



Interreg



UNIONE EUROPEA

MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



ADAPT

STATISTIQUE DES EVOLUTIONS DES DEBITS

Rédigé par WACOGNE Yoan (Stagiaire) et BRIGODE Pierre (MCF)



Table des matières

Remerciements	3
Table des figures.....	5
Table des tableaux.....	5
Table des annexes	5
Résumé.....	6
Abstract	6
I. Introduction.....	7
II. Etat de l'art.....	8
2.1. Méthodes employées dans l'étude des changements physiographiques des bassins versants. 8	
2.1.1. Généralités.....	8
2.1.2. Méthode Débit-Débit.....	8
2.1.3. Méthode Pluie-Débit	10
2.2. Résultats obtenus dans le cadre de feux de forêts	11
III. Présentation de la méthode utilisée	13
3.1. Modèle utilisé.....	13
3.2. Critère de calibrage	14
3.3. Périodes de calibrage	14
3.4. Simulation sur la période post-incendie et quantification des changements.....	16
IV. Données utilisées	17
V. Résultats obtenus.....	18
5.1. Analyse graphique des cumuls mensuels.....	18
5.2. Calibrage sur période continue	21
5.3. Calibrage par sous-périodes successives.....	21
5.4. Discussion	24
Conclusion	25
Bibliographie.....	27
Annexe.....	29

Remerciements

Dans un premier temps, la personne que je tiens à remercier est mon maître de stage et directeur de département, Mr Brigode. Je vous remercie tout particulièrement pour votre écoute et votre compréhension. Merci de m'avoir accepté au sein de l'équipe hydrologique de GéoAzur pour réaliser ce stage des plus enrichissant. Merci pour le partage de vos expériences en tant que prof et doctorant et d'avoir une fois de plus été à l'écoute sur les retours du stage, mais également des cours. Enfin, merci pour les cafés offerts (bien que ceux de la machine ne soient pas exceptionnellement bons et que vous auriez pu prendre une vraie cafetière, mais bon), ou encore les sorties terrains qui ont permis de nous sortir un peu de l'hydrologie, pour aller faire de l'hydrologie.

Je tiens également à remercier mes collègues de stage Maxime, Nicolas pour les codes R échangés, et Florian, notamment pour ses dessins de tableaux qui ont « embelli » nos « bureaux ».

Enfin, merci à tous les membres de GéoAzur qu'il m'a été possible de rencontrer, qui ont pu partager avec nous, comme Lise sur le terrain, ou encore les doctorants Raphaël et Yoann pour le savoir transmis en hydrogéologie et pour la composition d'une salade pour un prix correct.

Table des figures

<i>Figure 1 : Représentation du modèle Débit-Débit (Viatgé, 2013).</i>	9
<i>Figure 2 : Périodes de calibrage (Brigode et al., 2015).</i>	10
<i>Figure 3 : Représentation des différentes périodes du modèle GR4J et des méthodes de calibrage.</i>	15
<i>Figure 4 : Schéma du modèle de Génie Rural GR4J (https://wiki.ewater.org.au/display/SD41/GR4J+-+SRG).</i>	16
<i>Figure 5 : Carte des bassins versants de la région étudiée (Var, France) et de ses incendies de 1958 à 2003.</i> ...	17
<i>Figure 6 : Cumuls des débits mensuels (en mm) du Réal Collobrier à Pierre-Feu-du-Var.</i>	19
<i>Figure 7 : Cumuls des débits mensuels (en mm) de la Gisle à Cogolin.</i>	19
<i>Figure 8 : Cumuls des débits mensuels (en mm) de l'Aille à Vidauban.</i>	20
<i>Figure 9 : Cumuls des débits mensuels (en mm) de l'Endre à Callas.</i>	20
<i>Figure 10 : Critères NSE pour un calibrage et une simulation sur les 5 sous périodes précédents l'incendie sur le bassin du Réal Collobrier à Pierre-Feu-du-Var.</i>	22
<i>Figure 11 : Critères NSE du calibrage pas bootstrap sur le bassin du Réal Collobrier à Pierre-Feu-du-Var.</i> ...	22

Table des tableaux

<i>Tableau 1 : Critères NSE pour un calibrage sur une période continue.</i>	21
<i>Tableau 2 : Ecart de débits entre la simulation et les observations et rapport avec le pourcentage de superficie incendiée.</i>	21
<i>Tableau 3 : Récapitulatif des écarts de quantiles et mise en relation avec le pourcentage de bassin incendié.</i> ...	23

Table des annexes

<i>Annexe 1 : Tableau récapitulatif des données disponibles.</i>	29
<i>Annexe 2 : Critères NSE pour un calibrage et une simulation sur les 5 sous périodes précédents l'incendie sur le bassin de la Gisle à Cogolin.</i>	29
<i>Annexe 3 : Critère NSE pour un calibrage et une simulation sur les 5 sous périodes précédents l'incendie sur le bassin de l'Aille à Vidauban.</i>	29
<i>Annexe 4 : Critère NSE pour un calibrage et une simulation sur les 5 sous périodes précédents l'incendie sur le bassin de l'Endre à Callas.</i>	30
<i>Annexe 5 : Critères NSE du calibrage pas bootstrap sur le bassin de l'Aille à Vidauban.</i>	30

Résumé

Chaque année, peu importe la saison, des forêts dans le monde entier sont en proie aux flammes. Une fois l'incendie maîtrisé, tout n'est que désolation, et tout ceci a un impact sur l'hydrologie de la région. Une première observation des débits semble démontrer une baisse du profil des cumuls mensuels, mais avec une réponse des débits de crues bien plus rapide. Plusieurs méthodes existent pour vérifier cette théorie. La première vise à utiliser un bassin voisin et similaire, comme bassin témoin, et de comparer les données de débits de ces deux bassins. Ainsi, l'écart entre les deux pourra être assimilé comme étant la conséquence de l'incendie. La seconde méthode tend à simuler, après calibrage, ce qu'auraient été les débits sans modification. De ce fait, aucun autre bassin est nécessaire. Cependant, un important nombre de données est indispensable pour le bon fonctionnement du modèle. La simulation exercée ici fait intervenir le modèle GR4J, modèle de Génie Rural à 4 paramètres au pas de temps journalier. Grâce à ce modèle, les écarts de débits et les écarts de quantiles Q_{95} sont établis, et une relation avec la superficie du bassin incendié peut être mise en place. L'étude présentée ici est appliquée sur 4 bassins-versants du Var, dans le sud de la France. Les simulations semblent confirmer la première relation, qui exprime une diminution des cumuls de débits, mais également la relation avec le quantile. Ces résultats peuvent être approfondis par des études complémentaires sur la végétation ou encore la nature des sols.

Mots clés : Hydrologie, Feux de forêts, Simulation, Prévision

Abstract

Every year, on any seasons, forest from all around the world are touched by fires. When they are under control, the land is nothing else than desolation, and all of this have consequences on the hydrology of the region. The first observation that can be made is about a decrease of the monthly accumulated flow, but with an increasing response of higher values of the floods. Then, it exists many ways to study these consequences. The first one consists to use another close and similar basin, and to compare the results of flow variation between them. the second method simulate, after a calibration period, these flows if no modification was brought to the basin. Thanks to this, no other basin is needed, but it's a necessity to have a huge quantity of data. In this case, the GR4J model is used, model with 4 parameters with a daily time step. With it, it's possible to define the variations of flow and the variation of the quantile Q_{95} , in the study of the forest fires. The result of this study, leaded in the Var, in the South of France, have highlighted a relationship between these variations and the areas burnt. But all of this can be completed by another study of the vegetation or the ground composition

Key words : Hydrology, Forest fires, Simulation, Forecasting

I. Introduction

Chaque année, des millions d'hectares de forêts sont en proie aux flammes. Des incendies ravageurs qui touchent de nombreux pays du globe, la plupart du temps impuissants face aux flammes destructrices. L'exemple le plus récent et le plus marquant reste l'impressionnant nombre de départs de feux recensés au Brésil depuis le début de l'année (79 513 au total), ce qui reste loin de la surface incendiée en Sibérie, avec ses 13 millions d'hectares parties en fumée. Une fois ces incendies maîtrisés, tout n'est que désolation sur les territoires touchés par ces catastrophes naturelles. Bien que l'incendie lui-même mette en danger des milliers d'habitations et de citoyens, cela ne s'arrête pas là. En effet, des scientifiques tendent à croire que de tels phénomènes d'une extrême violence peuvent avoir de graves conséquences sur l'hydrologie d'une région.

Pour comprendre les impacts d'un changement - tel qu'un feu de forêt - sur un bassin versant, il est important de comprendre le fonctionnement du bassin lui-même. Le bassin versant est défini comme la surface déterminée par un point, appelé exutoire, tel que chaque goutte d'eau arrivant à l'exutoire est issue de la pluie tombée sur cette surface. Un bassin versant peut être assimilé à un réservoir. De ce fait, la réponse hydrologique d'un bassin soumis à des pluies est régie par deux fonctions : la fonction de production et la fonction de transfert. La fonction de production est définie comme estimant la pluie nette à partir de la pluie brute. La pluie nette correspond à une fraction de la pluie brute qui participe directement à l'écoulement. Autrement dit, cela correspond à la quantité de pluie qui va se retrouver dans l'écoulement d'une rivière, après avoir pris en compte l'infiltration et les transferts par évapotranspiration. La fonction de transfert quant à elle définit l'hydrogramme de crue et donc la répartition dans le temps de la pluie nette. Cette étude vise à déterminer si, grâce aux propriétés d'un incendie affectant un bassin versant, il est possible de définir et de quantifier les changements potentiels de la réponse hydrologique de ce même bassin versant. Cette étude sera menée au sein des bureaux de GéoAzur, à Sophia-Antipolis, dans le cadre du projet Interreg ADAPT, qui a pour objectif d'étudier le potentiel de la forêt méditerranéenne et du milieu péri-urbain afin de limiter les ruissellements pouvant conduire à des inondations.

Comme il a été dit précédemment, l'étude de ces impacts a déjà été évoquée lors de nombreux rapports scientifiques qui seront ici résumés. De ce fait, les différentes méthodes utilisées dans le cadre de ces études seront présentées, ainsi que les résultats concernant les cas d'incendie en forêt. Par la suite, la méthodologie développée de calage/simulation par un modèle pluie-débit sera présentée et les résultats de simulation sur 4 bassins versants français ayant été touchés par des incendies seront comparés aux conclusions faites par les autres études scientifiques. Enfin, une relation entre les propriétés des incendies et les changements hydrologiques constatée sera recherchée.

