



Etude de ralentissement dynamique des crues du bassin versant de la Charente

RAPPORT DE PHASE 2 : DEFINITION DE LA STRATEGIE GLOBALE

N°4352644



Etude de ralentissement dynamique des crues du bassin versant de la Charente

Etablissement Public Territorial de Bassin Charente

RAPPORT DE PHASE 2 : Définition de la stratégie globale

VERSION	DESCRIPTION	ÉTABLI(E) PAR	CONTROLÉ(E) PAR	APPROUVÉ(E) PAR	DATE
1	Rapport provisoire	YBN			10/2021
2	Intégration des remarques du maître d'ouvrage – Complétion du rapport	YBN - CPU			05/2022
3	Intégration des remarques du maître d'ouvrage	YBN - CPU			07/2022
ARTELIA - Agence de Bordeaux Parc Sextant – Bâtiment D 6-8 avenue des Satellites – CS 70048 33187 LE HAILLAN Cedex Tel. : +33 (0)5 56 13 85 82 Fax : +33 (0)5 56 13 85 63					

SOMMAIRE

1. CONTEXTE – INTRODUCTION	9
2. RALENTISSEMENT DYNAMIQUE.....	9
2.1.1. Concept.....	9
2.1.2. Actions et solutions	9
3. MODÉLISATION HYDROLOGIQUE.....	11
3.1. Découpage du territoire et définition des événements hydrologiques	11
3.2. Choix des evenements étudiés	12
3.3. Présentation du logiciel et lois utilisées	14
3.3.1. Le logiciel HEC-HMS.....	14
3.3.2. Lois utilisées.....	15
3.3.2.1. Module de transformation pluie-débit	15
3.3.2.2. Module de propagation	16
3.3.2.3. Module d'écoulement souterrain	16
3.4. Données d'entrée.....	17
3.4.1. Curve Number	17
3.4.2. Lag time	17
3.4.3. Reach lag.....	18
3.4.4. Débit de base	18
3.5. Données pluviométriques	18
3.5.1. Postes pluviométriques	18
3.5.2. Données radar.....	20
3.6. Calage du modèle.....	22
3.6.1. Préambule : Prise en compte des karsts de la Rochefoucauld	22
3.6.2. Critères de calage	23
3.6.3. Résultats de calage.....	23
3.6.3.1. Crue de 1982	23
3.6.3.2. Crue de 2007	28
3.6.3.3. Crue de 2021	33
3.7. Horloge des crues.....	38
3.7.1. Crue de 1982	38

3.7.2. Crue de 2007	40
3.7.3. Crue de 2021	42
3.8. Synthèse de la propagation des crues.....	43
3.8.1. Méthodologie d'analyse des contributions	46
3.8.2. Contribution absolue.....	49
3.8.2.1. Crue de 1982	49
3.8.2.2. Crue de 2007	50
3.8.2.3. Crue de 2021	51
3.8.3. Contribution relative	53
4. DÉFINITION DE LA STRATÉGIE GLOBALE	55
4.1. Réflexion globale.....	55
4.2. Actions locales.....	56
4.2.1. Analyse des concomitances	56
4.2.2. Analyse des contributions	58
4.2.3. Démarche d'identification des sites propices au ralentissement dynamique 60	
4.2.3.1. Evitement des zones à enjeux	60
4.2.3.2. Identification des secteurs inondés	61
4.2.3.3. Recherche des secteurs où les pentes et aires drainées sont favorables	61
4.2.4. Sites identifiés.....	62
4.2.5. Solutions d'aménagement proposées	73
4.2.5.1. Le rechargement alluvionnaire.....	73
4.2.5.2. Frein en lit majeur	74
4.3. Actions diffuses	75
4.3.1. Priorisation des secteurs - Analyse des contributions relatives	75
4.3.2. Solutions proposées	78
4.3.2.1. Actions sur les zones de production du ruissellement	78
4.3.2.2. Actions sur les zones du transfert du ruissellement	80
4.3.2.3. Actions sur les zones d'accumulation du ruissellement	82
4.4. Synthèse des propositions de ralentissement dynamique	84
5. MODÉLISATIONS HYDRAULIQUE DES SOLUTIONS D'AMÉNAGEMENT	86
5.1. Présentation de la modélisation hydraulique 1D	86
5.1.1. Emprise modélisée	86

5.1.2. Données disponibles	87
5.1.3. Présentation du logiciel et lois utilisées	88
5.1.3.1. Le logiciel HEC-RAS	88
5.1.3.2. Lois utilisées	89
5.1.3.1. Conditions aux limites	90
5.2. Impacts des solutions locales	92
5.2.1. Frein en lit majeur	93
5.2.2. Rechargement alluvionnaire du lit mineur	97
5.3. Impacts des solutions diffuses	98
5.4. Impacts des solutions locales et diffuses	100
5.5. Estimation de l'impact sur les enjeux	101
6. CONCLUSIONS SUR LA STRATÉGIE PRÉCONISÉE	103

FIGURES

Figure 1 : Schéma des cheminements possibles de l'eau en bassin versant. Source : Cemagref.	10
Figure 2 : Découpage du territoire en 150 sous-bassins versants.....	11
Figure 3 : Hydrogrammes des crues majeures à Vindelle	13
Figure 4 : Modèle construit sous HEC-HMS.....	14
Figure 5 : Postes pluviométriques utilisés pour la crue de 2007.....	18
Figure 6 : Postes pluviométriques utilisés pour la crue de 1982	19
Figure 7 : Méthode des polygones de Thiessen	20
Figure 8 : Répartition pluviométrique à l'échelle du bassin versant de la Charente (Pluie du 02/02/2021)	21
Figure 9 : Situation approximative de la zone karstique. Source : Hydratec, 2006.....	22
Figure 10 : Stations hydrométriques disponibles pour la crue de 1982	24
Figure 11 : Résultats de calage sur les stations en amont de Vindelle – Crue 1982.....	25
Figure 12 :Résultat de calage à Vindelle - Crue de 1982	26
Figure 13 : Résultats de calage en aval de Vindelle - Crue de 1982	27
Figure 14 : Stations hydrométriques disponibles pour la crue de 2007	28
Figure 15 : Résultats de calage en amont de Vindelle - Crue de 2007	29
Figure 16 : Résultat de calage à Vindelle -Crue de 2007	30
Figure 17 : Résultats de calage en aval de Vindelle	31
Figure 18 : Résultats de calage à Chaniers – crue 2007.....	32
Figure 19 : Stations hydrométriques disponibles pour la crue de 2021	33
Figure 20 : Résultats de calage en amont de Vindelle - Crue de 2021	34
Figure 21 : Résultat du calage à Vindelle -Crue 2021.....	35
Figure 22 : Résultats du calage en aval de Vindelle -Crue de 2021	37
Figure 23 : Horloge de crue de 1982.....	38
Figure 24 : Horloge de crue de 2007.....	40
Figure 25 : Horloge de crues de 2021	42
Figure 26 : Propagation des hydrogrammes de la Charente en 1982	43
Figure 27 : Propagation des hydrogrammes de la Charente en 2007	44
Figure 28 : Propagation des hydrogrammes de la Charente en 2021	45
Figure 29 : Découpage en grands secteurs - Partie amont.....	47
Figure 30 : Découpage en grands secteurs - Partie aval.....	48
Figure 31 : Contribution absolue - Crue de 1982 (Partie amont).....	49
Figure 32 : Contribution absolue - Crue de 1982 (Partie aval).....	50
Figure 33 : Contribution absolue - Crue de 2007 (Partie amont).....	50
Figure 34 : Contribution relative - Crue de 2007 (Partie aval)	51
Figure 35: Contribution absolue - Crue de 2021 (Partie amont).....	52
Figure 36 :Contribution absolue - Crue de 2021 (Partie aval)	52
Figure 37 : Contribution relative (Partie amont).....	53
Figure 38 : Contribution relative (Partie aval).....	54
Figure 39 : Logigramme d'élaboration de la stratégie de ralentissement dynamique.....	55
Figure 40 : Carte des indicateurs de contribution par secteur	59
Figure 41 : Actions locales - Evitement des zones à enjeux (Secteur Bandiat Tardoire Bonnieure)	60
Figure 42 : Actions locales – Identification des secteurs inondés (Secteur Bandiat Tardoire Bonnieure)	61
Figure 43 : Actions locales – Recherche des secteurs de pentes et aires drainées favorables (Secteur Bandiat Tardoire Bonnieure).....	62

Figure 44 : Action locales - Site Bandiat.....	63
Figure 45 : Action locales - Site Tardoire 1.....	64
Figure 46 : Action locales - Site Tardoire 2.....	65
Figure 47 : Action locales - Site Bonnieure	66
Figure 48 : Action locales - Site aval Tardoire et confluence avec la Bonnieure + Charente	67
Figure 49 : Action locales – Sites Charente amont 1.....	68
Figure 50 : Action locales – Sites Charente amont 2.....	69
Figure 51 : Action locales – Sites Charente amont 3.....	70
Figure 52 : Action locales – Sites Charente aval (Zones de prescription dérogatoires – PPR Charente)	71
Figure 53 : Carte de synthèse des sites propices aux actions locales de ralentissement dynamique	72
Figure 54 : Schéma explicatif du principe de rechargement alluvionnaire	73
Figure 55 : Exemple de frein en lit majeur – Merlon	74
Figure 56 : Carte de priorisation des secteurs propices aux actions diffuses	77
Figure 57 : Disposition des haies interparcellaires	79
Figure 58 : Coupes types de fossés (Source : AREAS).....	80
Figure 59 : Exemple de noue enherbée (Source : LIOSE)	80
Figure 60 : Chenal enherbé implanté dans l'axe du ruissellement concentré (encart : situation initiale) (Source : LIOSE)	81
Figure 61 : Actions sur les zones de transfert - Exemple d'application (fond de plan IRIP).....	81
Figure 62 : Actions sur les zones de transfert - Exemple d'application (fond de plan photographie aérienne).....	82
Figure 63 : Schéma de fonctionnement d'une mare tampon (Source : LIOSE)	82
Figure 64 : Schéma type d'un talus de plein de champ (Source : LIOSE)	83
Figure 65 : Actions sur les zones d'accumulation - Exemple d'application.....	83
Figure 66 : Actions sur les zones d'accumulation - Exemple d'application.....	84
Figure 67 : Synthèse des préconisations de ralentissement dynamique	85
Figure 68 : Emprise du modèle hydraulique 1D	87
Figure 69 : Modèle construit sous HEC RAS	89
Figure 70 : Volume de contrôle élémentaire pour les équations de Saint Venant (Source : HEC RAS)	90
Figure 71 : Hydrogramme d'apports de la Boutonne à sa confluence avec la Charente - Crue 1982.....	91
Figure 72 : Localisation des profils en travers d'observation	93
Figure 73 : Rappel des sites identifiés dans la stratégie pour la mise en place d'actions locales	94
Figure 74 : Emprise des modèles utilisé pour la traduction sur les enjeux	101
Figure 75 : Exemple de l'impact des aménagements sur la zone inondable (Saintes)	102
Figure 76 : Conclusion sur la stratégie préconisée	103

TABLEAUX

Tableau 1 : Définition des évènements modélisés	12
Tableau 2 : Analyse des concomitances pour les 3 crues.....	57
Tableau 3 : Analyse des contributions.....	58
Tableau 4 : Analyse des contributions relatives.....	76
Tableau 5 : Impact au niveau du TRI de la mise en place de frein en lit majeur sur l'ensemble des sites identifiés (Manning : $0,2 \text{ s/m}^{1/3}$)	94
Tableau 6 : Impact au niveau du TRI de la mise en place de frein en lit majeur sur l'ensemble des sites identifiés (Manning : $0,5 \text{ s/m}^{1/3}$)	95
Tableau 7 : Impact au niveau du TRI de la mise en place de frein en lit majeur uniquement sur les sites identifiés sur l'axe Charente (Manning : $0,5 \text{ s/m}^{1/3}$)	95
Tableau 8 : Impact au niveau du TRI de la mise en place de frein en lit majeur uniquement sur les sites identifiés sur l'axe Charente à l'amont de Mansle (Manning : $0,5 \text{ s/m}^{1/3}$).....	96
Tableau 9 : Impact au niveau du TRI de la mise en place de frein en lit majeur uniquement sur les sites identifiés sur le bassin versant Bandiat Tardoire Bonnieure (Manning : $0,5 \text{ s/m}^{1/3}$)	96
Tableau 10 : Impact au niveau du TRI de la mise en place du rechargement alluvionnaire (inférieure à la moitié de la section d'écoulement) sur les sites identifiés du bassin versant Bandiat Tardoire Bonnieure	97
Tableau 11 : Impact au niveau du TRI de la mise en place du rechargement alluvionnaire (inférieure à la moitié de la section d'écoulement) sur les sites identifiés du bassin versant Bandiat Tardoire, et à 80% sur l'ensemble du linéaire de la Bonnieure	97
Tableau 12 : Impacts de la modification du CN sur les débits de pointe à Vindelle et Saintes pour les 3 crues étudiées.....	98
Tableau 13 : Impact au niveau du TRI de la mise en place de la modification de l'occupation des sols (baisse du CN de 3%) sur l'ensemble du bassin versant de la Charente.....	99
Tableau 14 : Impact au niveau du TRI de la modification d'occupation des sols (CN abaissé de 3%), avec mise en place de freins en lit majeur (Manning $0,5 \text{ s/m}^{1/3}$) sur l'ensemble des sites identifiés	100
Tableau 15 : Impact au niveau du TRI de la modification d'occupation des sols (CN abaissé de 3%), avec mise en place de freins en lit majeur (Manning $0,5 \text{ s/m}^{1/3}$) sur l'ensemble des sites identifiés dans la stratégie et rechargement alluvionnaire sur les sites du Bandiat, Tardoire, Bonnieure.....	100
Tableau 16 : Traduction de l'abaissement de la ligne d'eau sur les enjeux du TRI	102

1. CONTEXTE – INTRODUCTION

L'objectif de cette partie de mission est d'affiner la connaissance du fonctionnement des mécanismes de crue à l'échelle du bassin versant, via la mise en œuvre et l'exploitation d'outils de modélisation hydrologique et hydraulique à l'échelle globale du bassin versant. L'exploitation de ces outils doit permettre de définir la contribution de chaque sous-bassin versant pour les différentes gammes de crues modélisées. Cette analyse concerne à la fois les apports respectifs de chaque bassin et le déphasage entre les différentes crues des affluents et de la Charente (Horloge des crues).

