

Travail de fin d'études

Pour le diplôme d'ingénieur École nationale des travaux publics de l'État
(ENTPE)

Année : 2023-2024

Voie d'approfondissement : CELVN

Soutenu le 29 Août 2024

Devant le jury :

- Président du Jury : Raphaël Santos
- Maître de TFE : Elsa LAGANIER
- Expert : Yan LABORDA

Par

Julien REMY

Construction et calage d'outils d'aide à la décision pour la vigilance essentielle sur le territoire du SPC Rhône amont-Saône

Organisme d'accueil : DREAL Auvergne Rhône-Alpes



DIRECTION RÉGIONALE
DE L'ENVIRONNEMENT,
DE L'AMÉNAGEMENT
ET DU LOGEMENT

AUVERGNE -
RHÔNE-ALPES

Notice analytique

AUTEUR	
Nom	Julien
Prénom	REMY
ORGANISME D'ACCUEIL	
Nom de l'organisme et Localité	Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement, service prévision des crues Rhône amont-Saône
Nom du Tuteur	LAGANIER Elsa
ANALYSE DU TFE	
Titre (français)	Construction et calage d'outils d'aide à la décision pour la vigilance essentielle sur le territoire du SPC Rhône amont-Saône
Titre (anglais)	Construction and Calibration of Decision Support Tools for Essential Monitoring in the Rhône upstream - Saône SPC Territory
Résumé (français)	Ce travail représente l'aboutissement de la modélisation d'outil d'aide à la vigilance et d'une étude comparative entre des performances de chacun des outils utilisés. Les outils sont variés allant de simples abaques pluie et un indice d'humidité du sol à des formules linéaires et non-linéaires spatialisant la pluie dans le temps. Les stations étudiées sont situées à Oisilly et à l'Arbresle, mais la méthode s'applique sur l'ensemble du territoire du SPC. Au global, chaque outil présente des intérêts distincts, mais se complètent dans les informations qu'ils fournissent. Les abaques semblent être très performants pour anticiper des franchissements de seuils pour les crues classiques, tandis que les formules linéaires repèrent temporellement les pics de crues. Le travail a été effectué sur une vingtaine d'années, les abaques sont voués à être optimiser au fur et à mesure des crues qui arrivent.
Résumé (anglais)	This work represents the culmination of the modeling of monitoring support tools and a comparative study of the performance of each tool used. The tools vary, ranging from simple rainfall nomograms and a soil moisture index to linear and non-linear formulas that spatialize rainfall over time. The studied stations are in Oisilly and the Arbresle, but the method applies to the entire SPC territory. Overall, each tool offers distinct benefits but complements the others in the information they provide. The nomograms appear to be highly effective for anticipating threshold exceedances for typical floods, while the linear formulas are useful for identifying flood peaks over time. The work was conducted over a period of twenty years, and the nomograms are intended to be optimized as new floods occur.
Mots-clés (français)	Crue, Inondation, Vigilance, Abaque, Prévision, Performance
Mots-clés (anglais)	Flooding, Monitoring, Alertness, Abacus, Prevision, Performance
Termes géo-graphiques (français)	Bassin versant Rhône amont-Saône
COLLATION	

	Nb de pages	Nb d'annexes (nb de pages)	Nb de réf. biblio.
	51	6	14

Déclaration de travail personnel

Je déclare que ce rapport constitue l'aboutissement d'un travail personnel et ne peut être suspecté de plagiat.

Le travail présenté distingue explicitement ce que j'ai produit de ce que j'ai emprunté à d'autres. A ce titre, les citations sont clairement identifiables et les sources (écrits, images) qui ont alimenté ma réflexion sont référencées.

SOMMAIRE

<u>Notice Analytique</u>	<u>2</u>
<u>Déclaration de travail personnel</u>	<u>4</u>
<u>Glossaire</u>	<u>6</u>
<u>Introduction</u>	<u>7</u>
<u>Contexte</u>	<u>8</u>
<u>Territoire du SPC RaS</u>	<u>8</u>
<u>Principe de la vigilance crue</u>	<u>10</u>
<u>Projet de couverture totale</u>	<u>12</u>
<u>Découpage des zones de vigilance</u>	<u>14</u>
<u>Notion de zones de travail</u>	<u>16</u>
<u>Méthodologie d'outils d'aide à la vigilance</u>	<u>18</u>
<u>Outils déjà existants</u>	<u>18</u>
<u>AVI</u>	<u>18</u>
<u>GRP</u>	<u>22</u>
<u>Modélisation d'abaques</u>	<u>25</u>
<u>Abaque Pluie/Débit Classé</u>	<u>27</u>
<u>Abaque Pluie/Humidité</u>	<u>29</u>
<u>Résultats et performances</u>	<u>32</u>
<u>La Vingeanne à Oisilly : Abaques</u>	<u>32</u>
<u>Pluie débit classé</u>	<u>32</u>
<u>Pluie humidité</u>	<u>36</u>
<u>AVI</u>	<u>39</u>
<u>La Turdine à l'Arbresle : Abaques</u>	<u>40</u>
<u>Pluie débit classé</u>	<u>40</u>
<u>Pluie humidité</u>	<u>44</u>
<u>AVI</u>	<u>46</u>
<u>Conclusion des résultats</u>	<u>47</u>
<u>Conclusion générale et ouverture</u>	<u>49</u>
<u>Bibliographie</u>	<u>50</u>

Glossaire

DREAL ARA : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement Auvergne-Rhône-Alpes

SPC RaS : Service Prévision des Crues Rhône amont-Saône

SPC LACI : Service Prévision des Crues Loire Allier Cher Indre

SPC GD : Service Prévision des Crues Grand Delta

SCHAPI : Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations

OPVigil : Outil de production de la vigilance

AP : Avertissement précipitation

SACHA : Système d'analyse des crues historiques et actuelles

PHYC : Plateforme hydrologique centrale

HU : Humidité

DC : Débit Classé

RR : Rainfall Rate

Introduction

En France, le risque d'inondation est le premier risque naturel en raison du nombre de personnes, des enjeux et des emplois qui y sont exposés. Près de 17 millions d'habitants, soit près d'un Français sur quatre, sont menacés par les inondations causées par le débordement des cours d'eau. Chaque année, des crues dévastatrices surviennent sur tout le territoire à cause de facteurs multiples tels que les tempêtes et les orages de plus en plus intenses. Par exemple, les inondations des 8 et 9 septembre 2002 dans le Gard, l'Hérault, la Lozère et le Vaucluse ont causé 24 décès.

Face à cette problématique, une réforme a été mise en place le 30 juillet 2003, plaçant l'État en charge de l'organisation de la surveillance et de la prévision des crues. Cette réforme s'est traduite par :

1. La réorganisation territoriale du dispositif d'annonce de crues pour la prévision des crues, par le biais des services de prévision des crues (SPC).
2. La création d'un service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations (SCHAPI), qui joue le rôle de coordinateur de la prévision des crues au niveau national et fournit un appui technique aux SPC.

En 2006, la vigilance crue est créée sur les mêmes principes que la vigilance météo produite par Météo-France, c'est-à-dire, la production de bulletins d'informations et de niveaux de vigilance journalière. Dans un premier temps, cette vigilance ne concerne pas tous les cours d'eau de France, seulement les cours d'eau importants autour desquels des enjeux inondables significatifs sont présents et dont les temps de réponse sont supérieurs à 6h : il s'agit du réseau surveillé, qui représente en 2024 23000 km de cours d'eau sur le territoire hexagonal.

Actuellement, moins de 50% de la population française est couverte par la vigilance crue, un taux jugé insuffisant. Pour remédier à cela, un projet visant à étendre la vigilance crue à l'ensemble du territoire couvert par les Services de Prévision des Crues a été lancé en 2022. Cet élargissement implique la réalisation d'études dans des zones encore non surveillées, ainsi que le développement d'outils d'aide à la vigilance adaptés à ces nouvelles régions. C'est dans le cadre de ce projet que s'inscrit ce stage et plus précisément l'élaboration d'outils d'aide à la vigilance dans les secteurs non surveillés. Au travers de ce rapport, nous allons voir comment, en créant des outils adaptés aux enjeux spécifiques du territoire étudié, il est possible d'assurer une vigilance de qualité sur des cours d'eau actuellement non surveillés et dépourvus d'outils préexistants.

Contexte

Territoire du SPC RaS

Le territoire du SPC RaS s'étend sur deux régions : à deux tiers sur la région Bourgogne Franche-Comté (BFC) et à un tiers sur la région Auvergne Rhône-Alpes. Il couvre 14 départements : l'Ain (01), Côte-d'Or (21), le Doubs (25), l'Isère (38), le Jura (39), la Loire (42), Haute-Marne (52), le Rhône (69), Haute-Saône (70), Saône-et-Loire (71), Savoie (73), Haute-Savoie (74), les Vosges (88) et le Territoire de Belfort (90). Le découpage du territoire du SPC RaS suivant une logique hydrologique, le territoire couvre tout ou partie de ces départements. Le découpage prend la forme suivante :



Territoire du SPC Rhône-amont Saône (fig 1)

Le bassin du Rhône est l'un des bassins français les plus exposés au risque inondation. La Saône en est le principal affluent. Le plus grand bassin présent sur le territoire est le bassin Saône-Doubs avec une superficie de 29 950 km² qui représente le tiers du bassin du Rhône et 60% du bassin Rhône-amont Saône.

Le bassin du Rhône présente plusieurs caractéristiques topologiques sur l'ensemble de son territoire :

- Des zones montagneuses, comme le Jura, les Vosges et les Alpes, sur lesquelles des problèmes d'enneigement et de redoux peuvent se poser. Ces mêmes zones sont

soumises aux influences pluvio-nivales et sur les cours d'eau dynamiques dans ces zones, des ouvrages hydroélectriques ont été construits. La présence de ces ouvrages rend difficile la surveillance des cours d'eau puisqu'ils sont très sensibles aux manœuvres effectuées par les barrages (retenu d'eau / lâcher d'eau)

- Des zones karstiques entre le Haut-Doubs et la Loue. Ces zones sont formées essentiellement de plateaux de calcaires étagés, fortement karstique. Dans ces secteurs, il faut alors faire face à d'importantes résurgences, mais également au taux de remplissage du karst puisque celui-ci influence fortement la vitesse des cours d'eau. En effet, plus les couches seront remplies de karst, plus rapides sera le cours d'eau et à l'inverse, avec un faible taux de remplissage du karst, on devrait avoir affaire à des cours d'eau relativement lents

Hormis les secteurs amont, le cours d'eau de la Saône est caractérisé par un très long replat sur sa partie aval, de Verdun-sur-le-Doubs à Trévoux qui présente de très faibles pentes, de l'ordre de 0.05 m/km. Beaucoup de champs d'expansion sont très développés le long de la Saône dans les secteurs urbanisés, ils sont censés les protéger.

Le Rhône, pour sa part, se divise en 3 sections hydrologiques en amont de Lyon :

- Le Lac Léman, réservoir d'une superficie de 582 km² et d'un volume de 89 milliards de m³, il a une forte influence sur le Rhône et permet de laminier la plupart des fortes crues du bassin supérieur du Rhône, en Suisse
- Le Haut-Rhône, section en marche d'escalier qui permet, avec le lac du Bourget, de mobiliser de vastes champs d'expansion des crues
- Au niveau de la confluence du Rhône avec l'Ain, le Rhône subit de fortes influences océaniques propres au bassin versant de l'Ain. L'Ain est l'affluent le plus important du Rhône, ses apports en eau peuvent accroître sensiblement les débits du Rhône à Lyon. Les réactions de l'Ain permettent, en règle générale, d'anticiper les réactions du Rhône à Lyon

Principe de la vigilance crues

Initialement, la vigilance crues a été créée pour prévenir les populations de potentiels risques qui pourraient les toucher. Cette vigilance prend la forme d'un dégradé de couleur relative à l'impact estimé sur les enjeux entourant le tronçon en question. Chaque couleur représente un seuil de vigilance et a pour définition :

- Vigilance verte : pas de vigilance particulière requise
- Vigilance jaune : risque de crue génératrice de débordements et de dommages localisés ou de montée rapide et dangereuse des eaux, nécessitant une vigilance particulière notamment dans le cas d'activités exposées et/ou saisonnières
- Vigilance orange : risque de crue génératrice de débordements importants susceptibles d'avoir un impact significatif sur la vie collective et la sécurité des biens et des personnes. Des inondations importantes sont possibles.
- Vigilance rouge : risque de crue majeure. Menace directe et généralisée de la sécurité des personnes et des biens. Des inondations très importantes sont possibles, y compris dans les zones rarement inondées.

Le 14 Juin 2021, une nouvelle instruction¹ a vu le jour, elle fixe les principes de déclenchement des vigilances météorologiques et hydrologiques. Pour les seuils nécessitant une précaution particulière, à savoir, le jaune, l'orange et le rouge, les aléas climatiques doivent être pris en compte, la fréquence de retour de l'évènement est fondamentale, ainsi que les enjeux permanents exposés sur le terrain. Cette instruction a provoqué la révision des seuils utilisés jusqu'alors pour la vigilance crues.

Les couleurs de vigilance ne concernent généralement pas l'intégralité d'un cours d'eau, mais plutôt certaines sections spécifiques. En effet, plusieurs facteurs peuvent expliquer pourquoi un cours d'eau ne se comporte pas de manière uniforme le long de son tracé :

- Variabilité topologique :
La forme du sol peut changer en fonction de l'endroit où l'on se trouve sur le cours d'eau. Celui-ci évolue perpétuellement, même si ce changement est lent à l'échelle d'une vie. Par exemple, un cours d'eau peut devenir plus étroit à certains endroits, le rendant ainsi plus susceptible d'être en crue
- Variabilité de la nature du sol :
Les sédiments, qu'il s'agisse de sable, de gravier ou d'autres matériaux, sont constamment déplacés par le courant. En fonction de la nature du sol et des

¹ Instruction du Gouvernement relative à la mise en œuvre des évolutions du dispositif de vigilance météorologique et de vigilance crues, fait le 14 Juin 2021, à Paris

parois, la rugosité varie, ce qui est déterminé par le coefficient de Manning-Strickler. Cette rugosité peut ralentir le débit localement et favoriser la formation de crues par accumulation d'eau

- Variabilité du climat local :

Les précipitations ne sont pas toujours uniformes le long d'un bassin versant. Il est courant que des orages soient localisés sur une zone précise, ce qui modifie considérablement les effets selon que l'orage se produit en amont ou en aval du bassin

- Influence des affluents :

L'apport d'eau à la confluence d'un affluent peut influencer le débit du cours d'eau principal. Par exemple, si un affluent rejoint un cours d'eau, une crue peut se former après la confluence, mais pas nécessairement avant.

En raison de ces facteurs, il est nécessaire de diviser le cours d'eau en sections appelées tronçons pour maintenir la cohérence. Un tronçon est une subdivision du cours d'eau principal où son comportement est similaire tout au long de son tracé. C'est sur ces tronçons que la vigilance s'applique.

Maintenant que les niveaux de vigilance ont été présentés, voyons comment ils sont exploités. Chaque cours d'eau est défini en tout point par deux mesures : sa hauteur (en mètres) et son débit (en m^3/s). Comme expliqué précédemment, plusieurs facteurs montrent qu'un tronçon n'est pas uniforme, donc la hauteur et le débit varient selon l'endroit où l'on se place. C'est pourquoi des stations de mesure de ces hauteurs et/ou débits sont présentes sur les tronçons. Généralement, une station dite de "référence" utilisée pour la vigilance et la prévision est présente sur chaque tronçon. Cette station est censée être représentative du comportement du cours d'eau.

Les degrés de vigilance étant définies par des enjeux et des aléas, leur valeur fait face à de fortes incertitudes, il est alors nécessaire de prendre en compte ces marges d'erreurs. Les niveaux de vigilance ne sont pas les seuls à être incertains puisque les valeurs récupérées depuis les stations, qu'elles soient en débit ou en hauteur, sont aussi sensibles à des incertitudes de mesure, cela peut être dû à plusieurs paramètres, notamment l'incertitude des instruments de mesure, incertitude des logiciels pendant l'exploitation des données.

