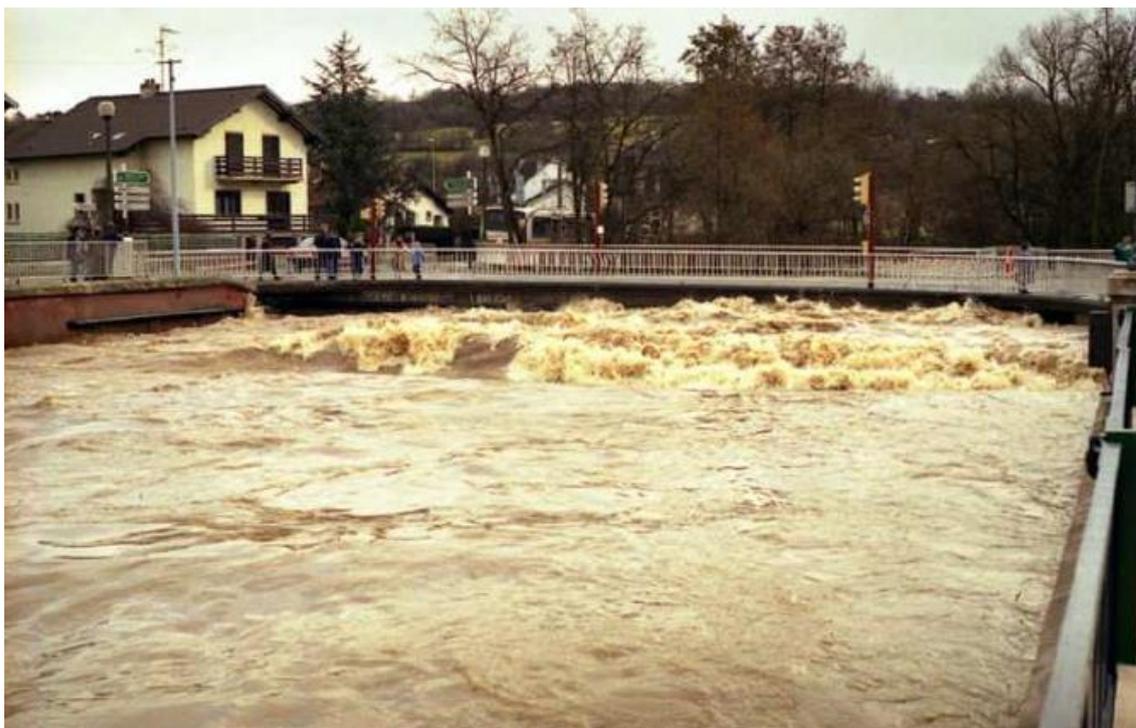


Figure 3-6 : vue amont du pont Richelieu dans Belfort, en février 1990 (source : étude EGIS, Aménagement des berges de la Savoureuse, 2015)

3.1.2 Synthèse des repères de crue

Le modèle hydraulique est dans un second temps calé sur les repères de crue recueillis lors des recherches bibliographiques et lors des visites de terrain. Les repères de crues collectés sont présentés et jugés dans les paragraphes ci-dessous, pour les deux évènements considérés (1990 et 2007). Une analyse critique de ces repères est réalisée pour ne conserver que les repères pertinents pour le calage du modèle. Les couleurs des colonnes du tableau correspondent à la fiabilité théorique du repère compte tenu des informations à notre disposition.

Il est à noter qu'une crue significative a été observée en 2018. Cette dernière n'a pas été retenue pour caler le modèle car elle était débordante sur la partie amont du bassin versant, aujourd'hui bien documenté et non débordante sur sa partie aval.

a) Crue de 1990

Dans un premier temps, l'ensemble des repères recensés pour le calage de l'évènement de 1990 est présenté dans ce présent paragraphe.

Cours d'eau	Commune	Repères de crue	Source	Cote mesurée	Observations	Prise en compte calage
Rhône	Chapelle sous Chaux	RHO-CHAP-6	DHI 2006	405.85		Oui
Rhône	Chapelle sous Chaux	RHO-CHAP-8	DHI 2006	405.09		Oui
Rhône	Chapelle sous Chaux	RHO-CHAP-9	DHI 2006	409.63		Oui
Rhône	Sermamagny	RHO-SERM-12	DHI 2006	394.58	Pont refait directement en aval. Problème de cohérence entre les deux repères pourtant proches	Oui, associé à une précision plus faible
Rhône	Sermamagny	RHO-SERM-14	DHI 2006	394.95		
Rosemontoise	Rougegoutte	ROS-ROUG-10	DHI 2006	448.73	Fortes incohérences avec données topographiques	Fiabilité du repère
Rosemontoise	Rougegoutte	ROS-ROUG-2	DHI 2006	455.66	Peu précis	Précision moyenne
Rosemontoise	Rougegoutte	ROS-ROUG-4	DHI 2006	453.78	Repère dans un méandre très serré	Peu fiable
Rosemontoise	Rougegoutte	ROS-ROUG-6	DHI 2006	450.41		oui
Rosemontoise	Rougegoutte	ROS-ROUG-8	DHI 2006	448.47		oui
Rosemontoise	Eloi	ROS-ELOI-11	DHI 2006	394.67		Oui
Rosemontoise	Eloi	ROS-ELOI-16	DHI 2006	395.34	Inondation par la nappe d'après les fiches	Non
Rosemontoise	Eloi	ROS-ELOI-19	DHI 2006	393.68		Oui
Rosemontoise	Eloi	ROS-ELOI-21	DHI 2006	393.18		oui
Savoireuse	Lepuix	SAV-PUIX-4	DHI 2006	491.04		Oui
Savoireuse	Giromagny	SAV-GIRO-5	DHI 2006	463.81		Oui
Savoireuse	Chaux	SAV-CHAU-9	DHI 2006	425.97		Oui
Savoireuse	Chaux	SAV-CHAU-11	DHI 2006	415.39		Oui
Savoireuse	Sermamagny	SAV-SERM-13	DHI 2006	399.07		Oui
Savoireuse	Valdoie	SAV-VALD-16	DHI 2006	375.35		Oui
Savoireuse	Valdoie	SAV-VALD-17	DHI 2006	370.37		oui
Savoireuse	Danjoutin	Hydra_Danj	Hydratec 1994	349.91		Oui
Savoireuse	Andelnans	Hydra_Ande-1	Hydratec 1994	344.7		Oui
Savoireuse	Andelnans	Hydra_Ande-2	Hydratec 1994	344.39		Oui
Savoireuse	Andelnans	SAV-ANDE-18	DHI 2006	343.69		Oui

Cours d'eau	Commune	Repères de crue	Source	Cote mesurée	Observations	Prise en compte calage
Savoireuse	Sevenans	HYDRA-SEV	Hydratec 1994	341.42		Oui
Savoireuse	Sevenans	SAV-SEVE-20	DHI 2006	341		Oui
Savoireuse	Sevenans	SAV-SEVE-20	DHI 2006	341		Oui
Savoireuse	Bermont	Hydra-Berm-1	Hydratec 1994	337.82		Oui
Savoireuse	Trévenans	Hydra-Trev	Hydratec 1994	336.75		Oui
Savoireuse	Châtenois les Forges	SAV-CHAT-22	DHI 2006	333.72		oui
Savoireuse	Nommay	SAV-NOMM-25	DHI 2006	326.88		Oui
Savoireuse	Nommay	Entreprise GCC	EDD PMA	326.65		Oui
Savoireuse	Nommay	SAV-NOMM-24	DHI 2006	325.70		Oui
Savoireuse	Nommay	SAV-NOMM-23	DHI 2006	325.45		Oui
Savoireuse	Vieux - Charmont	Hydra94-VX-3	Hydratec 1994	322.01		Précision moyenne
Savoireuse	Vieux - Charmont	Hydra94-VX-2	Hydratec 1994	321.9		Précision moyenne
Savoireuse	Vieux - Charmont	Hydra94-VX-1	Hydratec 1994	321.8		Précision moyenne
Savoireuse	Vieux - Charmont	SAV-CHAR-30	DHI 2006	321.55		Oui
Savoireuse	Vieux - Charmont	SAV-CHAR-27	DHI 2006	321.5		Oui
Savoireuse	Vieux - Charmont	Hydra94-VX-4	Hydratec 1994	321.48		Oui
Savoireuse	Vieux - Charmont	Hydra94-VX-7	Hydratec 1994	321.48	Incohérence avec SAV-CHAR-27 qui est en aval	Précision moyenne
Savoireuse	Vieux - Charmont	SAV-CHAR-29	DHI 2006	321.37	Ce repère non cohérent	Non
Savoireuse	Vieux - Charmont	Hydra94-VX-5	Hydratec 1994	320.86	Repère non cohérent	non
Savoireuse	Vieux - Charmont	Hydra94-VX-6	Hydratec 1994	320.82		Précision moyenne
Savoireuse	Vieux - Charmont	SAV-CHAR-28	DHI 2006	320.63		Oui
Savoireuse	Vieux - Charmont	025000174	DDT 25	320.62		Oui

Tableau 1 : analyse des repères de crue de 1990

Une analyse sur la fiabilité des repères de crue, leur cohérence avec les éléments topographiques à notre disposition et les repères localisés à proximité a été réalisée. Les principales anomalies constatées sont présentées et discutées ci-après :

- **ROS-ROUG-4** : ce repère est jugé peu fiable car il est localisé dans une singularité hydraulique, dans l'extrado d'un méandre très serré aménagé. Le changement brutal de direction induit une élévation de la ligne d'eau induit la transformation de l'énergie cinétique en énergie potentielle : le mur arrête l'écoulement et toute sa vitesse se transforme en hauteur. Dans la réalité, un bourlet se crée qui n'est pas numériquement représenté par le modèle hydraulique. Ce phénomène peut entraîner localement une élévation de hauteur comprise entre 5 cm et 20 cm. Dans ces conditions, des battements très importants de la ligne d'eau ont du être observés, liés à la turbulence de l'écoulement rendant la fiabilité de la mesure faible.
- **ROS-ROUG-10**. La fiche du repère de crue fait état d'une cote de repère de crue à 448.73, correspondant à une lame d'eau de 20cm s'écoulant sur la route. La maille du modèle au droit de ce point de mesure est associée à une cote de fond de 448.81, ne permettant logiquement pas le calcul d'une cote d'eau à 448.73. Une différence importante entre la cote de la route levée dans les fiches de repère de crue (448.53) et la cote de la route d'après le MNT (448.81) est constatée. Ces différences posent les questions de la fiabilité de ce repère et de la précision du MNT dans cette zone. Ce repère est donc retiré.
- **ROS-ELOI-16** : des écarts de 57 cm ont été constatés sur ce repère. L'analyse de la fiche de repère de crue spécifie bien que les débordements observés en 1990 dans ce secteur étaient générés par des remontées de nappe, non modélisées par le modèle hydraulique. Il est donc normal de trouver des différences pour ce repère de crue qui sera par la suite retiré de l'analyse.

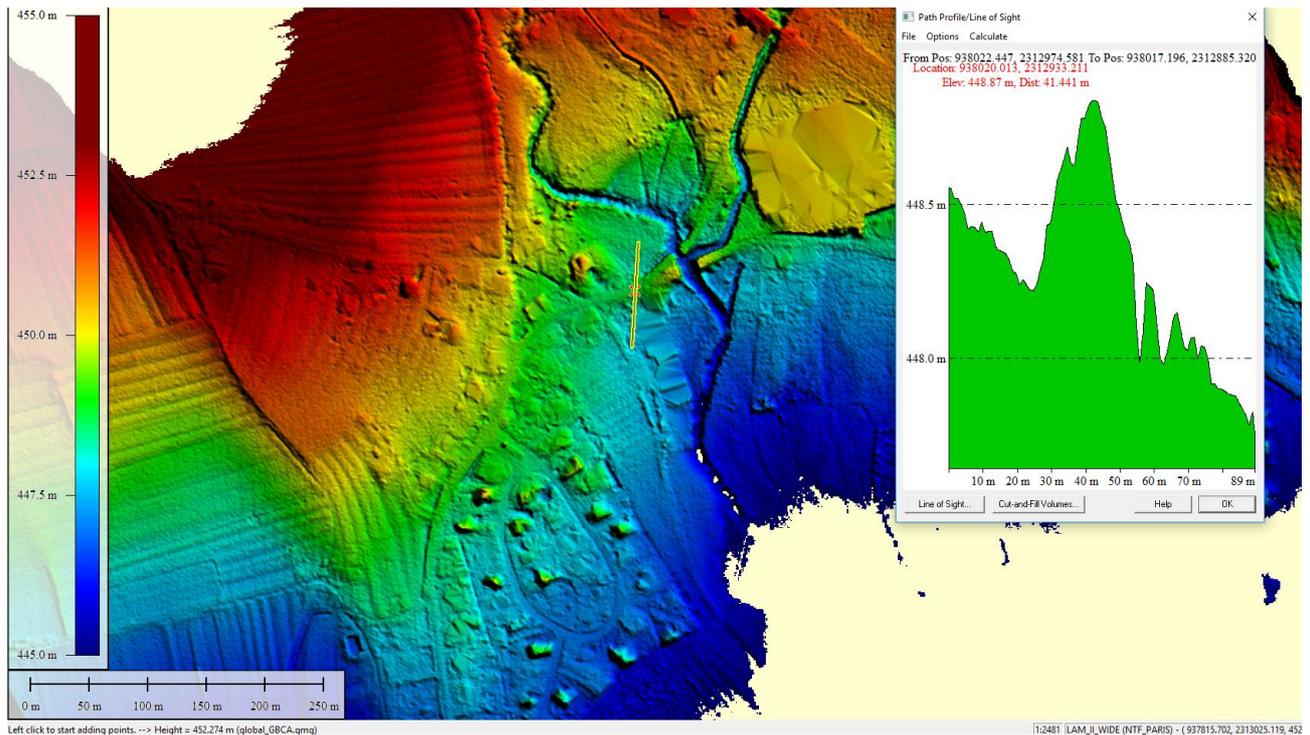


Figure 3-7 : MNT au droit du repère de la route de Chaux à Rougegoutte (ROS-ROUG-10)

- **Repères à Vieux Charmont** : Il est difficile de faire le tri sur les repères existants à Vieux Charmont. Des écarts importants peuvent en effet être relevés pour les différents repères en fonction des sources d'information. La carte ci-après synthétise ainsi les repères énumérés dans l'étude DHI de 2006 et dans l'étude hydratec de 1994. L'analyse de ces repères montrent :
 - Une réelle cohérence entre les repères à proximité de la Savoureuse, à savoir les repères 27 et 28 de DHI et les repères 4 de l'étude hydratec. Ces points sont donc jugés fiables et seront conservés dans la phase de calage. Le repère Hydra-VX-7 localisé légèrement à l'amont est associé à une cote inférieure. La précision du repère est donc jugée moyenne.
 - Une certaine cohérence entre les trois repères hydratec 1994 à l'amont de la zone (repères 1,2 et 3). Compte tenu des incertitudes de mesure de ces repères qui peuvent être estimés de l'ordre de 10 cm, ces repères traduisent une cohérence qui revient à considérer que la cote à l'amont du terrain de foot était probablement aux alentours de 321.9 m IGN69.
 - Des écarts beaucoup plus importants sont constatés en rive gauche de la Savoureuse Rue Brognard. Sur la rue Brognard, des écarts de 75 cm sont constatés. Il est difficile en première approche de classer les repères en fonction de leur fiabilité. Cependant, une analyse du MNT au droit de la route permet de constater que cette dernière constitue un seuil en travers de l'écoulement ayant une cote de 321.10 m IGN69. Le repère hydratec n°5 à la cote 320.86 m, localisé à l'amont de la route apparaît dès lors peu physique et sera écarté. Le repère DHI n°30 est quant à lui associé à une cote de 321.55 m. Cette cote apparaît plus élevée que les levés localisés à l'amont du pont de la savoureuse. Ce repère est donc probablement surestimé. Il sera toutefois conservé, mais avec une fiabilité dégradée. Il en est de même pour le repère hydratec n°6. Le repère DHI n°29, défini dans

les fiches de repères de crue par une marque à 80 cm sur le mur de la maison, n'apparaît pas cohérent avec les cotes du TN d'après le MNT dans le secteur, la voirie ayant une élévation de 320 m ce qui entrainerait un repère à la cote 320.80 m, plus cohérents avec les repères à proximité. Ce repère sera donc retiré de l'analyse.

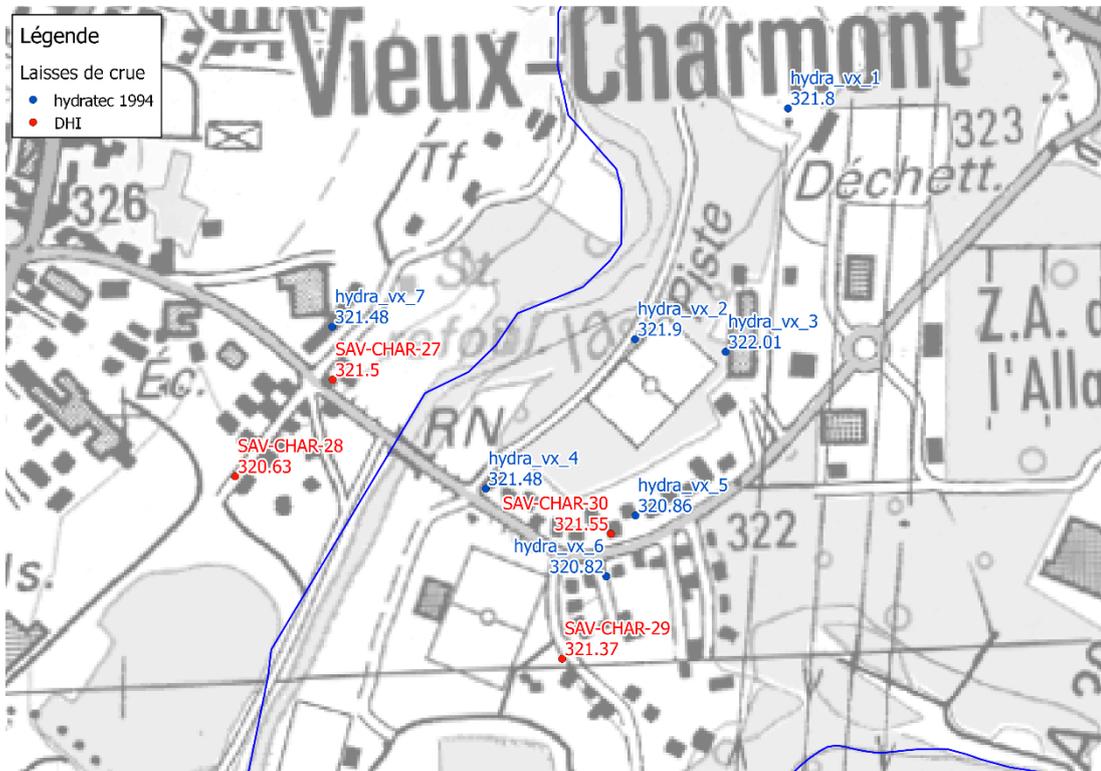


Figure 3-8 : repères de crues recensés sur Vieux Charmont

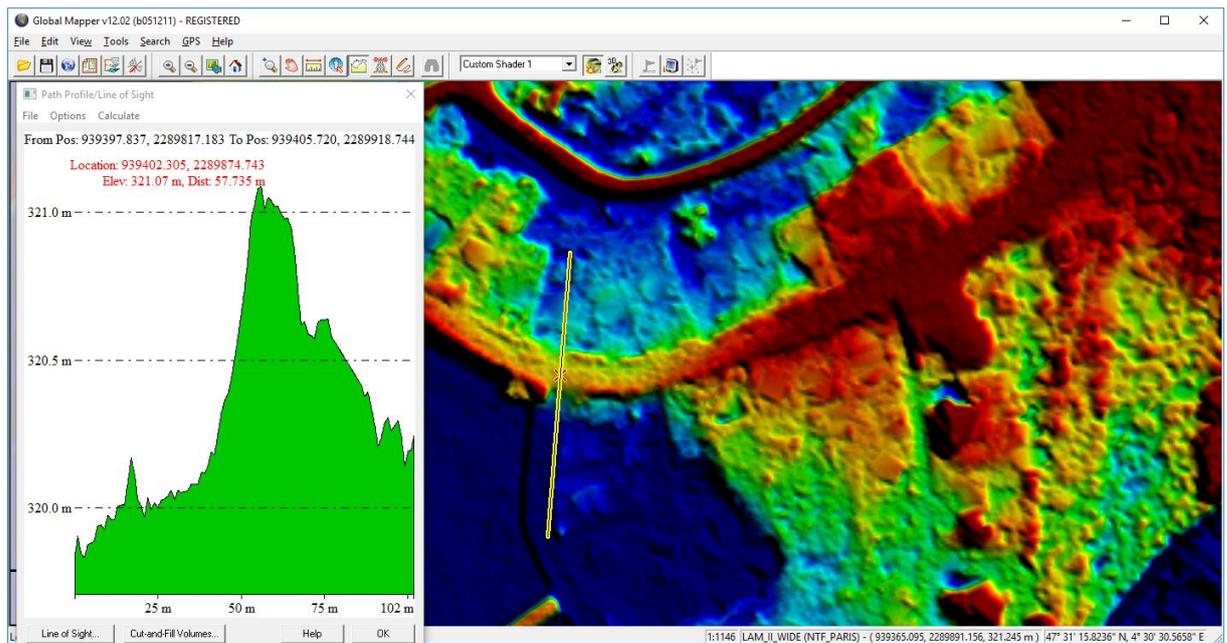


Figure 3-9 : MNT au droit de la rue Brognard

b) Crue de 2007

Dans un premier temps, l'ensemble des repères recensés pour le calage de l'évènement de 2007 est présenté dans ce présent paragraphe.

