Analyse bivariée des liens entre magnitude et durée des crues en zones Alpine et Pyrénéenne

Analyse bivariée des liens entre magnitude et durée des crues en zones Alpine et Pyrénéenne

G. Evin[1] and G. Piton[1]

[1]*Univ. Grenoble Alpes, INRAE UR ETNA, Grenoble, France*



Citation : Evin, G. & Piton, G. 2020. *Analyse bivariée des liens entre magnitude et durée des crues en zones Alpine et Pyrénéenne.* [Rapport de recherche] INRAE ; DGPR (Direction Générale de la Prévention des Risques - Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire). `https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02509705`

Résumé

Dans l'analyse du risque lié aux inondations, l'évaluation de l'aléa repose encore souvent sur une hypothèse de crue centennale (sous-entendu du point de vue des débits de pointe). Les crues torrentielles se distinguent des crues classiques, dites « fluviales », par les dommages additionnels liés au transport solide. Les flux de matériaux solides sont fortement liés à la fois aux débits de pointe mais aussi aux durées des crues. Plusieurs caractéristiques des hydrogrammes de crue (débit de pointe, volume, durée, forme) doivent donc être déterminées pour en estimer les effets (zone inondable, volume solide transporté, volume écrêté par des ouvrages, etc.).

D'un point de vue statistique, une crue centennale en débit de pointe ne sera pas forcément centennale en durée. Le temps de retour d'un évènement est classiquement liés à une de ces caractéristiques, par exemple le débit de pointe, mais des approches intégrant plusieurs caractéristiques, dites "multivariées", existent aussi. Paradoxalement, ces approches multivariées ne sont que très peu utilisées et exploitées dans le contexte des torrents et rivières torrentielles alors que les outils et méthodes statistiques sont disponibles.

Ce rapport explore leur potentiel sur un jeu de données de 128 stations localisées dans les Alpes et dans les Pyrénées.

Cette analyse met en lumière que les crues décennales des torrents et rivières torrentielles sont en générales longues (quasiment systématiquement un à plusieurs jours). La durée de ces crues est ainsi plus à relier à celle des précipitations qu'à un temps de réponse du bassin versant. Trois régimes de comportements ont toutefois été identifiés : un régime de "crues éclair" (les crues de plus forte magnitude sont courtes mais tout de même de l'ordre de la journée), un régime de crues longues (les crues de plus fortes magnitudes sont aussi les plus longues) et un régime intermédiaire. Une formule complémentaire a été proposée pour estimer une durée équivalente moyenne qui serait valable à la fois dans une approche univariée et dans une approche bivariée.

Lors de l'analyse d'un site disposant de données hydrologiques suffisantes, en utilisant la méthode proposée, les chargés d'études peuvent générer des familles d'hydrogrammes sur la base d'un contour de temps de retour connu. Ces hydrogrammes peuvent servir dans une étape suivante pour analyser des variables réponses du système pour un ensemble des crues de temps de retour homogène. Un exemple est fourni dans un contexte d'analyse du transport solide par charriage.

Dans le cas le plus typique, le chargé d'étude mènera dans un premier temps une analyse univariée sur le débit de pointe pour caractériser la capacité du chenal, puis analysera dans un cadre bivarié (ou sur la base de quelques scénarios d'hydrogrammes) des variables réponses particulières identifiées comme importantes pour le contrôle de l'aléa du site étudié.

Table des matières

Introduction **4**

1 Périodes de retour dans un contexte bivarié **5**

2 Données disponibles **7**

3 Extraction des crues et de leurs caractéristiques **8**
3.1 Extraction des crues : ensemble $\mathcal{Q}_0$ . . . 8
3.2 Caractéristiques des crues $\mathcal{Q}_0$ . . . 11
3.3 Sélection d'un sous-ensemble de crues $\mathcal{Q}_1$ . . . 20

4 Modélisation de la distribution bivariée avec les copules **21**
4.1 Principe . . . 21
4.2 Application à l'étude des liens entre pic de crue et durée des crues . . . 21
4.3 Illustration pour une station . . . 21

5 Interprétation et utilisation opérationnelle de l'analyse bivariée **25**
5.1 Analyse univariée et compléments apportés par l'analyse bivariée . . . 25
5.2 Typologie des bassins versants . . . 26
5.3 Estimation de la durée équivalente décennale uni- et bivariée . . . 27
5.4 Exemple d'utilisation d'une analyse bivariée : l'estimation du transport solide . . . 29
5.4.1 Méthode d'estimation du transport solide . . . 29
5.4.2 Résultats . . . 29

Conclusion **31**

A Description des codes appliqués dans R **33**

B Contours de l'ensemble des stations traitées rassemblés par départements **33**

Financement : Ce travail a été réalisé pour le compte de la DGPR (Direction Générale de la Prévention des Risques - Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire) dans le cadre de la convention Multirisques SRNH IRSTEA 2019 (Action *CrueBiv*).

Introduction

Cette étude vise à évaluer l'intérêt des méthodes statistiques multivariées dans la caractérisation des évènements torrentiels. Ce travail s'intéresse en particulier au lien entre magnitude des pics de crues et durées des crues. La particularité des crues torrentielles est de générer des dommages aggravés par le transport solide par charriage. Le processus de transport solide cause des phénomènes d'érosion et de dépôt et potentiellement des dommages importants. Le transport solide est fortement lié à la fois au débit de pointe et au volume des crues (et donc à leur durée, voir par exemple Piton *et al.* (2016)). C'est l'ensemble de la forme des hydrogrammes de crue qui caractérise donc ces manifestations.

L'étude des évènements rares fait appel de manière quasi systématique à la notion de temps de retour. Les crues décennales et centennales sont des références utilisées dans beaucoup d'analyses du risque (Cipriani *et al.*, 2012). Il est utile de rappeler que la notion de temps de retour se rapporte généralement à une seule caractéristique de la crue, par exemple le débit de pointe. Ainsi, d'un point de vue statistique, une crue centennale en débit de pointe n'est pas nécessairement centennale en durée. Des approches multivariées permettent de prendre en compte plusieurs paramètres descripteurs de la crue. Ce type d'approche multivariée est absente de la littérature portant sur les torrents et rivières torrentielles alors que les outils et méthodes statistiques sont disponibles et exploités dans de nombreuses autres applications hydrologiques (Salvadori *et al.*, 2011; Serinaldi, 2015; Salvadori *et al.*, 2016; Brunner *et al.*, 2016).

Ce travail a deux objectifs :

1. Développer et implémenter une méthode statistique permettant l'estimation de niveaux de retour dans un contexte multivarié (caractérisation des crues avec le débit de pointe et la durée) sur des sites jaugés, c'est-à-dire disposant d'un échantillon de données de débit ; ceci pour des temps de retour cohérents avec la taille de l'échantillon ;
2. Proposer des clés d'interprétation et explorer la possibilité de régionaliser les résultats pour les appliquer à des sites non instrumentés, dans un contexte où de nombreux bassins de montagne sont peu ou pas jaugés.

Le rapport est organisé en cinq parties qui présentent :

1. Un rapport sur la notion de temps de retour dans le contexte bivarié ;
2. Les données disponibles ;
3. Le protocole d'extraction des valeurs débit au pic et durée ;
4. La méthode statistique des copules et les résultats illustrés sur une station,
5. L'analyse régionale des résultats, leur interprétation opérationnelle et une tentative de régionalisation.

1 Périodes de retour dans un contexte bivarié

La notion de période de retour est fréquemment utilisée en hydrologie (et plus généralement dans le domaine des sciences géophysiques et environnementales) afin d'identifier les évènements rares et comme outil d'aide à la décision. La définition usuelle est "le temps moyen séparant deux réalisations successives d'un évènement prescrit". La magnitude associée est souvent définie comme "la valeur de la variable caractérisant l'évènement associé à une certaine période de retour".

Dans le contexte classique univarié, si la variable X caractérisant l'évènement (par exemple les débits de pointe pour les crues) a une distribution de probabilité F, la période de retour $\mathcal{T}$ peut être définie par la formule suivante :

$$\mathcal{T} = \frac{\mu}{\Pr[X > x]} = \frac{\mu}{1 - F_X(x)}, \tag{1}$$

où $\mu > 0$ est le temps moyen séparant deux réalisations successives d'un évènement et $\Pr[X > x]$ est la probabilité d'observer des réalisations dépassant une valeur spécifique x.

La notion de période de retour repose donc sur l'existence d'une distribution F qui caractérise la variable X, dont les évènements sont supposés indépendants et identiquement distribués (hypothèse i.i.d.).

Dans les contextes non-stationnaires (l'occurrence des évènements augmente/diminue avec le temps) ou multivariés (plus d'une variable est nécessaire pour caractériser l'évènement), la notion de période de retour n'a plus de définition mathématique unique. De nombreuses définitions ont donc été proposées (voir Serinaldi, 2015, pour une discussion complète sur ce sujet). Nous nous limitons ici au contexte bivarié même si la plupart des définitions suivantes sont généralisables à des dimensions supérieures. De manière très générale, Salvadori *et al.* (2011) définissent une période de retour $\mathcal{T}_\Omega$ d'un évènement "critique" de la manière suivante :

$$\mathcal{T}_\Omega = \frac{\mu}{\Pr[\{X, Y\} \in \Omega]}, \tag{2}$$

où $\{X, Y\}$ est un vecteur aléatoire contenant les variables décrivant la magnitude des évènements (dans notre cas le pic de crue et sa durée) et Ω est un ensemble comprenant toutes les réalisations possibles de $\{X, Y\}$. Comme précédemment, μ est le temps moyen séparant deux réalisations successives d'un évènement. Il y a de nombreuses façons de caractériser $\Pr[\{X, Y\} \in \Omega]$, la plupart se basant sur la distribution bivariée $F_{X,Y}(X, Y)$ (qui indique la probabilité que X et Y soit inférieurs à x et y). Les définitions les plus simples proposent des périodes de retour conditionnelles ou jointes (voir Figure 1 pour une illustration).

En deux dimensions, on peut visualiser ces niveaux de probabilité avec des isolignes dans l'espace X, Y (tous les couple X, Y correspondant à un niveau de probabilité t), voir par exemple la Figure 2.

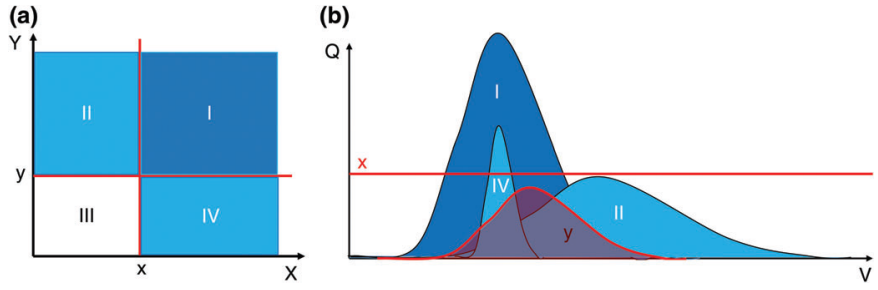


FIGURE 1 – (a) Illustration des probabilités jointes. Le quadrant I montre le cas où les deux variables X et Y dépassent les valeurs x et y. Le quadrant II montre le cas où Y mais pas X dépasse la valeur de référence. Le quadrant III montre le cas où ni X ni Y ne dépasse leur valeur de référence. (Tiré de Yue *et al.* (2002) et Brunner *et al.* (2016)). (b) : Exemple hydrologique. La ligne rouge indique le seuil lié au débit de pointe x, l'hydrogramme rouge illustre une valeur de référence pour le volume y. Pour chaque quadrant de la figure a, un exemple d'évènement est donné. L'exemple de crue pour le quadrant I a un débit de pointe et un volume plus élevés que les valeurs de référence. La crue du quadrant II a un volume plus élevé que le seuil mais un débit de point plus bas. La crue du quadrant IV a un volume plus faible que le seuil mais un débit de point plus élevé.

Parmi l'ensemble des définitions de temps de retour qu'il est possible d'utiliser, nous retenons la définition de période de retour de *survie de Kendall* (Salvadori *et al.*, 2016; Brunner *et al.*, 2016), notée $\overline{K}(t)$, qui permet d'estimer dans un graphique de valeurs (pic de crue, durée) un contour le long duquel le temps de retour t du couple de valeurs (pic de crue, durée) est connu, par exemple un contour de valeurs décennales. La période de retour de survie de *Kendall* a une définition basée sur la distribution de survie de Kendall :

$$\overline{K}(t) = \Pr[\overline{F}_{X,Y}(X,Y) \geq t], \tag{3}$$

où $\overline{F}_{X,Y}$ est la fonction de survie de X et Y (c'est-à-dire $\Pr(X > x, Y > y)$). La période de retour de survie de *Kendall* peut s'interpréter comme une fonction de dépassement d'un niveau de probabilité. La période de retour de survie de Kendall est défini comme le temps moyen séparant deux évènements critiques correspondant à un niveau de probabilité t :

$$\mathcal{T}_{\overline{K}} = \frac{\mu}{1 - \overline{K}(t)}. \tag{4}$$

D'autres approches se basent sur une fonction de transfert de l'hydrogramme vers une quantification du risque ("Structural scenario", voir Salvadori *et al.*, 2016). Cette option est explorée dans ce rapport au paragraphe 5.4 avec le calcul du transport solide résultant de l'hydrogramme (pic de crue et volume). Avec cette approche, il est possible de revenir à une analyse univariée (le volume solide transporté dans notre cas). Toutefois, chaque site étant unique et présentant souvent plusieurs dysfonctionnements hydrauliques (capacité du chenal insuffisante, dépôt chronique de sédiment), les fonctions de transfert d'un site donné sont potentiellement multiples et à définir pour chaque site. **La définition d'hydrogrammes de projet étant une étape commune à l'analyse de tous les dysfonctionnements hydrauliques, nous nous focalisons ici sur la définition de ces hydrogrammes et laissons aux chargés d'études le soin de proposer les fonctions de transfert pertinentes pour le site étudié.**

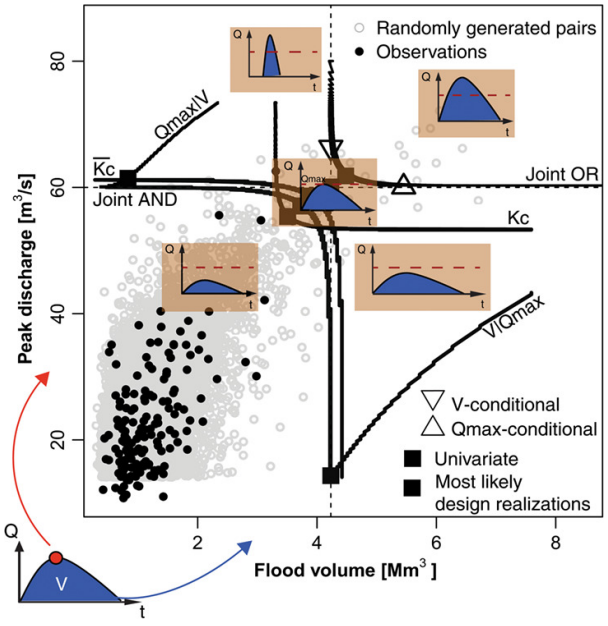


FIGURE 2 – Graphique débit de pointe et volume de l'hydrogramme et contours de temps de retour homogène selon les différentes définitions existantes. La période de retour de survie de *Kendall*, définition retenue dans ce travail, est annotée $\overline{K_c}$. Les points noirs correspondent à des observations et les points gris à des évènements virtuels simulés selon les lois statistiques de l'échantillon. Exemple de la Station de la Birse à Moutier-la-Charrue (figure tirée du résumé graphique de Brunner *et al.* (2016))

2 Données disponibles

Pour cette étude, nous disposons de données de débit pour 273 stations des Alpes et des Pyrénées, cette base de données ayant été constituée lors du travail de Unanoa (2015). Les données de débit proviennent de la banque Hydro et ont un pas de temps variable (procédure d'extraction *Qtvar*). La surface des bassins versants correspondants à ces stations varie de 1 à 1 000 km^2 et la durée minimum des chroniques est de 7 ans. Parmi les 273 stations, 81 stations sont situées dans les Pyrénées et 192 dans les Alpes (voir Figure 3). La plupart de ces stations concernent des petits bassins versants (50-200 km^2), en basse altitude (0-500 m), voir Figure 4.

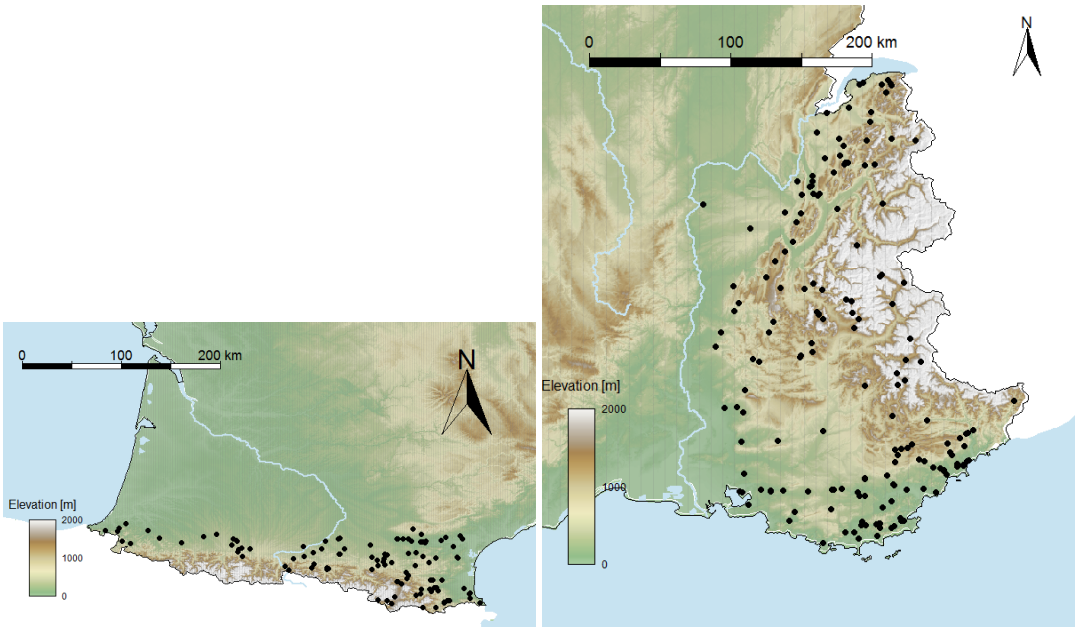


FIGURE 3 – Carte des stations de débits dans les Pyrénées (haut) et les Alpes (bas).

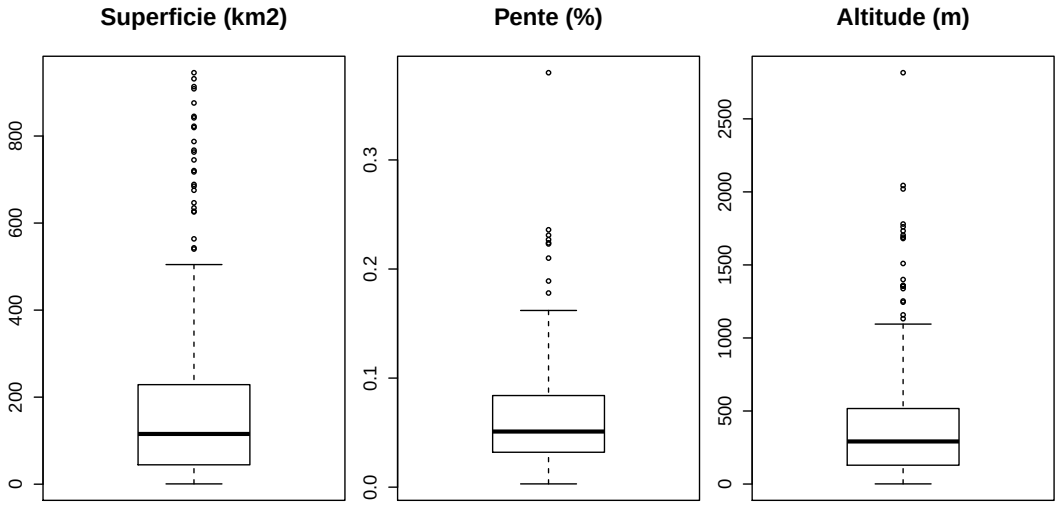


FIGURE 4 – Distribution des superficies, pentes moyennes et altitudes des bassins versants des 273 stations.

3 Extraction des crues et de leurs caractéristiques

Le traitement statistique de ce travail a été réalisé sous le logiciel R. La liste des scripts utilisée est fournie en annexe A.

3.1 Extraction des crues : ensemble $\mathcal{Q}_0$

Pour chaque bassin versant, nous estimons d'abord une *durée caractéristique* D^* (heures) d'après (Cipriani *et al.*, 2012, Eq. 3) :

$$D^* = 7.45\, S^{0.27} \tag{5}$$

où S est la superficie du bassin versant (km^2). D^* correspond à la durée pendant laquelle le débit dépasse la moitié du débit au pic pour un hydrogramme médian normalisé (Figure 5).

Nous extrayons ensuite un premier ensemble de crues $\mathcal{Q}_0$ selon les deux étapes suivantes :

— Les séquences de débits supérieurs à $4 \times Q_{MA}$ sont sélectionnées, où Q_{MA} est le module (moyenne des débits disponibles, en m^3/s), voir exemple à la figure 6,

— Si le temps entre le pic d'une crue et le début d'une crue suivante est inférieur à la durée caractéristiques D^*, les deux crues sont considérées comme étant un seul évènement et sont fusionnées (voir exemple à la figure 7).

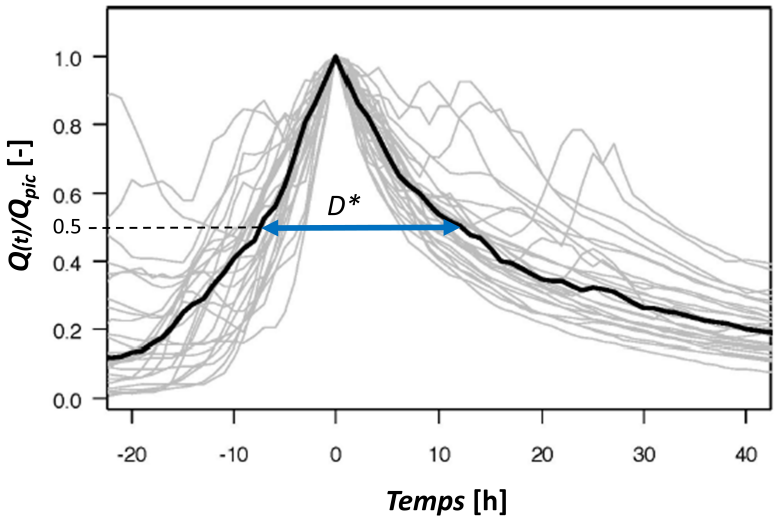


FIGURE 5 – Illustration du calcul de D^* sur les hydrogrammes normés (en gris) et hydrogramme médian (en noir) extraits de la série de débits privés de la composant de base de la Savoureuse à Giromagny (source : Cipriani *et al.*, 2012)

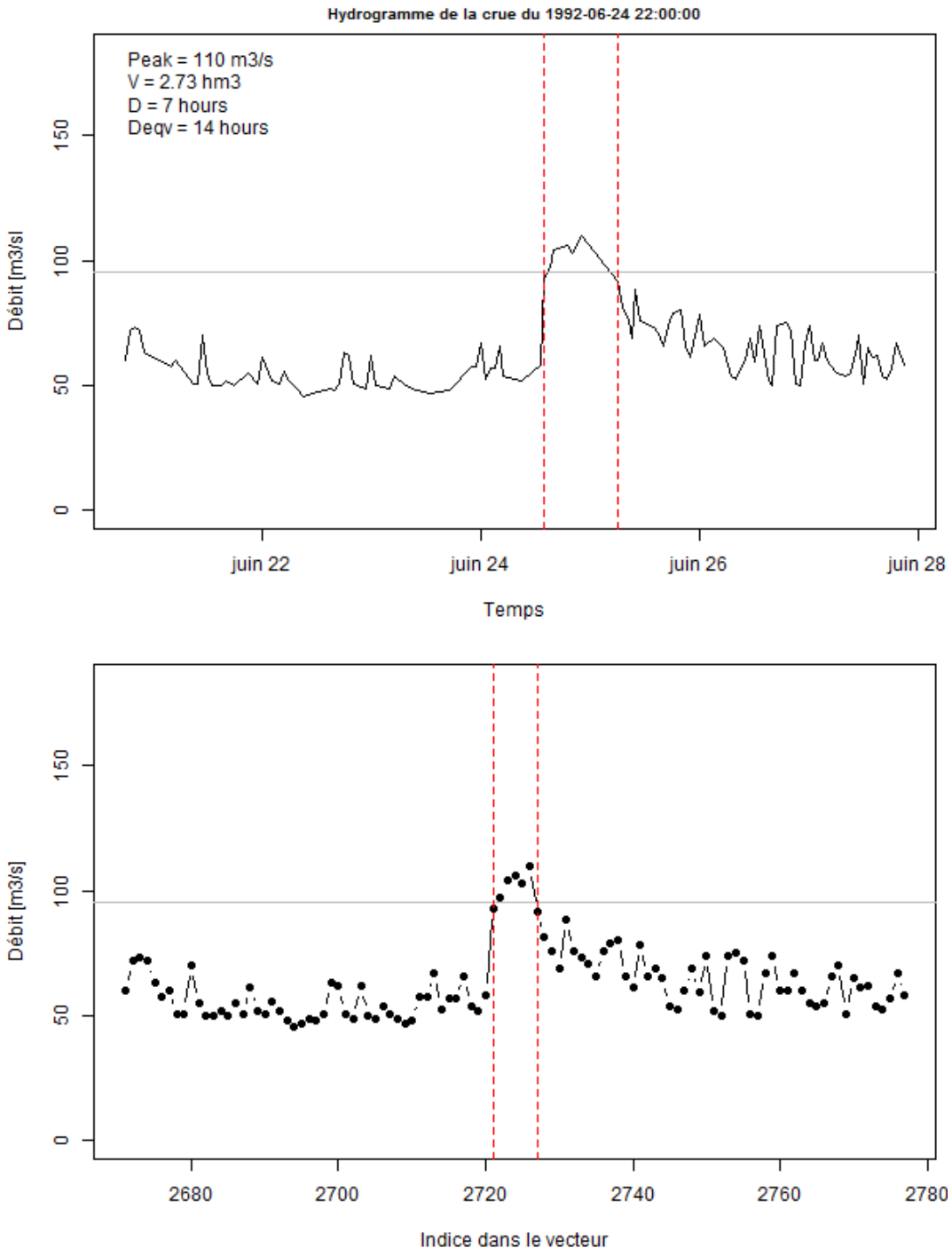


FIGURE 6 – Exemple d'extraction d'une crue pour la station de la Garonne à Saint-Béat (O0010040), le 1992-06-25.

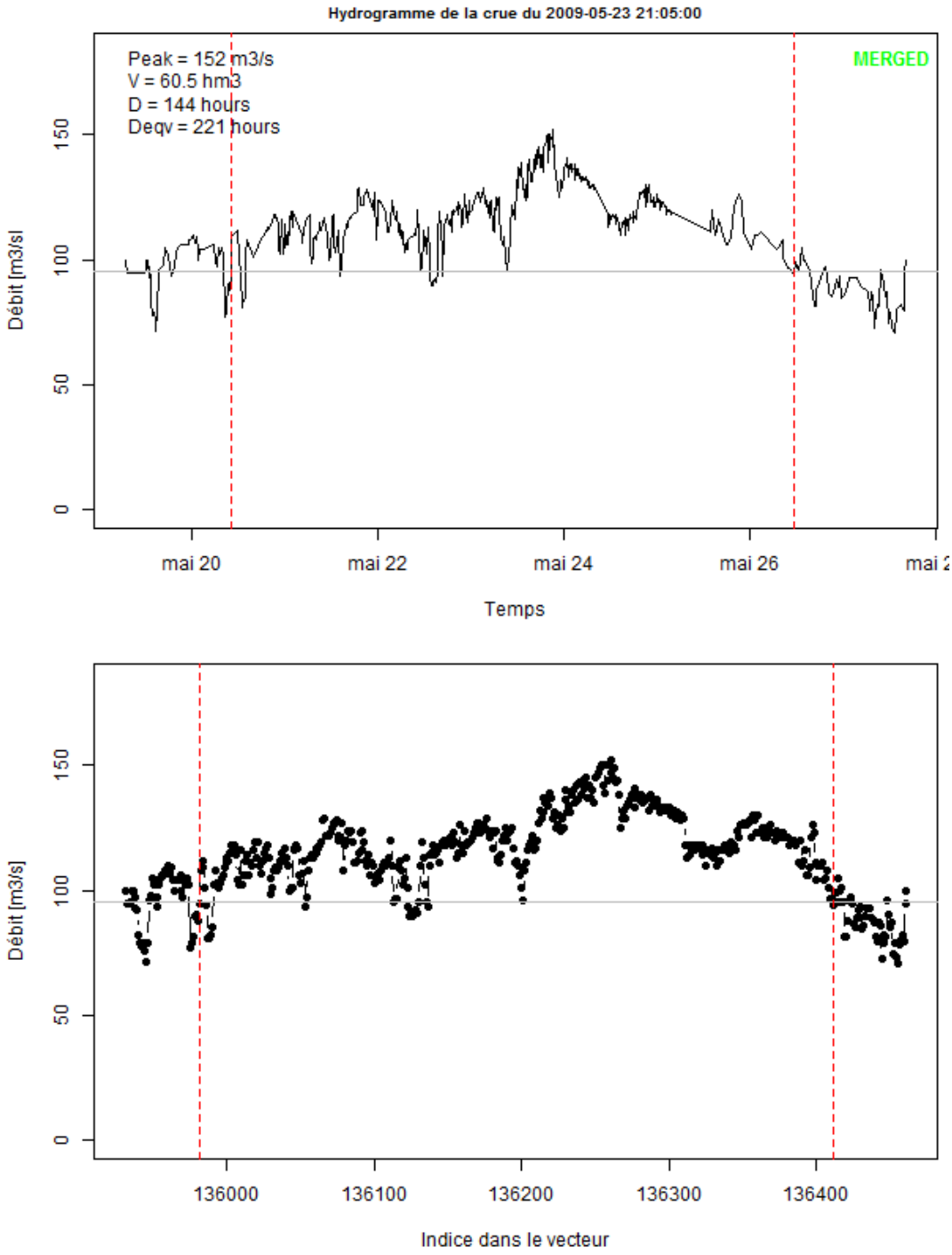


FIGURE 7 – Exemple d'extraction d'une crue après fusion pour la station de la Garonne à Saint-Béat (O0010040), le 2009-05-23.

3.2 Caractéristiques des crues $\mathcal{Q}_0$

Les caractéristiques de chaque crue sont ensuite calculées de la manière suivante :

— **Début, fin et durée de la crue** : Le temps correspondant au début de la crue, où le débit dépasse le seuil $4 \times Q_{MA}$, est estimé à l'aide d'une interpolation linéaire (connaissant le débit et le temps avant et après cet instant). La fin de la crue est estimée de la même manière. La durée de la crue (en heures) est le temps séparant le début et la fin de la crue.

— **Pic de crue** : Le débit de pointe Q_{MAX} (pic de crue, en m^3/s) est le débit maximum de la crue.

— **Volume de crue** : Le volume V de la crue [en hm^3] est estimé avec une intégration par méthode des trapèzes, sur la période séparant le début et la fin de la crue (c'est-à-dire les moments où le débit est égal au seuil $4 \times Q_{MA}$) et avec les débits disponibles.

— **Durée équivalente** D_{EQUIV} : La durée équivalente [en heures] correspondant à la durée correspondant au volume et débit maximum de la crue pour un hydrogramme triangulaire,

$$D_{EQUIV} = 2 \times V \times 1,000,000/(Q_{MAX} * 3600).$$

La figure 8 illustre sommairement ces caractéristiques.

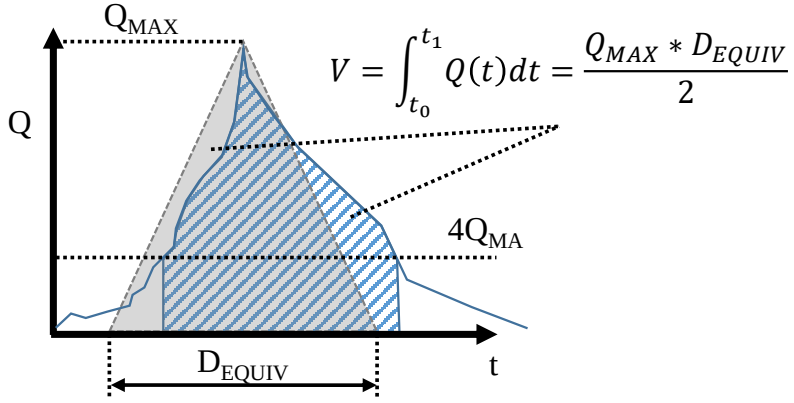


FIGURE 8 – Schéma d'une crue réelle (courbe bleue) et de la crue triangle équivalente (triangle gris) et des caractéristiques correspondantes.

Un important travail d'exploration de ces données de débit a été nécessaire afin de filtrer les mesures dont la qualité peut être mise en doute. Nous avons donc écarté plusieurs types de crues :

— Les crues pour lesquelles les dates n'étaient pas en ordre chronologique et donc visiblement mal renseignées, conduisant à une période longue (plusieurs mois) sans mesures. Un exemple de ce type de crues est donnée à la figure 9. Seulement 4 crues sont concernées sur l'ensemble des stations.

— Les crues dont les mesures semblaient plafonner à un certain niveau de débit, ce qui se traduit par une succession de mesures exactement égales lors du pic de crue. Un exemple est donné à la figure 10. Quatre-vingt crues mesurées sur 30 stations sont concernées par ce problème.

— Les crues pour lesquelles le temps entre deux mesures dépassent 12 heures. Nous considérons que les pics de crue ainsi que les durées associées à ces crues sont trop imprécis pour être utilisés lors de l'ajustement de distributions de probabilité. Ce problème concerne beaucoup de crues (environ 20%) et presque toutes les stations, de façon inégale. Pour certaines stations, il y a plus de crues avec ce type de problème que de crues correctes, pour certaines autres, cela ne concerne que quelques crues. Ce problème est illustré pour deux crues (voir Fig. 11 et 12).

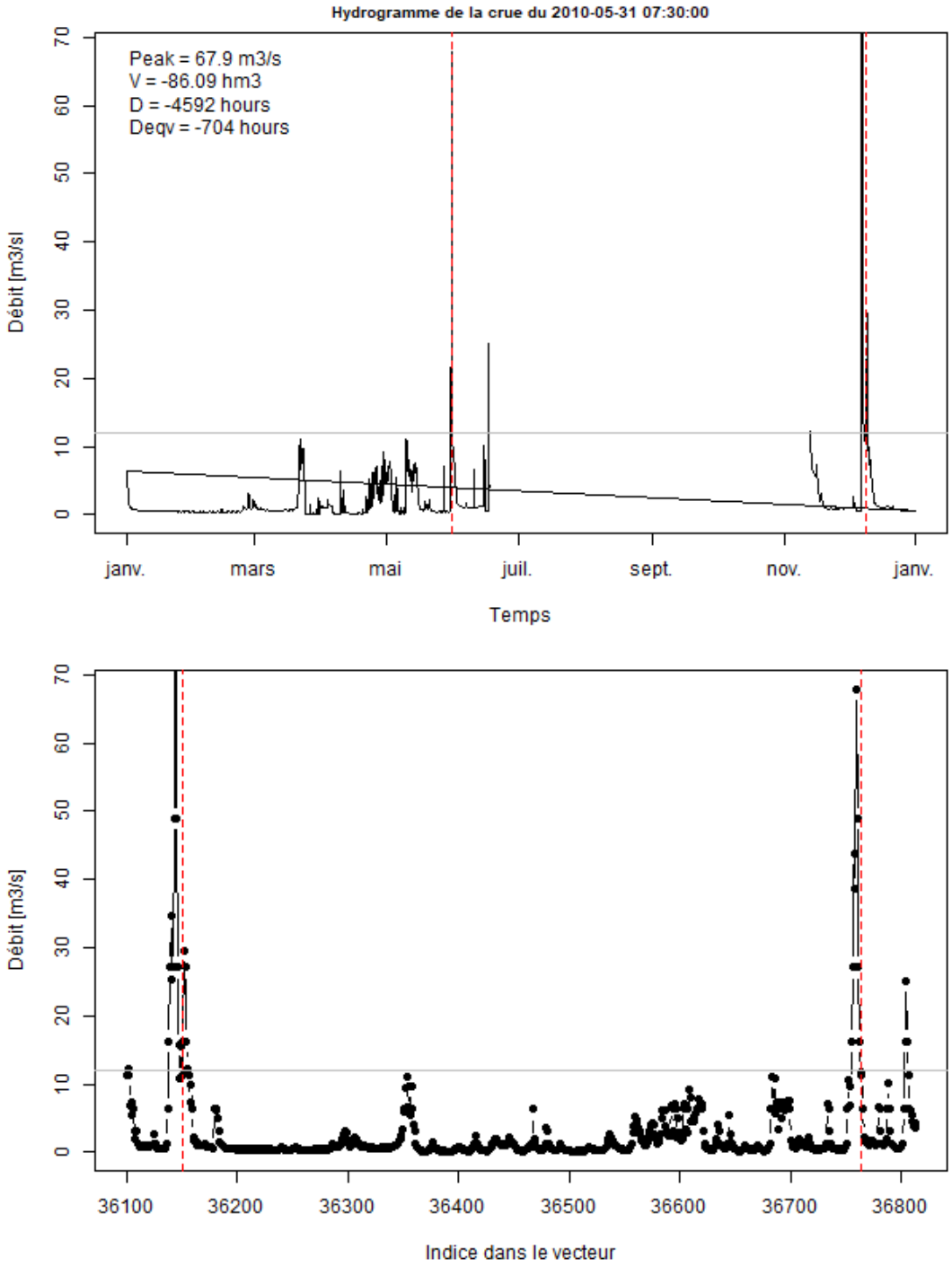


FIGURE 9 – Exemple d'une crue avec des problèmes de dates pour la station de la L'Arly à Ugine, en Savoie (W0414010), le 2010-05-31.