Cette analyse de la genèse des crues de la Charente permettra alors de définir et de proposer par la suite la stratégie de gestion et d'aménagement du territoire la plus pertinente et la mieux adaptée au fonctionnement hydraulique observé à l'échelle des différents sous-bassins versant du territoire. La réflexion est menée ici à l'échelle des enjeux du Territoire à Risque Important d'inondation Saintes-Cognac-Angoulême, d'autres actions restant envisageables à une échelle plus locale.

Pour mener à bien cette analyse, les outils de modélisation suivants ont été exploités :

- un modèle hydrologique, afin de déterminer la part de la pluviométrie qui rejoint les cours d'eau (modèle pluie/débit) et la propagation des crues,
- un modèle hydraulique, pour représenter le transfert des ondes de crue dans le réseau hydraulique, ainsi que les effets de laminage de l'onde de crue (tests d'aménagements).

2. RALENTISSEMENT DYNAMIQUE

2.1.1. Concept

Le ralentissement dynamique est un outil de protection contre les inondations. Il consiste en l'utilisation des potentialités de rétention d'eau sur l'ensemble du bassin versant, que ce soit dans le lit majeur des cours d'eau ou sur les versants, afin de compenser l'accélération du ruissellement due aux multiples activités anthropiques, et d'écarter les crues en amont des enjeux.

Il peut donc agir à la fois sur la rétention des volumes de crue en amont des enjeux à protéger, mais également sur le déphasage entre les pics de crue des différents cours d'eau qui constitue le réseau hydrographique du bassin versant de la Charente.

2.1.2. Actions et solutions

Le ralentissement dynamique se concrétise par la mise en place de plusieurs techniques douces et d'aménagement plus conséquents de « surstockage » de l'eau. Les actions douces sont multiples et réparties d'une manière diffuse sur le bassin versant contrairement aux aménagements de rétention localisés directement sur le cours d'eau, comme illustré ci-dessous :



Figure 1 : Schéma des cheminements possibles de l'eau en bassin versant. Source : Cemagref

Les actions de ralentissement dynamique peuvent être mises en œuvre sur différents secteurs du territoire :

- Versants : Comme indiqué dans le schéma, la réhabilitation des haies (4), les chaussées à structures réservoirs (9), ou encore l'embroussaillage (7) vont permettre d'augmenter les temps de trajet des écoulements.
- Lits des cours d'eau : par la mise en place d'aménagements légers (seuils noyés, arasement de bourrelets de berges), retenues à pertuis ouverts (8) qui permettent de stocker temporairement l'eau et contribuent à écrêter les pics de crue.

3. MODELISATION HYDROLOGIQUE

3.1. DECOUPAGE DU TERRITOIRE ET DEFINITION DES EVENEMENTS HYDROLOGIQUES

Afin de procéder à la représentation des différentes hétérogénéités du territoire et d'analyser le rôle joué par chaque sous-bassin versant, le bassin versant de la Charente a été découpé en 150 sous-bassins versants. Ce découpage correspond à celui de la BD Carthage et permet de proposer une analyse fine pour l'ensemble des structures de gestion présentes sur le territoire. Le modèle a été construit en deux parties séparées : une partie en amont s'étendant jusqu'à la station hydrométrique de Vindelle sur la Charente et une partie en aval, comme illustré ci-dessous.

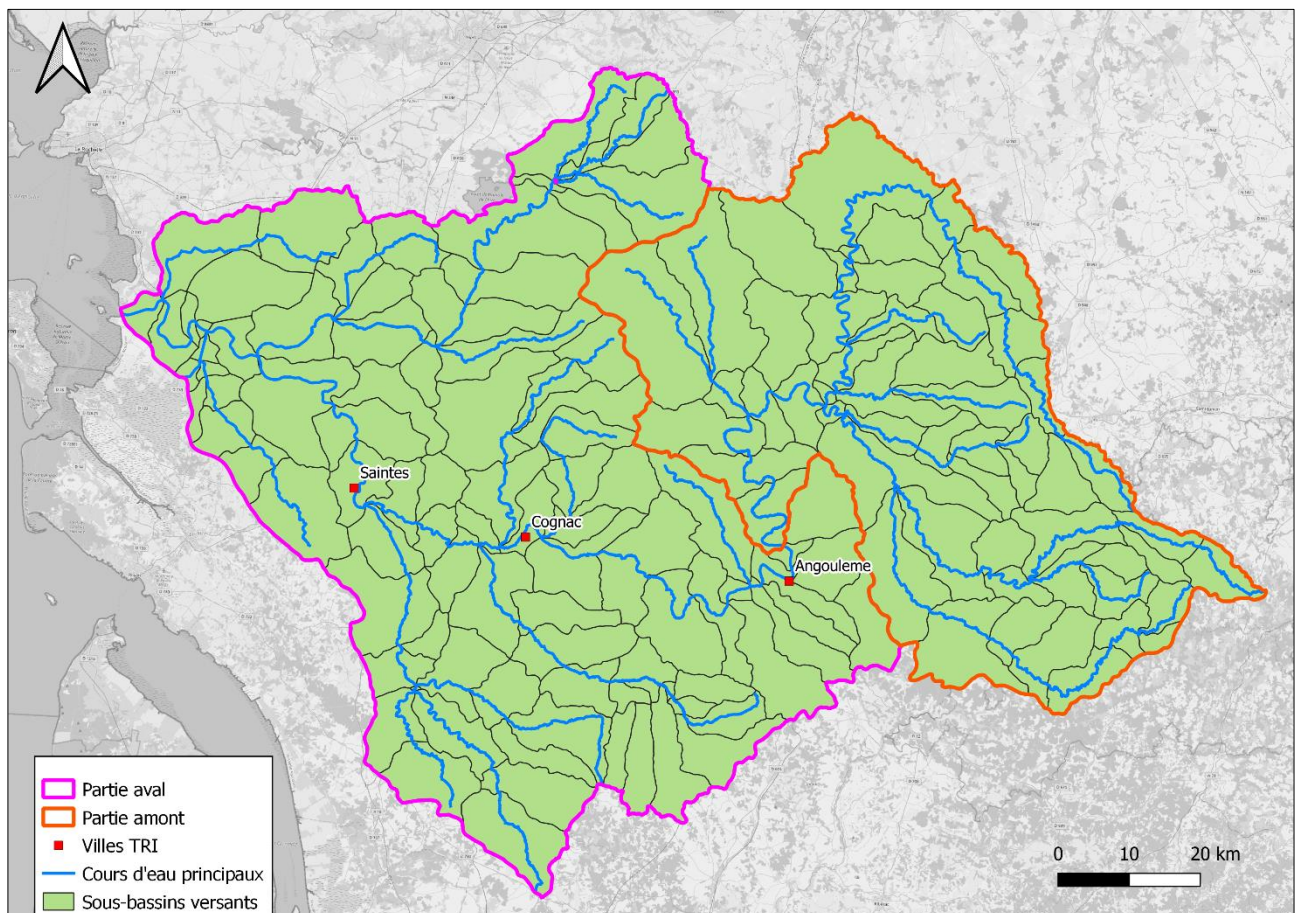


Figure 2 : Découpage du territoire en 150 sous-bassins versants

3.2. CHOIX DES EVENEMENTS ETUDIES

Après analyse des évènements historiques et échange avec les membres du Comité Technique, trois crues ont été modélisées :

Tableau 1 : Définition des évènements modélisés

Crue	Période de retour à Saintes	Débit à Saintes (m ³ /s)	Niveau à l'échelle du pont de Palissy à Saintes (m NGF)
Décembre 1982	100 ans	815 (Source EPTB)	6,99 (Source EPTB)
Mars 2007	5-6 ans	515 (Source SPC)	5,64 (Source site EPTB)
Février 2021	20 ans	610 (Source SPC)	6,18 (Source site EPTB)

Ces trois événements ont été choisis car ils présentent des gammes de débit de pointe et des dynamiques de crue différentes. En outre, ces événements sont bien documentés (présence de stations hydrométriques et expertise du SPC). D'autres événements avaient été proposés et non retenus (1994, 2000) car leurs caractéristiques sont relativement similaires aux événements étudiés.

Les trois événements retenus permettent ainsi de couvrir différentes périodes de retour.

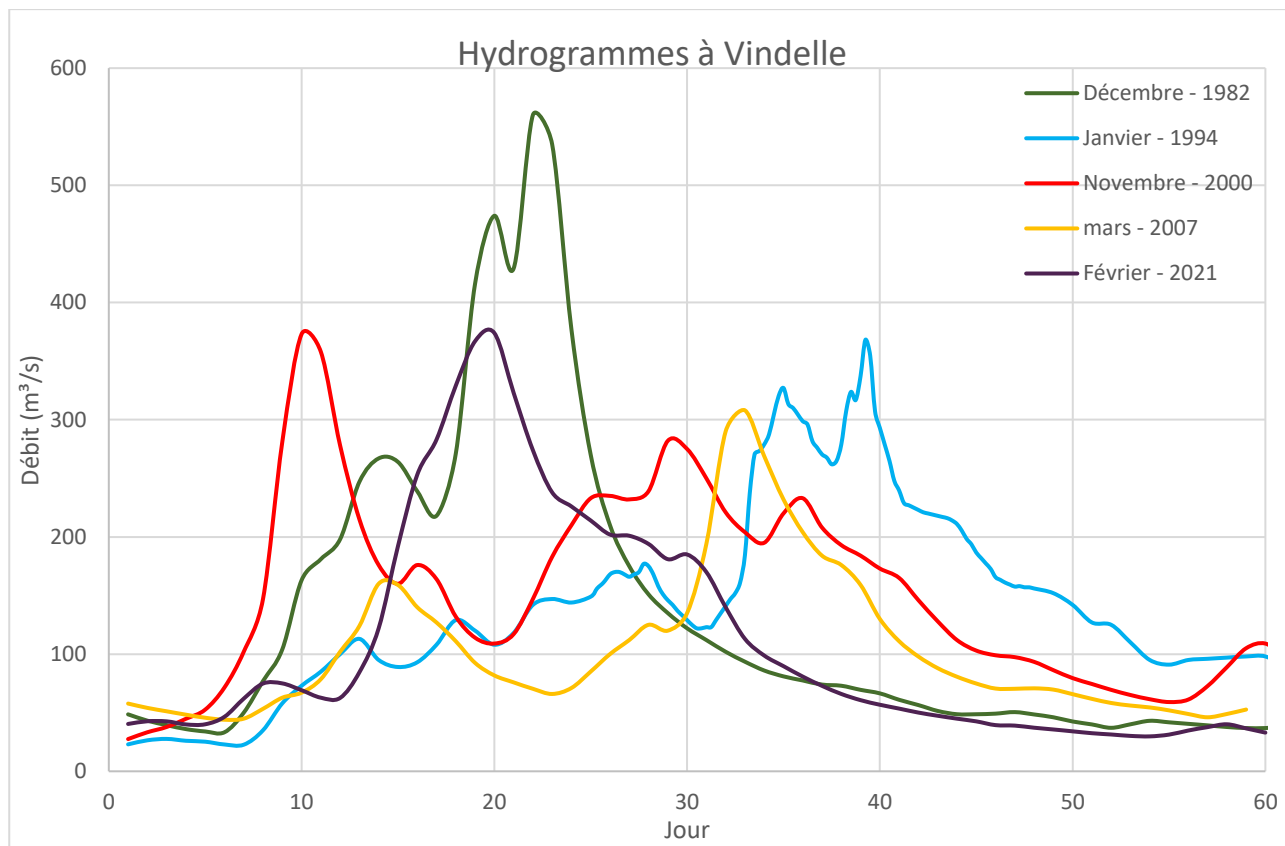


Figure 3 : Hydrogrammes des crues majeures à Vindelle

Ces hydrogrammes permettent de distinguer différentes typologies de crue. Le principal évènement en termes d'intensité, décembre 1982, a duré environ 3 semaines et comprend deux pics principaux, avec des montées et des descentes rapides. Au contraire, la crue de janvier 1994 s'étale sur une cinquantaine de jour avec une montée très progressive approchant 25 jours, et une décrue plutôt lente. Les évènements de novembre 2000 et mars 2007 sont d'une durée sensiblement similaire et se caractérisent par deux pics de crue. Enfin la crue de février 2021, d'intensité semblable à celles de 2000 et 1994, est caractérisée par une montée rapide sur une semaine puis la décrue sur quinze jours. Il est important de noter que l'analyse menée ici est valable pour les relevés de la station hydrométrique de Vindelle, première station située à l'amont du territoire du TRI sur la Charente (les hydrogrammes variant selon la localisation de la station).