Repères de crue	Source	Cote mesurée	Commentaire	Prise en compte calage
RHO-CHAP-10	DHI 2006	408.59	Information : 10 / 20 cm d'eau Cote TN = 408.7 Cote mesurée < Cote TN	Jugée douteux
RHO-CHAP-5	DHI 2006	409.14	Surement ruissellement	Non
RHO-CHAP-7	DHI 2006	404.3		Oui
RHO-SERM-11	DHI 2006	393.3		Oui
RHO-SERM-13	DHI 2006	393.61		Oui
ROS-ELOI-12	DHI 2006	394.56		Oui
ROS-ROUG-1	DHI 2006	455.37	Même niveau de la rivière	Précision ?
ROS-ROUG-3	DHI 2006	455.27		Précision ?
ROS-ROUG-5	DHI 2006	453.75	Repère dans un méandre très serré	Peu fiable
ROS-ROUG-7	DHI 2006	448.85		Oui
ROS-ROUG-9	DHI 2006	446.84	Peu précis	Précision moyenne
SAV-ANDE-19	DHI 2006	342.84	Sur court de tennis, probablement débordement réseau assainissement	Non
SAV-CHAU-10	DHI 2006	425.76		Oui
SAV-CHAU-12	DHI 2006	414.22		Oui
SAV-CHAU-8	DHI 2006	426		Oui
SAV-GIRO-7	DHI 2006	462.27		Oui
SAV-PUIX-3	DHI 2006	489.64		Oui
SAV-SERM-14	DHI 2006	395.36		Oui
SAV-ANDE-21	DHI 2006	339.51	Peu précis	Peu fiable
SAV-VALD-15	DHI 2006	374.54		Oui

Tableau 2 : analyse des repères de crue de 2007

Une analyse sur la fiabilité des repères de crue, leur cohérence avec les éléments topographiques à notre disposition et les repères localisés à proximité a été réalisée. Les principales anomalies constatées sont présentées et discutées ci-après :

- **RHO-CHAP-5** : Ce repère de crue, mesuré en 2007 à la cote de 409.14 m est localisé à l'aval du repère RHO-CHAP-10 mesuré à la cote de 408.9 m. Il est impossible que le niveau aval soit 1 mètre plus haut que le repère amont. Il apparaît donc probable que le repère RHO-CHAP-5 ne soit pas induit par les débordements du Rhône mais par le ruissellement, non modélisé dans le cadre de cette étude. Ce repère est donc retiré de l'analyse.
- **ROS-ROUG-9** : Le repère de crue dans ce secteur est issu d'un témoignage d'un riverain qui mentionne 5cm d'eau dans le champ, au-dessus de la zone en terre. Ce repère est jugé par DHI comme peu fiable. L'analyse de l'élévation du champ à partir du MNT montre un terrain en pente, avec une élévation comprise dans ce secteur entre 447.3 m et 446.5 m.

- **ROS-ROUG-3** : Ce repère est à considérer avec le repère ROS-ROUG-1, localisé au même niveau de la rivière mais sur la berge opposée. L'analyse de ces deux repères nous donne les informations suivantes. Le repère en rive droite est mesuré en 2007 à la cote de 455.37 m. Le repère en rive gauche est mesuré à la cote de 455.27 m. Cette observation peut conduire à deux interprétations :
 - La rivière ne déborde donc pas dans ce secteur de manière identique sur les deux berges. Deux explications physiques pourraient expliquer les niveaux d'eau plus importants constatés en rive droite :
 - la présence d'eau en provenance de l'amont en rive droite, issue des débordements de la Rosemontoise au niveau du coude très marqué de la rivière quelques centaines de mètres plus à l'amont ;
 - la présence d'un merlon de protection à l'amont de la parcelle habitée en rive gauche qui limite les arrivées d'eau au droit du repère.
 - Des incertitudes de mesures du repère.
- **SAV-ANDE-19** : Ce repère correspond à la présence d'une lame d'eau de 8 cm sur le terrain de tennis, à la cote de 342.84 mIGN69. Or sur ce tronçon la Savoureuse est endiguée à partir du pont et aucun débordement de la Savoureuse n'a été observé en 2007 sur ce linéaire. La cote de la digue au droit du terrain de tennis est de 343.75 m, soit presque un mètre au-dessus du niveau de repère de crue. Il est donc probable pour que ce repère soit induit par des problématiques d'assainissement et de gestion des eaux pluviales, non pris en compte dans la modélisation. Ce repère sera donc retiré de l'analyse.
- **SAV-ANDE-21** : un manque de fiabilité du repère a été identifié, ce dernier étant localisé dans une zone très peu fréquentée et loin d'accès ou par la chronologie de la crue avec une observation par un riverain hors période de pic. Ce repère avait été jugé peu fiable par DHI lors de la réalisation du PPRI en 2016.

3.1.3 Hydrologie aux stations de suivi

Les hydrogrammes injectés sont comme précisé plus haut ceux qui ont été définis dans l'étude hydrologique. Un contrôle est fait au niveau des stations hydrométriques de suivi à Belfort, à Vieux Charmont et à Chaux pour s'assurer que les hydrogrammes historiquement mesurés soient bien retrouvés.

3.2 AJUSTEMENT DE LA TOPOGRAPHIE

Pour rappel, les données qui ont permis la construction du modèle sont avant tout issues de plans des ouvrages aujourd'hui existants et des données LIDAR du MNT datant de 2007. Les principales corrections qui ont été apportées pour approcher la topographie de 1990 et de 2007 sont détaillées dans le rapport de topographie et sont rappelées le tableau ci-dessous.

Cours d'eau	Commune	Aménagement	Date	Scénario	Modélisation dans l'état antérieur
Savoireuse	Lepuix	Muret de protection en rive droite à l'arrière des maisons, le long de la carrière	1990-2007	2007	Absence de muret : liaison échange à la cote du TN actuel
	Giromagny	Merlon en rive gauche à l'amont de la RD 14	1990-2007	2007	Absence de merlon : liaison échange à la cote du TN actuel
		Muret de 40cm de haut en rive droite du camping	1990-2007	2007	Absence de muret : liaison échange à la cote du TN actuel
		Muret de protection en rive droite à l'aval de la RD 14	1990-2007	2007	Absence de muret : liaison échange à la cote du TN actuel
		Merlon de protection en rive gauche	1990-2007	2007	Absence de merlon : liaison échange à la cote du TN actuel
		Muret de protection en rive droite à l'arrière de la zone d'activité de la Lainière	1990-2007	2007	Absence de muret : liaison échange à la cote du TN actuel
		Nouvelle passerelle de Giromagny + Piste cyclable vers Sermamagny	Après 2007	Actuel	Suppression de l'ouvrage
	Chaux	Mise en place des bassins	2014	Actuel	Absence des bassins – liaison à la cote TN actuel
		Aménagements de seuils + fixation du Profil en long par des enrochements	Après 1990	2007	Non pris en compte
	Sermamagny	Recalibrage du lit à l'amont de Sermamagny	Après 1990	2007	Reconstitution d'un profil théorique à partir du profil amont
		Mise en place d'un merlon en rive droite à l'amont de Sermamagny, rue de la Savoieuse	Après 1990	2007	Absence du merlon : liaison échange à la cote du TN actuel
		Aménagements de seuils + fixation du Profil en long par des enrochements, en amont du Monceau	Après 1990	2007	Non pris en compte
		Merlon en terre végétal en amont de Sermamagny	Après 1990	2007	Absence du merlon : liaison échange à la cote du TN actuel
		Mise en place des bassins	2014	Actuel	Absence des bassins – liaison à la cote TN actuel
	Valdoie	Rehausse mur en rive droite et rive gauche entre la passerelle et la RD 465	Après 1990	2007	Ajustement de la cote durant la phase de calage pour retrouver les repères de crue
		Rehausse berges RD et RG entre Rue de Blumberg et la passerelle + Modification de la passe à poissons	Après 1990	2007	Ajustement de la cote durant la phase de calage pour retrouver les repères de crue

Cours d'eau	Commune	Aménagement	Date	Scénario	Modélisation dans l'état antérieur
		Petits murets de protection en rive gauche le long des habitations en amont de la rue de Blumberg et en aval du pont Carnot	Après 1990	2007	Ajustement de la cote durant la phase de calage pour retrouver les repères de crue
	Belfort	Pont Parmentier	1992	2007	Absence du pont
		Reconstruction du Pont du Magasin (augmentation du tirant d'air d'environ 70 cm)	1991	2007	Aucune modification (cote actuelle retenue) car pas de données précises sur l'ancien pont
		Passerelle Gambetta	2005	2007	Absence de la passerelle
		Urbanisation du champ de Mars, lycée, parc à ballon ...	Après 1990	2007	TN abaissé de 50 cm
		Serre municipale en rive droite	1998	2007	-
		Mur et merlon en rive droite entre pont du champ de mars et pont du magasin	Après 1990	2007	Absence du mur et merlon : liaison échange à la cote du TN
		Mur en rive gauche à l'aval du pont du champ de Mars	Après 1990	2007	Absence du mur et merlon : liaison échange à la cote du TN de l'époque
		Echangeur autoroute	2005	2007	-
		Pont de Gaulle et galerie Marchande	2002-2003	2007	Modification du pont
		STEP	1996	2007	-
	Danjoutin	Urbanisation (lotissement du moulin)	Après 1990	2007	Modification du coefficient du Strickler
	Andelnans	ZAC des Prés – extension	Après 1990	2007	Modification du coefficient du Strickler
		ZAC des Chênes	1992	2007	Modification du coefficient du Strickler
		Reconstruction du pont	Après 1990	2007	Aucune modification
		Merlon en rive droite du pont	Après 1990	2007	Absence du merlon : liaison échange à la cote du TN
	Sevenans	Merlon à l'aval de l'IUT	Après 1990	2007	Absence du merlon : liaison échange à la cote du TN
		Modification de l'échangeur autoroute A36-RN1019	2017-2020	En cours	-
	Trévenans	Rehaussement de la digue près du Castorama	Après 1990	2007	Ajustement de la cote durant la phase de calage pour retrouver les repères de crue
		Viaduc TGV	Après 2007	Actuel	Aucun changement de modèle
	Châtenois-les-Forges	Digues en rive droite entre Châtenois les Forges et Nommay	Après 1990	2007	Absence des digues – liaison à la cote TN actuel

Cours d'eau	Commune	Aménagement	Date	Scénario	Modélisation dans l'état antérieur
		Bassin de rétention + système d'endiguement + ajout d'un seuil supplémentaire de sécurité en 2002-2003	Entre 1998 et 2001	2007	Absence du bassin et digues – liaison à la cote TN actuel
	Vieux Charmont	Rocade Nord	1994	2007	-
		Remplacement des deux buses DN500 entre le bras mort de l'Allan et la Savoureuse par un dalot de 2x2m	2012	2007	Modélisation avec deux buses
		Destruction du seuil au niveau de la confluence avec l'Allan qui existait en 1990	Post 1990	2007	Seuil pris en compte
		Digues de protection contre les inondations	1998 – 2001	2007	Absence de digues – liaison à la cote TN actuel
Rosemontoise	Vescemont	Remblaiement d'un secteur le long de de la Rosemontoise	Après 1990	2007	-
	Rougegoutte	Enrochements sur la Rosemontoise	Après 1990	2007	-
		Merlon de protection le long du Rougegoutte	Après 1990	2007	Absence de merlon – liaison à la cote TN actuel
	Grosmagny	Bassins de rétention	Après 1990, mise en service en 2018	Actuel	Absence de bassin – liaison à la cote TN actuel
	Eloie	Remblaiement des lotissements en rive droite de la Rosemontoise	Après 1990	2007	Abaissement du TN de 20cm
		Evolution de la zone de l'ancienne gravière en cours	En cours		-
	Valdoie	Digue en rive droite à l'amont de la RD5	Après 1990	2007	Absence de la digue – liaison à la cote TN actuel
		Rectification remblais de protection CES et ZAC en RD à l'aval de l'aire d'accueil	Après 1990	2007	Ajustement de la cote durant la phase de calage pour retrouver les repères de crue
Création de la desserte du pays sous Vosgien avec remblais et ouvrages de décharge		Après 1990	2007	En dehors du modèle	
Rhôme	Chapelle sous Chaux	Enrochements au niveau des ponts	Après 1990	2007	-
	Sermamagny	Réfection de l'ouvrage du pont de la RD24	2003-2004	2007	Ajustement de la cote durant la phase de calage pour retrouver les repères de crue

Tableau 3 : Ajustements topographiques

3.3 RESULTATS DU CALAGE

3.3.1 Crue de calage : février 1990

a) Hydrogrammes aux stations de suivi

Les figures suivantes présentent les comparaisons des hydrogrammes réellement mesurés en 1990 avec les hydrogrammes modélisés. Elles permettent de voir qu'il y a peu de différences entre les hydrogrammes modélisés et les hydrogrammes mesurés : différence de 2% à Belfort (pointe à 214 m³/s au lieu de 209 m³/s), 6% pour la Rosemontoise et +11% à Vieux Charmont.

Des différences peuvent cependant être observées sur la forme de l'hydrogramme et sur le volume de la crue. La comparaison des hydrogrammes à Belfort permet d'identifier une différence dans la forme de l'hydrogramme, avec une surestimation du volume de la crue à Belfort. La surestimation est d'environ 6% et se traduit par une augmentation de la durée de la crue. Cet écart est jugé satisfaisant car les repères de crues arrivent à être reproduits sur l'intégralité du modèle. Une trop forte incidence du paramètre « volume » sur les écoulements aurait entraînée d'importantes difficultés de calage.

Le graphique de la station de Vieux Charmont intègre également les débits surversant par-dessus la rue Brognard. Le débit maximum simulé de 245 m³/s est 11% plus important que le débit mesuré (218 m³/s). La modélisation sous-estime le volume de la crue de 11%. Compte tenu des multiples échanges, discussions, remises en causes, repères de crues sur le secteur et sur cette station, l'hydrogramme nous apparaît satisfaisant car :

- il permet de retrouver la majorité des repères dans la zone d'étude
- il est sécuritaire, ce qui garantira une marge de sécurité dans un secteur lié à de nombreuses incertitudes.

La comparaison de l'hydrogramme observé à Courcelles les Montbéliard et de l'hydrogramme simulé est représenté sur la Figure 3-13. Il ressort que la forme de l'hydrogramme apparaît cohérent avec les observations. La représentation de l'hydrogramme mesuré avec les points de mesure laisse supposer que le pic de crue n'a pas été mesuré lors de l'évènement de 1990. L'écart observé est de 33 m³/s, correspondant potentiellement à la propagation de l'écart constaté à Vieux Charmont.

La différence, inférieure à 10% nous apparaît suffisante pour mener à bien l'étude hydraulique.

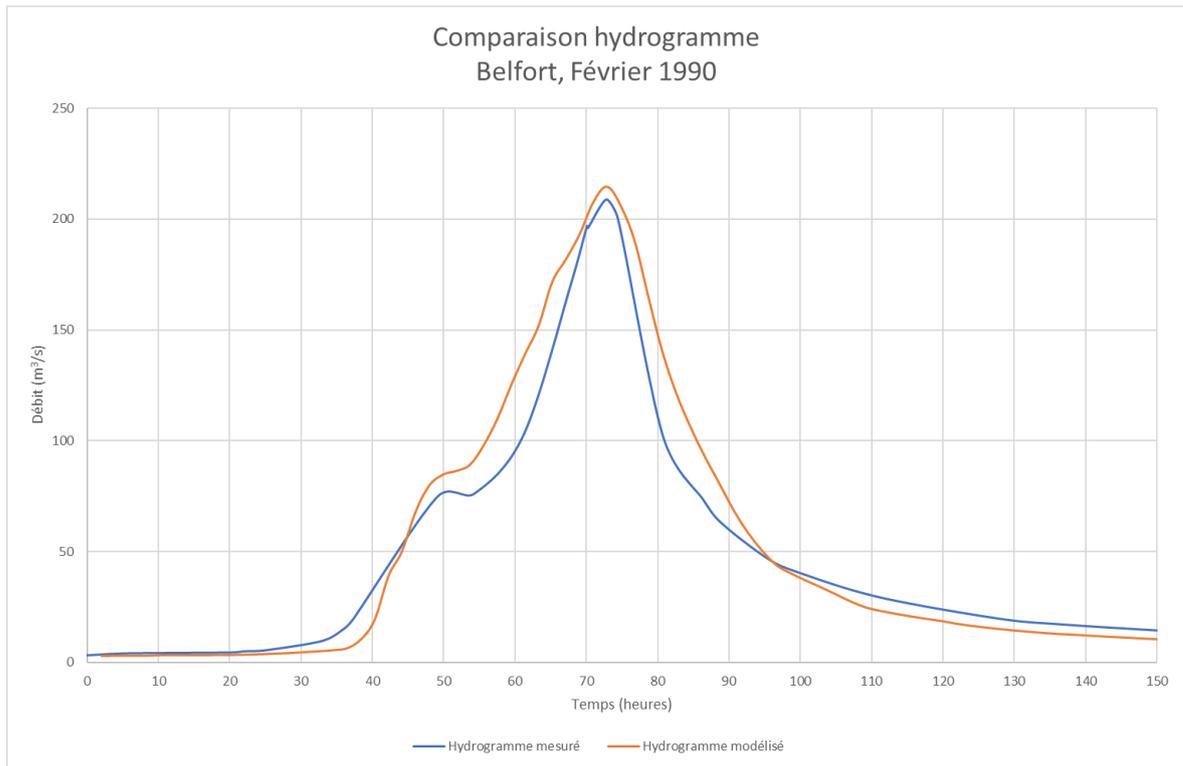


Figure 3-10 : vérification des hydrogrammes à Belfort pour la crue de février 1990

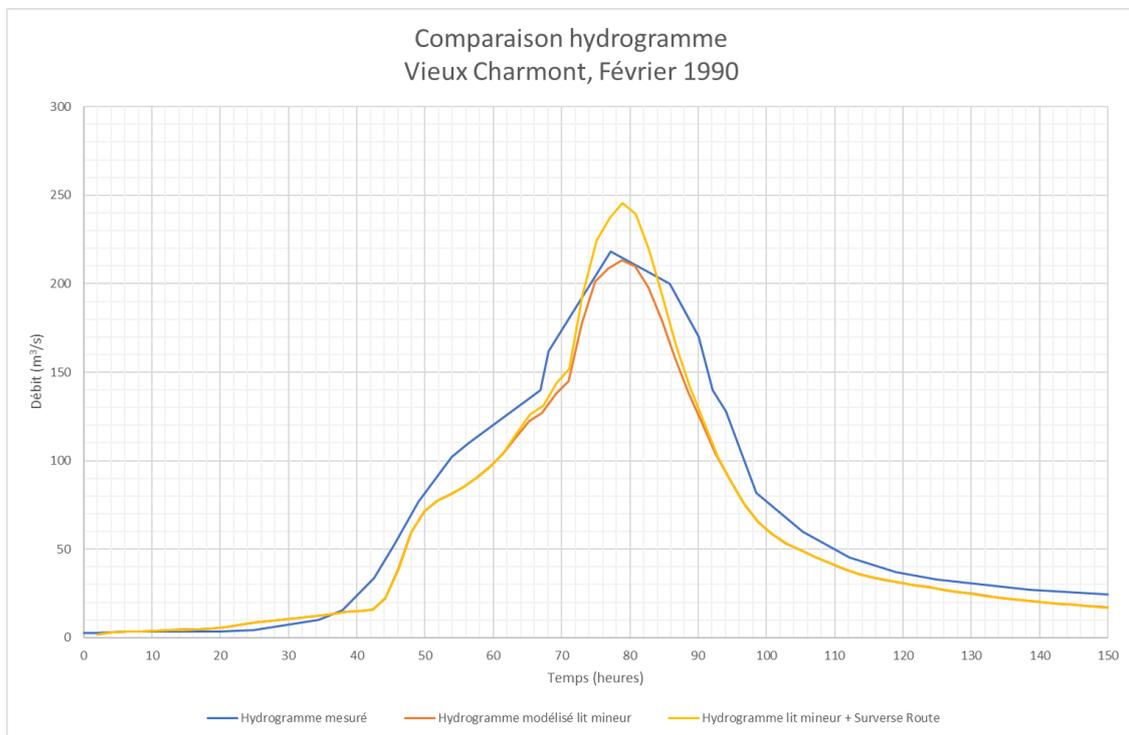


Figure 3-11 : vérification des hydrogrammes à Vieux Charmont pour la crue de février 1990