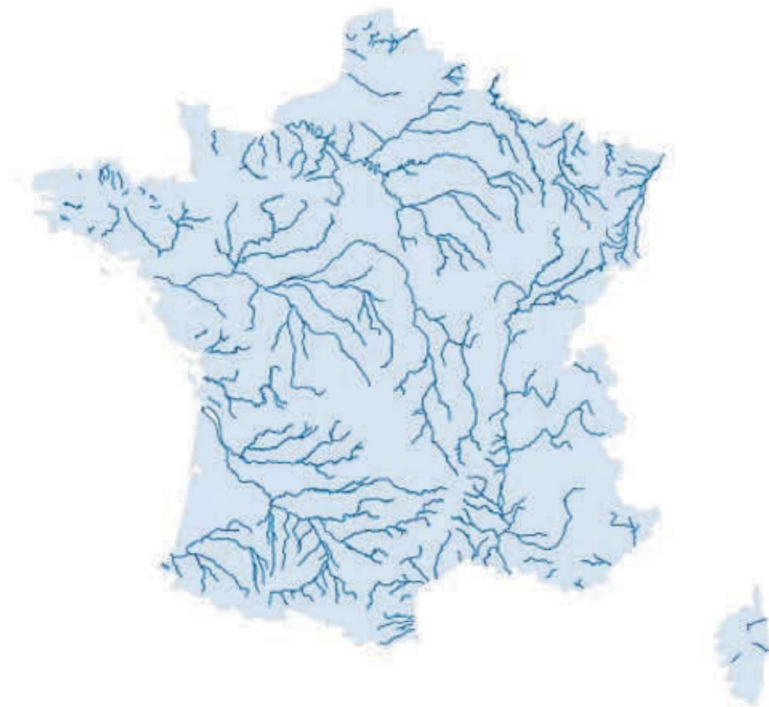
Les zones de transition offrent une expertise plus nuancée que de simplement déterminer si une valeur dépasse ou non un seuil fixé. Pour les prévisionnistes, il est crucial d'analyser si la courbe anticipée va franchir le seuil supérieur de la zone de transition, et si c'est le cas, pendant combien de temps cela se produira. Cette analyse, impossible à obtenir avec une valeur ponctuelle, représente un véritable enjeu pour affiner les prévisions.

Elles permettent d'apporter une certaine cohérence. Prenons deux situations : cas 1, le débit du cours d'eau est très proche de la valeur seuil par valeur supérieure ; cas 2, même chose mais par valeur inférieure à la valeur seuil. Dans le cas 1, on déclencherait la vigilance, dans le cas 2, on ne déclencherait pas, pourtant les deux crues seront relativement identiques. C'est pourquoi on a besoin de ces zones de vigilance.

Projet de couverture totale

Le Service de Prédiction des Crues Rhône-amont Saône est responsable de la surveillance et de la prédiction des crues sur 22 tronçons de cours d'eau, totalisant environ 1350 km. Chaque tronçon dispose d'une station de référence, où la vigilance et les prévisions sont effectuées. Actuellement, cette vigilance est partielle et ne couvre que moins de 50% de la population vivant en zones inondables, avec des lacunes notables dans certains secteurs urbanisés et ruraux.

L'objectif principal du projet est d'étendre la vigilance à un plus grand nombre de cours d'eau, afin de doubler le nombre d'habitants protégés par le dispositif de vigilance. Tout d'abord, ce projet vise à élargir la couverture territoriale en incluant toutes les rivières dans la vigilance. En effet, plus on a de cours d'eau sur lesquels faire de la vigilance, plus grand sera le territoire à surveiller et donc plus d'habitants seront couverts par la vigilance. De manière cartographique, cela reviendrait à passer de cette carte :



Carte des tronçons surveillés avant couverture totale (fig 2)

À cette carte :



Carte des tronçons après vigilance essentielle (fig 3)

Le deuxième objectif est de simplifier le système de vigilance crue ou pluie-inondation pour le rendre plus accessible et compréhensible pour le public. Cela permettra d'améliorer la lisibilité et l'efficacité du service

De même pour les stations de prévision, il y aura 3 types :

- Stations de prévision avancées pour les secteurs à forts enjeux
- Stations de prévisions standards pour les secteurs à enjeux moindres
- Stations d'observation ailleurs y compris sur certains cours d'eau en vigilance essentielle

Dans ce cadre, toutes les SPC doivent développer sur leur territoire d'ici 2026, des outils simples permettant de pratiquer de la vigilance très simpliste certes, mais qui devrait être plus précise que les seuils actuellement en vigueur pour la vigilance pluie-inondation effectuée par Météo-France.

Découpage des zones de vigilance

La vigilance de niveau essentiel vue précédemment sera appliquée sur des zones regroupant des cours d'eau voisins en plus des cours d'eau individualisés principaux. Il existe plusieurs types de zones correspondant aux différentes échelles de travail :

- Zone de travail : zone sur laquelle est calculé un niveau de vigilance élémentaire à l'aide d'un modèle hydraulique ou statistique
- Zone de vigilance : zone élémentaire la plus fine sur laquelle peut être produite une information de vigilance expertisée pour les 24h à venir dans le cadre de la production opérationnelle de la vigilance crues
- Zone d'affichage : zone sur laquelle l'information sur le niveau de vigilance essentielle est restituée à l'utilisateur, il est à noter que ce zonage peut varier selon le niveau de zoom, selon les regroupements de zones de vigilance, opérés de façon systématique ou en fonction des épisodes hydrométéorologiques, lors de la production de la vigilance

Au vu de la pluralité des événements présents sur le territoire inondable, des priorités sont instaurées afin de pouvoir traiter les phénomènes de manière optimale :

- 1) Débordement de petit cours d'eau : il s'agit du phénomène le plus connu du réseau et qui concerne l'ensemble du territoire. L'objectif est d'être en mesure de disposer d'une première version d'outils simples permettant de définir une vigilance essentielle sur le débordement de petits cours d'eau pour l'ensemble du territoire à fin 2026
- 2) Estuaire et influence marine : il s'agit d'un phénomène assez connu et ne concernant que certaines zones présentant également du débordement de petits cours d'eau. L'objectif est de disposer d'une première version d'outils simples permettant de définir une vigilance essentielle sur les estuaires et les cours d'eau soumis à l'influence marine pour l'ensemble des zones concernées à fin 2028
- 3) Ruissellement : il s'agit d'un phénomène difficile à appréhender techniquement. Néanmoins, il concerne des secteurs à forts enjeux et suscite donc une forte attente utilisateur. La question du ruissellement urbain sera à intégrer dans un deuxième temps, après 2030, une fois que la production de l'information de vigilance essentielle sera éprouvée pour les deux phénomènes précédents
- 4) Autre phénomènes (remontées de nappes, laves torrentielles, débordements des étangs littoraux, ...) :

La représentativité de ces phénomènes qui concernent que certains secteurs de certains SPC est plus marginale. Ils ne seront donc pas pris en compte dans la vigilance essentielle

Plus généralement, les zones de vigilance sont définies comme les zones où une couleur sera appliquée quotidiennement. Elle sera saisie dans l'outil de production de la vigilance (OPVigil).

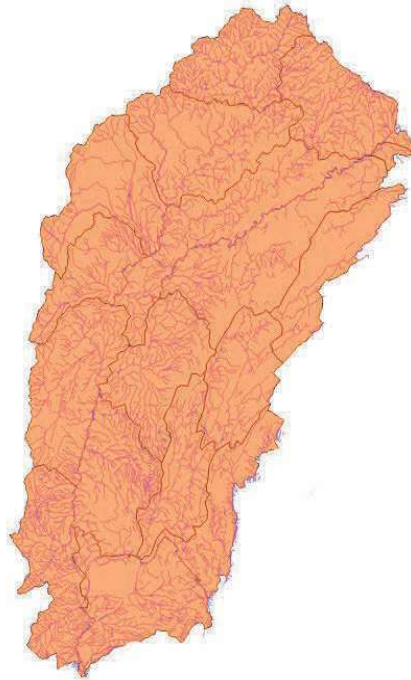
Les zones de vigilance sont plutôt grandes et sont divisées en plusieurs zones de travail dans lesquelles seront calculés les niveaux de vigilance qui nous permettront ensuite, d'attribuer la couleur de vigilance à la zone de vigilance.

Le découpage des zones de vigilance doit respecter plusieurs critères permettant de garder une certaine cohérence, notamment hydrologique. Par exemple, il est possible que la rive gauche et la rive droite d'un cours d'eau ne se comportent pas de la même manière lors d'événements de pluie, à savoir, qu'une rive déborde avant l'autre. Le risque est donc de déclencher la vigilance sur une zone dans laquelle il n'y a pas vraiment de risque d'inondation.

Ces critères/exigences sont les suivants :

- Taille approximative : pour des raisons de faisabilité opérationnelle pour les SPC et de pertinence de l'affichage infradépartemental à l'échelle nationale, la règle stipule qu'il y aura au maximum 2 à 3 zones de vigilance par département et que ces zones de vigilance devront faire entre 2000 km² et 3000 km², de sorte à avoir une moyenne nationale aux alentours de 2500 km²
- Contours : Le découpage doit répondre à des logiques hydrologiques autant que faire se peut, en croisant avec les délimitations départementales, des bassins hydrologiques et zones AP
- Contraintes : L'ensemble du territoire du SPC doit être couvert par les zones de vigilance, une zone de vigilance peut s'étaler sur plusieurs départements cependant

Graphiquement, le découpage du territoire du SPC RaS en zones de vigilance est le suivant : (les lignes noires les plus épaisses séparent les différentes zones de vigilance)



Carte des zones de vigilance du territoire SPCras (fig 4)

Notion de zones de travail

Les zones de travail sont définies comme des zones utilisées pour le calcul élémentaire, à partir des outils disponibles, d'un niveau de vigilance sur une partie d'une zone de vigilance.

C'est sur la base des niveaux de vigilance calculés sur les zones de travail d'une zone de vigilance qu'il sera possible de produire une couleur de vigilance expertisée par zone de vigilance.

De la même manière que pour les zones de vigilance, le découpage des zones de travail doit respecter des critères d'échelle et de capacité en matière de dispositif opérationnel.

Ces critères sont les suivants :

- Taille approximative et nombre : il n'y a pas de critère de taille (ni minimum, ni maximum), en revanche trop de zones de travail par zone de vigilance peut mener à des difficultés en matière de gestion opérationnelle
- Contours :

- Une zone de travail est associée à une zone de vigilance (càd elle ne peut pas être à cheval sur deux zones de vigilance)
- L'union des zones de travail d'une zone de vigilance n'est pas forcément la zone de vigilance, ainsi il peut y avoir des zones blanches (non traversées par une zone de travail) au sein d'une zone de vigilance
- Deux zones de travail peuvent se croiser
- Outils associés : Outils élémentaires envisagés pour effectuer les calculs élémentaires du niveau de vigilance, à savoir, des modèles nationaux ou bien des modèles locaux qui seront développés dans la partie suivante

Méthodologie d'outils d'aide à la vigilance

Outils déjà existants

Il existe au sein du SPC RaS plusieurs outils d'aide à la vigilance, qui utilisent les données actuelles de débit et de hauteur à une station pour obtenir des débits ou hauteurs anticipés du cours d'eau dans les prochaines 24h, afin de pouvoir mettre une couleur de vigilance 24h avant que la crue potentielle ne survienne.

AVI

Nous allons nous pencher sur les formules AVI, un outil historique développé en interne au SPC RaS pour soutenir la production de la vigilance. Cet outil utilise les prévisions de Météo-France, notamment les prévisions expertisées BP, qui sont les prévisions officielles de MF. Dans ce cadre, nous détaillerons la démarche à suivre pour établir une relation globale pluie/débit, intégrant l'indice d'humidité Hu SIM2 à une station, afin de répondre aux exigences de la vigilance. Cette intégration est cruciale pour estimer le franchissement des seuils à une station dans les prochaines 24 heures, en s'appuyant sur les observations récentes de débits et de pluies, l'indice d'humidité Hu SIM2, ainsi que sur les prévisions météorologiques fournies par Météo-France.

Tout d'abord, AVI fonctionne sur le principe de recherche de maximum sous 24h. En effet, à partir de simples formules linéaires, en prenant en compte les cumuls de pluie passés et prévus par Météo-France, l'humidité du sol à la station, on obtient un débit maximum dans un intervalle de temps de 0h à 24h d'anticipation à partir du moment où on applique la formule, cette formule est horaire, c'est-à-dire qu'elle prend en entrée des débits ou des hauteurs une fois par heure, ainsi si on change l'instant t où on applique la formule, il est fort à parier, en cas de période de pluie, que la valeur obtenue à partir de la formule soit différente si on commence à l'instant t ou à l'instant $t + 1h$ (si il pleut dans l'intervalle de temps $[t+1h, t+25h]$ ou alors qu'il a plus dans l'intervalle de temps $[t-24h, t-23h]$).

La première étape a consisté à définir une relation pluie/débit simple en intégrant l'indice d'humidité Hu SIM2. Cette relation peut être formulée comme suit :

$$Q_{\max} [T / T+dt] \text{ (ou } H_{\max}) = 1 \times Q[T] + a_1 \times Pb [T-t_{deb1} / T-t_{fin1}] \dots + a_5 \times Pb [T-t_{deb5} / T-t_{fin5}]$$

Où :

- Q_{\max} : Débit maximum attendu
- $Q[T]$: Débit observé à l'instant T

- Pb : Pluie cumulée sur le bassin
- tdeb1,tfin1,...,tdeb5 : Périodes d'observation et de prévision des pluies

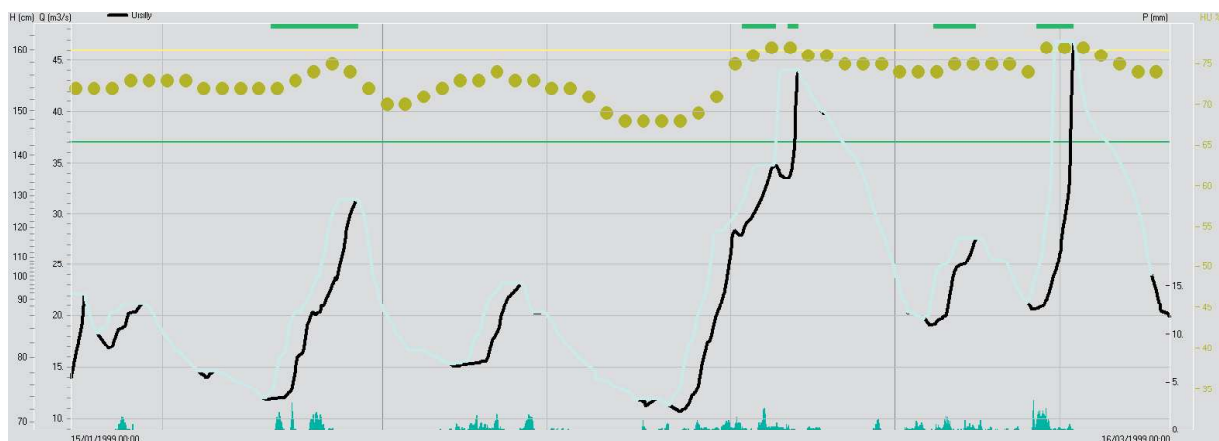
Les données de pluies utilisées actuellement proviennent des mesures au sol. Il est envisagé d'évoluer vers l'utilisation des données de pluie issues de la lame d'eau Antilope (lame d'eau mixte radar + pluviomètres) pour une meilleure prise en compte de la spatialisation des pluies.

Il s'agit tout d'abord de constituer la base de données de référence des échantillons de données qui vont nous permettre de paramétrer nos formules.

Dans cette base de données, il est nécessaire d'avoir :

- La hauteur H ou le débit Q d'une station avec des niveaux de vigilance
- Pluies de bassin au sol/radar
- Indice SIM Hu2 au pas de temps journalier
- Les évènements de crues avec date de début et de fin au format JJ/MM/AA/HH
- Les évènements de pluie associés au crues précitées
- Les évènements de pluie significatifs n'ayant pas provoqués de crues

Toutes ces données sont regroupées sur ce graphique :



Rendu visuel de la modélisation des paramètres sur SACHA (fig 6)

Avec en noir, le débit réellement observé à la station ; en bleu, le débit réellement observé anticipé de 24h ; les points verts correspondent à l'humidité et en dessous des courbes de débit, il y a les hyétogrammes précédant les crues.

Une fois les épisodes de crues importés, on sélectionne uniquement les phases de montées de ces épisodes, c'est uniquement la montée qui nous intéresse car on cherche

à anticiper le maximum de la crue 24h en avance. Une fois que ces sous-épisodes sont récupérés, on les exporte sous Excel afin d'exploiter les données plus facilement.