II. Etat de l'art

2.1. Méthodes employées dans l'étude des changements physiographiques des bassins versants

2.1.1. Généralités

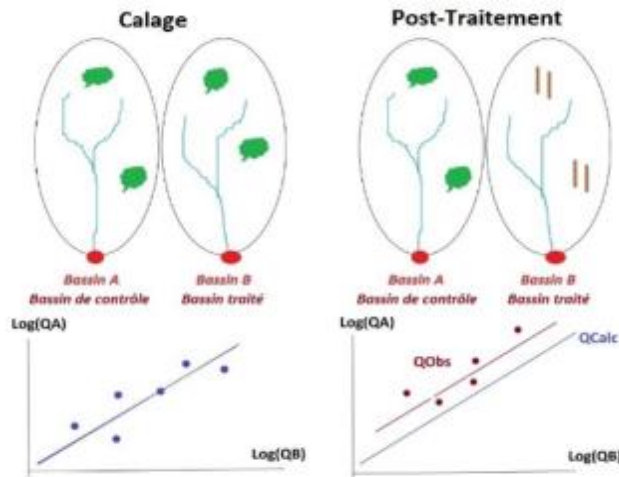
Les modifications qui peuvent être apportées sur un bassin versant sont diverses et variées. La cause peut être naturelle, comme des feux de forêts, ou artificielle comme par exemple dans les cas de déboisement ou d'inondations en amont des barrages. De ce fait, il est important de quantifier tout impact de tels changements du point de vue de l'hydrologie de la région. La première hypothèse qui peut être exposée est le fait que la présence de ces modifications va changer les profils hydrologiques du bassin, c'est-à-dire la quantité d'apport en eau du bassin, mais également la vitesse de réponse en cas de crues. De ce fait, une observation des débits sur une période suffisamment longue avant et après la modification devrait faire apparaître une « cassure » au niveau des débits observés. Cependant, afin de constater et quantifier un réel impact, il est nécessaire de se focaliser sur des indicateurs plus spécifiques tels que les quantiles de débits. Pour cela, il est possible de comparer les quantiles observés après modification avec des quantiles qui seront simulés par un modèle (qui sont supposés être ceux que l'on aurait observé sans changement d'occupation du sol), soit par l'utilisation des débits d'un bassin voisin, qui sera alors considéré comme un bassin de référence (Lavabre *et al.*, 1996).

2.1.2. Méthode Débit-Débit

Une des méthodes visant à étudier les impacts de changements sur un bassin versant est l'utilisation d'un autre bassin versant, voisin du bassin étudié. Cette méthode est appelée la méthode Débit-Débit. Ces deux bassins doivent être similaires du point de vue de la position géographique, c'est-à-dire proche l'un de l'autre afin d'avoir des propriétés climatiques semblables, que du point de vue de la morphologie, c'est-à-dire que la superficie du bassin, sa topographie les types de sols et leurs occupations sont similaires. Le fait d'avoir des propriétés similaires permet la comparaison des deux bassins, du fait de leurs similitudes en termes de débits. Le premier bassin, est le bassin dit de référence. Aucune modification n'y est observée. Le bassin d'étude correspond alors au second bassin, qui lui aura subi des transformations. Ainsi, si aucune modification n'est appliquée au bassin de contrôle, les débits qui y sont observés sont utilisés comme référence au bassin d'étude, dans le cas où il n'aurait subi aucun changement. Une comparaison peut alors être réalisée sur le bassin d'étude (Cosandey *et al.*, 2005).

Dans le cas de l'étude de changements sur un bassin, deux périodes sont identifiées : la première correspondant à la période précédant le changement, et la seconde à la suite du changement. Dans toutes les études menées, un calibrage est effectué sur la période précédant le changement, ce qui va amener à une quantification des impacts sur la seconde période. Dans le cas de la comparaison de bassins, une relation de corrélation est établie sur la période de calage, ce qui permet d'établir un modèle de débits qui auraient été observés si aucune modification n'avait été observée. La

Figure 1 présente le principe de cette modélisation (Viatgé, 2013).



Une relation mathématique est alors établie, liant les deux bassins selon l'équation suivante :

$$\ln(Q_A(j)) = \beta * \ln(Q_B(j + \gamma))^\alpha$$

Figure 1 : Représentation du modèle Débit-Débit (Viatgé, 2013).

De cette équation, les paramètres à définir sont donc α , β et γ , tous trois sans unité. Cette équation, bien que simple, permet d'obtenir des résultats très cohérents, parfois meilleurs qu'avec une simulation, utilisant des outils de modélisation plus complexes. Ceci s'explique par le fait que la simulation fait intervenir des paramètres tels que la température ou encore l'évapotranspiration, afin de simuler sans aucune référence ce qu'auraient été les débits sans modification, tandis que la méthode débit-débit met simplement en relation deux bassins similaires et se base sur les résultats du bassin de référence, c'est-à-dire sur des résultats concrets, pour définir les débits du bassin d'étude sans modification (Andréassian, 2012).

Ainsi, l'écart entre les débits observés et ceux simulés permet d'interpréter et de quantifier l'impact de changements physiographiques d'un bassin versant sur son hydrologie (Folton *et al.*, 2015). La

Figure 1 illustre l'application de cette méthode. Deux bassins similaires du point de vue de leurs propriétés sont sélectionnés. Par la suite, la relation entre les débits des deux bassins est mise en évidence. Enfin, après l'application d'un changement d'état des sols sur le bassin d'étude (feu de forêt ou déboisement par exemple), et grâce à la relation définie précédemment, l'écart entre les débits observés et ceux calculés dans le cas où il n'y a aucune modification du bassin peut être effectuée.

2.1.3. Méthode Pluie-Débit

L'autre méthode très utilisée sur l'ensemble des bassins du globe est la modélisation Pluie-Débit. Cette méthode, à partir d'un calibrage exercé sur la période précédant la modification, va simuler les débits qui auraient été observés sur la période suivant les changements si rien n'avait été apporté au bassin. Cette simulation sera établie via des données climatiques (précipitations, température et évapotranspiration potentielle) de la région. De la même façon que la méthode précédente, différentes périodes sont définies : la période d'initialisation correspondant généralement à la première année de données, puis la période de calage allant jusqu'à l'année de modification, et enfin la période de simulation (Salavati *et al.*, 2016). Lors de la période de calibrage, le processus de calage des paramètres vise à définir le meilleur jeu de paramètres. Afin de déterminer la performance du jeu de paramètres, des critères d'évaluation sont utilisés. Pour cela, 3 méthodes peuvent être appliquées, présentées en Figure 2.

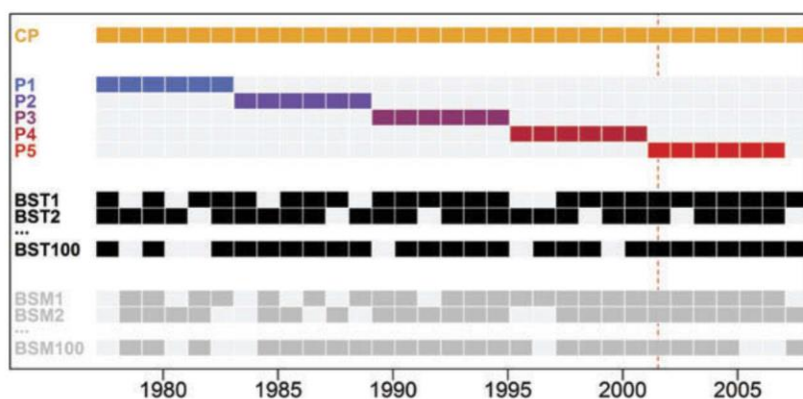


Figure 2 : Périodes de calibrage (Brigode *et al.*, 2015).

La première consiste à considérer l'ensemble de la période précédant le changement comme une seule période, période CP (Complete Period). La seconde méthode vise à diviser l'ensemble de la période précédant la modification apportée au bassin versant, en plusieurs sous-périodes, ici représentées par les périodes P1 à P5. De cette façon, un plus grand nombre de calibrages pourra être effectué et appliqué lors des simulations. Cette méthode permet donc un découpage inter annuel, où les sous-périodes sont composées d'années entières, mais également un découpage intra-annuel. Ceci permet alors de pouvoir différencier les variations climatiques visibles au cours d'une année, comme les différentes saisons par exemple (Zhao *et al.*, 2017). Enfin, la dernière méthode vise à sélectionner des périodes courtes (une année ou un mois par exemple) de manière totalement aléatoire parmi l'ensemble de la période pré-changement. Une série de taille N, chacune composées de n sous-périodes, est ainsi créé. Le but de cette méthode est similaire à l'utilisation de sous-périodes continues, c'est-à-dire de créer un important nombre de jeux de paramètres et donc, de faire le plus de calibrage et de simulation possible, afin d'avoir du recul sur les résultats des simulations.

Ainsi, grâce aux paramètres définis lors de cette période de calibrage, les débits qui auraient été observés si aucune modification n'avait été apportée au bassin sont simulés. Dans un premier temps, une analyse des débits résiduels peut être menée. Elle est définie comme la différence entre les débits observés et les débits simulés (Viatgé, 2013). Un débit résiduel positif impliquerait alors une augmentation de la ressource en eau, due aux modifications apportées au bassin. Dans le cas contraire, un débit résiduel négatif signifierait une baisse de la disponibilité de la ressource en eau. Cette analyse, bien que succincte, permet d'avoir un premier aperçu des changements constatés. Afin d'obtenir une réelle quantification des impacts sur un bassin versant, la seule observation de débits ne suffit pas. Cette quantification peut être apportée par l'étude des quantiles Q_{05} , Q_{95} , correspondant respectivement aux débits dépassés 95% et 5% du temps, et du débit médian Q_{50} (Andréassian, 2012). Finalement, dans le but de représenter les impacts sur les débits de crues, une comparaison des débits pour des périodes de retour importantes (par exemple la crue de période de retour 100 ans) peut être menée pour chaque période de calage définie auparavant.