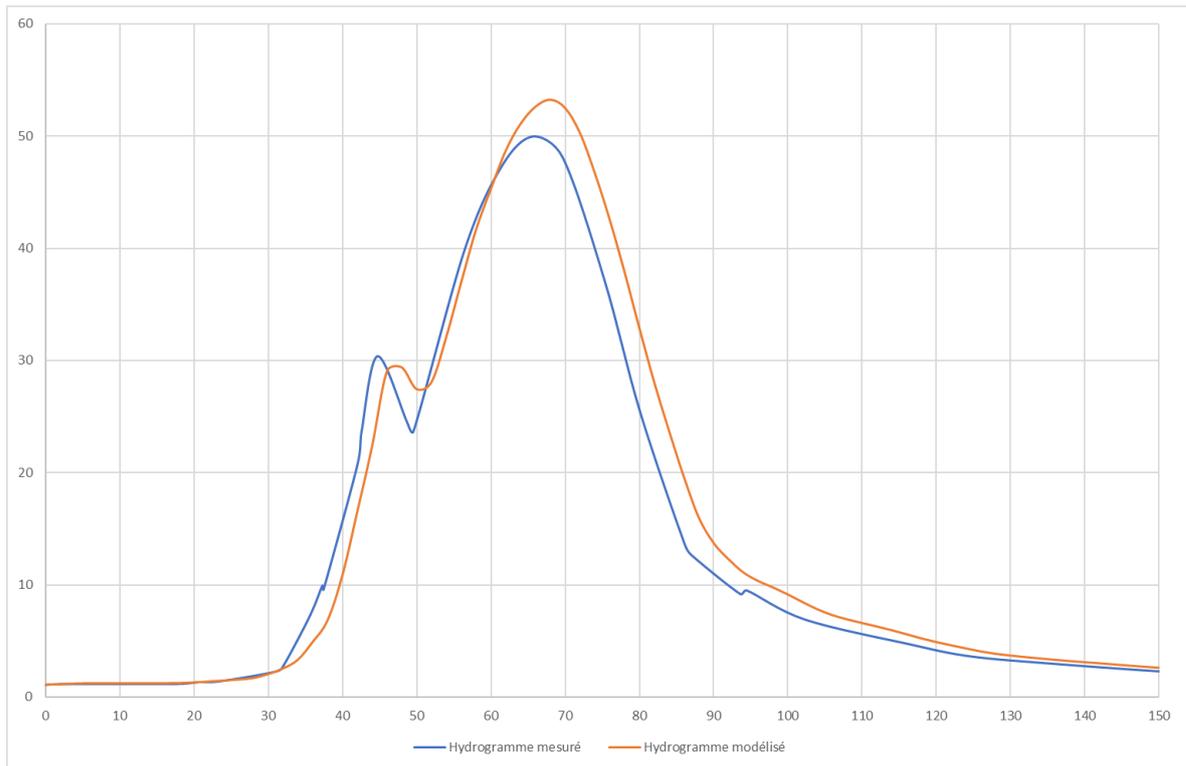


Figure 3-12 : vérification des hydrogrammes à Chaux, Rosemontoise, crue de février 1990

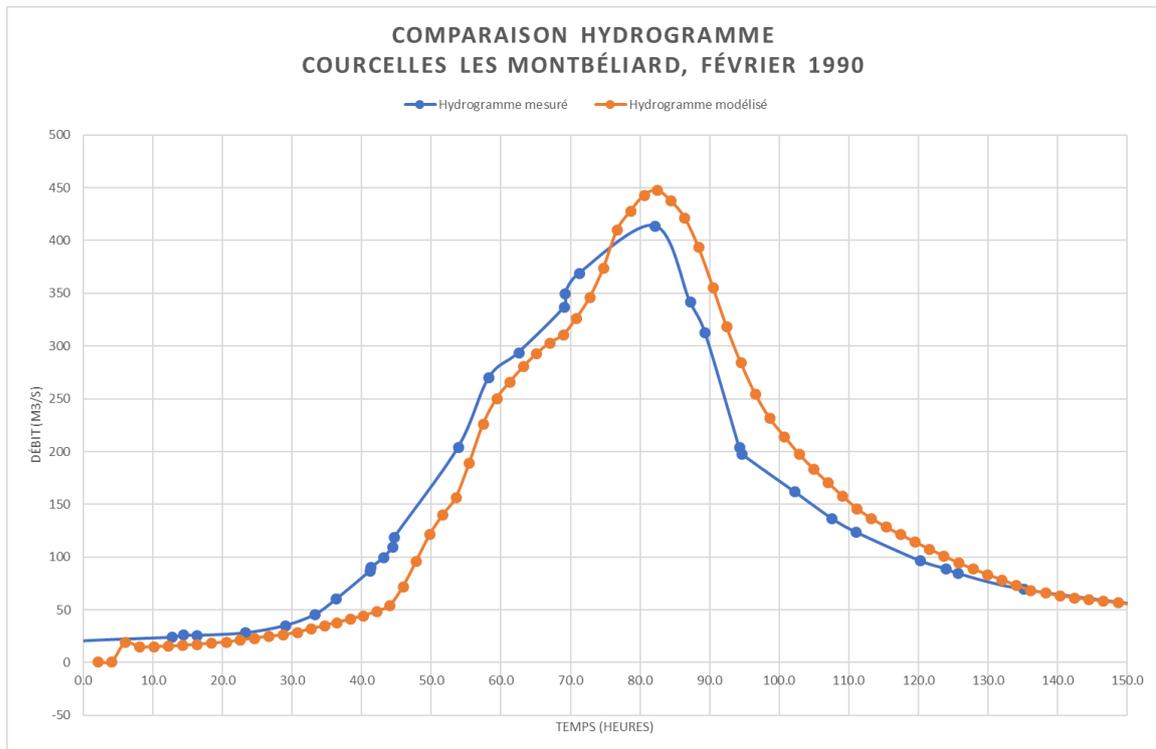


Figure 3-13 : vérification des hydrogrammes à Courcelles les Montbéliard

b) Repères de crues

La cartographie de la zone inondable pour la crue de février 1990 est disponible en annexe 1. Ces cartes représentent la zone inondable modélisée pour la crue de 1990, les repères de crue et les informations collectées lors des entretiens.

Les résultats du calage aux repères de crue sont les suivants et sont également repris dans la cartographie.

Repères de crue	Fiabilité repère	Cote mesurée	Cote modélisée	Différence	Commentaires
RHO-CHAP-6		405.85	405.74	-0.11	
RHO-CHAP-8		405.09	404.97	-0.12	
RHO-CHAP-9		409.63	409.53	-0.1	
RHO-SERM-12	Repère douteux	394.58	394.51	-0.07	
ROS-ELOI-11		394.67	394.86	0.19	
ROS-ELOI-19		393.68	393.63	-0.05	
ROS-ELOI-21		393.18	393.29	0.11	
ROS-ROUG-2	Peu précis	455.66	455.58	-0.08	
ROS-ROUG-6		450.41	450.32	-0.09	
ROS-ROUG-8		448.47	448.4	-0.07	
HYDRA-SEV		341.42	341.36	-0.06	
SAV-SEVE-20		341	341.13	0.13	
Hydra-Berm-1		337.82	337.85	0.03	
Hydra-Trev		336.75	336.56	-0.19	La digue qui protège Trévenans a été rehaussée après la crue de 1990. Les cotes de la digue antérieures à 1990 n'ont pas été retrouvées.
Hydra_Ande-1		344.7	344.65	-0.05	
Hydra_Ande-2		344.39	344.24	-0.15	
Hydra_Danj		349.91	349.92	0.01	

Repères de crue	Fiabilité repère	Cote mesurée	Cote modélisée	Différence	Commentaires
SAV-ANDE-18		343.69	343.67	-0.02	
SAV-CHAR-27		321.5	321.49	-0.01	
SAV-CHAR-28		320.63	320.61	-0.02	
SAV-CHAR-30		321.55	321.39	-0.16	
Hydra94-VX-3	Précision moyenne	322.01	321.62	-0.39	Ecart peut s'expliquer par la fiabilité du repère
Hydra94-VX-2	Précision moyenne	321.9	321.5	-0.4	Ecart peut s'expliquer par la fiabilité du repère
Hydra94-VX-1	Précision moyenne	321.8	321.99	0.19	
Hydra94-VX-4		321.48	321.28	-0.2	
Hydra94-VX-6	Précision moyenne	320.82	321.36	0.54	Ecart peut s'expliquer par la fiabilité du repère
SAV-CHAT-22		333.72	333.84	0.12	
SAV-CHAU-11		415.39	415.46	0.07	
SAV-CHAU-9		425.97	426.15	0.18	
SAV-GIRO-5		463.81	463.69	-0.12	
SAV-NOMM-23		325.45	325.45	0	
SAV-NOMM-24		325.7	325.63	-0.07	
SAV-NOMM-25		326.88	326.76	-0.12	
SAV-PUIX-4		491.04	491.03	-0.01	
SAV-SERM-13		399.07	399.13	0.06	
SAV-SEVE-20		341	341.13	0.13	
SAV-VALD-16		375.35	375.44	0.09	
SAV-VALD-17		370.37	370.32	-0.05	
025000174		320.62	320.47	-0.15	

Tableau 4 : résultats du calage aux repères de crue (1990)

Il est d'usage de considérer qu'un résultat de calage est valide lorsque la différence entre la cote mesurée et la cote modélisée est inférieure à 20 cm. Cette valeur a été retenue pour prendre en compte les incertitudes qui peut y avoir sur les levés topographiques (précision des données MNT environ 20 cm, précision des levés topographiques terrestres inférieure à 5 cm), sur les données issues des stations hydrométriques, sur les levés des repères de crue (effet de vague, montée par capillarité sur les murs...).

Généralement, la phase de calage permet d'identifier les incohérences de description dans le modèle, dont les plus fréquentes sont :

- Une erreur de représentation d'un ouvrage, d'une digue, de la topographie ...
- Une erreur dans l'analyse hydrologique.

Dans un second temps les ajustements des coefficients de Strickler peuvent également affiner les résultats de modélisation et permettre de retrouver les repères historiques.

Si toutefois des écarts significatifs subsistent après ces phases de contrôle et d'ajustement, ils peuvent alors s'expliquer par :

- Incertitudes liées au repère de crue. Des incertitudes peuvent en effet provenir du relevé du repère, de son emplacement exact, etc...
- Changement de topographie dans le temps avec une difficulté à retrouver l'état originel du cours d'eau et des ouvrages hydrauliques ;
- Incertitudes liées aux phénomènes physiques à l'origine du repère (par exemple : ruissellement ou remontées de nappe et non débordement de cours d'eau) ;
- Débordements liés à des phénomènes physiques non modélisées. C'est notamment le cas lorsque les débordements sont induits par des embâcles qui ne peuvent pas être numériquement représentés ou lorsqu'il y a un fort changement de direction en régime torrentiel, hydra ne modélisant la ligne d'eau qu'en 1D ne tenant pas compte de ce genre de singularité.

Cette grille de lecture va être utilisée pour justifier les écarts restants.

Globalement, les écarts supérieurs à 20cm apparaissent sur les repères jugés moins précis car ils étaient associés à des incohérences avec d'autres repères voisins ou avec le TN retenu pour la modélisation. On retiendra notamment :

- Un repère sur le Rhône (RHO-SERM-14) est localisé à l'amont d'un ouvrage hydraulique refait après 1990. Nous ne disposons d'aucun plan de l'ouvrage hydraulique antérieur. Des hypothèses ont été posées pour essayer de retrouver le repère amont, mais de manière peu satisfaisante, les écarts résiduels obtenus étant de -45 cm.
- ROS-ROUG-10. La fiche du repère de crue fait état d'une cote de repère de crue à 448.73, correspondant à une lame d'eau de 20cm s'écoulant sur la route. La maille du modèle au droit de ce point de mesure est associée à une cote de fond de 448.81, ne permettant logiquement pas le calcul d'une cote d'eau à 448.73. La cote simulée par le modèle est de 449.12, ce qui correspond à une lame surversante de 30 cm sur la route, soit 10 cm de plus que ce qui avait été observé en 1990. Au bilan, l'importance de l'écart est ici principalement induite par la différence entre la cote de la route levée dans les fiches de repère de crue (448.53) et la cote de la route d'après le MNT (448.81). Ces différences posent les questions :
 - de la fiabilité de ce repère ;
 - de la précision du MNT dans cette zone.

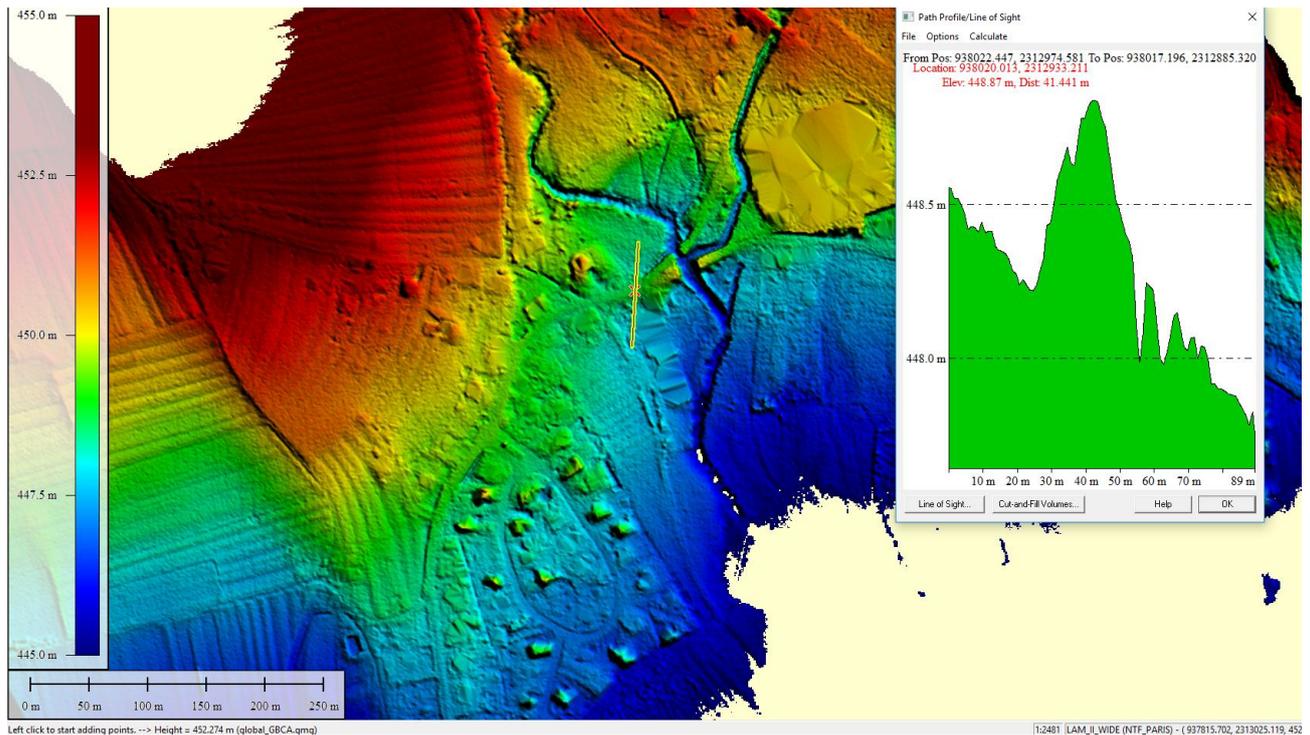


Figure 3-14 : MNT au droit du repère de la route de Chaux à Rougegoutte

Sur la Savoureuse à Vieux Charmont, des écarts importants apparaissent avec les repères hydratec 1994, jugés peu précis car peu cohérents entre eux et avec les repères de DHI.

Les figures suivantes présentent les profils en long de la Savoureuse et permettent de voir que plusieurs ouvrages sont en charge tels que les passerelles des Lettres et des Arts, le pont Richelieu dans Belfort. En revanche, il n'y a pas de débordements dans la traversée du centre-ville de Belfort mais en amont dans le secteur du champ de Mars et des serres municipales. Le profil en long de Belfort permet également de voir l'impact du seuil de l'Arsot. En dehors de la traversée de Belfort, la majorité des ouvrages qui se situent dans les centres des communes sont pour la plupart limitants. Seuls les ouvrages importants tels que voie ferrée ou grandes infrastructures routières n'ont pas d'impacts. Des débordements ont lieu sur la grande majorité du linéaire comme en témoigne également la cartographie.

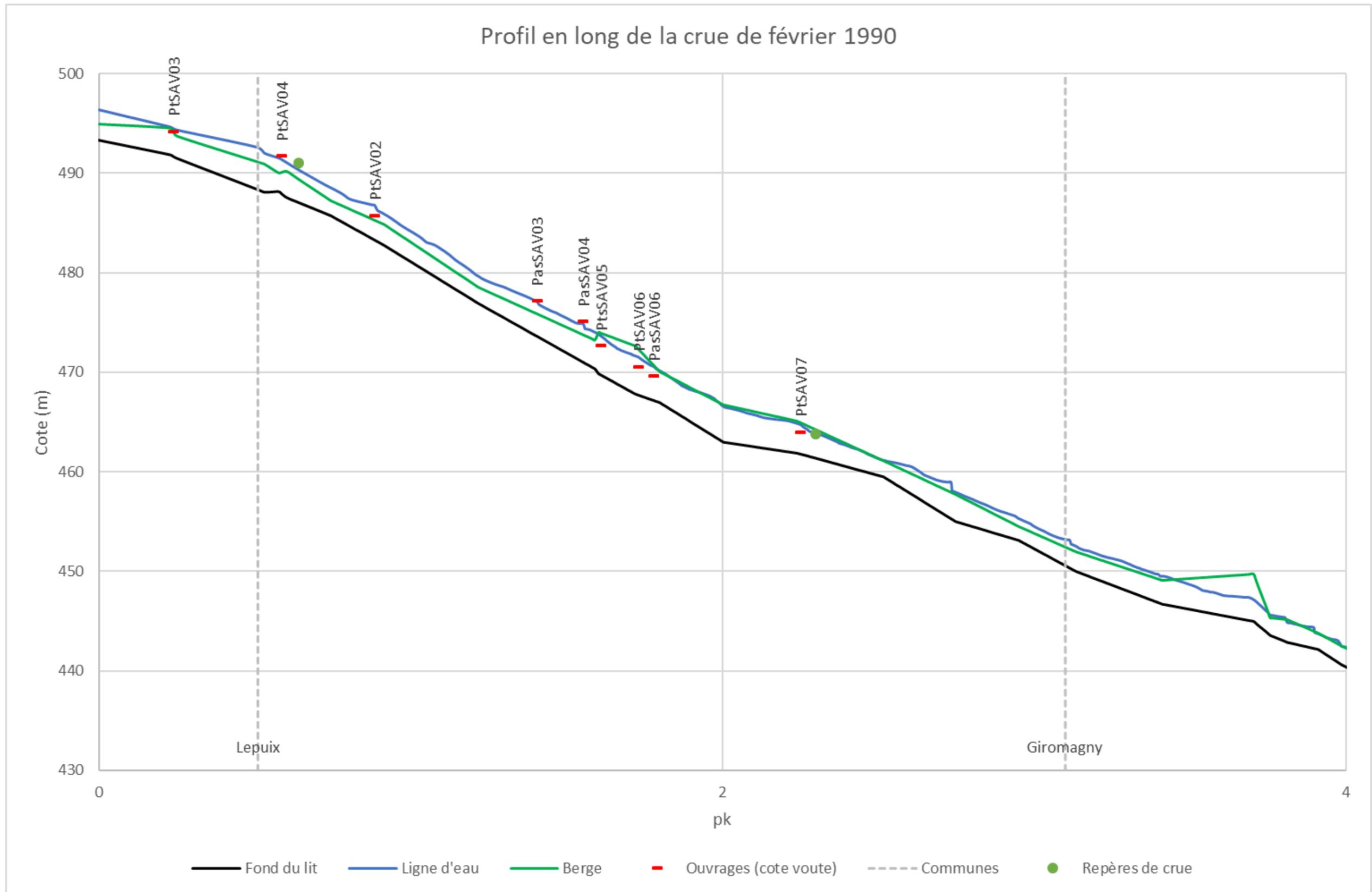


Figure 3-15 : profil en long de la Savoureuse, février 1990 (amont 1)