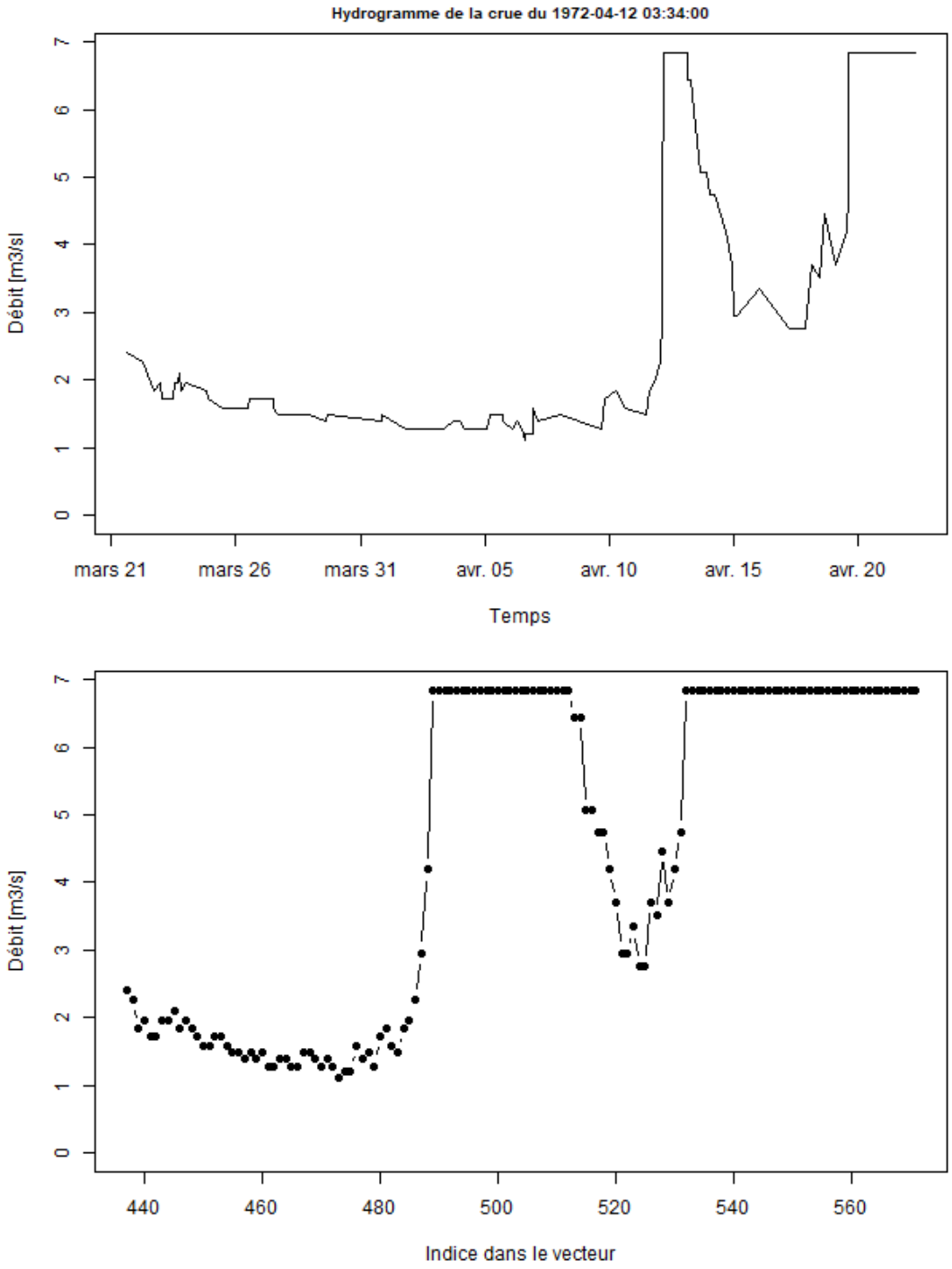


FIGURE 10 – Exemple d'une crue avec de nombreuses mesures plafonnant au pic de crue pour la station de Le Sou à Saint-Martin-de-Villereglan, dans l'Aude (Y1205010), le 1972-03-05.

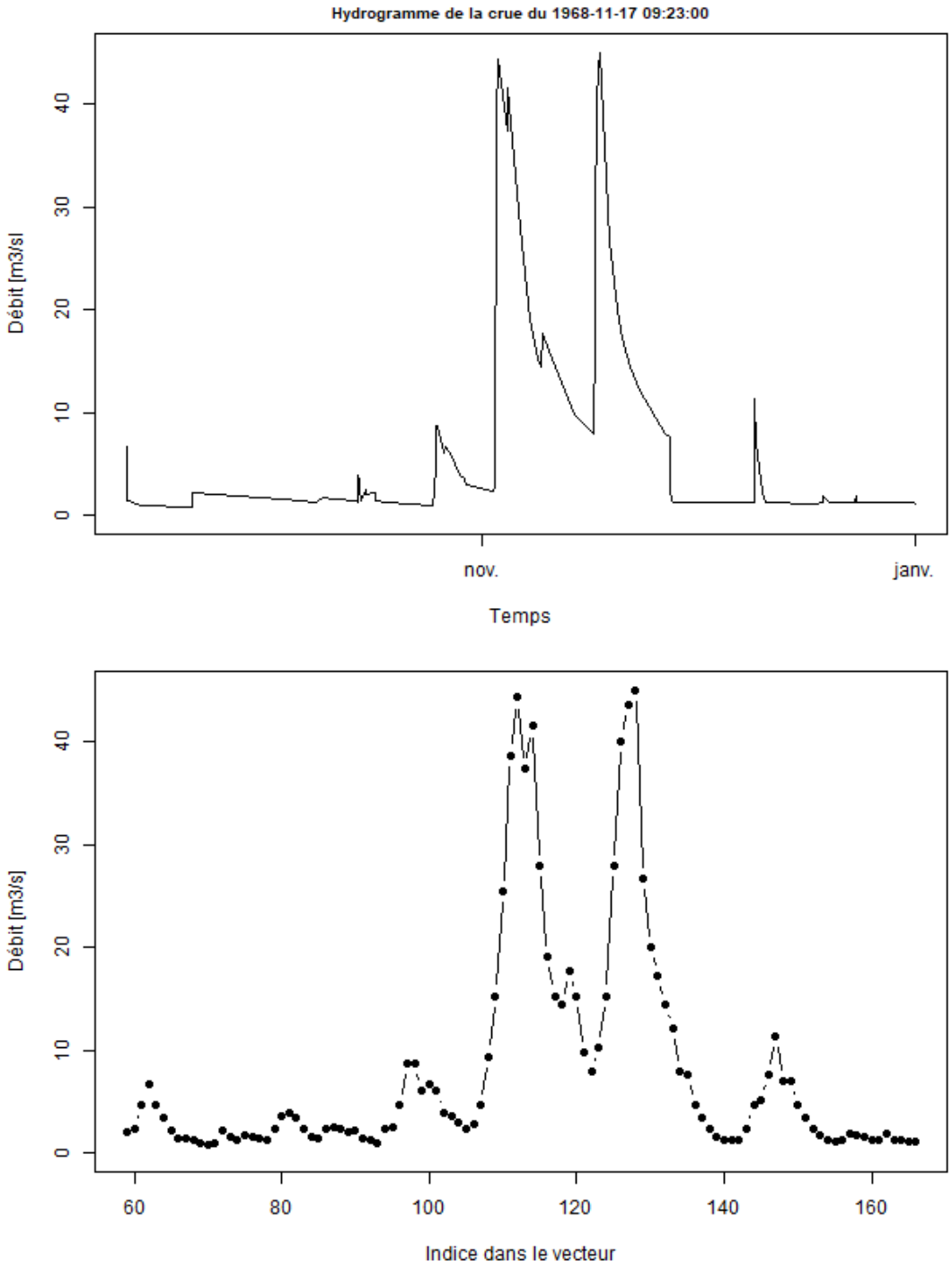


FIGURE 11 – Exemple d'une crue avec de plus de 12 heures entre deux mesures lors d'une crue pour la station de La Siagne à Montauroux (Y5514010), le 1968-02-23.

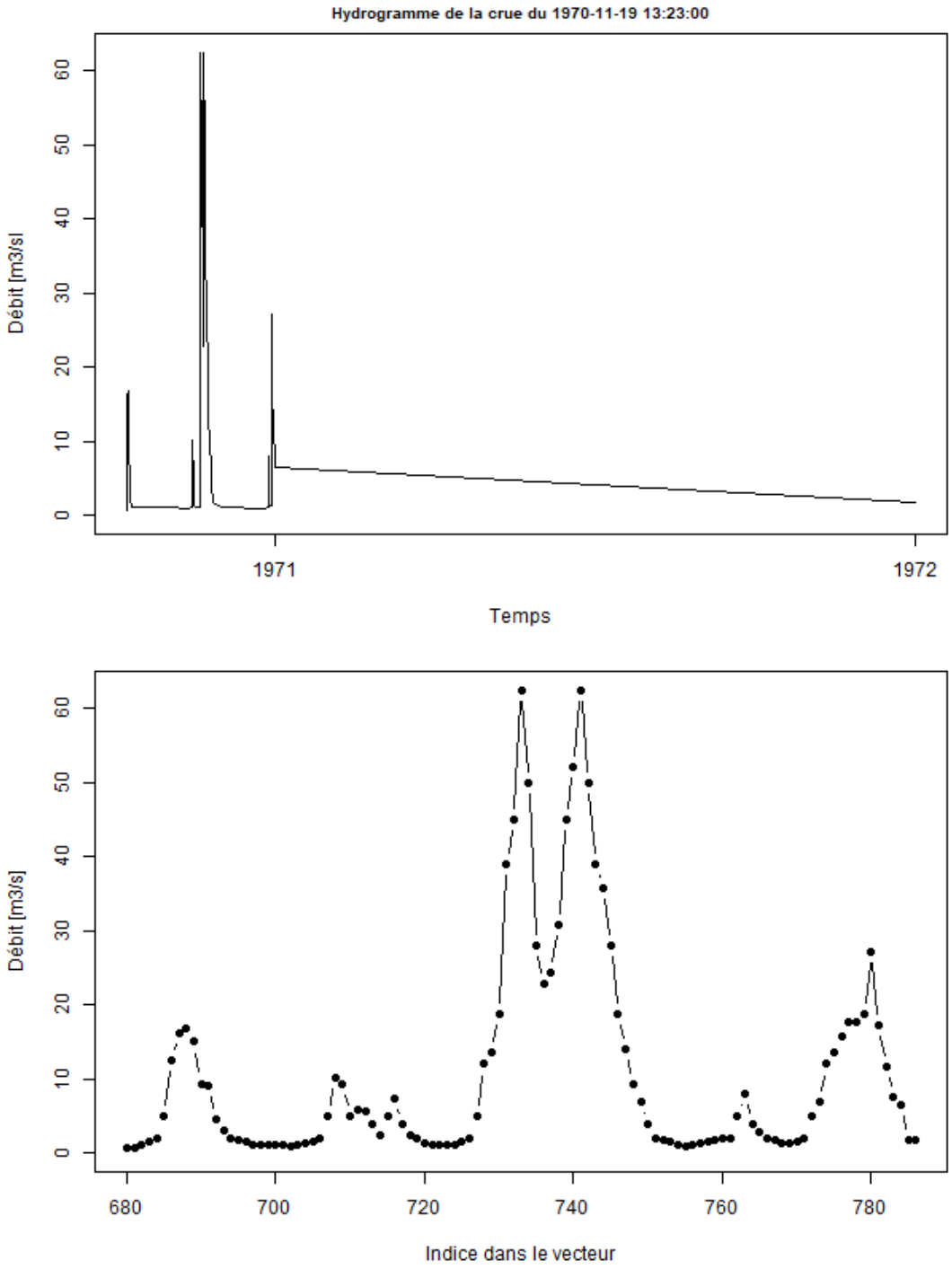


FIGURE 12 – Exemple d'une crue avec de plus de 12 heures entre deux mesures lors d'une crue pour la station de La Siagne à Montauroux (Y5514010), le /1970-01-11.

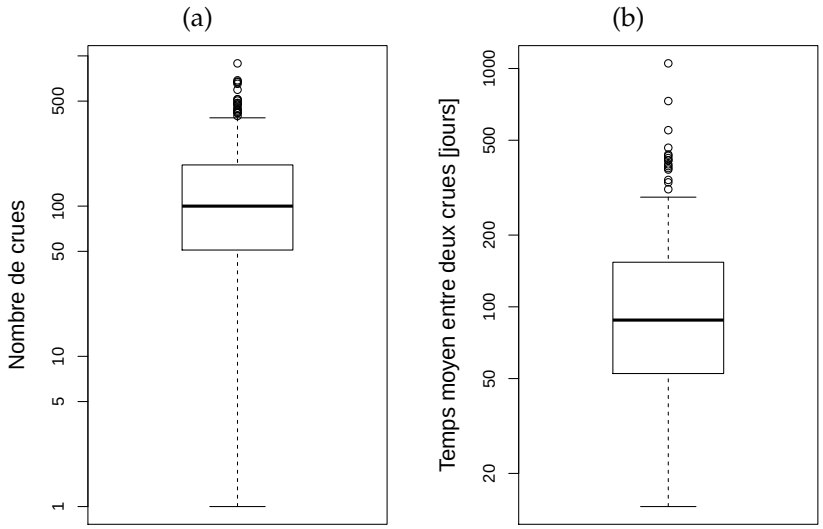


FIGURE 13 – (a) Distribution du nombre de crues par station. (b) Distribution du temps moyen entre deux crues par station.

La figure 13 montre les nombres de crues obtenus pour toutes les stations, et les temps moyens de ces crues. Pour la plupart des stations, entre 50 et 200 crues sont retenues, et quelques-unes en ont très peu (1-10). Quelques mois séparent les crues en général (50-100 jours), avec quelques stations particulières avec peu de temps entre chaque crue (5-10 jours en moyenne).

Les figures 14-16 présentent les statistiques des pics de crue Q_{MAX}, des volumes de crue V et des durées équivalentes de crue D_{EQUIV} par station. La durée équivalente minimum est très courte (quelques secondes) et peut aller jusqu'à plus d'une semaine (200 heures). Ce premier ensemble de crues $\mathcal{Q}_0$ contient donc des crues très courtes (dépassement du seuil sur un seul point) ainsi que de très longues.

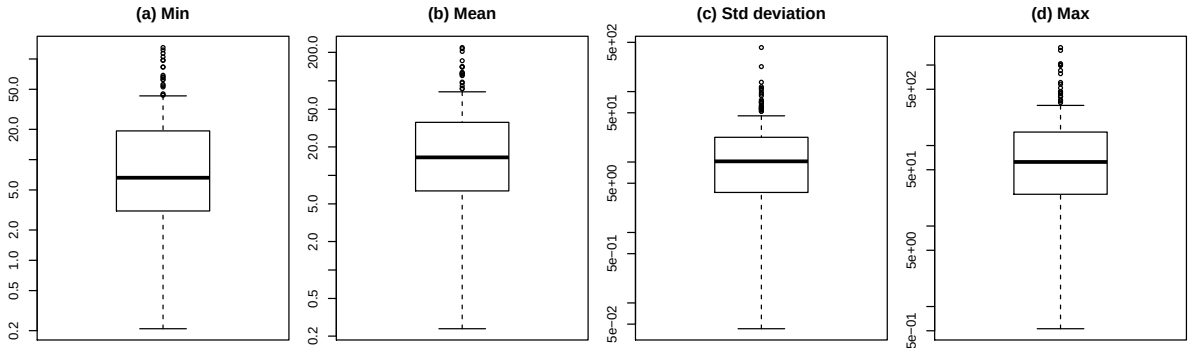


FIGURE 14 – Distribution de certaines statistiques des pics de crue Q_{MAX} par station. (a) Minimum. (b) Moyenne. (c) Écart-type. (d) Maximum.

Pour ce premier ensemble de crues $\mathcal{Q}_0$, nous comparons ensuite les degrés de corrélation entre les pics de crue et les volumes (Fig. 17a) et les durées équivalentes de crues (Fig. 17b). Les liens pic/volume sont plus forts que les liens pic/durée équivalente en général (on passe en moyenne de corrélations autour de 0.7 à des corrélations autour de 0.4). Ce lien moins fort avec les durées équivalentes semble expliqué par les petites crues, comme on peut le voir avec des exemples de nuages de points "pics de crue versus volumes de crue" et "pics de crue versus durées équivalentes" aux figures 18 et 19.

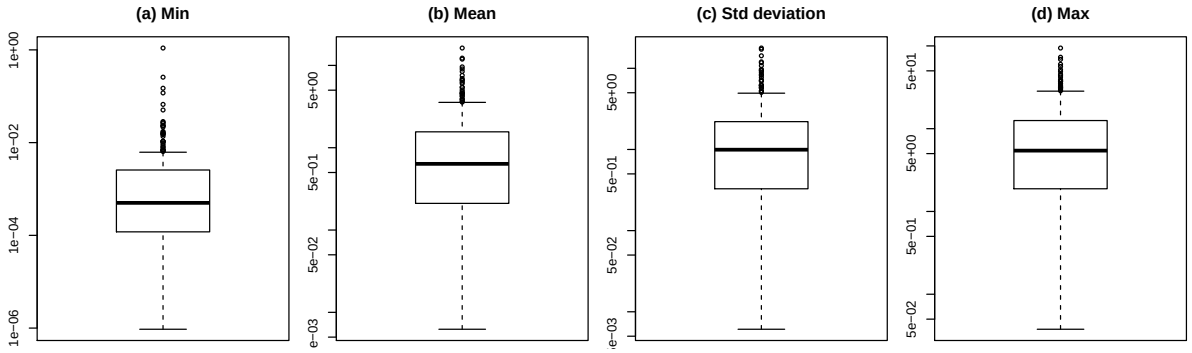


FIGURE 15 – Distribution de certaines statistiques des volumes de crue V par station. (a) Minimum. (b) Moyenne. (c) Écart-type. (d) Maximum.

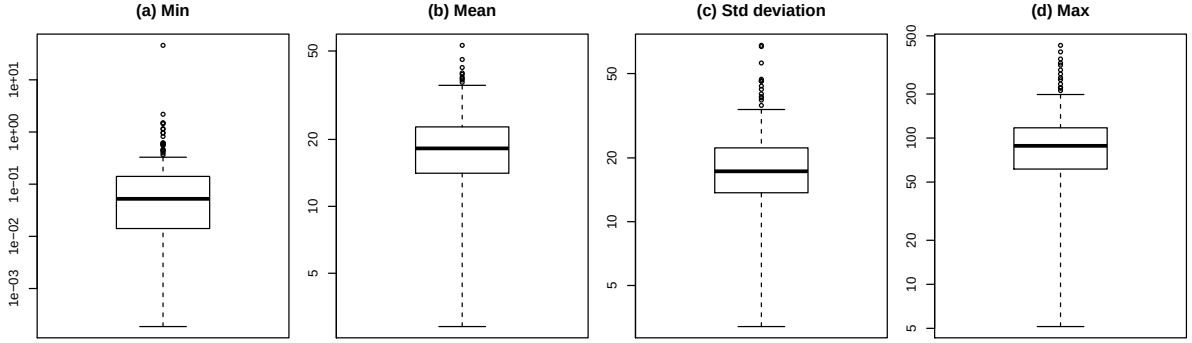


FIGURE 16 – Distribution de certaines statistiques des durées équivalentes de crue D_{EQUIV} par station, en heures. (a) Minimum. (b) Moyenne. (c) Écart-type. (d) Maximum.

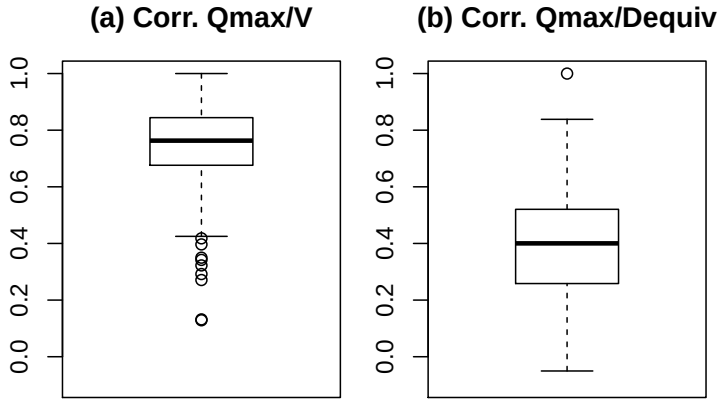


FIGURE 17 – Distribution de corrélations entre les pics de crue Q_{MAX} et (a) les volumes de crue V par station et (b) les durées équivalentes de crue D_{EQUIV} par stations.

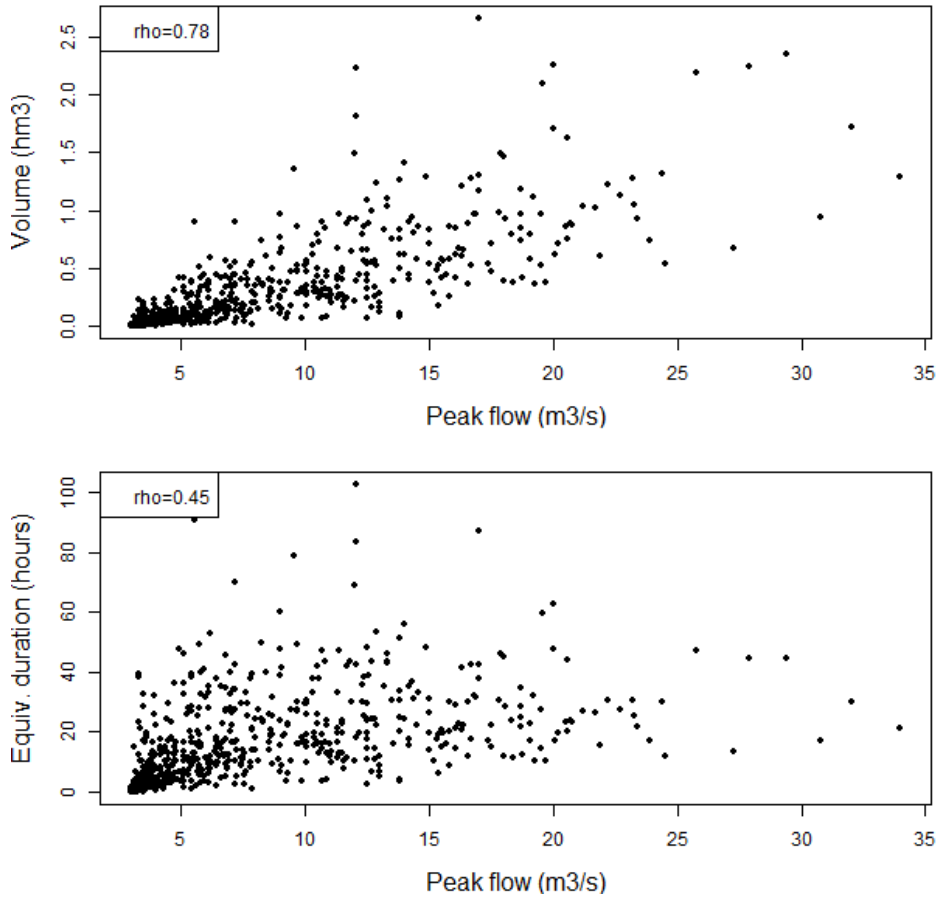


FIGURE 18 – Lien entre les pics de crue et les volumes de crue (haut), ou la durée équivalente (bas), pour la station de l'Aire à Saint-Julien-en-Genevois (V0245610).

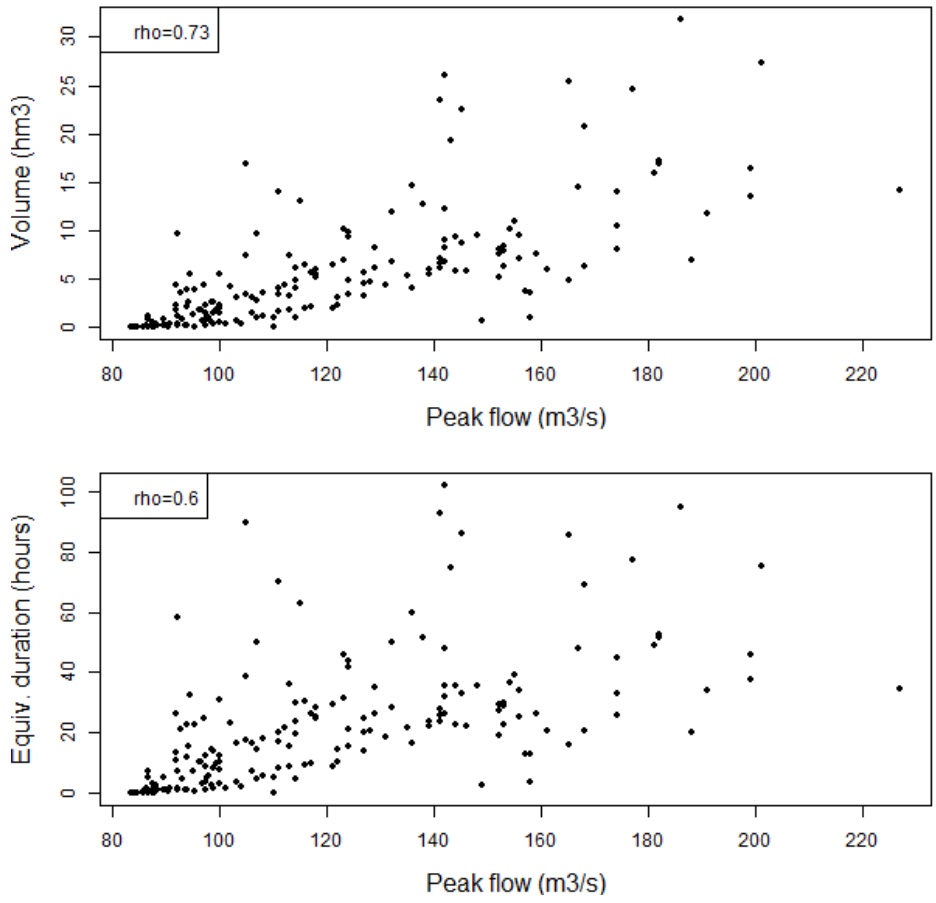


FIGURE 19 – Lien entre les pics de crue et les volumes de crue (haut), ou la durée équivalente (bas), pour la station de La Dranse à Reyvroz (V0334010).

3.3 Sélection d'un sous-ensemble de crues $\mathcal{Q}_1$

Afin de ne conserver que les stations avec des chroniques suffisamment longues et un nombre de crues assez important pour l'ajustement des modèles statistiques bivariés, nous sélectionnons un sous-ensemble de stations $\mathcal{Q}_1$ de la manière suivante :

— sélection des stations avec au moins 25 ans de chroniques de débits observés,

— sélection des stations avec au moins 2 crues/an.

Il en résulte un ensemble de 137 stations. De plus, pour chaque station, nous sélectionnons les n crues avec les débits de pointe les plus élevés, n correspondant à 2 crues par an en moyenne. Ce critère nous permet de retenir les crues les plus fortes, que l'on pourra utiliser pour modéliser le lien débit/durée équivalente des crues et estimer les périodes de retour correspondantes dans un contexte bivarié. Pour ce deuxième ensemble de crues $\mathcal{Q}_1$, nous comparons les degrés de corrélation entre les pics de crue et les durées équivalentes de crue (Fig. 20). Les liens pic/durée équivalente sont, en moyenne, autour de 0.2, souvent proches de 0 et inférieurs à 0.4.

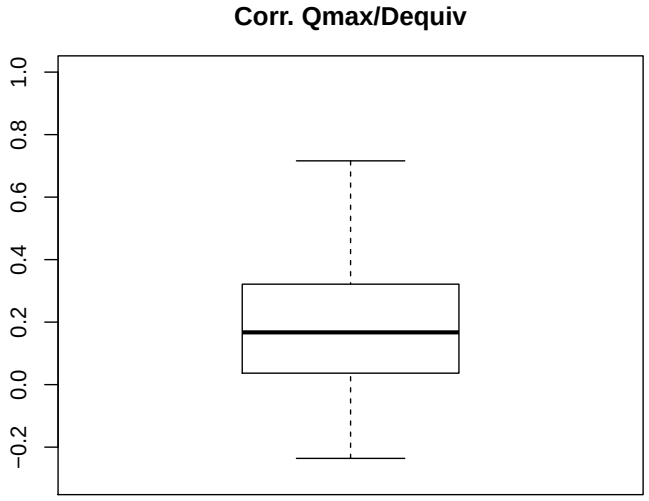


FIGURE 20 – Distribution de corrélations entre les pics de crue Q_{MAX} et (a) les volumes de crue V par station et (b) les durées équivalentes de crue D_{EQUIV} par stations pour l'ensemble de crues $\mathcal{Q}_1$.

4 Modélisation de la distribution bivariée avec les copules

4.1 Principe

Les distributions multivariées classiques, par exemple la distribution gaussienne, présentent plusieurs contraintes. Par exemple, les distributions marginales sont du même type (distributions gaussiennes univariées pour la distribution gaussienne multivariée), ou sur le type de dépendance. Un outil statistique utile qui a été employé dans de nombreuses études hydrologiques (et dans de nombreux autres domaines comme la finance) est la distribution **copule** qui modélise la fonction de dépendance entre des distributions marginales univariées (Favre *et al.*, 2004). Le théorème de Sklar indique que toute distribution bivariée peut être décomposée par une copule unique et les distributions marginales, de la manière suivante :

$$F_{X,Y} = C\{F_X(x), F_Y(y)\} = C(u,v),\ x,y \in \Re, \tag{6}$$

où $F_X(x)$ et $F_Y(y)$ sont les réalisations des distributions marginales et C est la fonction copule qui modélise la **dépendance** entre les distributions marginales. Par construction (*probability integral transform*), $F_X(x)$ et $F_Y(y)$ suivent des distributions uniformes, ce qui explique que la copule C s'applique sur des quantiles u et v uniformément distribués ($(u,v) \in [0,1]^2$).

De nombreuses copules existent, et leur sélection peut être faite sur la base de tests statistiques, critères AIC ou BIC, ou de propriétés des copules (par exemple comment la copule modélise les liens entre les extrêmes : la dépendance de queue). Pour plus d'information sur ces questions, les livres de Nelsen (2006) et Joe (2014) sont de bonnes références, et Genest et Favre (2007) font une revue des outils disponibles sur les copules, avec une illustration en hydrologie.

4.2 Application à l'étude des liens entre pic de crue et durée des crues

Dans cette section, nous cherchons à modéliser la distribution bivariée Pic/Durée équivalente des plus fortes crues pour chaque station (ensemble $\mathcal{Q}_1$). Nous représentons la distribution bivariée :

$$F_{QD}(Q_{MAX}, D_{EQUIV}) = C\{F_Q(Q_{MAX}), F_D(D_{EQUIV})\} = C(u_1, u_2), \tag{7}$$

avec une copule bivariée C et des distributions marginales $F_Q(Q_{MAX})$ et $F_D(D_{EQUIV})$ suivantes :

- **distribution marginale des pics de crue** $F_Q(Q_{MAX})$ **:** Nous avons sélectionné les crues correspondant à un dépassement d'un seuil sur les pics de crue. Une distribution naturelle pour modéliser ces pics de crue est alors la distribution de **Pareto Généralisée** (GPD), la théorie des valeurs extrêmes fournissant des arguments forts pour modéliser les dépassements de seuil avec cette distribution (Coles, 2001), cette théorie étant de plus supportée par de nombreuses applications (Serinaldi et Kilsby, 2014).
- **distribution marginale des durées équivalentes** $F_D(D_{EQUIV})$ **:** Les durées équivalentes sont modélisées par une distribution gamma qui convient bien pour des valeurs positives.
- **Structure de dépendance** C **:** Les copules archimédiennes (Genest et MacKay, 1986; Genest et Favre, 2007) permettent de représenter de nombreuses caractéristiques possibles de la dépendance (degrés de dépendance, dépendance de queue) et présentent de nombreux avantages (estimation, simulation, etc.). L'ensemble de copules considérées est : Clayton, Gumbel, Frank, Joe, BB1, BB6, BB7, BB8. Le critère AIC permet de sélectionner la meilleure copule.

4.3 Illustration pour une station

La figure 21 montre le lien pic/durée équivalente des crues les plus fortes pour la station O0384010 de l'Arac à Soulan (09), pour les 27 années de débits disponibles. Pour cette station, le lien est modéré (paramètre τ de Kendall de 0.21 : 1 correspondant à une dépendance parfaite et 0 à une indépendance totale). Une crue forte et longue se détache assez nettement du nuage de point, avec un débit de pointe de 160 m^3/s et une durée de 50 heures.

Les figures 22 et 23 montrent les ajustements des distributions marginales des pics de crue et des durées équivalentes. Les ajustements semblent raisonnables, même si on peut suspecter une sous-estimation des durées équivalentes les plus grandes avec la distribution gamma ajustée (voir Fig. 23, panel haut/droite).

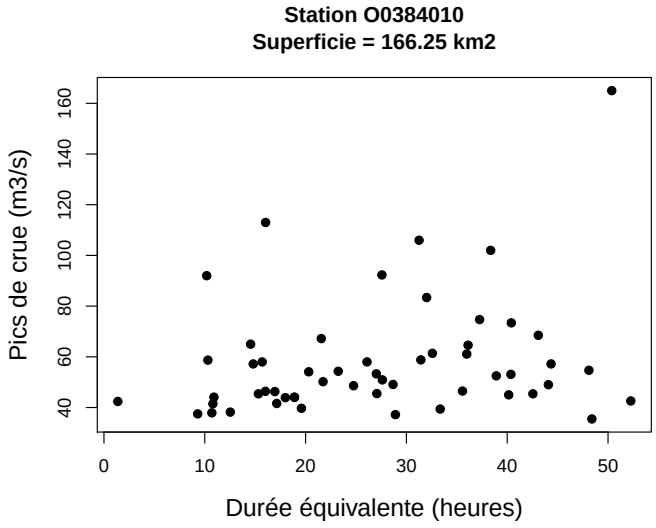


FIGURE 21 – Pics de crue Q_{MAX} versus durée équivalente D_{EQUIV} des crues les plus fortes pour la station O0384010 L'Arac à Soulan (09).

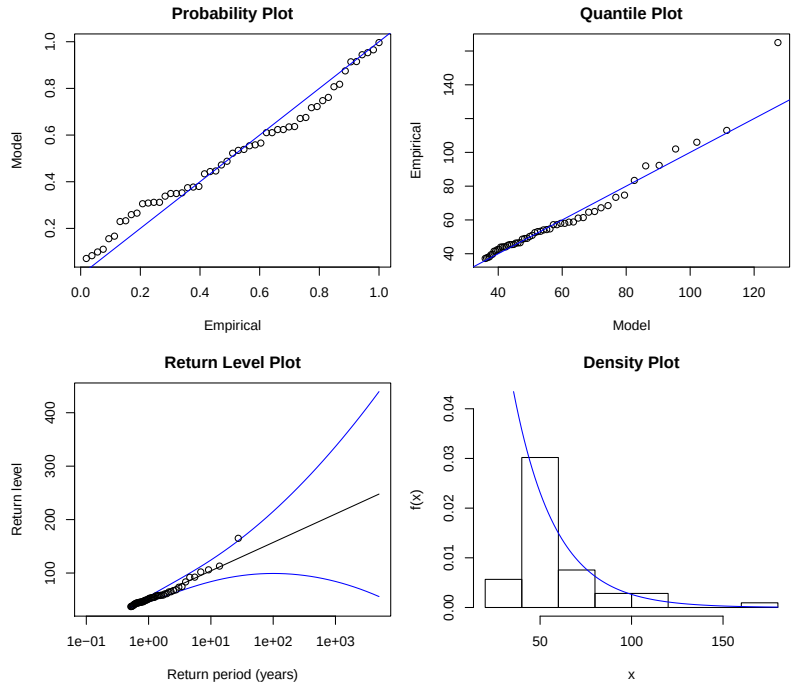


FIGURE 22 – Ajustement des pics de crue Q_{MAX} par une distribution GPD, pour la station O0384010 du l'Arac à Soulan (09).

Pour cette station, la copule Frank est sélectionnée. La figure 24 montre la densité de cette copule. On voit que la densité pour les couples $[u_1, u_2]$ proche de $[1, 1]$ est plus élevée que pour les couples au centre des distributions (autour de $[0.5, 0.5]$), ce qui signifie que la copule reproduit une dépendance positive des valeurs les plus élevées ("extrêmes"). Cette dépendance est néanmoins modérée.

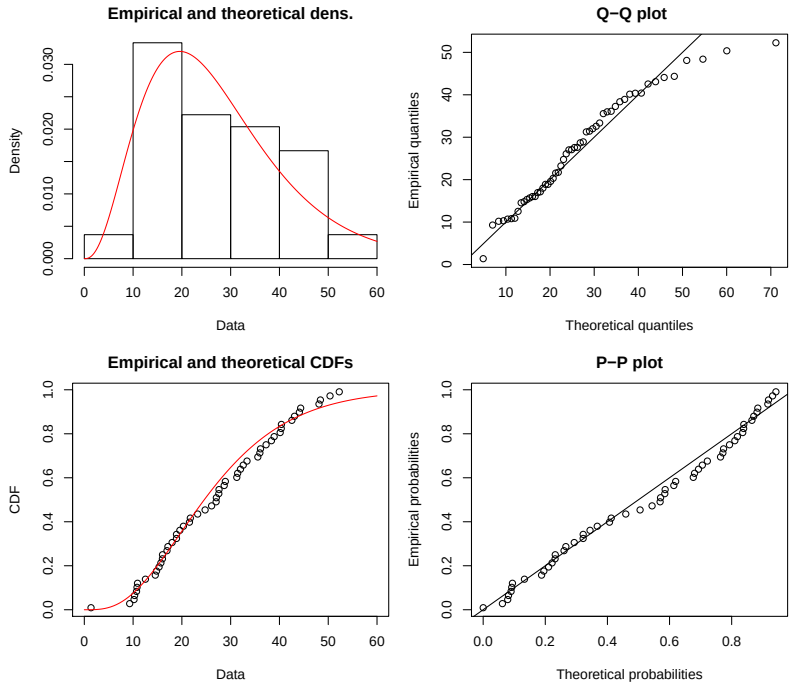


FIGURE 23 – Ajustement des durées équivalentes D_{EQUIV} par une distribution gamma, pour la station O0384010 du l'Arac à Soulan (09).

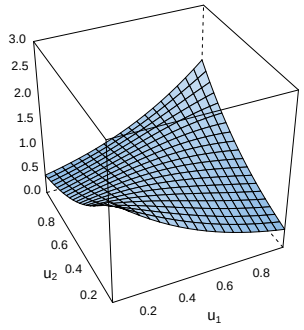


FIGURE 24 – Densité de probabilité de la copule Gumbel ajustée, pour la station O0444010 du Lez aux Bordes (09).

La figure 25 permet de comparer les couples pic/durée observés et simulés à partir de la distribution jointe de l'Eq. 7, toujours pour la station O0384010 de l'Arac à Soulan (09). Pour cette figure, 500 années sont simulées, qui correspondent à 1000 couples pic/durée. Le nuage simulé (points gris) recouvre bien le nuage observé (points noirs). Ce nuage est assez éclaté, en raison de la faible dépendance des pics et des durées équivalentes. Des crues très fortes et courtes, mais aussi très longues et peu intenses, sont simulées.