3.3. PRESENTATION DU LOGICIEL ET LOIS UTILISEES

3.3.1. Le logiciel HEC-HMS

L'outil de calcul utilisé est le logiciel HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center –Hydrologic Modelling System) développé par le corps d'ingénierie de l'armée américaine. Il est conçu pour simuler les processus de précipitations-ruissellement des bassins versants dendritiques.

Il dispose de plusieurs modules de calculs :

- Un module de transformation pluie-débit (fonction de production) : plusieurs méthodes de calcul sont disponibles pour calculer l'hydrogramme de crue à partir des caractéristiques physiques du bassin versant et des précipitations.
- Un module de propagation (fonction de transfert) : Une fois la pluie tombée transformée en débit, ce module permet de calculer la propagation de l'hydrogramme de crue selon différentes méthodes de calcul.
- Un module d'écoulement souterrain : Différents modèles sont disponibles pour représenter les débits de base.
- Un module d'écroulement : Ce module permet de calculer l'écroulement de l'hydrogramme de crue au travers de retenues potentielles à partir de lois hauteur-volume ou hauteur-surface.

Les fonctions de production et de transfert dépendent de différents paramètres en fonction du modèle hydrologique choisi (l'occupation du sol, la perméabilité des sols du bassin versant, l'état de saturation du sol avant l'événement pluvieux, etc.). L'outil fonctionne en réseau ramifié et calcule donc l'hydrogramme résultant en aval d'une confluence.

Le modèle construit sur HEC-HMS est illustré ci-dessous, il est constitué de sous bassins versants numérotés de R000 à R734, de biefs, et de jonctions. La configuration suivante permet de calculer l'hydrogramme résultant dans chacune des confluences (Junction).

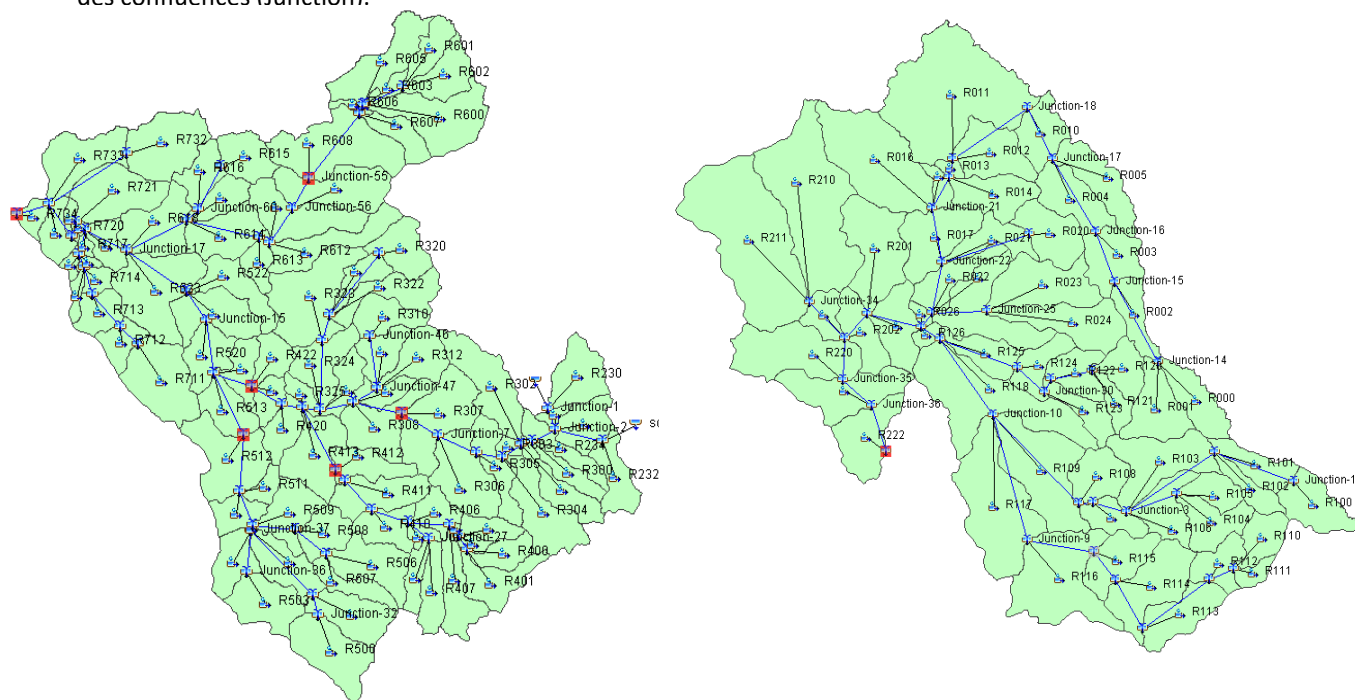


Figure 4 : Modèle construit sous HEC-HMS

3.3.2. Lois utilisées

3.3.2.1. Module de transformation pluie-débit

La méthode SCS Curve Number (Soil Conservation Service) a été retenue parmi les différents modules pluie-débit proposés par le logiciel. Elle consiste à évaluer le ruissellement maximum potentiel R à partir du cumul de précipitations de l'évènement considéré, l'occupation des sols et l'humidité initiale des sols selon l'équation suivante :

$$R = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

Avec : R : *Lame ruisselée (mm)*

P : *Cumul pluviométrique total de l'évènement considéré (mm)*

I_a : *Quantité de pluie retenue avant le début du ruissellement (perte initiale) (mm)*

S : *Infiltration maximale potentielle (mm)*

Le ruissellement ne peut commencer que quand le cumul pluviométrique est supérieur à la perte initiale.

Par défaut, le logiciel HEC-HMS calcule la perte initiale par la relation empirique suivante :

$$I_a = 0,2 \times S$$

Il est toutefois possible d'imposer la valeur de la perte initiale I_a . En effet, les recherches récentes préconisent une valeur inférieure de la perte initiale. Ce paramètre a été adapté par calage en fonction des résultats obtenus.

Le paramètre S est calculé par la relation :

$$S = 25,4 \times \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

Le paramètre CN traduit l'aptitude des sols au ruissellement et dépend notamment du type de sol (géologie), de l'utilisation de terres (couvert végétal) et de son état hydrique initial.

La valeur du coefficient CN varie entre 100 (pour des surfaces en eau telles que des lacs) et 30 (pour des sols très perméables avec une capacité d'infiltration très importante). Les valeurs usuelles du CN proviennent de la littérature mais elles doivent être adaptées pour chaque sous bassin versant et pour chaque évènement étudié.

Toute la difficulté d'application de cette méthode consiste donc à évaluer le Curve Number CN .

La construction de l'hydrogramme unitaire est ensuite réalisée en répartissant le volume d'eau effectivement ruisselé selon un triangle unitaire pour chaque pas de temps t selon la relation suivante :

$$Q_p = 2.08 \times \frac{A}{T_p} \quad \text{Avec} \quad T_p = \frac{\Delta t}{2} + T_{lag}$$

Avec : Q_p : *débit de pointe*

T_p : *temps du pic de crue*

T_{lag} : *lag time*

A : *superficie du bassin versant*

Δt : *pas de temps de calcul*

Le lag time usuellement pris égal à 60% du temps de concentration.

L'hydrogramme unitaire d'un bassin est défini comme l'hydrogramme de ruissellement pur résultant d'une pluie nette de hauteur unité produite de façon homogène sur la totalité du bassin (averse unitaire) en un temps donné.

3.3.2.2. Module de propagation

La méthode Reach Lag a été choisie pour propager les hydrogrammes de crue. Cette méthode permet de représenter uniquement le décalage temporel entre les sous bassins versants sans atténuation. C'est une méthode adaptée aux biefs relativement courts.

3.3.2.3. Module d'écoulement souterrain

Les écoulements souterrains seront représentés par la méthode de récession, le calcul de base est calculé par la relation suivante :

$$Q_t = Q_0 \times k^t$$

Avec : Q_t : débit à l'instant t

Q_0 : débit initial

K : constante de récession

Un autre paramètre est exigé en paramètre d'entrée dans ce module. C'est le « ratio to peak », il représente le rapport entre le débit de pointe et l'écoulement de base.

3.4. DONNEES D'ENTREE

3.4.1. Curve Number

L'estimation de ce paramètre est faite sur la base de l'occupation du sol fournie par le Corine Land Cover de 2018 (CLC).

Un Curve Number est associé à chaque code CLC en se basant dans un premier temps sur une étude réalisée par (Weglarz, 2018).

Ensuite pour chaque sous-bassin versant, on calcule un CN pondéré par la surface pour avoir une valeur de CN unique par sous bassin (modèle semi-distribué).

$$CN = \frac{\sum CN_i \times S_i}{S}$$

Avec : CN_i : Les différentes valeurs de CN dans un sous BV

S_i : Surface associée à chaque CN_i

S : Surface totale du sous BV

Ces valeurs de CN seront réadaptées après le calage, en conservant la même logique des CN théoriques calculés.

3.4.2. Lag time

Au premier abord, le lag time est calculé par la relation :

$$T_{lag} = 0.6 \times T_c$$

Avec T_c le temps de concentration, défini comme le temps nécessaire à une goutte d'eau de pluie pour parcourir la distance depuis le point le plus éloigné de l'exutoire d'un bassin jusqu'à celui-ci.

Il existe plusieurs relations empiriques pour calculer ce paramètre, deux d'entre elles ont été testées :

- La méthode de Passini :

$$T_c = 0,14 \times (S \times L)^{0.33} \times P^{-0.5}$$

- La méthode de Sogreah :

$$T_c = 2,60 \times S^{0.35} \times P^{-0.4}$$

Avec : S : surface du sous bassin versant (ha)

P : pente moyenne du sous bassin versant (m/m)

L : plus long chemin hydraulique (m)

T_c : temps de concentration (min)

La surface des sous BV et les plus longs chemins hydrauliques sont calculés à l'aide de l'outil de mesure de QGIS.

3.4.3. Reach lag

Le temps de décalage entre les sous-bassins versants est estimé par le rapport entre la longueur du chemin hydraulique et la vitesse, en première approche prise égale à 1m/s.

3.4.4. Débit de base

Le débit initial est pris égal au débit mesuré précédant la montée de crue, le paramètre de récession K et le ratio to peak sont définis à l'issue du calage.

3.5. DONNEES PLUVIOMETRIQUES

3.5.1. Postes pluviométriques

Pour les crues de 1982 et 2007, les données pluviométriques ont été collectées à partir des postes pluviométriques de MétéoFrance.

Les postes pluviométriques ont été sélectionnés de manière à couvrir de manière homogène tout le territoire, et en fonction des données disponibles pour chaque crue.