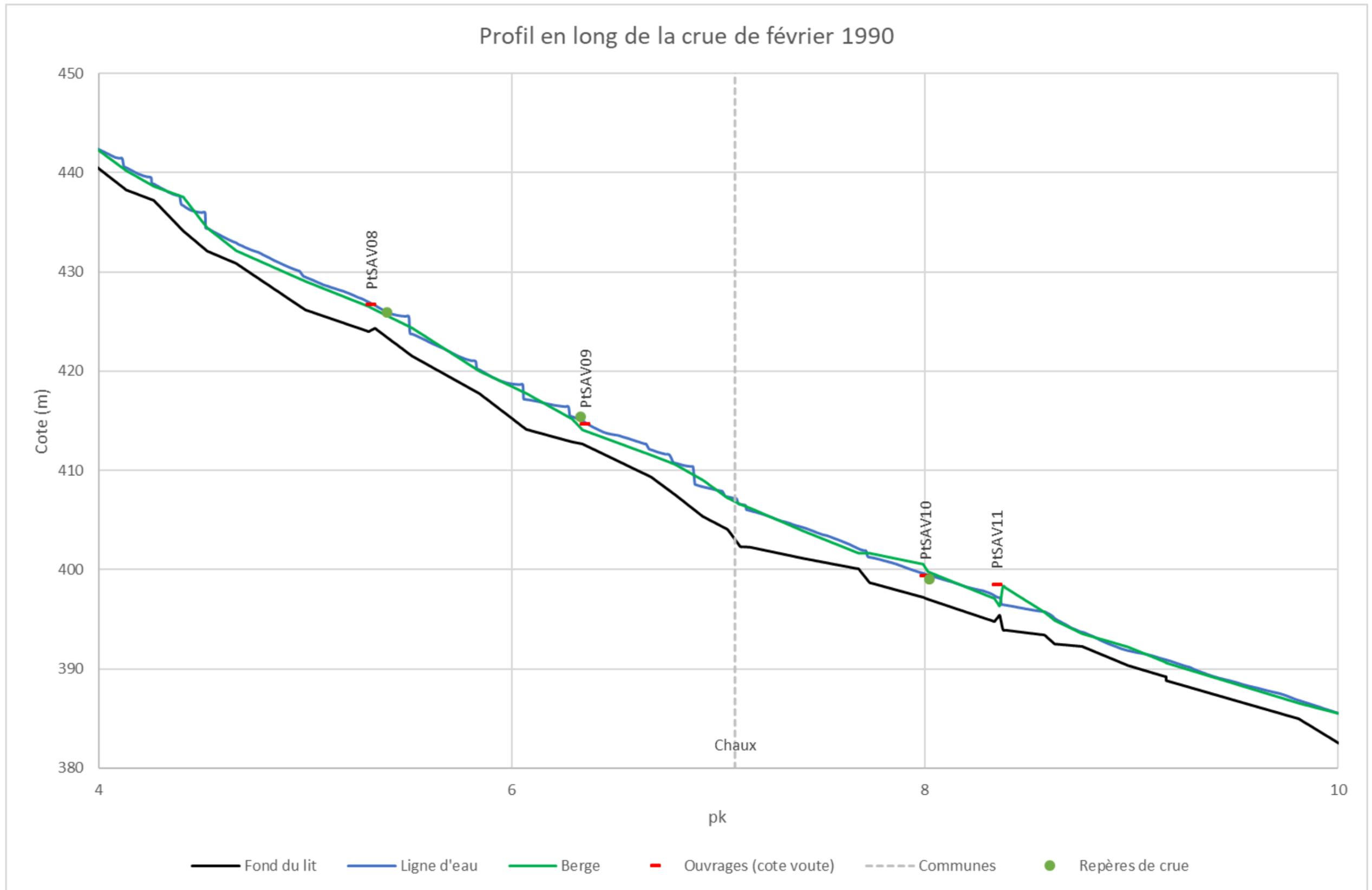


Figure 3-16 : profil en long de la Savoureuse, février 1990 (amont 2)

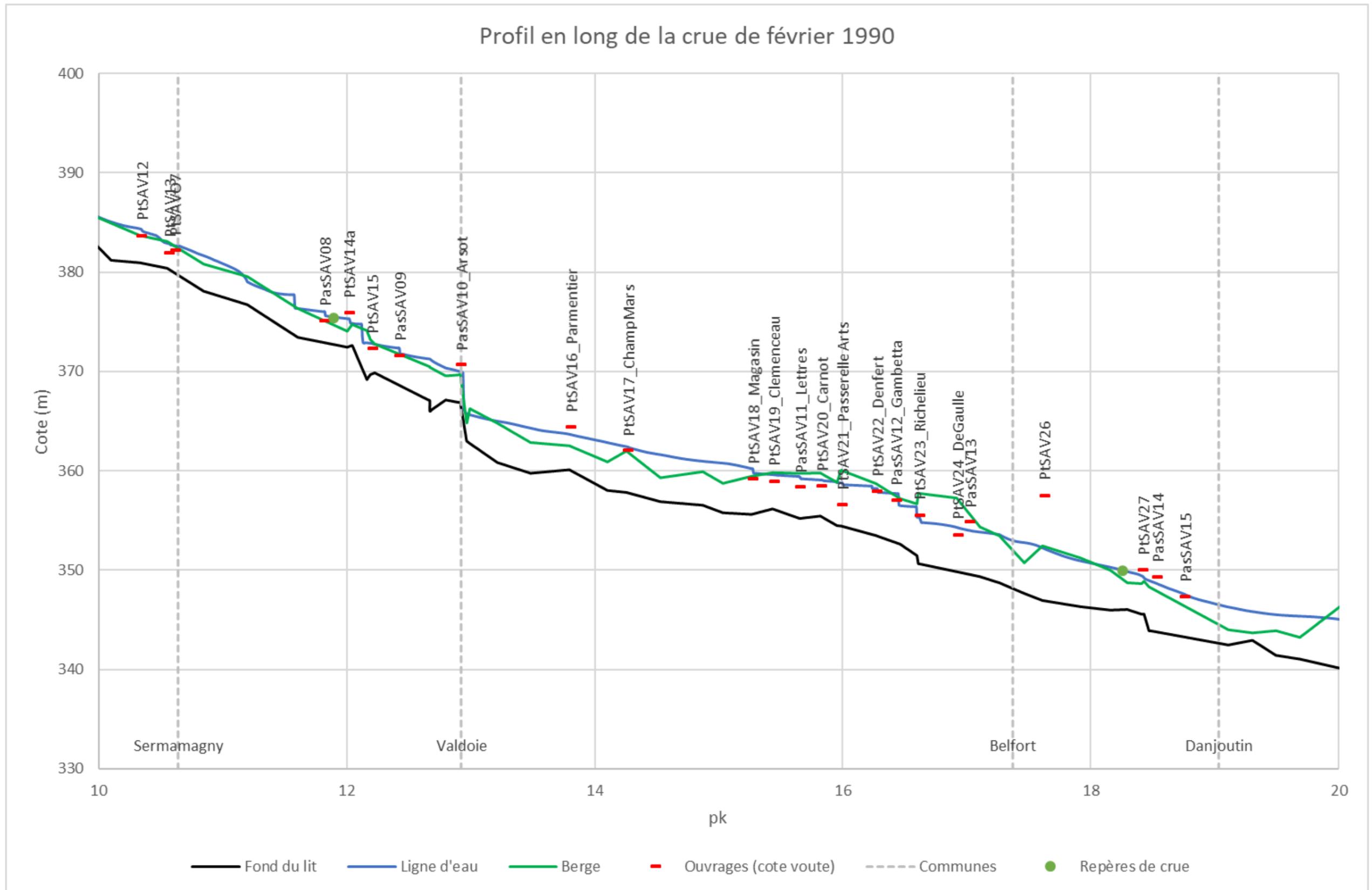


Figure 3-17 : profil en long de la Savoureuse, février 1990 (intermédiaire)

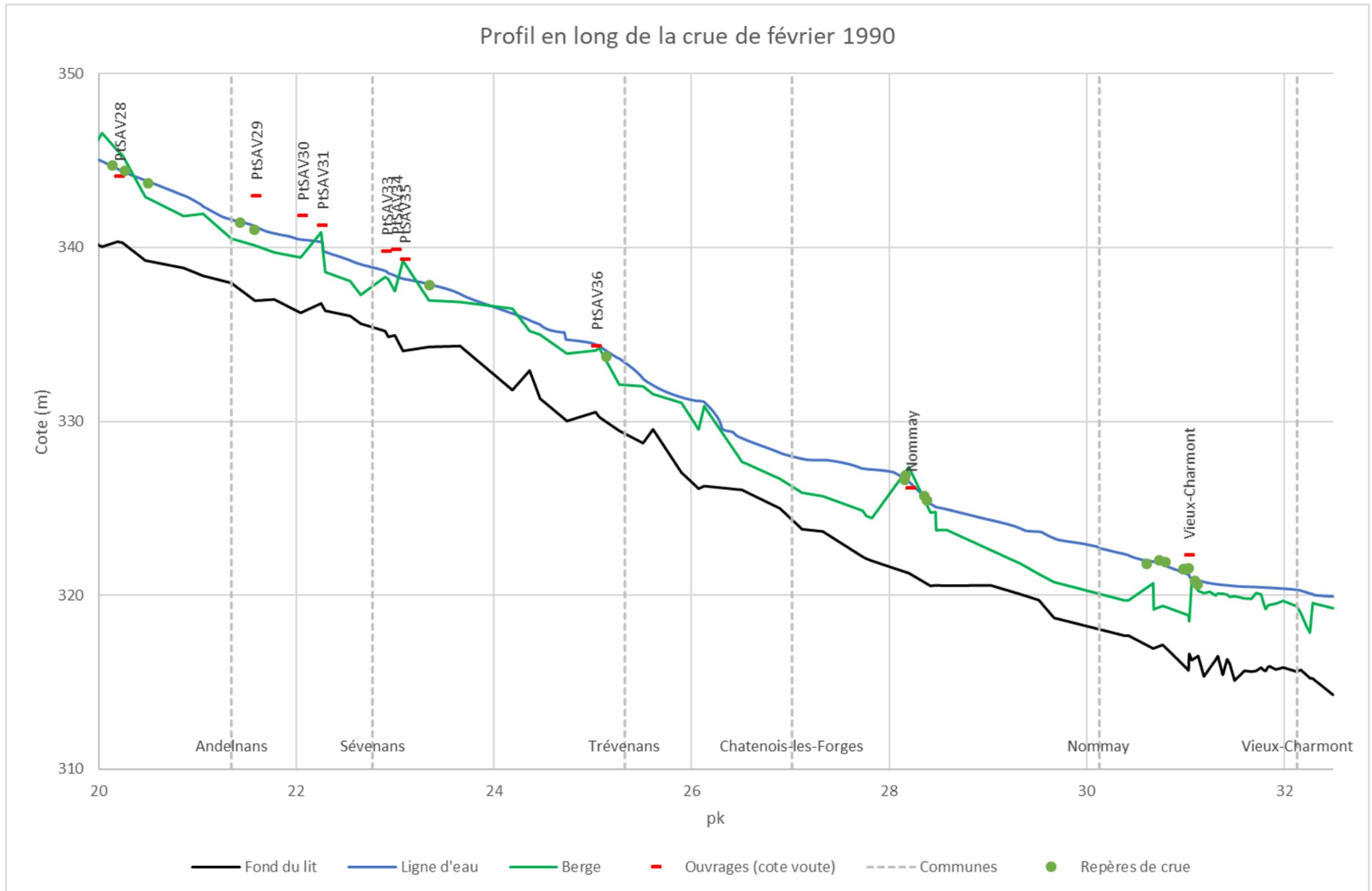


Figure 3-18 : profil en long de la Savoureuse, février 1990 (aval)

De même, les figures suivantes présentent le profil en long du Rhône puis de Rosemontoise.

Le profil en long du Rhône montre l'impact important de l'ouvrage de la route d'accès au laboratoire sur la commune de la Chapelle-sous-Chaux. Cet ouvrage est constitué de 6 buses de diamètre DN135 et des débordements ont alors lieu en rive gauche. Son influence se fait ressentir sur environ 500 mètres en amont. De même, l'ouvrage de la RD24 à l'aval, influence également la ligne d'eau. Cet ouvrage a refait depuis la crue de 1990. Dans la configuration utilisée pour le calage sur la crue de février 1990, il a été modifié pour essayer de retrouver la situation de l'époque mais aucun document ou aucune information n'a pu être collecté à son propos et sa section a donc été diminuée dans la mesure du possible. Sinon, en dehors du petit pont en amont du modèle, tous les autres ouvrages ne sont pas en charge. Enfin, des débordements ont lieu tout du long du cours d'eau.

Le profil en long de la Rosemontoise montre que la quasi-totalité des ouvrages est en charge et que les débordements sont fréquents.