2.2. Résultats obtenus dans le cadre de feux de forêts

Les méthodes évoquées précédemment peuvent être appliquées à différents cas d'études, comme par exemple l'urbanisation d'une zone (Brigode et Oudin, 2016), ou encore l'étude du déboisement d'une forêt. Certains scientifiques, tels que Lavabre (1996), Cosandey (2005) ou encore Folton (2015) se sont intéressés au cas des incendies en forêts et de leurs impacts sur l'hydrologie des bassins versants. Lavabre (1996) effectue une première analyse des paramètres des modèles GR2M et GR3J sur les différentes sous-périodes retenues, sur le Réal Collobrier dans le Var (France). La suite de cette étude amène à la comparaison des débits observés avec ceux simulés dans le cas où l'incendie n'aurait pas eu lieu. Sur les 3 années qui suivent cet incendie, l'écart est nettement positif, impliquant que les débits observés sont plus importants. Cosandey (2005), au travers de sa propre étude, en arrive à la même conclusion, avec une estimation de débit additionnel de 15%. Cependant, Folton (2015) explique que l'utilisation de pas de temps trop grands, que ce soit annuel, mensuel ou même journalier, ne permet pas une réelle quantification de l'impact de l'incendie. Selon elle, l'étude des débits de crue et d'étiage est nécessaire via l'utilisation de FDCs (Flow Duration Curves) dans le cadre de la méthode Débit-Débit, qui vise à étudier les écarts de débits pour une même période de retour, ou encore grâce aux quantiles dans le cas de la modélisation Pluie-Débit. L'application de cette méthodologie a amené Lavabre (1996) à la conclusion que des modifications sur la phase de transfert sont sensiblement notables. L'analyse des crues a relevé une augmentation importante des écoulements. Finalement, les études menées sur différents bassins versants touchés par des incendies semblent avoir les mêmes interprétations : l'absence de végétation due à l'incendie impliquerait un apport en eau supplémentaire, du fait de l'absence de captage par les plantes et des différences d'infiltration ; l'étude des pics de crues

témoigne d'une accélération de l'écoulement due à la création ou la réactivation de rigoles de drainage et à la diminution de la rugosité. Ainsi, les deux fonctions de l'hydrologie (fonction de production et fonction de transfert) sembleraient être sensiblement impactées par l'incendie. Folton (2015), dans son étude sur le Réal Collobrier, arrive aux mêmes conclusions.

En revanche, bien que ces différentes études tendent vers la même conclusion, Cosandey (2005) critique ce résultat en affirmant que dans son étude, seule la station du Rimbaud (Var, France) a été utilisée, alors que lorsque d'autres stations mises en place autour du Réal Collobrier sont prises en compte dans l'étude, les augmentations de débits observées auparavant restent présentes, mais sont bien moins importantes. Cela peut être expliqué par le fait qu'une seule station est utilisée et que celle-ci se situe dans la zone incendiée et il est donc possible que celle-ci ait été endommagée. De la même façon, les études menées par Coron et al. (2012) démontrent les risques engendrés par l'utilisation de multiples périodes de calibrage sur des périodes climatiques contrastées. Cette conclusion résulte d'une étude menée sur 216 bassins versants australiens, sur lesquels l'estimation des débits varie en fonction des conditions climatiques. Ainsi, l'utilisation de différentes sous-périodes de calibrage peut amener des erreurs de prédictions dans la mesure où les conditions climatiques peuvent évoluer d'une année à l'autre (exemple d'une année de sécheresse intense). C'est pourquoi Folton (2015), dont l'étude s'est portée sur une période de sécheresse suivant l'incendie, explique que ce choix d'étude peut avoir impacté sa période de calibrage. C'est notamment le cas lors de l'application du modèle Débit-Débit, qui intègre moins de paramètres que le modèle Pluie-Débit, et donc, qui peut altérer sa précision.

Plusieurs méthodes ont ici été évoquées de manière succincte. Bien qu'elles soient très performantes, chacune d'elles se voit limitée par leur environnement. En effet, le modèle Débit-Débit permet une simulation simple, du fait de l'utilisation de données réelles relevées sur un bassin similaire. Cependant, cette application nécessite la présence d'un second bassin, suffisamment semblable au bassin d'étude pour que les résultats soient des plus précis. C'est cet aspect de dépendance qui fait la force du modèle Pluie-Débit, qui ne nécessite aucun autre bassin. Cependant, ce modèle nécessite un plus grand nombre de données, avec donc une période de calibrage et de simulation suffisamment longue. En se basant sur les données disponibles sur le bassin avant et après l'incendie, ce modèle permet l'obtention d'une simulation fidèle en estimant, après un calibrage, ce que seraient les débits. Mais cette performance est également limitée par les paramètres intégrés et la complexité de modéliser tel ou tel bassin versant. Certaines de ces méthodes vont être utilisées au cours de l'étude menée sur la quantification de l'impact des incendies sur les bassins versants, et ces méthodes seront alors expliquées plus en détail. De plus, une comparaison avec les études déjà menées sur d'autres cas d'incendie sera réalisée afin de déterminer si les conclusions obtenues sont applicables à d'autres cas d'étude.

III. Présentation de la méthode utilisée

Comme présentées dans l'état de l'art, plusieurs méthodes existent quant à l'étude de l'impact d'un changement sur un bassin versant. Chacune travaille sur une modélisation des débits du bassin modifié, puis à une comparaison de ces résultats avec les débits observés. L'étude se concentrant sur des bassins français, les données peuvent être collectées à partir de la Banque HYDRO (<http://hydro.eaufrance.fr/>). Du fait de cette accessibilité aux données, mais surtout de leur disponibilité, il est préférable d'utiliser la méthode pluie-débit, afin d'élargir l'étude à différents bassins versants, et de ce fait, d'obtenir un résultat plus précis encore qu'avec l'application du modèle débit-débit sur un seul bassin versant.

3.1. Modèle utilisé

Dans le cadre de cette étude de l'impact des feux de forêts sur l'hydrologie des bassins versants, la méthode de simulation par application du modèle de Génie Rural à 4 paramètres au pas de temps journalier (modèle GR4J), sera utilisée (Perrin *et al.*, 2007). Ces modèles GR ont été développés par le Cemagref, maintenant appelé Irstea, dès le début des années 80, dans le but de fournir un outil et une aide à l'ingénierie dans la gestion de la ressource en eau, mais également dans la prévention de catastrophes naturelles telles que les crues ou les dimensionnements d'ouvrages. Ils permettent également d'obtenir une approche empirique des liens entre la pluie et les écoulements, le tout en proposant une représentation globale du bassin versant. Enfin, la force de ce modèle se traduit au travers de sa capacité d'application à un ensemble varié de bassin versant partout dans le monde.

Tout ceci est possible grâce à la mise en place d'une triple globalisation du système du bassin versant. La première globalisation concerne le processus. Les relations ayant lieu au sein du bassin versant sont présentées de façon simplifiées, empiriques et sans lien direct avec la physique des processus à petite échelle. La seconde globalisation concerne l'espace. Cela se traduit par la considération d'un bassin versant comme un ensemble, tout en reconnaissant l'aspect hétérogène qui le compose. Autrement dit, c'est le comportement de la moyenne spatiale qui est étudié en priorité. C'est-à-dire que sur chaque paramètre du bassin, que ce soit la pente ou la rugosité, c'est la moyenne qui sera prise en compte. Finalement, la dernière globalisation concerne le temps. Les différents modèles travaillent sur des moyennes, donnant ainsi des pas de temps horaires, journaliers, mensuels ou annuels. Plus le pas de temps est long, plus la structure du modèle sera simplifiée.

3.2. Critère de calibrage

Dans le cas de cette étude des impacts des incendies, le modèle GR4J sera utilisé. La Figure 4 représente le schéma d'exploitation du modèle GR4J. Ce modèle est donc défini par 4 paramètres au pas de temps journalier. Les 4 paramètres sont :

- **X1** (mm) qui correspond à la capacité du réservoir de production ;
- **X2** (mm/jour) est le coefficient d'échanges souterrains ;
- **X3** (mm) correspond à la capacité à un jour du réservoir de routage ;
- **X4** (jours) est le temps de base de l'hydrogramme unitaire HU1.

Ces 4 paramètres seront à définir lors du calibrage du modèle. La sélection de ces paramètres, ainsi que la simulation qui suit le calibrage peut être appliqué via R (2018, <http://www.r-project.org/>), avec l'aide des packages airGR (Coron *et Al.*, 2017), (<https://webgr.irstea.fr/logiciels/airgr/>) et airGRteaching (Delaigue *et al.*, 2018), (<https://webgr.irstea.fr/en/software/airgrteaching/>), développés par les équipes d'Irstea.

3.3. Périodes de calibrage

La période complète de disponibilité des données peut être découpée en 3 parties, représentées en Figure 3. Dans un premier temps, une période d'initialisation est nécessaire. Cette période correspond généralement à la première année de données disponible. Cela permet de définir la valeur des variables d'état du modèle au démarrage d'une simulation ou d'une prévision. Suite à cette initialisation, vient la période de calibrage. Pendant cette phase, une multitude de jeux de paramètres est testée afin d'en retenir le plus performant. L'intervalle utilisé pour ce calibrage correspond généralement à la fin de l'initialisation jusqu'à l'année du changement (ici l'incendie). Le critère qui est utilisé afin d'évaluer les performances du calibrage, et qui sera utilisé par la suite pour les performances de la simulation, est le critère de Nash et Sutcliffe (NSE) Nash et Sutcliffe, 1970). Ce critère est défini selon l'expression suivante :

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - Q_0^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - \bar{Q}_0)^2}$$

où Q_m^t (en mm) correspond aux débits simulés à l'instant t , Q_0 (en mm) correspond aux débits observés. Ce critère peut prendre les valeurs allant de 1 à $-\infty$. Un coefficient égal à 1 signifie que les simulations correspondent parfaitement aux observations. Si ce coefficient est égal à 0, cela implique que la simulation est aussi performante que la moyenne des débits observés. Enfin, pour un critère négatif, cela veut dire que la moyenne observée est plus performante que le modèle simulé.

	Initialisation	Calibrage							Simulation		
								Incendie			
Calibrage sur période continue		1979	1981	1983	1985	1987		1989	1991	1993	
Calibrage par sous-périodes successives											
		1979	1981	1983	1985	1987		1989	1991	1993	
Application de la méthode de Bootstrap											
		1979	1981	1983	1985	1987		1989	1991	1993	

Figure 3 : Représentation des différentes périodes du modèle GR4J et des méthodes de calibrage.

La Figure 3 montre également les différentes méthodes de calibrage qui seront utilisées lors de cette étude. La première méthode consiste à effectuer le calibrage sur l'ensemble de la période entre la fin de l'initialisation, jusque l'année de l'incendie. De ce fait, un seul critère NSE sera obtenu. La seconde méthode vise à établir des sous-périodes successives de calibrage. Grâce à cette méthode, autant de simulations sont réalisées qu'il y a de sous-périodes. Enfin, la dernière méthode consiste à produire une série de 100 calibrages, composées de 5 années tirées de façon aléatoire et non répétitive (Brigode *et al.*, 2015).