Les figures ci-dessous illustrent les postes utilisés pour les crues de 1982 et 2007 :

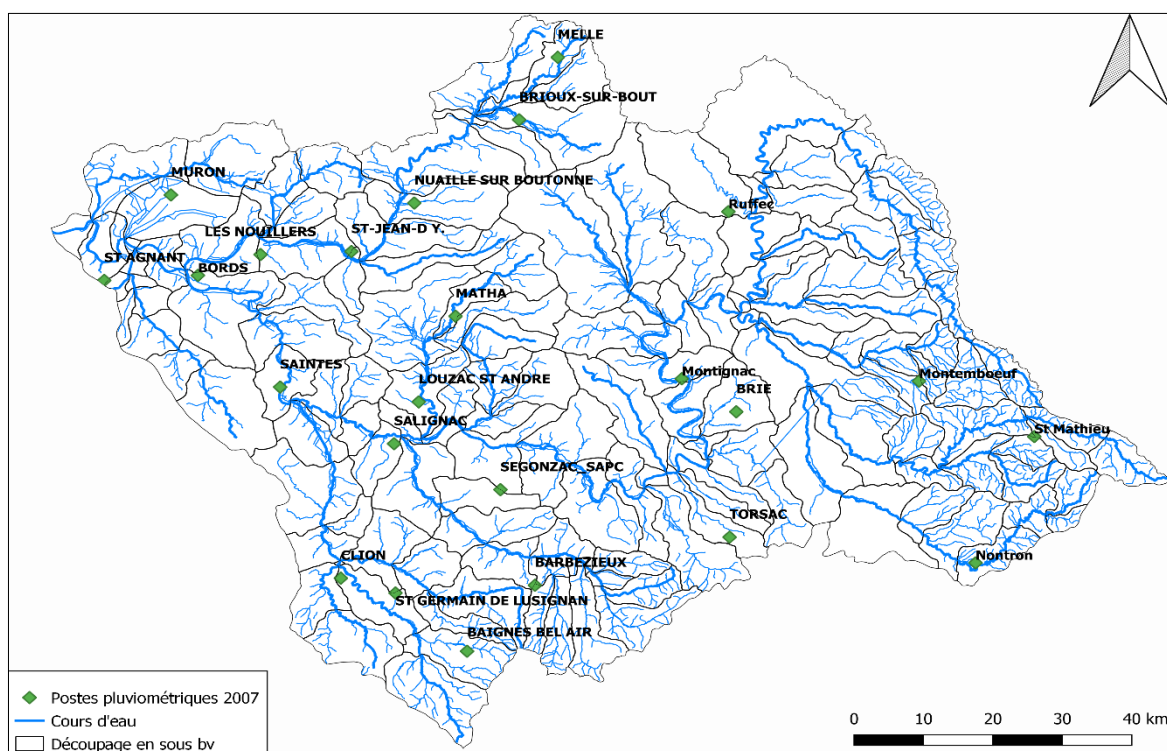


Figure 5 : Postes pluviométriques utilisés pour la crue de 2007

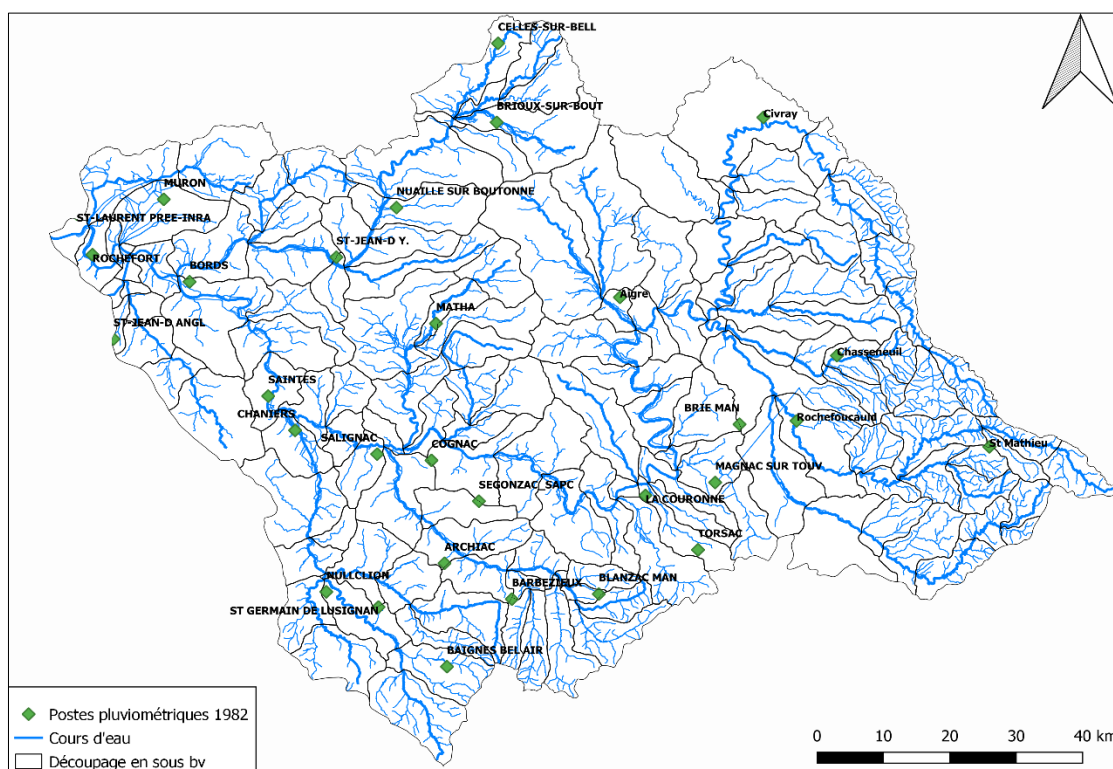


Figure 6 : Postes pluviométriques utilisés pour la crue de 1982

Les données d'entrée dans HEC-HMS sont sous forme de séries de pluviométries affectables aux différents sous bassins. C'est pourquoi la méthode des polygones de Thiessen a été utilisée.

Elle consiste à construire des polygones en déterminant les médiatrices de chaque couple de pluviomètre afin de déterminer la zone d'influence de chaque poste pluviométrique comme illustré sur la figure ci-dessous :

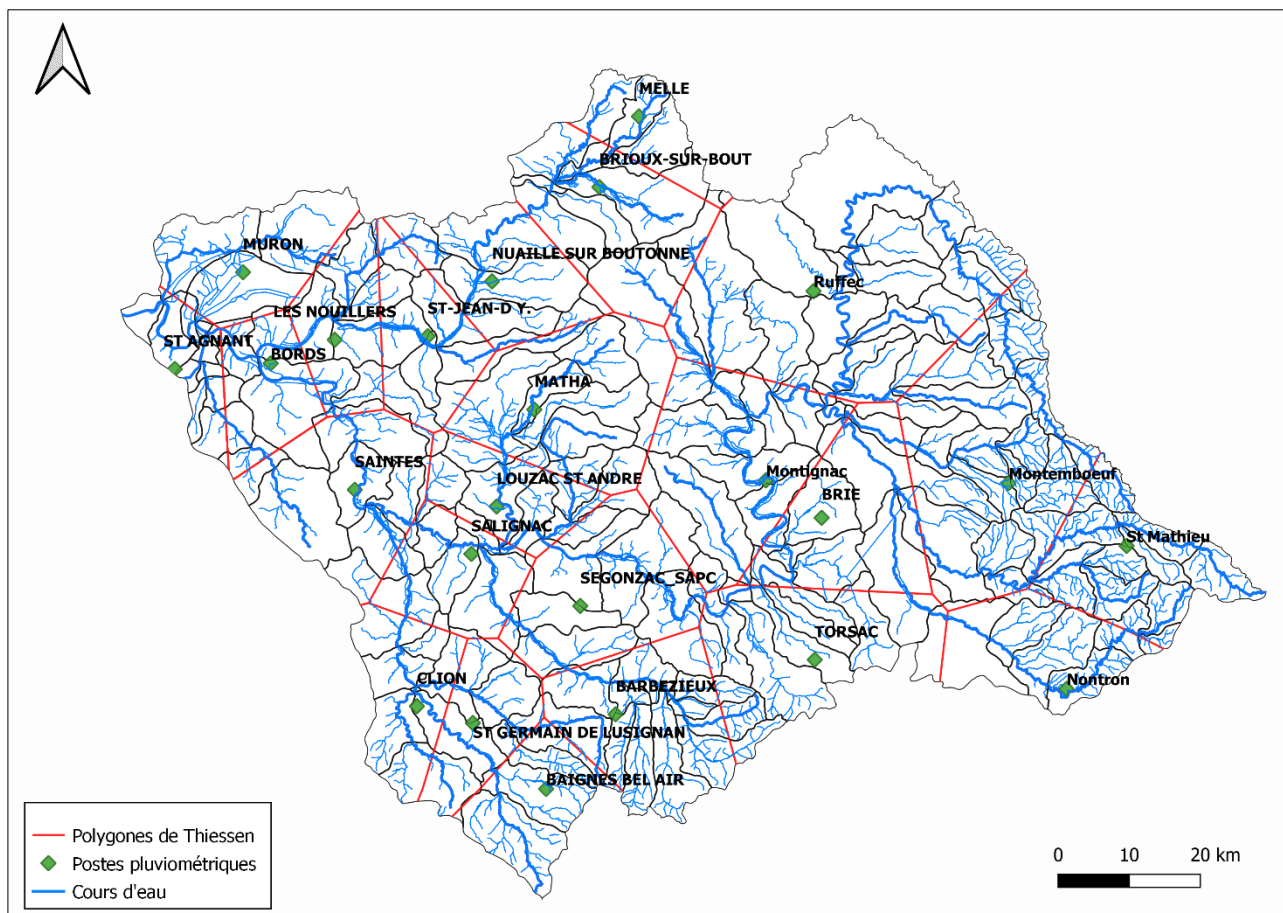


Figure 7 : Méthode des polygones de Thiessen

3.5.2. Données radar

Pour la crue de 2021, les lames d'eau radar Antilope ont été utilisées. Il s'agit de lames d'eau sur 24h géographiquement distribuée en pixels de 1km² sur tout le bassin versant de la Charente.

La carte ci-dessous illustre la répartition pluviométrique sur le bassin versant de la Charente pour la pluie du 02 février 2021.

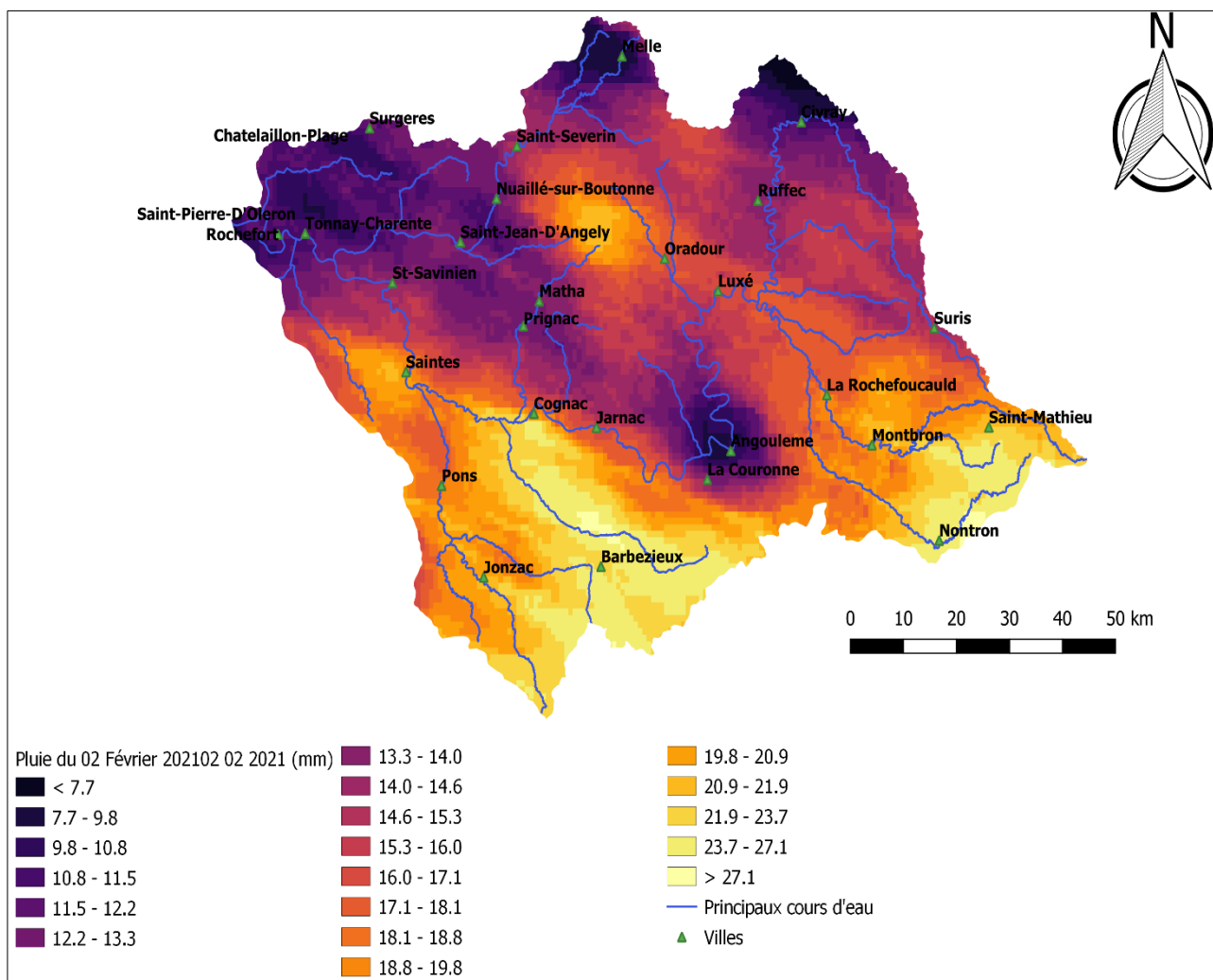


Figure 8 : Répartition pluviométrique à l'échelle du bassin versant de la Charente (Pluie du 02/02/2021)

Afin d'intégrer ces données dans le logiciel HEC-HMS, une moyenne des lames d'eau journalières par sous-bassin a été calculée.