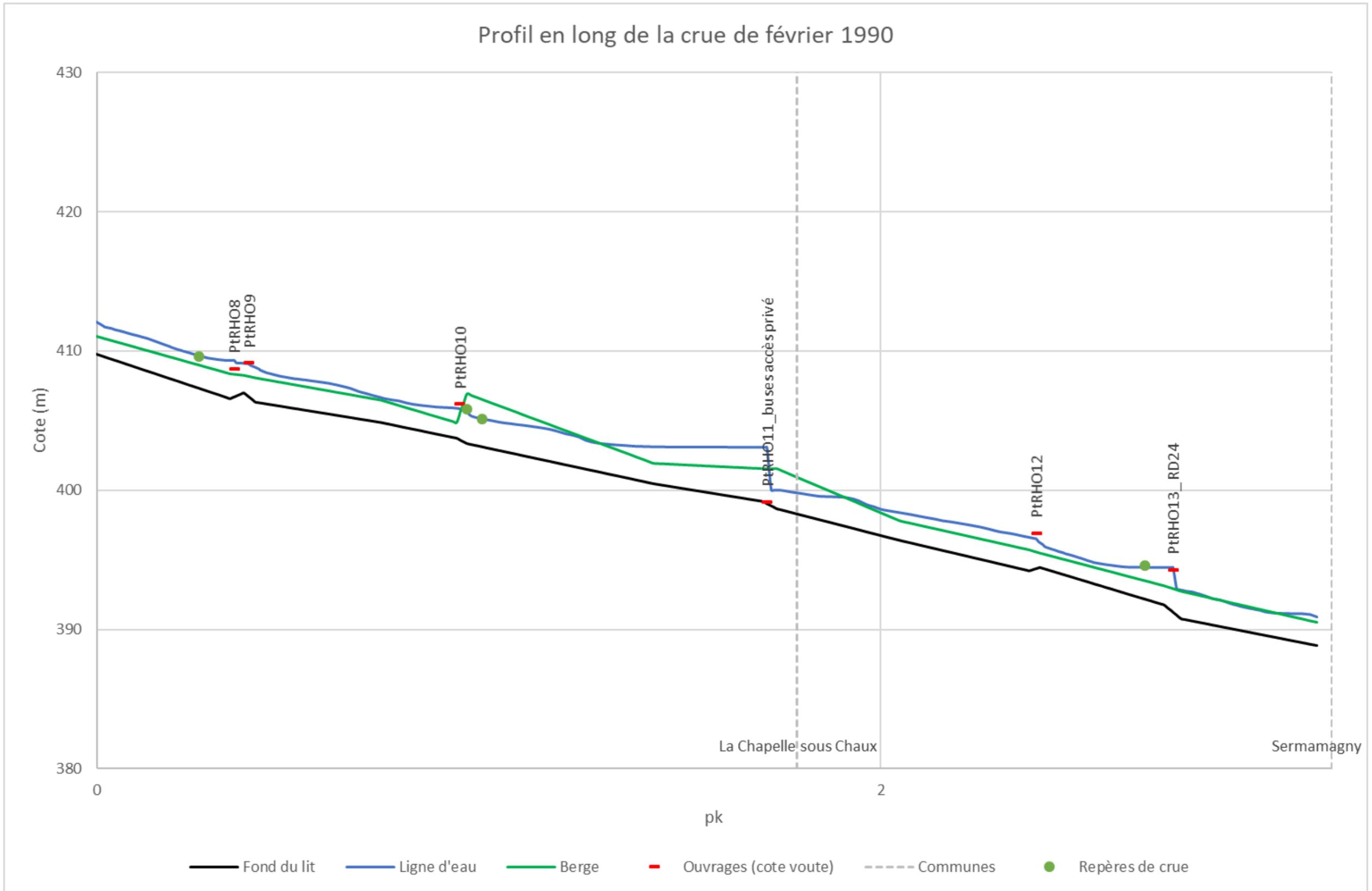


Figure 3-19 : profil en long du Rhône, février 1990

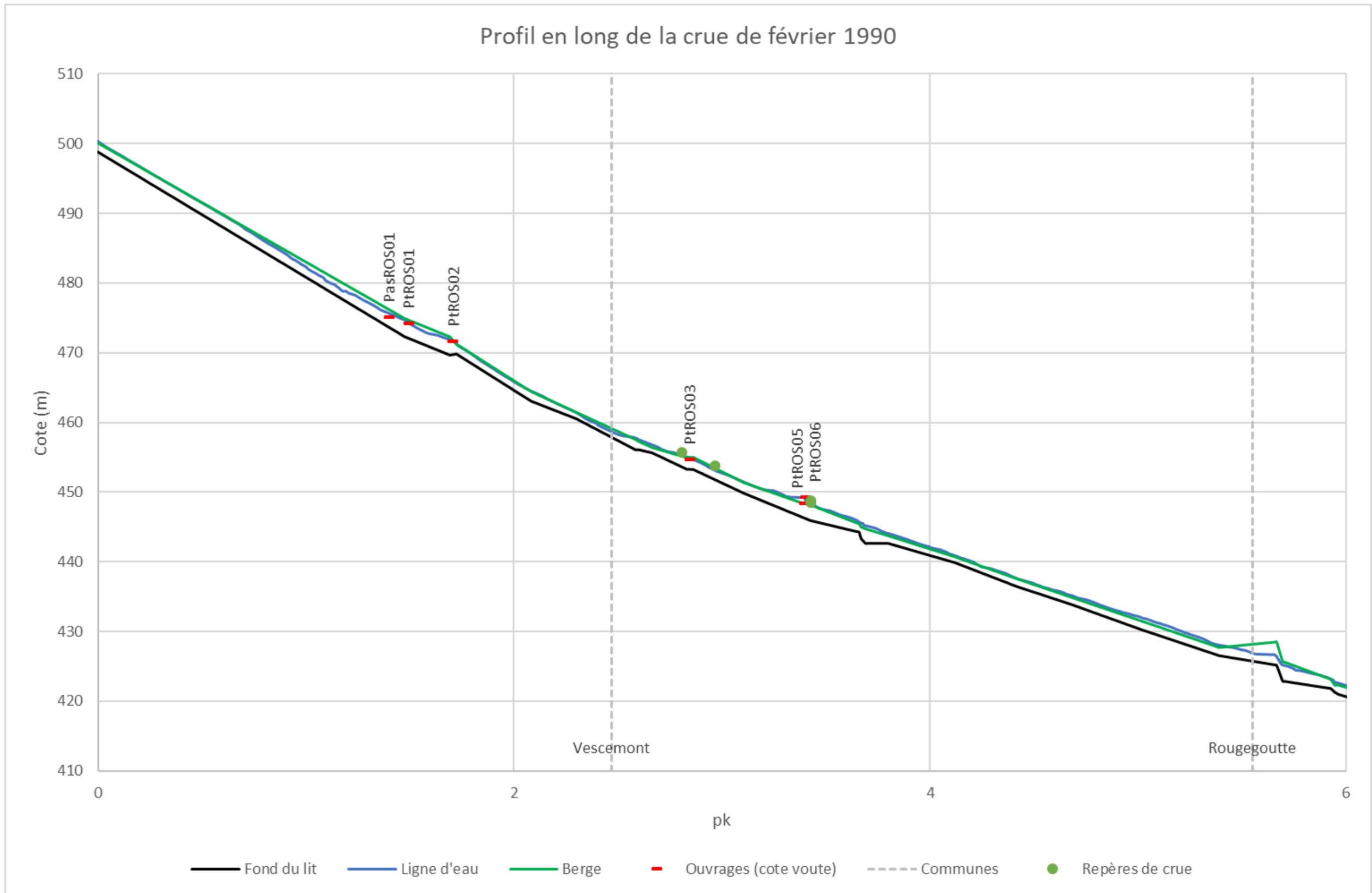


Figure 3-20 : profil en long de la Rosemontoise (amont), février 1990

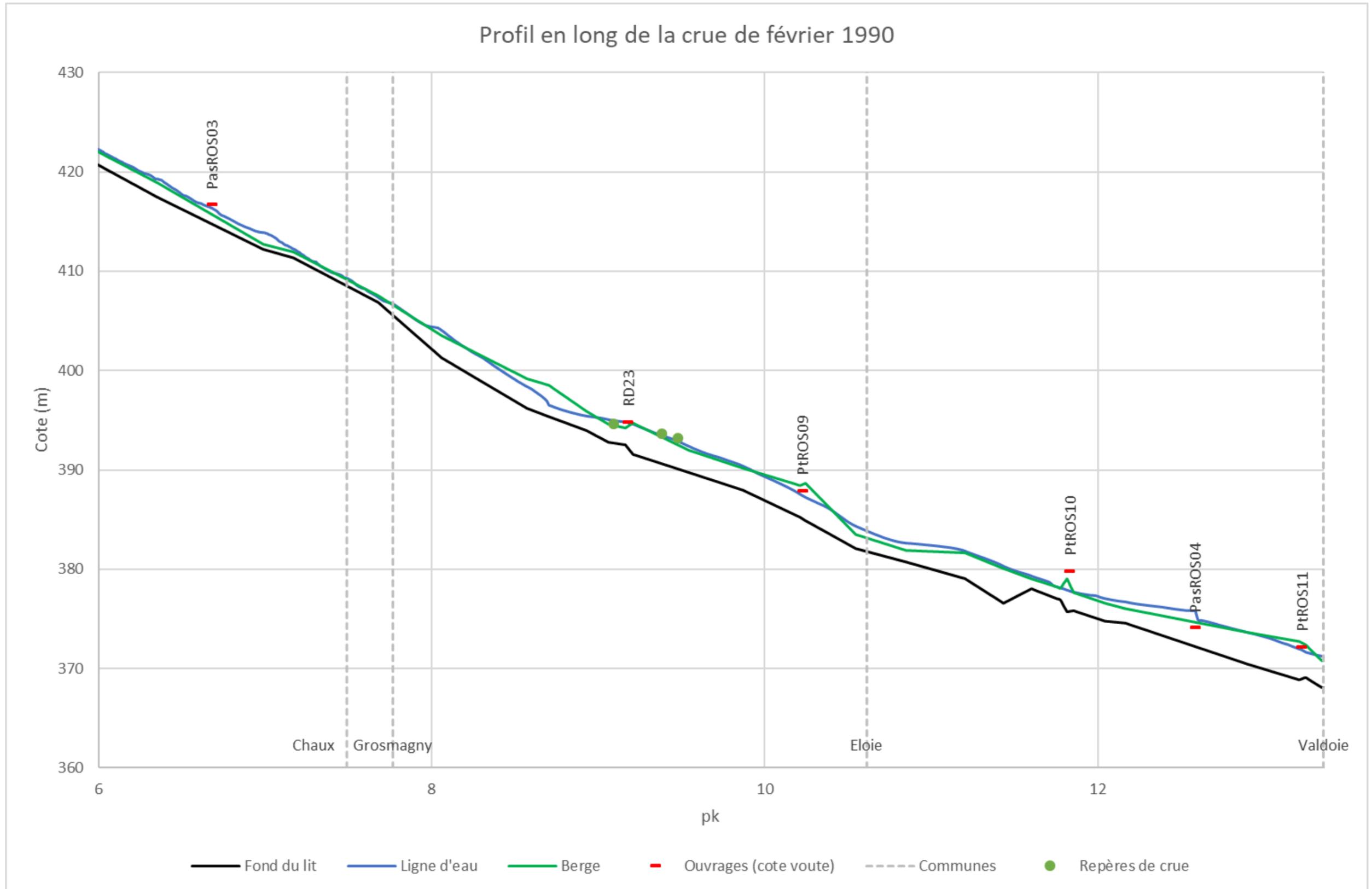


Figure 3-21 : profil en long de la Rosemontoise (aval), février 1990

3.3.2 Crue de calage : Janvier 2007

La crue de janvier 2007 est l'une des crues les plus importantes pour laquelle il y a suffisamment de données disponibles. Les hydrogrammes d'apport ont été définis lors de l'étude hydrologique et sont rappelés dans le paragraphe 2.3.

Les données topographiques utilisées sont le MNT disponible sur la vallée, les levés terrestres tels que les profils en travers et les ouvrages qui ont été réalisés entre autres par DHI en 2007.

Pour rappel, les bassins d'écrêtement en amont de Belfort étaient déjà construits mais ils étaient inactifs suite à la rupture de l'un d'entre eux en 2001.

Plusieurs repères de crue ont été identifiés dans les études précédentes et serviront de points de calage. Les données issues des stations hydrométriques seront également exploitées.

a) Hydrologie

Pour rappel, il a été proposé dans le rapport hydrologie de définir les apports intermédiaires pour la crue de 2007 à partir des apports intermédiaires injectés pour la crue de 1990. La méthode proposait :

- de retenir la forme des hydrogrammes intermédiaires injectés dans la simulation de 1990 ;
- d'ajuster le débits pointes de chaque apport aux ratios observés sur les débits de pointes aux stations de suivi.

Pour mémoire, les apports intermédiaires injectés dans le modèle sont représentés sur la figure ci-dessous.

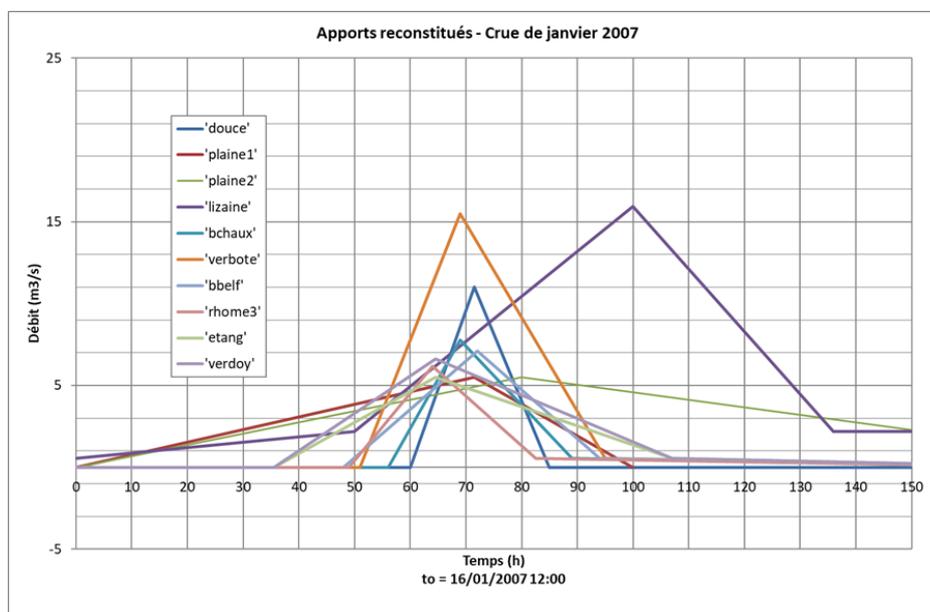


Figure 3-22 : hydrogrammes des apports reconstitués (2007)

L'analyse des premiers résultats numériques montre toutefois que cette approche ne conduit pas à des résultats satisfaisants : des écarts très significatifs sont observés sur les hydrogrammes de contrôle, aussi bien sur les débits maximums atteints que sur les volumes des crues. Il est donc proposé de ne pas retenir cette méthodologie pour la construction des hydrogrammes intermédiaires pour l'évènement de 2007. Ces écarts s'expliquent par des différences de dynamique entre les deux évènements de 1990 et 2007, la durée totale de crue et la forme des hydrogrammes observés n'étant pas identiques.

Une nouvelle hypothèse de travail a donc été proposée pour approcher les apports intermédiaires injectés dans le modèle. Le bassin versant étant suffisamment équipé en stations de mesures, il a été décidé de partir des relevés des hydrogrammes au niveau de ces stations et de répartir les apports tout du long de la Savoureuse et de ses affluents. La répartition de ces apports est réalisée au prorata des surfaces d'apports de chaque sous bassin versant rapporté à une station hydrométrique de référence. La formule appliquée est la suivante

$$Q_{\text{apport}} = Q_{BV \text{ ref}} \times \frac{S_{\text{apport}}}{S_{BV \text{ ref}}}$$

La combinaison et l'addition hydraulique de ces apports intermédiaires sont dans un troisième temps simulé numériquement. Ils sont ensuite ajustés afin que les hydrogramme de contrôle soit correctement reproduits. Les coefficients ajustés sont présentés dans le Tableau 5.

Nom apport intermédiaire	Station hydrométrique de référence	Surface (km ²)	Coefficients initiaux	Coefficients après calage
Belf	Savoireuse à Belfort	16.22	0.115	0.058
Chaux	Savoireuse à Giromagny	11.03	0.362	0.362
Douce	Savoireuse à Belfort	34.4	0.243	0.207
Etang	Rosemontoise à Rougegoutte	11.31	0.492	0
Plaine1	Savoireuse à Belfort	18.07	0.128	0.095
Plaine2	Savoireuse à Vieux Charmont	20.94	0.089	0.089
Rhône3	Rhône à La Chapelle sous Chaux	1.96	0.113	0.113
Rose3	Rosemontoise à Chaux	3.73	0.162	0.162
Rosemontoise_am	Rosemontoise à Rougegoutte	12.1	0.526	0.526
Rosemontoise_av	Rosemontoise à Rougegoutte	4.58	0.199	0.199
Rougegoutte	Rosemontoise à Rougegoutte	5.55	0.241	0.241
Verbote	Savoireuse à Belfort	14.59	0.103	0.050
Verdoyeux	Rosemontoise à Rougegoutte	10.42	0.453	0.226

Tableau 5 : répartition des hydrogrammes pour la crue de 2007

Les apports intermédiaires injectés dans le modèle sont représentés sur la Figure 3-23.

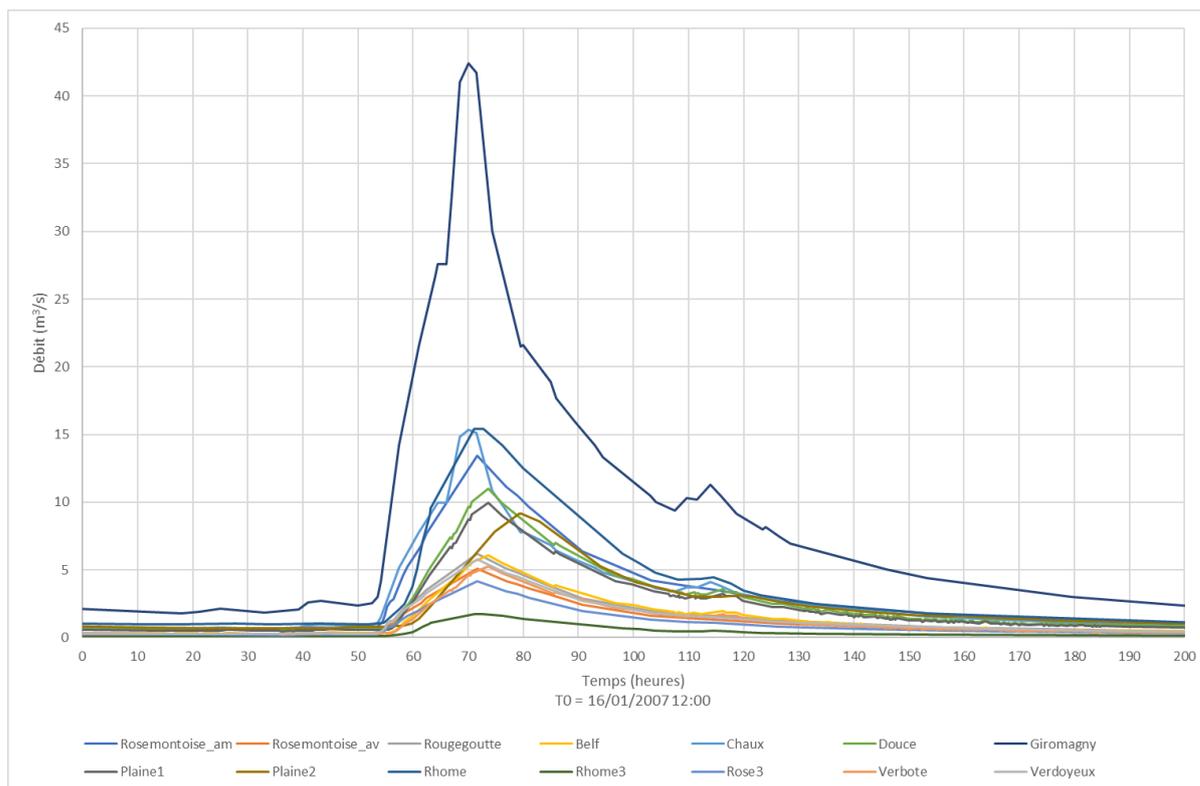


Figure 3-23 : hydrogrammes d'apport pour la crue de janvier 2007

b) Hydrogrammes aux stations de suivi

Les figures suivantes montrent le résultat du calage au niveau des stations hydrométriques. Ces figures montrent que les hydrogrammes mesurés et modélisés sont proches les uns des autres. Les écarts observés, relativement faibles sur la zone du PPRI, sont :

- 3 % à Belfort ;
- 2% à Giromagny ;
- 3% à Vieux Charmont
- 0% à La-Chapelle-sous-Chaux ;
- 4% à Chaux.

Globalement, les volumes simulés sont très proches des volumes observés pour la crue de 2007. A Vieux Charmont des différences peuvent être observées dans la forme de l'hydrogramme à la décrue, qui peuvent provenir du fonctionnement hydrologique souvent non concomitant de la Douce. Toutefois, les hauteurs maximales sont observées au pic de crue. La décrue n'influence pas sur les niveaux maximums atteints.

La comparaison à Courcelles les Montbéliard est également présentée. Il en ressort que l'écart entre la modélisation et les observations est de 13 m³/s, inférieur à 10 %. Compte tenu de l'absence d'influence aval démontrée précédemment, ce résultat apparaît satisfaisant.

La validation du calage sur le volume est jugée satisfaisante

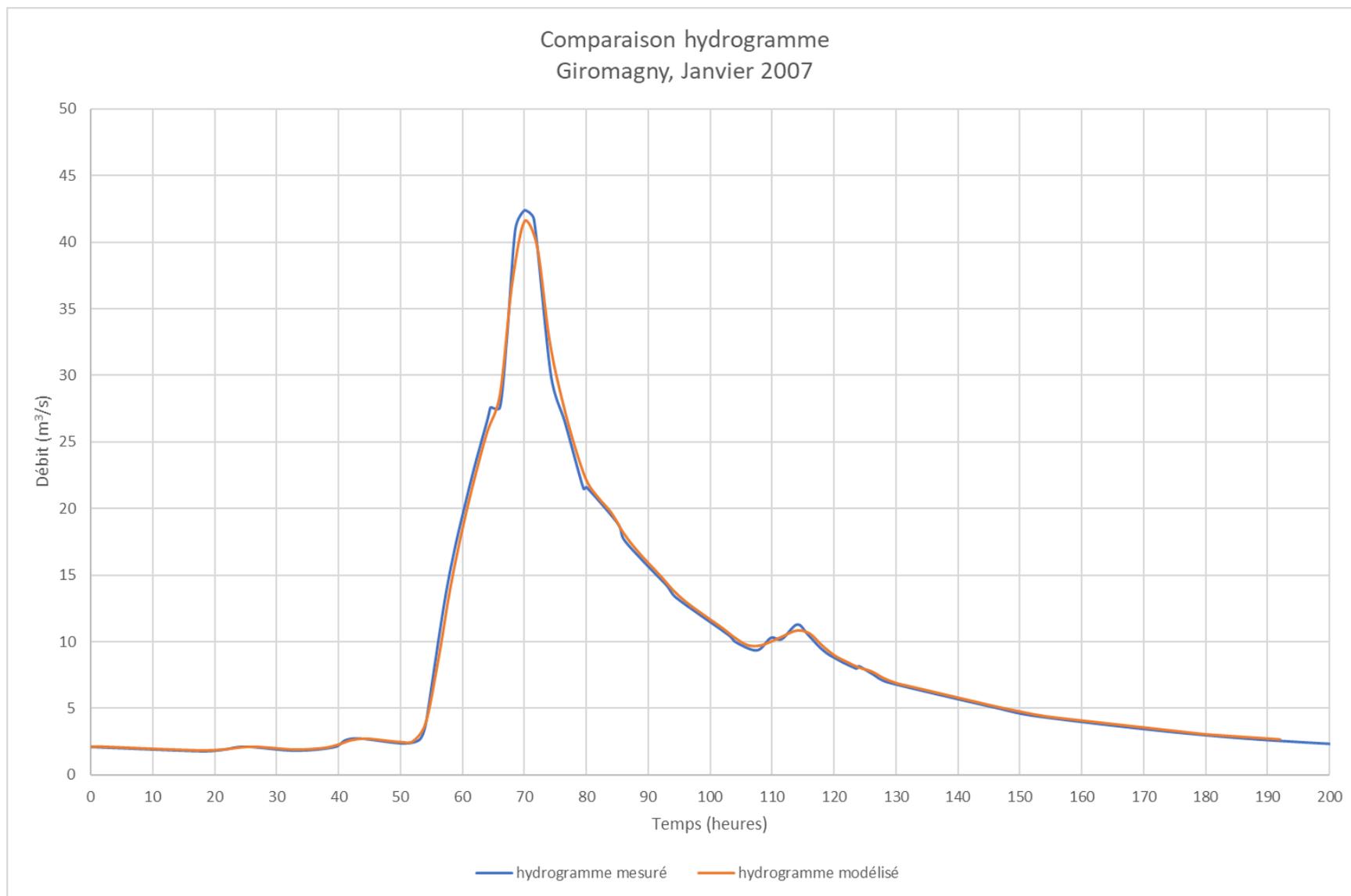


Figure 3-24 : comparaison des hydrogrammes modélisé et mesuré à la station de Giromagny pour la crue de 2007