3.4. Simulation sur la période post-incendie et quantification des changements

Pour chaque période de calibrage, une fois les 4 paramètres sélectionnés de manière à ce que le modèle soit le plus performant possible, grâce aux données de précipitations et d'évapotranspiration,

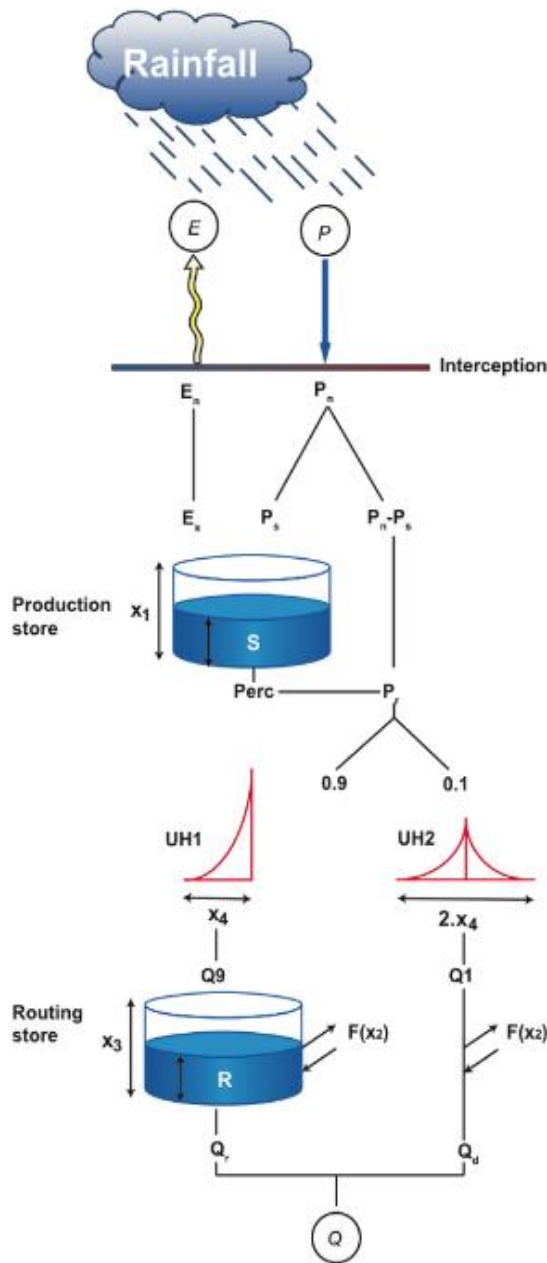


Figure 4 : Schéma du modèle de Génie Rural GR4J (<https://wiki.ewater.org.au/display/SD41/GR4J++SRG>). calibrage établi, grâce aux fonctions quantiles disponibles sur le logiciel.

une simulation sur la période post-incendie peut être réalisée. Cette simulation correspond aux débits qui auraient été observés dans le cas où aucun incendie n'avait ravagé le territoire du bassin versant.

Dans un premier temps, une comparaison visuelle peut être établie, ce qui apporte une première approche de l'impact qu'un incendie peut avoir sur l'hydrologie d'une région. Ensuite, un premier écart ΔQ est défini selon :

$$\Delta Q = \frac{Q_{obs} - Q_{sim}}{Q_{obs}} * 100,$$

Q_{obs} étant la moyenne des débits observés sur la période suivant l'incendie (en mm) et Q_{sim} la moyenne des débits obtenus par simulation sur cette même période (en mm également). Ensuite, afin d'obtenir une quantification de l'impact des feux de forêts sur l'hydrologie, il est nécessaire d'étudier les changements des débits exceptionnels. Une étude des quantiles Q_{95} , soit les débits dépassés 5% du temps, sera donc menée. Ces quantiles sont simplement obtenus, pour chaque

IV. Données utilisées

La France est régulièrement touchée par des incendies dévastateurs. L'étude menée ici sur les impacts des feux de forêts sera donc menée sur 4 bassins du Var, situés dans le sud de la France. Ces bassins ont été choisis du fait de leurs changements d'état des sols, lors des incendies. De plus, il est nécessaire que la surface incendiée soit suffisamment conséquente, afin que leurs impacts soient identifiables et visibles. Ces 4 bassins sont présentés sur la carte en Figure 5. L'ensemble des données de débits sont recueillies sur le site national de la banque HYDRO (<http://hydro.eaufrance.fr/>), plateforme sur laquelle les données de débits de plus de 5000 stations en France sont stockées. Le reste des données, à savoir les précipitations ou l'ETP, sont obtenues sur la base de données SAFRAN, fournies par le Centre national de Recherches Météorologiques (<http://www.umr-cnrm.fr/>).

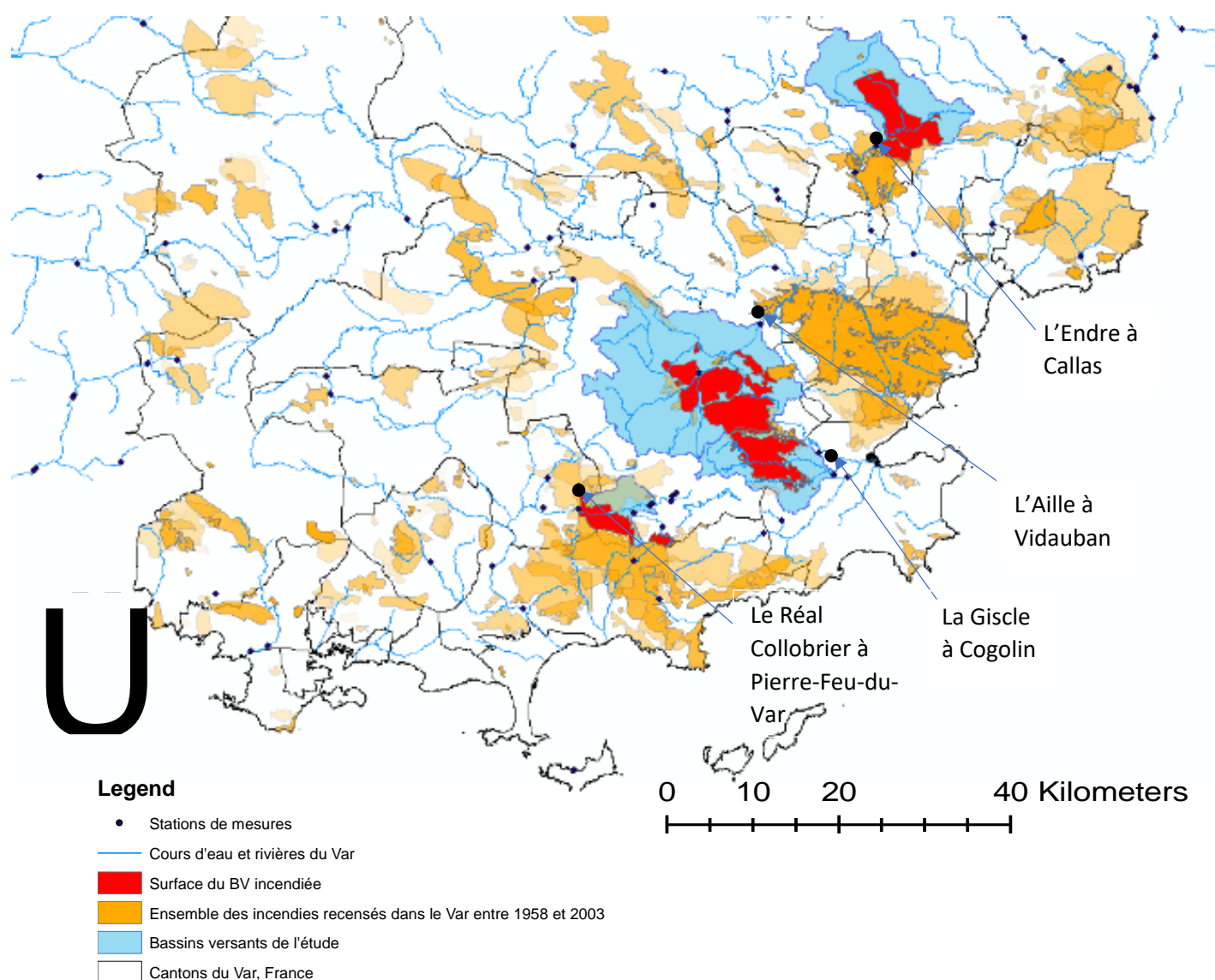


Figure 5 : Carte des bassins versants de la région étudiée (Var, France) et de ses incendies de 1958 à 2003.

Le premier bassin qui sera étudié ici est le bassin du Réal Collobrier à Pierre-Feu-du-Var (référéncé Y4615610). Les données pour ce bassin de 70.7 km² de superficie sont limitées par les données de débits disponibles, qui vont du 01 août 1966 au 31 décembre 1994. Cette région fut touchée par un incendie en 1990, qui brûla 10.8 km² du bassin, soit 15% de sa surface. Ensuite, le bassin de la Giscle à Cogolin sera également étudié (référéncé Y5424010). Les données disponibles de celui-ci vont du 1^{er} janvier 1986 au 31 mars 2010. En 2003, une superficie de 25.6 km² sur les 66 km² (surface totale du bassin) fut en proie aux flammes, ce qui représente 39% du bassin versant. Le troisième bassin de cette étude est le bassin de l'Aille à Vidauban (Y5215020). Ses données vont du 1^{er} août 1968 au 31 mars 2010. L'incendie de 1979 fut le plus important sur ce bassin, avec 46.6 km² de surface incendiée sur les 229.3 km² du bassin, ce qui représente 20%. Enfin, le dernier bassin de cette étude est celui de l'Endre à Callas (Y5305030), qui fait 103.2 km² de superficie. Les données à disposition vont du 1^{er} juillet 1971 au 31 octobre 1995. L'incendie de 1973 concerna 27% de la surface du bassin, soit 27.8 km². L'ensemble de ces données sont résumées en Annexe 1.

V. Résultats obtenus

Une fois les données récupérées, il est nécessaire de les mettre en forme afin de les rendre facilement lisible sur le logiciel sur lequel ils seront exploités, à savoir R.