La figure 26 présentent les contours constitués par tous les couples pics/crues correspondant aux temps de retour 2 ans, 5 ans et 10 ans, selon la définition $\mathcal{T}_{\overline{K}}$ (voir Eq. 4). Les pics de crue décrivant ces contours sont des fonctions décroissantes de la durée équivalente, puisque les durées sont de moins en moins probables lorsqu'elles

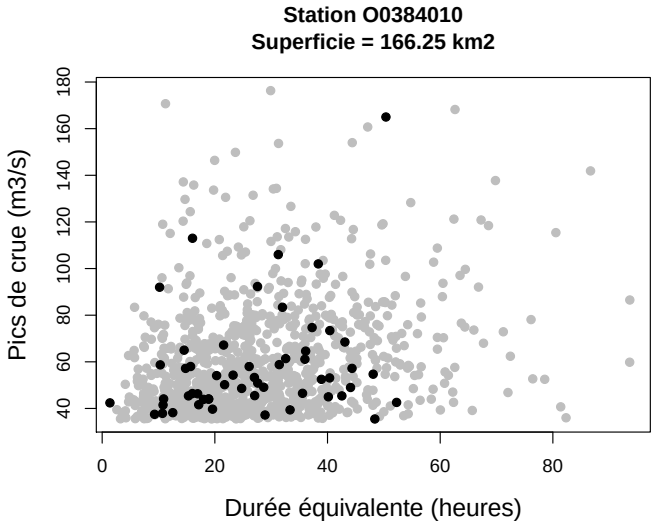


FIGURE 25 – Pics de crue Q_{MAX} versus durée équivalente D_{EQUIV} des crues les plus fortes pour la station O0384010 du l'Arac à Soulan (09). 1000 valeurs simulées de la distribution bivariée ajustée (gris) et observations (noirs).

augmentent (la densité de probabilité des durées est une fonction décroissante). Un seul point n'est pas englobé par le contour de la période de retour 10 ans, et concerne la crue longue (50 heures) et forte (160 m^3/s). Une figure équivalente à la figure 26 est fournie en annexe B pour chacune des stations traitées dans ce travail.

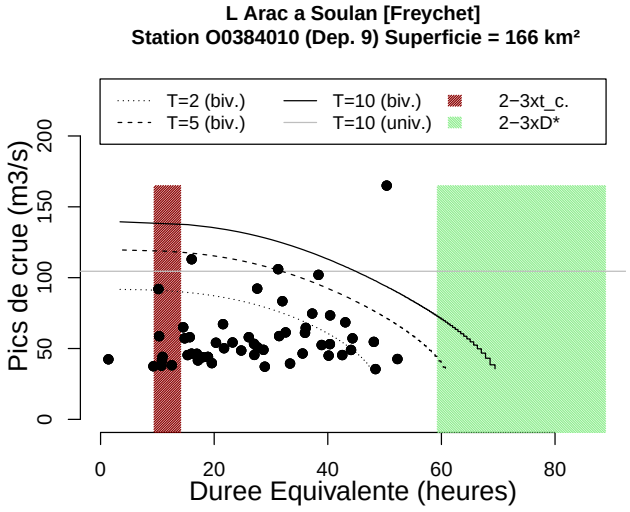


FIGURE 26 – Illustration des contours $\mathcal{T}_{\overline{K}}$ pour différentes périodes de retour, dans l'espace des pics/durées. Afin de faciliter l'interprétation (voir section suivante), il a été ajouté la valeur de débit de pointe décennal ajustée selon une approche classique univariée (ligne grise) et des ordres de grandeur de durées de crue de 2-3 x temps de concentration (formule de Giandotti, 1934) et de 2-3 x la durée D^* de Cipriani *et al.* (2012), voir Equation 5

5 Interprétation et utilisation opérationnelle de l'analyse bivariée

5.1 Analyse univariée et compléments apportés par l'analyse bivariée

Afin d'aider l'interprétation des contours issus de l'analyse multivariée, plusieurs éléments graphiques ont été ajoutés à la Figure 26 pour en faciliter la lecture :

— $Q_{MAX,T=10(univ.)}$ *:* La valeur de débit de pointe décennale $Q_{MAX,T=10(univ.)}$ ajustée par une analyse univariée est représentée par une droite horizontale grise sur la Figure 26. Une étude hydrologique classique menée sur cette station aurait typiquement retenu cette valeur comme débit de pointe décennal. Elle constitue la référence à laquelle les chargés d'études sont habitués. Le seconde étape aurait été de déterminer la durée ou le volume de la crue si l'étude nécessitait d'utiliser un hydrogramme.

— $2-3\ \times D^*$ *:* Le rectangle vert de la Figure 26 correspond à une durée de $2-3\times D^*$ qui peut être considérée en première approximation pour estimer la durée totale d'un hydrogramme, D^* étant calculé avec l'équation 5. Ce choix est issu de la réflexion suivante : Par définition, pour la crue médiane, le débit est supérieur à la moitié du débit au pic pendant la durée caractéristique D^* (Figure 5). En imaginant un hydrogramme sensiblement triangulaire ou ayant une décrue un peu plus longue, on peut faire l'hypothèse que la durée totale de crue est de l'ordre de $2-3\times D^*$.

— $2-3\times t_c$ *:* Un autre point de repère peut être utile : il est d'usage dans la caractérisation des crues d'orage de calculer le *temps de concentration* du bassin versant. En langage commun, le temps de concentration (t_c) est une approximation du temps moyen que mettrait une goutte tombée à l'extrémité d'un bassin pour atteindre son exutoire. Si un bassin versant est soumis à une averse très intense et très courte, la durée de montée de l'hydrogramme est de l'ordre de grandeur du temps de concentration.
On pourrait faire l'hypothèse qu'une durée de crue très courte pourrait être de l'ordre de deux à trois fois ce temps de réponse du bassin versant. C'est une hypothèse forte qui a simplement vocation à donner un point de repère complémentaire. Nous avons calculé le temps de concentration d'après la formule de Giandotti (1934) :

$$t_c = \frac{4S^{0.5} + 1.5L}{0.8(Z_m - Z_{min})^{0.5}} \tag{8}$$

avec t_c temps de concentration (h), S superficie du bassin versant (km^2), L longueur du talweg principal (km), Z_m altitude moyenne du bassin versant (mNGF) et z_{min} altitude de l'exutoire (mNGF). D'autres formules sont d'usage commun dans les cours d'eau torrentiels de montagne mais notre échantillon est plutôt constitué de rivières de piémont qui sont a priori le type de rivière qui a servi a caler la formule originale. Cette durée de $2-3\times t_c$ est représentée par un rectangle rouge foncé sur la Figure 26.

Les réflexions suivantes visent à aider l'interprétation de ces informations additionnelles :

— *vis à vis de* $Q_{MAX,T=10(univ.)}$ *:* On note que le contour bivarié décennal (contour noir continu) croise systématiquement la valeur univariée du même temps de retour (droite grise horizontale). C'est parfaitement normal : les contours visent à caractériser les probabilités de dépassement des *couples* de valeurs (Q_{MAX} ; D_{EQUIV}). **Il n'y a de sens à utiliser et à analyser les contours que si les deux paramètres Q_{MAX} et D_{EQUIV} sont importants dans l'analyse** (voir section 5.4). On déduit de ces contours que des crues particulièrement courtes peuvent avoir un débit $Q_{MAX} > Q_{MAX,T=10(univ.)}$ et être néanmoins de probabilité bivariée décennale de dépassement si leur durée (ou volume) reste faible. Ces crues correspondent aux évènements décrits par la branche supérieure du contour décennal où $Q_{MAX} > Q_{MAX,T=10(univ.)}$. Des crues au pic moins fort peuvent aussi être de probabilité bivariée décennale de dépassement si elles sont particulièrement longues. Ces dernières sont décrites par la branche inférieure du contour où $Q_{MAX} < Q_{MAX,T=10(univ.)}$.

— *vis à vis de* $2-3\times D^*$ *:* Bien qu'il y ait une grande variabilité dans l'échantillon de l'annexe B, on constate à la lecture de l'ensemble des graphiques que les durées estimée à l'aide de la formule de Cipriani *et al.* (2012) sont (i) sensiblement représentatives de crues de durée intermédiaire à longues pour les bassins versants de superficie $S < 50-100\ km^2$ et (ii) représentatives de crues longues, voire surestiment la durée des crues, pour les grands bassins ($S > 150-250\ km^2$). La durée $2-3\times D^*$ constitue toutefois un point de repère intéressant.

— $2-3\times t_c$ *:* Comme initialement supposée, les durées estimées via le temps de concentration ($2-3\times t_c$) et représentées par le rectangle rouge sont courtes et tendent à sous-estimer la durée des crues pour la plupart des bassins versants. Quelques bassins versants ont toutefois un comportement caractéristiques de crues éclair : les crues les plus fortes en débit sont systématiquement courtes (voir section 5.2). L'approximation $D_{EQUIV} \approx 2-3\times t_c$ est dans ce cas une première approximation intéressante.

5.2 Typologie des bassins versants

L'analyse des 137 stations de l'échantillon montre qu'une grande diversité de comportements hydrologiques est observable. Nous avons arbitrairement identifié trois "régimes" (voir exemples Figure 27). Ces derniers n'ont pas de limite précise mais permettent d'identifier des grandes classes de comportement.

— **Régime de crues éclair :** On identifie sur certaines stations que les crues de plus forte magnitude en débit sont courtes (typiquement $D_{EQUIV} \in [24h; 48h]$). Dans ce régime, les crues plus longues ont systématiquement des débits inférieurs. La durée équivalente est alors souvent proche de l'intervalle $D_{EQUIV} \approx 2-3\times t_c$. Ces stations présentent des contours à la forme partiellement ou totalement concave (Figure 27, panneau de gauche) représentatifs d'une dépendance inverse entre Q_{MAX} et D_{EQUIV}.

— **Régime de crues longues :** A l'opposé du spectre, on retrouve des stations pour lesquelles les crues de plus forte magnitude sont aussi les plus longues. Les durées équivalentes sont alors souvent de l'ordre de 2 à 4 jours, même pour des bassins versants de taille restreinte (par exemple Figure 27, panneau de droite). Dans ce régime, on retrouve des crues dans la gamme $D_{EQUIV} \approx 2-3\times D^*$, voire plus longues. La dépendance entre pic de crue et durée équivalente est alors très forte et le contour prend une forme "cassée".

— **Régime intermédiaire :** Un grand nombre de stations se trouve dans un régime intermédiaire entre les deux extrêmes présentés plus haut. Dans ce régime intermédiaire seulement une faible décroissance des débits de pointe est observée avec l'augmentation de la durée équivalente. Ces stations ont un contour concave de forme homogène (Figure 27, panneau central) et la durée des crues varie souvent dans la gamme $3\times t_c < D_{EQUIV} < 3\times D^*$.

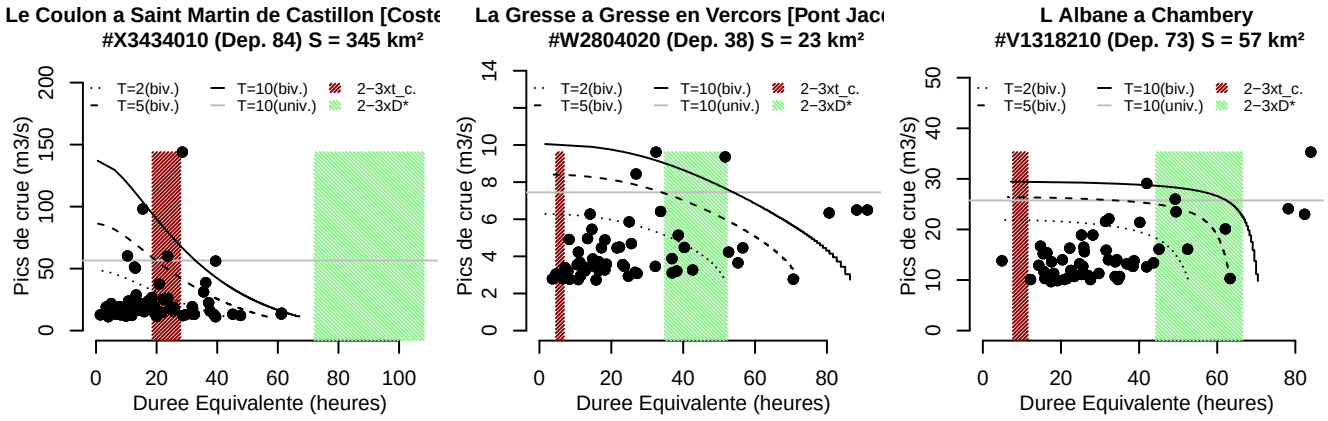


FIGURE 27 – Graphiques pics de crues VS durée équivalente pour trois stations représentatives des trois régimes observés : Le Coulon à Saint-Martin-de-Castillon, crues majeures courtes et peu de crues fortes et longues, **régime de crues éclair** et contour décennal concave (panneau de gauche) ; La Gresse à Gresse-en-Vercors, échantillons plus homogènes avec quelques crues plus fortes qui sont aussi légèrement plus courte, **régime intermédiaire** et contour concave régulier (panneau central) et l'Albane à Chambéry, les crues majeures en débit sont aussi les plus longues, **régime de crues longues** et contour "cassé".

Une première analyse montre que les stations au régime de crue éclair sont plus nombreuses dans la vallée du Rhône et le pourtour méditerranéen. Il n'est détecté aucune station au régime de crues éclair dans les départements de l'Isère, de la Savoie et de la Haute-Savoie. La plupart des stations étudiées ont des régimes intermédiaires. Les stations des Alpes internes, les Alpes du Nord et les Pyrénées Occidentales présentent souvent des contours un peu plus convexes tendant plus ou moins vers le régime de crues longues.

Une tentative d'adimensionalisation de l'ensemble des contours a été menée pour tenter de proposer un faisceau de courbe unique mais la diversité des formes n'a pas permis de proposer une méthode simple et parcimonieuse de régionalisation. Pour l'étude d'une site non jaugé, il est donc recommandé de mener une analyse critique des stations de la région, d'identifier les variables locales qui semblent piloter les régimes de crues (orographie, orientation, régimes de pluies tels que les phénomènes de Lombarde, etc.) et de mener une historique de la dynamique des crues dommageables (durée, situation atmosphérique, etc.).

5.3 Estimation de la durée équivalente décennale uni- et bivariée

Il a semblé utile de chercher à estimer simplement les durées équivalentes des crues décennales, par exemple en première approximation sur les sites jaugés ou pour les stations non jaugées. En compléments des Eqs. (5) (durée caractéristique) et (8) (temps de concentration), nous avons extrait la durée équivalente *à l'intersection du contour bivarié décennal (courbe noire) et de valeur univariée de débit décennal (droite grise)*. Une équation a ensuite été calibrée pour relier cette durée équivalente notée $D_{EQUIV,T=10(univ.)}$ à la superficie du bassin versant dans le même esprit que l'équation (5) pour la durée caractéristique :

$$D_{EQUIV,T=10(univ.)} = 30 \times S^{0.125} \tag{9}$$

Une station des Hautes-Alpes (Le Riou de Crachet a Saint Paul [col de Vars]) a été retirée car elle présentait un comportement très différent du reste de l'échantillon.

En cohérence avec l'ensemble de nos résultats, on remarque que cette équation aboutit à des crues qui sont particulièrement longues, toujours de l'ordre de plusieurs jours. La superficie du bassin versant joue un rôle mais la puissance utilisée (0.125) est faible [1], signe d'une croissance très progressive de la durée des crues avec la taille du bassin versant. La durée est crues est donc vraisemblablement plus liée au régime de précipitation et à la durée des épisodes de pluies extrêmes qu'à un quelconque temps de réponse du bassin versant.

L'ajustement de l'Eq. 9 et la dispersion des points sont illustrés dans la Figure 28. Dans ce graphique aussi, la gamme de variation de $2-3\times D^*$ est représentée par une bande verte claire. Par ailleurs les durées $2-3\times t_c$, qui dépendent de la superficie du bassin versant mais aussi d'autres variables (longueur du drain, altitudes moyennes et basse), sont représentées par des segments rouges foncés.

On constate que, à l'exception des quelques bassins versants des Alpes-Internes et de la Plaine-Méditerranéenne, l'Eq. 9 estime la durée mesurée dans une gamme d'incertitude de [0.5 ; 2] et que la plupart des bassins versant sont dans la gamme [0.75 ; 1.3] (voir aussi Figure 29). Dans les zones des Alpes-Interne de la Provence et des Pyrénées-Est, les valeurs sont majoritairement légèrement plus longues que la valeur estimée par l'Eq. 9 tandis qu'elles sont légèrement plus courtes dans les zones de la Plaine-Méditerranéenne et des Pré-Alpes du Nord.

On constate ici encore que la durée $2-3\times D^*$ (bandeau vert) intersecte les durées équivalentes pour les bassins versants de taille petite à intermédiaire mais qu'elle semble surestimer les valeurs pour des bassins versants de plusieurs centaines de kilomètres carrés. La gamme de durée $2-3\times t_c$ dans cette figure est généralement trop faible pour estimer les durées équivalentes, excepté pour quelques bassins versants de la Plaine-Méditerranéenne qui ont très probablement un régime de crues éclair.

1. La croissance du débit avec le bassin versant est par exemple plutôt de l'ordre d'une puissance de 0.8 (Cipriani *et al.*, 2012)

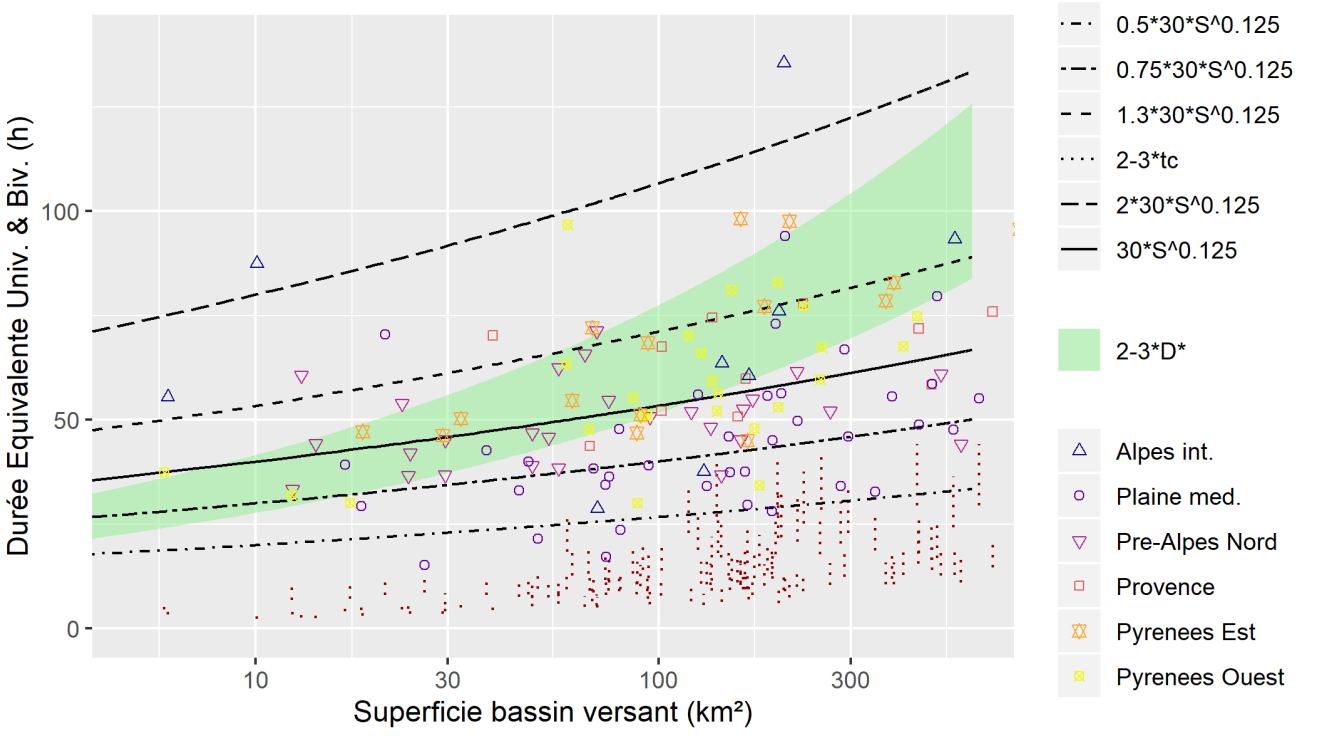


FIGURE 28 – Estimation de la durée équivalente des crues à l'intersection du contour bivarié décennal et de la valeur univariée de pic de crue décennal

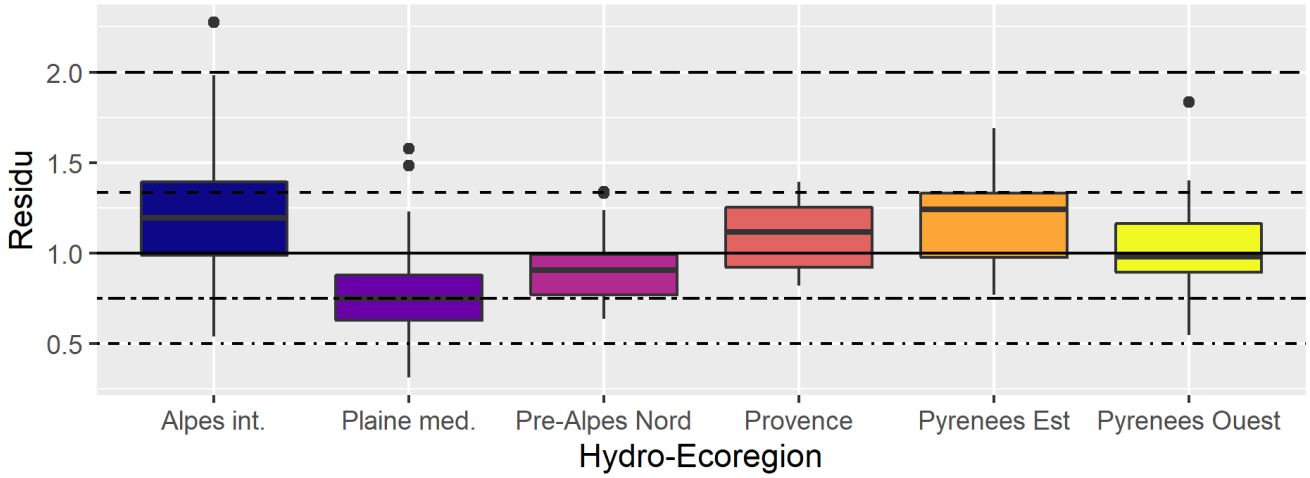


FIGURE 29 – Déviation entre la valeur de la durée équivalente décennale estimée par l'Eq. 9 et la valeur estimé sur les contours ajustés statistiquement

5.4 Exemple d'utilisation d'une analyse bivariée : l'estimation du transport solide

5.4.1 Méthode d'estimation du transport solide

Afin de montrer une utilisation possible de l'analyse bivariée, nous avons réalisé un calcul du transport solide par charriage pour la station exemple de l'Arac à Soulan. Le transport solide a été estimé pour toutes les crues de l'échantillon et pour des crues du contour décennal sur la base des hypothèses suivantes :

— Hydrogramme triangulaire de caractéristique (Q_{MAX}, D_{EQUIV}) ;

— Capacité de charriage instantané estimée par la formule de Recking (2013) :

$$Q_s = W\sqrt{g(\rho_{rock}-1)D_{84}^3}\frac{\rho_{rock}}{\rho_{sed}}\frac{14\tau^{*2.5}}{1+(\tau_m^*/\tau^*)^4} \tag{10a}$$

$$\tau^* = \frac{S}{(\rho_{rock}-1)D_{84}(2/W+74p^{2.6}(gI)^p(Q/W)^{-2p}D_{84}^{3p-1}} \tag{10b}$$

$$\tau_m^* = (5I+0.06)(D_{84}/D50)^{4.4\sqrt{I}-1.5} \tag{10c}$$

avec Q_s transport solide volumique apparent (m^3/s), W largeur du cours d'eau (m), g accélération de la gravité (9.81 m/s^2), ρ_{rock} et ρ_{sed} densités de la roche et des sédiments (-), D_{84} et D_{50} quantile 84% et 50% de la courbe granulométrique (m), τ^* contrainte de Shields (-), I pente du court d'eau (m/m) et p paramètre de la loi de frottement avec $p = 0.23$ pour $Q/(W\sqrt{gID_{84}^3}) < 100$ et $p = 0.3$ sinon (-).

— Volume total charrié calculé par intégration de l'équation 10 sur l'ensemble de la crue.

— Largeur du cours d'eau de W=21 m et pente S=1%, valeurs mesurées sur le site *www.geoportail.fr* ;

— Granulométrie inconnue et fixée à D_{84}=5 cm et D_{50}=2 cm. Les granulométries réelles n'étant pas connues pour la station, la valeur absolue du volume total charrié est entachée d'erreur. Afin de ne pas afficher un volume transporté qui n'aurait aucune réalité physique, nous avons normalisé tous les volumes estimés par la valeur maximum calculée sur le contour décennal (Figure 30). La valeur maximale sur le contour est donc égale à 1, des crues de plus forte magnitude (et donc moins probables) peuvent afficher un volume transporté de plus de 1.

5.4.2 Résultats

On identifie bien sur la Figure 30a l'évolution du volume transporté en fonction de la durée équivalente. La durée équivalente de la crue dimensionnante vis à vis du volume transporté est celle qui maximise le volume transporté (44 h dans le cas de l'Arac à Soulan). Les crues plus courtes ou plus longues génèrent un transport solide moins important, par exemple des crues décennales avec D_{EQUIV} = 24 h et 56 h transporteraient respectivement 25% et 15% de moins que la crue de 44 h. La taille variable des points sur la Figure 30b permet de prendre conscience du volume transporté pour les crues de l'ensemble de l'échantillon tandis que la position du point indique la magnitude bivariée des épisodes historiques (points noirs) en comparaison avec les crues décennales théoriques du contour (points gris).

Pour cette station particulière, la crue dimensionnante en volume transporté a un débit de pointe de 106 m^3/s, très proche de la valeur du débit de pointe décennal estimé par l'approche univariée à $Q_{MAX,T=10(univ.)}$=104 m^3/s. C'est le fruit du hasard dans ce cas précis et cela pourrait changer si les granulométries étaient très différentes. Sur d'autres sites, la crue dimensionnante en volume transporté est différente de celle dimensionnante selon une analyse monovariée du débit de pointe. Une analyse rapide nous laisse toutefois penser que les ordres de grandeur restent en général proches. **Cela signifie que dans la majorité des cas, en première approche, il reste pertinent de travailler avec une analyse univarié des débits de pointes et de calculer le transport solide cumulé sur un hydrogramme utilisant cette valeur *à condition de choisir une durée équivalente pertinente*** (par exemple avec l'approche proposée dans la section 5.3).

Il apparaît aussi clairement sur la Figure 30b que l'évènement exceptionnel de pic de crue 160 m^3/s et de durée équivalente d'environ 50 h aurait généré un transport solide équivalent à environ 150% du maximum décennal. Les crues de moindre magnitude ont par contre des volumes transportés qui décroissent rapidement.

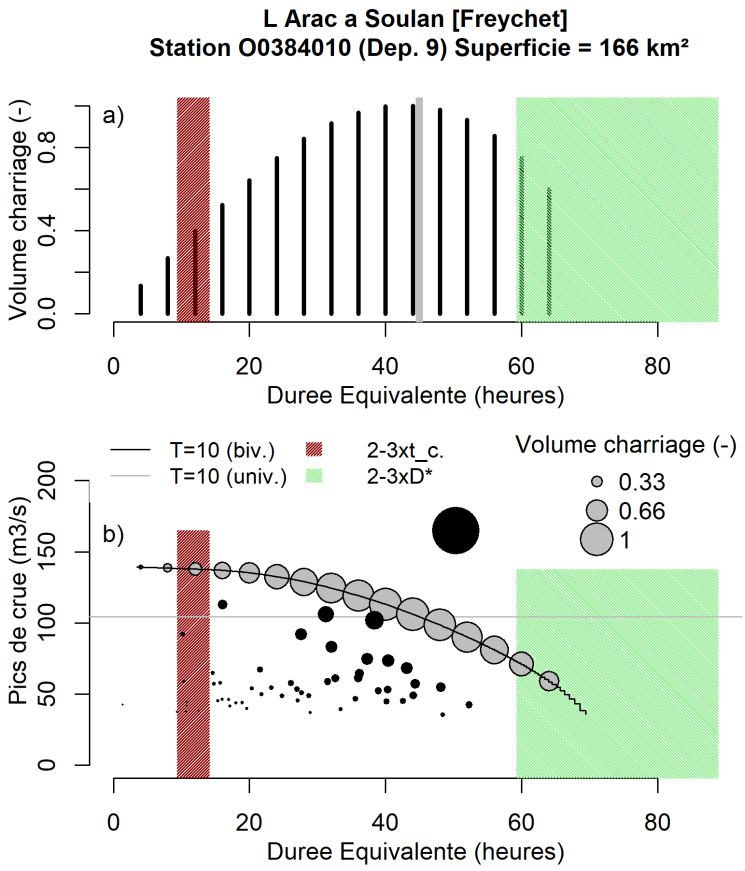


FIGURE 30 – Analyse bivariée des crues décennales de l'Arac à Soulan et du transport solide par charriage : a) estimation des volumes de charriage pour les crues du contour décennal de différentes durées équivalentes et b) diagramme pics de crues / durées équivalente, la taille des points étant proportionnelle au volume de charriage

Cet exemple pourrait être appliqué à d'autres variables réponses telle que le volume de crue générant des inondations (Bokhove *et al.*, 2019), les niveaux maximums atteints, etc.

Conclusion

La première étape de cette action consistait à développer et à implémenter une méthode statistique permettant l'estimation de niveaux de retour dans un contexte bivarié pour caractériser les crues torrentielles avec le débit de pointe et la durée équivalente. Nous proposons un modèle parcimonieux (c'est-à-dire avec un nombre raisonnable de paramètres) à l'aide de distributions marginales classiques (gamma and Pareto généralisée) et de copules Archimédiennes (pour la modélisation de la dépendance). Ce modèle bivarié permet d'obtenir directement les débits et durée équivalentes associés à différents temps de retour (y compris en extrapolation). Les résultats préliminaires de cette étude permettent déjà d'apprécier une structure spatiale de la dépendance pics de crue / durée des crues importantes. Trois régimes de comportements ont été identifiés : un régime de crues éclair, un régime de crues longues et un régime intermédiaire (voir Figure 27).

Le croisement de ces contours avec les approches classiques d'estimation du débit (ajustement statistique univarié) et des durées des crues (temps de concentration et durée caractéristique) a permis de mettre en lumière que les crues décennales sont en générales longues, durant quasiment systématiquement un à plusieurs jours. La durée des crues est ainsi plus à relier à celle des précipitations qu'à un temps de réponse du bassin versant. Une formule complémentaire a été proposée pour estimer une durée équivalente moyenne qui serait valable à la fois dans une approche univariée et dans une approche bivariée.

Lors de l'analyse d'un site disposant de données hydrologiques suffisantes, en utilisant la méthode proposée, les chargés d'études peuvent générer des familles d'hydrogrammes sur la base d'un contour de temps de retour connu. Ces hydrogrammes peuvent servir dans une étape suivante pour analyser plusieurs variables réponses du système le long d'un contour donné, par exemple :

— Volume d'eau stocké dans des ouvrages de rétention ;
— Niveau maximum au droit d'un pont ou d'un évacuateur de crue [2] ;
— Volume de transport solide ;
— etc.

Dans le cas le plus typique, le chargé d'étude mènera dans un premier temps une analyse univariée sur le débit de pointe pour caractériser la capacité du chenal dans les zones à géométrie stable (absence de dépôts et d'érosions), puis analysera dans un cadre bivarié (ou sur la base de quelques scénarios d'hydrogramme générés avec la durée estimée par l'Eq. 9 en intégrant une incertitude) des variables réponses particulières, par exemple le volume solide transporté, comme illustré au paragraphe 5.4.

2. La méthode SHYPRE présentée dans Paquet *et al.* (2014) est un exemple d'une méthode univariée visant à caractériser la distribution de cote maximale atteinte dans une retenue sur la base de la simulation de très nombreux hydrogrammes de forme et de magnitude variée. Cette méthode rappelle un peu l'approche proposée ici mais elle est univariée et ne vise qu'à caractériser la variable de cote de retenue qui est clé dans l'analyse du risque de rupture. Elle ne permet pas de calculer d'autre variables réponses telle que le transport solide, il faudrait pour cela décliner la méthode SHYPRE en application au transport solide.

Références

BOKHOVE, O., KELMANSON, M., KENT, T., PITON, G. et TACNET, J. (2019). Communicating (nature-based) flood-mitigation schemes using flood-excess volume. *River Research and Applications*, 35(9):1402–1414.

BRUNNER, M. I., SEIBERT, J. et FAVRE, A.-C. (2016). Bivariate return periods and their importance for flood peak and volume estimation. *Wiley Interdisciplinary Reviews : Water*, 3(6):819–833.

CIPRIANI, T., TOILLIEZ, T. et SAUQUET, E. (2012). Estimation régionale des débits décennaux et durées caractéristiques de crue en France. *La Houille Blanche*, (4–5):5–13.

COLES, S. (2001). *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. Springer Series in Statistics. Springer-Verlag London.

FAVRE, A.-C., ADLOUNI, S. E., PERREAULT, L., THIÉMONGE, N. et BOBÉE, B. (2004). Multivariate hydrological frequency analysis using copulas. *Water Resources Research*, 40(1).

GENEST, C. et FAVRE, A.-C. (2007). Everything You Always Wanted to Know about Copula Modeling but Were Afraid to Ask. *Journal of Hydrologic Engineering*, 12(4):347–368.

GENEST, C. et MACKAY, R. J. (1986). Copules archimédiennes et familles de lois bidimensionnelles dont les marges sont données. *The Canadian Journal of Statistics / La Revue Canadienne de Statistique*, 14(2):145–159.

GIANDOTTI, M. (1934). Previsione delle piene e delle magre dei corsi d'acqua, memorie e studi idrografici, pubbl. 2 del servizio idrografico italiano : Rome, italy, vol. *VIII*, 107.

JOE, H. (2014). *Dependence Modeling with Copulas*. Chapman and Hall/CRC, Boca Raton.

NELSEN, R. B. (2006). *An Introduction to Copulas*. Springer Series in Statistics. Springer-Verlag, New York, 2 édition.

PAQUET, E., AUBERT, Y., ARNAUD, P., ROYET, P. et FINE, J. A. (2014). Prédétermination des crues et cotes de projet par les méthodes SHYPRE et SCHADEX - application à un aménagement fictif sur le tech. *La Houille Blanche*, (5):65–72.

PITON, G., VÁZQUEZ-TARRÍO, D. et RECKING, A. (2016). Can bed-load help to validate hydrology studies in mountainous catchment ? the case study of the roize (voreppe – fr). *in Proc. of 3rd European Conference on Flood Risk Management (FLOODrisk 2016)*, 7:04020.

RECKING, A. (2013). Simple method for calculating reach-averaged bed-load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139:70–75.

SALVADORI, G., DE MICHELE, C. et DURANTE, F. (2011). On the return period and design in a multivariate framework. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15(11):3293–3305.

SALVADORI, G., DURANTE, F., MICHELE, C. D., BERNARDI, M. et PETRELLA, L. (2016). A multivariate copula-based framework for dealing with hazard scenarios and failure probabilities. *Water Resources Research*, 52(5):3701–3721.

SERINALDI, F. (2015). Dismissing return periods ! *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 29(4):1179–1189.

SERINALDI, F. et KILSBY, C. G. (2014). Rainfall extremes : Toward reconciliation after the battle of distributions. *Water Resources Research*, 50(1):336–352.

UNANOA, S. (2015). Analyse des gradients de montée de crue des bassins versants Alpins et Pyrénéens français. Rapport technique, Mémoire présenté pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur de l'ENGEES. 79 pages.

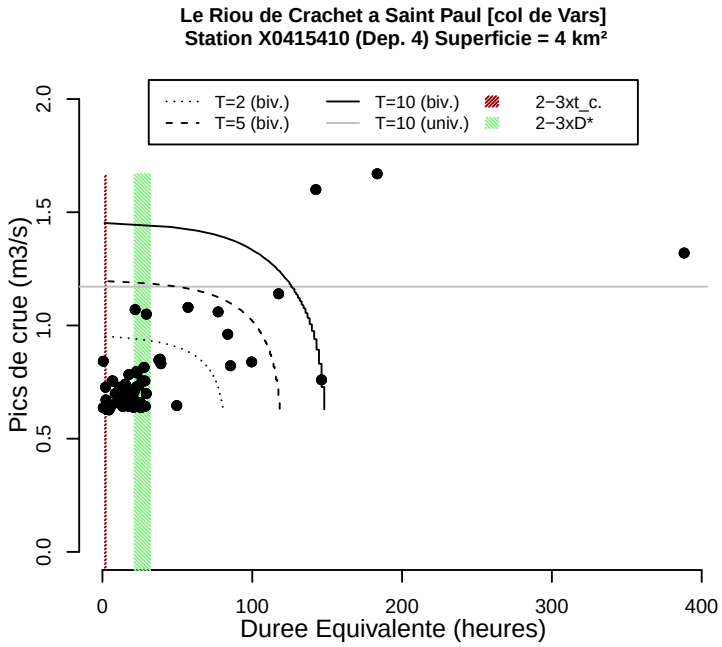
YUE, S., OUARDA, T. B. M. J., BOBÉE, B., LEGENDRE, P. et BRUNEAU, P. (2002). Approach for Describing Statistical Properties of Flood Hydrograph. *Journal of Hydrologic Engineering*, 7(2):147–153.