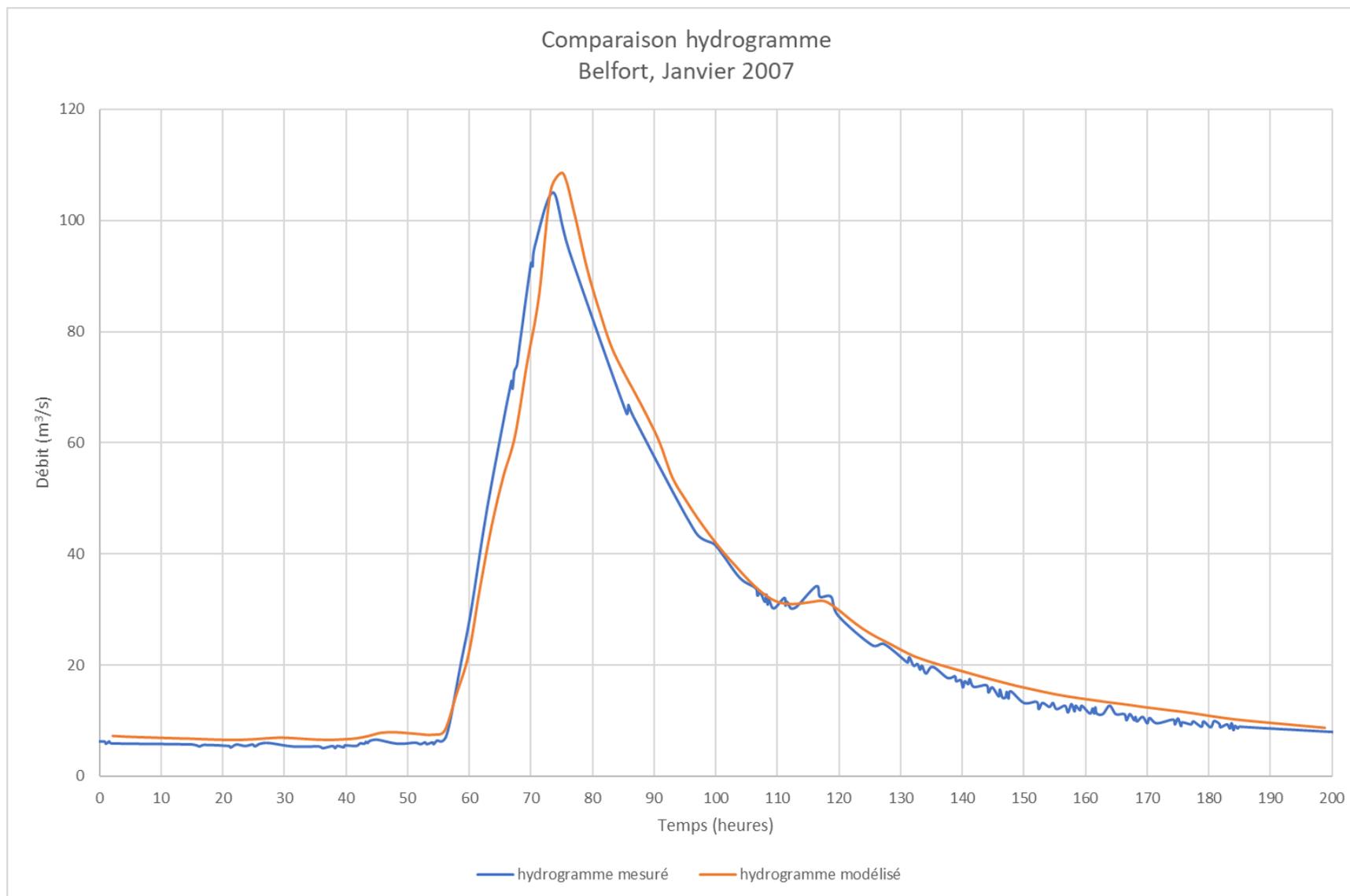


Figure 3-25 : comparaison des hydrogrammes modélisé et mesuré à la station de Belfort pour la crue de 2007

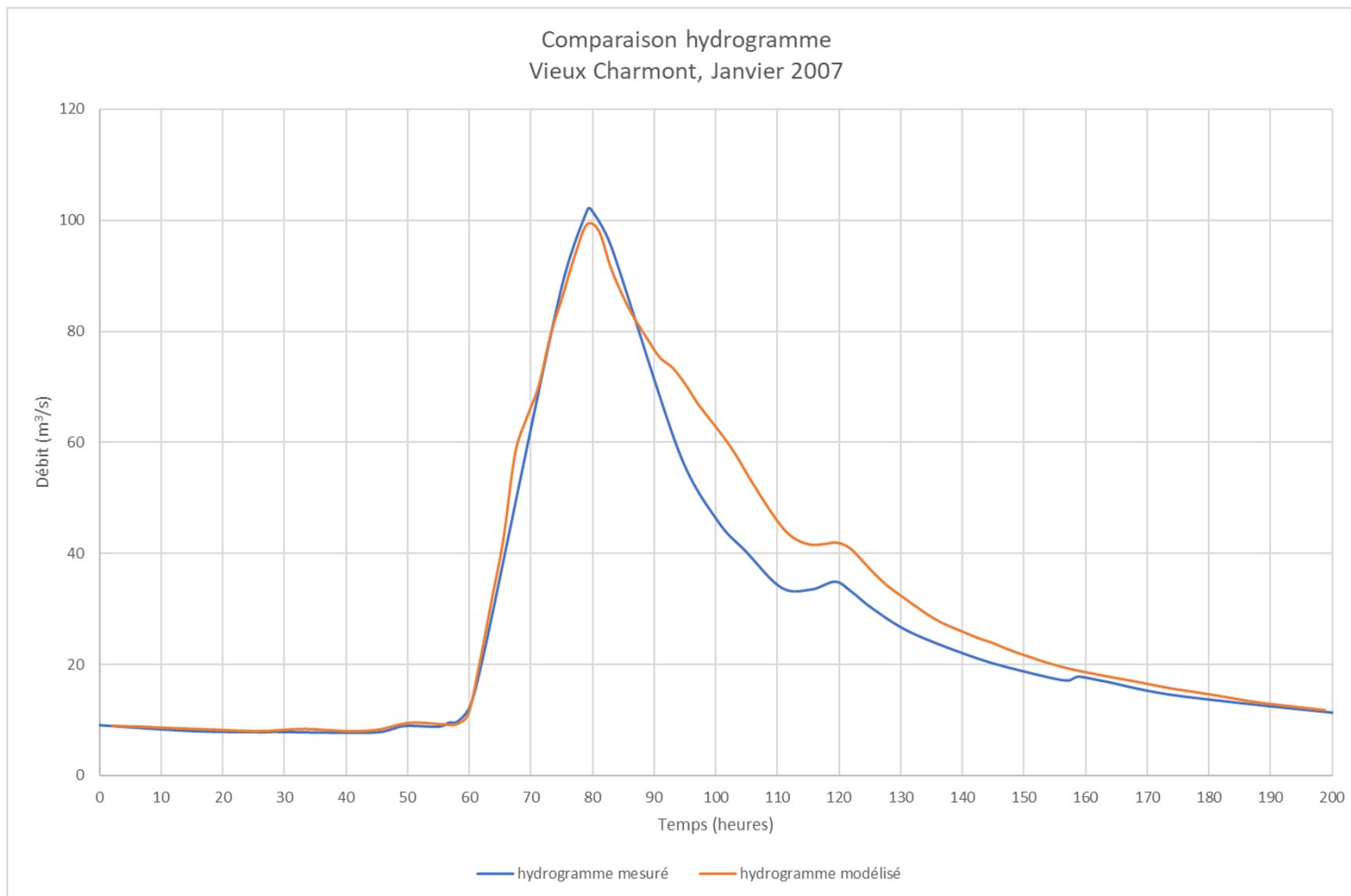


Figure 3-26 : comparaison des hydrogrammes modélisé et mesuré à la station de Vieux Charmont pour la crue de 2007

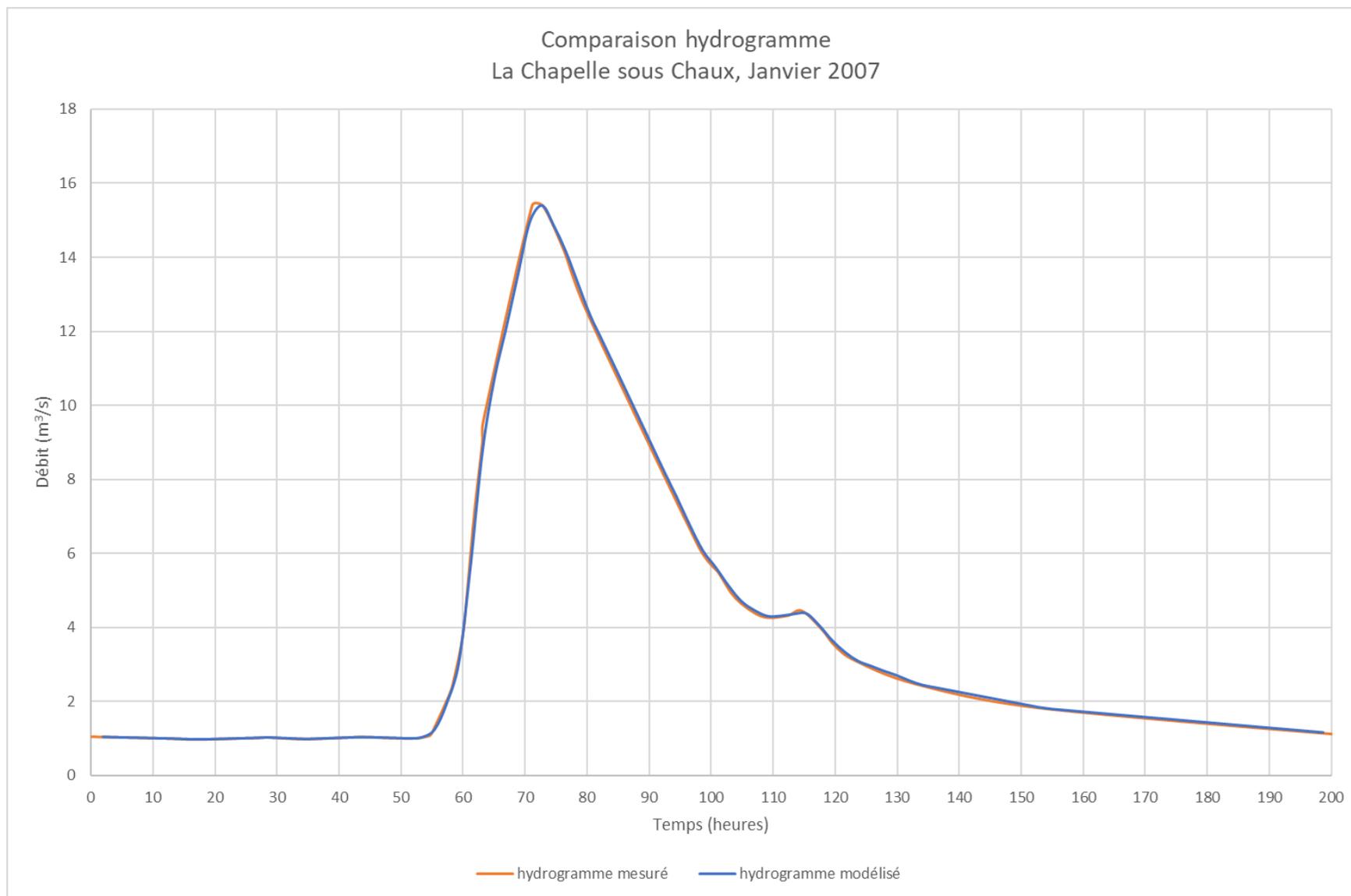


Figure 3-27 : comparaison des hydrogrammes modélisé et mesuré à la station de La chapelle sous Chaux pour la crue de 2007

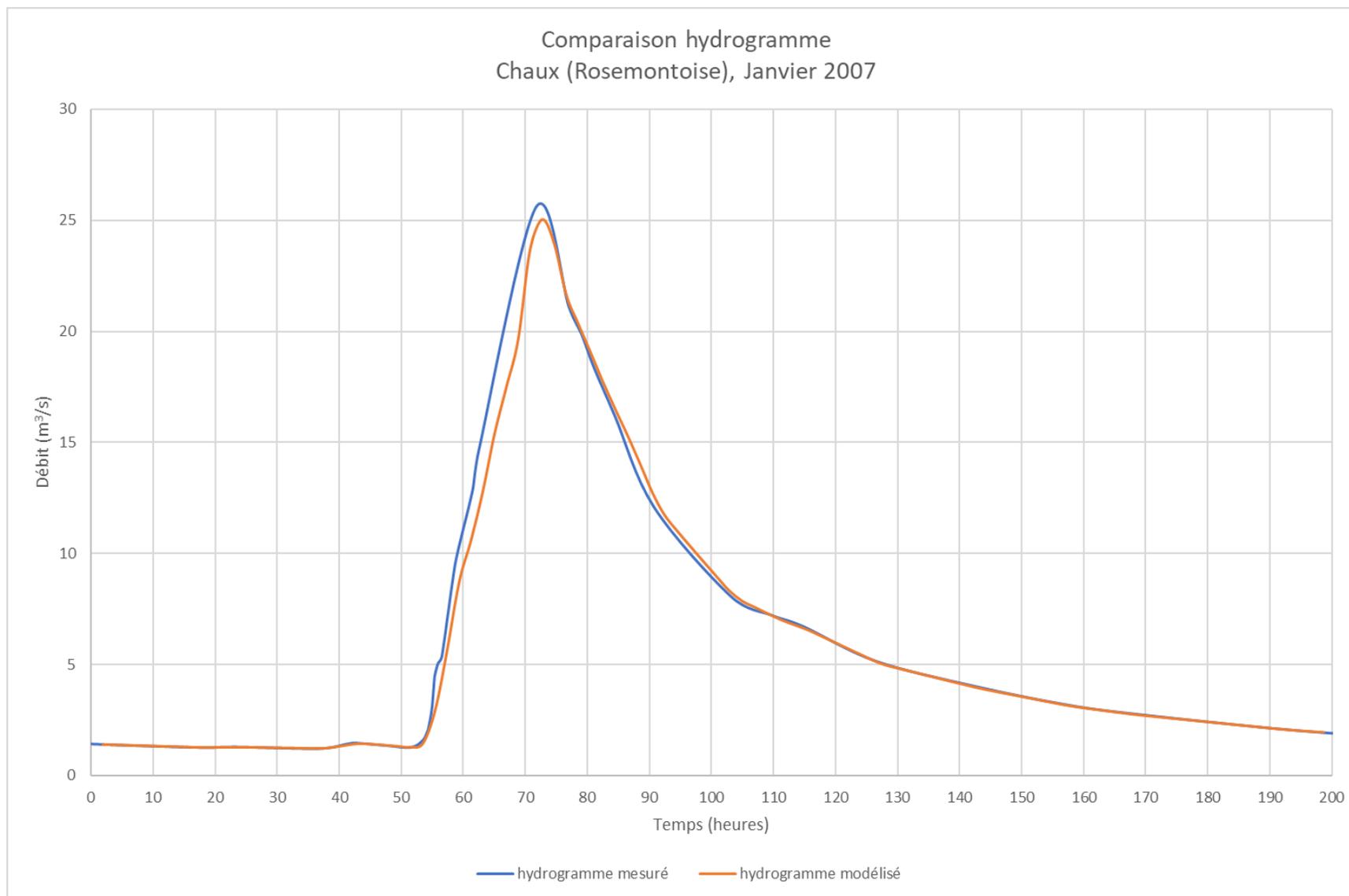


Figure 3-28 : comparaison des hydrogrammes modélisé et mesuré à la station de Chaux pour la crue de 2007

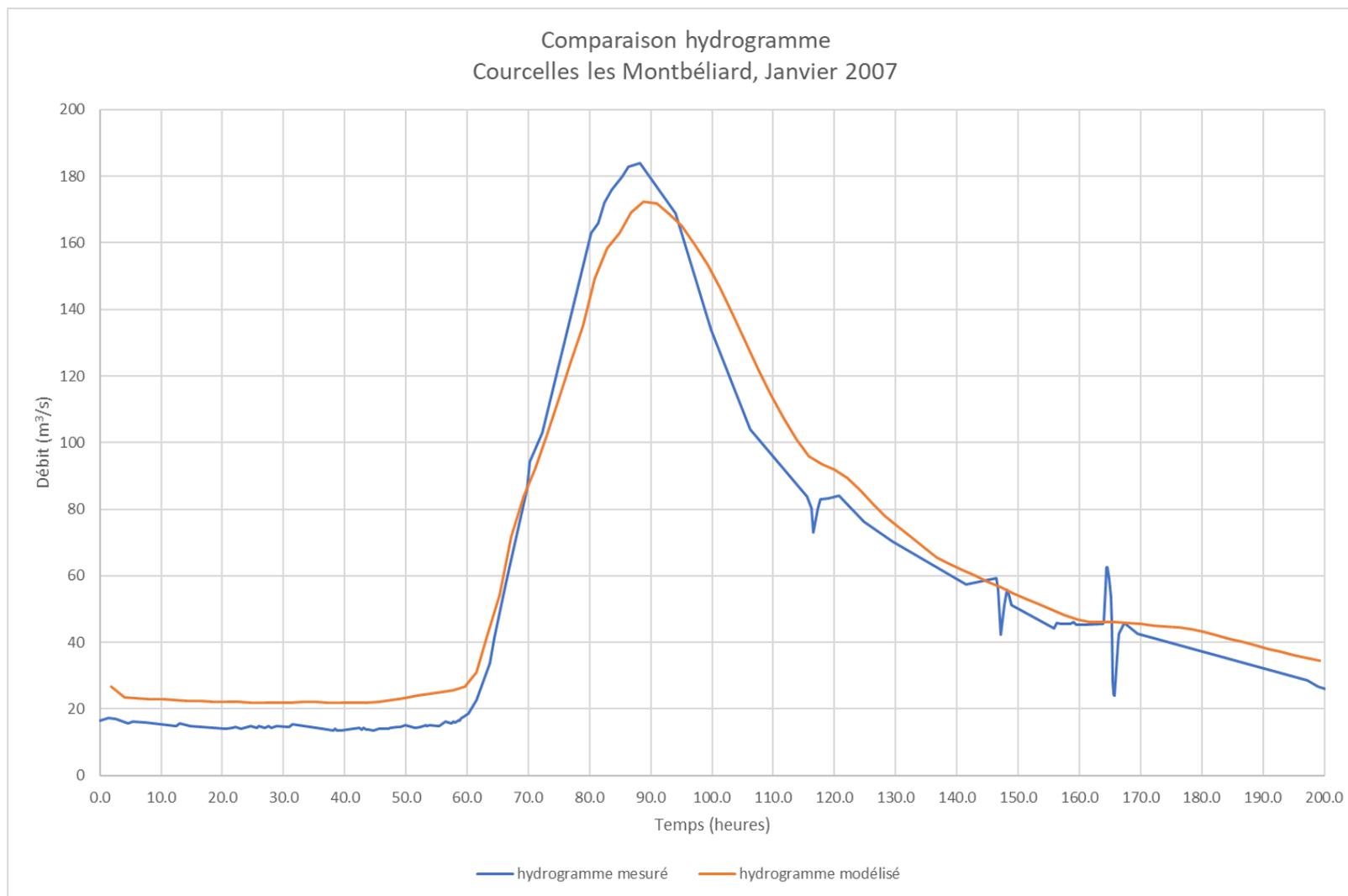


Figure 3-29 : comparaison des hydrogrammes modélisé et mesuré à la station de Courcelles les Montbéliard en janvier 2007

c) Repères de crue

La cartographie de la zone inondable pour la crue de janvier 2007 est disponible en annexe 2. Ces cartes représentent la zone inondable modélisée pour la crue de 2007, les repères de crue et les informations collectées lors des entretiens.

Les résultats du calage aux repères de crue sont les suivants et sont également repris dans la cartographie.

Repères de crue	Fiabilité	pk	Cote mesurée	Cote modélisée	Différence	Commentaire
RHO-CHAP-7		1.025	404.3	404.51	0.21	
RHO-SERM-13		2.654	393.61	393.53	-0.08	
RHO-SERM-11		2.694	393.3	393.45	0.15	
ROS-ROUG-1	Précision ?	2.803	455.37	455.43	0.06	
ROS-ROUG-3	Précision ?	2.803	455.27	455.55	0.28	Ecart peut s'expliquer par la précision associée au repère
ROS-ROUG-7		3.327	448.85	448.69	-0.16	
ROS-ROUG-9	Précision moyenne	3.503	446.84	447.2	0.36	Ecart peut s'expliquer par la précision associée au repère
ROS-ELOI-12		9.087	394.56	394.39	-0.17	
SAV-PUIX-3		0.641	489.64	489.84	0.2	
SAV-GIRO-7		2.389	462.27	462.28	0.01	
SAV-CHAU-8		5.346	426	426.07	0.07	
SAV-CHAU-10			425.76	425.62	0.14	
SAV-CHAU-12		6.366	414.22	414.39	0.17	
SAV-SERM-14		8.559	395.36	395.28	-0.08	
SAV-VALD-15		11.89	374.54	374.68	0.15	

Tableau 6 : résultats du calage aux repères de crue (2007)

Il est d'usage de considérer qu'un résultat de calage est valide lorsque la différence entre la cote mesurée et la cote modélisée est inférieure à 20 cm. Cette valeur a été retenue pour prendre en compte les incertitudes qui peut y avoir sur les levés topographiques (précision des données MNT environ 20 cm, précision des levés topographiques terrestres inférieure à 5 cm), sur les données issues des stations hydrométriques, sur les levés des repères de crue (effet de vague, montée par capillarité sur les murs...).

Sur le Rhône, des écarts significatifs ont été identifiés :

- **RHO-CHAP-7** : Un écart de 21 cm est observé à la Chapelle sous Chaux au niveau du centre équestre. La validation du modèle dans ce secteur est moyennement satisfaisante car supérieure à 20 cm. Les paramètres de Strickler contrôlant les écoulements dans la zone proposés sont ceux générant toutefois les résultats les plus satisfaisants lorsque les deux crues de 1990 et 2007 sont considérés. En effet pour mémoire, le calage sur l'évènement de 1990 est sur le secteur, avec les repères RHO-CHAP-6 et ROH-CHAP-8 de -11 cm.