Le fichier Excel se présente de la manière suivante :

		coefficients		0.02104944	0.018015924	0.120403062	0.541423362	0.256359223		
Date	Q[T] m3/s	Qmx[T+0 T+24]	Pc1[t=-36 T-24]	Pc1[t=-24 T-12]	Pc1[t=-12 T+0]	Pc1[t=+0 T+12]	Pc1[t=+12 T+24]	HU%		Ecart
14/07/2009 22:00	1.849	10.771	0	91.6	38.9	62.7	0.1	57	985.006826	
14/07/2009 23:00	2.265	10.771	0	95.1	57	41.1	0.1	57	499.452097	
14/08/2010 14:00	0.696	5.865	0	0	0	64.6	57.1	58	1975.36343	
14/08/2010 15:00	0.698	5.865	0	0	0	82.8	38.9	58	2463.65587	
14/08/2010 16:00	0.699	5.865	0	0	0	93.1	28.6	58	2763.85606	
14/08/2010 17:00	0.702	5.865	0	0	0.3	100.4	21	58	2982.8605	
14/08/2010 18:00	0.702	5.865	0	0	1.9	104.7	15.1	58	3094.00891	
14/08/2010 19:00	0.701	5.865	0	0	2.8	111.4	7.5	58	3295.95233	
14/08/2010 20:00	0.728	5.865	0	0	8.8	108.9	4.3	58	3134.42051	
14/08/2010 21:00	0.713	5.865	0	0	13.1	105.7	3.2	58	2967.42528	
14/08/2010 22:00	0.706	5.865	0	0	17.8	102	2.2	58	2785.02622	
14/08/2010 23:00	0.713	5.865	0	0	22.2	98.1	2.6	58	2631.80427	
15/08/2010 00:00	0.816	5.865	0	0	33.5	87.8	7.8	58	2354.29478	
15/08/2010 01:00	0.928	5.865	0	0	50.8	70.9	14.2	58	1866.81831	
15/08/2010 02:00	0.925	5.865	0	0	64.6	57.1	21.3	58	1537.71922	
15/08/2010 03:00	1.157	5.865	0	0	82.8	38.9	29.4	58	1146.47952	
15/08/2010 04:00	1.294	5.865	0	0	93.1	28.6	32.9	58	933.75785	
15/08/2010 05:00	1.674	5.865	0	0.3	100.4	21	35.8	58	809.426566	
15/08/2010 06:00	2.038	5.865	0	1.9	104.7	15.1	39	58	728.294567	
15/08/2010 07:00	2.647	5.865	0	2.8	111.4	7.5	44	58	654.634527	
15/08/2010 08:00	3.439	5.865	0	8.8	108.9	4.3	50.3	58	679.510538	
15/08/2010 09:00	4.199	5.865	0	13.1	105.7	3.2	55.4	58	741.552846	
15/08/2010 10:00	4.738	5.865	0	17.8	102	2.2	56.3	58	734.353166	
15/08/2010 11:00	5.125	6.019	0	22.2	98.1	2.6	56.1	58	734.786576	
15/08/2010 12:00	5.409	6.649	0	33.5	87.8	7.8	50.1	58	729.087567	
15/08/2010 13:00	5.779	7.489	0	50.8	70.9	14.2	43.7	58	709.311138	
15/08/2010 14:00	5.865	8.179	0	64.6	57.1	21.3	37.6	58	723.409226	
15/08/2010 15:00	5.863	8.513	0	82.8	38.9	29.4	33.1	58	780.014222	
15/08/2010 16:00	5.642	8.604	0	93.1	28.6	32.9	31	58	779.457974	
15/08/2010 17:00	5.383	8.604	0.3	100.4	21	35.8	29.4	58	786.381547	
15/08/2010 18:00	5.189	8.604	1.9	104.7	15.1	39	28	58	819.271362	
15/08/2010 19:00	4.934	8.604	2.8	111.4	7.5	44	26.4	58	893.379024	
15/08/2010 20:00	4.66	8.604	8.8	108.9	4.3	50.3	22.3	58	1003.07176	
15/08/2010 21:00	4.374	8.604	13.1	105.7	3.2	55.4	22.1	58	1155.70855	
15/08/2010 22:00	4.131	8.604	17.8	102	2.2	56.3	26.6	58	1246.47703	
15/08/2010 23:00	3.891	8.88	22.2	98.1	2.6	56.1	34.7	58	1356.31803	
15/07/2009 00:00	2.825	10.771	0	95.2	60.3	37.7	0.1	60	460.819947	
15/07/2009 01:00	3.394	10.771	0	95.4	62.9	35	0	60	435.343608	
15/07/2009 02:00	4.063	10.771	31.1	64.4	63	34.8	0	60	463.704065	

Tableau du traitement des données récupérées depuis SACHA (fig 7)

Le but, à partir de cette étape, est de trouver les paramètres optimaux a1, a2, a3, a4 et a5 associés aux pluies passées et futures en fonction de l'humidité.

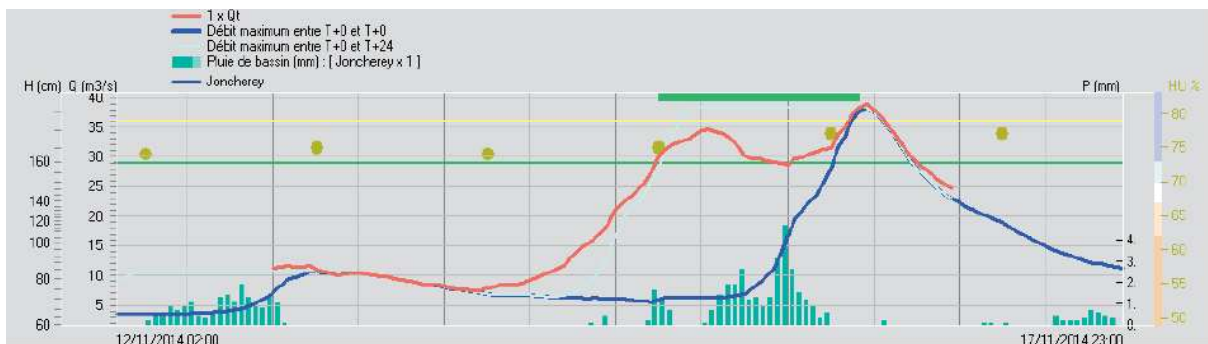
On commence par trier les humidités par ordre croissant, on calcule dans une nouvelle colonne « écart », le carré de l'écart entre le débit maximum observé entre T et T + 24h et la valeur obtenue par combinaison linéaire du débit et des pluies cumulées observées et prévues.

Une fois que la colonne écart est remplie, on va chercher les coefficients optimaux des pluies à l'aide de l'outil « Solveur » sur Excel, qui nous permet en fonction des conditions qu'on impose au coefficient et à la valeur d'arriver, de trouver des valeurs optimales à la solution du problème. En l'occurrence, ici pour trouver les coefficients optimaux liés à une humidité (N%), on va sommer les valeurs des écarts ayant pour humidité N-1%, N% et N+1%, pour ensuite faire converger cette somme vers 0 en utilisant le solveur, ce qui nous donnera les coefficients optimaux correspondant à l'humidité N%. Cependant, on impose une condition qui est que les coefficients doivent être croissants avec plus

augmente d'humidité, c'est-à-dire, le a_1 lié à l'humidité N% devra nécessairement être plus petit que le a_1 lié à N+1%, pareil pour les autres coefficients.

HuSim2	effectifs		Pc1[t=-6T+0]	Pc1[t=+0T+6]	Pc1[t=+6T+12]	Pc1[t=+12T+18]	Pc1[t=+18T+24]
55	30	170	0.34	0.00	0.18	0.00	0.35
56	6		0.34	0.05	0.21	0.02	0.35
57	24		0.34	0.10	0.24	0.05	0.35
58	4		0.34	0.15	0.27	0.08	0.35
59	8		0.34	0.22	0.30	0.11	0.35
60	53		0.34	0.29	0.33	0.14	0.35
61	45	219	0.34	0.36	0.36	0.17	0.35
62	25		0.34	0.43	0.39	0.20	0.35
63	53		0.34	0.50	0.42	0.23	0.35
64	43		0.34	0.57	0.44	0.27	0.35
65	73		0.35	0.65	0.61	0.39	0.35
66	25		0.35	0.72	0.78	0.51	0.35
67	112	334	0.35	0.79	0.95	0.63	0.35
68	106		0.36	0.88	1.13	0.76	0.35
69	116		0.38	0.88	1.13	0.76	0.35
70	174	495	0.40	0.88	1.13	0.76	0.35
71	242		0.42	0.89	1.13	0.76	0.35
72	79		0.42	0.89	1.13	0.76	0.35
73	172	507	0.42	0.89	1.13	0.76	0.35
74	164		0.42	0.91	1.13	0.76	0.35
75	171		0.42	0.94	1.15	0.76	0.35
76	66	303	0.42	0.97	1.17	0.76	0.35
77	133		0.42	1.01	1.18	0.76	0.35
78	104		0.42	1.06	1.18	0.83	0.35
79	99		0.42	1.11	1.18	0.90	0.35
80	63		0.42	1.16	1.19	0.98	0.35
81			179	0.42	1.19	1.20	1.06
82	5	0.42	1.24	1.20	1.14	0.35	
83	12	0.42	1.29	1.20	1.22	0.35	
total	2207	2207					

Tableau d'affectation des paramètres optimaux par humidité (fig 8)



Visualisation de la courbe calculée grâce à la formule AVI à la station de Vesoul (fig 9)

Une fois que l'hydrogramme calculé est affiché, on peut commencer à faire de la vigilance. En effet, on regarde l'hydrogramme simulé par rapport aux lignes de vigilance, l'instant du dépassement est également très important, puisqu'en général il est souhaité d'anticiper une crue avec 24h d'avance, c'est pourquoi au plus tôt, on repère la crue, au plus tôt, on peut mettre la couleur de vigilance.

GRP

Le GRP est un autre outil de modélisation des crues utilisé par le SPCras, plus complet que l'outil AVI vu précédemment, puisqu'il prend en compte la neige. En effet, la structure de ce modèle repose sur un principe de réservoir d'eau et de neige, elle se compose d'un réservoir de production qui permet d'assurer un suivi des conditions d'humidité du bassin, une fonction d'ajustement de la pluie nette, un hydrogramme unitaire, ainsi qu'un réservoir de transfert.

La méthode GRP se schématise de la manière suivante :

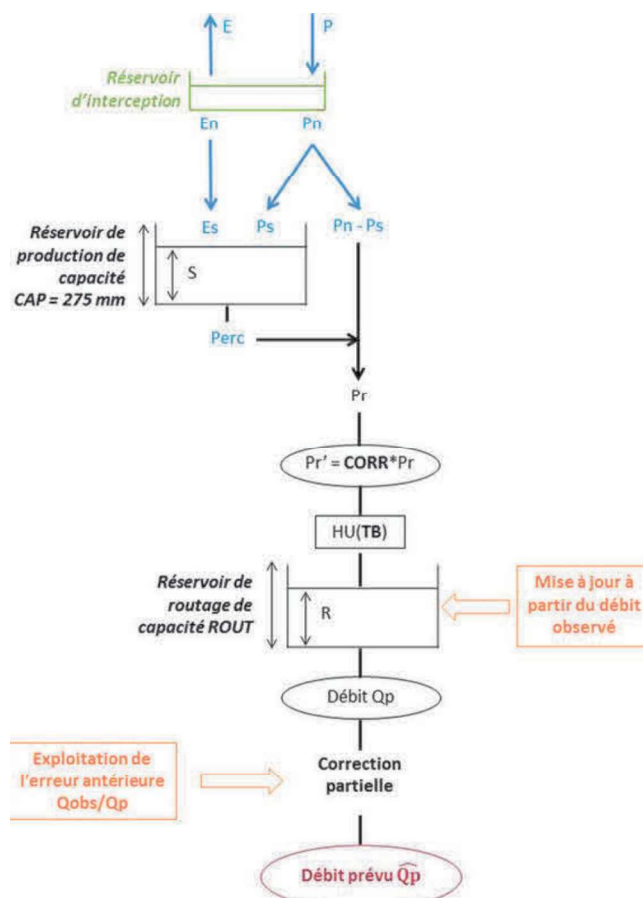


Schéma de la méthode GRP (fig 10)

Concrètement, la pluie est captée par évapotranspiration potentielle (ETP), en fonction du taux de remplissage du réservoir de production, le reste de pluie qui tombe est divisé en deux parties, soit elle remplit le réservoir s'il n'est pas déjà plein, soit sous forme d'écoulement si le réservoir est rempli, s'il reste encore de l'eau sous forme d'évapotranspiration potentielle, alors elle servira à la vidange du réservoir de production. D'autre part, une percolation issue du réservoir de production alimente l'écoulement.

La quantité d'eau totale alimentant l'écoulement doit être revue à la baisse ou à la

hausse, selon qu'il y ait des échanges en eau avec les nappes profondes ou les bassins voisins. Ensuite, le transfert d'eau est géré par l'hydrogramme unitaire permet de tenir compte du décalage temporel entre pluie et débit, puis par le réservoir de routage non linéaire.

Le modèle GRP fonctionne avec un système de mémoire des crues passées, où chaque crue est enregistrée dans le système comme une « expérience » ajoutée à la base de données. Cela permet d'améliorer l'anticipation des crues futures, à chaque nouvelle occurrence. Avant de produire un résultat, le GRP puise dans la base de données LAMEDO, qui archive les données spatio-temporelles des précipitations, ainsi que dans la base PHyC, qui enregistre les observations en temps réel des hauteurs d'eau et des débits à des intervalles variables de 5 à 60 minutes. Le GRP consulte également la base Aquareel, qui recense les crues survenues sur le territoire.

Pour chaque bassin, les paramètres du modèle (S, Corr, et TB) sont ajustés sur une longue série chronologique continue passée. Une fois ces paramètres fixés, le modèle GRP est alimenté en temps réel et en continu avec des données de pluie, de débit, et de température (si le module neige est utilisé). À chaque exécution, le modèle calcule un hydrogramme prévisionnel, qui est ensuite déposé dans la base PHyC. Ce résultat est ensuite modélisé et déposé sur le serveur opérationnel du SPC, où il peut être consulté et/ou expertisé par les prévisionnistes, qu'ils soient d'astreinte ou non.

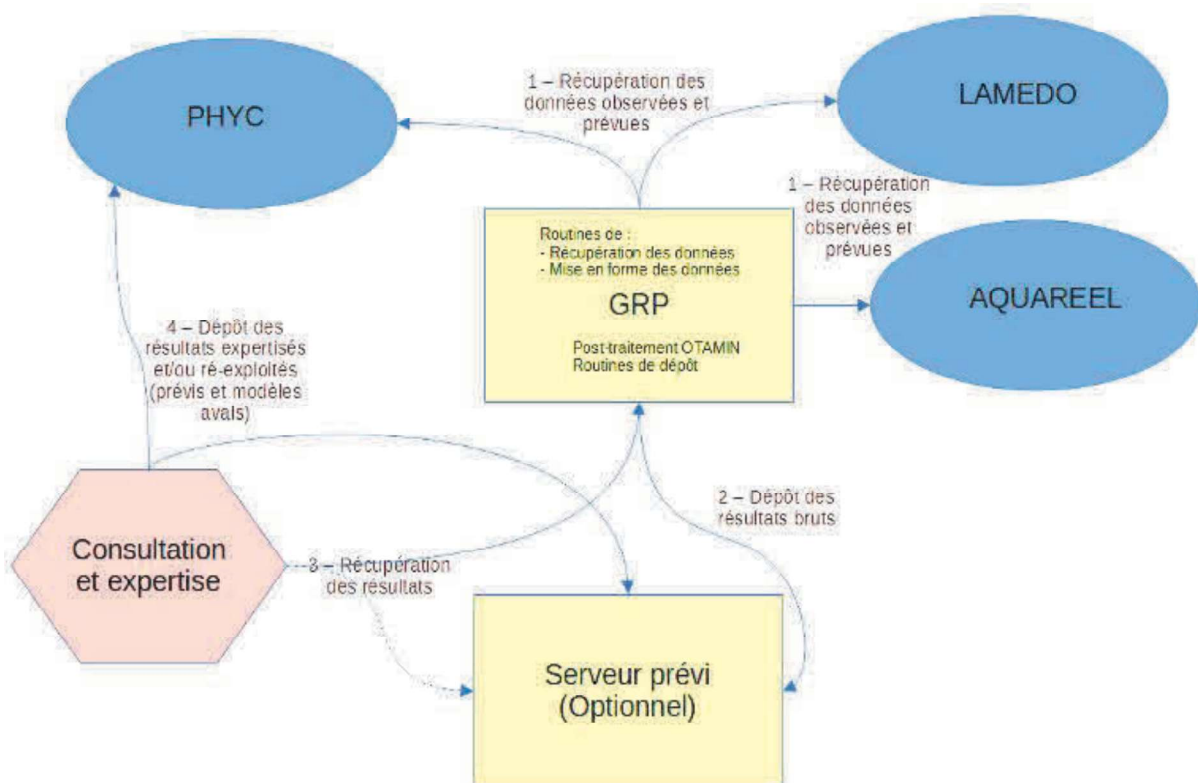
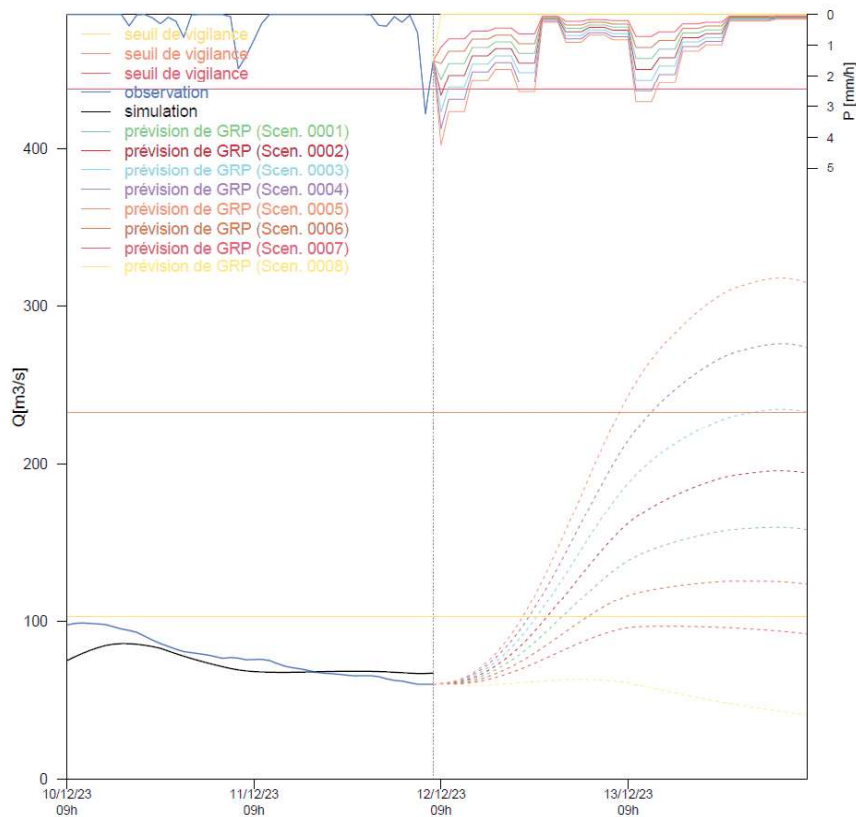


Schéma des relations entre l'entrée et la sortie d'un GRP (fig 11)

Enfin, il s'agit de voir les sorties d'un modèle GRP dans le but de comprendre comment les prévisionnistes expertisent ces résultats.