Il est à noter que les données radar ont tendance à sous-estimer les cumuls de pluie comme nous le verrons dans le chapitre suivant relatif au calage.

3.6. CALAGE DU MODELE

3.6.1. Préambule : Prise en compte des karsts de la Rochefoucauld

Les bassins versants des affluents du Bandiat et de la Tardoire sont caractérisés par la présence de calcaires fissurés due à la dissolution de certaines parties du sous-sol et au cheminement des eaux dans les galeries naturelles ainsi formées, comme illustré ci-dessous :

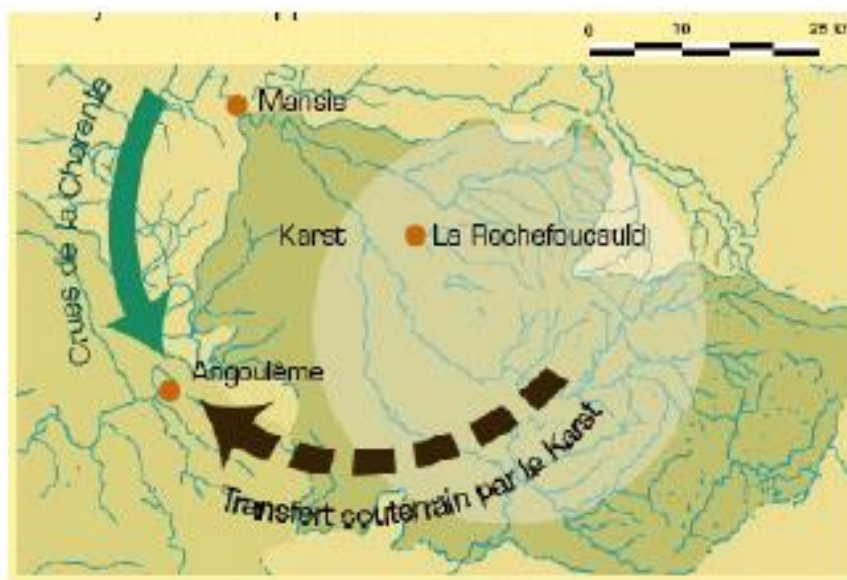


Figure 9 : Situation approximative de la zone karstique. Source : Hydratec, 2006

Le long de ces cours d'eau, au niveau du karst de la Rochefoucauld, se produisent des « pertes » en eau. La résurgence de ces « pertes » est supposée se retrouver en intégralité dans le cours d'eau de la Touvre. D'un point de vue hydrologique, le réseau hydrographique de surface perd son rôle d'organisation de l'écoulement au profit d'une circulation souterraine en trois dimensions.

Il est donc important de prendre compte l'effet écrêteur des karsts de la Rochefoucauld dans le calage du modèle.

Le modèle HEC-HMS ne dispose pas de fonction spécifique permettant de représenter les pertes en eau dans la zone karstique. Deux moyens de représentation schématisque de cette singularité ont été testés :

- En aval de la zone karstique approximativement délimitée, un réservoir a été mis en place. La capacité de stockage a été estimée par la différence entre le débit entrant et sortant de cette zone.

Bien que d'un point de vue physique, cette zone est assimilable à un réservoir, cette approche n'a pas été retenue car la mise en place d'un réservoir implique un retard du pic de crue par rapport à celui mesuré à la station Coulgens située après la confluence entre le Bandiat et la Tardoire.

- Des Curve Number CN faibles ont été imposés sur les sous-bassins situés dans la zone karstique. Ceci implique qu'une grande partie de la pluie tombée est infiltrée, en compensant ainsi le surplus de débit observé entre les stations amont et aval de la zone karstique. C'est cette approche qui a finalement été retenue.

Un débit complémentaire est ensuite injecté sur la Touvre pour représenter les résurgences des eaux infiltrées dans la zone karstique.

3.6.2. Critères de calage

Le calage du modèle s'est fait d'une manière itérative et en amont des bassins jaugés pour coller au mieux aux débits mesurés. Concernant les bassins non jaugés, les données d'entrée ont été adaptées pour améliorer le calage sur la station la plus en aval.

Les critères de calage considérés sont :

- Intensité du pic de crue : afin d'évaluer correctement la contribution de chaque sous-bassin aux pics de crue de la Charente ;
- Heure du pic de crue : afin de représenter au mieux les horloges de crues ;
- Volume de crue : pour évaluer la contribution de chaque sous-bassin en termes de volume aux crues de la Charente.

Le critère de Nash et Sutcliffe (1970) est ensuite utilisé pour évaluer la performance du modèle :

$$Nash = 1 - \frac{\sum (Q_{obs,i} - Q_{calc,i})^2}{\sum (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2}$$

Avec : $Q_{obs,i}$: Débits observés au pas de temps i ,
 $Q_{calc,i}$: Débits simulés au pas de temps i ,
 $\overline{Q_{obs}}$: Moyenne des débits observés sur la période

3.6.3. Résultats de calage

3.6.3.1. Crue de 1982

Les stations hydrométriques en service et où les données de mesure de débit sont disponibles sur la banque HYDRO pour la crue de 1982 sont illustrées sur l'image suivante :

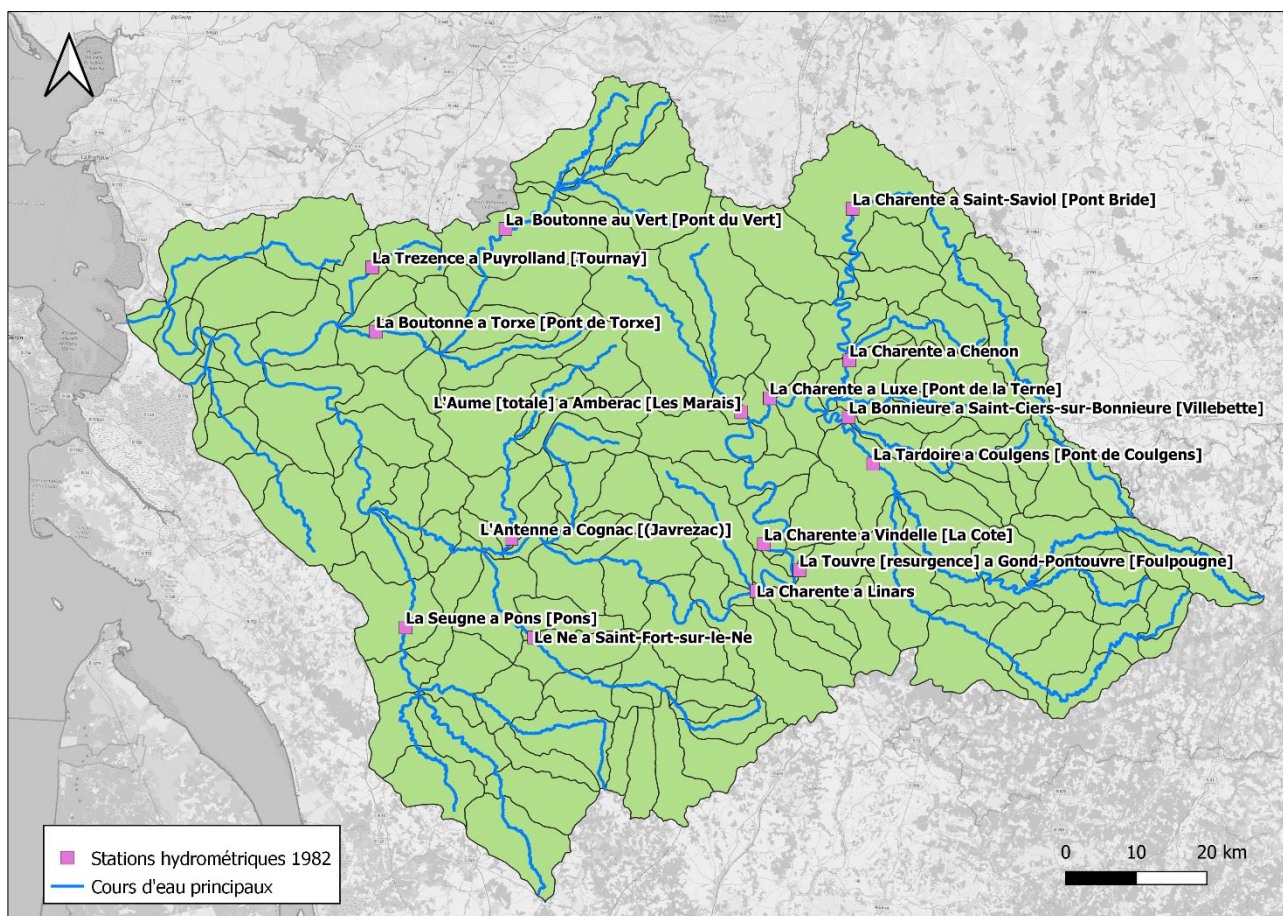


Figure 10 : Stations hydrométriques disponibles pour la crue de 1982

Les débits mesurés dans ces stations ont été comparés aux résultats de la modélisation par HEC-HMS afin d'ajuster les paramètres d'entrée. Il est à noter que les débits mesurés disponibles sont des moyennes journalières.

La période modélisée est du 05/12/1982 au 31/12/1982.

Les résultats de calage pour cette crue sont présentés ci-dessous :

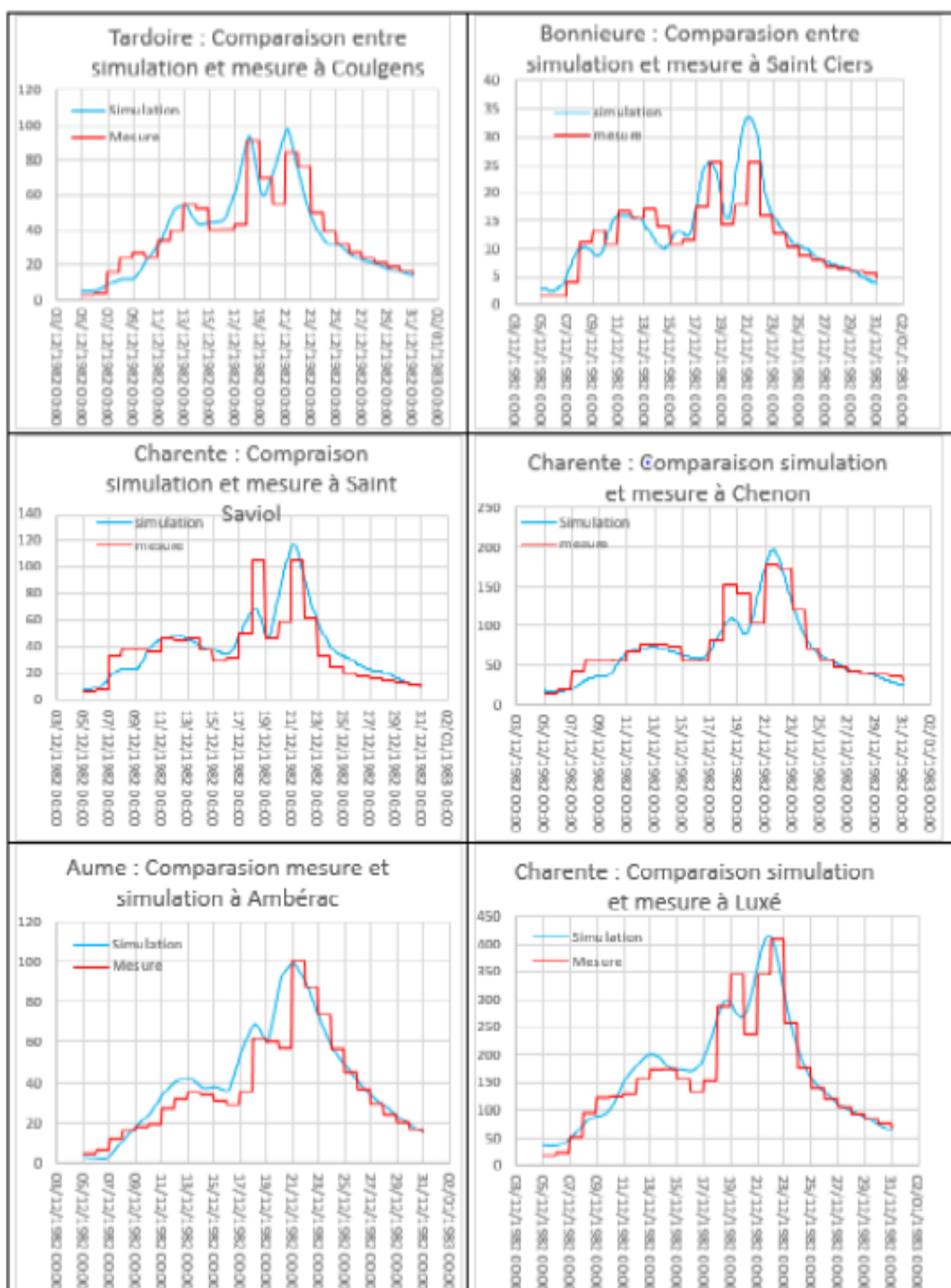


Figure 11 : Résultats de calage sur les stations en amont de Vindelle – Crue 1982