5.1. Analyse graphique des débits mensuels

Une première observation peut être réalisée sur les débits mensuels. Les figures 6 à 9 représentent les débits mensuels des 4 bassins versants de l'étude, où la verticale rouge représente le mois de l'incendie. En ce qui concerne le bassin du Réal Collobrier, les faibles débits précédents l'incendie témoignent d'une période de sécheresse, certainement à l'origine de ce départ d'incendie. Bien que de manière générale les débits suivants l'incendie sont relativement plus faibles qu'avant, passant d'une moyenne de débits de 0.59 mm/mois pour la période précédant l'incendie, à 0.55 mm/mois sur la période suivante. De ce bassin versant, aucune hypothèse quant à l'impact des incendies sur l'hydrologie de la région ne peut être émise, du fait du peu d'information à disposition pour le moment. Concernant la Giscle à Cogolin, il est possible d'observer une baisse des débits sur la période post-incendie. Dans le cas présent, l'hypothèse qui peut en être déduite est que dans ce bassin versant, la présence d'un incendie semble provoquer une baisse des cumuls mensuels de débits, mais provoquerait également une réponse de crue bien plus rapide. La courbe représentant les débits mensuels du bassin de l'Aille à Vidauban sont similaires au bassin précédent. Sur la période précédant l'incendie, les cumuls semblent stables. De ce fait, les mêmes hypothèses qu'auparavant peuvent être appliquées ici. Enfin, les

données disponibles du bassin de l'Endre à Callas sont limitées sur la période pré-incendie, avec seulement 2 années de données. De ce fait, il est difficile d'émettre des hypothèses quant à un changement dans le profil des débits mensuels.

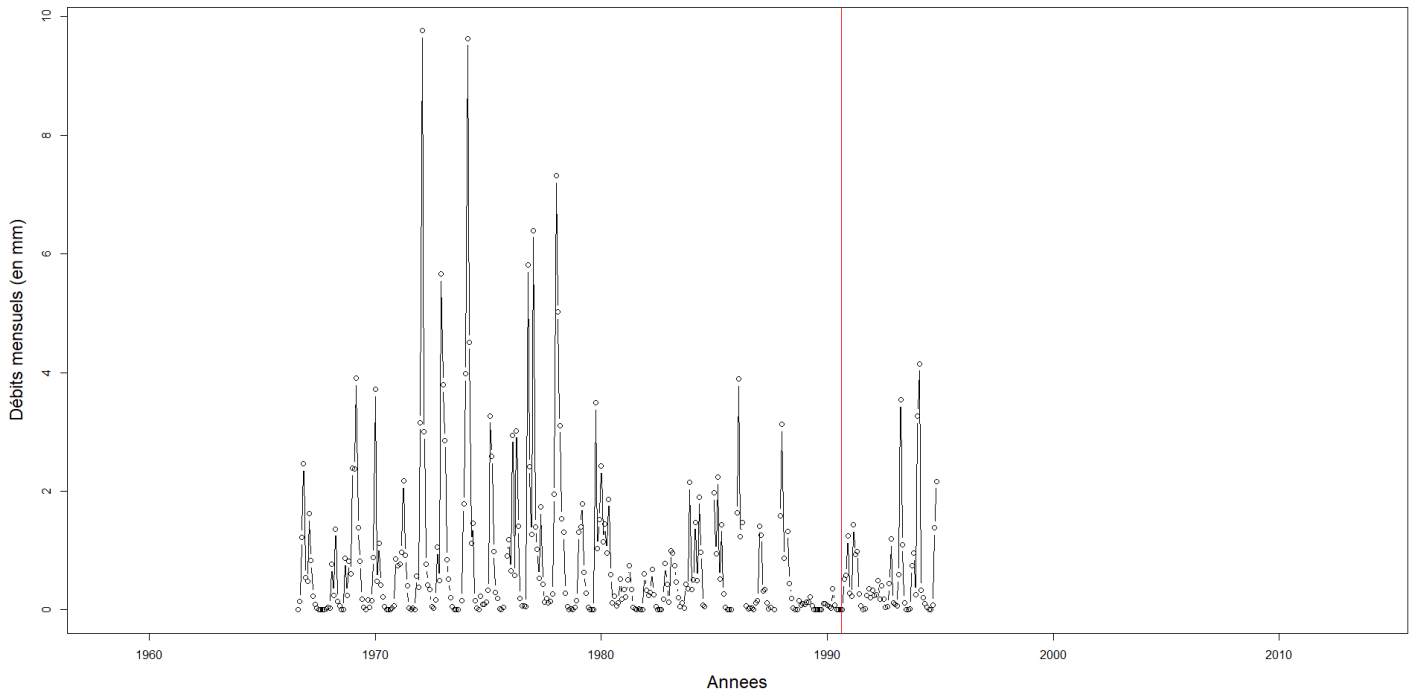


Figure 6 : Débits mensuels (en mm/mois) du Réal Collobrier à Pierre-Feu-du-Var.

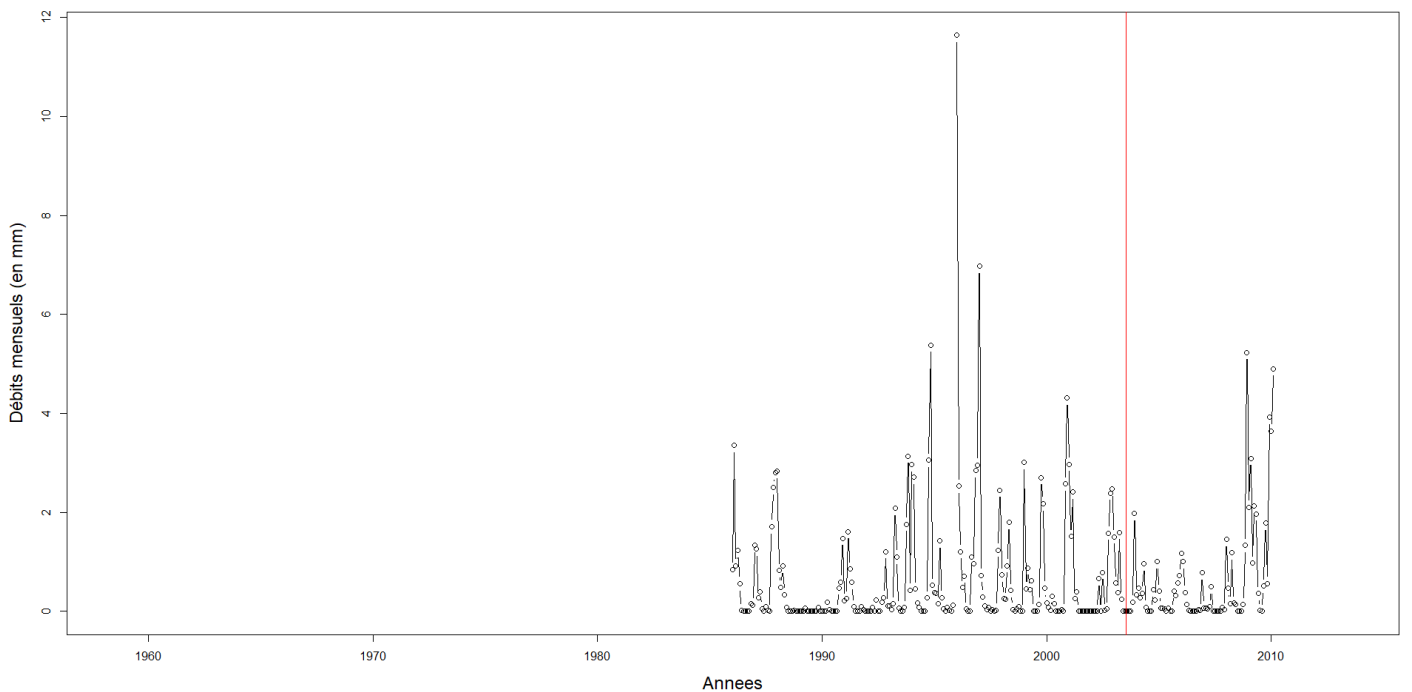


Figure 7 : Débits mensuels (en mm/mois) de la Giscle à Cogolin.

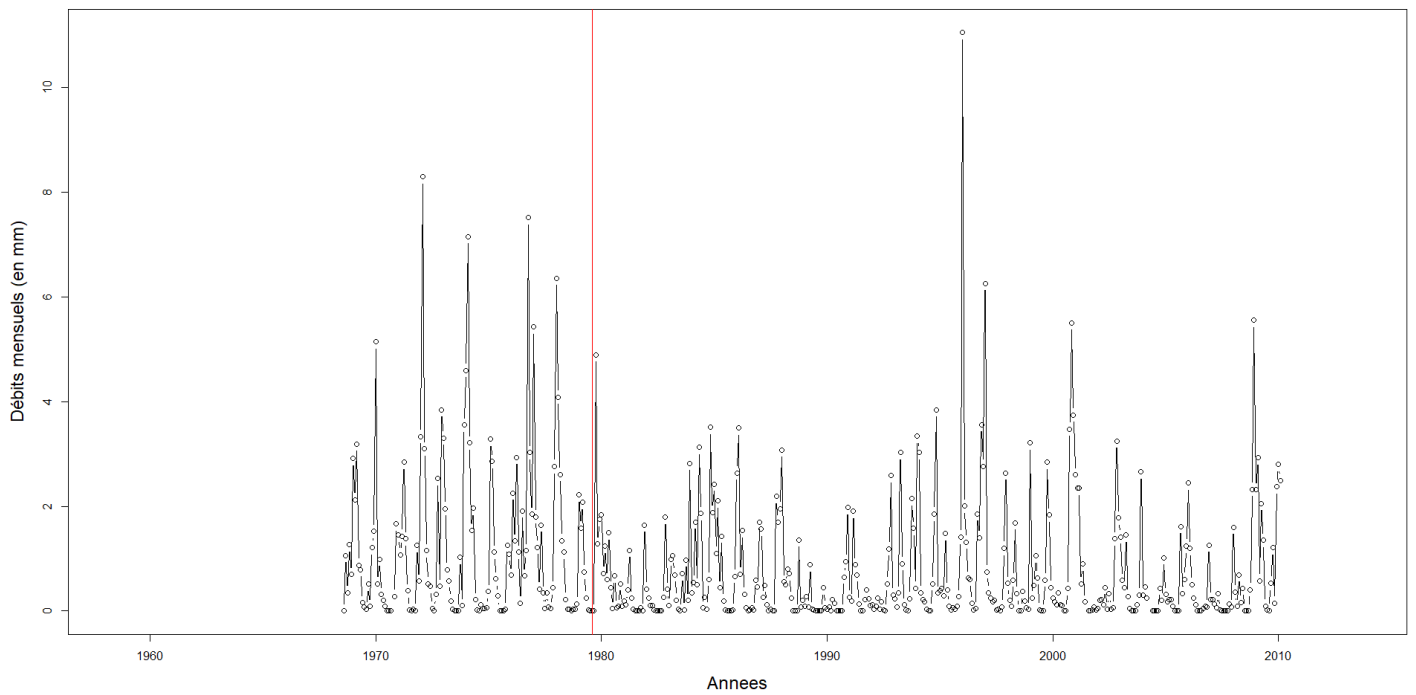


Figure 8 : Débits mensuels (en mm/mois) de l'Aille à Vidauban.