Voici un exemple de sortie GRP à la station Cendrecourt, situé dans la Haute-Sône :



Sortie hydrogramme GRP à la station de Cendrecourt (fig 12)

Lors de l'utilisation du modèle GRP, le résultat obtenu dépend directement des valeurs d'entrée fournies. Cependant, ces valeurs peuvent ne pas refléter exactement les observations réelles, car les zones de prévision définies par Météo-France sont vastes et manquent de précision. Les prévisions de pluie couvrent un large périmètre, ce qui rend difficile, voire impossible, de prédire précisément les événements, surtout en cas d'orages.

C'est pourquoi, lorsque les prévisionnistes modélisent sur 24 heures, ils ne se contentent pas d'un seul scénario, mais en créent plusieurs. Ces scénarios varient en fonction des valeurs d'entrée, généralement en ajoutant ou en soustrayant un pourcentage de la pluie prévue. Le scénario de référence est ajusté en ajoutant ou en soustrayant 25 % ou 50 % de la pluie prévue, ce qui produit un ensemble de courbes de tendance.

Modélisation d'abaques

Au sein du SPCras, il existe alors des formules AVI, ainsi que des modèles GRP présents sur les stations de vigilance des bassins amont du territoire. En revanche, il existe en plus d'AVI, d'autres relations possibles entre liant la pluie à l'humidité et au débit. Des relations, en somme, tout à fait rudimentaires, mais qui présente un certain intérêt statistique, cet outil porte un nom celui d'abaque pluie débit classé et abaque pluie humidité.

Ils ont déjà été développés dans d'autres SPC, c'est le cas notamment du SPC LACI et du SPC GD, ils avaient travaillé en proche collaboration avec Météo-France et le réseau Vigicrues pour ajouter un critère basé sur l'état du sol avant l'événement météorologique à la vigilance pluie-inondation. L'objectif était de créer un outil simple permettant, en tenant compte de l'état initial du sol, d'identifier les événements pluvieux susceptibles de provoquer des crues significatives sur les cours d'eau non surveillés par Vigicrues, ou de causer un fort ruissellement hors des zones urbaines. Des expérimentations sont en cours, trois autour du pourtour méditerranéen et une dans le bassin de la Loire jusqu'au Bec de Vienne. L'approche « Loire » est menée par le Service de Prévision des Crues (SPC) Loire-Allier-Cher-Indre, en collaboration avec les directions interrégionales de Météo-France Centre-Est (basée à Lyon) et Ouest (basée à Rennes).

Nous allons envisager sur le territoire Rhône-Amont Saône, un outil de type abaque à deux entrées : les cumuls de précipitations et un indicateur de l'état de saturation des sols avant l'événement météorologique. Seuls les phénomènes de ruissellement de versant et de débordement de cours d'eau non surveillés seront inclus dans la vigilance pluie-inondation, excluant les remontées de nappe et le ruissellement urbain.

La création des abaques a été faite sur deux pas de temps, d'abord au pas de temps journalier, puis au pas de temps horaire.

Pour les stations qui font déjà de la vigilance, les niveaux de vigilance sont déjà établis, en revanche, pour les stations qui mesure uniquement le débit ou la hauteur d'eau en fonction du temps, les niveaux de vigilance vont être défini par rapport aux périodes de retour des crues du cours d'eau.

Pour toute la suite de ce rapport, une vigilance pluie-inondation jaune correspond à une crue avec une période de retour 2 ans et pour l'orange à une période de retour de 5 ans. Le choix s'était porté pour le niveau de vigilance orange sur une période de retour de 20 ans ce qui correspond un peu plus à une crue orange, mais le problème est que les données de pluie radar disponibles à nos stations vont du 1^{er} Janvier 1997 à aujourd'hui, ce qui signifie qu'on a que 27 ans de chroniques de débit et de hauteur exploitables dans la plupart des stations du territoire. Cependant, il y a beaucoup de stations qui n'ont pas une chronique continue de données entre 1997 et 2024, dans certains cas, la station a été créé après 1997, dans d'autres cas, c'est dû à des aléas climatiques ou des travaux. Généralement, les stations sont placées au bord d'un pont, c'est arrivé par le passé que des ponts aient besoin d'être rénovés ou réparés et que la station doive être mise en

arrêt temporaire. Par exemple, à la station de l'Arbresle, des travaux ont eu lieu pendant 4 ans, il y a donc un trou de données entre 2017 et 2021. Il peut également s'agir d'aléas climatiques, soit une météo peu clémente et qui emporte la station avec elle, ou bien des crues qui font monter le cours d'eau à un tel point que la station est emportée par le courant, c'est le cas notamment de la station Saint-Bel.

On s'intéressera plus loin à la méthodologie que l'on va adopter pour déterminer des niveaux de vigilance dans les stations de cours d'eau non surveillés. Il s'agit maintenant de développer ce qu'on entend par abaque à deux entrées.

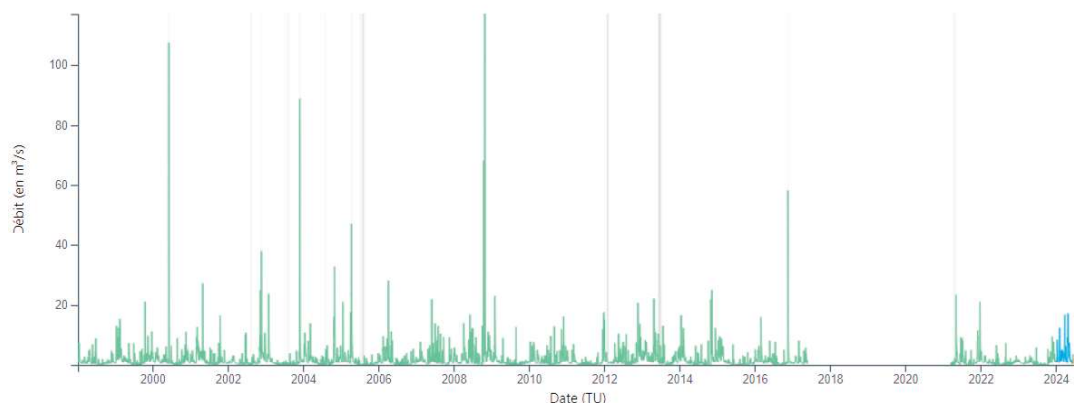
Ici, nous allons développer deux types d'abaques à deux entrées :

- Abaque Pluie/Humidité
- Abaque Pluie/Débit Classé

Pour chaque abaque, il s'agira de créer une base de données, commune si c'est pour la même station, qui nous permettra d'élaborer les abaques à deux entrées. Cette base de données sera composée de multiples éléments :

- Des événements de crues et de non crues, intenses ou lents, survenus sur le territoire depuis 1997.
- Les débits à la station pendant les événements mentionnés ci-dessus.
- Les valeurs des débits de retour de crues.

Pour récupérer ces événements de crues, il faut aller sur le site Hydroportail qui référence les débits ou hauteur d'eau en fonction du temps sur les stations présentes dans sa base de données et prend la forme suivante :



Visuel sur l'hydroportail du débit en fonction du temps à la station de l'Arbresle (fig 13)

Ce graphique est précieux parce qu'il nous permet de visualiser où sont les crues, l'abaque serait trop exhaustif, et surtout illisible, si on prenait toutes les valeurs de débits, c'est pourquoi on se préoccupe uniquement des débits ayant dépassé un certain seuil, ces seuils seront présentés dans les méthodes.

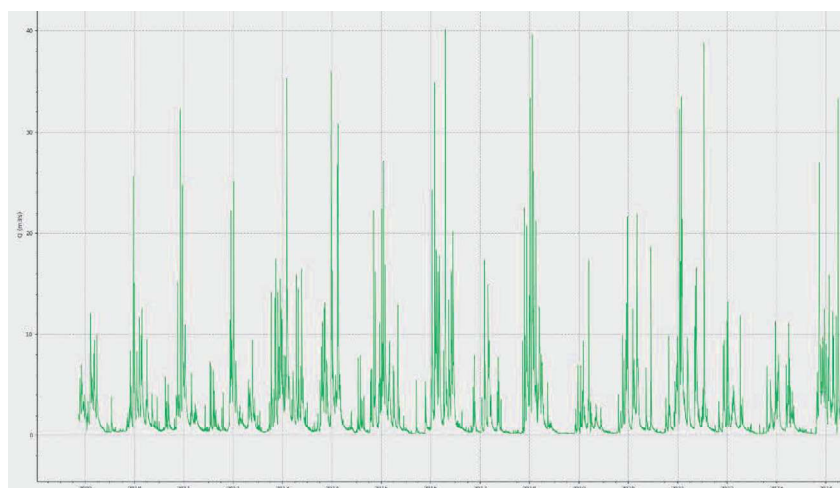
Abaque Pluie/Débit Classé

Le paramètre qui va nous intéresser ici est le débit classé, il se distingue de la valeur commune du débit, catégorisation des débits par leur fréquence de non-retour. Le principe est simple, on va attribuer à chacun des débits présents dans la base de données, une valeur comprise entre 0 et 1 qui représente la fréquence de retour, ou de non-retour suivant la manière dont est fait le calcul, du débit sur le cours d'eau. Dans le cas des fréquences de non-retour de la crue, il est fondamental de comprendre que plus la valeur de la fréquence est élevée, plus le débit est élevé, puisque plus un débit est élevé et moins sa probabilité de retour est faible. À l'inverse, les faibles débits correspondent à des fréquences de non-retour faibles puisqu'ils sont présents la plupart du temps du fait qu'un cours d'eau est majoritairement calme et pas en crue.

On va s'intéresser à la détermination des valeurs de seuils jaunes et oranges. Au lieu de prendre les valeurs de crues biennales et vicennales à la station, on va placer nos seuils à partir des valeurs de crues réellement observées disponibles sur le logiciel Octave qui s'occupe notamment de stocker les valeurs de débits, de hauteurs d'eau et de pluies tombées au niveau des stations de mesure du territoire.

Le principe consiste à établir manuellement les seuils de vigilance des stations en comparant le nombre de dépassements aux valeurs de débit. Par exemple, un débit ayant une période de retour de 2 ans correspond à un débit dépassé environ 10 fois en 20 ans de données. Pour une période de retour de 5 ans, le nombre de dépassements est de 4 à 5 fois en 20 ans de données.

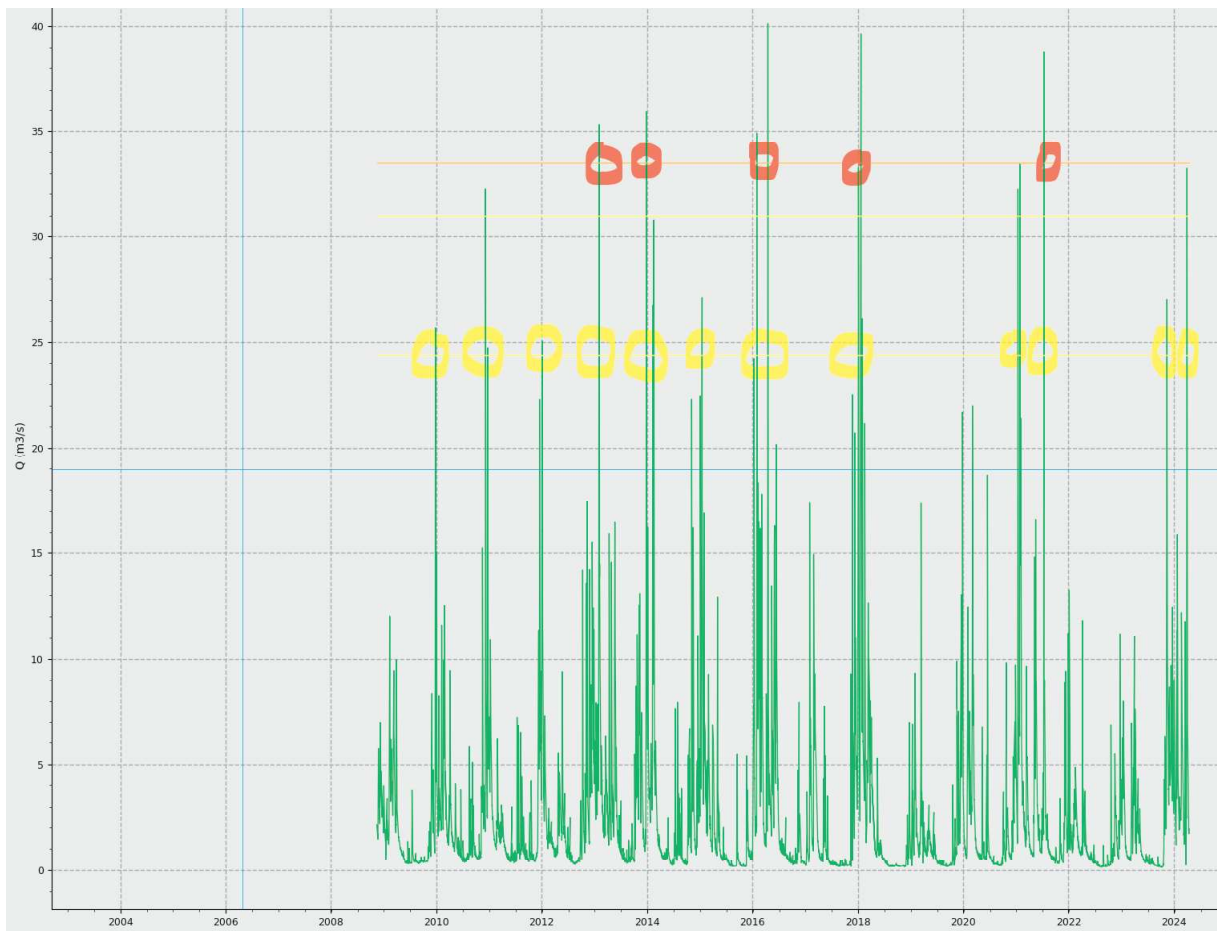
En pratique, on se place dans Octave à une station de mesure, on obtient le graphique suivant :



Visualisation sous Octave du débit de 1997 à 2024 à la station Colombine (fig 14)

Sur ce graphique, on voit les pics de crues sur la totalité de la chronique de débits, il s'agit de compter les pics de crues, en partant du plus haut, ici en Avril 2016, et de descendre de pic en pic, jusqu'à obtenir 10 ou 12 pics pour Q2 et 4 pics pour Q5.

Lorsqu'on a identifié tous les pics de crues correspondant aux crues Q2 et Q5, on peut tracer les seuils inférieurs et supérieurs de chaque couleur de vigilance.



Identification des pics de crues et des seuils à la station de la Colombine (fig 15)

Une fois ces dépassements identifiés, il est possible de déterminer la période pendant laquelle chaque crue s'est produite ainsi que la quantité de pluie tombée pendant cette période. Contrairement à la méthode précédente, nous utilisons les valeurs de débits horaires pour identifier précisément le pic de crue et les jours de pluie associés.