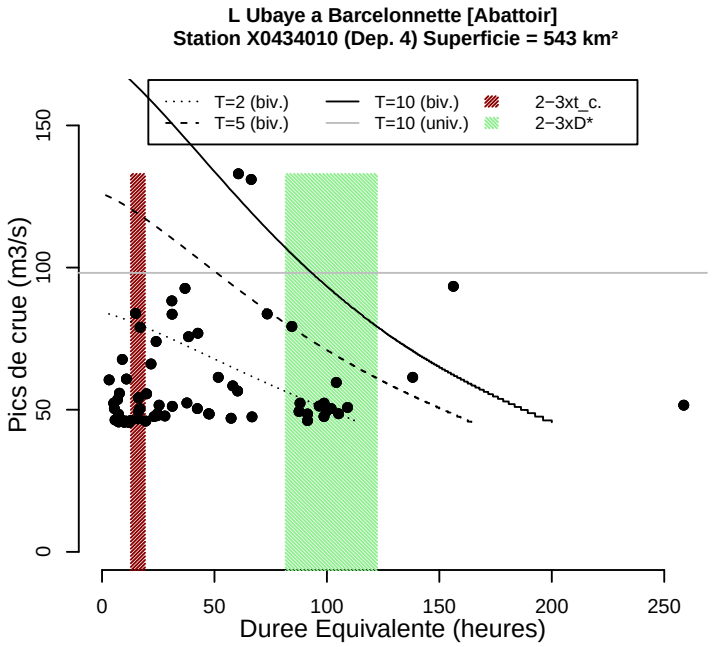
A Description des codes appliqués dans R

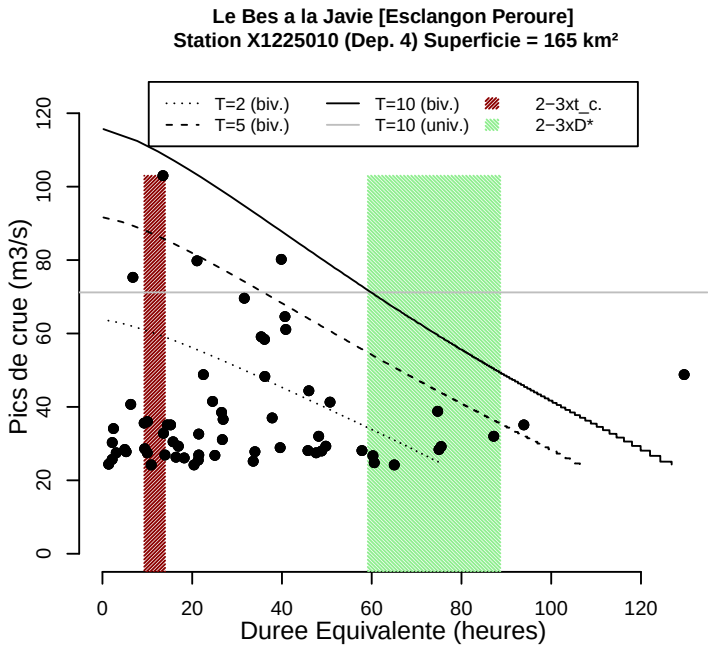
1. `extractFloodsS0.r`: Extrait le premier ensemble de crues $\mathcal{Q}_0$.
2. `extractFloodsS1.r`: Extrait le premier ensemble de crues $\mathcal{Q}_1$.
3. `FitBivDist_ExtremeFloods.r`: Ajuste une distribution bivariée Pic/Durée équivalente des plus fortes crues pour chaque station.
4. `getIsoReturnPeriods_ExtremeFloods.r`: Calcule les isolignes associées aux périodes de retour 2, 5, 10 et 20 ans.
5. `plot_one_station.r`: Produit des illustrations des résultats pour une station, à partir des sorties des codes précédents.
6. `isoCurveRP10_BivUniv.r`: Calcule les temps de concentration et durées caractéristiques et le transport solide par évènement et le long du contour décennal.
7. `ComputeBedloadVolumeTriangularHydrograph.r`: Sous fonction qui calcule le transport solide selon les hypothèses du paragraphe 5.4.

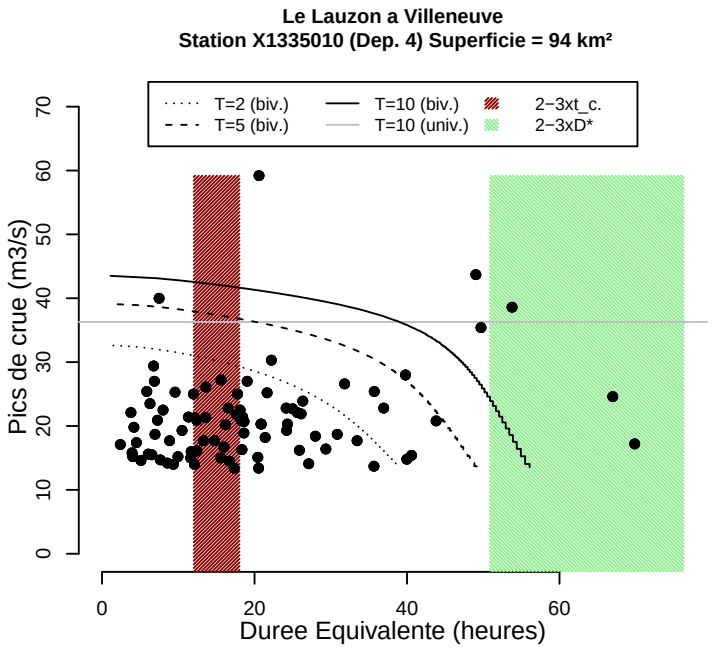
Les scripts des codes 1 à 5 sont téléchargeables au lien suivant :`https://github.com/guillaumeevin/CRUESBIV`
Les scripts des codes 5 et 6 peuvent être demandés directement au second auteur à l'adresse : `guillaume.piton[at]inrae.fr`.

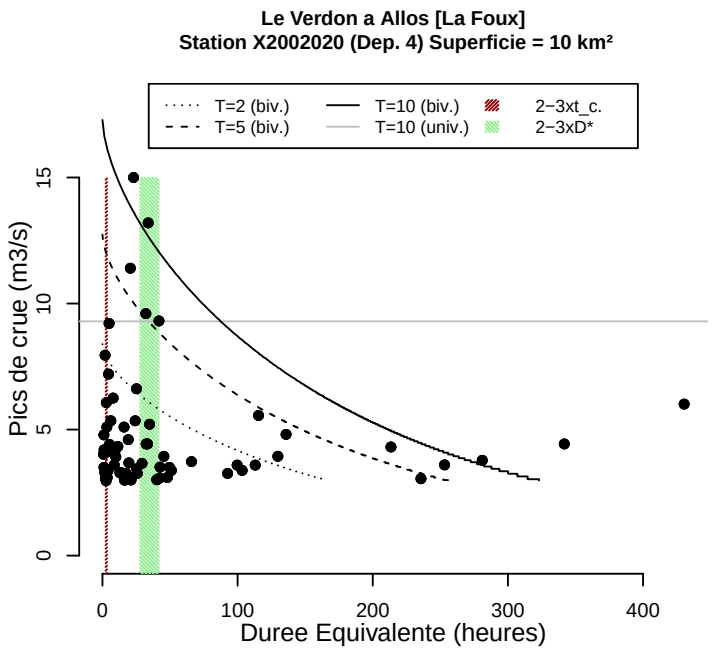
B Contours de l'ensemble des stations traitées rassemblés par départements

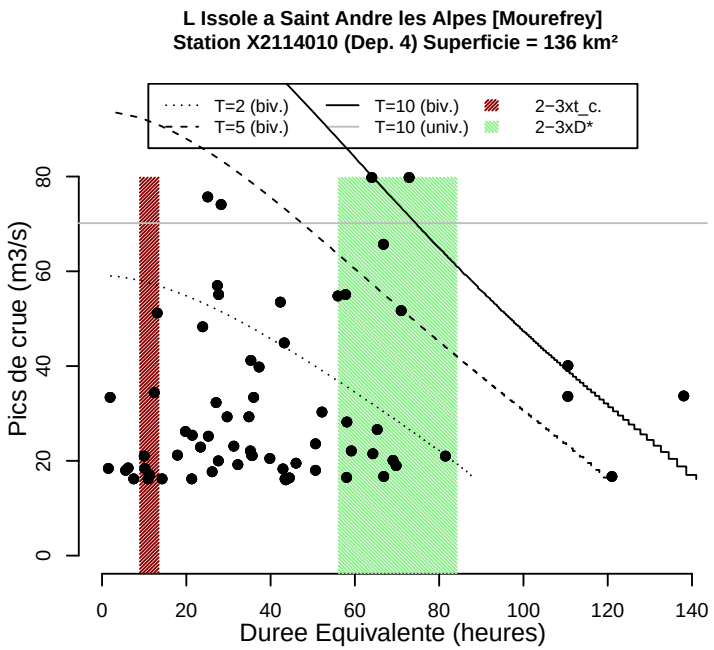

Le Riou de Crachet a Saint Paul [col de Vars]
Station X0415410 (Dep. 4) Superficie = 4 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)


L Ubaye a Barcelonnette [Abattoir]
Station X0434010 (Dep. 4) Superficie = 543 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

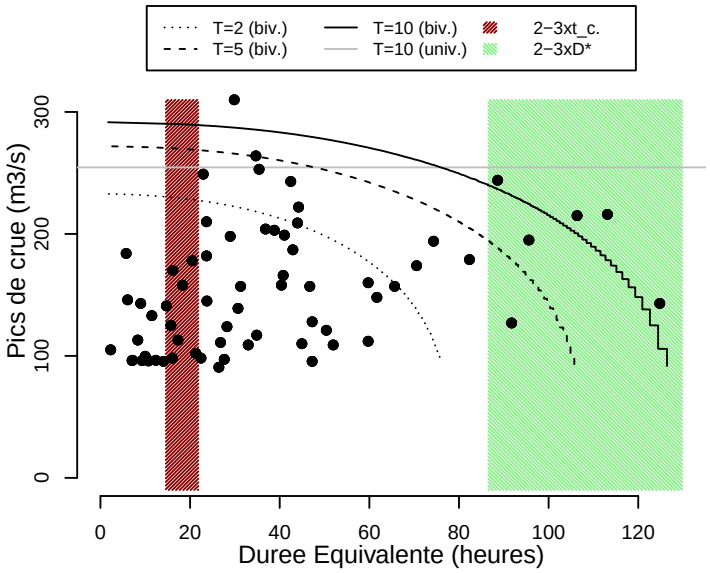

Le Bes a la Javie [Esclangon Peroure]
Station X1225010 (Dep. 4) Superficie = 165 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)


Le Lauzon a Villeneuve
Station X1335010 (Dep. 4) Superficie = 94 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

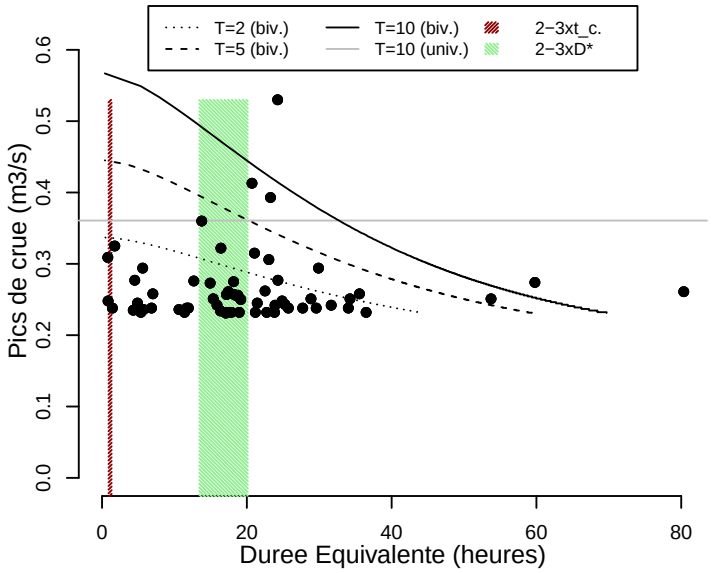

Le Verdon a Allos [La Foux]
Station X2002020 (Dep. 4) Superficie = 10 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)


L Issole a Saint Andre les Alpes [Mourefrey]
Station X2114010 (Dep. 4) Superficie = 136 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

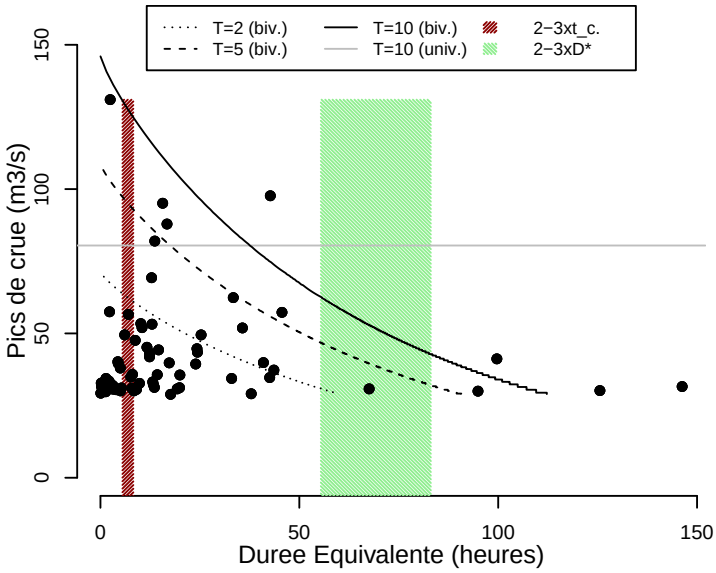
Le Var a Entrevaux [Pont Levis]
Station Y6042010 (Dep. 4) Superficie = 675 km²



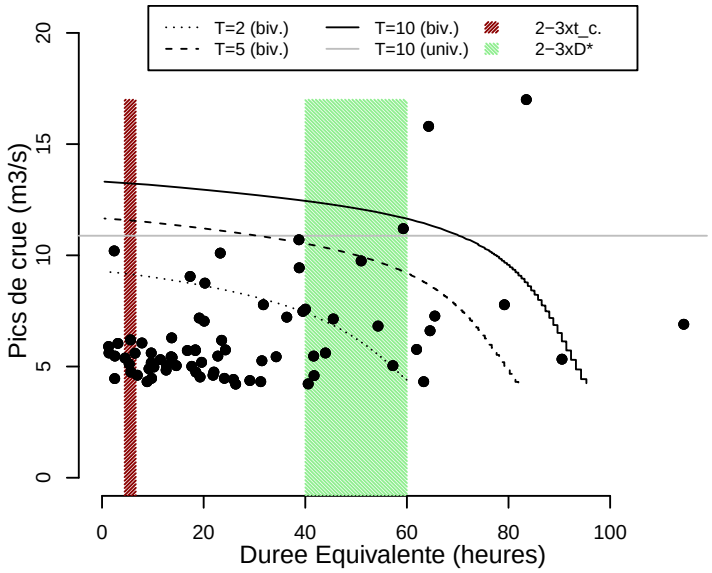
Le torrent de Malcros a Champoleon
Station W2035010 (Dep. 5) Superficie = 1 km²



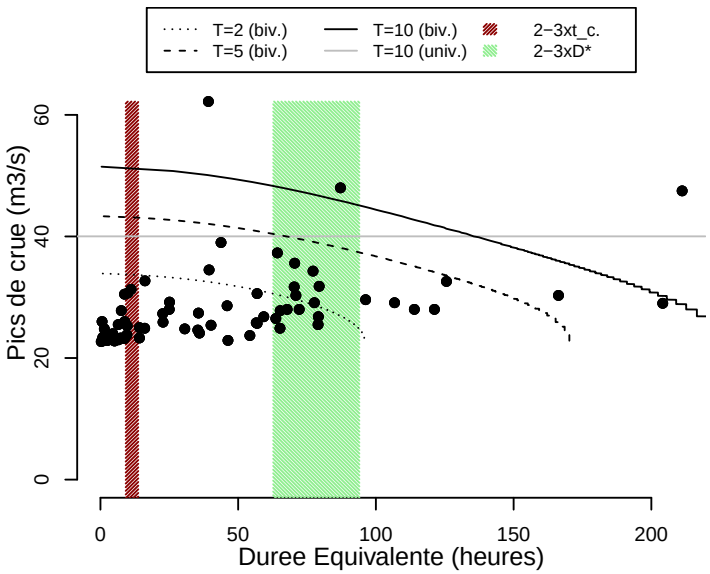
La Severaisse a Villar Loubiere
Station W2114010 (Dep. 5) Superficie = 129 km²



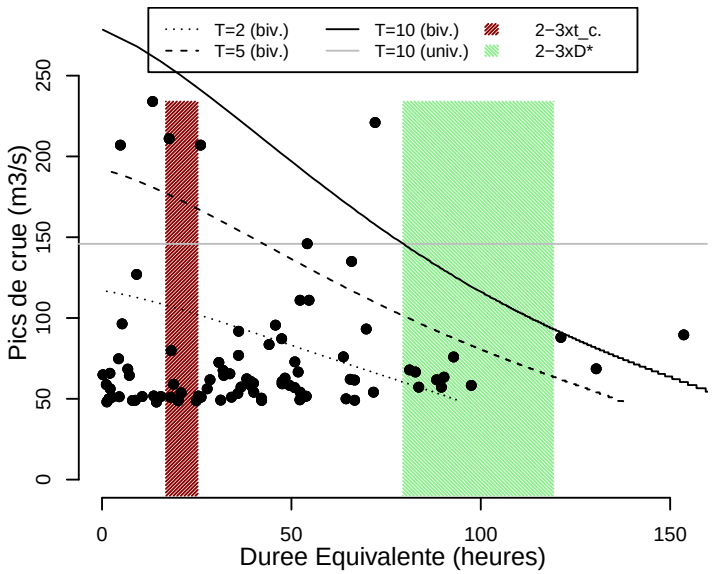
La Souloise a Saint Etienne en Devoluy [2]
Station W2215030 (Dep. 5) Superficie = 39 km²

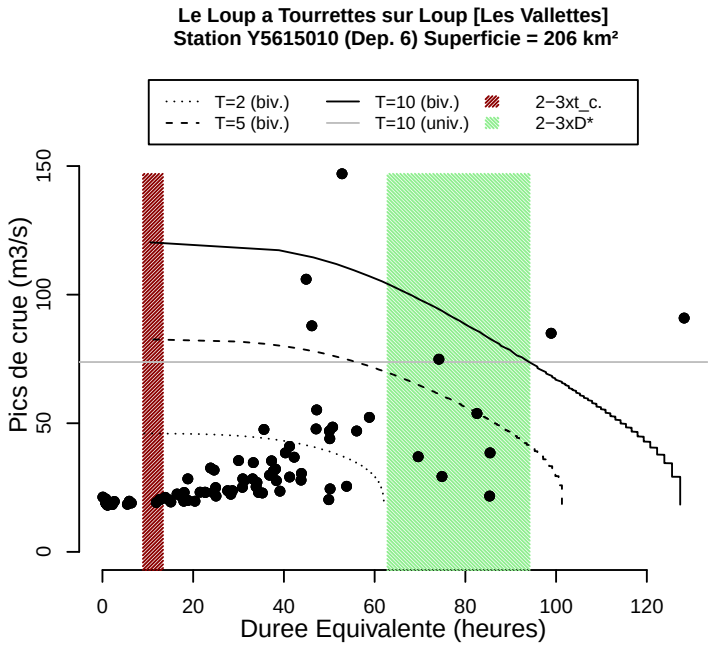


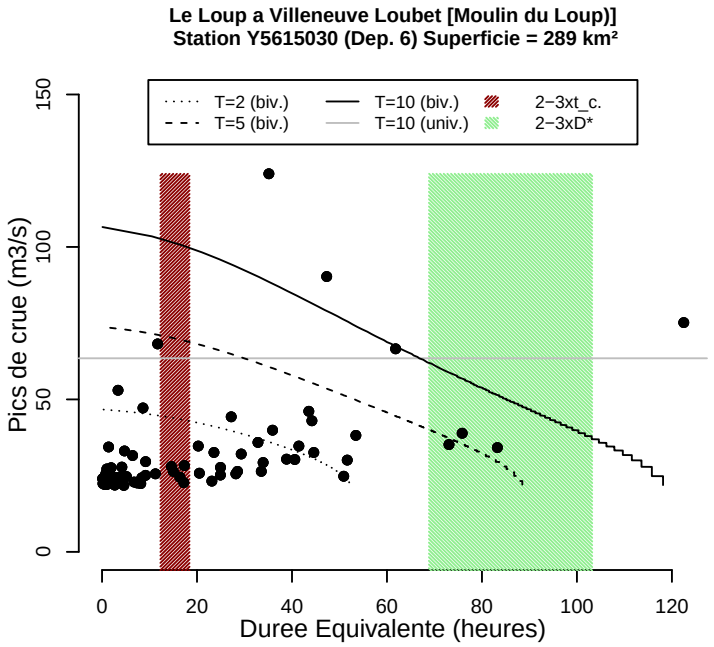
La Durance a Val des Pres [La Vachette]
Station X0010010 (Dep. 5) Superficie = 205 km²

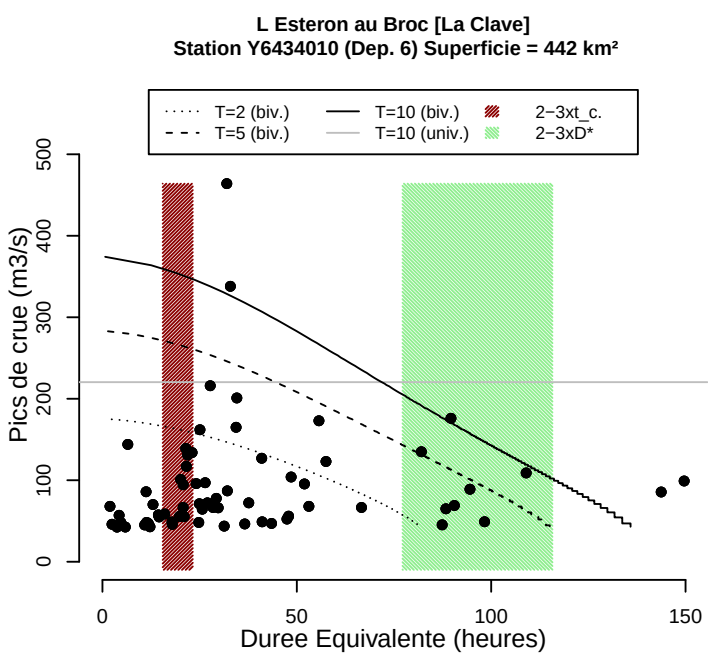


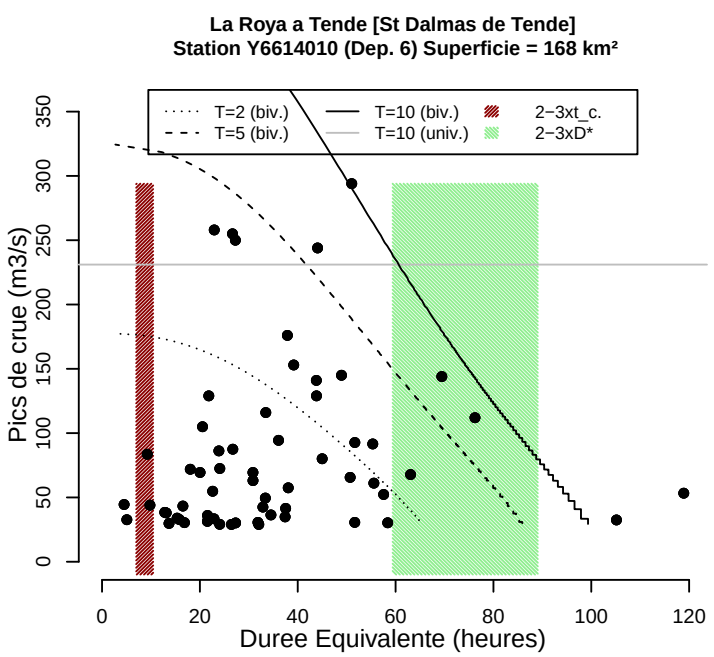
La Siagne a Pegomas
Station Y5534030 (Dep. 6) Superficie = 492 km²

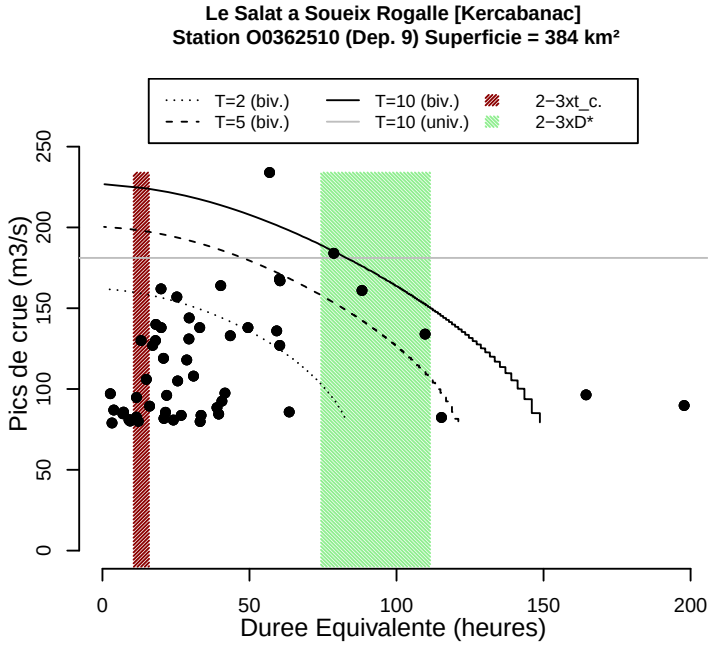


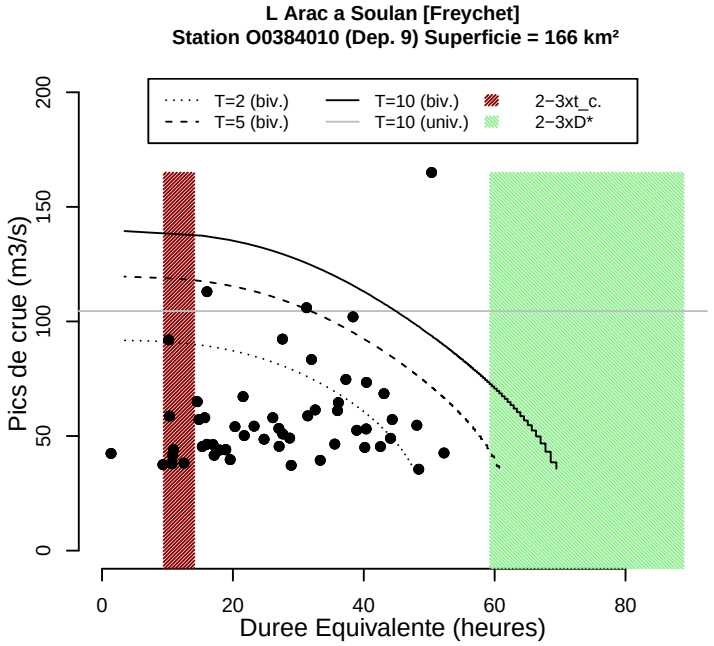

Le Loup a Tourrettes sur Loup [Les Vallettes]
Station Y5615010 (Dep. 6) Superficie = 206 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)


Le Loup a Villeneuve Loubet [Moulin du Loup)]
Station Y5615030 (Dep. 6) Superficie = 289 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

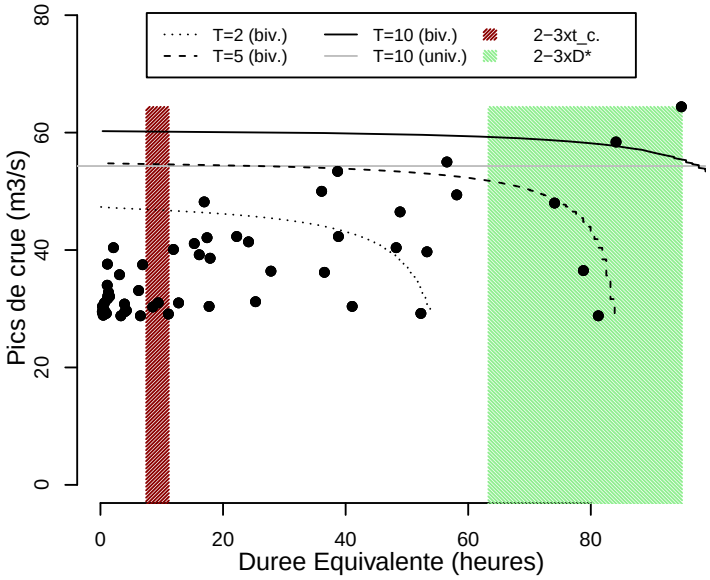

L Esteron au Broc [La Clave]
Station Y6434010 (Dep. 6) Superficie = 442 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)


La Roya a Tende [St Dalmas de Tende]
Station Y6614010 (Dep. 6) Superficie = 168 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

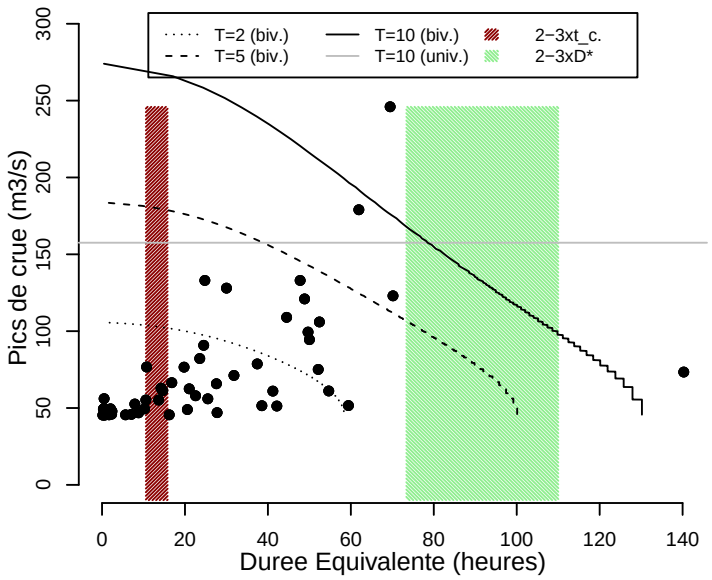

Le Salat a Soueix Rogalle [Kercabanac]
Station O0362510 (Dep. 9) Superficie = 384 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)


L Arac a Soulan [Freychet]
Station O0384010 (Dep. 9) Superficie = 166 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

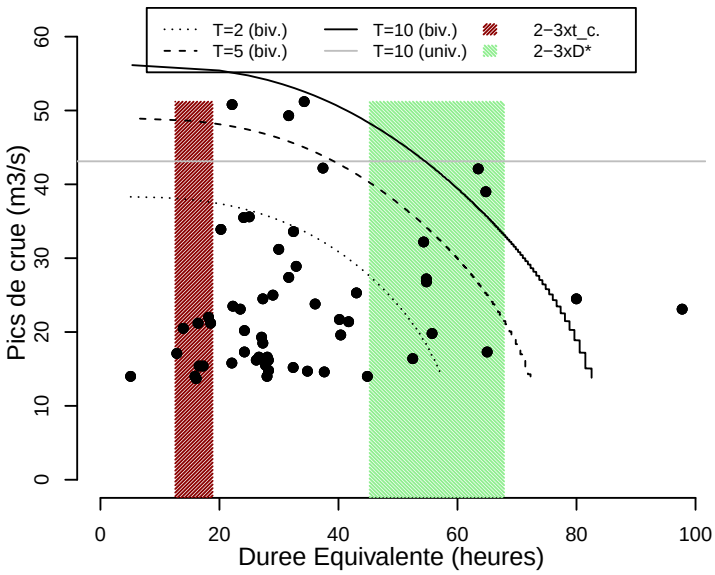
Le Lez aux Bordes sur Lez
Station O0444010 (Dep. 9) Superficie = 212 km²



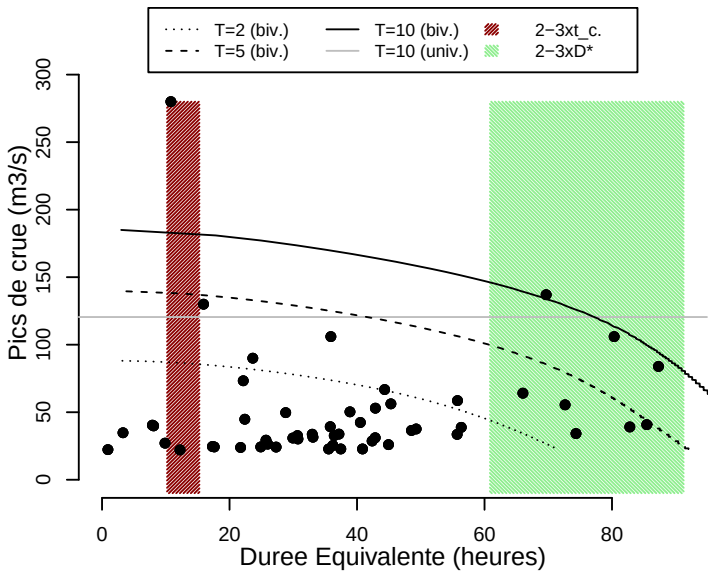
Le Lez a Engomer [Balagueres]
Station O0484010 (Dep. 9) Superficie = 366 km²



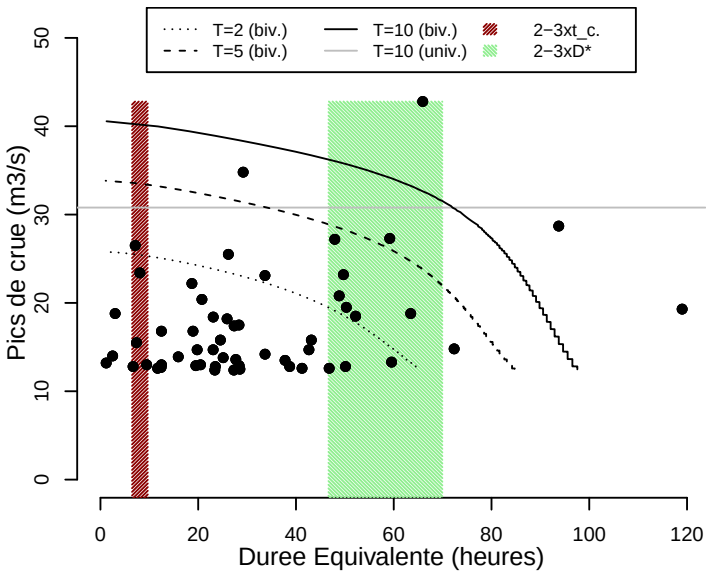
Le Lens a Betchat
Station O0584310 (Dep. 9) Superficie = 61 km²



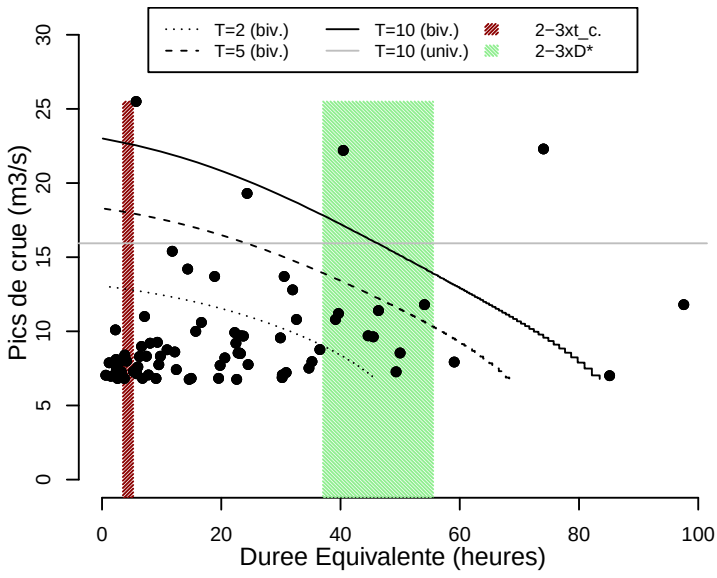
L Hers Vif au Peyrat
Station O1442910 (Dep. 9) Superficie = 183 km²



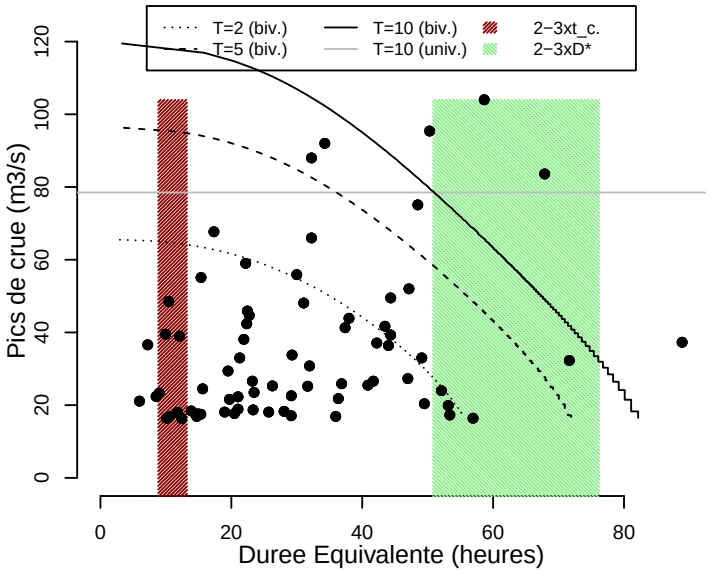
La Touyre a Lavelanet [2]
Station O1484310 (Dep. 9) Superficie = 68 km²



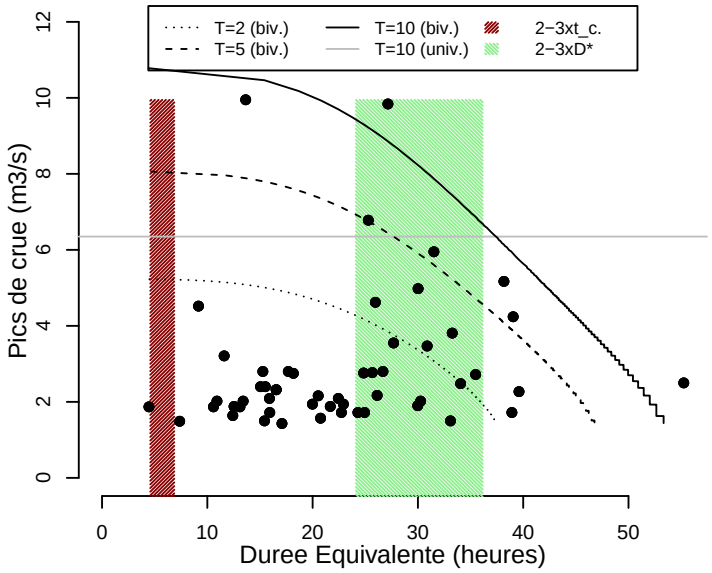
La Touyre a Montferrier [2]
Station O1484320 (Dep. 9) Superficie = 29 km²



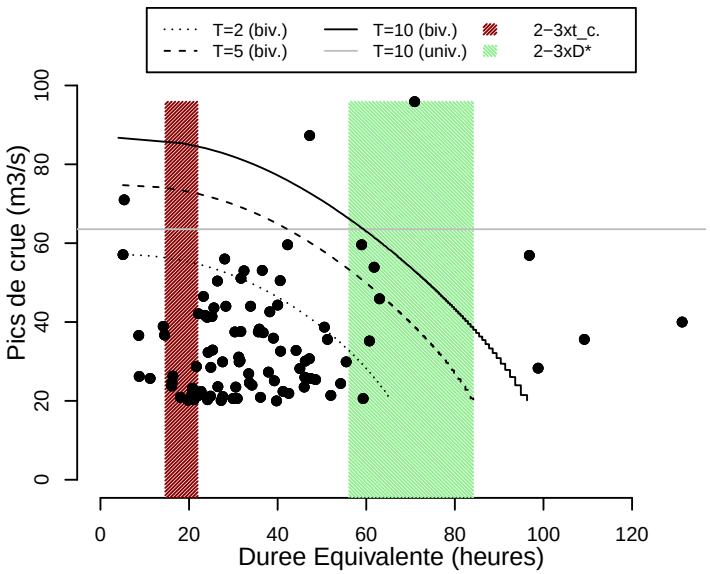
La Touyre a Leran
Station O1494330 (Dep. 9) Superficie = 94 km²