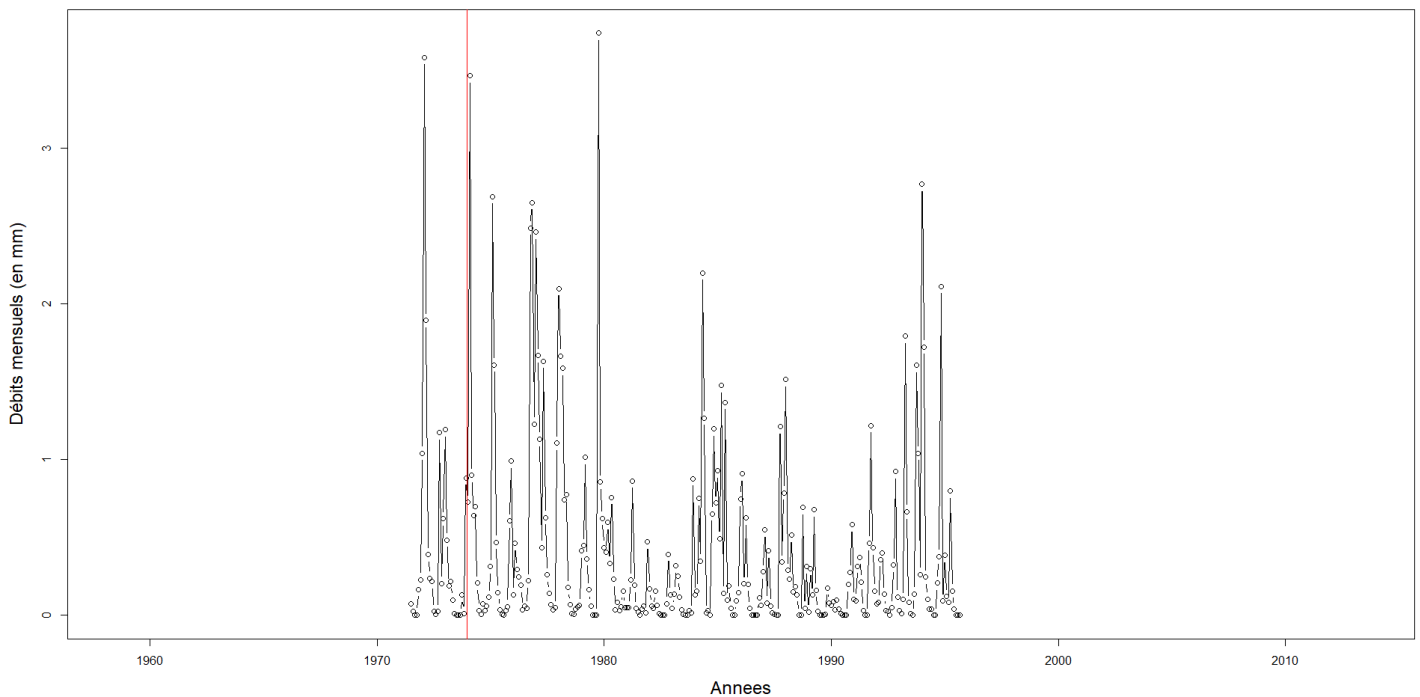


Figure 9 : Débits mensuels (en mm/mois) de l'Endre à Callas.

Finalement, la seule étude des débits mensuels ne permet pas de conclure quant à un changement dans les pics de crue. C'est ce qui sera étudié par la suite, avec le quantile Q_{95} .

5.2. Calibrage sur période continue

Suite à ces premières observations, il est possible d'effectuer les premières simulations en prenant l'ensemble de la période précédant l'incendie comme période de calibrage continue. Les critères NSE seront utilisés comme témoins de la performance de ces simulations. Les critères obtenus pour les 4 bassins de l'étude sont résumés dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Critères NSE pour un calibrage sur une période continue.

Réal Collobrier	La Gisle	L'Aille	L'Endre
0.6570	0.7166	0.7235	0.5224

Les critères obtenus pour les 3 premiers bassins étant supérieurs à 0.6, il est possible d'en conclure que la simulation présente de très bonnes performances. Le NSE de valeur 0.5224 sur le bassin de l'Endre à Callas peut s'expliquer par le manque de données disponibles pour le calibrage sur la période pré-incendie. Ensuite, l'exploitation de cette simulation amène à l'étude des écarts entre les débits moyens journaliers observés et ceux simulés. Ces résultats sont présentés dans le Tableau 2

Tableau 2 : Ecart de débits entre la simulation et les observations et rapport avec le pourcentage de superficie incendiée.

	Réal Collobrier	La Gisle	L'Aille	L'Endre
% du bassin incendié	15	39	20	27
ΔQ	-6.03	-3	-6.99	-10.8
$\Delta Q/\%$	-0.402	-0.077	-0.3495	-0.4

Mis à part les résultats de la Gisle qui sont plus faibles que les autres, les 3 autres bassins versants semblent vérifier le lien existant entre les écarts de débits et le pourcentage de superficie incendiée sur le bassin versant, avec un coefficient moyen de -0.38. Ceci implique que les débits moyens simulés sont plus importants que les débits observés, et donc cela confirme la première hypothèse, qui exprimait le fait que la présence d'un incendie diminuait les débits moyens annuels.

5.3. Calibrage par sous-périodes successives

De la même façon, les performances des calibrages par sous-périodes successives nécessitent l'utilisation du critère NSE. L'observation des variations de valeurs obtenues justifie l'utilisation de cette méthode. En effet, l'exemple du Réal Collobrier, dont les critères NSE sont présentés en Tableau

2, démontre bien la variation de performance qu’il est possible d’obtenir en fonction du calibrage qui est réalisé. Les résultats des autres bassins versants sont présentés dans les annexes 2 à 4.

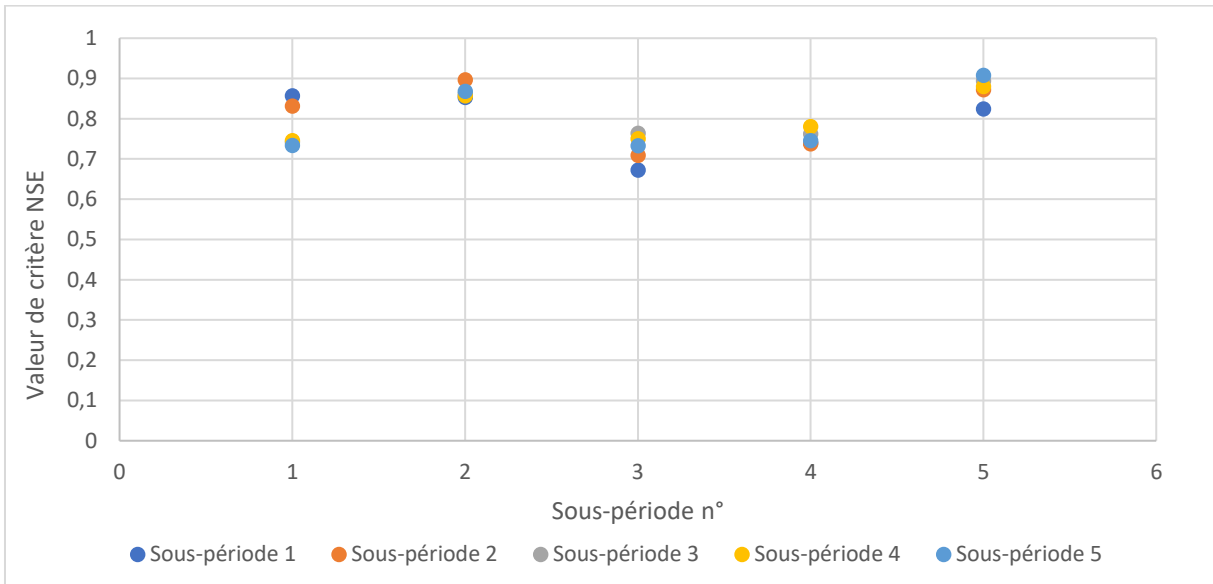


Figure 10 : Critères NSE pour un calibrage et une simulation sur les 5 sous périodes précédents l’incendie sur le bassin du Réal Collobrier à Pierre-Feu-du-Var.

Par la suite, la méthode de calibrage par « bootstrap » est appliquée. De cette façon, 100 tirages sans remise de 5 années parmi l’ensemble des années présentant des données, sont effectués. De la même manière que la méthode précédente, les 100 calibrages sont appliqués à la simulation sur les 5 sous-périodes successives définies précédemment, évaluées par 100 critères NSE chacune. Le résultat de cette première simulation, qui permet de définir les performances de ce modèle est présenté dans la Figure 11.

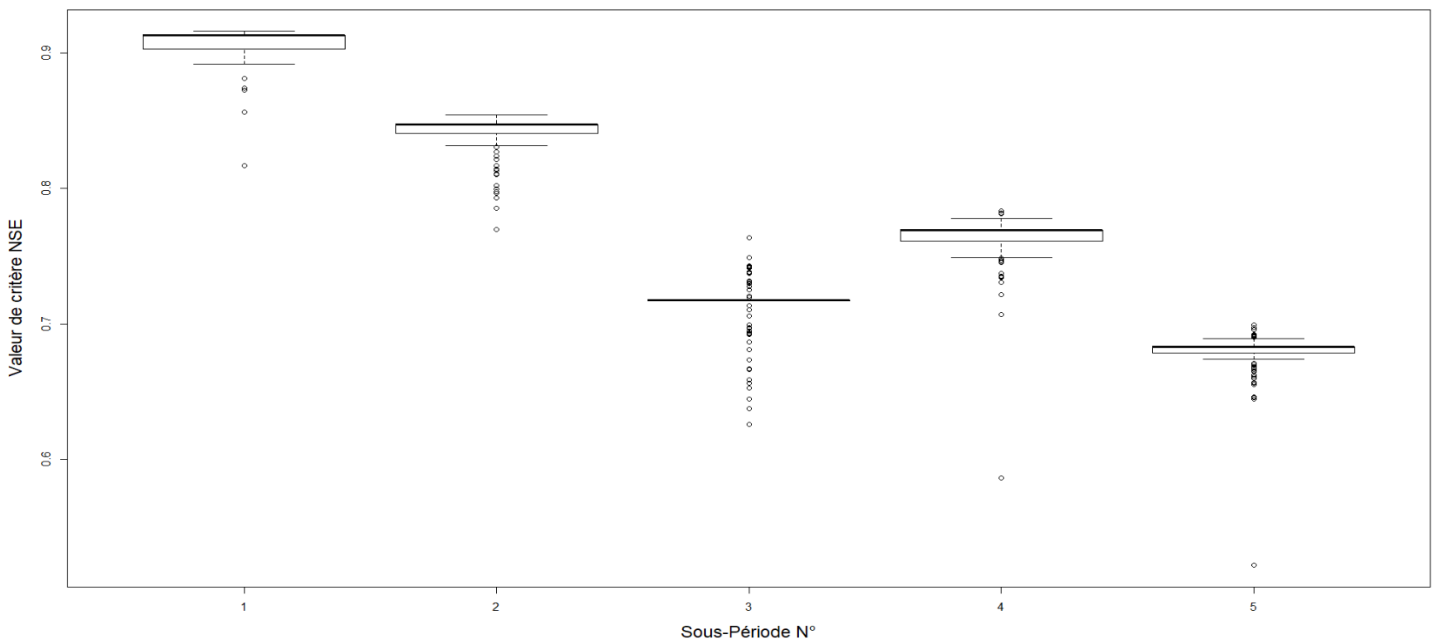


Figure 11 : Critères NSE du calibrage pas bootstrap sur le bassin du Réal Collobrier à Pierre-Feu-du-Var.