Il est également crucial de récupérer des périodes de fortes pluies sans crue, car elles sont nécessaires pour ajuster précisément les abaques, notamment dans les zones où les données sont insuffisantes. À partir du logiciel Octave, nous extrayons les valeurs horaires des débits pour ces périodes de crues et de non-crues, ainsi que les valeurs journalières de précipitations.

Une fois ces valeurs de débits récupérées, nous appliquons la même méthodologie que la méthode 1 pour déterminer les débits classés associés à la station étudiée, en éliminant les lignes correspondant à des valeurs de pluie inférieures à 5 mm. Nous additionnons les pluies du jour J et du jour J-1, en suivant la même logique de prise en compte du temps de réponse du bassin décrite dans la méthode 1.

Les débits classés sont attribués dans l'ordre décroissant, et les fréquences de non-dépassement sont calculées selon la formule : $f = 1 - \text{rang}/N$, où N est le nombre de débits pris en compte. Enfin, l'abaque peut être créé en plaçant en abscisse la fréquence de non-dépassement et en ordonnée les précipitations mesurées.

Abaque Pluie/Humidité

L'abaque pluie-débit classé permet de prévoir les crues en fonction des précipitations et des débits enregistrés, mais il existe un autre type d'abaque tout aussi utile pour anticiper les crues : l'abaque pluie-humidité. Ce dernier prend en compte le taux de saturation du sol en eau, un paramètre déterminant dans la gestion des risques d'inondation.

Dans notre service, nous recevons quotidiennement une valeur d'humidité à 8h TU. Cette donnée, qui reflète l'état de saturation du sol, est essentielle pour ajuster les prévisions de crues. En effet, un sol déjà saturé par de l'humidité ne pourra absorber de nouvelles précipitations aussi efficacement qu'un sol sec, augmentant ainsi le risque de crue.

L'abaque pluie-humidité est mis à jour deux fois par jour grâce aux bulletins Météo-France. Contrairement à l'abaque pluie-débit classé, qui peut être actualisé en continu grâce aux valeurs de débit disponibles en temps réel, l'abaque pluie-humidité dépend de la mesure quotidienne de l'humidité et de la pluie prévue. Cette limitation impose une mise à jour moins fréquente, mais la donnée reste d'une grande importance pour une prévision précise des crues.

Le facteur humidité est essentiel car il influence directement la quantité d'eau de pluie que le sol peut absorber avant de commencer à ruisseler et à contribuer à une crue. Un sol saturé accélère le processus de ruissellement, augmentant le volume d'eau entrant dans les cours d'eau et, par conséquent, le risque de crue.

Par exemple, après une période de fortes pluies, le sol peut rester saturé pendant plusieurs jours, augmentant le risque de crues même avec des précipitations modérées. En revanche, après une période sèche, le sol peut absorber une quantité significative de pluie, réduisant temporairement le risque de crue.

Le SPCras possède une base de données qui recense toutes les humidités sur l'ensemble des chroniques de temps à chaque station du territoire du SPC. Cette base de données s'alimente en temps réel, chaque valeur d'humidité est renseignée automatiquement chaque jour. Les valeurs d'humidité sur le territoire du SPCras varie généralement entre 40% (grand minimum) et 80% (grand maximum), ces valeurs peuvent varier beaucoup au cours d'une journée selon s'il pleut ou s'il fait très beau et surtout chaud.

La méthodologie pour l'abaque Pluie/Humidité est la même que la méthodologie de l'abaque Pluie/Débit Classé, en remplaçant débit classé par humidité.

Les abaques ont deux données d'entrées différentes : le cumul de pluie et l'indice d'humidité. L'objectif de l'abaque est de trouver une relation simple qui permettrait d'évaluer le niveau de vigilance dans les prochaines 24h. Ces délimitations peuvent prendre la forme de droite ou de segments de droite suivant la répartition des points de crues, la première droite se place entre les points sans vigilance et les points ayant une vigilance jaune (Q2) et la deuxième droite se place entre les points jaunes et orange (Q5). Le but est d'optimiser ces droites de sorte qu'elles délimitent le mieux les zones sur l'abaque. Par exemple, la première droite devra séparer au mieux les points verts et les points jaunes en plaçant un minimum de points verts au-dessus de cette droite pour éviter les fausses alertes et un minimum de points jaunes en-dessous de cette droite pour ne pas manquer d'alertes. Ces droites peuvent être obliques, horizontales ou verticales. Une droite verticale signifierait que la vigilance ne dépend pas du cumul de pluie tombée, mais ne dépend seulement d'un seuil d'humidité à partir duquel on considère être sensible à des crues potentielles. Une droite horizontale correspond à un seuil de pluie à partir duquel le cours d'eau risque de passer en crue, indépendamment de l'humidité du sol. Une droite oblique, quant à elle, dépend à la fois du cumul de pluie et de l'humidité du sol, ce qui correspond à la majorité des cas. À priori, plus on est croissant selon l'humidité, moins de cumul de pluie ne sera nécessaire pour atteindre une crue, ainsi ces seuils sont décroissants.

On rappelle que le but est d'évaluer les performances de ces outils entre eux et par rapport à des outils déjà existants. Il s'agit de trouver une méthode qui nous permette d'évaluer la performance de ces abaques. Le résultat d'une sortie d'abaque est binaire, elle peut soit avoir bien anticipé la crue, soit ne pas l'avoir anticipée. Pour évaluer la performance de l'abaque, on va mettre en comparaison, les résultats obtenus par l'abaque et les résultats effectifs, quatre cas se distinguent alors : l'abaque a vu une crue et la crue était effective (a), l'abaque a vu une crue et il n'y avait pas de crue (b), l'abaque n'a pas vu de crue, mais il y en avait une (c), l'abaque n'a rien vu et il n'y avait rien (d). Ces conditions sont réunies dans le tableau suivant :

		Resultat vigilance pluie-inondation effective	
		Oui	Non
Resultat vigilance pluie-inondation provenant de l'abaque	Oui	a	b
	Non	c	d

Table de comparaison des résultats entre abaque et réalité (fig 16)

L'évaluation des modèles consiste à définir un score prenant en compte tous les éléments du tableau ci-dessus, en les résumant en une valeur qu'on appelle CSI (Critical Success Index). Le CSI correspond à la probabilité d'émettre une bonne vigilance pluie-inondation et se définit par l'expression suivante :

$$CSI = a/(a+b+c)$$

Avec a : les vigilances pertinentes ; b : les vigilances manquées ; c : fausses alertes

L'abaque est considéré comme parfait si son CSI vaut 1 et comme incapable si son CSI vaut 0.

Résultats et performances

Les abaques ont été réalisés sur le cours d'eau de la Vingeanne à la station de Oisilly au nord du territoire du SPC RaS et sur la Turdine à la station de l'Arbresle au Sud du territoire du SPC RaS. La Turdine est un cours d'eau très rapide à réagir tandis que la Vingeanne, elle, est très lente.

La Vingeanne à Oisilly : Abaques

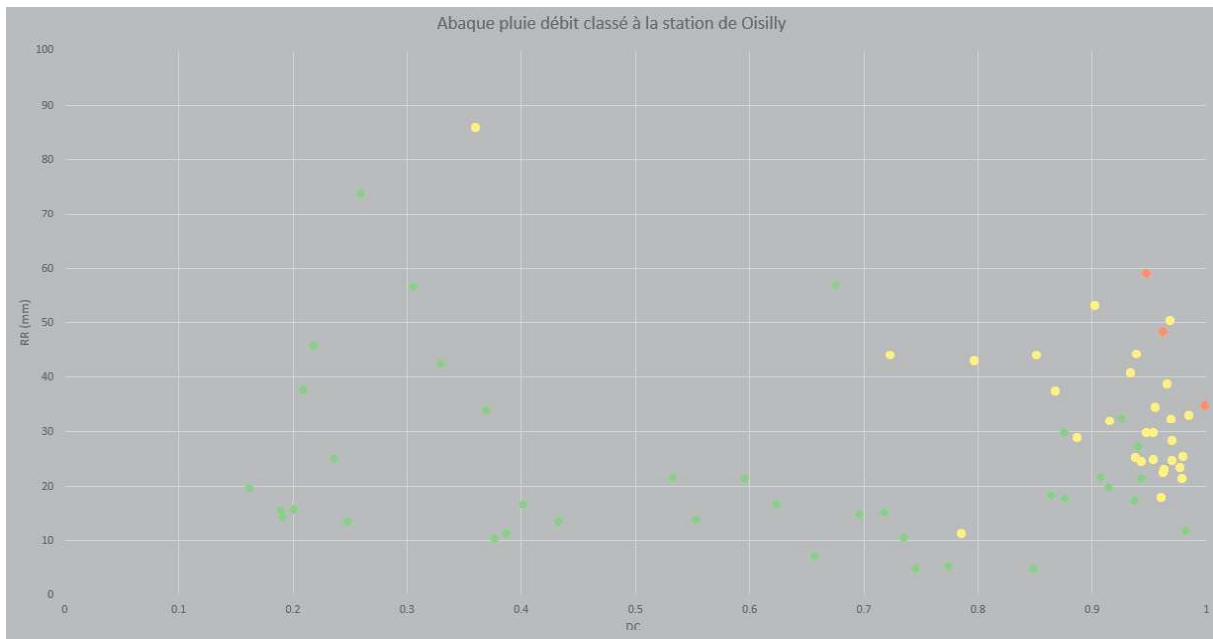
Pluie débit classé

On commence par créer la base de données comme indiqué dans la méthodologie :

Orange						Jaune						Vert					
RR (mm)	date	debit(m3/s)	rang	f (%)	fa (j)	RR (mm)	date	debit(m3/s)	rang	f (%)	fa (j)	RR (mm)	date	debit(m3/s)	rang	f (%)	fa (j)
40.4	03/05/2013	24.425	371	0.96146255	350.933032	22.6	20/01/1990	24.461	366	0.96177410	351.047575	18.4	03/01/1990	12.204	1311	0.8630205	315.294404
35.1	22/01/2018	47.544	16	0.99833801	364.393373	50.5	28/04/1998	26.547	307	0.96811052	353.360341	21.5	04/01/1998	20.837	554	0.94245352	343.995533
59.2	02/05/2013	21.746	508	0.94723174	345.739587	21.5	22/02/1999	30.824	209	0.97829023	357.073932	21.7	17/01/1998	15.681	891	0.9074478	331.218448
						34.7	10/03/1999	22.993	439	0.95439909	348.355666	19.9	01/11/1998	16.375	832	0.9135764	333.455386
						23.2	20/12/1999	24.541	364	0.96218967	351.199231	4.8	13/11/1998	11.421	1460	0.8483432	309.645269
						32.5	27/12/1999	28.798	302	0.96868399	353.549912	10.6	12/12/1998	6.639	2559	0.7341851	267.977563
						33.2	28/12/1999	33.485	154	0.98400332	389.161213	17.8	12/12/1998	13.145	1197	0.8756622	319.616703
						53.2	14/11/2000	15.241	846	0.9017347	329.133167	27.4	29/01/1999	20.565	574	0.94037603	343.237249
						23.6	13/03/2001	29.725	229	0.97621274	396.317848	17.4	04/03/1999	19.822	613	0.93832492	341.728296
						44.1	30/12/2001	11.527	1439	0.85052457	310.441467	4.9	03/04/1999	6.892	2456	0.74488418	271.882726
						37.5	21/02/2002	12.462	1279	0.86714449	316.507739	15.2	14/04/1999	6.204	2718	0.71766906	261.949205
						28.4	04/01/2003	27.041	291	0.96977251	353.966968	14	12/05/1999	3.445	4311	0.55219695	201.551885
						40.9	14/01/2004	19.408	646	0.93289706	340.507427	21.5	13/05/1999	3.985	3898	0.59509712	217.21045
						25.5	17/01/2004	31.155	202	0.97901735	357.341332	16.7	14/05/1999	4.363	3620	0.62303037	227.405360
						44.3	05/03/2006	20.17	597	0.93798691	342.365223	7.3	30/01/2000	4.886	3305	0.65669471	239.69357
						24.9	10/03/2006	27.01	292	0.96966864	353.929054	5.3	03/02/2000	7.881	2177	0.77386517	282.460787
						32.1	02/03/2007	16.451	822	0.91461514	333.834528	21.8	17/04/2000	3.207	4504	0.53214916	194.234445
						11.5	04/02/2010	8.381	2075	0.78446037	286.328036	16.6	12/05/2000	2.153	5770	0.40064402	146.235068
						44.7	06/12/2010	6.338	2676	0.77303179	263.521607	11.8	18/06/2000	2.065	5905	0.38667096	141.116651
						29.9	22/12/2010	22.615	457	0.93525294	347.673211	10.5	28/05/2000	2.002	6010	0.37571414	137.13566
						17.9	09/01/2011	24.133	387	0.95980056	350.327205	12	28/11/2000	32.278	177	0.98161421	358.289187
						43.1	16/12/2011	8.856	1965	0.79588657	290.498598	32.7	24/11/2000	18.195	720	0.92521095	337.701776
						23.4	01/02/2013	20.047	605	0.93715392	342.061909	34.2	10/06/2010	1.964	6078	0.36865067	134.552495
						29.9	02/05/2013	21.746	508	0.94723174	345.739587	13.5	16/06/2010	2.368	5464	0.43242963	157.836313
						86.1	04/11/2014	1.919	6164	0.35971746	131.296873	25.2	06/06/2010	1.411	7358	0.23569128	86.027319
						38.8	04/01/2018	25.159	339	0.96478654	352.147086	13.6	29/05/2010	1.453	7243	0.24763683	90.387452
						29	11/03/2010	13.039	1093	0.80646515	323.55970	19.7	21/07/2010	1.151	8074	0.16131473	50.6807921
						24.7	05/03/2020	20.825	556	0.94224577	343.919705	14.4	01/08/2010	1.244	7792	0.19060974	69.572564
						25	30/03/2024	22.663	453	0.93294484	347.824868	15.6	14/08/2010	1.239	7808	0.18894775	68.5659292
												37.8	15/08/2010	1.315	7620	0.20847616	76.0937987
												15.7	23/09/2010	1.279	7705	0.19984683	72.8710917
												45.4	24/09/2010	1.34	7538	0.21699387	79.2027631
												30	14/11/2010	13.121	1201	0.8752467	319.465046
												14.8	17/03/2024	5.705	2927	0.69595928	254.025138
												31	27/04/2013	3.237	3130	0.61481275	298.228329
												56.7	28/07/2013	1.685	6697	0.30435234	111.088605
												42.5	11/05/2020	1.785	6463	0.32865898	119.960528
												73.9	03/10/2020	1.495	7139	0.25843981	84.3305287

Base de données de la méthode 2 de l'abaque pluie débit classé (fig 19)

Les seuils utilisés ont été identifiés grâce à Octave au pas de temps horaire, les débits récupérés sont donc des débits à l'heure, on peut observer les vrais pics de crue cette fois, les pluies associées au débit de pointe correspondent réellement aux pluies qui ont fait réagir le bassin.



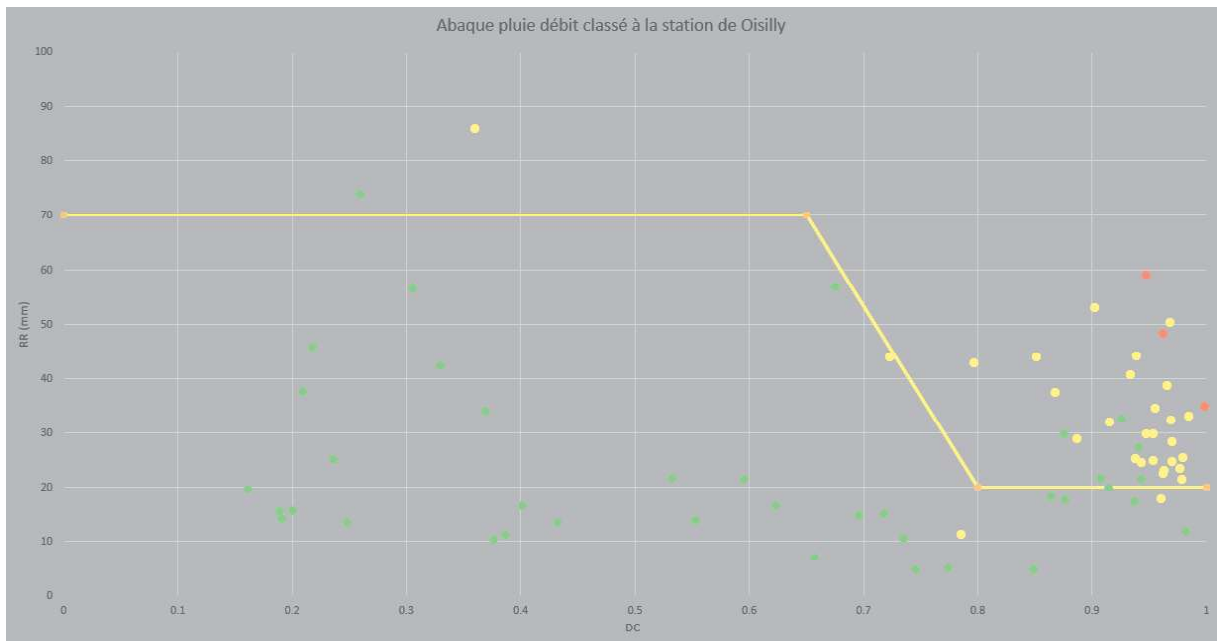
Abaque Pluie/Débit Classé à Oisilly avec débits horaires (fig 20)

Ce nouvel abaque pluie débit classé est bien mieux réparti que l'abaque précédent, le nombre de points est plus faible, ce qui permet d'épurer l'abaque. Un abaque n'a pas besoin d'un nombre de points importants pour être exploitable, il faut simplement que les épisodes soient répartis tout le long de l'intervalle $[0,1]$ avec des valeurs de pluie variées. On voit bien sur l'abaque que le passage en vigilance jaune se distingue en deux parties, la première partie, à gauche, représente les fortes pluies avec un faible débit classé de départ et la deuxième partie, à droite, représente les pluies moyennes, voire faibles mais avec un débit classé de départ élevé, à savoir, au-dessus de $DC = 0.7$.