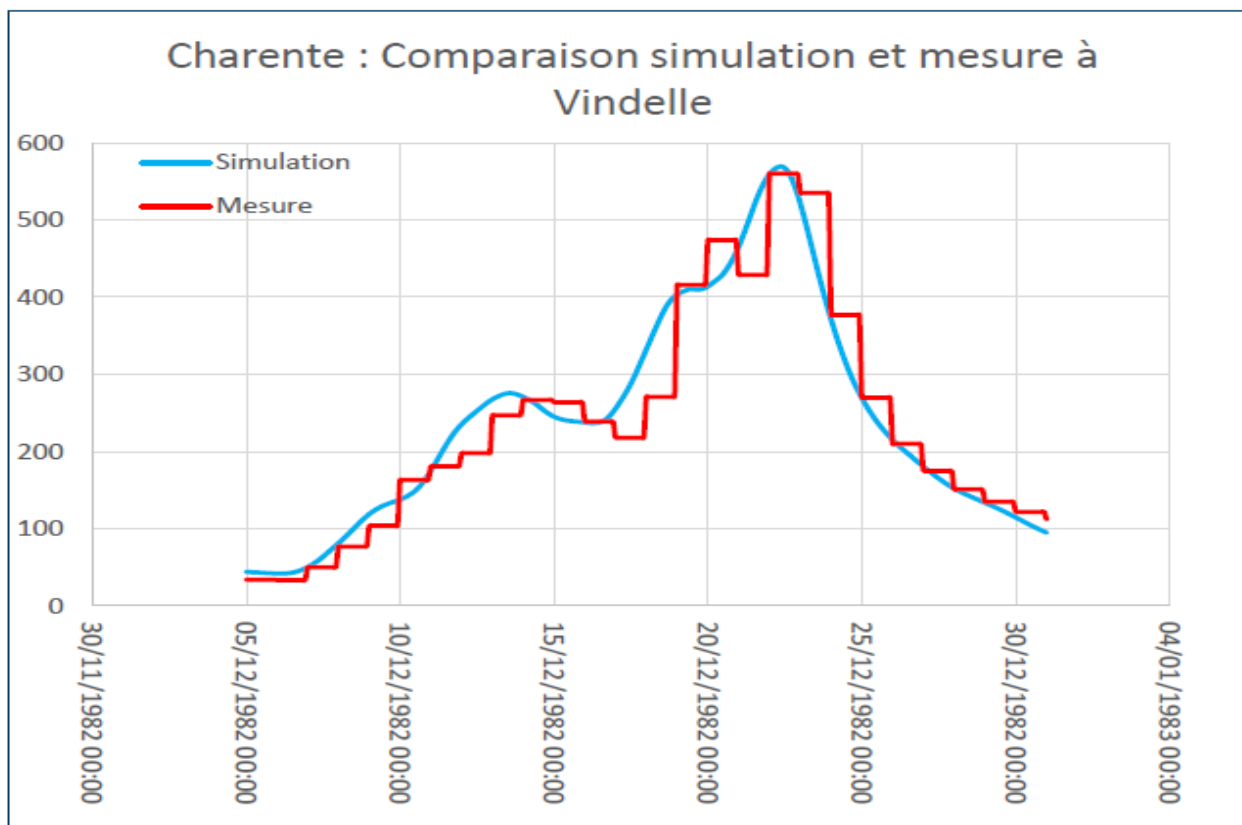


Figure 12 :Résultat de calage à Vindelle - Crue de 1982

Il est à noter que l'hydrogramme de crue à Vindelle figurant dans la banque Hydro est probablement biaisé. En effet, la valeur de débit de pointe de 560 m³/s correspondrait à priori à la station de Chalonne (Gond-Pontouvre), soit en aval de la confluence avec l'Argence. Le débit de pointe à Vindelle est donc légèrement surestimé.

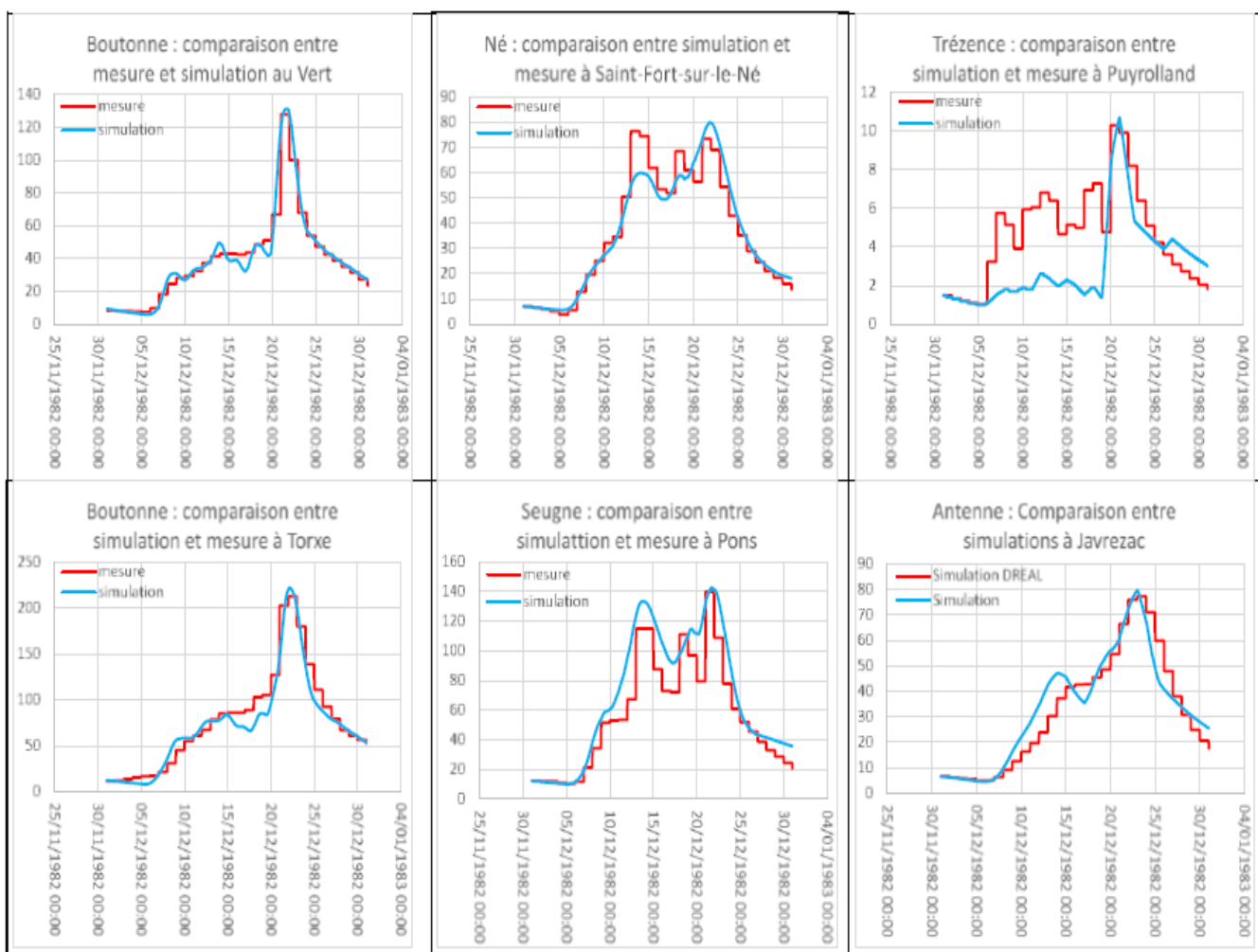


Figure 13 : Résultats de calage en aval de Vindelle - Crue de 1982

Il ressort de l'analyse de ces graphiques que globalement, le calage du débit de pointe est cohérent autant au niveau des intensités que de la chronologie, les volumes sont également bien représentés dans toutes les stations.

Les dynamiques de crue sont fidèlement reprises par le modèle, que ce soit pendant la crue ou la décrue. Cependant, on observe que les premiers pics sont parfois sous-estimés par le modèle, ce qui peut s'expliquer par le fait que le modèle considère que le sol est sec avant la simulation, une grande partie de la pluie est ainsi infiltrée. Les surestimations des derniers pics peuvent quant à elles s'expliquer par une saturation du sol. Malgré les résultats parfois plus dégradés sur certains affluents, les résultats obtenus traduisent d'une bonne représentativité globale du modèle avec un critère de Nash calculé à Vindelle de 0,913. Il est à noter qu'un modèle est considéré comme performant à partir d'un critère de Nash de 0,7.

Une surestimation du débit de pointe issu de la modélisation hydrologique est constatée à Saintes : le modèle donne une valeur de débit de pointe d'environ 1000 m³/s, alors que le SPC avait évalué le débit à environ 800 m³/s. Cette surestimation est liée à la potentielle surestimation des débits de la banque Hydro. En effet, le calage a bien été réalisé sur les affluents en amont de Saintes comme présenté sur les graphiques ci-dessus.

3.6.3.2. Crue de 2007

Les stations hydrométriques en service et où les données de mesure de débit sont disponibles sur la banque HYDRO pour la crue de 2007 sont illustrées sur l'image suivante :

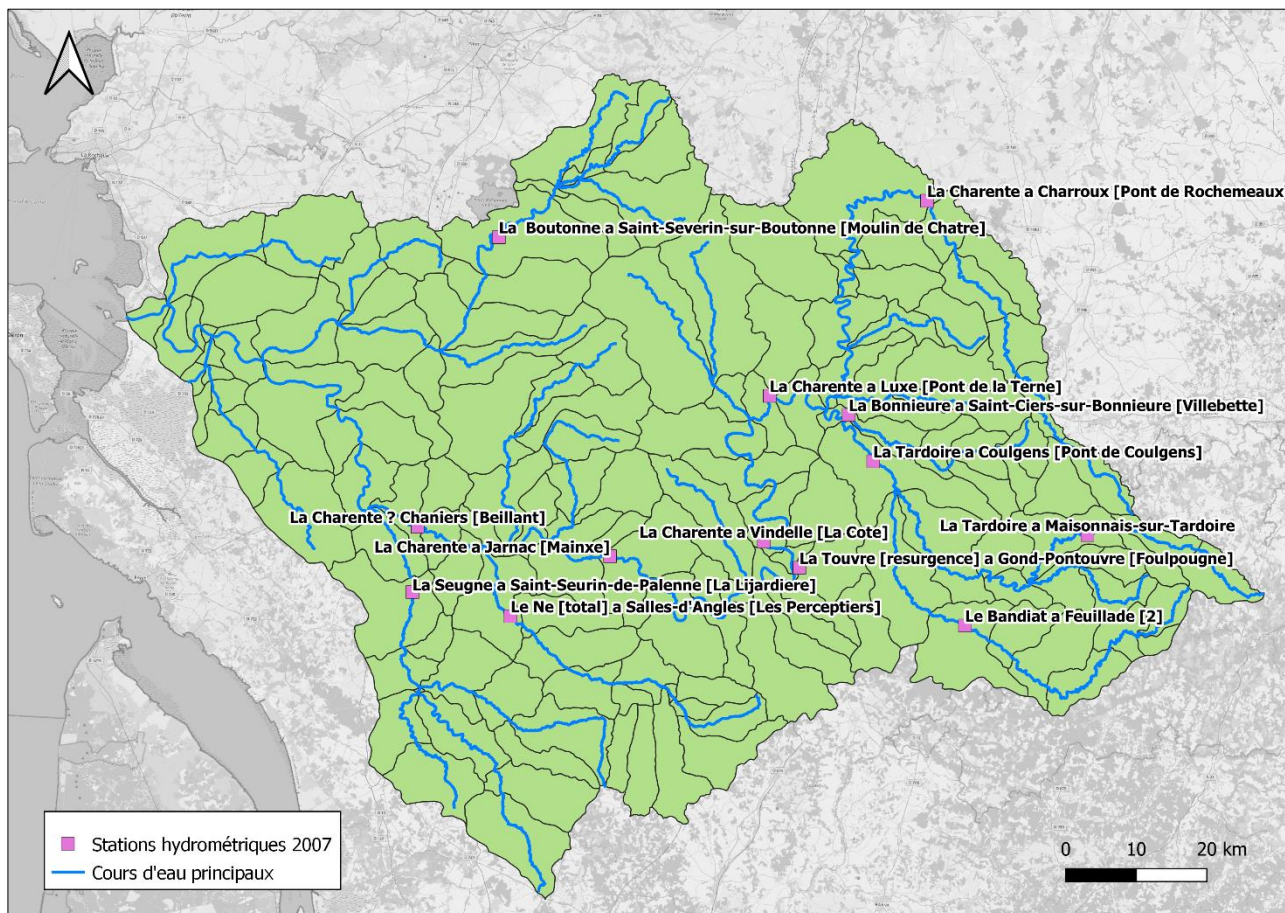


Figure 14 : Stations hydrométriques disponibles pour la crue de 2007

La période modélisée est du 23/02/2007 au 16/03/2007.