Les résultats de l'Aille à Vidauban sont présentés dans Annexe 5. Par ailleurs du fait du faible jeu de donnée disponible sur la période pré-incendie pour le bassin de l'Endre à Callas, une sélection de 5 années n'est pas possible. De ce fait, 100 tirages de 5 mois peuvent être réalisés, mais ne seront cependant pas présentés dans ce rapport.

Finalement, de l'ensemble de ces simulations, il est possible de définir les quantiles pour les débits observés, ainsi que ceux produits par le modèle. De ces résultats en découle un écart puis une relation par rapport à la superficie du bassin qui fut incendié. Ces résultats sont présentés dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Récapitulatif des écarts de quantiles et mise en relation avec le pourcentage de bassin incendié.

	Réal Collobrier à Pierre-Feu-du- Var	La Giscle à Cogolin	L'Aille à Vidauban	L'Endre à Callas
Superficie du BV incendié (en %)	15	39	20	27
ΔQ_{95} pour un calibrage continu (en %)	-2.15	15.3	6.88	13.2
ΔQ_{95} pour un calibrage par sous-périodes (en %)	-2.13	-18.6	19	-107
ΔQ_{95} pour un calibrage par méthode bootstrap (en %)	-3.13	-34.5	23.5	
ΔQ_{95} moyen (en %)	-2.47	-12.6	16.5	-46.9
Rapport de ΔQ_{95} et de superficie incendié	-0.1647	-0.323	0.823	-0.1737

Les résultats des bassins du Réal Collobrier, de la Giscle et de l'Endre présentent des valeurs, bien que différentes, dans le même ordre de grandeur (-10^{-1}). Ces résultats indiquent une proportionnalité entre le pourcentage de superficie de bassin incendié et une augmentation des débits dépassés 5% du temps.

En revanche, le bassin de l'Aille semble présenter une toute autre conclusion, avec dans ce cas une proportionnalité entre l'incendie et une diminution des quantiles Q_{95} .

5.4. Discussion

La méthode qui a été employé pour définir et quantifier les impacts des feux de forêts sur l'hydrologie des bassins versants est basée sur une simulation des débits qui auraient été observés, si une partie de la superficie du bassin n'avait pas été brûlée. De ce fait, les résultats obtenus sont basés sur un calibrage qui est réalisé sur une période plus ou moins courte, en fonction de la disponibilité des données. Ceci implique dans un premier temps que la simulation obtenue, bien que non-aberrante, peut présenter des erreurs qui peuvent influencer les résultats finaux. Cet aspect est visible au travers des variations de valeurs des critères NSE qui traduisent la performance du modèle, où il est possible d'observer parfois des valeurs de critère négatives, qui impliquent que le modèle défini par la moyenne des débits observés est meilleur que la simulation produite.

De plus, compte tenu du temps nécessaire pour une étude complète et du temps mis à disposition pour la réaliser, toutes les possibilités de résultats n'ont pas été étudiés. En effet, pour la méthode de calibrage par sous-périodes successives, une réduction de chaque sous-période et donc une augmentation de leur nombre permettrait un plus grand nombre de simulations, et donc un résultat plus précis. Il en est de même pour la méthode bootstrap, où seulement 100 tirages ont été réalisés, sur des pas de temps annuels. Une augmentation du nombre de tirages par une réduction du pas de temps permettrait à nouveau l'obtention d'un résultat plus précis.

Cependant, les résultats obtenus ne sont pas si mauvais. Sur les 4 bassins, 3 d'entre eux présentent des résultats similaires quant à une relation de proportionnalité entre la superficie incendiée et une augmentation du quantile Q_{95} . L'écart entre ces 3 résultats et celui de l'Aille à Vidauban est très certainement dû à une erreur dans les données, dans les calculs ou encore dans la simulation, car étant donné que ces 4 bassins sont localisés dans la même région (département du Var, France), les résultats devraient être similaires pour les 4 bassins. Ceci est illustré également par le fait que dans l'étude du rapport entre les écarts des débits moyens et les paramètres de l'incendie, c'est le bassin de la Giscle à Cogolin qui présente des résultats différents des 3 autres.

Conclusion

Plus les années passent et plus le monde se voit confronté à de nombreuses catastrophes naturelles. Certaines d'entre elles sont naturelles, telles que les séismes, qui eux même donnent naissance à des vagues dévastatrices, les tsunamis. D'autres peuvent avoir comme origine le développement humain, tel que l'urbanisation. Mais que la cause soit naturelle ou humaine, les départs d'incendie se font de plus en plus fréquents dans toutes les régions du monde. Ces feux de forêts, bien qu'eux-mêmes dévastateurs, peuvent aussi être la cause de bien d'autres catastrophes, à l'échelle des cours d'eau et des bassins versants. Cette étude vise à quantifier les impacts de ces feux de forêts sur l'hydrologie de la région incendiée.

Cette problématique a déjà fait l'objet de nombreuses recherches scientifiques, par l'application de différentes méthodes. La première, appelée modèle débit-débit, vise à comparer 2 bassins versants voisins et similaires du point de vue de leur morphologie. L'un des 2 bassins subit des modifications de l'état de ses sols, tandis que l'autre, appelé bassin de contrôle, reste tel qu'il est. Une comparaison des débits de ces deux bassins permet l'élaboration d'une relation entre la modification et l'évolution des débits. L'autre méthode ne nécessite aucun autre bassin. Une simulation des débits qui auraient été observés sans modification est obtenue puis comparée aux débits réels, après incendie. C'est cette méthode qui est appliquée dans cette étude, par le biais des modèles de Génie Rural (GR), à 4 paramètres au pas de temps journalier. Ce modèle est nommé GR4J. Pour ces simulations, il est nécessaire de calibrer le modèle sur des périodes précédentes l'incendie. 3 méthodes ont ici été appliquées, à savoir la méthode pas calibrage continu, l'utilisation de 5 sous-périodes successives, ou encore la méthode bootstrap, qui vise à définir 100 tirages de 5 années pour le calibrage. L'ensemble de ces méthodes est évalué par le critère de Nash, aussi appelé NSE. De ces simulations, un rapport entre les écarts des débits moyens et la superficie du bassin qui fut incendié, ainsi que le rapport entre les écarts de quantiles Q_{95} et cette même superficie est défini.

Sur les 4 bassins utilisés pour l'études, à savoir le Réal Collobrier à Pierre-Feu-du-Var, la Giscle à Cogolin, l'Aille à Vidauban et l'Endre à Callas, 3 d'entre eux présentent un rapport similaire entre les écarts de débits moyens, entre la simulation et l'observation, et la superficie incendiée, avec une moyenne de -0.38 mm/mois, ce qui démontre la présence d'une proportionnalité entre ces deux paramètres. De la même façon, l'étude des écarts de quantiles et du pourcentage du bassin brûlé indique une proportionnalité entre ces paramètres, avec un coefficient d'ordre de grandeur 10^{-1} . Le fait que les deux bassins qui présentent des résultats différents exprime une erreur au niveau des calculs, ou de la simulation.

Finalement, cette étude a démontré que la présence d'un incendie provoque une diminution des débits moyens mensuels. De plus, l'étude du quantile Q_{95} démontre l'influence de l'incendie sur les débits

importants, en les augmentant de manière proportionnelle à la superficie du bassin touché, selon un coefficient moyen de -10^{-1} .

Par ailleurs, l'étude qui a été menée ici peut être approfondie, notamment par l'application de d'autres méthodes d'analyse, telle que la méthode débit-débit, mais également en étudiant les résultats obtenus sur d'autres bassins du monde, comme par exemple dans le cadre de l'étude des incendies exceptionnels survenus cette année en Sibérie ou encore en Amazonie. En revanche, dans le cadre de cette étude, la nature de la végétation et des sols ne sont pas été pris en compte. Dans la région choisie pour l'étude, qui est une région plus sèche et rocheuse que dans d'autres régions de France, on peut imaginer que l'impact d'un incendie serait différent si d'autres espèces végétales ayant un besoin d'eau plus important étaient touchées. Mais ces analyses demandent un temps d'étude plus long, et peuvent pourquoi pas être l'objet d'une future thèse.