Seuils de vigilance

Météo France Nord Est

Météo-France a établi des seuils pluie-inondation, ce qui signifie qu'au-delà d'un certain cumul de pluie tombée en 24h ou 48h, Météo-France déclenche la vigilance jaune sur la zone AP en question. On récupère les seuils de pluie de Météo-France Nord Est puisque le bassin de la Vingeanne est situé au Nord Est de la France. Selon leurs critères, ils considèrent qu'entre 30 mm et 70 mm de pluie tombée en 24h, la zone AP peut être mise en vigilance jaune pluie. Ces seuils bas et haut de vigilance sont très utiles pour les zones où on manque d'information, ce qui va assurément arriver avec l'élargissement des zones de vigilance prévu par la couverture totale. On va utiliser pour les seuils haut et bas de cet abaque, les valeurs données par Météo France Nord Est. Ainsi, on construit le seuil jaune en fixant une horizontale en seuil haut à 70 mm pour les petits débits et un seuil bas à 20 mm pour les forts débits. Enfin, on relie les seuils par un segment dont la pente est placée de façon à optimiser le score de performance. On obtient cette nouvelle version de l'abaque :



Abaque pluie débit classé avec seuils MF Nord Est (fig 21)

On voit que le seuil bas de l'abaque est bon. En effet, le seuil encadre la plupart des points jaunes à l'exception du dernier situé vers DC = 0.96 qui doit être laissé en-dessous du seuil, sinon en la faisant passer en-dessous du point jaune, on ajouterait 3 points jaunes au-dessus du seuil ce qui abaisserait le score de performance de l'abaque.

Quant au seuil haut, il est au-dessus de presque tous les points verts entre DC = 0 et DC = 0.7 à l'exception d'un point vert. L'abaque en prenant en compte ces seuils haut et bas obtient le score de performance suivant :

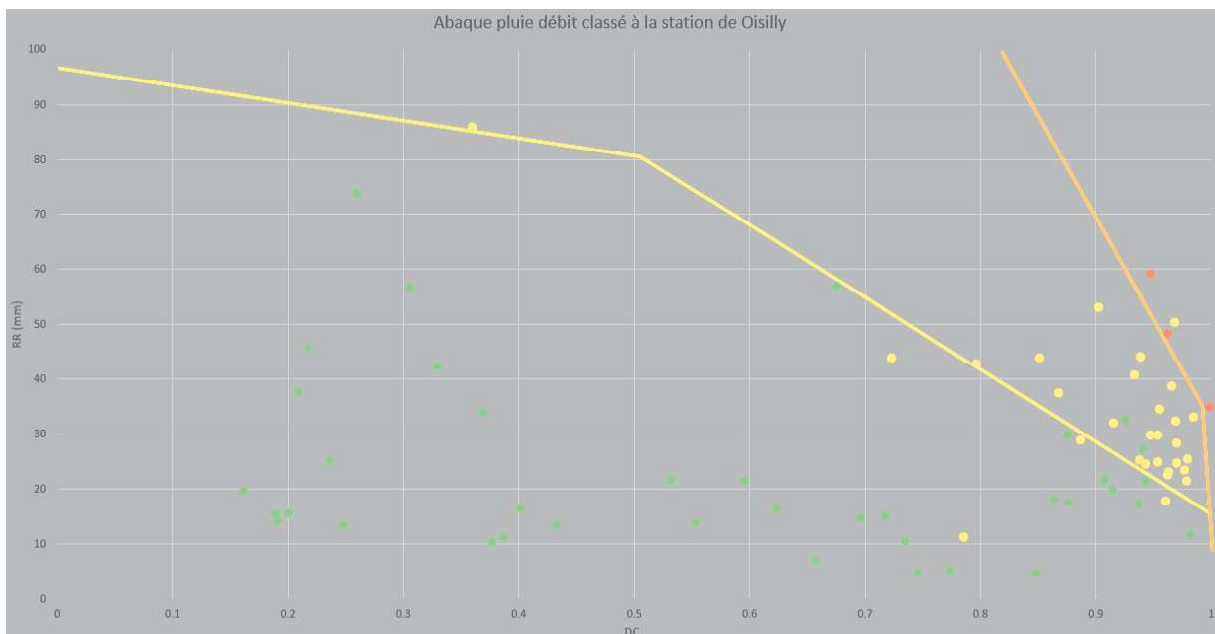
	Performance MF Nord Est Oisilly DC
a	26
b	2
c	7
CSI	0.742857143

Score de performance de l'abaque Pluie DC à Oisilly avec seuils MF NE (fig 22)

On peut interpréter le score de performance comme une probabilité, c'est-à-dire qu'obtenir un score de performance de 0.74 revient à dire que la probabilité que l'abaque voit juste est de 0.74, donc une chance sur 4 de manqué la vigilance. Mais, au vu des remarques faites sur les valeurs seuils de Météo-France, on voit que l'abaque n'est pas optimisé et qu'il reste des ajustements à faire pour obtenir un score encore meilleur.

Personnalisés

Il s'agit maintenant de placer les seuils de vigilance sur l'abaque. On s'aide de la répartition épisodes de crues jaunes pour tracer le seuil de vigilance jaune. Sur un abaque, un seuil ne correspond pas à une valeur seuil, il est souvent segmenté en deux ou trois parties suivant le nombre de données qu'on possède et leur répartition sur l'abaque. Le but du seuil de vigilance est qu'il sépare les points verts des points jaunes et les points jaunes des points orange. Pour le seuil jaune, il faut tracer une droite ou des morceaux de droites de sorte qu'il y ait le plus points jaunes au-dessus et le plus de points verts en dessous. Il est impossible ici de séparer parfaitement les points jaunes des points verts, dans ce cas, il faut faire des compromis, tout en gardant en tête qu'un point jaune au-dessus du seuil a plus d'importance qu'un point vert en dessous au regard de la formule qui calcule les performances d'un abaque. Au vu de la répartition des points sur l'abaque, il est plus simple de tracer le seuil jaune sur la partie droite de l'abaque par le nombre de point, on trace un segment qui nous donne une valeur de performance, puis on réitère jusqu'à obtenir la valeur optimale de cette partie de l'abaque. Pour la partie gauche, on pourrait être tenté de tracer un seuil horizontal passant en dessous du premier point jaune et au-dessus du point vert le plus haut, mais il faut tenir compte du fait que plus le débit est faible, plus il faut de cumul de pluie pour faire réagir le bassin. Ainsi, le seuil jaune sur cette partie est également en pente. Les deux ensembles donnent l'abaque suivant :



Abaque pluie débit classé à Oisilly avec seuils personnalisés (fig 23)

Le score de performance associé à cet abaque se trouve dans ce tableau :

	Oisilly seuils personnalisés
a	25
b	2
c	4
CSI	0.806451613

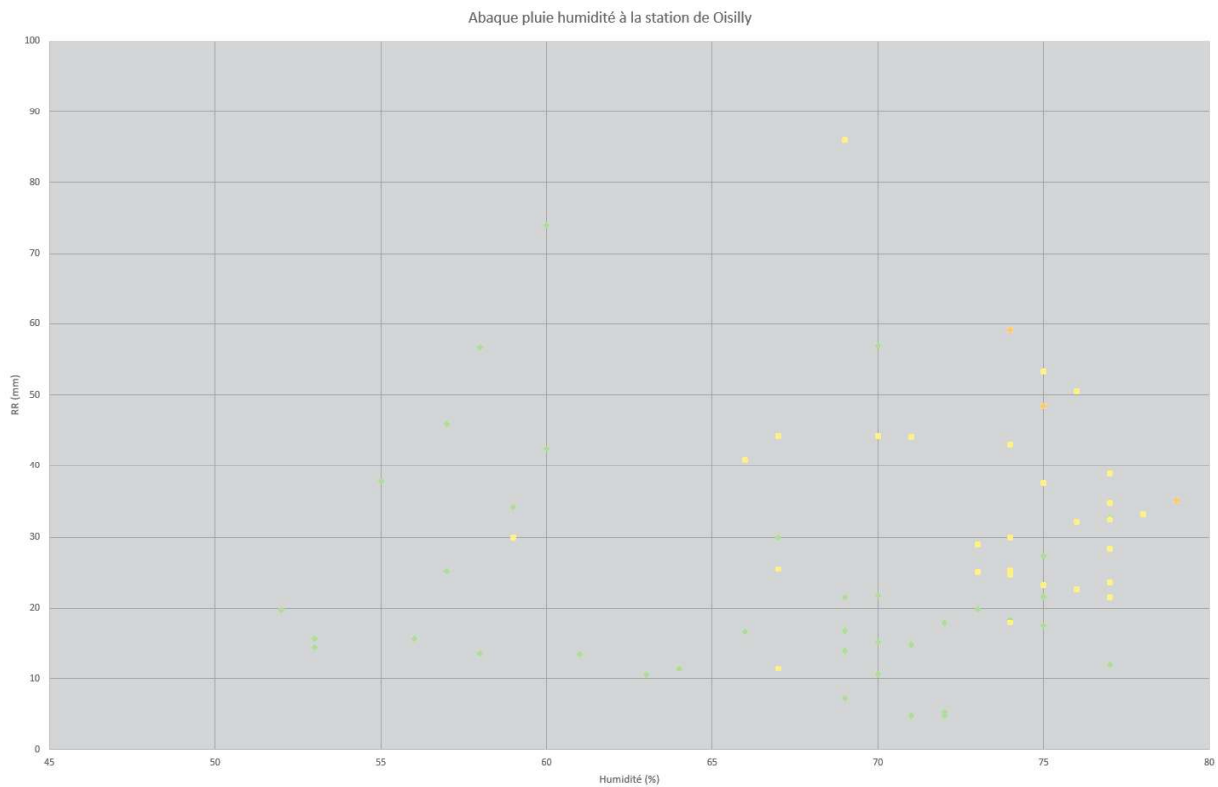
Score de performance de l'abaque Pluie DC à Oisilly avec seuils personnalisés (fig 24)

Ce score de performance est encore meilleur que l'abaque avec les seuils de Météo-France, en effet, on a 4 chances sur 5 de faire une vigilance juste.

Pluie humidité

Pour l'abaque pluie humidité, on récupère la même base de données des chroniques de crues que celle de l'abaque pluie débit classé car les dates et les cumuls de pluie sont les mêmes pour les deux abaques, c'est seulement une des deux données d'entrée qui changent, en l'occurrence le débit classé est remplacé par l'humidité HU (%) du sol. Dans le tableau des données, on supprime la colonne des débits et du classement des débits et on lui ajoute une colonne humidité. Dans la pratique, pour récupérer l'humidité, on utilise la base de données des humidités du SPC qui se nomme « humidite_sim2.mbd ». Puis, on utilise Sacha pour visualiser l'humidité au jour voulu, à savoir, à toutes les dates de crues renseignées dans la base de données de l'abaque. Ainsi, on peut affecter une valeur d'humidité par jour à chaque date et donc à chaque cumul de pluie, ce qui aboutit à l'abaque pluie humidité.

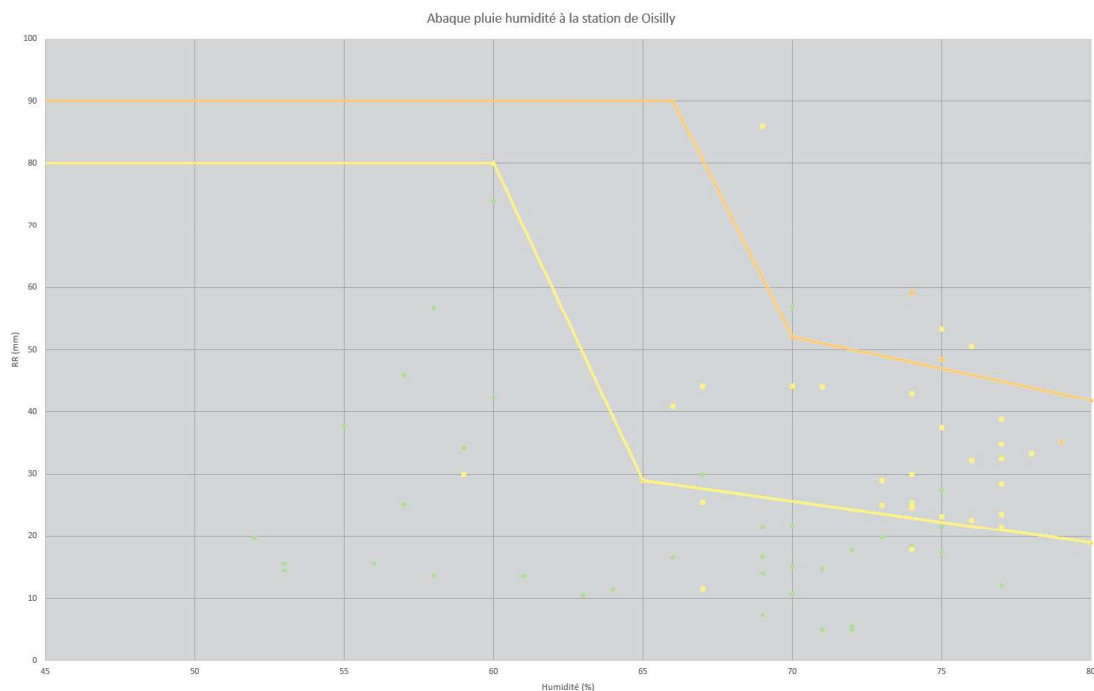
Voici l'abaque pluie humidité à la station de Oisilly :



Cet abaque pluie humidité est très similaire à l'abaque pluie débit classé. En effet, on remarque la même répartition des points verts, jaunes et oranges sur l'ensemble de l'abaque. On remarque une disparité très forte entre les fortes humidités et les faibles humidités, il y a trois explications à cela :

- 1) Le bassin de Oisilly est lent à réagir ce qui signifie qu'entre le moment où il aura plus assez pour faire réagir le bassin et le moment où il réagira, il se sera passé assez de temps pour que l'humidité du jour où l'on fait la vigilance ait augmenté, jusqu'à atteindre 60%, voire plus. Partant de ce constat et du peu de chroniques de données, il est normal qu'on observe très peu de point jaune dans la partie entre 40% et 60% d'humidité.
- 2) Durant la période de crue (Automne, Hiver, Printemps), le sol est généralement assez humide, au-delà de 60%. Ainsi, on trouve difficilement lors de ces saisons des crues qui peuvent se placer dans la partie gauche de l'abaque.
- 3) Sur le territoire du SPCras, les cumuls de pluie depuis plus de vingt ans ne sont pas suffisants pour faire passer le cours d'eau de la Vingeanne en vigilance jaune en moins de 24h

La distinction entre les événements sans crue et avec crue jaune à droite de l'abaque se distingue plus facilement que pour l'autre abaque. On peut donc tracer plus facilement les seuils jaunes et oranges de l'abaque :



Abaque pluie humidité à la station de Oisilly avec seuils personnalisés (fig 26)

Une valeur seuil à 80 mm a été fixée pour le seuil haut de la première moitié de l'abaque pour passer au-dessus du point vert le plus haut, puis on a stabilisé le seuil autour de 20 mm pour les grandes humidités. On aurait pu utiliser les seuils de pluie de Météo-France, mais on aurait eu un score de performance plus faible, à cause du point vert cité précédemment et des quelques points verts situés proches mais au-dessus de 20 mm vers les grandes humidités.