Sur la Rosemontoise, à Rougegoutte, deux écarts significatifs importants ont été identifiés :

- **ROS-ROUG-5** localisé dans le virage serré dans la Rosemontoise après le cabinet de Notaire. Les écarts entre les simulations et la réalité sont de 77 cm, du même ordre de grandeur que ce qui est simulé lors de la crue de 1990. Nous expliquons cette différence par la localisation du repère, dans un virage très brutal sur un linéaire à écoulement torrentiel fortement influencé par l'énergie cinétique. L'écart est donc potentiellement induit par la fiabilité du repère.
- **ROS-ROUG-9** : des écarts de 36 cm sont observés entre la modélisation et les observations. Le repère de crue dans ce secteur est issu d'un témoignage d'un riverain qui mentionne 5cm d'eau dans le champ, au-dessus de la zone en terre. Ce repère est jugé par DHI comme peu fiable. L'analyse de l'élévation du champ à partir du MNT montre un terrain en pente, avec une élévation comprise dans ce secteur entre 447.3 m et 446.5 m. La modélisation fait état d'une cote calculée de 447.2 m cohérente avec les observations. De plus, l'enveloppe de crue dans le secteur, contenant notamment l'intégralité du champ entre la bâtisse agricole et la Rosemontoise est inondée, conformément aux observations de terrain. La simulation est donc considérée comme satisfaisante sur cette portion du cours d'eau.
- **ROS-ROUG-3** : Ce repère est à considérer avec le repère ROS-ROUG-1, localisé au même niveau de la rivière mais sur la berge opposée. L'analyse de ces deux repères nous donne les informations suivantes. Le repère en rive droite est mesuré en 2007 à la cote de 455.37 m. Le repère en rive gauche est mesuré à la cote de 455.27 m. La rivière ne déborde donc pas dans ce secteur de manière identique sur les deux berges. Deux explications physiques pourraient expliquer les niveaux d'eau plus importants constatés en rive droite :
 - la présence d'eau en provenance de l'amont en rive droite, issue des débordements de la Rosemontoise au niveau du coude très marqué de la rivière quelques centaines de mètres plus à l'amont ;
 - la présence d'un merlon de protection à l'amont de la parcelle habitée en rive gauche qui limite les arrivées d'eau au droit du repère.

La modélisation des débordements précoce en rive droite sont a priori pris en compte dans la modélisation. Un abaissement volontaire du niveau des berges a de plus été mis en place pour prendre en compte l'arrêt brutal de l'eau sur la berge qui se traduit par une élévation localisée de la ligne d'eau non modélisée par le logiciel. Ces modifications n'ont pas permis d'augmenter le niveau d'eau en rive droite. Il est donc possible que le merlon de protection joue un rôle de protection de la parcelle. Celui-ci n'a toutefois pas été pris en compte dans la modélisation, comme cela est préconisé pour l'ensemble des petits aménagements privés (murets, maison, merlon de protection...) volontairement retiré du MNT lors de la construction du modèle. Cela entraîne toutefois un calage peu satisfaisant sur cette partie du modèle, avec un écart entre la simulation et les observations de 0.28 cm pour la crue de 2007. Il est à noter que pour la crue de 1990, la simulation numérique sur la zone entraîne une différence observation/simulation de -8 cm en

rive gauche de la Rosemontoise au même niveau de la rivière. Aucun ajustement de Strickler complémentaire ne peut donc être mené sans altérer le calage sur l'évènement de 1990.

Sur la Savoureuse, quelques différences significatives ont été relevées entre la simulation numérique et la crue de calage de 2007 :

- **SAV-ANDE-21** : l'écart de 1.15 m entre la simulation de 2007 et l'observation est anormalement haut. Il peut s'expliquer par le manque de fiabilité du repère dans une zone très peu fréquentée et loin d'accès ou par la chronologie de la crue avec une observation par un riverain hors période de pic. Ce repère avait été jugé peu fiable par DHI lors de la réalisation du PPRI en 2016.

Les figures suivantes présentent les profils en long de la Savoureuse et permettent de voir que plusieurs ouvrages sont en charge.

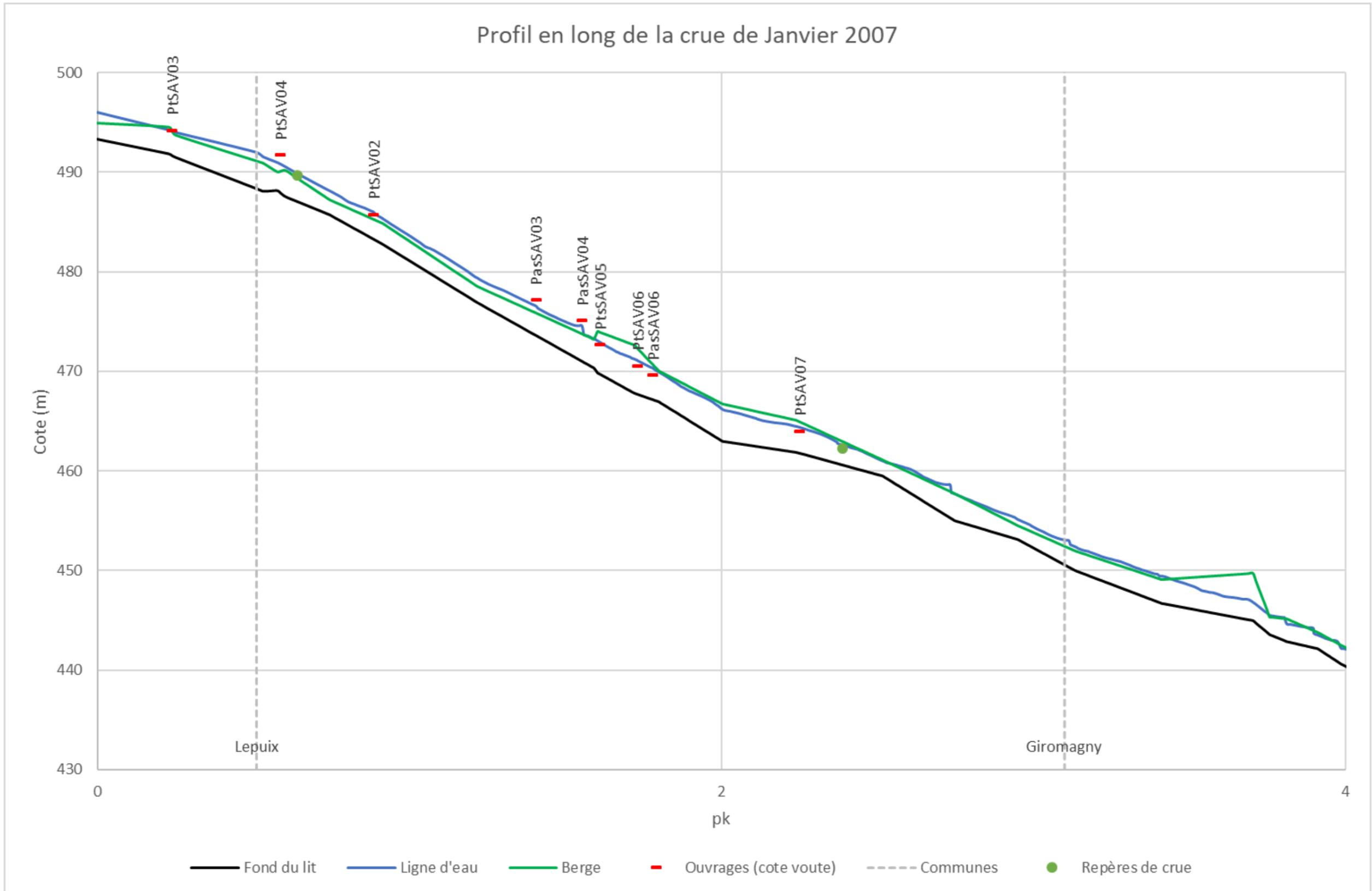


Figure 3-30 : profil en long de la Savoureuse, Janvier 2007 (amont 1)

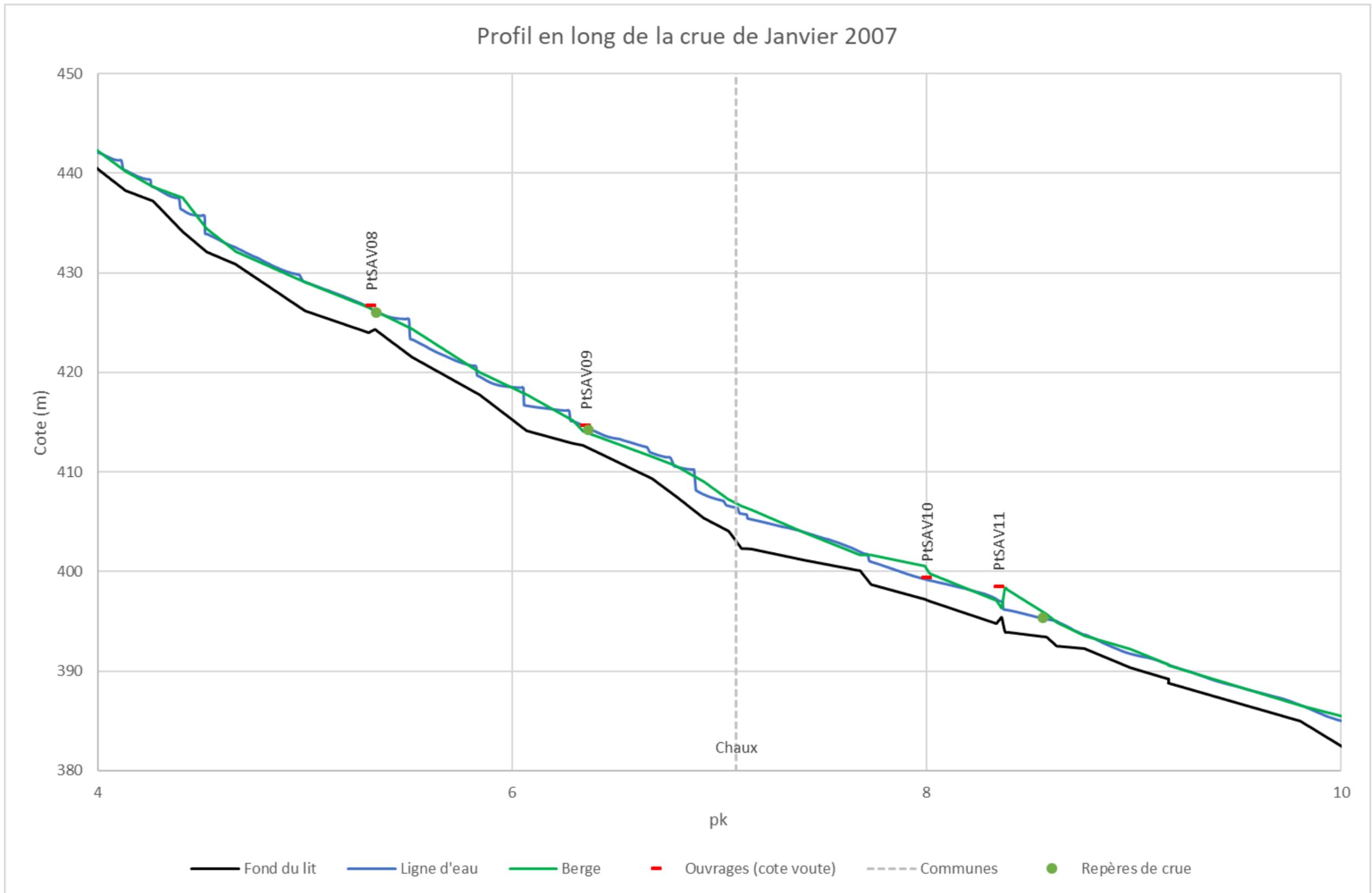


Figure 3-31 : profil en long de la Savoureuse, Janvier 2007 (amont 2)

Profil en long de la crue de Janvier 2007

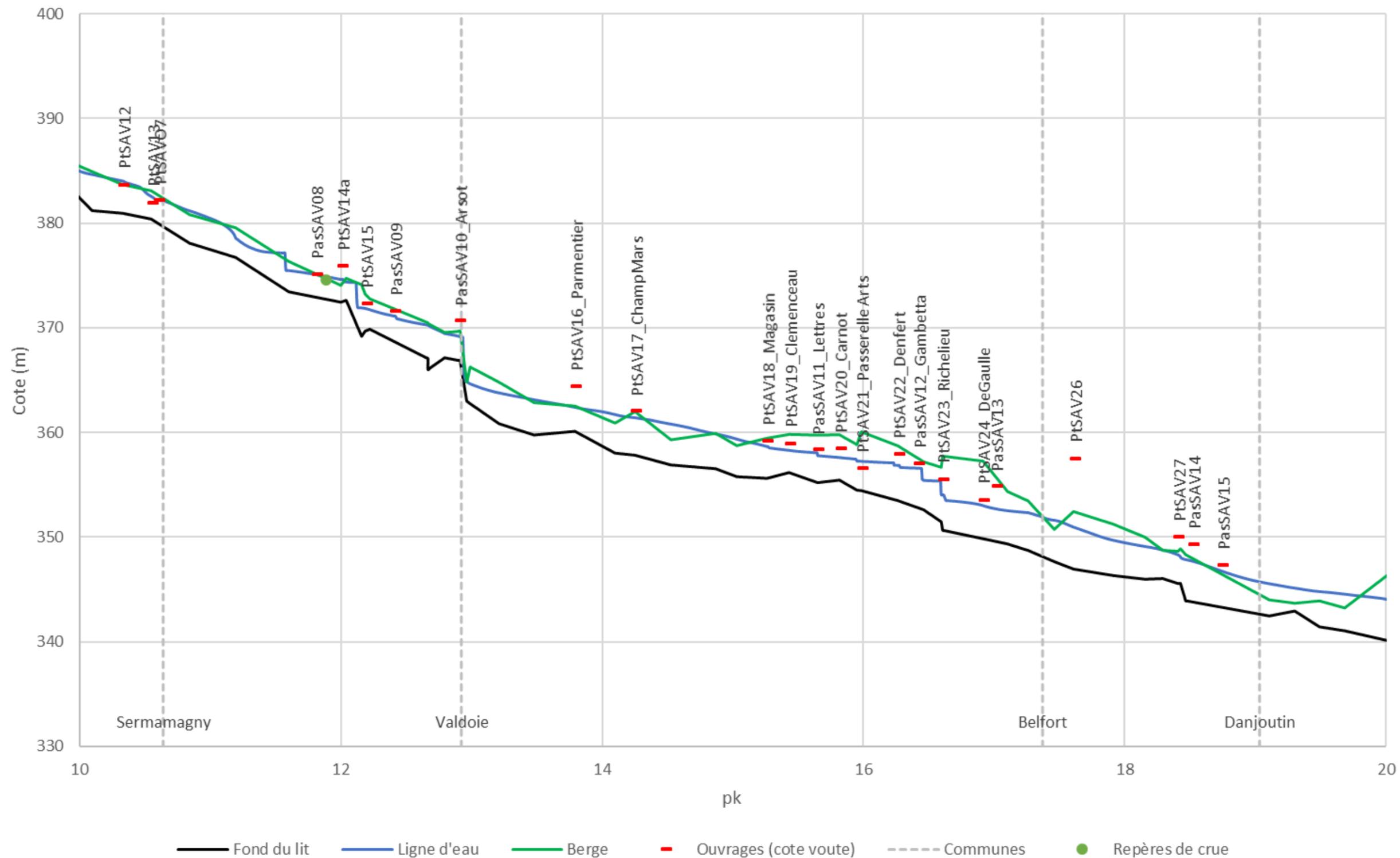


Figure 3-32 : profil en long de la Savoureuse, Janvier 2007 (intermédiaire)

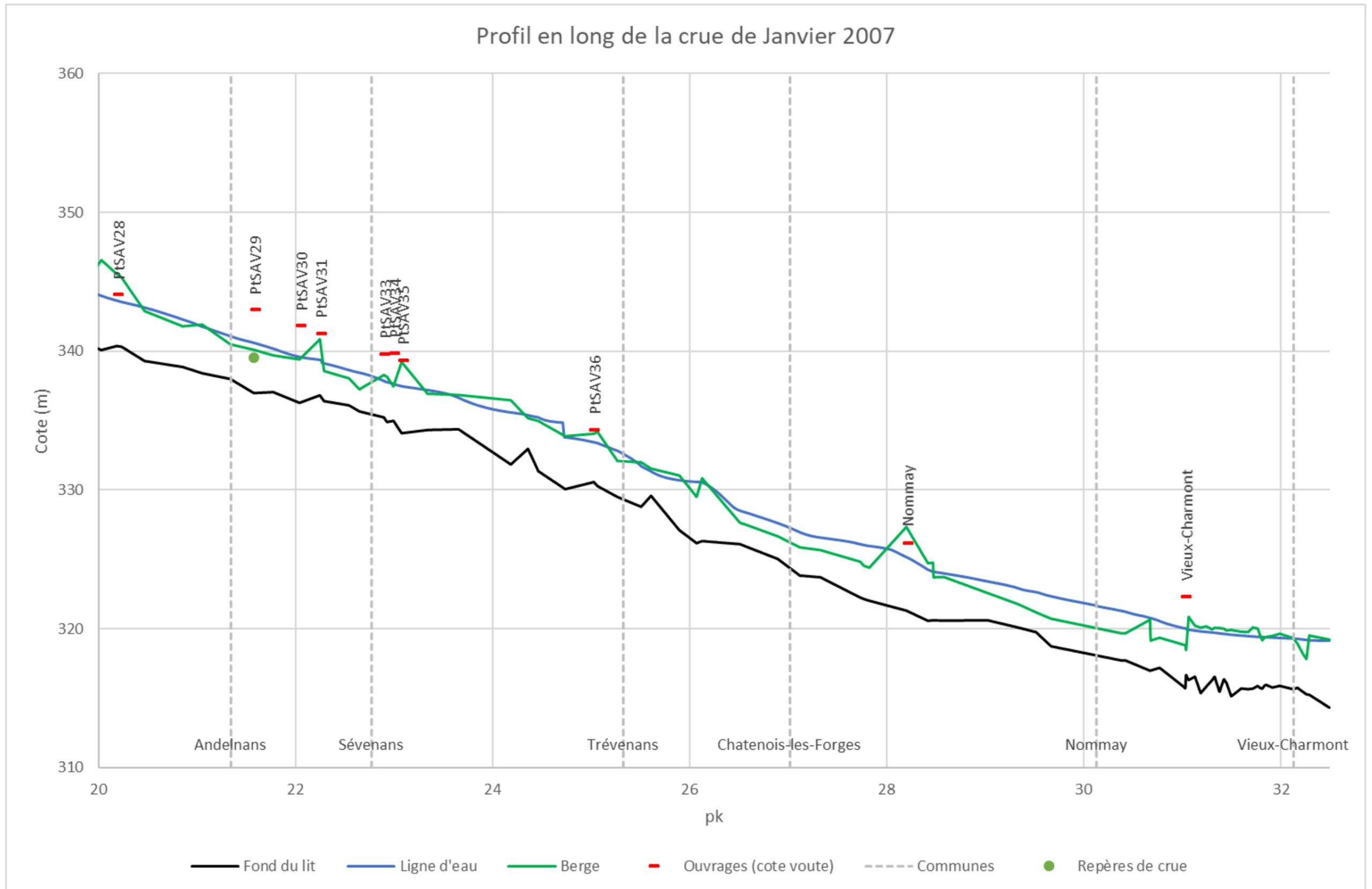


Figure 3-33 : profil en long de la Savoureuse, Janvier 2007 (aval)

De même, les figures suivantes présentent le profil en long du Rhône puis de Rosemontoise.

Le profil en long du Rhône montre l'impact important de l'ouvrage de la route d'accès au laboratoire sur la commune de la Chapelle-sous-Chaux. La cote voute de cet ouvrage étant très basse, l'ouvrage est régulièrement en charge.

Le profil en long de la Rosemontoise montre qu'une grande partie des ouvrages est en charge.