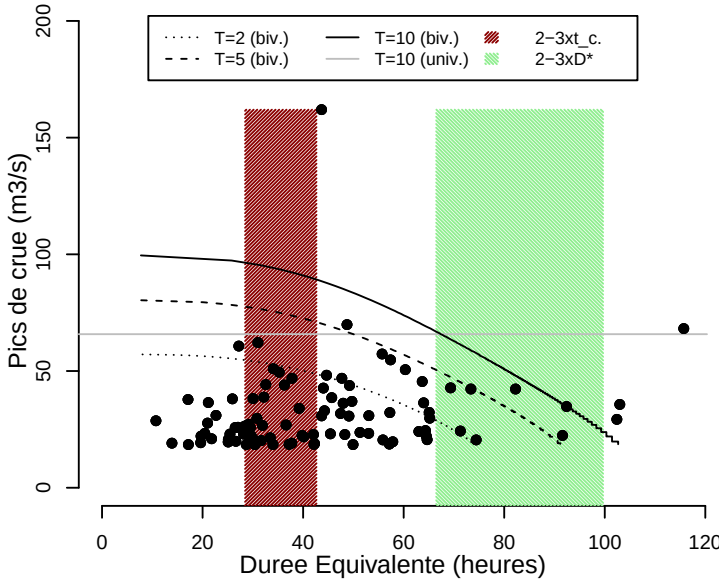
Le ruisseau des Gourds a Limbrassac
Station O1576910 (Dep. 9) Superficie = 6 km²



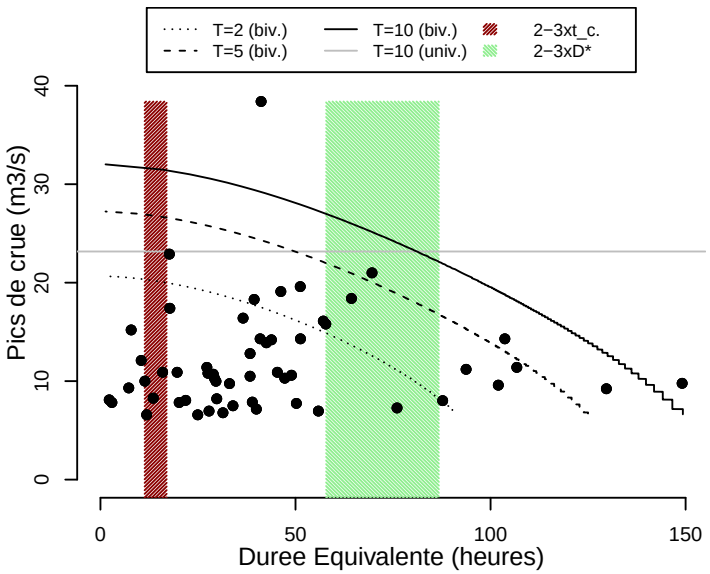
Le Douctouyre a Vira [Engravies]
Station O1584610 (Dep. 9) Superficie = 136 km²



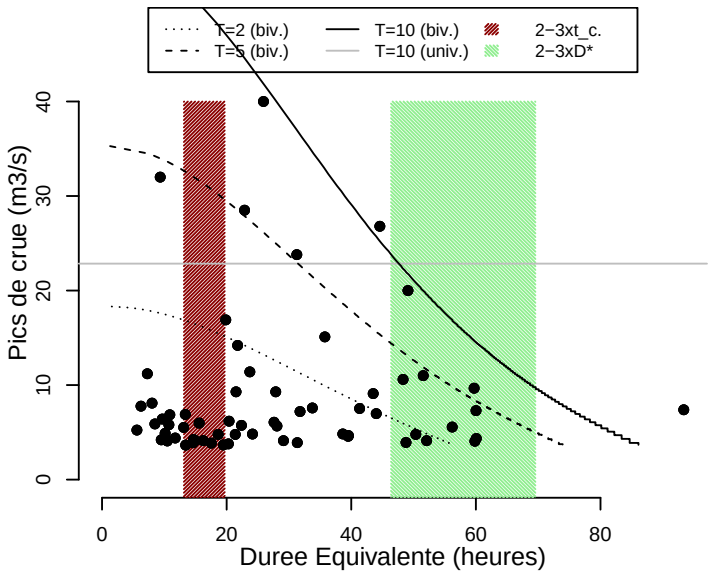
La Leze a Lezat sur Leze
Station O1844020 (Dep. 9) Superficie = 254 km²

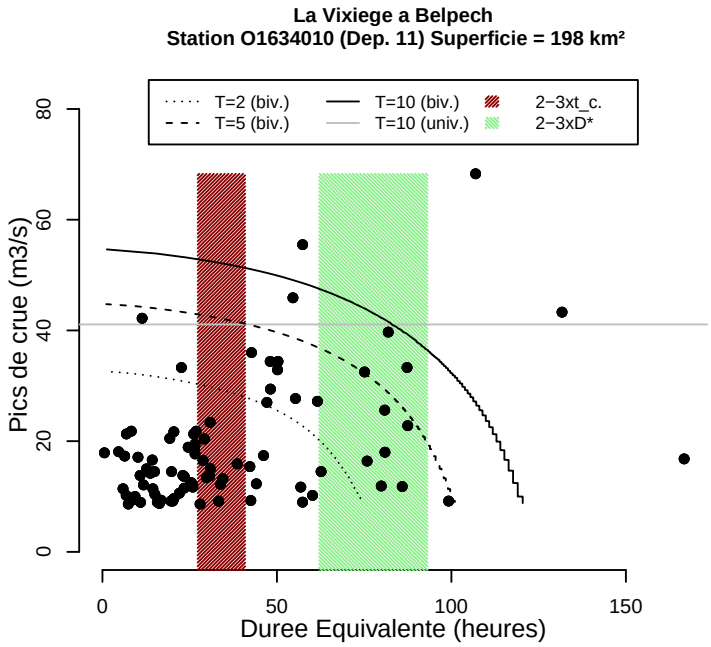


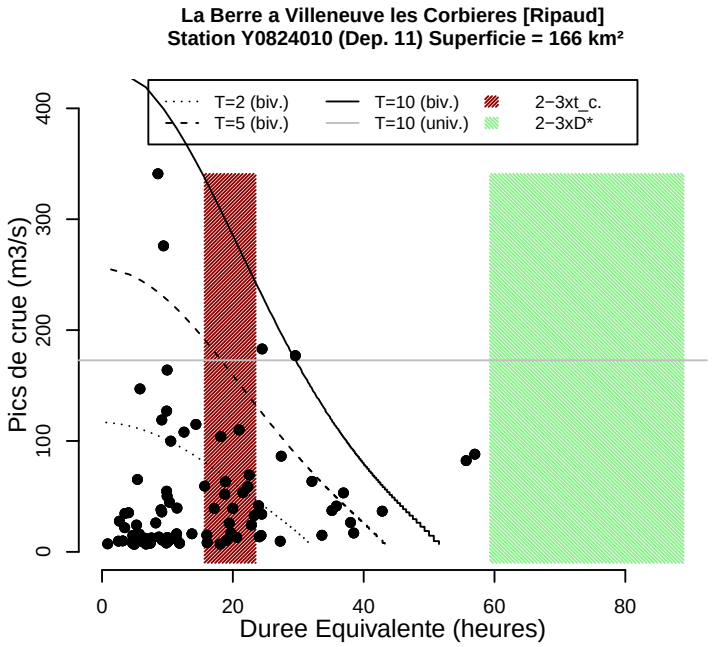
Le Blau a Chalabre
Station O1464010 (Dep. 11) Superficie = 152 km²

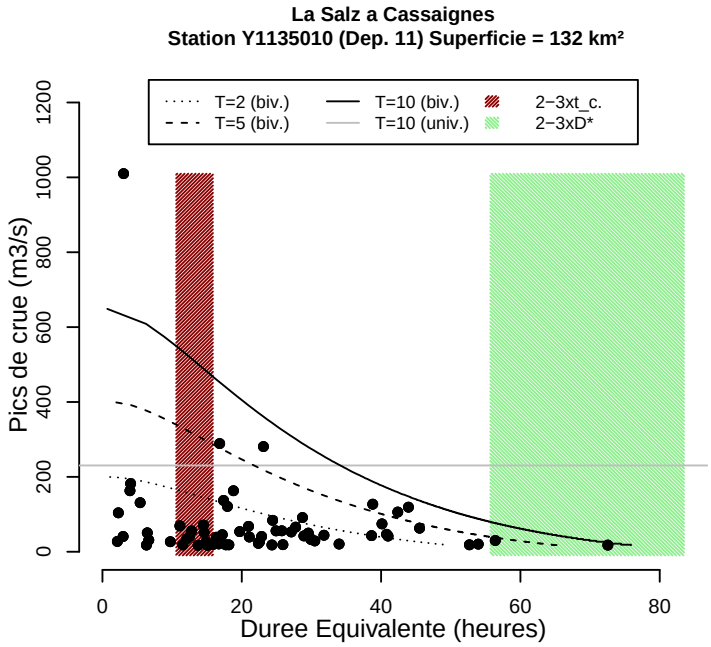


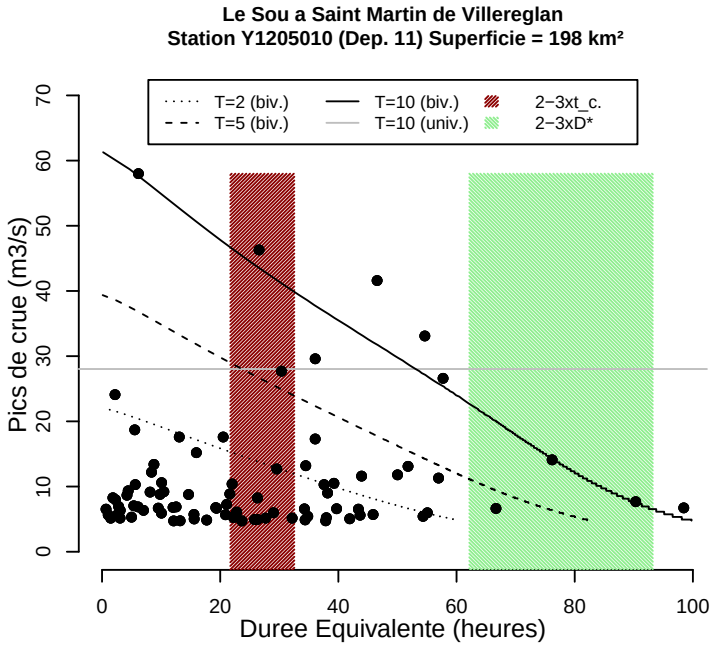
L Ambronne a Caudeval
Station O1524010 (Dep. 11) Superficie = 67 km²

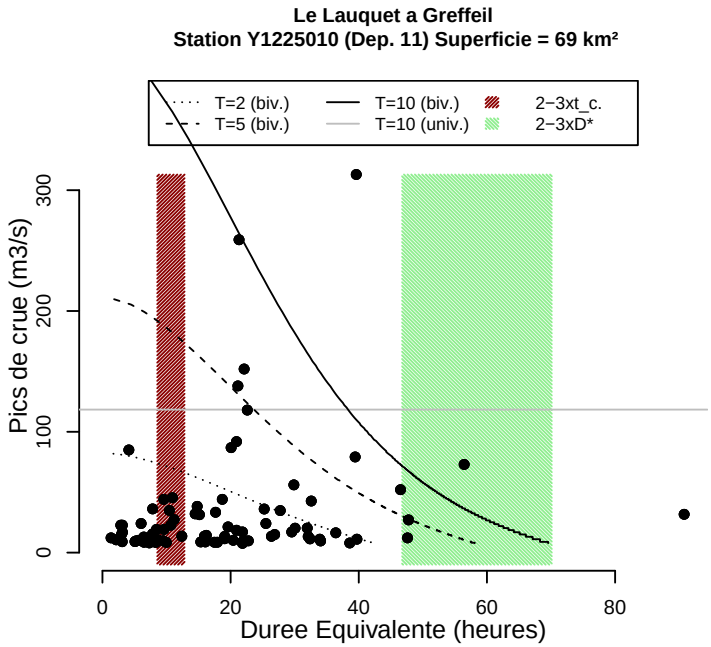


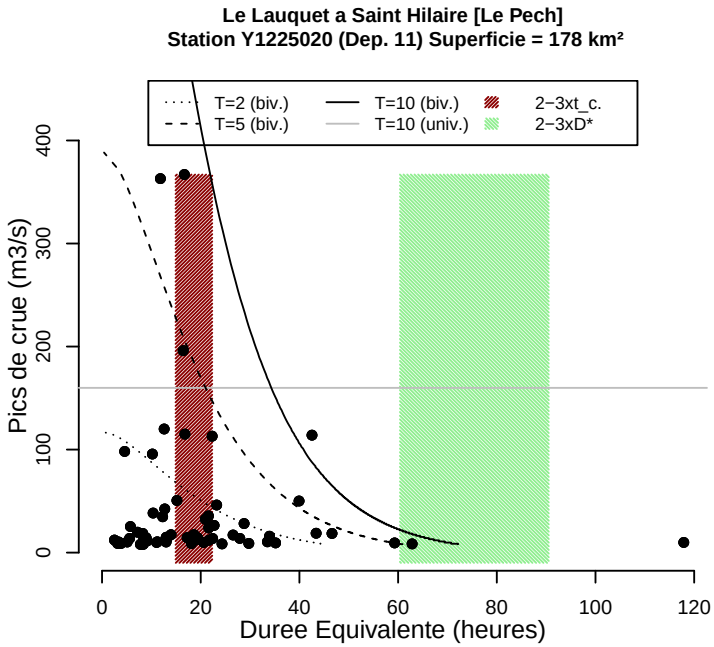

La Vixiege a Belpech
Station O1634010 (Dep. 11) Superficie = 198 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

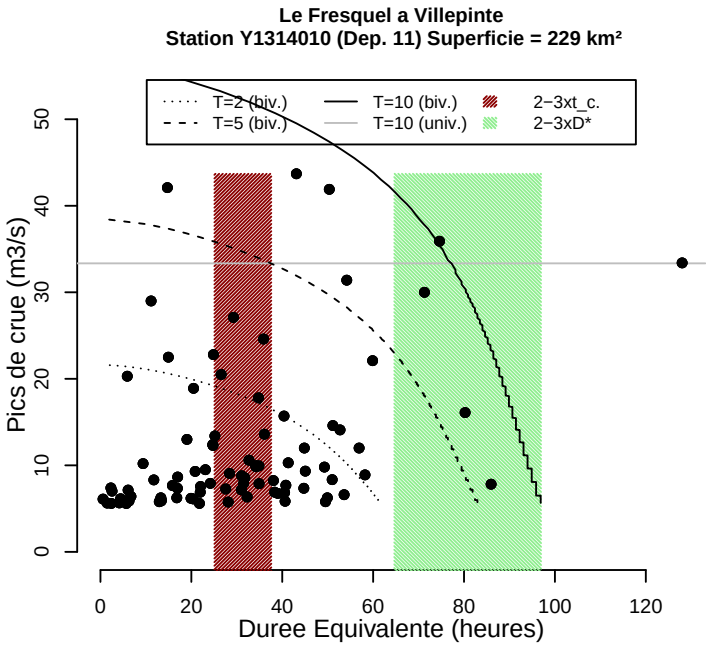

La Berre a Villeneuve les Corbieres [Ripaud]
Station Y0824010 (Dep. 11) Superficie = 166 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

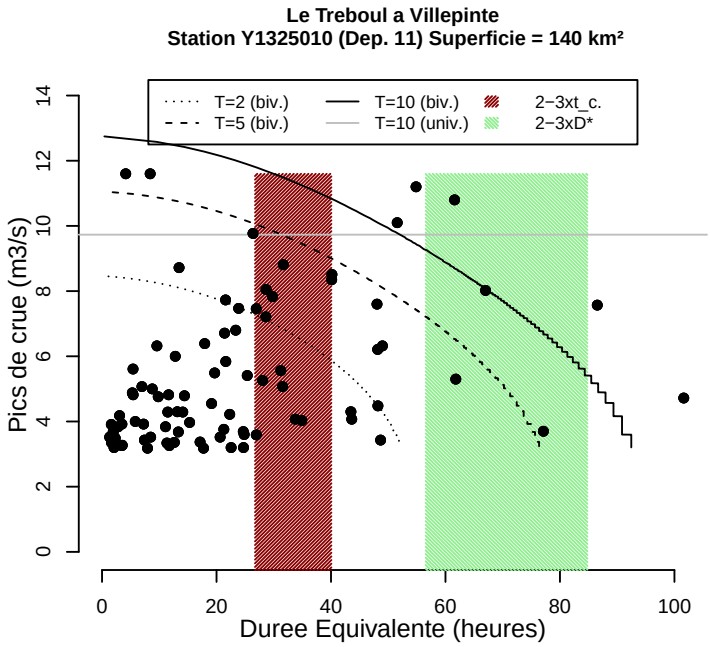

La Salz a Cassaignes
Station Y1135010 (Dep. 11) Superficie = 132 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

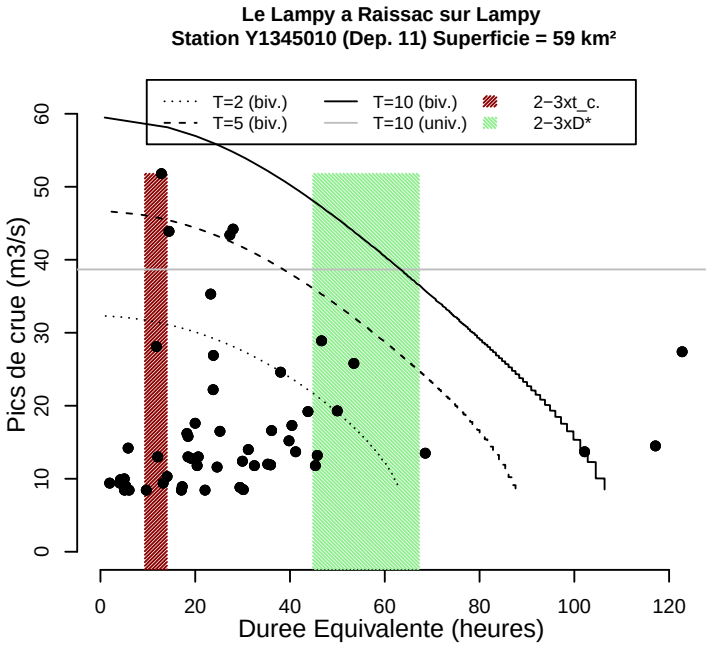

Le Sou a Saint Martin de Villereglan
Station Y1205010 (Dep. 11) Superficie = 198 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

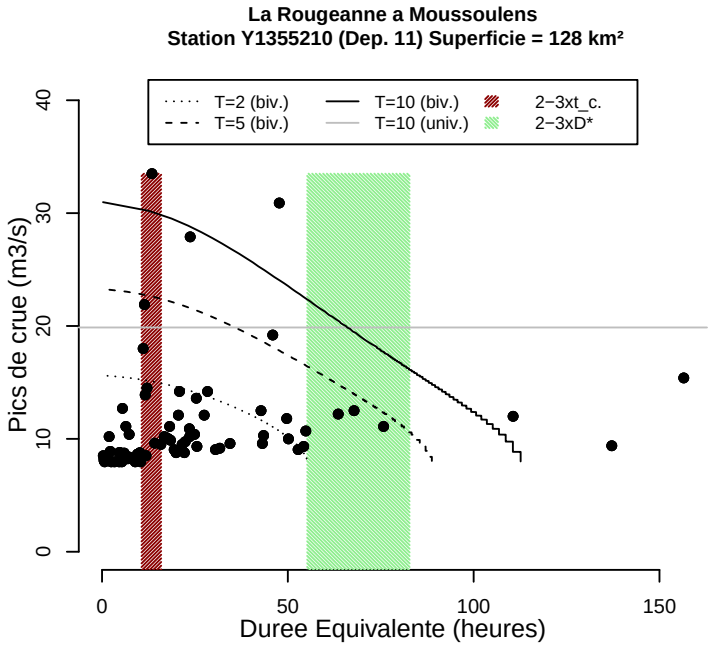

Le Lauquet a Greffeil
Station Y1225010 (Dep. 11) Superficie = 69 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

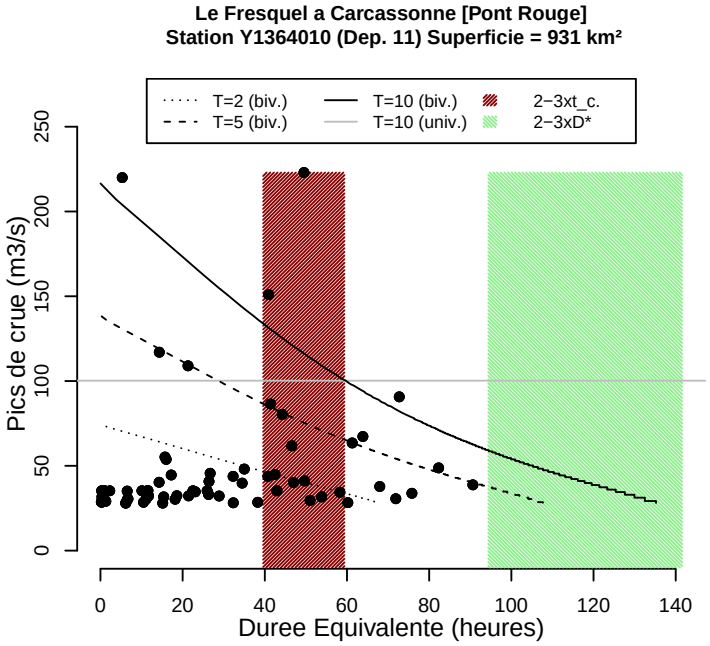

Le Lauquet a Saint Hilaire [Le Pech]
Station Y1225020 (Dep. 11) Superficie = 178 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

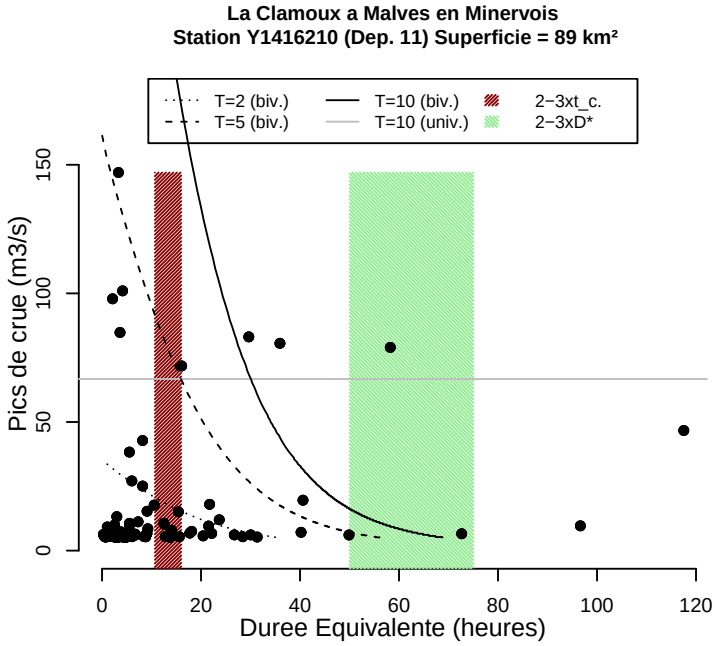

Le Fresquel a Villepinte
Station Y1314010 (Dep. 11) Superficie = 229 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

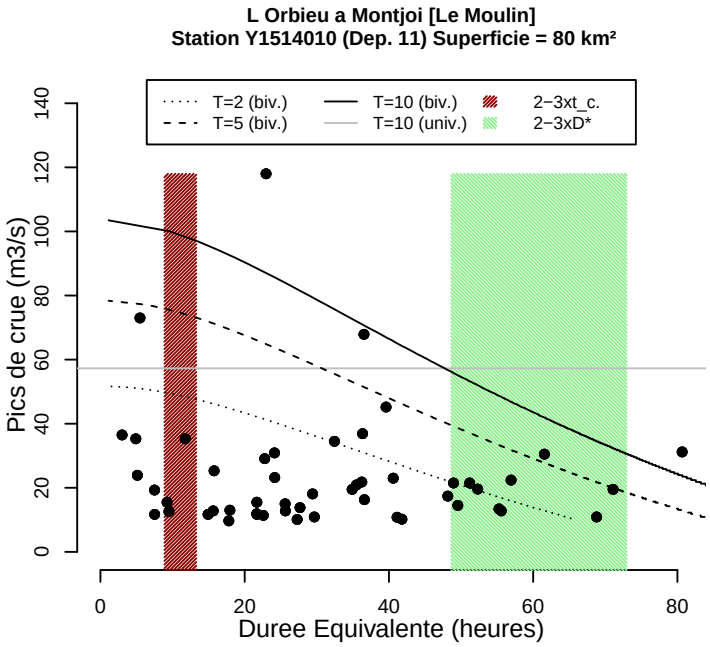

Le Treboul a Villepinte
Station Y1325010 (Dep. 11) Superficie = 140 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

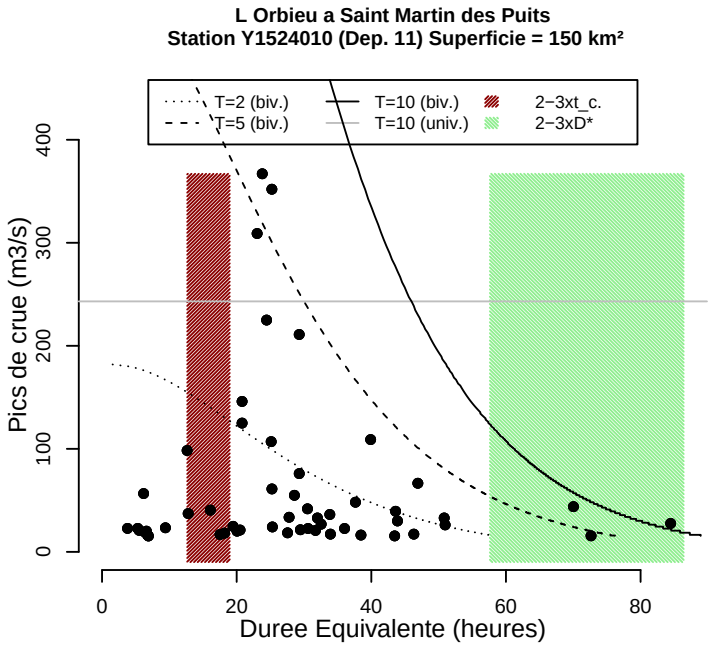

Le Lampy a Raissac sur Lampy
Station Y1345010 (Dep. 11) Superficie = 59 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

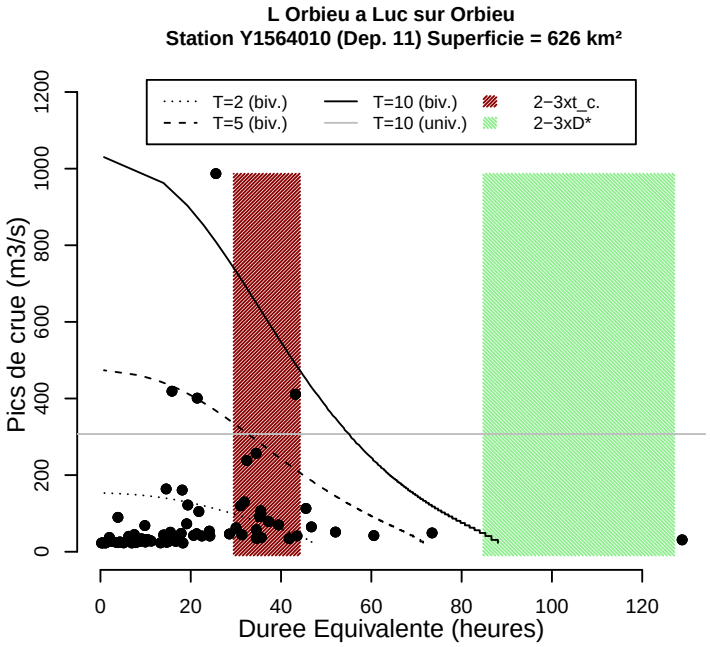

La Rougeanne a Moussoulens
Station Y1355210 (Dep. 11) Superficie = 128 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

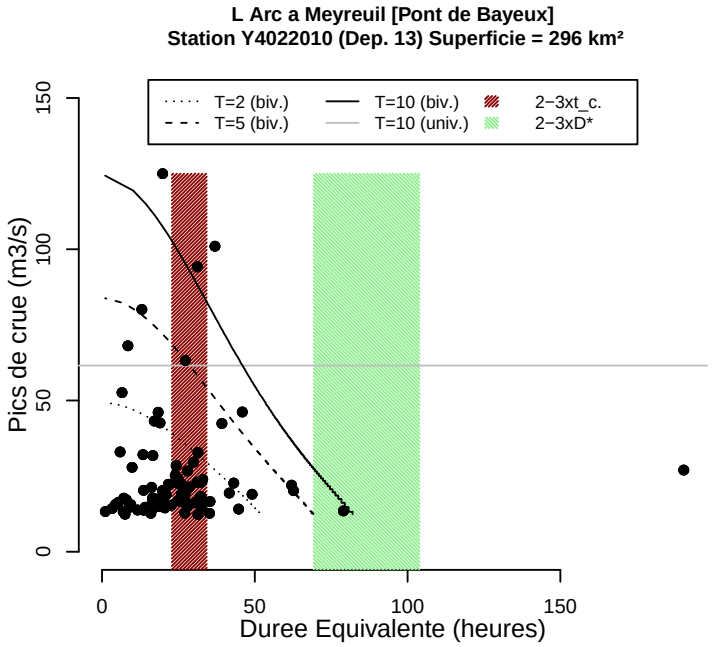

Le Fresquel a Carcassonne [Pont Rouge]
Station Y1364010 (Dep. 11) Superficie = 931 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

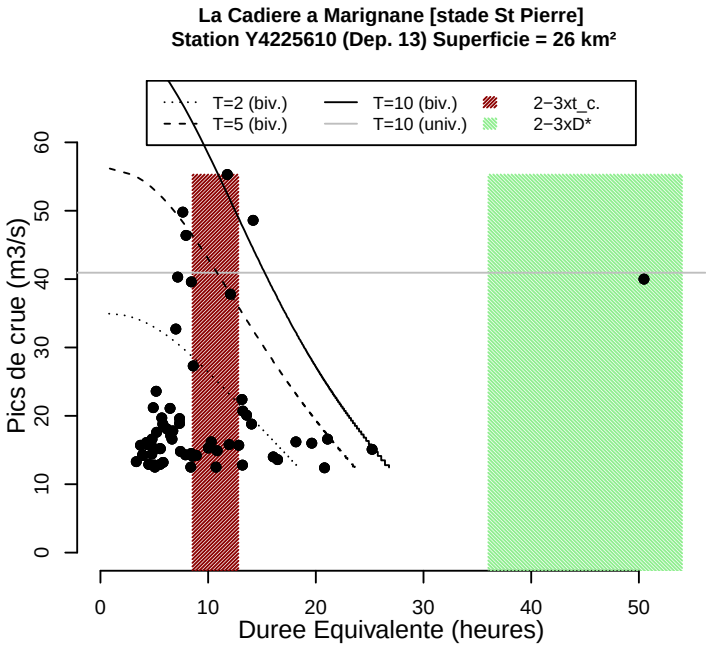

La Clamoux a Malves en Minervois
Station Y1416210 (Dep. 11) Superficie = 89 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

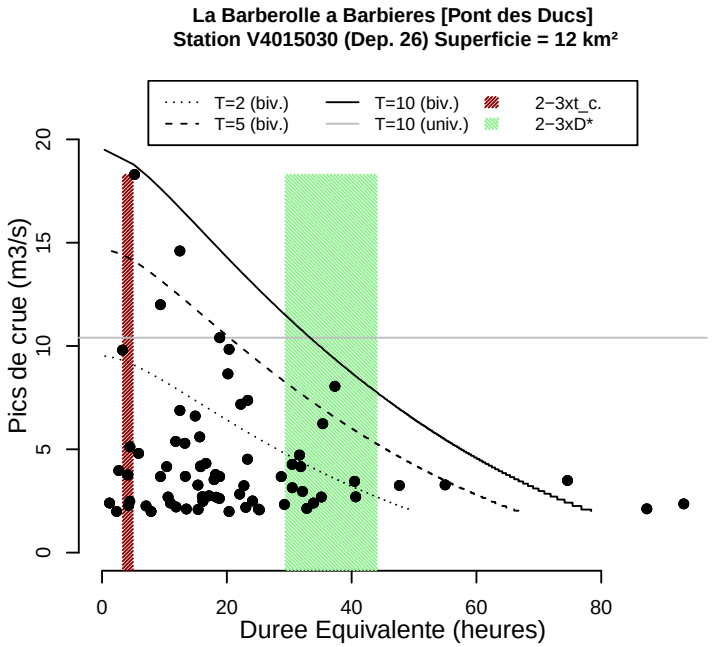

L Orbieu a Montjoi [Le Moulin]
Station Y1514010 (Dep. 11) Superficie = 80 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)


L Orbieu a Saint Martin des Puits
Station Y1524010 (Dep. 11) Superficie = 150 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

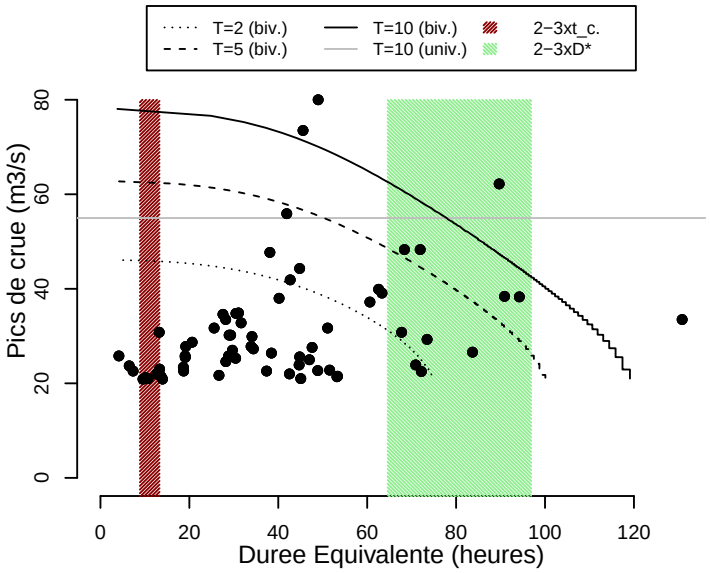

L Orbieu a Luc sur Orbieu
Station Y1564010 (Dep. 11) Superficie = 626 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)


L Arc a Meyreuil [Pont de Bayeux]
Station Y4022010 (Dep. 13) Superficie = 296 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

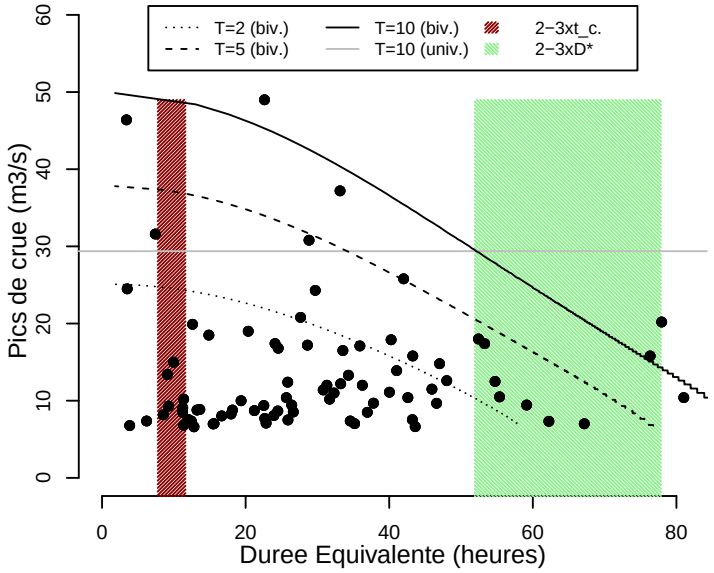

La Cadiere a Marignane [stade St Pierre]
Station Y4225610 (Dep. 13) Superficie = 26 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)


La Barberolle a Barbieres [Pont des Ducs]
Station V4015030 (Dep. 26) Superficie = 12 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

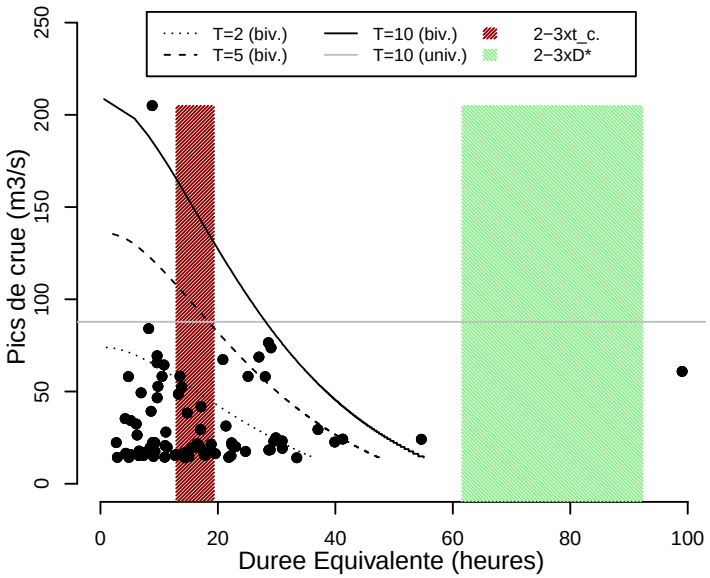
Le Bez a Chatillon en Diois
Station V4225010 (Dep. 26) Superficie = 229 km²



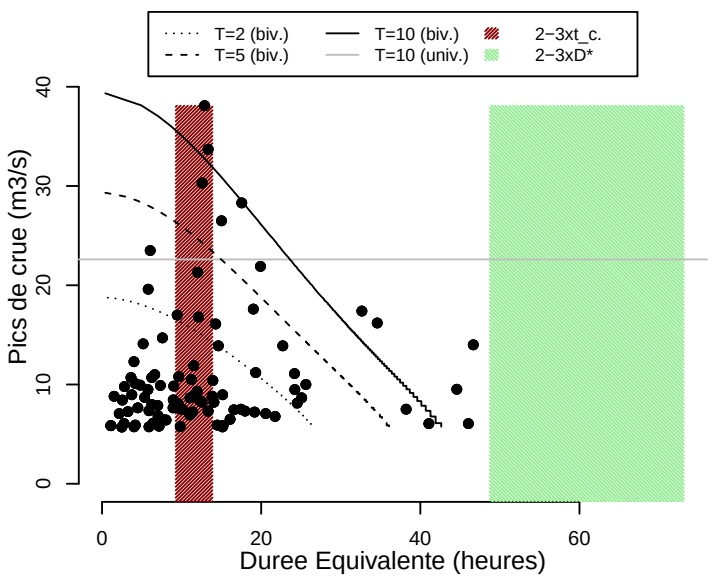
La Gervanne a Beaufort sur Gervanne
Station V4275010 (Dep. 26) Superficie = 102 km²