Le score de performance de cet abaque est :

Oisilly HU seuils personnalisés	
a	24
b	3
c	4
CSI	0.774193548

Score de performance de l'abaque Pluie HU à Oisilly (fig 27)

Le CSI de cet abaque est très élevé, il est en ordre de grandeur similaire au CSI de l'abaque pluie débit classé, même s'il lui reste inférieur.

AVI

Les résultats des formules AVI à Oisilly se regroupent au sein d'un tableau visualisable sur Sacha, ce tableau recense le nombre d'annonce effectuée produites par les formules AVI, parmi ces annonces, il y a des erreurs. Une erreur correspond à un dépassement du seuil d'après la formule AVI, mais le débit réel lors de l'évènement n'a pas dépassé le seuil. On retrouve également dans le tableau, le temps d'anticipation de la crue, ainsi que le débit maximum anticipé. Voici le tableau des résultats de la formule AVI à Oisilly :

C	C	C	C
Nb annonces	21	21	21
Nb erreurs	15	15	15
Seuil annoncé le	Anticip	Qmax-obs	HUabs
Seuil annoncé le (h)		[t - t+35]	%
27/04/1998 13:00		35.7	73
23/02/1999 16:00		44	77
10/03/1999 15:00	3		77
27/12/1999 08:00		40.2	76
29/12/1999 15:00		44.8	78
13/11/2000 22:00		35	70
12/03/2001 20:00		45.2	75
19/03/2001 02:00		43.5	77
31/12/2001 00:00	1		71
18/01/2004 00:00		45.5	78
10/03/2006 08:00	4		72
07/12/2010 07:00	24		67
18/12/2011 11:00		43.2	76
05/01/2012 02:00		44.5	77
03/02/2013 17:00		43.4	76
02/05/2013 23:00		41	74
06/03/2016 15:00		42.7	76
04/01/2018 11:00	32		75
19/01/2018 14:00	12		75
17/03/2018 15:00		42.4	76
07/03/2020 14:00		44.9	76

Tableau des annonces vues par la formule AVI à Oisilly (fig 28)

D'après le tableau, il y eu 21 annonces de dépassement des seuils, dont 15 erreurs d'annonce, ce qui signifie que les formules AVI n'auraient vu juste que 6 fois sur 21 annonces. Ce ratio est très faible et on pourrait penser qu'AVI n'est pas performant pour l'anticipation de crue. On ne le voit pas sur le tableau, mais dans la moitié des cas considérés comme étant des erreurs, le débit n'a pas dépassé le seuil de très peu, à 1m³/s ou 2m³/s près. Dans la pratique, les prévisionnistes prennent en compte 3 scénarios : BP min, BP max et sympto. Les simulations avec les données du BP min et du BP max devraient, en général, encadrer la courbe observée. Partant de ce constat, il arrive des situations où le scénario BP min reste inférieur au seuil tout en ayant un scénario BP max supérieur au seuil ce qui laisse la responsabilité aux prévisionnistes le choix de déclencher la vigilance ou non, choix

De plus, certains évènements ont franchi les seuils de vigilance sans que les formules AVI ne les détectent à cause de la neige. Lorsque la neige fond, elle peut provoquer des crues par excès de débit, mais ce n'est pas détectables par AVI car les stocks de neige ne sont pas pris en compte dans ces formules. En prenant en compte ces remarques, on aboutit à 5 erreurs, donc 16 annonces justes. Cela donne le score de performance suivant :

	Performance AVI à Oisilly
a	16
b	5
c	0
CSI	0.761904762

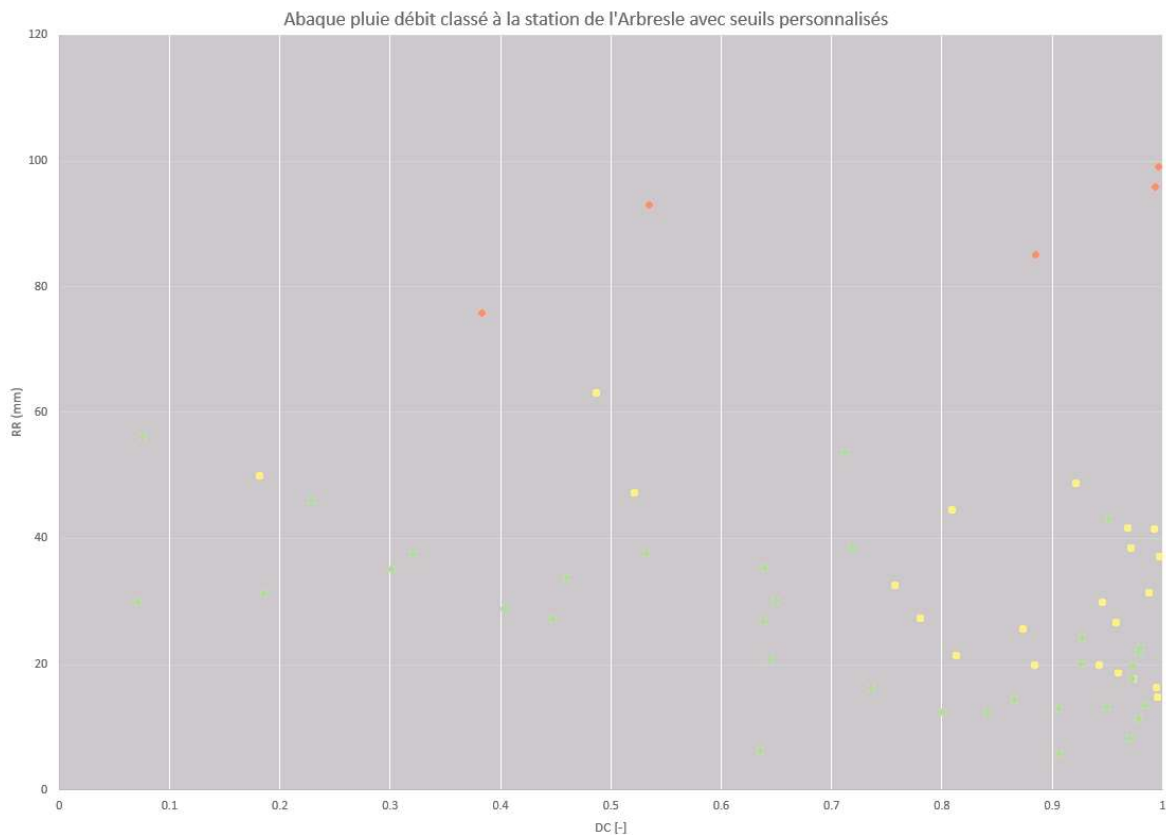
Score de performance de la formule AVI à Oisilly (fig 29)

La Turdine à l'Arbresle : Abaques

Pluie Débit Classé

On a vu dans la partie précédente que la méthode 2 de l'abaque pluie débit classé était plus pertinente que la méthode 1, on va donc n'utiliser que cette seconde méthode à la station de l'Arbresle.

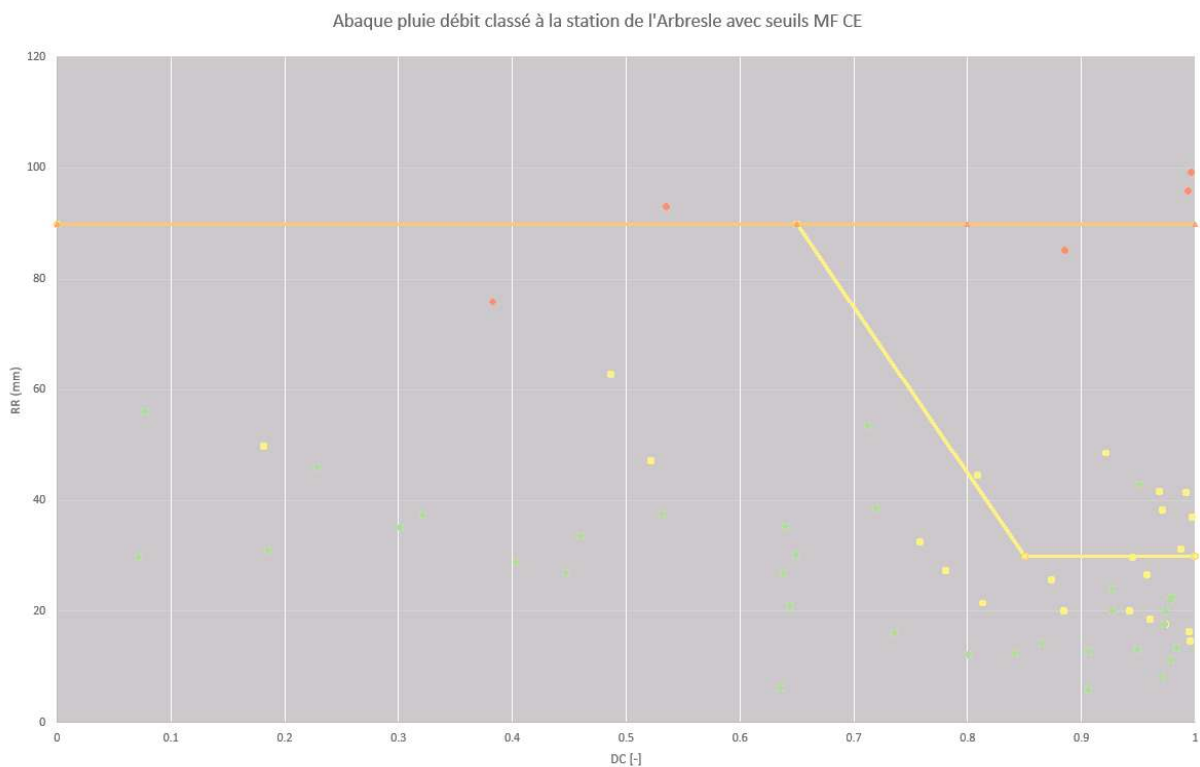
De la même manière qu'à Oisilly, on récupère les évènements de pluie, les cumuls de pluie, les débits, puis on classe ces débits, on obtient l'abaque suivant :



Cet abaque contient une bien meilleure répartition des points jaunes au niveau des petits débits. De même, les points orange sont plus présents à la station de l'Arbresle qu'à Oisilly. La présence de point jaune dans la partie gauche est favorisée par la forte réactivité de la Turdine qui a un temps de réponse aux crues de l'ordre de 16h ce qui est nettement plus rapide que la réponse aux crues de la Vingeanne.

Seuil Météo-France Centre Est

On récupère les seuils de pluie de Météo-France Centre Est puisque le bassin de la Turdine est situé en Rhône-Alpes. Selon leurs critères, ils considèrent qu'entre 30 mm et 90 mm de pluie tombée en 24h, la zone AP peut être mise en vigilance jaune pluie. On va utiliser pour les seuils haut et bas de cet abaque, les valeurs données par Météo France Centre Est. Ainsi, on construit le seuil jaune en fixant une horizontale en seuil haut à 90 mm et un seuil bas à 30 mm et ensuite on ajuste la pente pour optimiser le score de performance. On obtient cette nouvelle version de l'abaque :



On voit que le seuil bas de l'abaque n'est pas bon, en effet, la ligne de vigilance jaune passe au-dessus de beaucoup d'évènements jaunes. Le seuil haut quant à lui ne voit pas 3 évènements dans la zone des faibles débits, ce qui n'est pas acceptable pour un abaque, sachant que ces 3 points jaunes sont les seules données qui nous permettent de pouvoir fixer un seuil dans cette partie de l'abaque.

Cet abaque avec les seuils de Météo-France Centre Est obtient le score de performance suivant :

	Performance abaque DC Arbresle MF CE
a	7
b	1
c	14
CSI	0.318181818

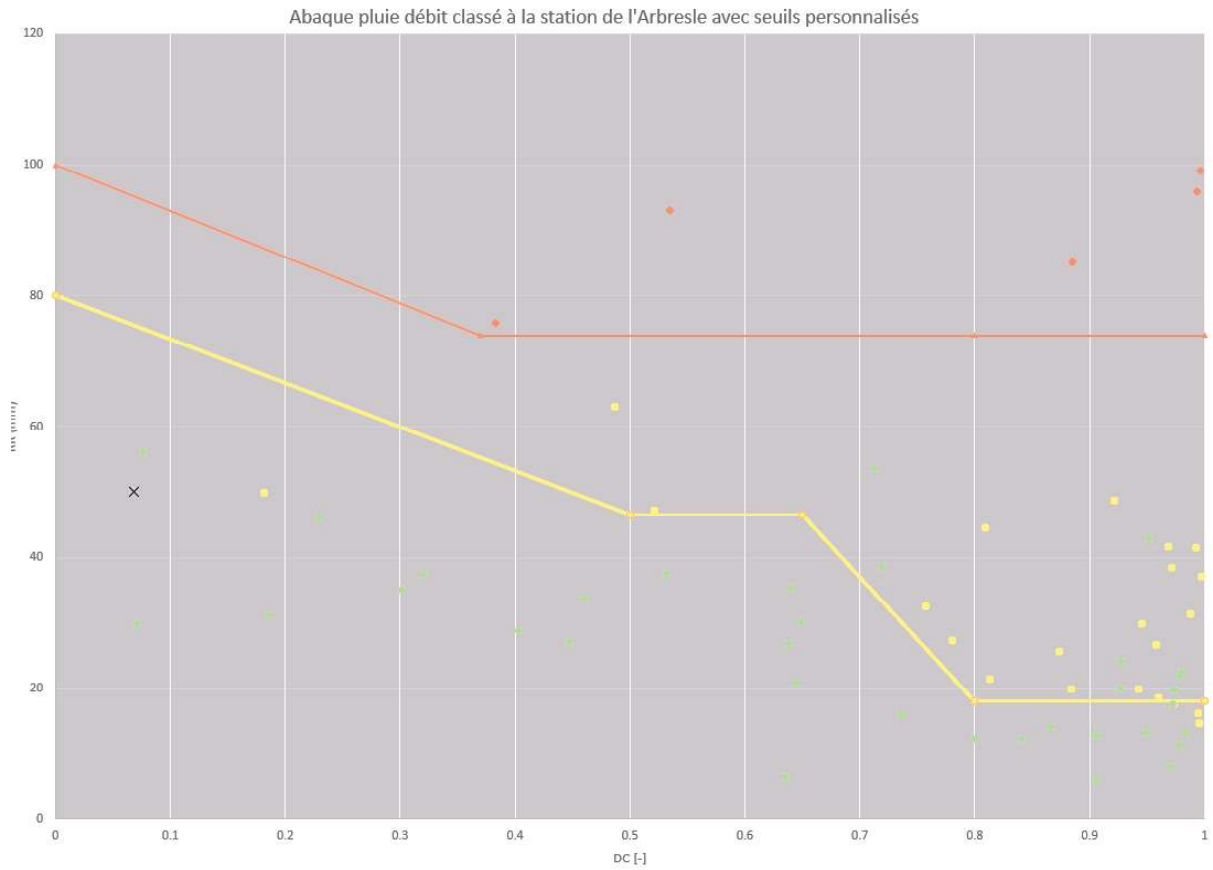
Score de performance de l'abaque Pluie DC à l'Arbresle seuils MF CE (fig 31)

Ce score est très faible, plus de 2 chances sur 3 de se tromper sur la vigilance d'un cours d'eau. Cet abaque n'est pas exploitable avec de tels seuils, il est nécessaire de créer les seuils à la main.

Seuils personnalisés

Tous les points orange sont placés de sorte qu'on puisse tracer facilement le seuil orange en fixant une valeur seuil, une valeur légèrement inférieure au cumul de pluie correspondant au premier point orange.