Bibliographie

- Andreassian, V., (2012) Visualising the hydrological signature of an unsteady land cover – an application to deforested and afforested catchments in Australia, the USA and France. Revisiting Experimental Catchment Studies in Forest Hydrology (Proceedings of a Workshop held during the XXV IUGG General Assembly in Melbourne, June–July 2011) (IAHS Publ. 353, 2012).
- Best, A., Zhang, L., McMahon, T., Western, A., and Vertessy, R. A critical review of paired catchment studies with reference to seasonal flows and climatic variability. 56.
- Brigode, P., Bernardara, P., Paquet, E., Gailhard, J., Garavaglia, F., Marz, R., Micovic, Z., Lawrence, D. and Ribstein, P. (2014) - Sensitivity analysis of SCHADEX extreme flood estimations to observed hydrometeorological variability. WATER RESOURCES RESEARCH, VOL. 50, 1–18, doi:10.1002/2013WR013687, 2014.
- Brigode, P., Bernardara, P., Paquet, E., Gailhard, J., Garavaglia, F., Ribstein, P., Bourgin, F., Perrin, C., Andréassian, V. (2015) Dependence of model-based extreme flood estimation on the calibration period : case study of the Kamp River (Austria). Informa Ltd Registered in England and Wales Registered Number: 1072954 Registered office: Mortimer House, 37-41 Mortimer Street, London W1T 3JH, UK.
- Brigode, P. and Oudin, L. (2016) Are conceptual rainfall-runoff models robust enough to quantify the impacts of urbanization.
- Coron, L., Thirel, G., Delaigue, O., Perrin, C. and Andréassian, V. (2017). The Suite of Lumped GR Hydrological Models in an R package. Environmental Modelling and Software, 94, 166-171. DOI: 10.1016/j.envsoft.2017.05.002.
- Coron, L., Perrin, C., Delaigue, O., Thirel, G., and Michel, C. (2018). airGR: suite of GR Hydrological models for Precipitations-Runoff Modelling. R package version 1.0.15.2. URL: <https://webgr.irstea.fr/en/airGR/>.
- Cosandey, C., Andréassian, V., Martin, C., Didon-Lescot, J.F., Lavabre, J., Folton, N., Mathys, N. and Richard, D. (2005) The hydrological impact of the mediterranean forest: a review of French research. Journal of Hydrology 301 (2005) 235–249.
- Delaigue, O., Thirel, G., Coron, L., Brigode, P. (accepted). airGR and airGRteaching: two open source tools for rainfall-runoff modelling and teaching hydrology. HIC proceedings, 13th International conference of Hydroinformatics, July 2018, Palermo, Italy.
- Delaigue, O., Coron, L., Brigode, P. (2018). airGRteaching : Teaching Hydrological Modelling with GR (shiny Interface Included). R package version 0.2.3.2. URL: <https://webgr.irstea.fr/en/airGRteaching/>.
- Devreux, L. (2018) Changements climatique et physiographiques : comment quantifier leurs impacts respectifs sur les débits.
- Folton, N., Andréassian, V. and Duperray, R. (2015) Hydrological impact of forest-fire from paired-catchment and rainfall-runoff modelling perspectives. Informa Ltd Registered in

England and Wales Registered Number: 1072954 Registered office: Mortimer House,
37-41 Mortimer Street, London W1T 3JH, UK

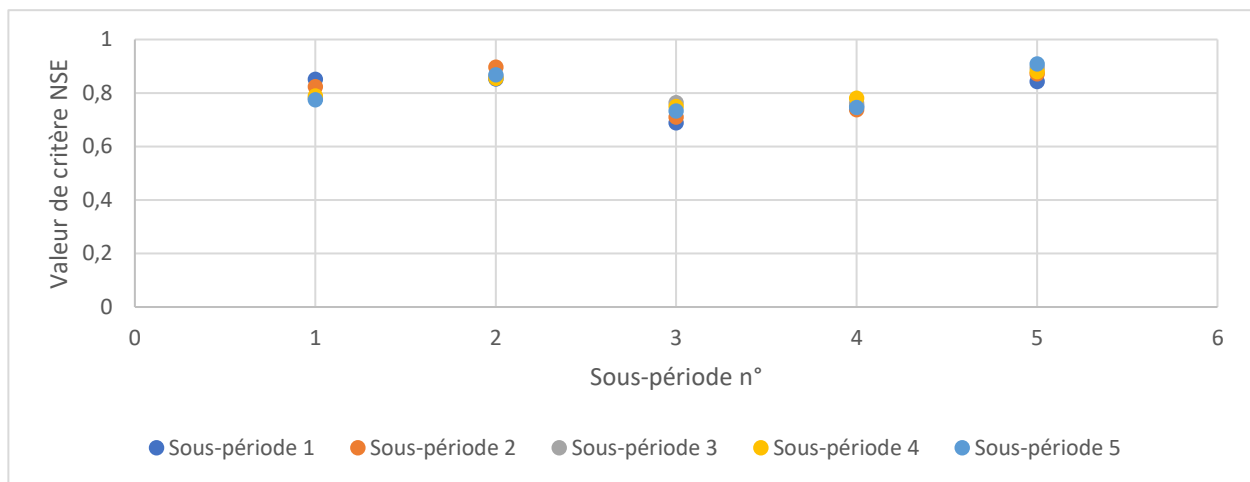
- Garrick, M., Cunnane, C., and Nash, J.E. (1978). A criterion of efficiency for rainfall-runoff models. *Journal of Hydrology* 36, 375–381.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., and Martinez, G. F.: Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling, *J. Hydrol.*, 377, 80–91, 2009.
- Lavabre, J., Arnaud, P., Folton, N. and Michel, C. (1996) Les écoulements d'un petit bassin versant méditerranéen après un incendie de forêt. *Ingénieries – EAT – N°7 septembre 1996* – p 212 à 230.
- Nash, J. E. ; Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models : part I- A : discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10 : 282-290
- Perrin, C., Michel, C., and Andréassian, V. *Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR)*. 16.
- Perrin, C., Michel, C., and Andréassian, V. *Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR)*. 16.
- Salavati, B., Oudin, L., Furusho-Percot, C. and Ribstein, P. (2016) Modeling approaches to detect land-use changes: Urbanization analyzed on a set of 43 US catchments. *Journal of Hydrology* 538 (2016) 138–151.
- Servat, E., and Dezetter, A. Sélection de critères numériques de calage dans le cadre d'une modélisation pluie-débit en zone de savane soudanaise. 19.
- Viatgé, J. (2013) Étude du comportement hydrologique de petits bassins versants soumis à un changement forestier. Bassin Expérimental du Ruisseau des eaux-Volées au Québec.
- Zhao, B., Dai, H., Han, D., and Rong, G. (2017). The sub-annual calibration of hydrological models considering climatic intra-annual variations. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 1–15.

Annexe

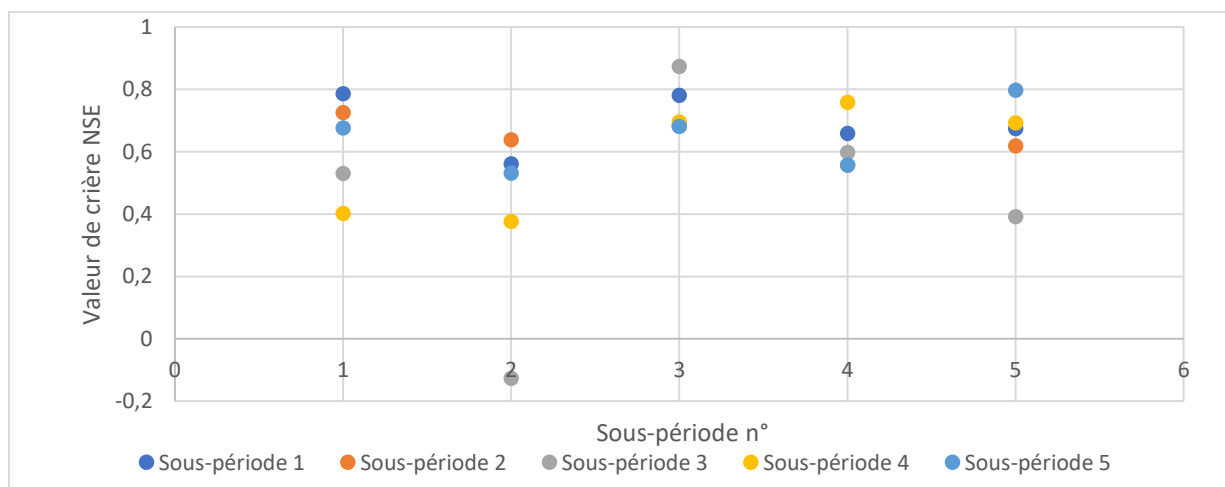
Annexe 1 : Tableau récapitulatif des données disponibles.

Rivière	Station	Code	Début données	Fin données	Date incendie	Superficie BV (km ²)	Superficie Brulée (km ²)	Pourcentage du BV incendié
Réal Collobrier	Pierrefeu-du-Var	Y4615610	1966	1994	1990	70.7	10.8	15
La Gisle	Cogolin	Y5424010	1986	2010	2003	66.0	25.6	39
L'Aille	Vidauban	Y5215020	1968	2010	1979	229.3	46.6	20
L'Endre	Callas	Y5300500	1971	1995	1973	103.2	27.8	27

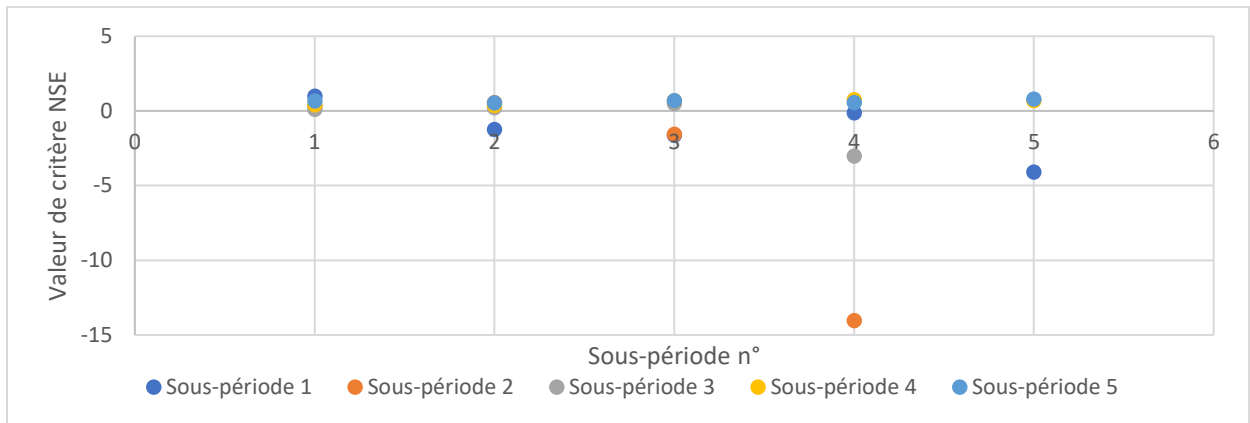
Annexe 2 : Critères NSE pour un calibrage et une simulation sur les 5 sous périodes précédents l'incendie sur le bassin de la Gisle à Cogolin.



Annexe 3 : Critère NSE pour un calibrage et une simulation sur les 5 sous périodes précédents l'incendie sur le bassin de l'Aille à Vidauban.



Annexe 4 : Critère NSE pour un calibrage et une simulation sur les 5 sous périodes précédents l'incendie sur le bassin de l'Endre à Callas.



Annexe 5 : Critères NSE du calibrage pas bootstrap sur le bassin de l'Aille à Vidauban.