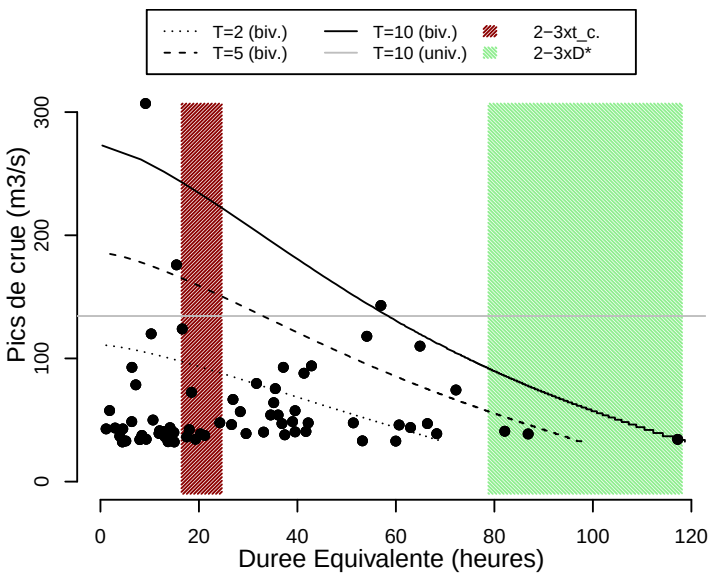
Le Roubion a Soyans
Station V4414010 (Dep. 26) Superficie = 191 km²



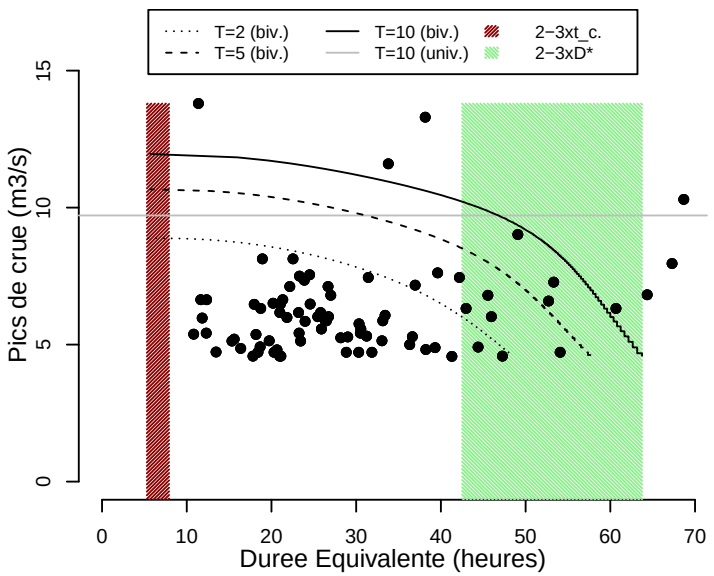
Le Jabron a Souspierre
Station V4455010 (Dep. 26) Superficie = 81 km²

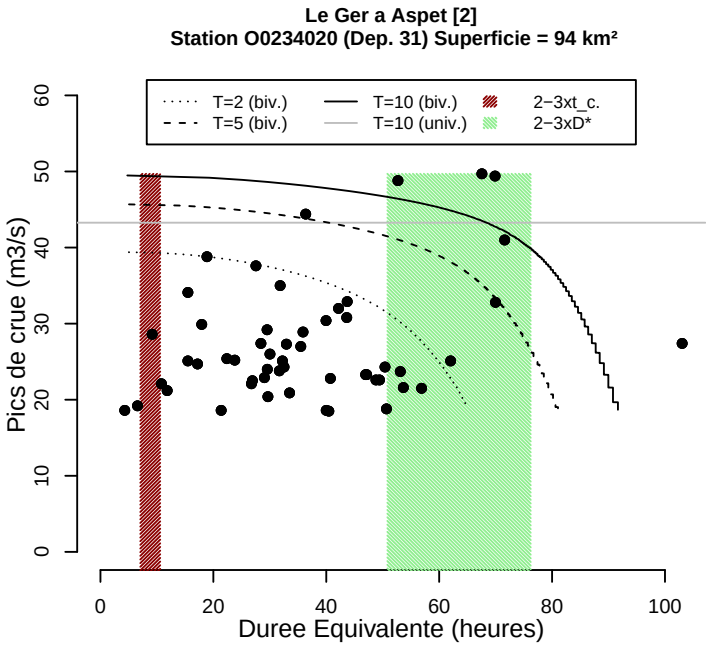


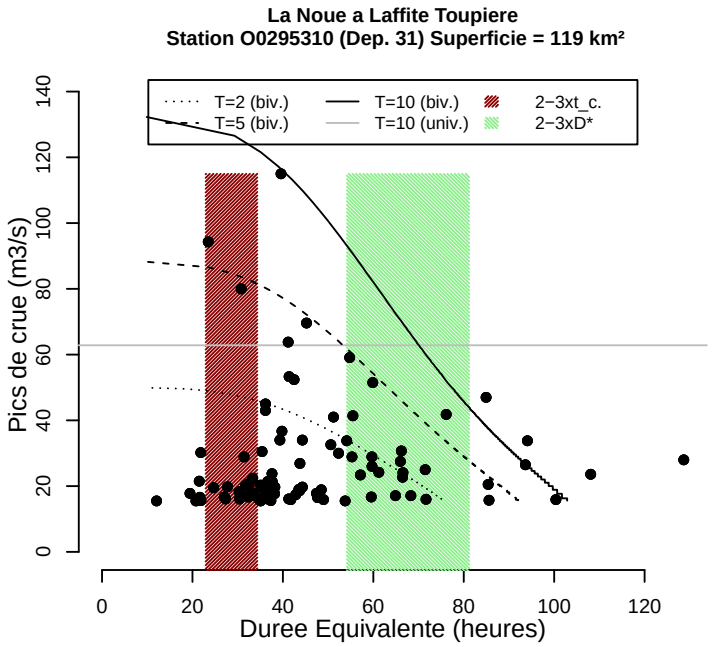
L Aygues a Saint May [Pont de la Tune]
Station V5324010 (Dep. 26) Superficie = 476 km²

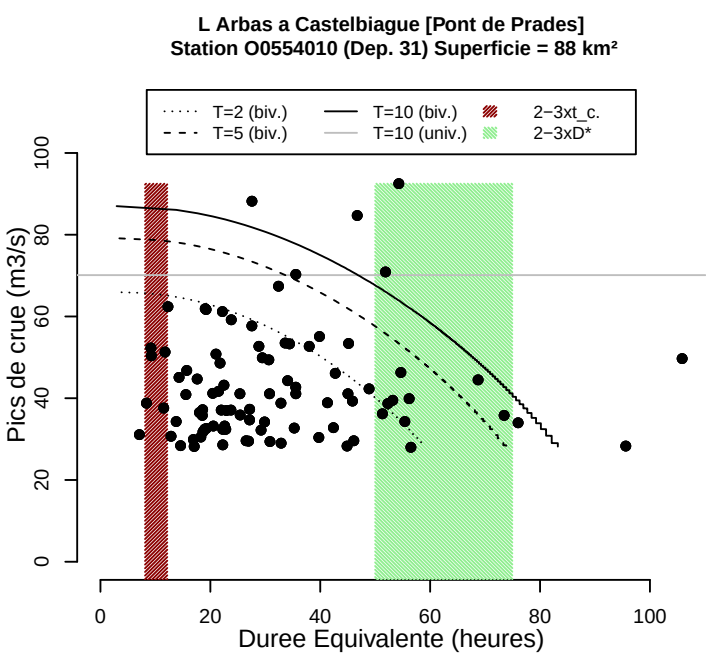


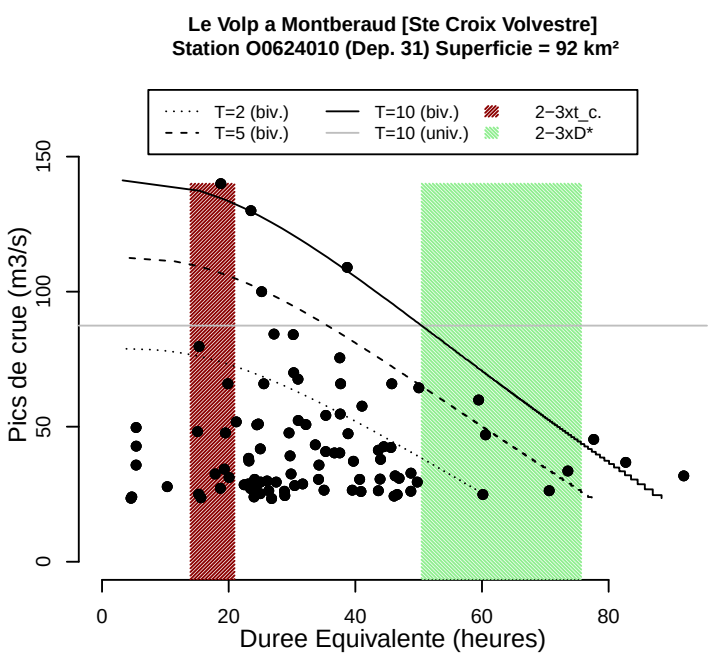
L Adouin a Saint Martin en Vercors [Tourtre]
Station W3335210 (Dep. 26) Superficie = 49 km²

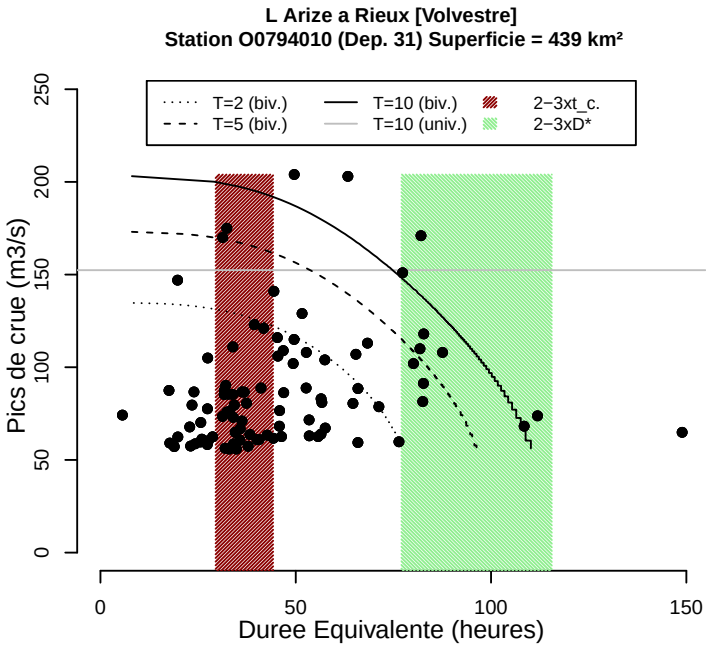


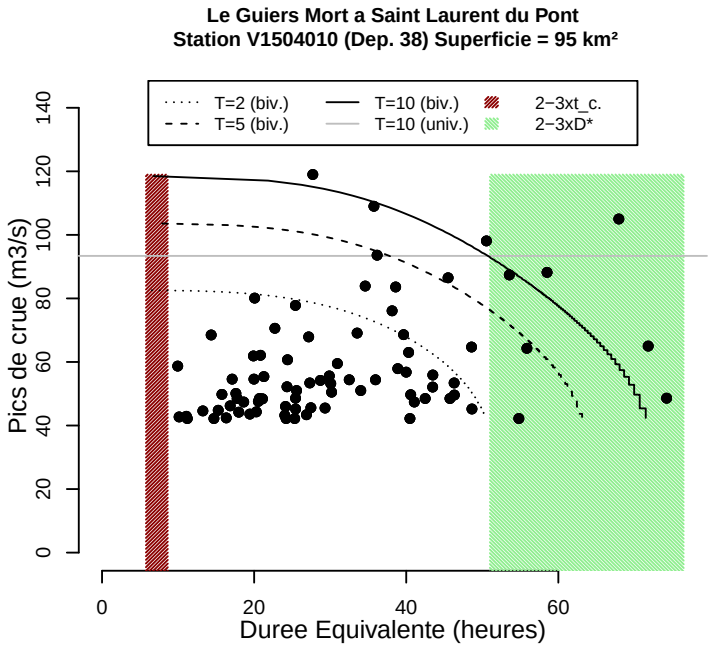

Le Ger a Aspet [2]
Station O0234020 (Dep. 31) Superficie = 94 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)


La Noue a Laffite Toupiere
Station O0295310 (Dep. 31) Superficie = 119 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

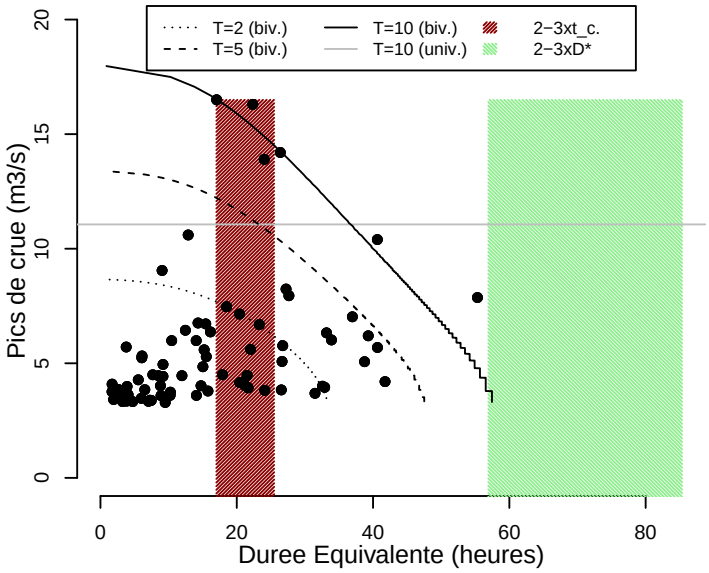

L Arbas a Castelbiague [Pont de Prades]
Station O0554010 (Dep. 31) Superficie = 88 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)


Le Volp a Montberaud [Ste Croix Volvestre]
Station O0624010 (Dep. 31) Superficie = 92 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

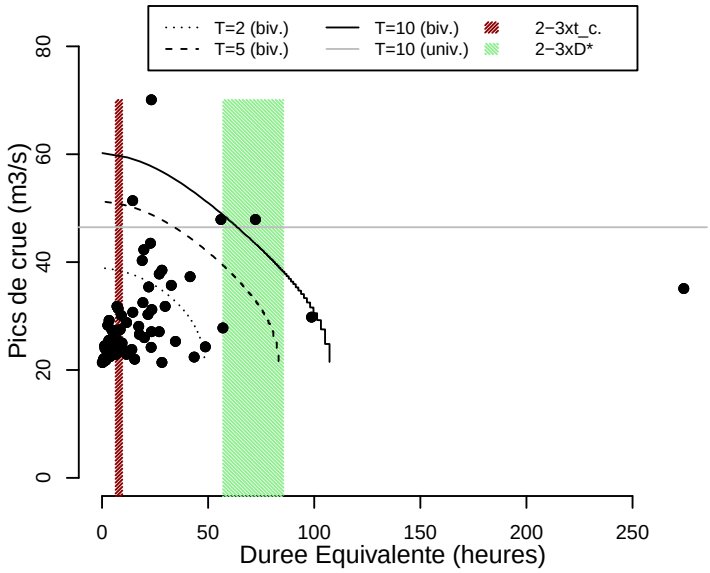

L Arize a Rieux [Volvestre]
Station O0794010 (Dep. 31) Superficie = 439 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)


Le Guiers Mort a Saint Laurent du Pont
Station V1504010 (Dep. 38) Superficie = 95 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

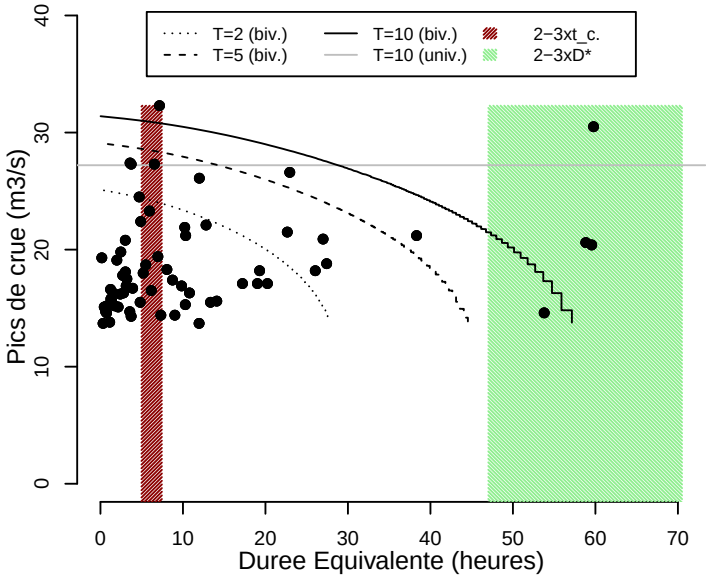
Le Rival a Brezins
Station V3404310 (Dep. 38) Superficie = 143 km²



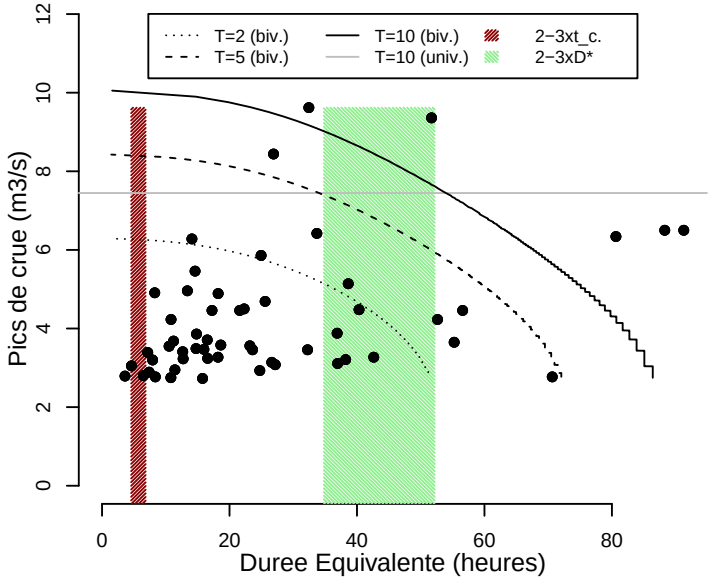
La Bonne a Entraigues [Pont Battant]
Station W2314010 (Dep. 38) Superficie = 144 km²



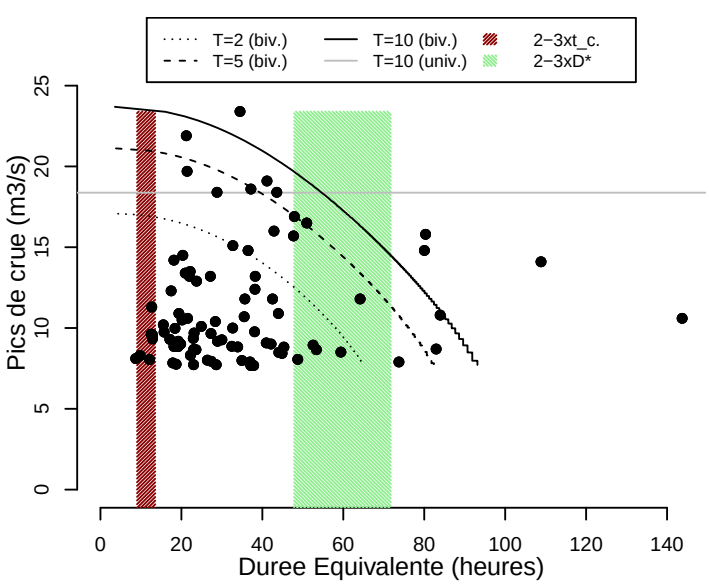
La Roizonne a la Valette [La Rochette]
Station W2335210 (Dep. 38) Superficie = 70 km²



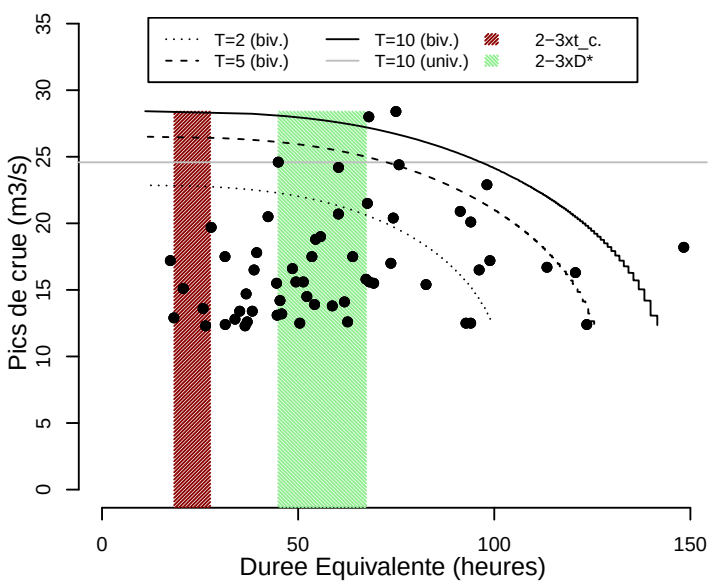
La Gresse a Gresse en Vercors [Pont Jacquet]
Station W2804020 (Dep. 38) Superficie = 23 km²

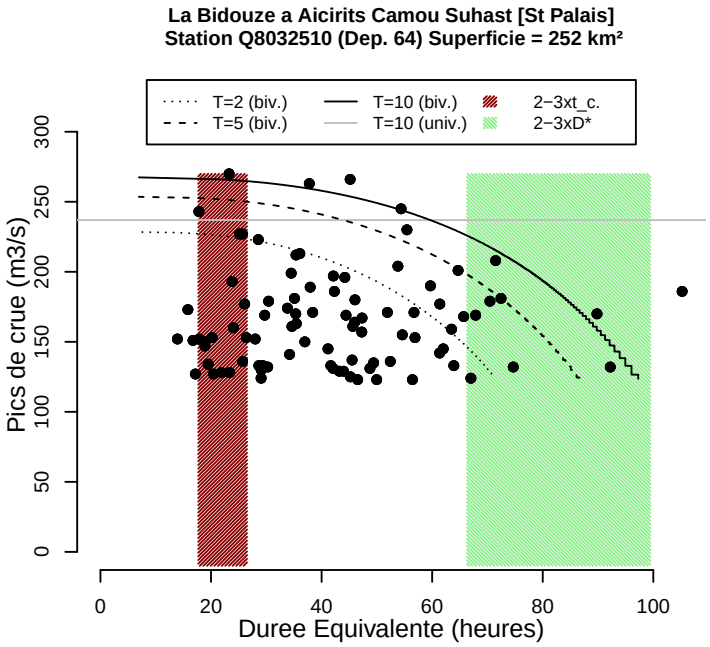


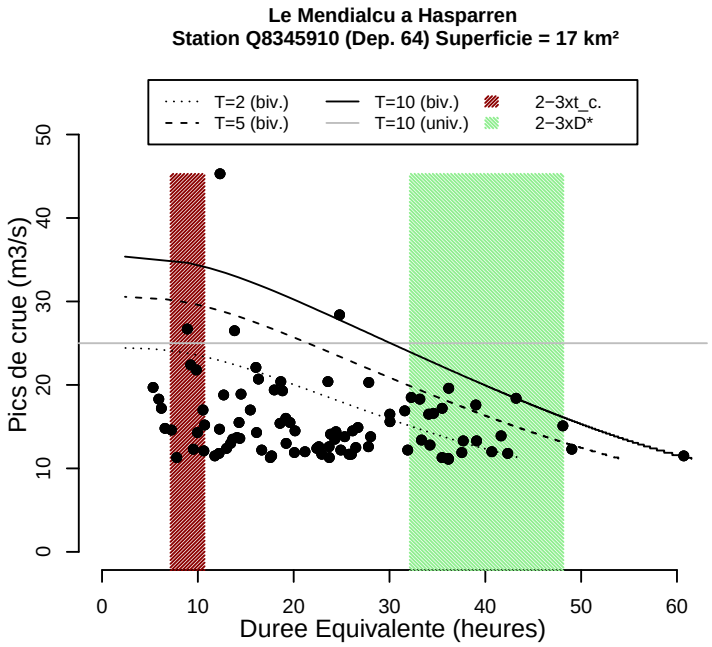
Le Meaudret a Meaudre
Station W3315010 (Dep. 38) Superficie = 75 km²

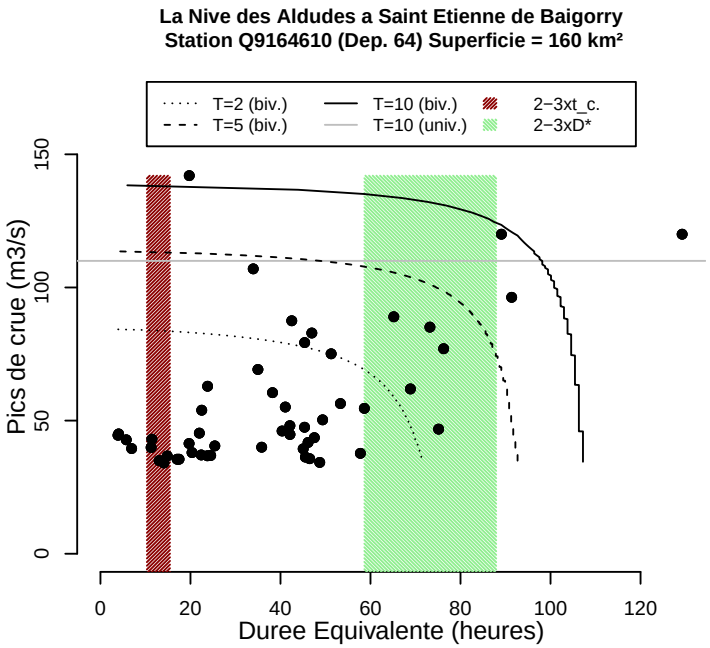


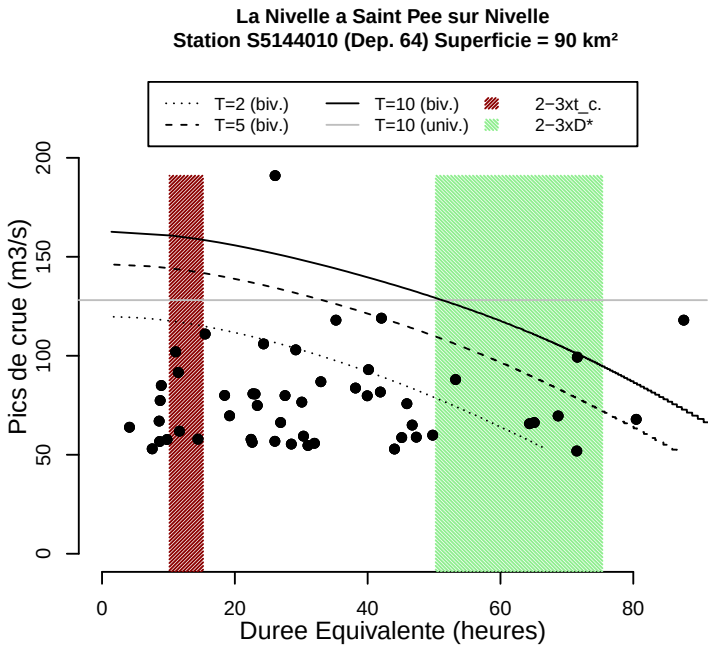
Le Gabas a Arrien
Station Q1314010 (Dep. 64) Superficie = 59 km²

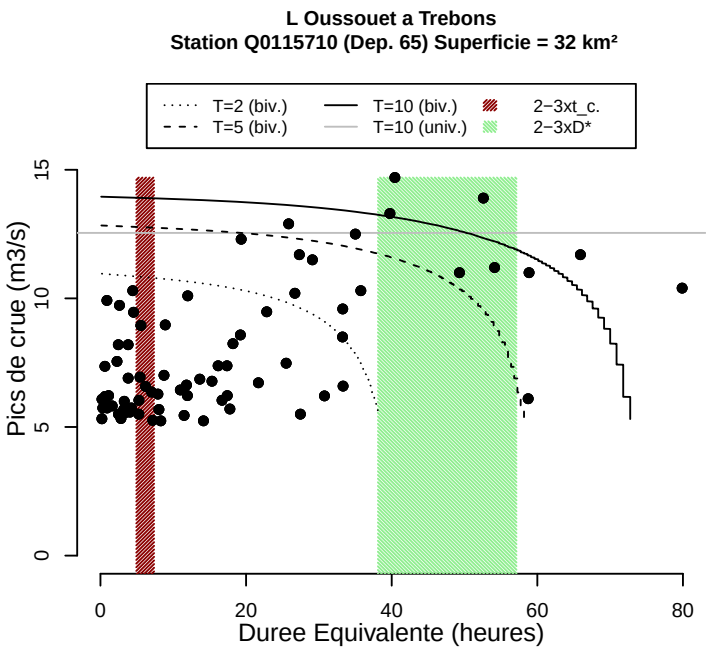


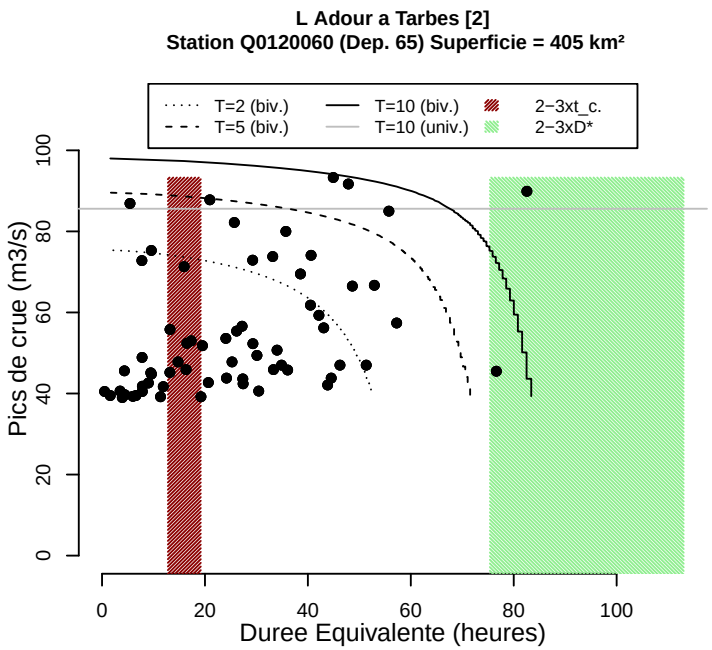

La Bidouze a Aicirits Camou Suhast [St Palais]
Station Q8032510 (Dep. 64) Superficie = 252 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

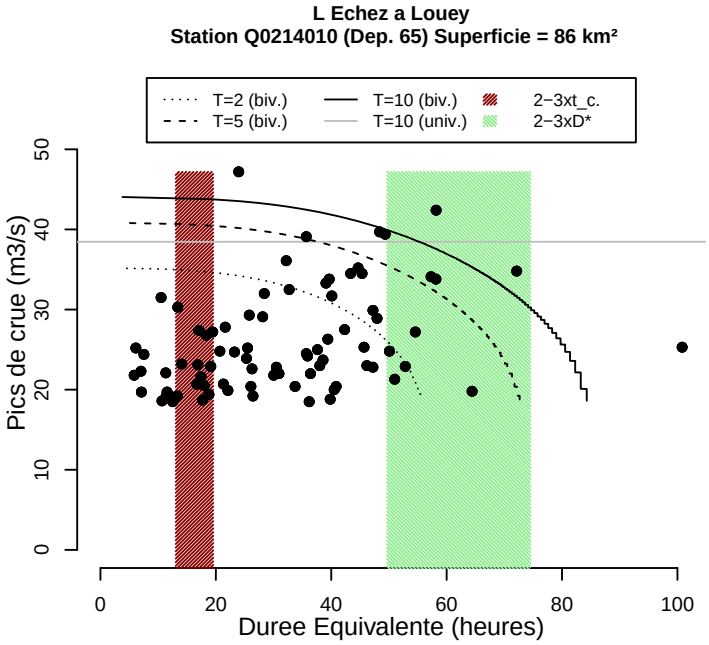

Le Mendialcu a Hasparren
Station Q8345910 (Dep. 64) Superficie = 17 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

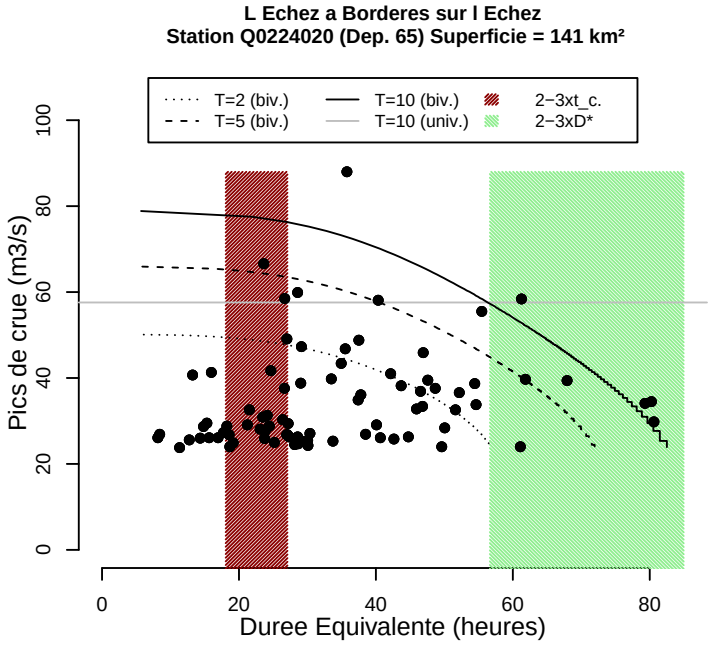

La Nive des Aldudes a Saint Etienne de Baigorry
Station Q9164610 (Dep. 64) Superficie = 160 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

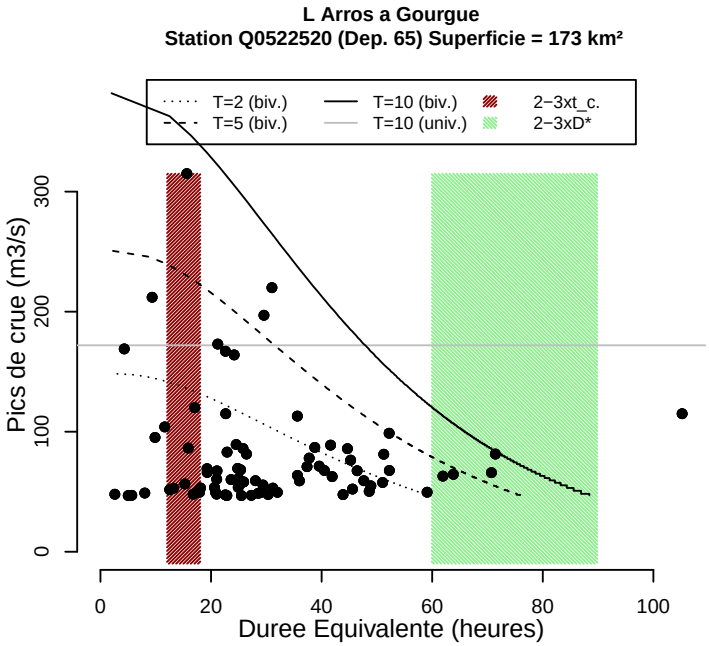

La Nivelle a Saint Pee sur Nivelle
Station S5144010 (Dep. 64) Superficie = 90 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

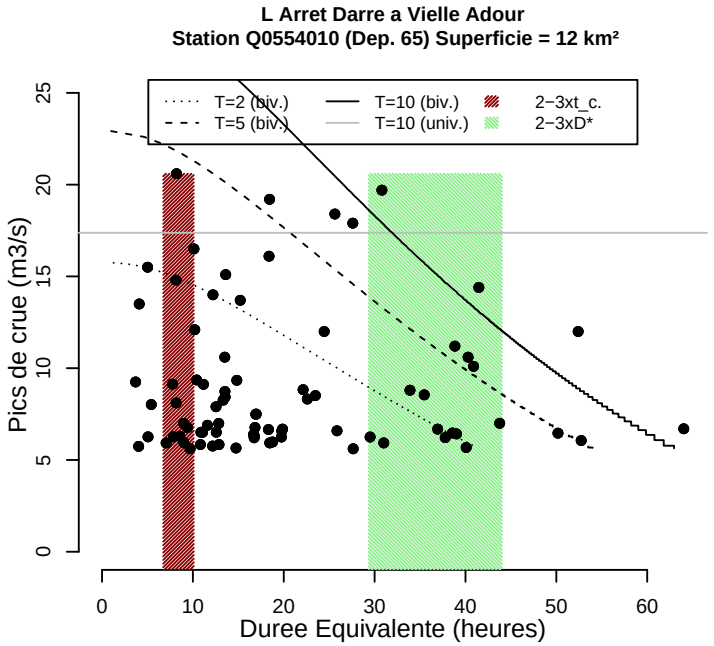

L Oussouet a Trebons
Station Q0115710 (Dep. 65) Superficie = 32 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

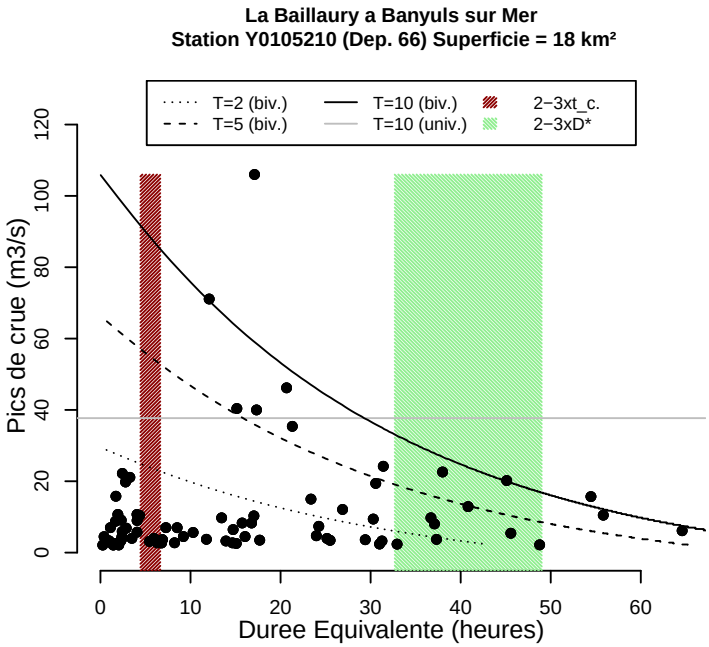

L Adour a Tarbes [2]
Station Q0120060 (Dep. 65) Superficie = 405 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