Pour le seuil jaune, il faudra le diviser en 3 parties comme les abaques précédents. Pour la partie gauche de l'abaque, le premier point jaune correspond à un cumul de pluie de l'ordre de 50 mm, avec un DC faible, ce point ne correspond pas à la norme, mais à un évènement ponctuel de fonte de neige. Il est important de ne pas prendre en compte ce point pour le seuil jaune, au risque de commettre des erreurs dans la pratique. Le seuil jaune est décroissant à mesure qu'on augmente le débit classé, on trace alors une pente pour la partie gauche. Pour la partie droite, on fixe une valeur seuil qui englobe la plupart des points jaunes correspondant aux forts débits classés. Finalement, on obtient ces seuils :



Abaque pluie débit classé à l'Arbresle avec seuils personnalisés (fig 32)

Le score de performance de cet abaque est :

	Performance abaque DC Arbresle
a	18
b	8
c	4
CSI	0.6

Score de performance de l'abaque Pluie DC à l'Arbresle seuils personnalisés (fig 33)

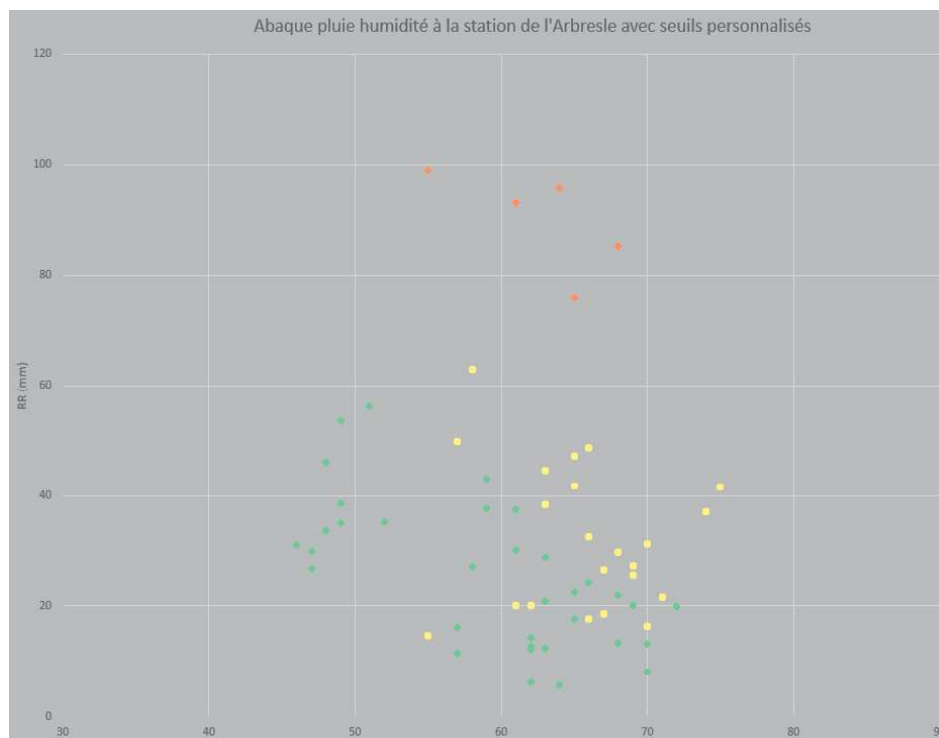
Ce score de performance est bon, 3 chances sur 5 de faire le bon choix de vigilance. Il est moins élevé que les scores d'abaque à Oisilly, mais le but est de comparer les outils sur un même territoire.

Comparons ce résultat à celui de l'abaque pluie humidité.

pluie humidité

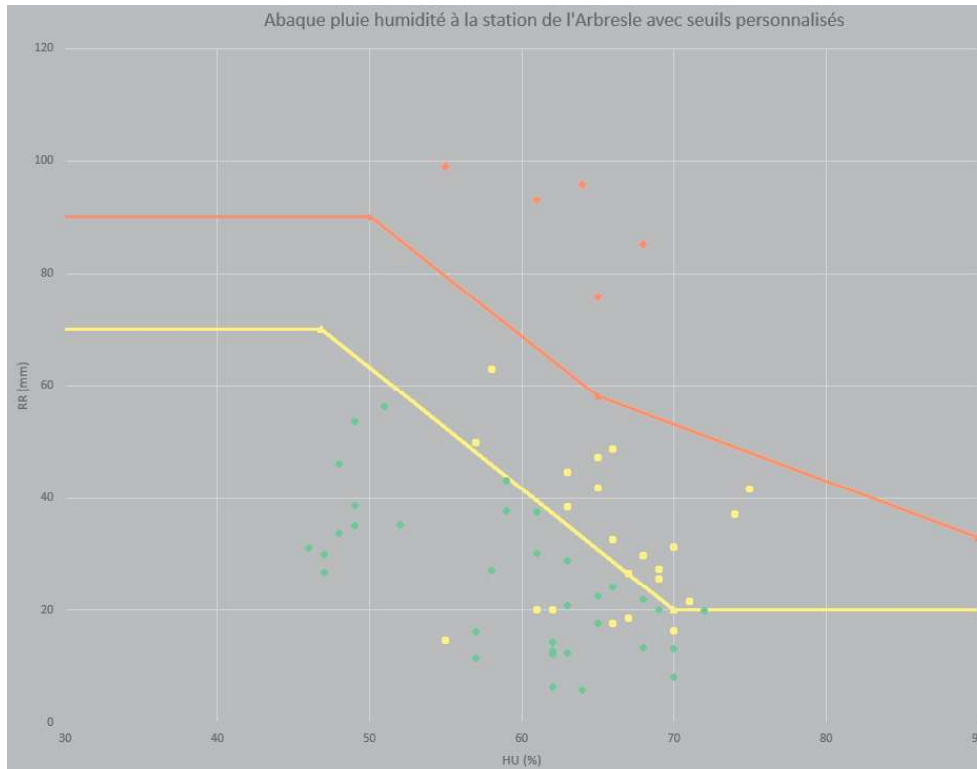
Pour cette partie les seuils Météo-France donnent des résultats aberrants, c'est pourquoi nous ne les utiliseront pas.

On utilise les mêmes évènements que ceux utilisés dans l'abaque pluie débit classé, on obtient l'abaque suivant :



Abaque pluie humidité à la station de l'Arbresle (fig 34)

Les points sont très centrés et proches, on voit une nette distinction entre les points verts, jaunes et oranges, ce qui est pratique pour créer les seuils, mais laisse très peu de marge d'erreur. Il faudra compter sur une bonne précision des prévisions de pluie pour pouvoir être le plus précis possible sur l'abaque. Le bassin est très réactif, quand il est déjà humide, même un cumul de pluie suffirait à faire réagir le bassin. On fixe alors un seuil pour les grandes valeurs d'humidité du bassin à 20 mm de cumul de pluie. Compte-tenu des petites dimensions de la Turdine, il y a besoin de moins de pluie pour faire réagir la Turdine que la Vingeanne, ainsi on fixe le seuil de pluie à 60 mm. En suivant la diagonale séparant les points jaunes des points verts, on obtient les seuils suivants :



Abaque pluie humidité à l'Arbresle avec seuils personnalisés (fig 35)

Le score de performance de cet abaque est :

	Performance abaque HU Arbresle Perso
a	16
b	0
c	6
CSI	0.727272727

Score de performance de l'abaque Pluie HU à l'Arbresle (fig 36)

On obtient un très bon score d'abaque avec aucune fausse alerte, mais un peu d'alerte manquée ce qui est pénalisant. Cet abaque semble être plus performant que l'abaque pluie débit classé. Il reste à comparer avec les performances de la formule AVI.

AVI

C	C	C	C
Nb annonces		23	23
Nb erreurs		21	21
Seuil annoncé le	Anticip	Qmax-obs	HUabs
Seuil annoncé le	(h)	[t - t+35]	%
21/10/1999 20:00			21
20/10/2001 19:00			16.2
14/11/2002 22:00			25.2
23/11/2002 14:00	30		
04/02/2003 04:00			23.8
30/11/2003 15:00	30		
25/10/2004 06:00			7.24
03/11/2004 03:00			23.2
06/04/2005 21:00			17.7
15/04/2005 11:00			21.4
09/04/2006 00:00			27.9
29/04/2007 18:00			5.21
07/07/2007 20:00			13.6
05/08/2007 23:00			13
28/08/2007 17:00			10
29/08/2007 19:00			10
10/04/2008 08:00			13.9
06/02/2009 16:00	abs	abs	
21/05/2012 06:00			10.5
15/05/2013 01:00			8.36
03/11/2014 06:00			15.1
14/11/2014 03:00			25.3
28/12/2021 11:00			20.3
31/03/2024 01:00			15.9

Tableau des annonces vues par la formule AVI à l'Arbresle (fig 37)

D'après le tableau, on observe 23 annonces de dépassement des seuils, dont 21 erreurs d'annonce, ce qui signifie que les formules AVI n'auraient vu juste que 2 fois sur 23 annonces. On se retrouve dans le même cas que pour la formule AVI à Oisilly. La plupart des erreurs sont très proches du franchissement du seuil jaune et aurait probablement été signalé comme crue jaune lors de l'évènement. En prenant en compte ces remarques, on aboutit à 5 fausses alertes, donc 18 annonces correctes. Le score de performance d'AVI est le suivant :

Performance AVI à l'Arbresle	
a	21
b	5
c	0
CSI	0.807692308

Score de performance de la formule AVI à l'Arbresle (fig 38)

Conclusion des résultats

Il s'agit de synthétiser les résultats obtenus de chaque méthode en listant les avantages et les inconvénients des 3 méthodes.

Abaque Pluie Humidité :

Avantages :

- Utilise un nombre limité de données en entrée, à savoir les précipitations sur 24 heures (RR24) et l'humidité. Cela simplifie son utilisation en nécessitant peu de paramètres pour effectuer les calculs.
- Sa prise en main est relativement facile, ce qui en fait un outil accessible pour les utilisateurs sans besoin d'une expertise poussée
- La base de données est simple à créer

Inconvénients :

- Malgré ces avantages, l'outil reste limité par sa simplicité. Étant un modèle statistique, il n'offre pas de marge d'amélioration ou de personnalisation sur le fond de la méthode. Cette limitation peut restreindre l'usage du modèle
- Étant un nouvel outil, sa fiabilité reste à prouver lors des crues futures
- Les résultats obtenus sont binaires, limitant ainsi la possibilité d'une analyse plus fine ou experte
- On ne peut pas se fier aux seuils de pluie de Météo-France pour les seuils des abaques.

Abaque Pluie Débit Classé :

Avantages :

- La base de données est simple à créer
- Cette méthode permet de classer les débits dans un ordre d'importance relativement aux crues, cela permet de mieux comprendre le comportement du cours d'eau pour lequel l'abaque est créé

Inconvénients :

- Comme pour l'Abaque Pluie HU, il s'agit d'un modèle statistique sans possibilité d'amélioration sur le fond de la méthode. Les résultats obtenus sont binaires, limitant ainsi la possibilité d'une analyse plus fine ou experte.
- Étant un nouvel outil, sa fiabilité reste à prouver lors des futures crues
- On ne peut pas se fier aux seuils de pluie de Météo-France pour les seuils des abaques. Enfin, les données d'entrée requièrent des précipitations sur 24 heures (J ou J-1) et le DC, nécessitant une station de mesure calibrée, ce qui est une contrainte

AVI :

- Il est capable d'anticiper l'heure de franchissement d'un seuil, et peut même repérer des crues avec 24 heures d'avance. Ces capacités en font un outil

particulièrement utile pour la prévision et la gestion des crues. De plus, il est déjà utilisé par le Service de Prévision des Crues (SPC), ce qui atteste de sa validité et de son efficacité.

- Par ailleurs, l'AVI spatialise la pluie dans le temps, ce qui devrait théoriquement le rendre plus performant que les abaques traditionnels
- Malgré ses avancées, l'outil AVI présente aussi des inconvénients notables. Il n'annonce un franchissement que lorsque le seuil haut est dépassé, ce qui peut limiter sa réactivité ou sa précision.
- En outre, le taux de fausses annonces est supérieur à celui des abaques, ce qui peut entraîner des fausses alertes ou des interventions inappropriées

Au terme de cette étude sur la prévision des crues, plusieurs outils de prévision ont été comparés, l'abaque pluie débit classé, l'abaque pluie humidité et la méthode AVI. Les résultats montrent que chaque outil présente des performances distinctes selon la réactivité du bassin hydrographique.

Pour un bassin très réactif, l'abaque reliant pluie et humidité s'avère le plus performant, car il permet de mieux distinguer les événements susceptibles de provoquer des crues de ceux qui ne le sont pas. Pour un cours d'eau rapide, il arrive qu'une crue se forme et se déforme en l'espace d'une journée, ainsi le débit au jour J et au jour J+1 sera resté en dessous du seuil sans que l'abaque ne voie une crue. En revanche, pour un cours d'eau dont la réponse aux précipitations est plus lente, l'abaque pluie-débit classé s'est révélé plus pertinent. Ce dernier, en moyenne, obtient les meilleurs scores de performance sur les deux types de cours d'eau étudiés, ce qui en fait l'outil le plus performant parmi ceux analysés.

Il est important de noter que les scores élevés obtenus par les abaques sont en grande partie dus à la création de seuils optimisés pour maximiser ces performances. Cependant, la méthode AVI, bien que moins performante sur le plan des scores, ne doit pas être écartée. En effet, elle permet une anticipation des crues en fournissant des informations cruciales notamment le franchissement d'un seuil.

Toutefois, ces conclusions ne peuvent être généralisées à l'ensemble des cours d'eau, étant donné que les tests n'ont été réalisés que sur deux bassins (la Vingeanne et la Turdine). Il est donc possible que les résultats obtenus soient spécifiques à ces cours d'eau et ne reflètent pas la réalité d'autres bassins. Une étude plus étendue serait nécessaire pour valider ces conclusions à une échelle plus large.

Conclusion générale et ouverture

Au terme de cette étude, il apparaît clairement que chaque outil de prévision des crues possède des caractéristiques et des qualités spécifiques, qui, bien que différentes, peuvent être complémentaires. La formule AVI se distingue par la précision de ses prévisions, notamment en offrant une anticipation horaire du franchissement d'un seuil. Cela la rend particulièrement utile pour prévoir l'impact des crues de manière anticipée. Cependant, AVI présente aussi des limites, notamment une tendance à surestimer les débits, ce qui peut conduire à des fausses alertes.

De leur côté, les abaques se sont révélés efficaces pour prévoir le franchissement des seuils critiques d'un cours d'eau. Ils fournissent une indication rapide sur la probabilité de crue, mais ne permettent pas de comprendre en détail le comportement de la crue elle-même. En cas de surestimation par AVI, l'utilisation conjointe d'un abaque qui permettrait de visualiser le franchissement des seuils pourrait réduire le risque de fausses alertes. Par conséquent, en combinant ces trois outils au niveau d'une même station, on pourrait obtenir une qualité d'anticipation de crue suffisamment fiable pour mettre en place un système de vigilance efficace.

Cette étude a également mis en évidence une différence de performance entre les trois types d'abaques testés suivant le territoire étudié. Les abaques pluie humidité et pluie débit classé semblent être plus performants qu'AVI. De plus, l'abaque pluie débit classé semble le plus performant des abaques sur les cours d'eau à réaction rapide et l'abaque pluie débit classé semble être le plus performant sur les cours d'eau plus lents. Toutefois, la durée limitée du stage n'a pas permis de développer autant d'abaques que nécessaire pour tirer des conclusions définitives. Une étude plus approfondie, avec la création et l'analyse de nombreux autres abaques sur d'autres bassins, serait essentielle pour garantir la pertinence de ces outils par rapport aux exigences du Service de Prévision des Crues en matière de prévision.

Bibliographie

1. Instruction du Gouvernement relative à la mise en œuvre des évolutions du dispositif de vigilance météorologique et de vigilance crues, par le ministère de la transition écologique, le ministère de l'Intérieur et le ministère des solidarités et de la santé
2. Étude d'un indicateur Pluie/Aléa hydro sur l'Escoutay, par l'UHPCGD Cellule Prévision, Janvier 2016
3. Établissement d'une grille multicritère pour le choix des couleurs de vigilance, direction départementale de l'Équipement du Gard, version 6/10/2006
4. Rapport de recherche sur le modèle de simulation de quantité et de qualité SIGMA, par Guy MORIN et Pierre PAQUET, Mai 1994
5. « Connaître les débits des rivières : quelles méthodes d'extrapolation lorsqu'il n'existe pas de station de mesures permanentes ? », Office national de l'eau et des milieux aquatiques, Laure Lebecherel, Vazken Andréassian, Bénédicte Augeard, Eric Sauquet, Clotaire Catalogne
6. Carte de sensibilité hydrologique : bilan et synthèse méthodologique de l'expérimentation sur l'Arc-Med, Yann Laborda, 19/12/2021
7. Vers l'intégration d'un indicateur hydrologique pour une nouvelle vigilance « pluie inondation », par Pierre-Emmanuel GALLERAND, Renaud MARTY, Françoise TORTEROTOT, Raphaëlle KOUNKOU-ARNAUD, Béatrice VINCENDON, Brigitte DUBOIS, Ludovic MAGNOULOUX et Bruno LOSSEC, 2020
8. Aide à la création d'abaques (prise en compte des « couleurs » de vigilance) Analyses pour la création de AVI, par le SPC RaS
9. Calage d'une formule de Vigilance sur l'Allaine à Joncherey, par Frédéric COURTES, 05/09/2023
10. Rapport sur la vigilance Pluie-Inondation avec indicateur hydrologique : Extension au bassin de l'Allier, par Renaud Marty, 02/12/2022

11. Rapport d'expérimentation des abaques pour la vigilance Pluie-Inondation, sur le territoire du SPC Loire-Cher-Indre, Audrey BILDSTEIN, 17/12/2021
12. Projet de couverture totale du territoire par la vigilance crue, SPC RaS
13. Schéma directeur de la prévision des crues du bassin Rhône-Méditerranée, approuvé par arrêté du préfet coordinateur du bassin, 12/07/2024
14. Règlement de surveillance, de prévision et de transmission de l'Information sur les Crues (RIC), Elsa Laganier, SPC Rhône amont-Saône, 12/07/2022