Les résultats de calage pour cette crue sont présentés ci-dessous :

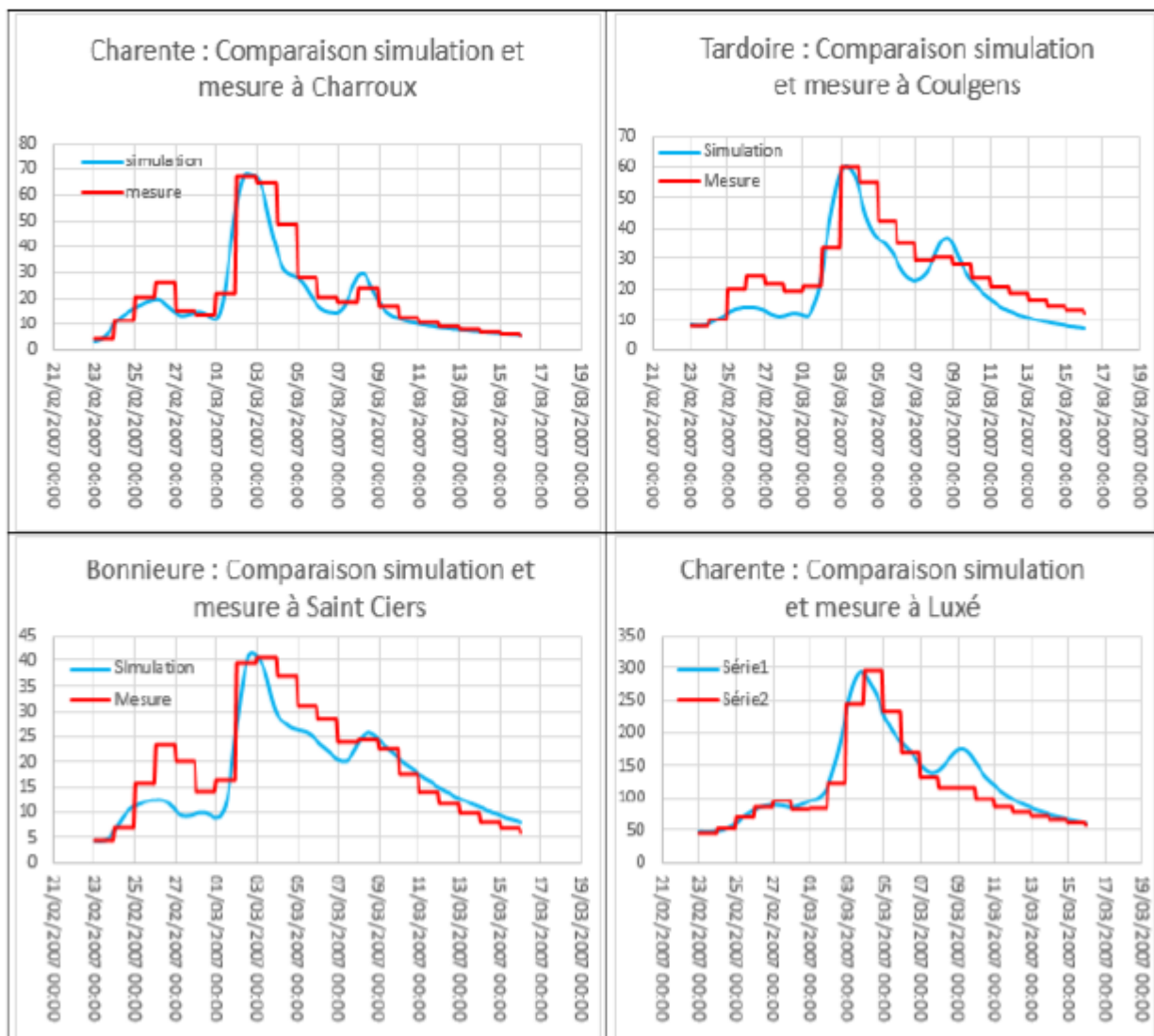


Figure 15 : Résultats de calage en amont de Vindelle - Crue de 2007

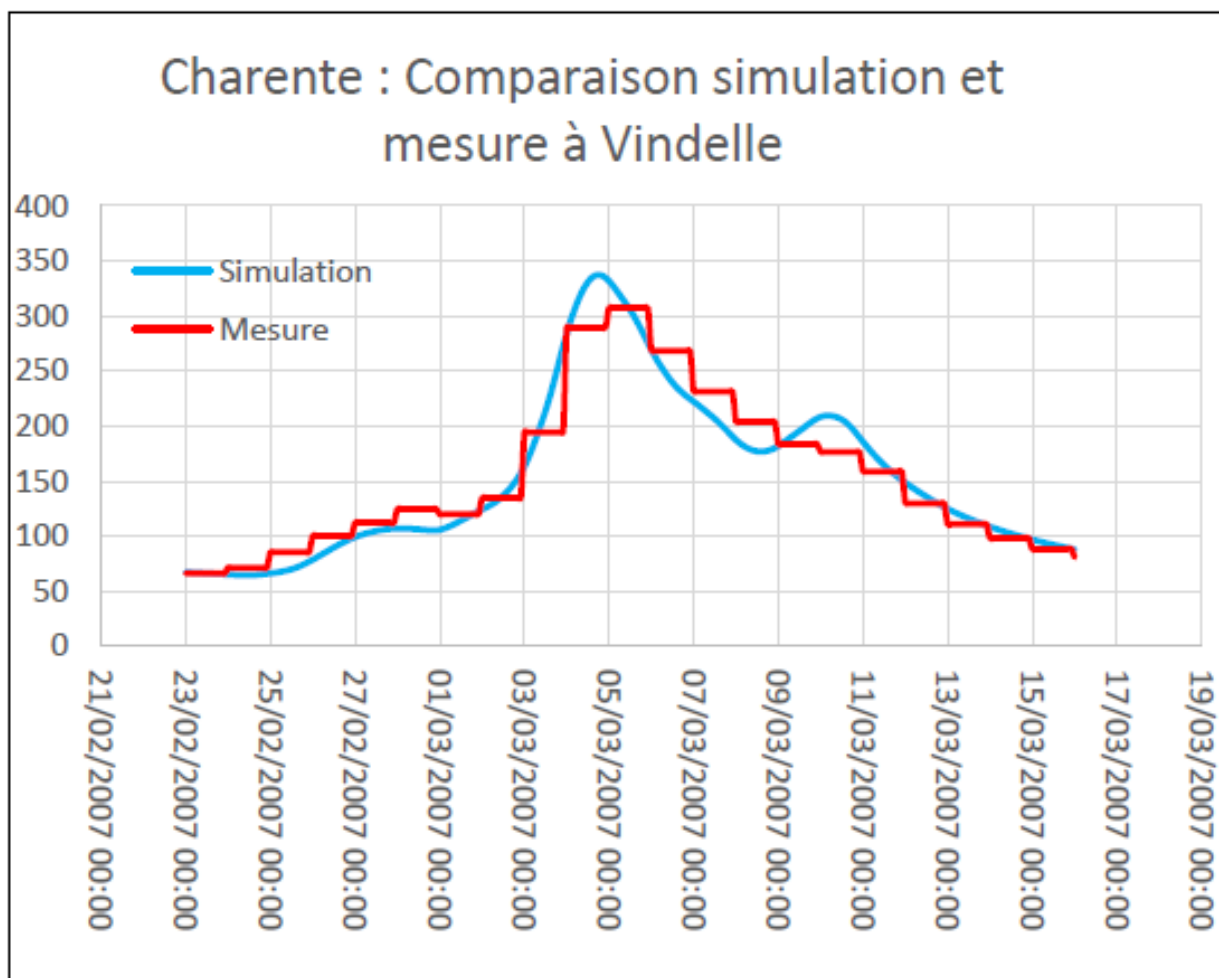


Figure 16 : Résultat de calage à Vindelle -Crue de 2007

Au niveau de la station de Vindelle, le pic de crue est globalement bien représenté, avec une légère surestimation de l'intensité du pic mais l'évolution du débit est très proche de la mesure.