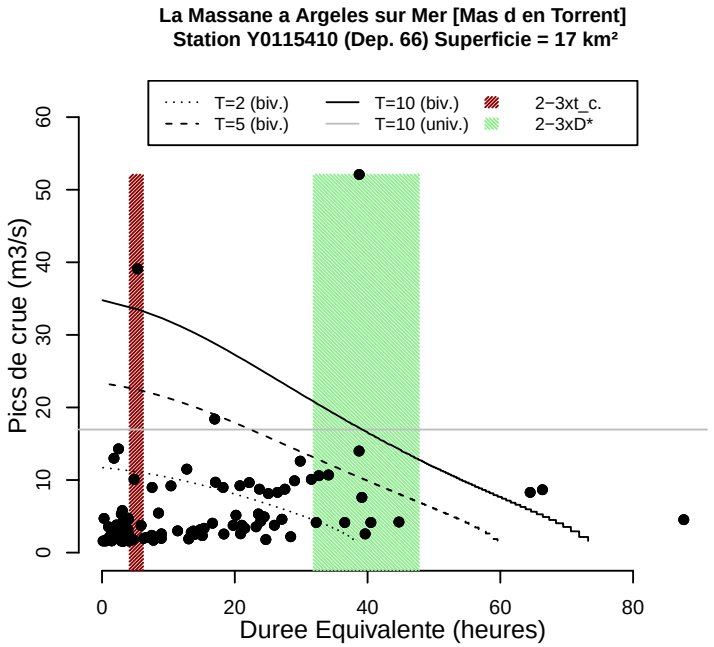

L Echez a Louey
Station Q0214010 (Dep. 65) Superficie = 86 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)


L Echez a Borderes sur l Echez
Station Q0224020 (Dep. 65) Superficie = 141 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

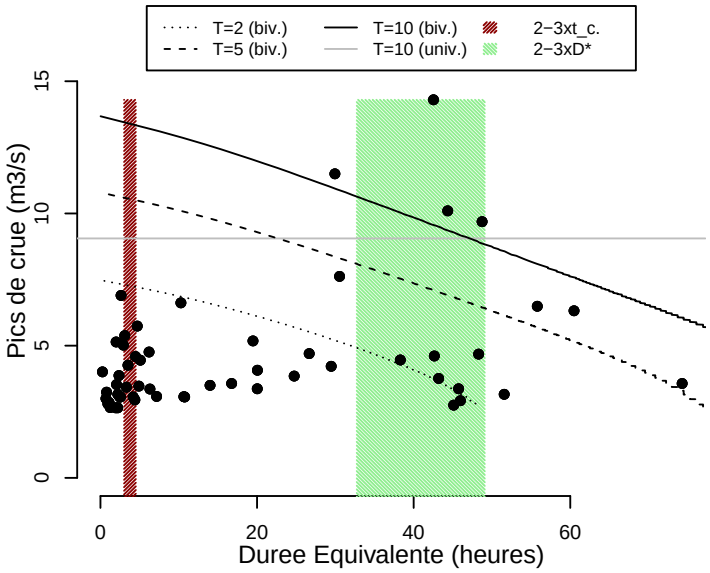

L Arros a Gourgue
Station Q0522520 (Dep. 65) Superficie = 173 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)


L Arret Darre a Vielle Adour
Station Q0554010 (Dep. 65) Superficie = 12 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

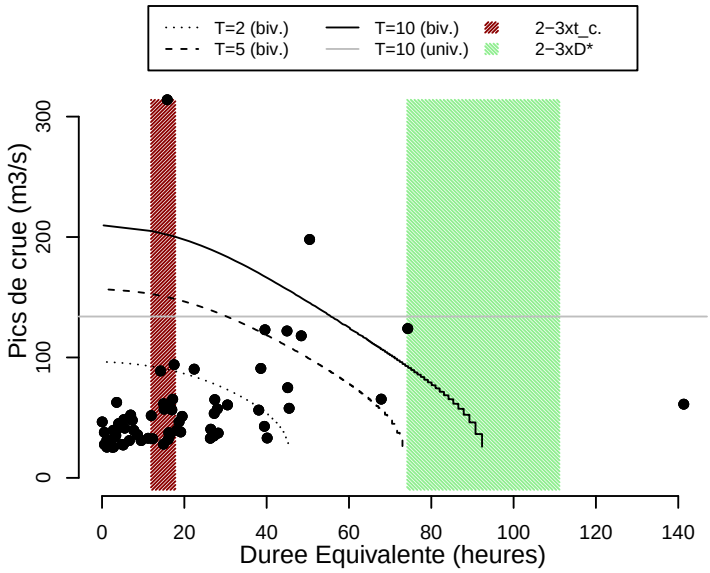

La Baillaury a Banyuls sur Mer
Station Y0105210 (Dep. 66) Superficie = 18 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)


La Massane a Argeles sur Mer [Mas d en Torrent]
Station Y0115410 (Dep. 66) Superficie = 17 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

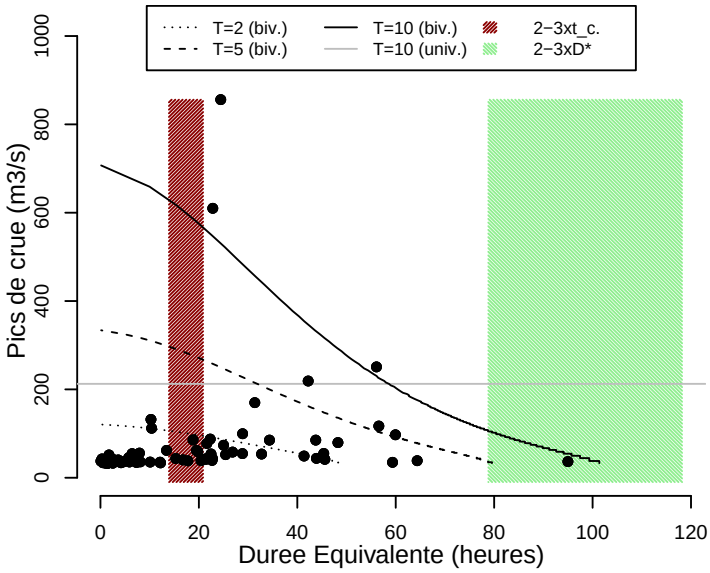
Le Tech a Prats de Mollo la Preste [La Preste]
Station Y0204010 (Dep. 66) Superficie = 18 km²



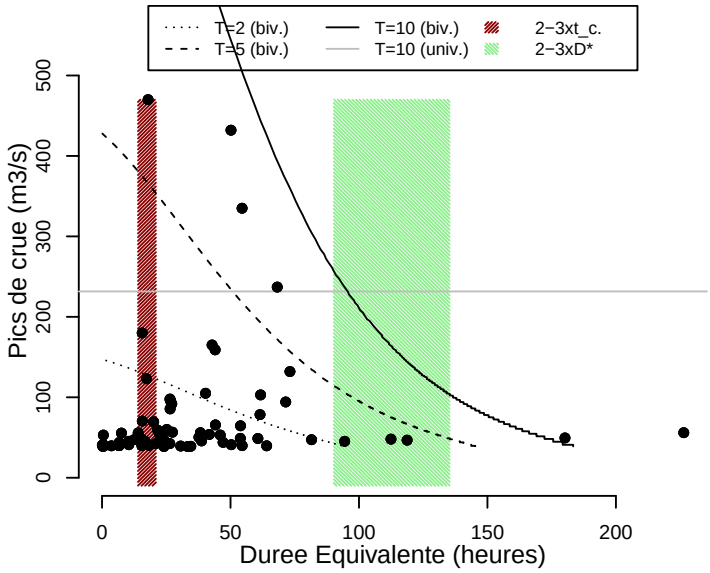
Le Tech a Amelie les Bains Palalda [aval]
Station Y0244040 (Dep. 66) Superficie = 380 km²



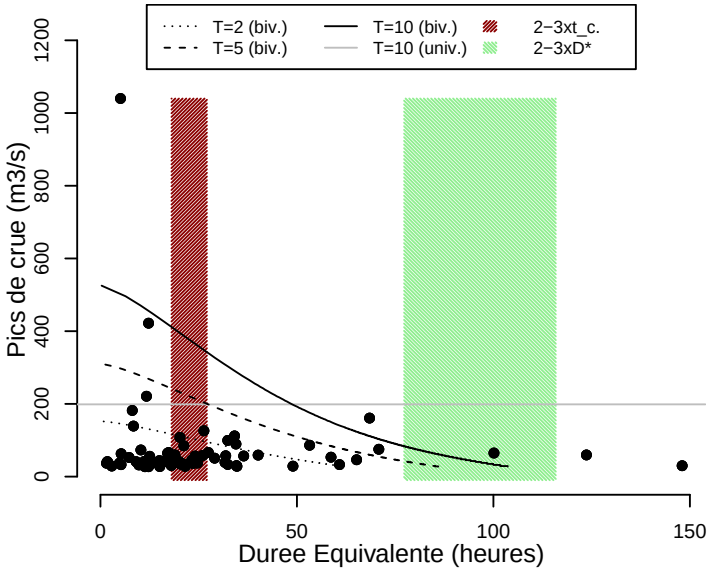
Le Tech [partiel] a Reynes [St Paul sur Tech]
Station Y0254040 (Dep. 66) Superficie = 478 km²



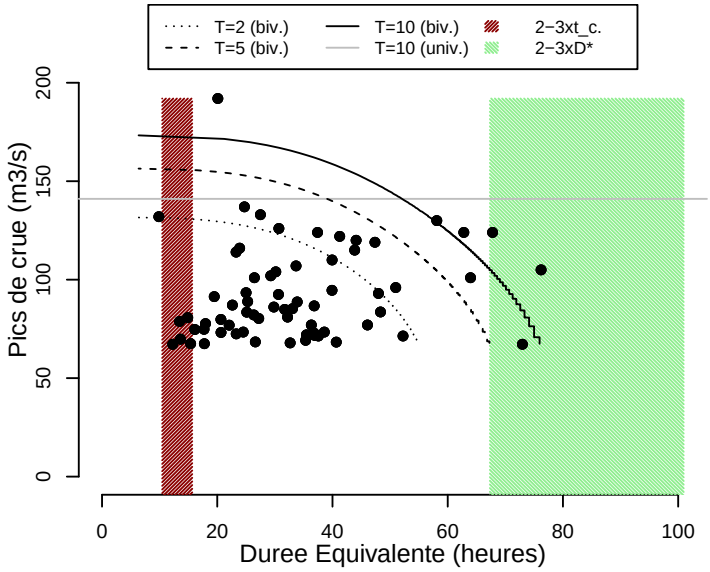
La Tet a Marquixanes
Station Y0444010 (Dep. 66) Superficie = 787 km²

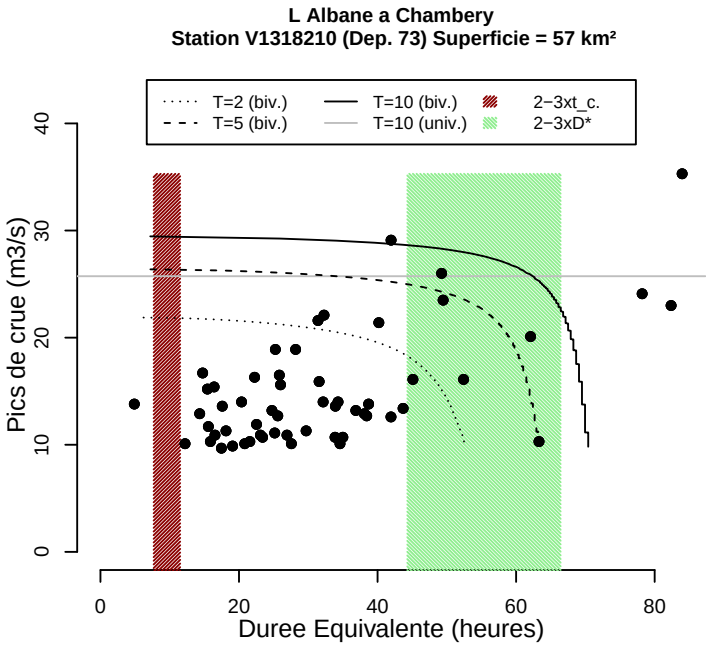


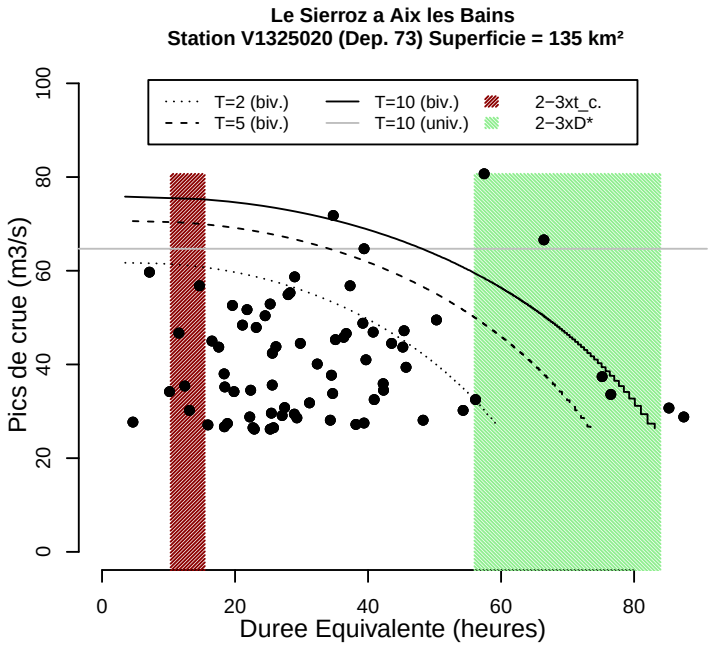
l Agly à planèzes
Station Y0634030 (Dep. 66) Superficie = 444 km²

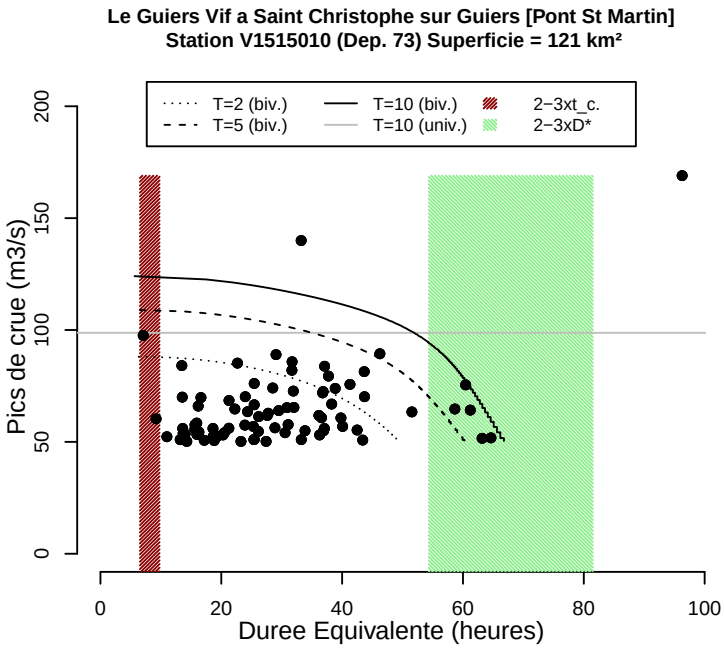


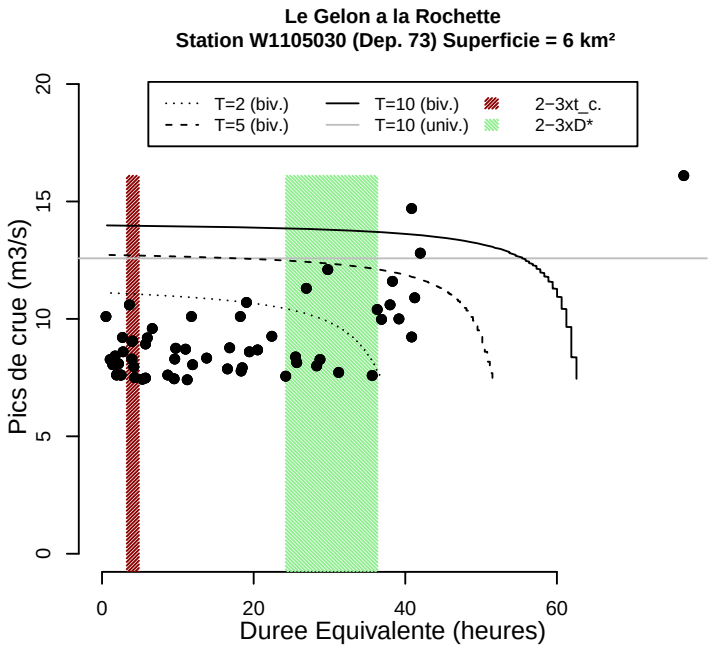
Le Cheran a Alleves [La Charniaz]
Station V1255010 (Dep. 73) Superficie = 266 km²

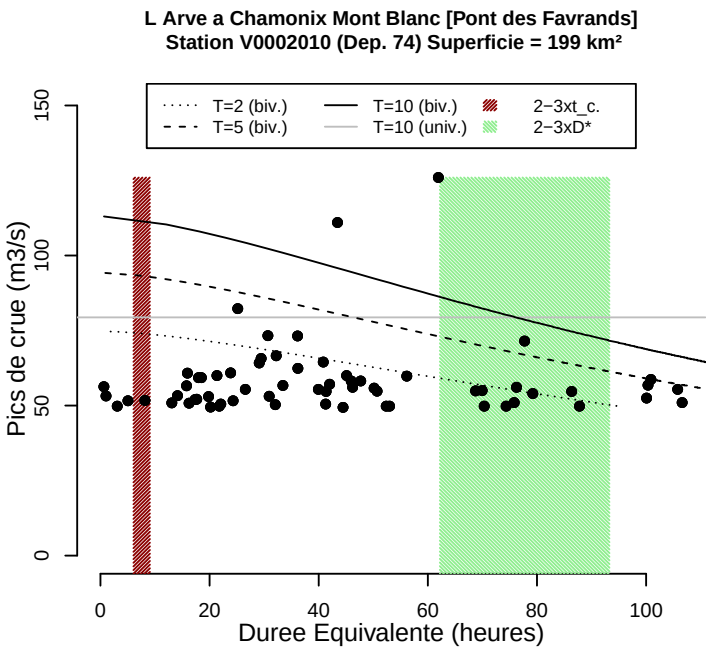


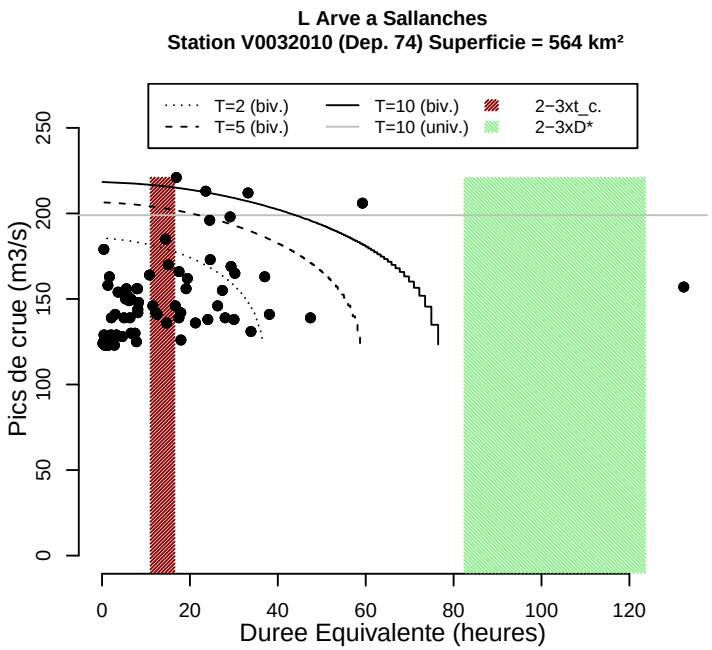

L Albane a Chambery
Station V1318210 (Dep. 73) Superficie = 57 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)


Le Sierroz a Aix les Bains
Station V1325020 (Dep. 73) Superficie = 135 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

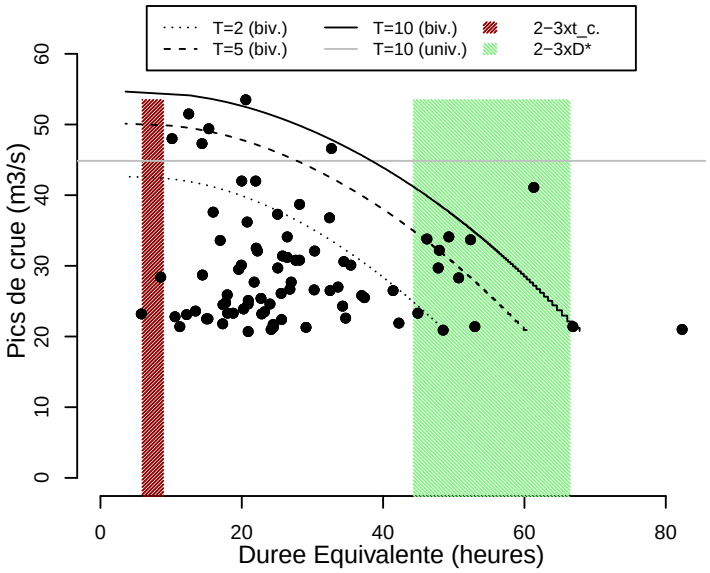

Le Guiers Vif a Saint Christophe sur Guiers [Pont St Martin]
Station V1515010 (Dep. 73) Superficie = 121 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)


Le Gelon a la Rochette
Station W1105030 (Dep. 73) Superficie = 6 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

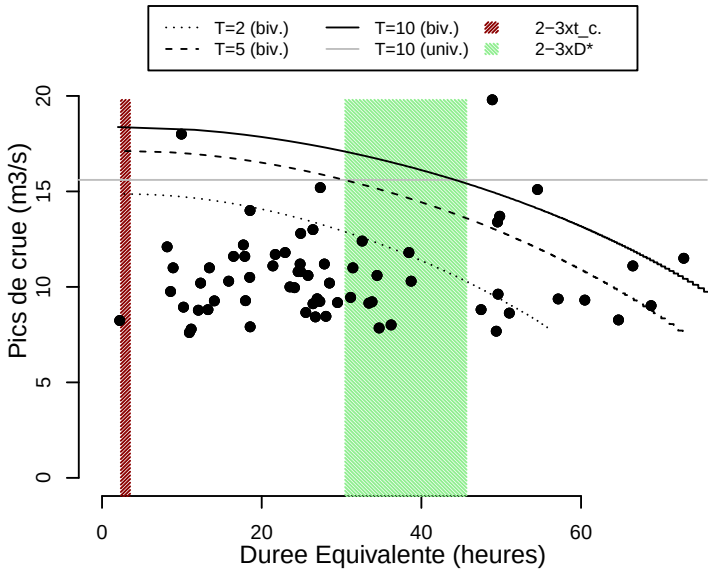

L Arve a Chamonix Mont Blanc [Pont des Favrands]
Station V0002010 (Dep. 74) Superficie = 199 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)


L Arve a Sallanches
Station V0032010 (Dep. 74) Superficie = 564 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

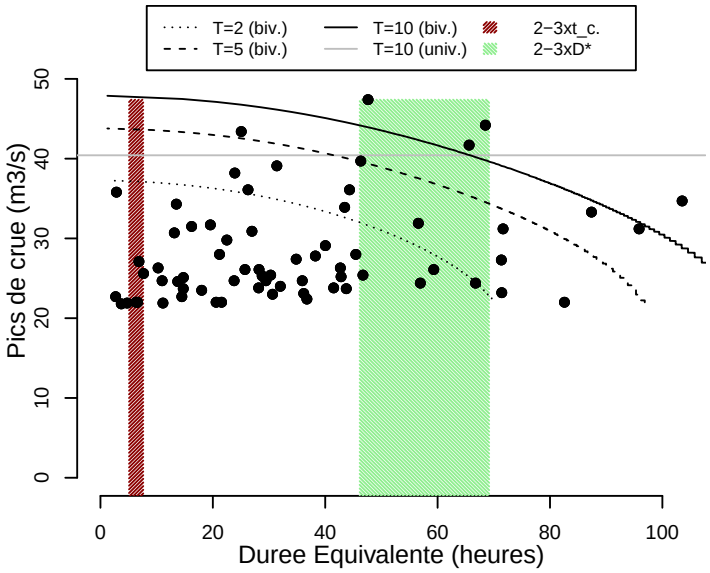
Le Risse a Saint Jeoire
Station V0155010 (Dep. 74) Superficie = 57 km²



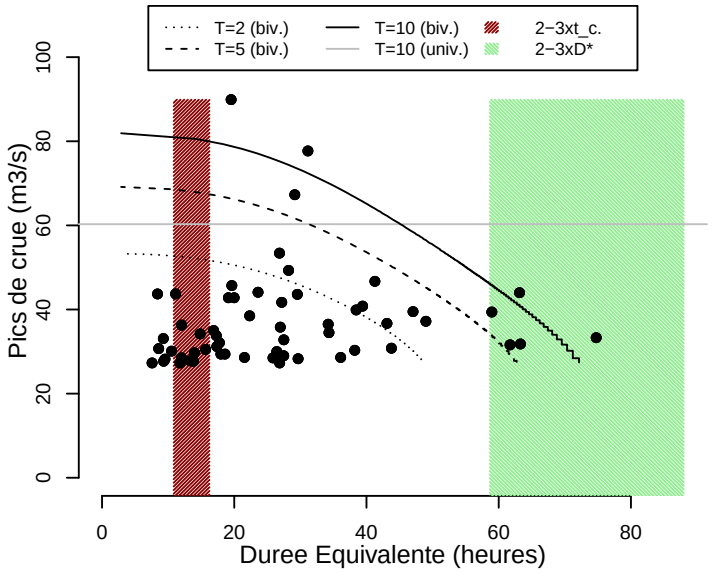
Le Bronze a Bonneville
Station V0205010 (Dep. 74) Superficie = 14 km²



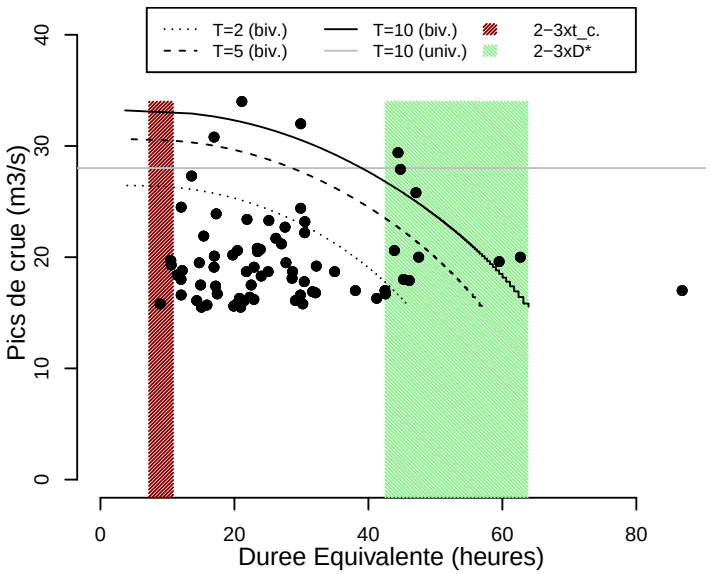
Le Borne a Saint Jean de Sixt
Station V0205420 (Dep. 74) Superficie = 66 km²



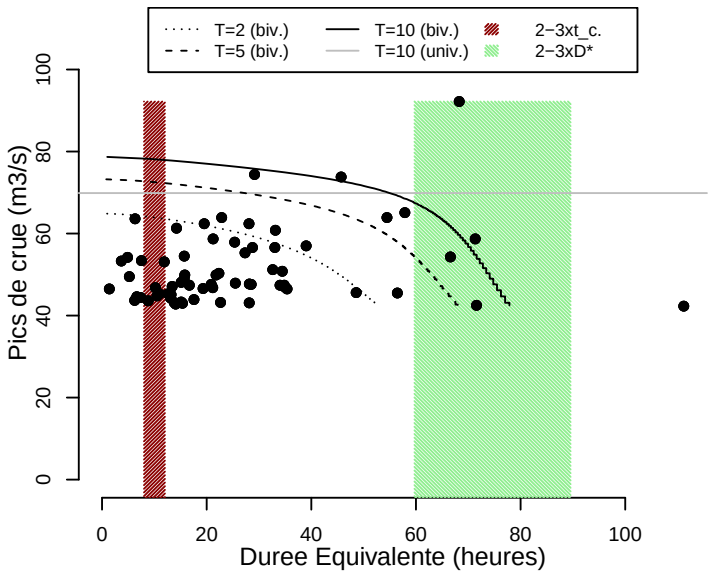
La Menoge a Vetraz Monthoux
Station V0235010 (Dep. 74) Superficie = 160 km²

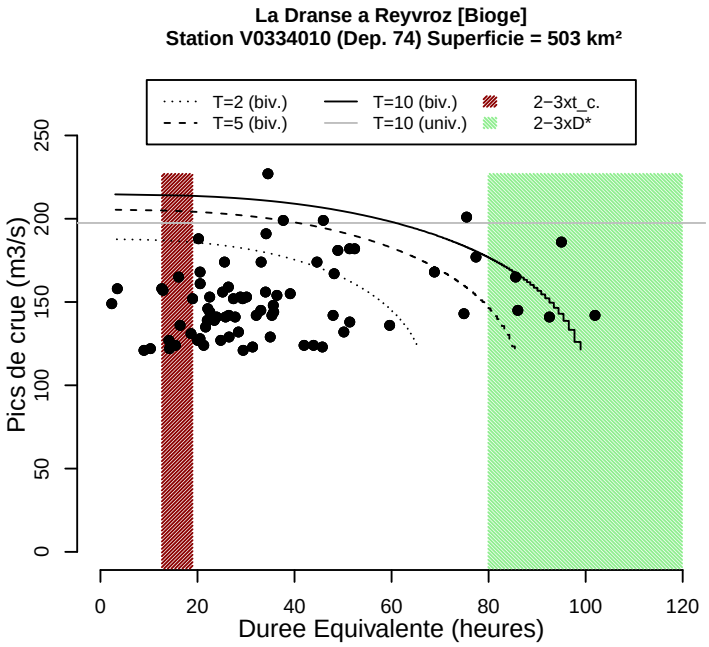


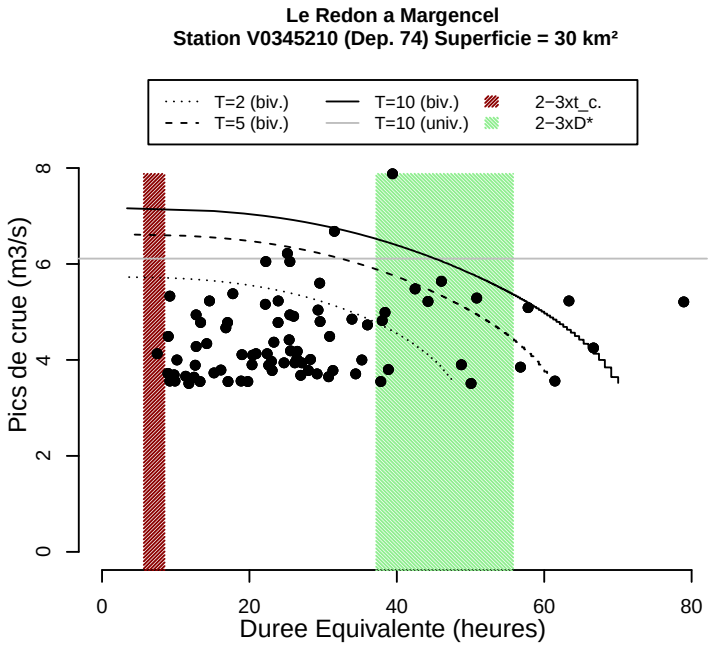
L Aire a Saint Julien en Genevois [Thairy]
Station V0245610 (Dep. 74) Superficie = 49 km²

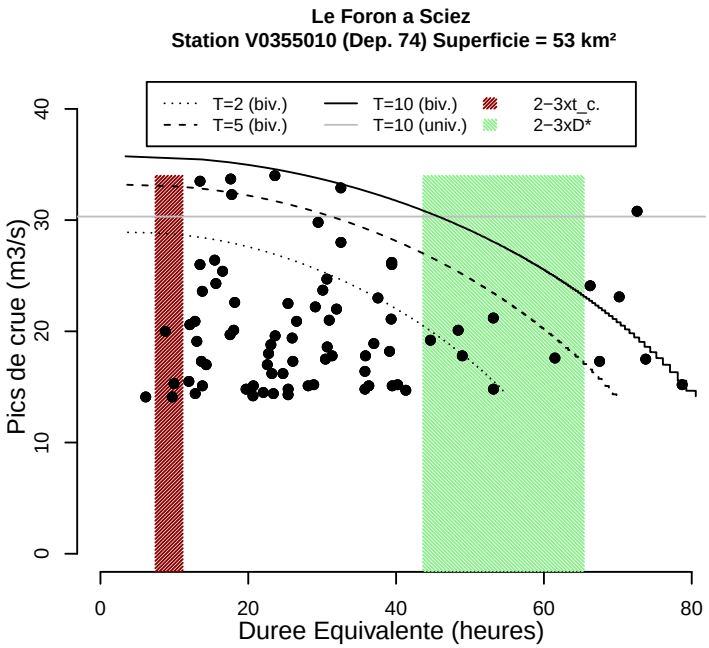


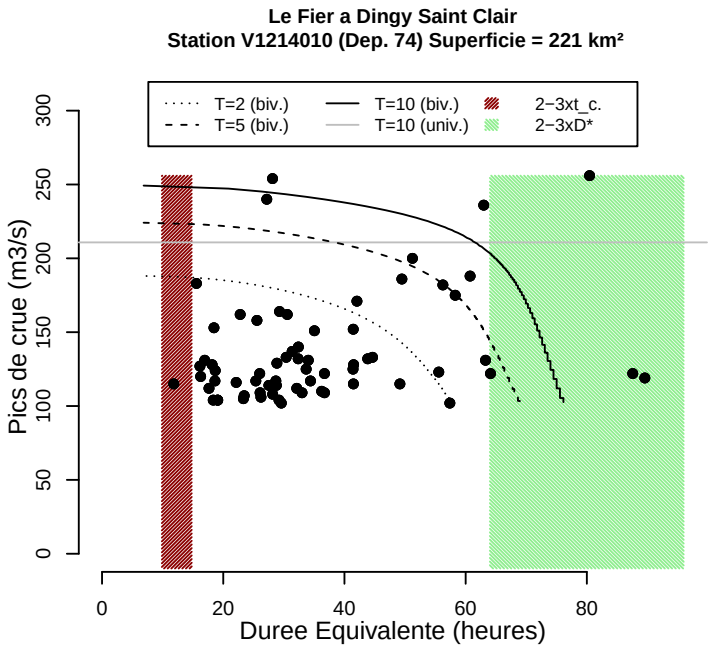
La Dranse de Morzine a Seytroux [Pont de Couvaloup]
Station V0325010 (Dep. 74) Superficie = 171 km²

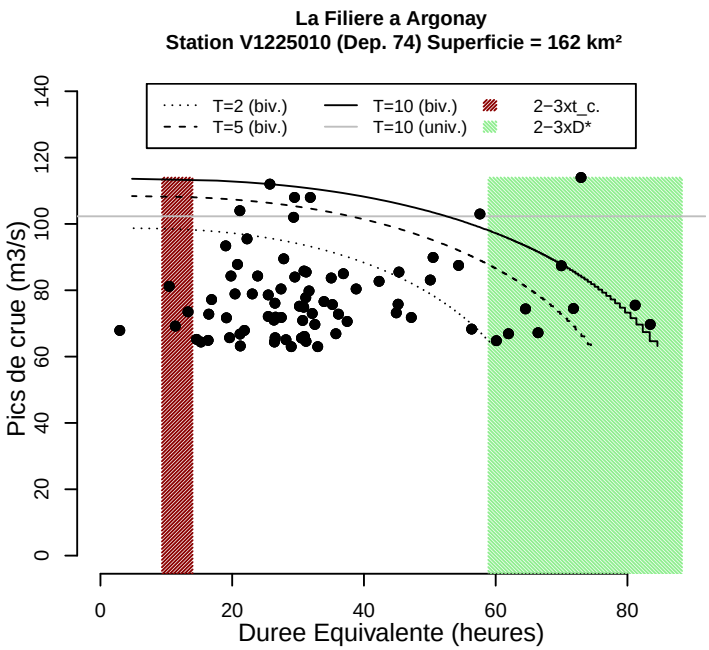


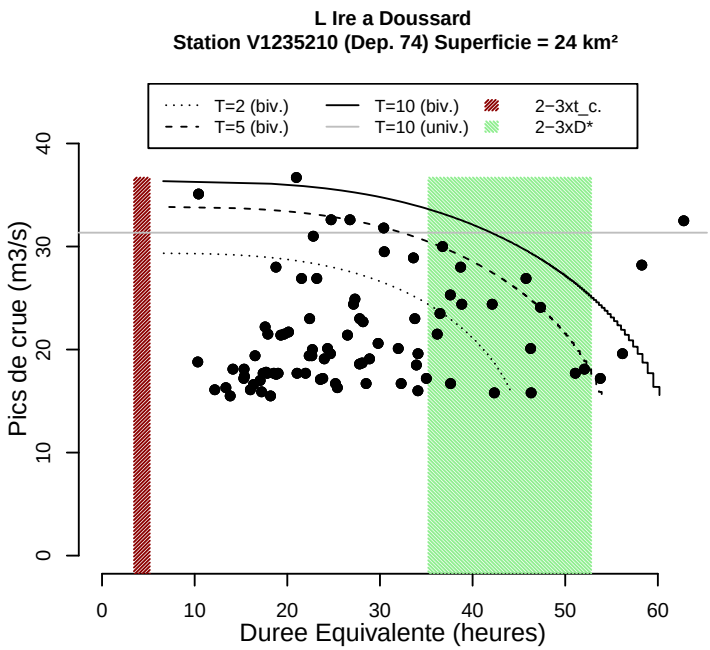

La Dranse a Reyvroz [Bioge]
Station V0334010 (Dep. 74) Superficie = 503 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)


Le Redon a Margencel
Station V0345210 (Dep. 74) Superficie = 30 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

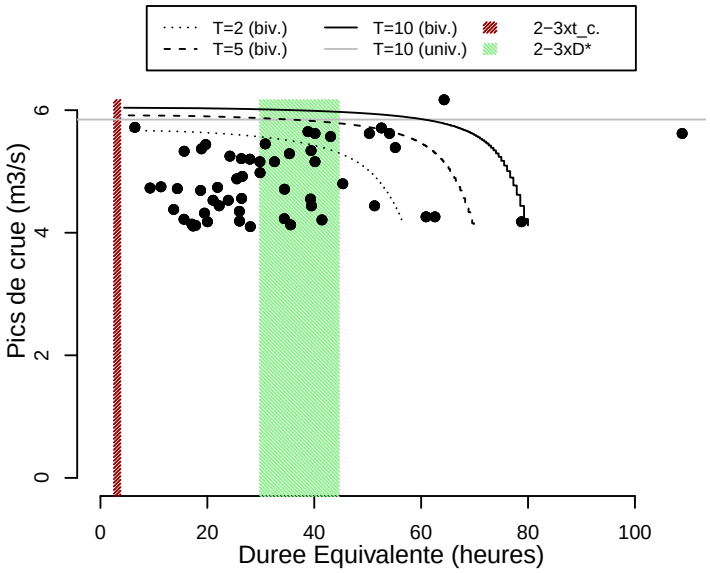

Le Foron a Sciez
Station V0355010 (Dep. 74) Superficie = 53 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)