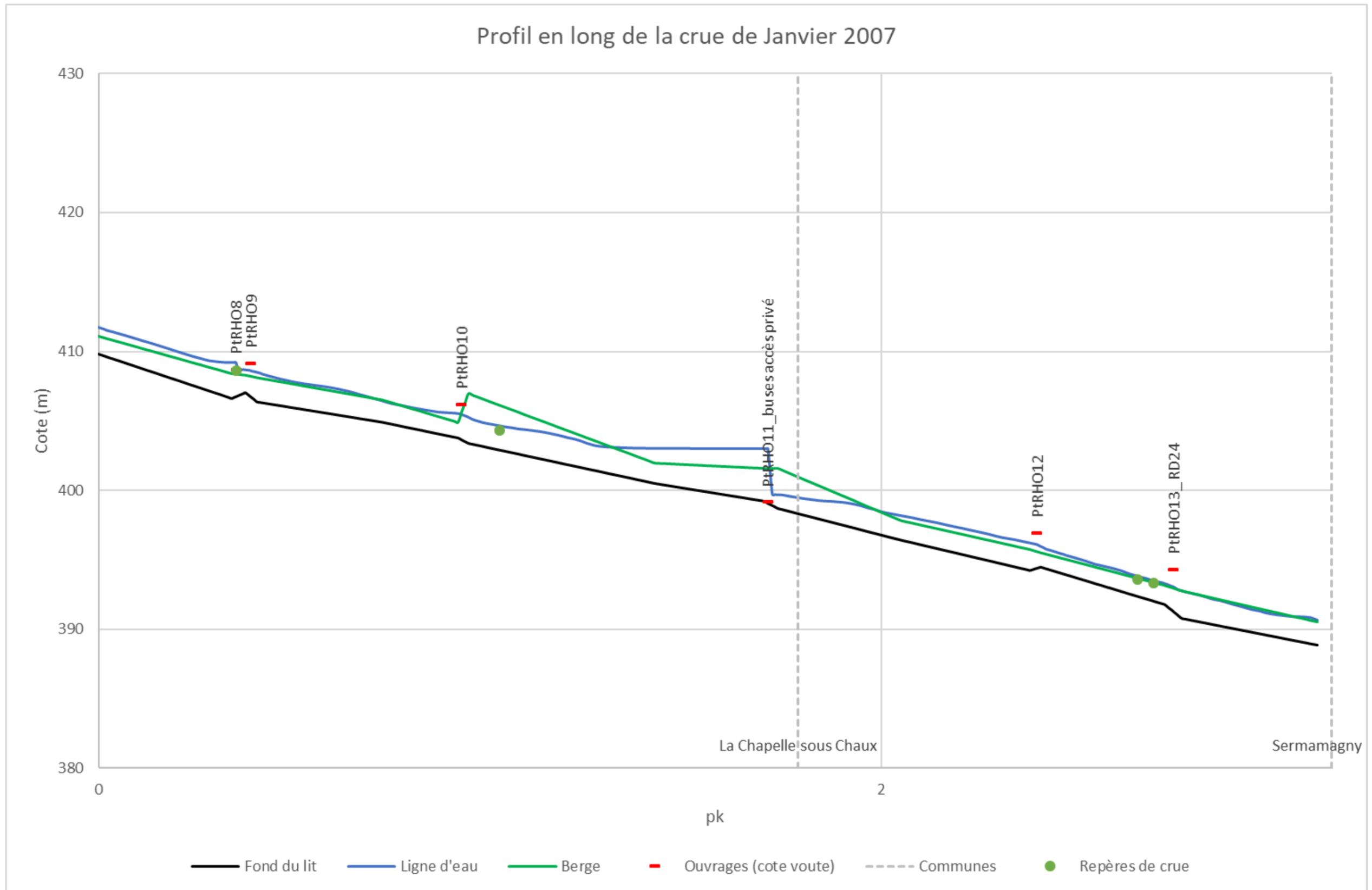


Figure 3-34 : profil en long du Rhône, Janvier 2007

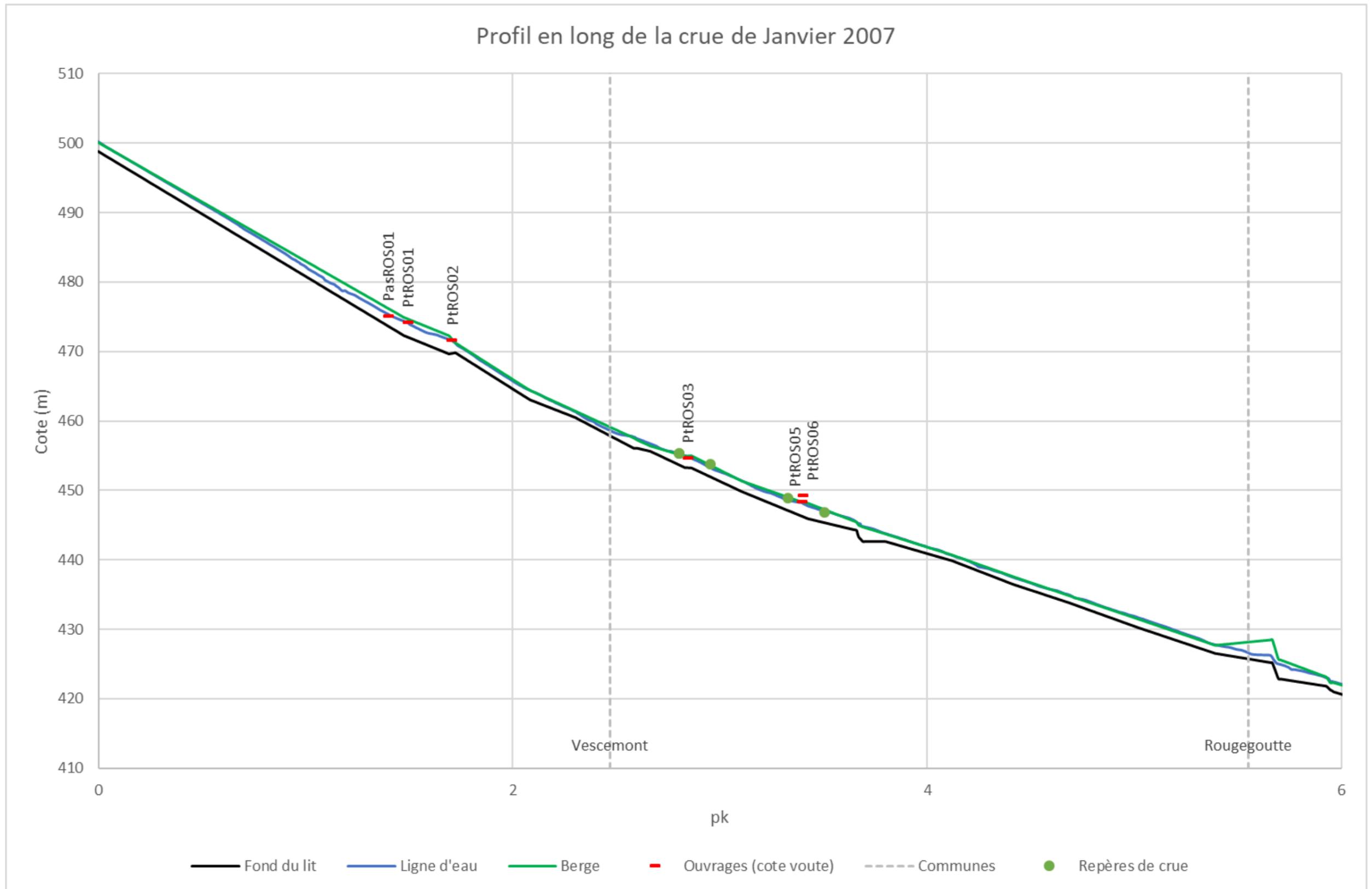


Figure 3-35 : profil en long de la Rosemontoise (amont), Janvier 2007

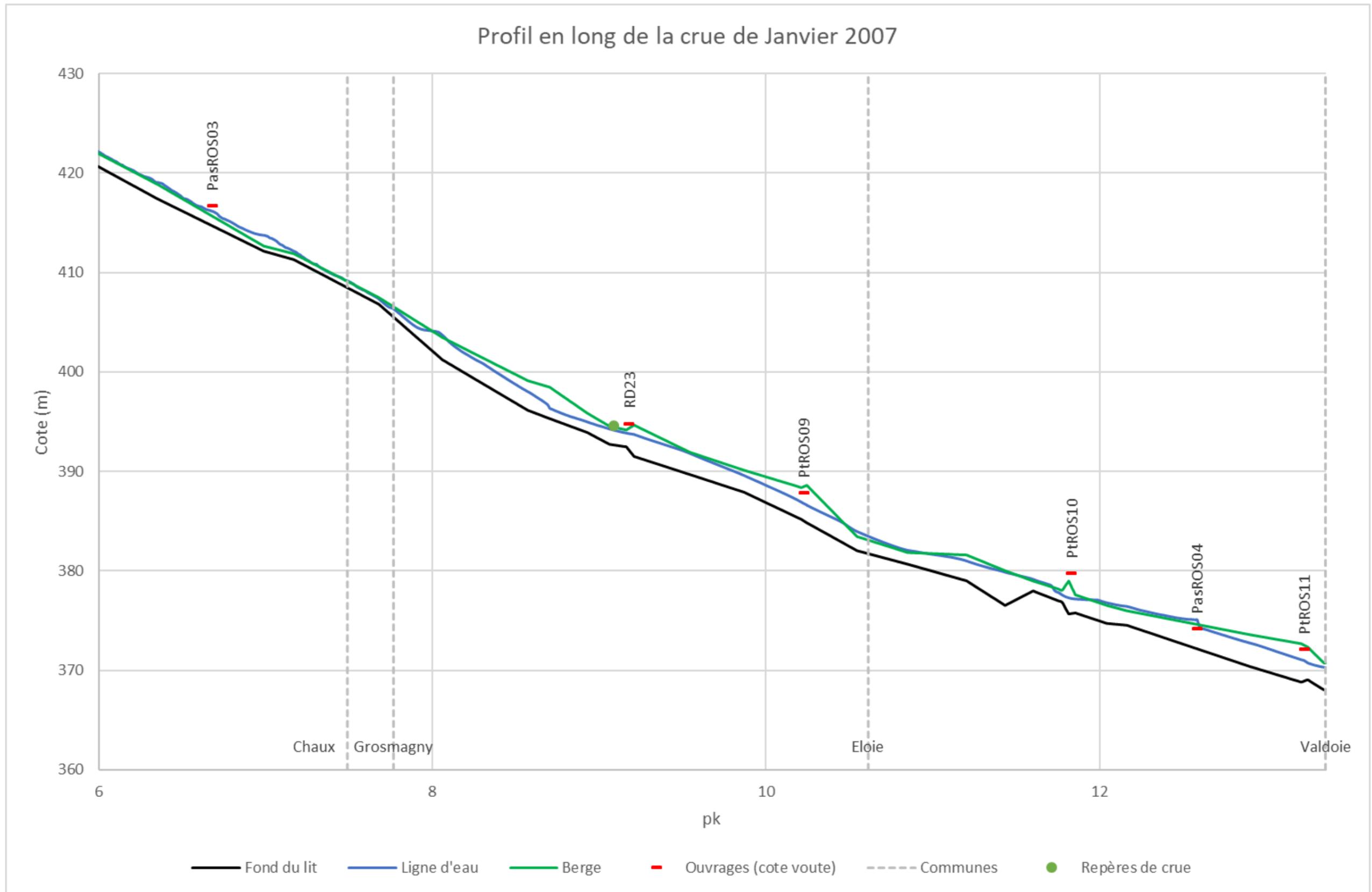


Figure 3-36 : profil en long de la Rosemontoise (aval), Janvier 2007

3.3.3 Test de sensibilité

Un test de sensibilité sur la condition limite a été réalisé. Les résultats sont présentés dans le paragraphe 2.4 et permettent de garantir une déconnexion entre la condition à la limite et la modélisation dans la Savoureuse.

Un test de sensibilité a également été réalisé sur le coefficient de Strickler. Ce dernier a été augmenté de 10%. L'incidence maximal de ce test sur la ligne d'eau est de -4 cm.

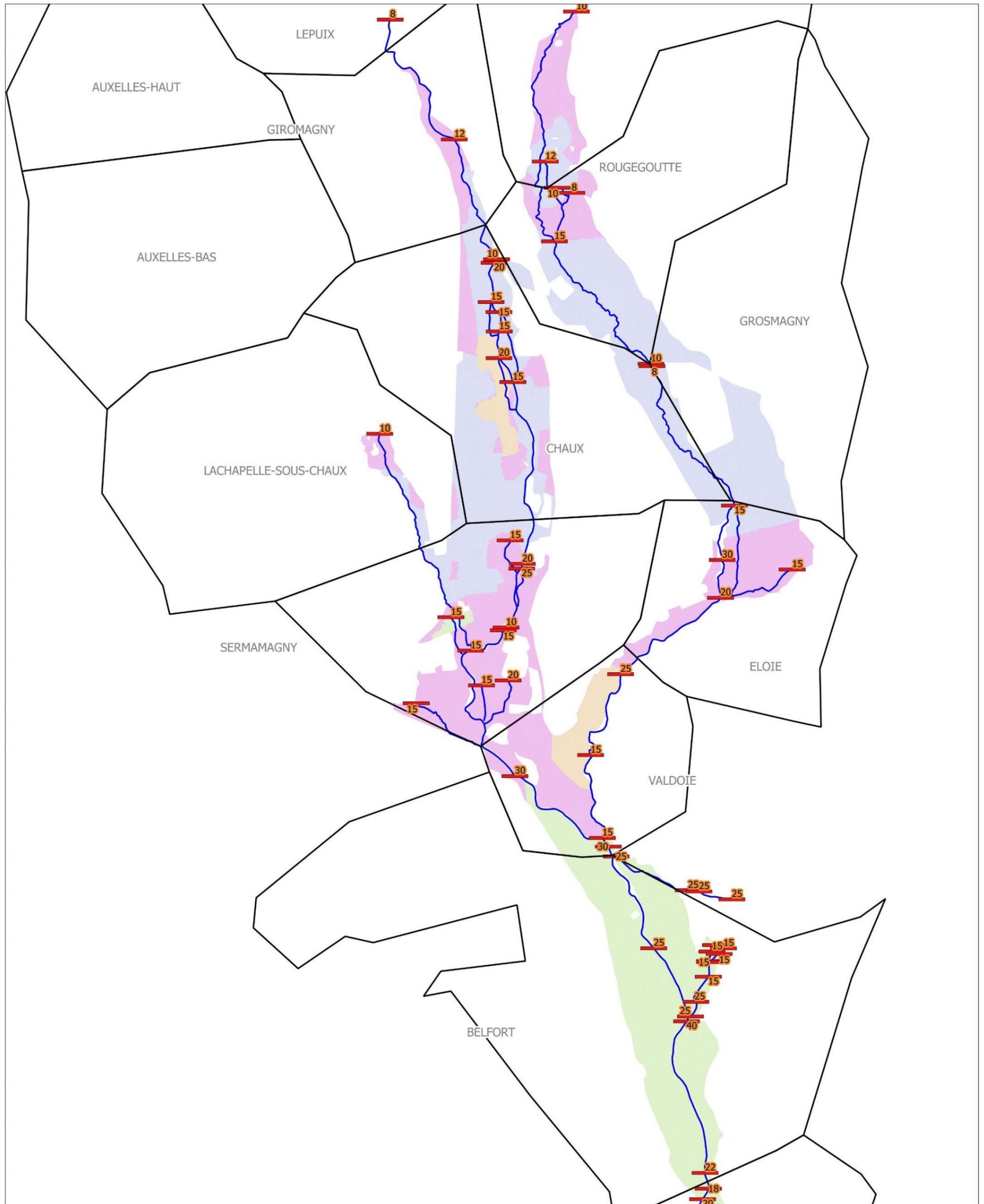
3.3.4 Synthèse du calage

L'un des paramètres de calage est le coefficient de Strickler pour le lit mineur et le lit majeur. Une première valeur est choisie en fonction de la nature du profil en travers considéré dans le lit mineur ou de la zone considérée dans le lit majeur. Cette valeur dépend de la végétation, de la nature des berges, de la nature de l'occupation du sol... Des valeurs par défaut, usuellement usitées sont dans un premier temps, appliquées. Le tableau suivant reprend ces valeurs.

Type de lit	Valeur de Strickler
Lit mineur	
Cours d'eau de pente et fond irréguliers	12
Cours d'eau avec fond plus régulier, moins de branches	15
Cours d'eau canalisé et de sinuosité faible	30
Lit majeur	
Forêt	8
Tissu urbain	6
Prairie	10

Tableau 7 : valeurs usuelles de Strickler

Suite au calage, les valeurs de Strickler suivantes ont été retenues :

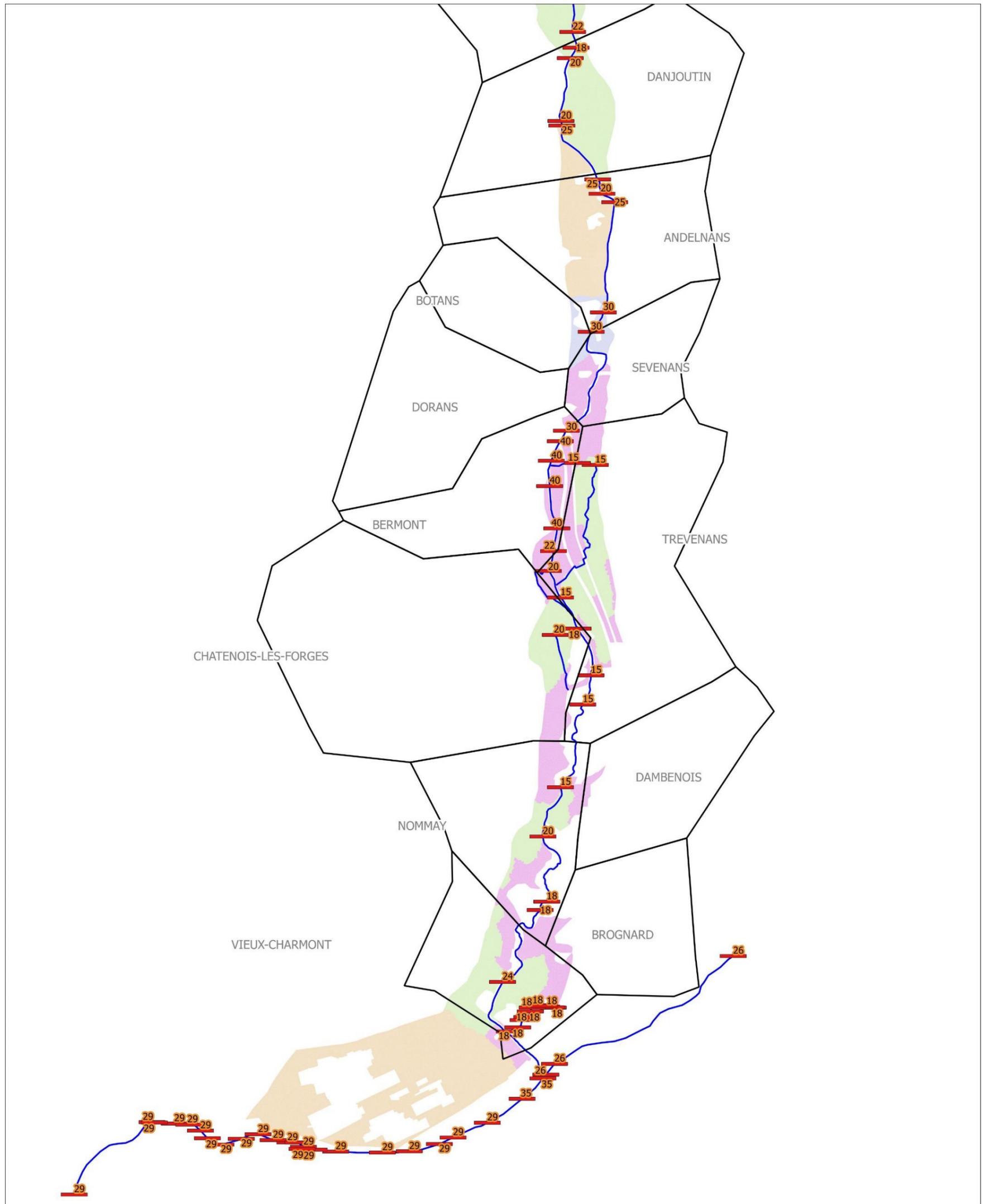


Légende

- Communes concernées par le PPRi
 - Biefs modélisés
 - Strickler du lit mineur
- Strickler du lit majeur**
- 8
 - 10
 - 12
 - 15



Figure 3-37 : résultats du calage amont



Légende

- Communes concernées par le PPRi
 - Biefs modélisés
 - Strickler du lit mineur
- Strickler du lit majeur**
- 8
 - 10
 - 12
 - 15

0 1 2 km

Figure 3-38 : Résultats du calage aval

4 CRUE DE REFERENCE

La crue de référence est construite en tenant compte de la transparence des ouvrages de protection (digues, barrage et bassins). Le détail des ouvrages à effacer devra normalement faire l'objet d'une discussion avec la DDT25 et PMA. Cette étape ne pourra cependant être finalisée qu'à l'issue des réunions d'associations avec les élus.



ANNEXES