Le Fier a Dingy Saint Clair
Station V1214010 (Dep. 74) Superficie = 221 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

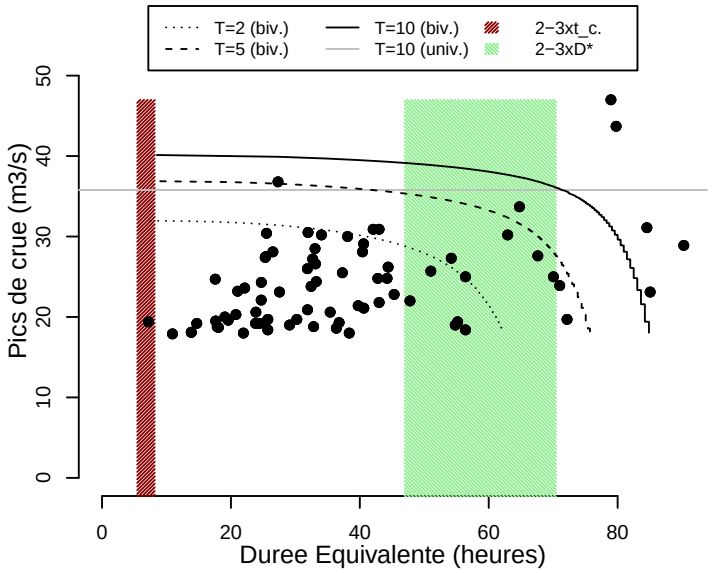

La Filiere a Argonay
Station V1225010 (Dep. 74) Superficie = 162 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)


L Ire a Doussard
Station V1235210 (Dep. 74) Superficie = 24 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

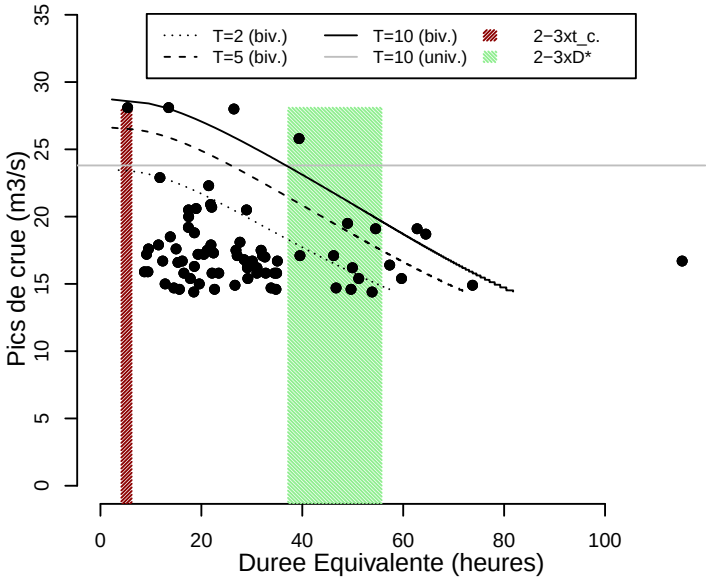
La Bornette a Lathuile
Station V1235420 (Dep. 74) Superficie = 13 km²



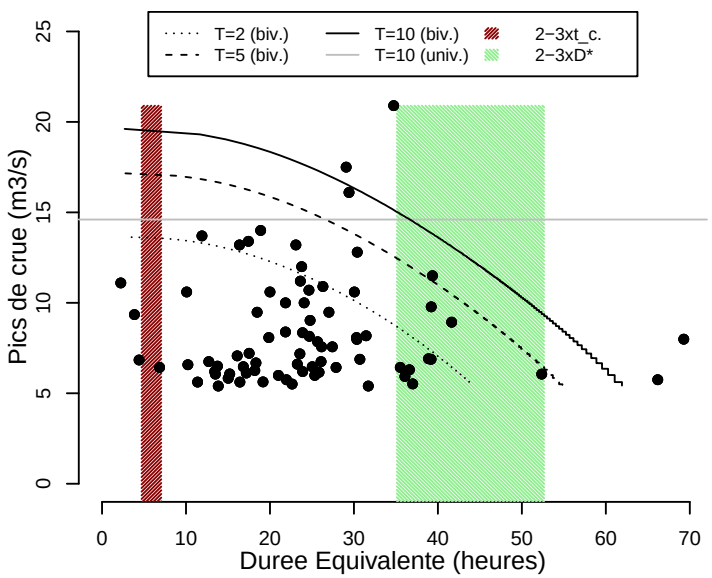
L Eau Morte a Doussard
Station V1235610 (Dep. 74) Superficie = 70 km²



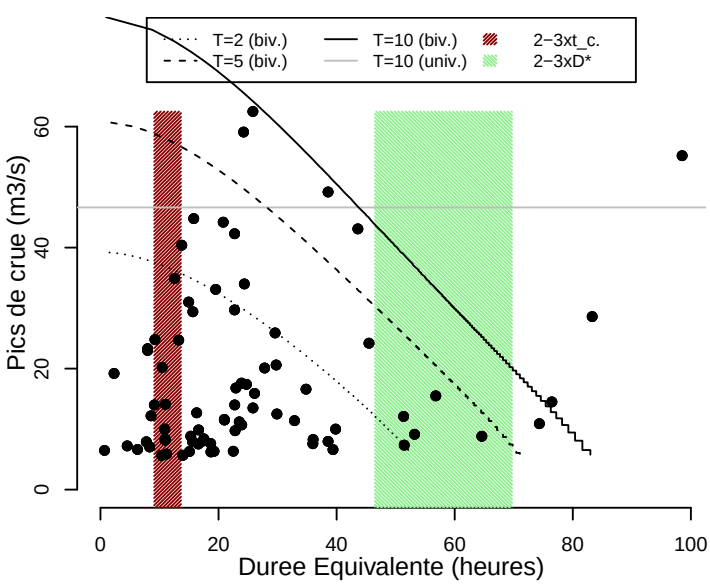
Le Laudon a Saint Jorioz
Station V1237410 (Dep. 74) Superficie = 30 km²



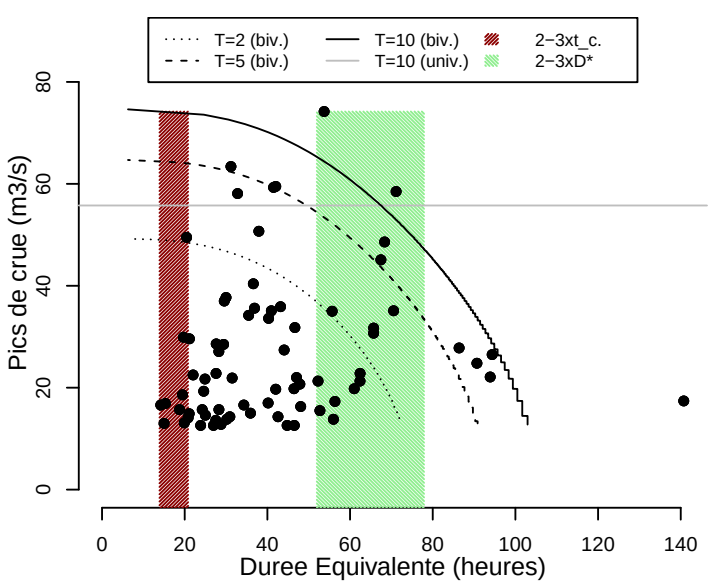
Les Eparis a Alby sur Cheran
Station V1257810 (Dep. 74) Superficie = 24 km²



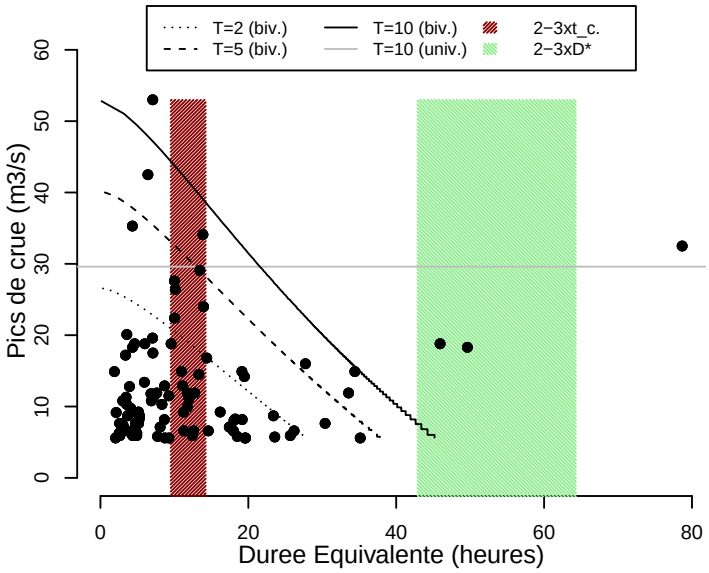
Le Jabron a Comps sur Artuby [Pont de l Evescat]
Station X2305010 (Dep. 83) Superficie = 68 km²



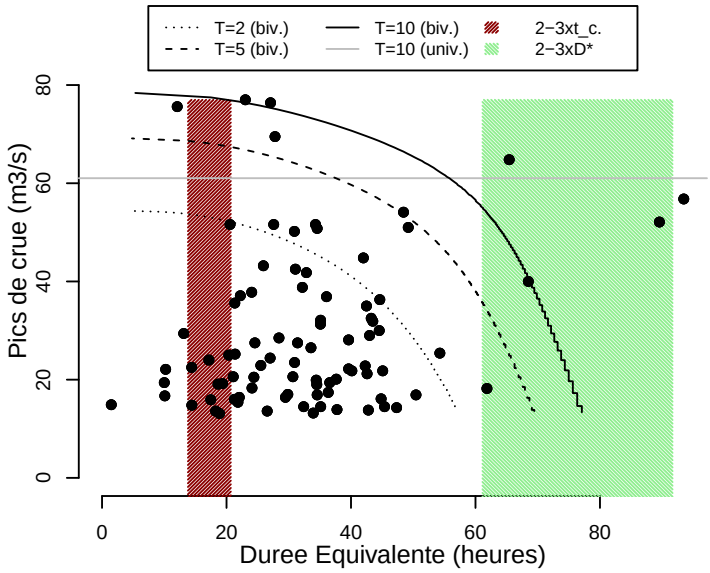
L Artuby a la Bastide [Taulane]
Station X2414030 (Dep. 83) Superficie = 102 km²



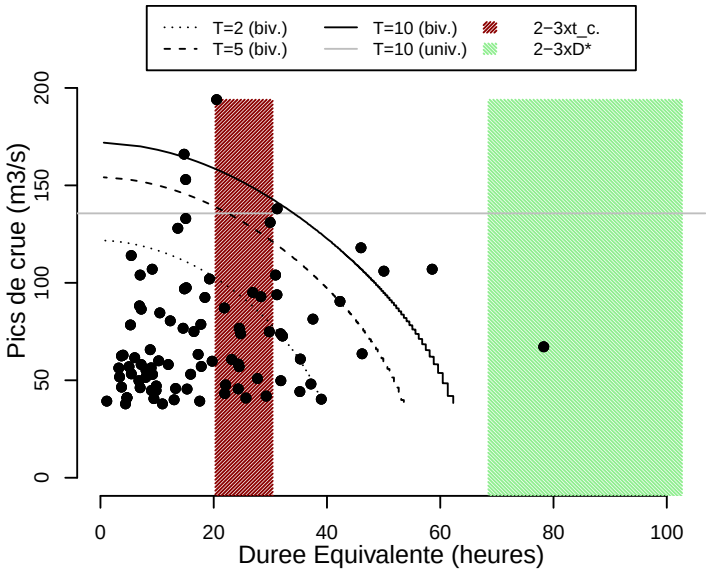
L Arc a Pourrieres
Station Y4002010 (Dep. 83) Superficie = 50 km²



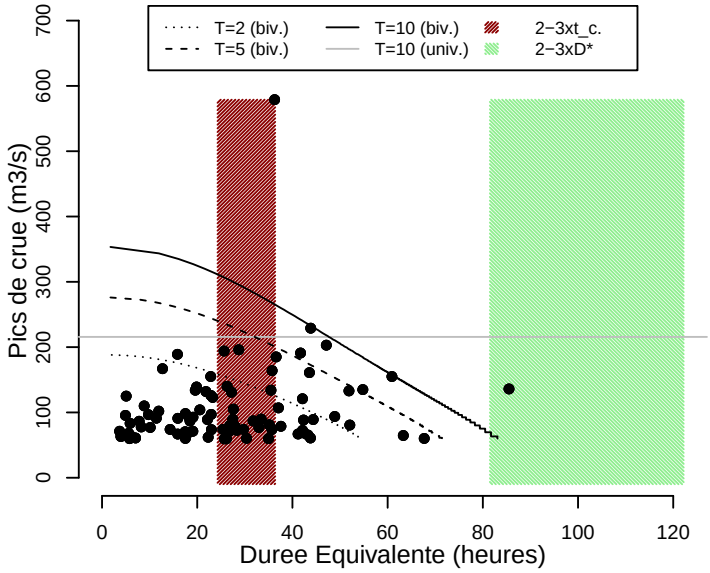
Le Gapeau a Sollies Pont
Station Y4604020 (Dep. 83) Superficie = 186 km²



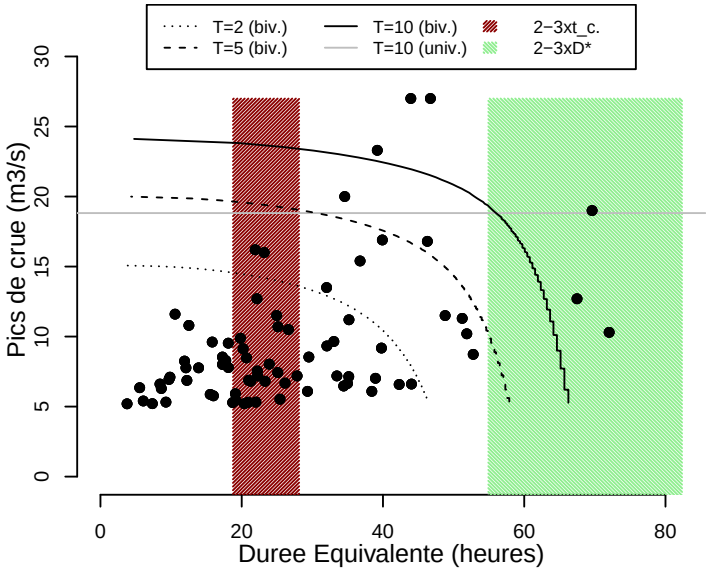
Le Real Martin a la Crau [Decapris]
Station Y4615020 (Dep. 83) Superficie = 284 km²



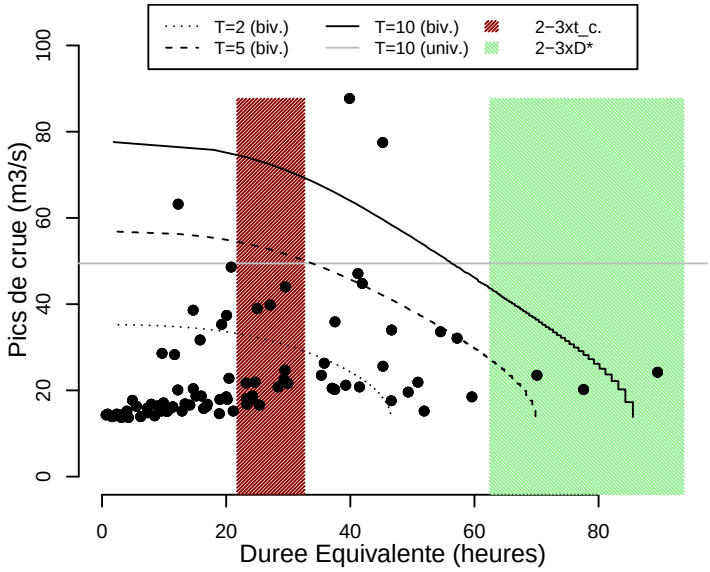
Le Gapeau a Hyeres [Ste Eulalie]
Station Y4624010 (Dep. 83) Superficie = 540 km²

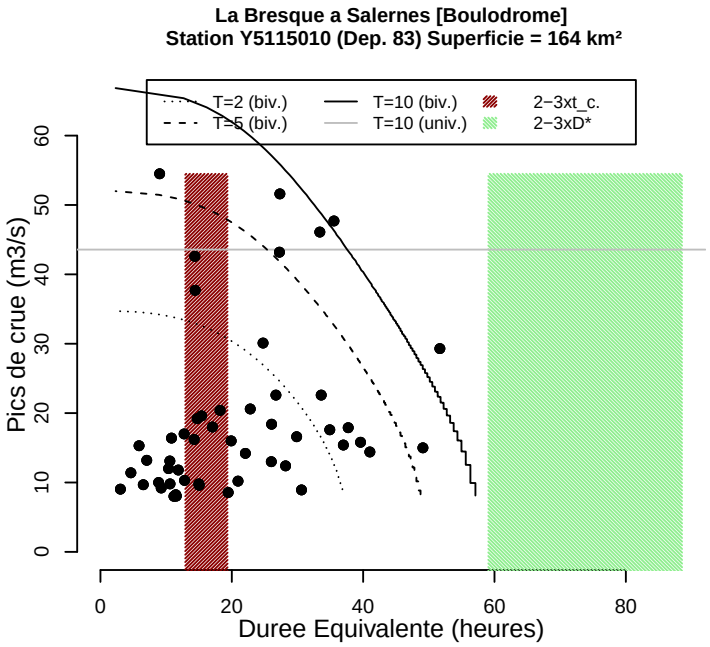


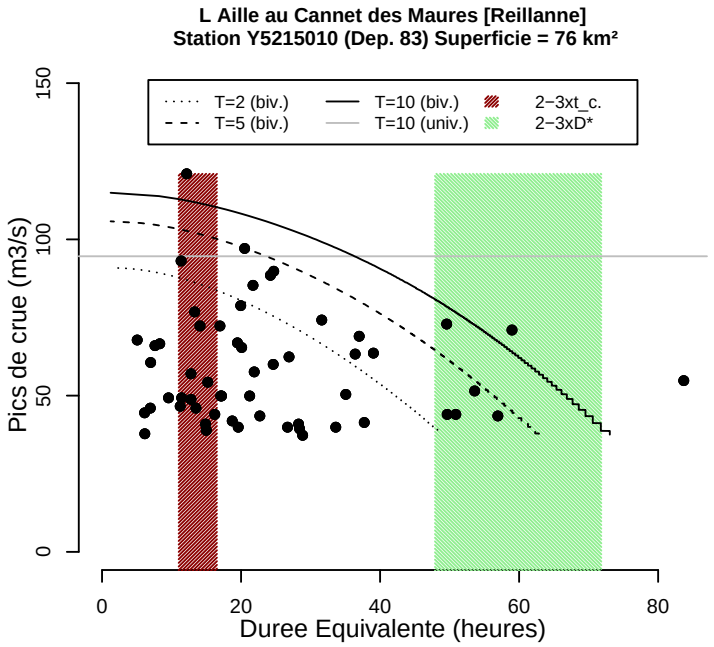
Le Cauron a Bras [Pont de l Avocade]
Station Y5005210 (Dep. 83) Superficie = 125 km²

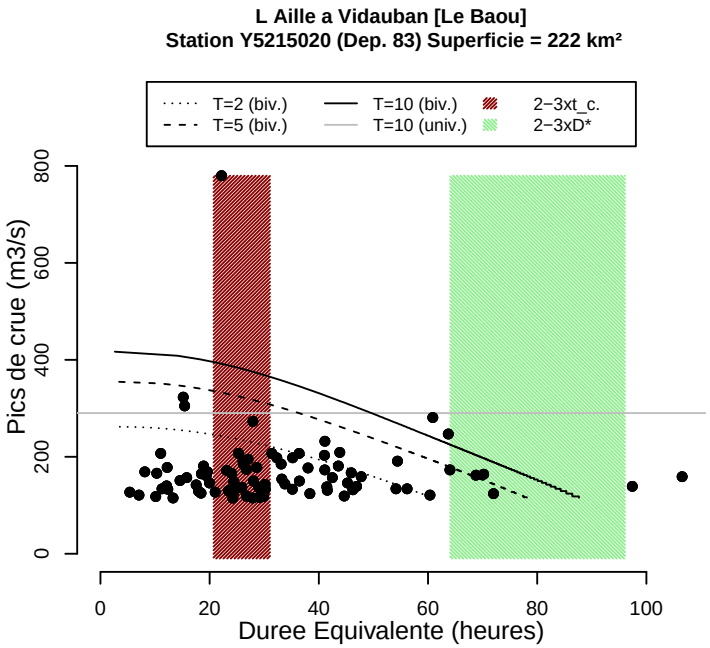


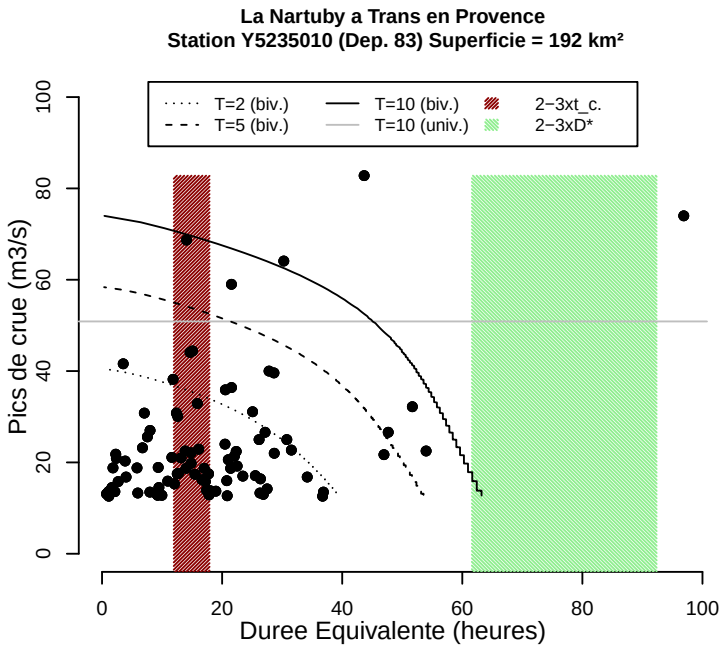
Le Caramy a Vins sur Caramy [Les Marcounious]
Station Y5105010 (Dep. 83) Superficie = 202 km²

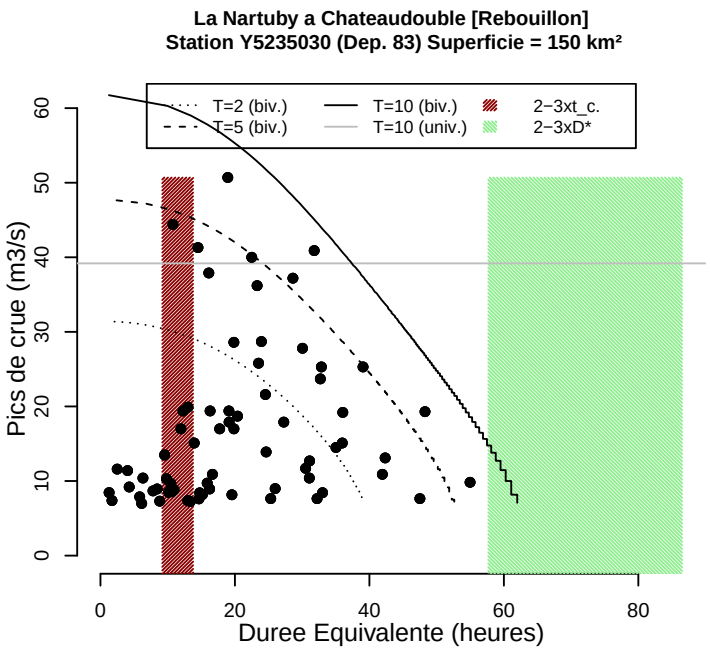


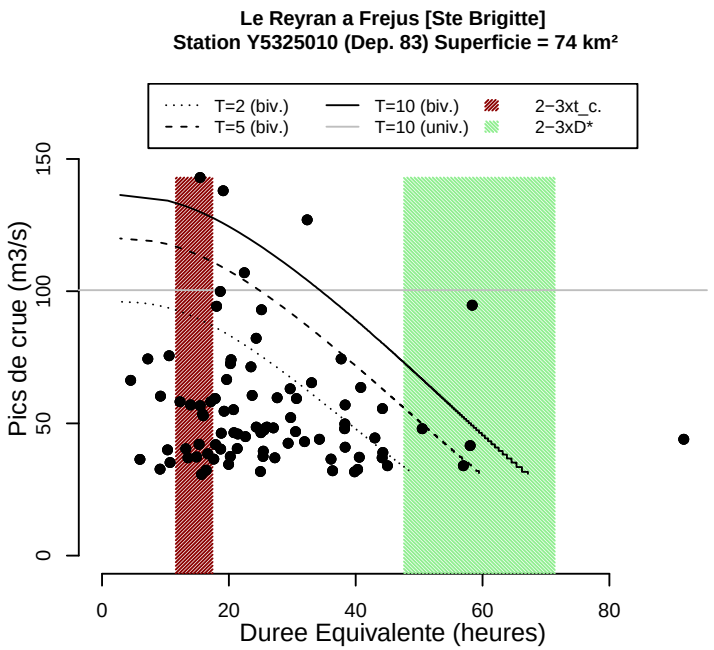

La Bresque a Salernes [Boulodrome]
Station Y5115010 (Dep. 83) Superficie = 164 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)


L Aille au Cannet des Maures [Reillanne]
Station Y5215010 (Dep. 83) Superficie = 76 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

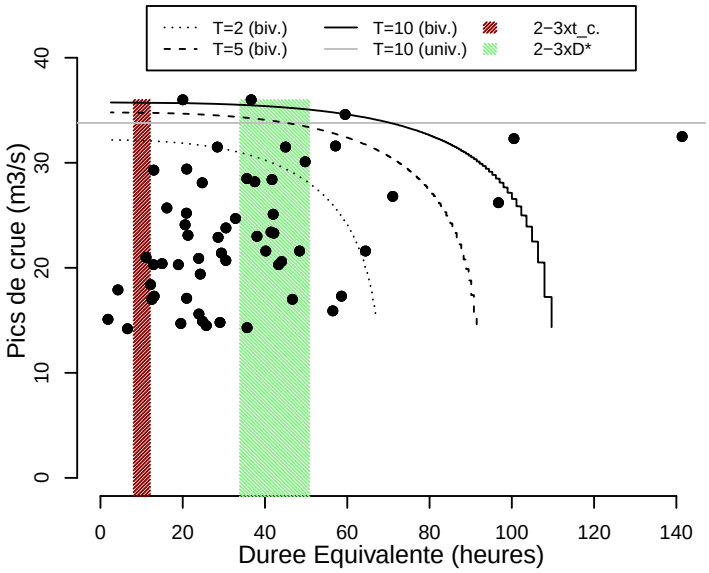

L Aille a Vidauban [Le Baou]
Station Y5215020 (Dep. 83) Superficie = 222 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)


La Nartuby a Trans en Provence
Station Y5235010 (Dep. 83) Superficie = 192 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

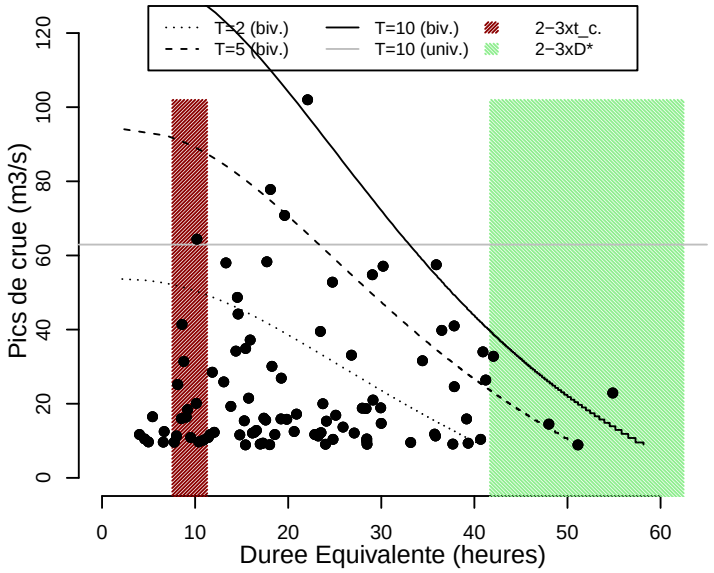

La Nartuby a Chateaudouble [Rebouillon]
Station Y5235030 (Dep. 83) Superficie = 150 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)


Le Reyran a Frejus [Ste Brigitte]
Station Y5325010 (Dep. 83) Superficie = 74 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
Duree Equivalente (heures)

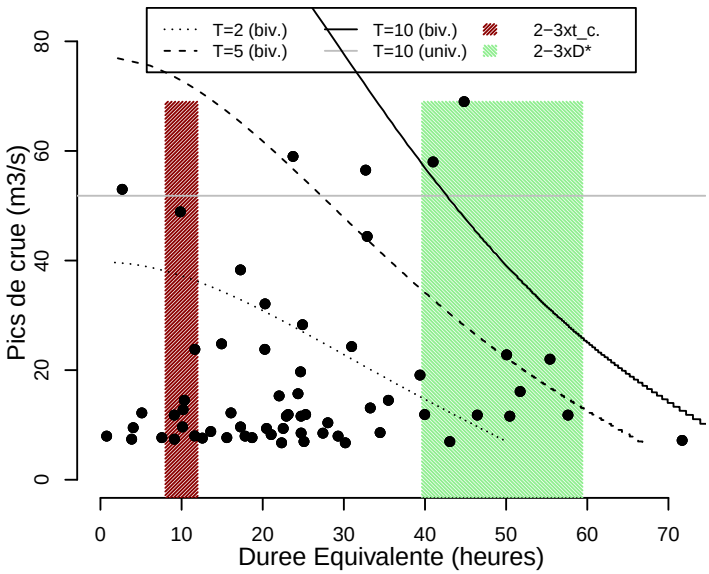
La Giscle a Cogolin
Station Y5424010 (Dep. 83) Superficie = 21 km²



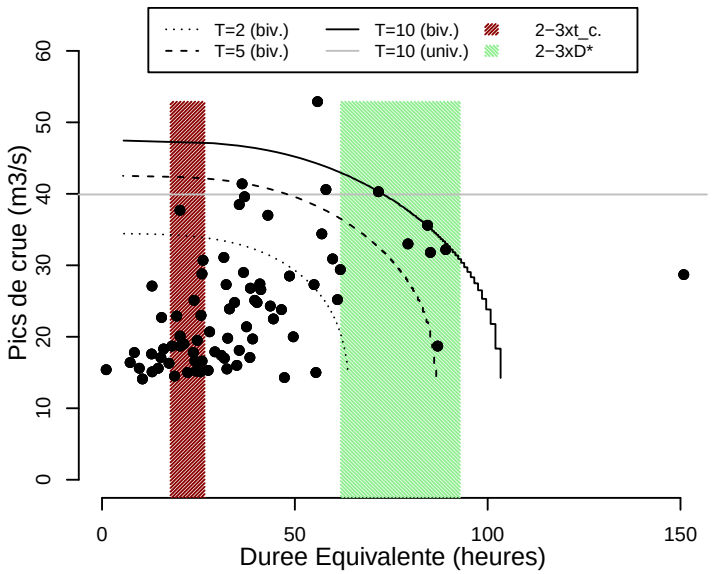
La Mole au Lavandou [Destel]
Station Y5435010 (Dep. 83) Superficie = 45 km²



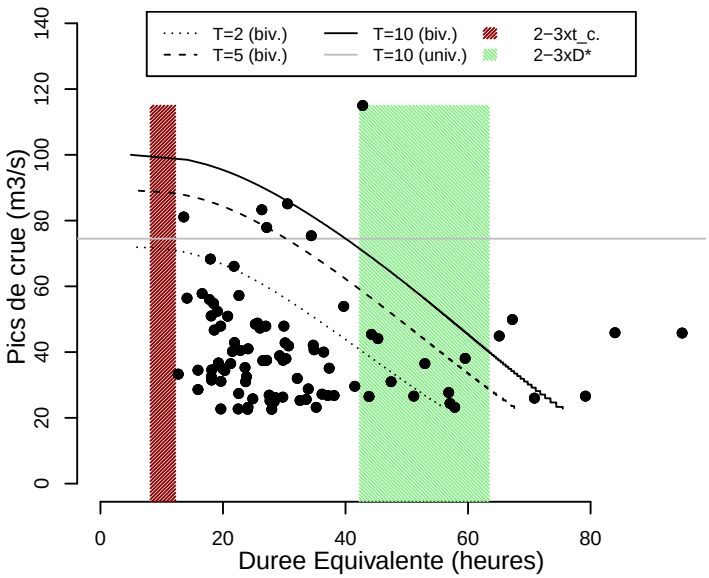
La Verne a la Mole [Les Cabris]
Station Y5436210 (Dep. 83) Superficie = 37 km²



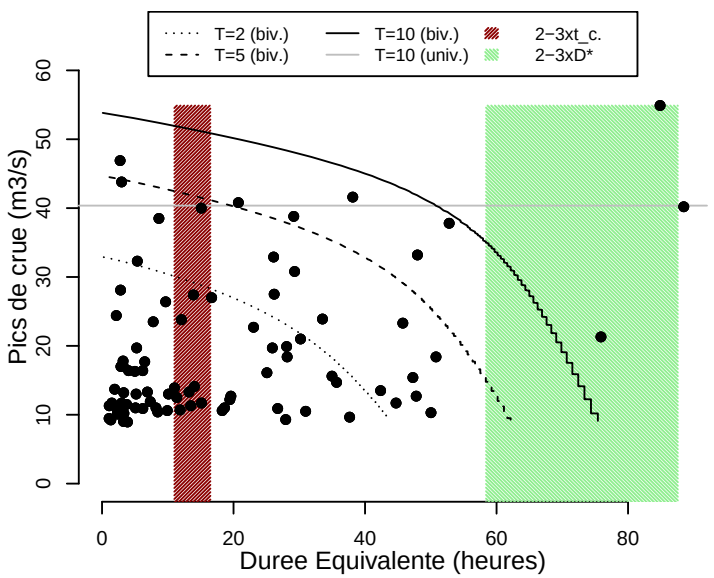
La Giscle a Cogolin [Les Ajusts]
Station Y5444010 (Dep. 83) Superficie = 195 km²

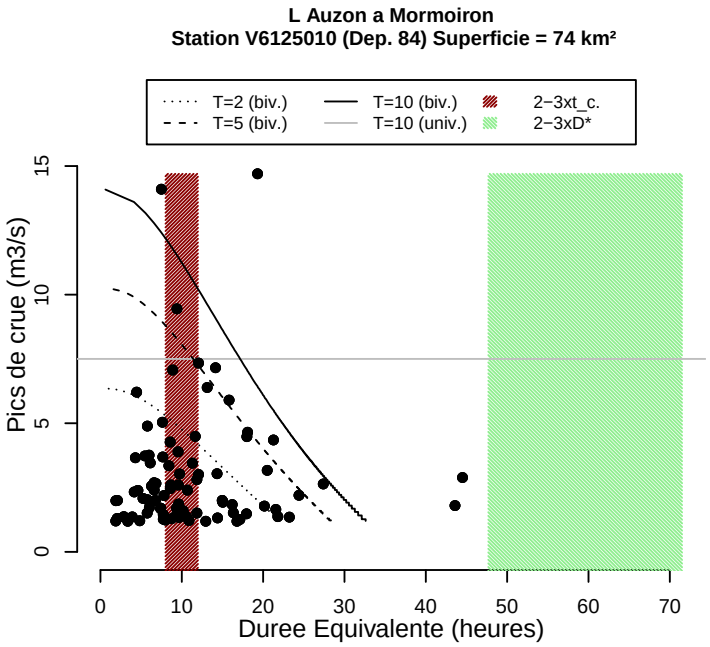


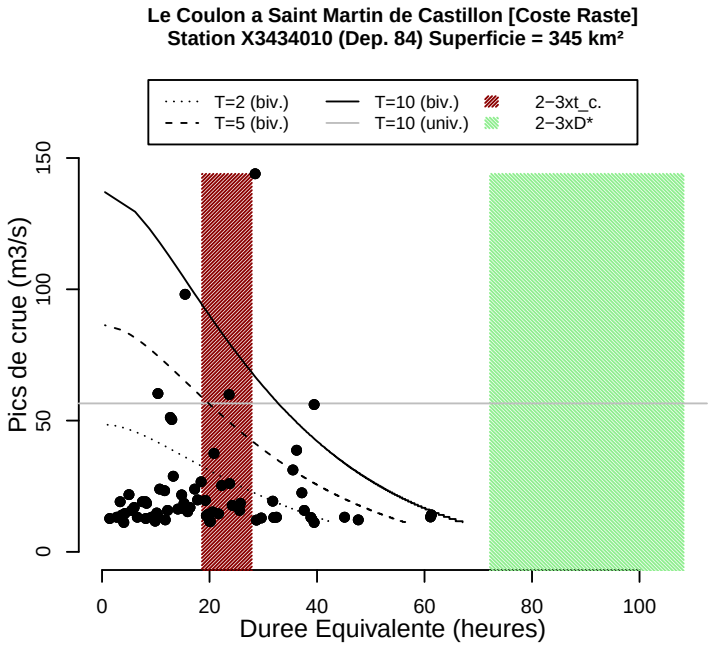
Le Grenouiller a Saint Raphael [Agay]
Station Y5505410 (Dep. 83) Superficie = 48 km²



Le Toulourenc a Malaucene [Veaux]
Station V6035010 (Dep. 84) Superficie = 157 km²




L Auzon a Mormoiron
Station V6125010 (Dep. 84) Superficie = 74 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
0
5
10
15
0
10
20
30
40
50
60
70
Duree Equivalente (heures)


Le Coulon a Saint Martin de Castillon [Coste Raste]
Station X3434010 (Dep. 84) Superficie = 345 km²
T=2 (biv.)
T=5 (biv.)
T=10 (biv.)
T=10 (univ.)
2−3xt_c.
2−3xD*
Pics de crue (m3/s)
0
50
100
150
0
20
40
60
80
100
Duree Equivalente (heures)

Centre Center Lyon-Grenoble - Auvergne-Rhône-Alpes
2 rue de la Papeterie BP 76,
38 402 St-Martin-d'Hères - France

Rejoignez-nous sur :

https://www.inrae.fr/centres/lyon-grenoble-auvergne-rhone-alpes

INRAE
la science pour la vie, l'humain, la terre