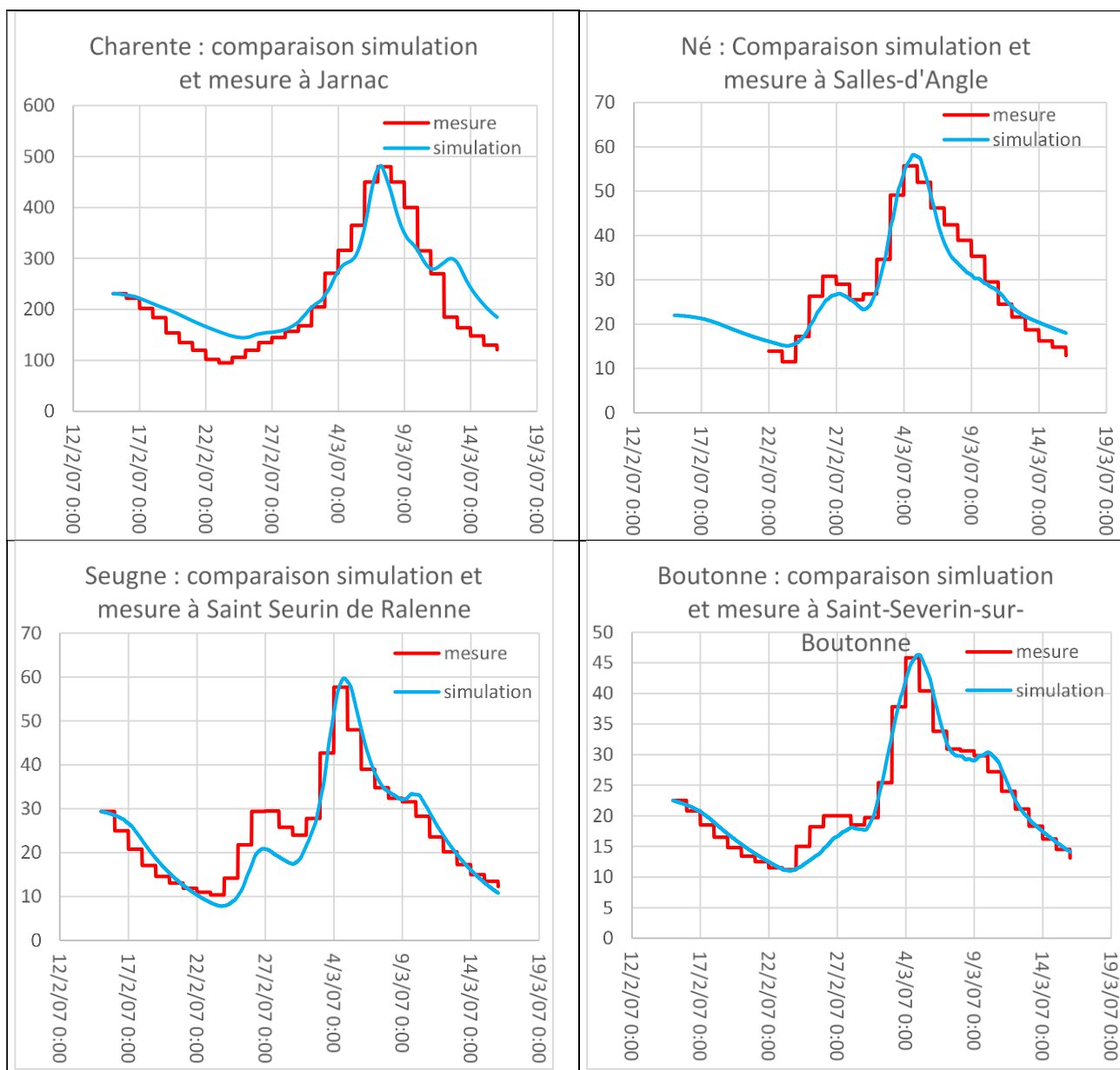


Figure 17 : Résultats de calage en aval de Vindelle

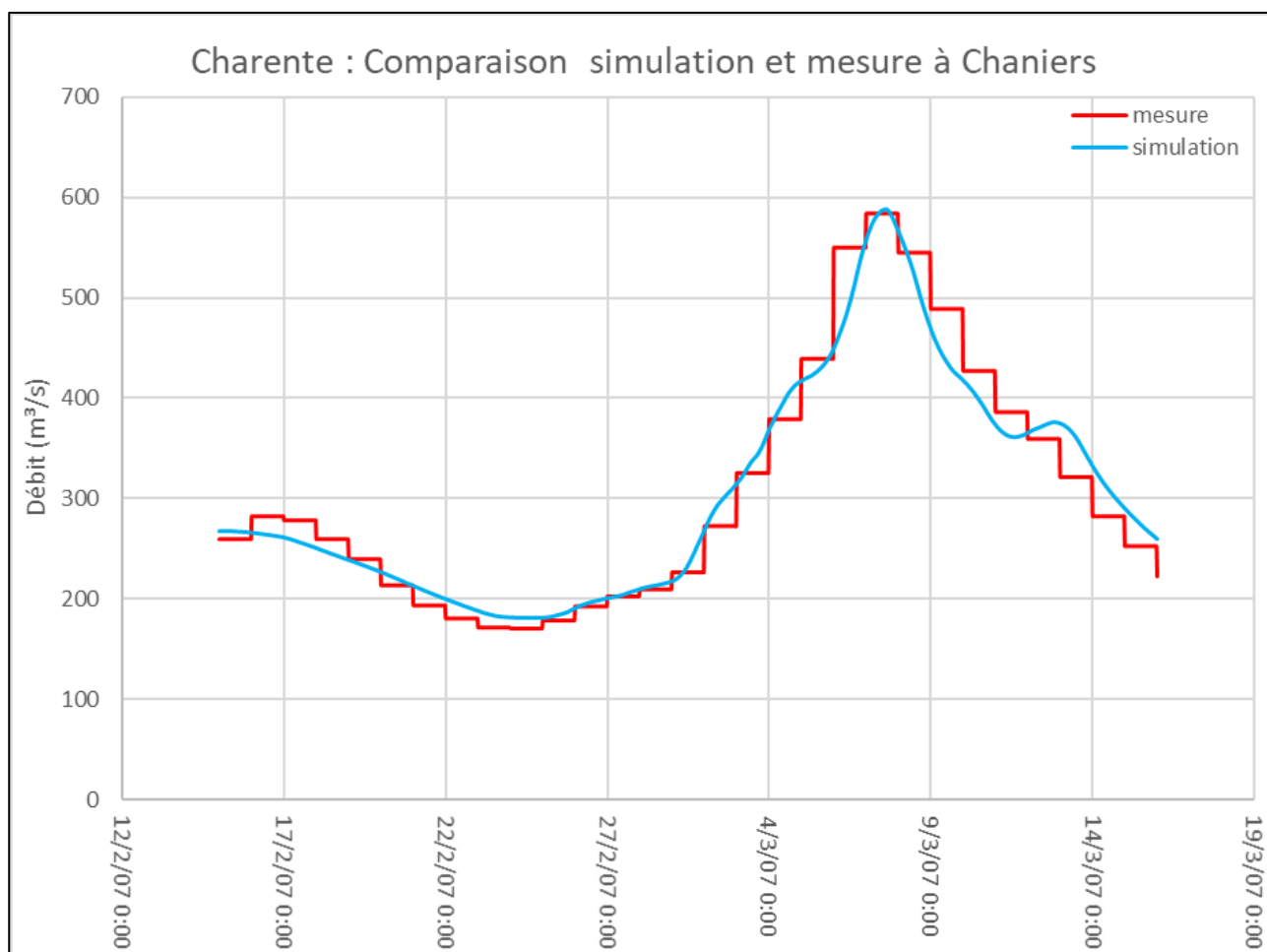


Figure 18 : Résultats de calage à Chaniers – crue 2007

L'ajustement des données d'entrée a permis d'avoir une bonne représentativité globale du modèle. Le critère de Nash calculé à la station de Vindelle est de 0,926, et à la station de Chaniers 0,949.

3.6.3.3. Crue de 2021

Pour cette crue, plusieurs stations hydrométriques sont disponibles, notamment sur certains affluents où les données étaient absentes pour les autres crues :

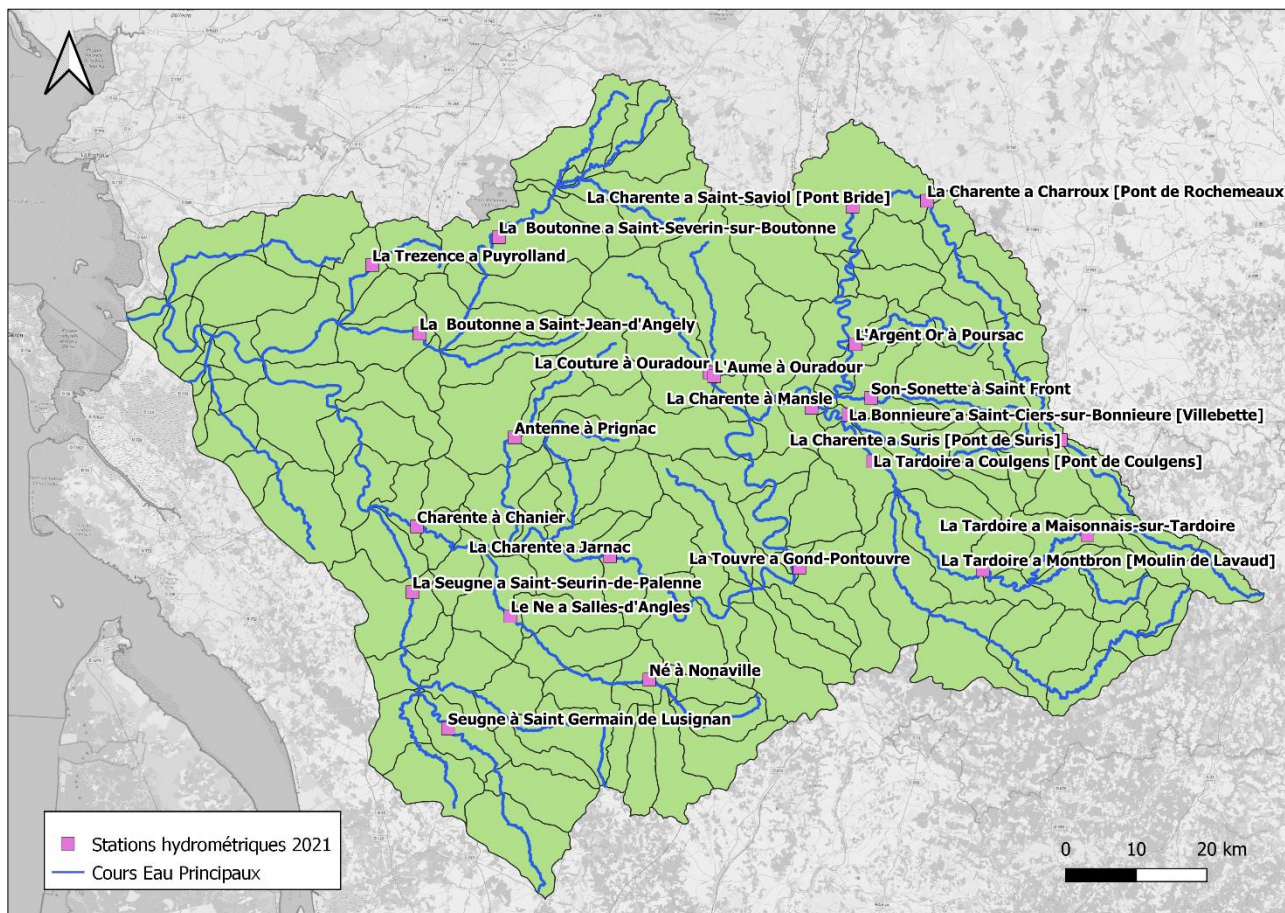


Figure 19 : Stations hydrométriques disponibles pour la crue de 2021

En plus des données disponibles dans la banque Hydro, une expertise du SPC a été fournie avec des données de débits plus précises.

La période modélisée est du 20/01/2021 au 26/02/2021.

Les résultats de calage pour cette crue sont présentés ci-dessous :

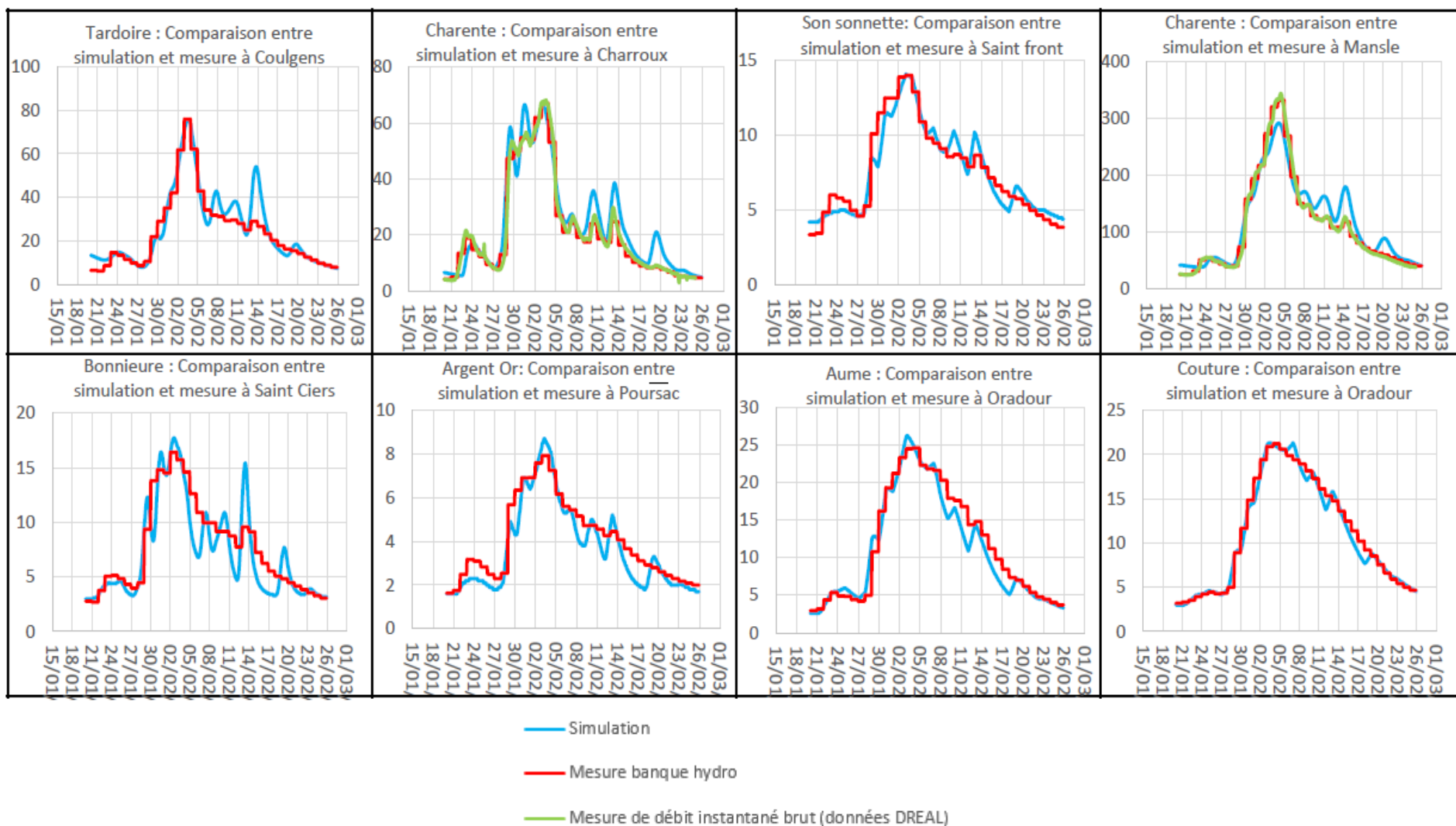


Figure 20 : Résultats de calage en amont de Vindelle - Crue de 2021

Charente : Comparaison entre simulation et mesure à Vindelle

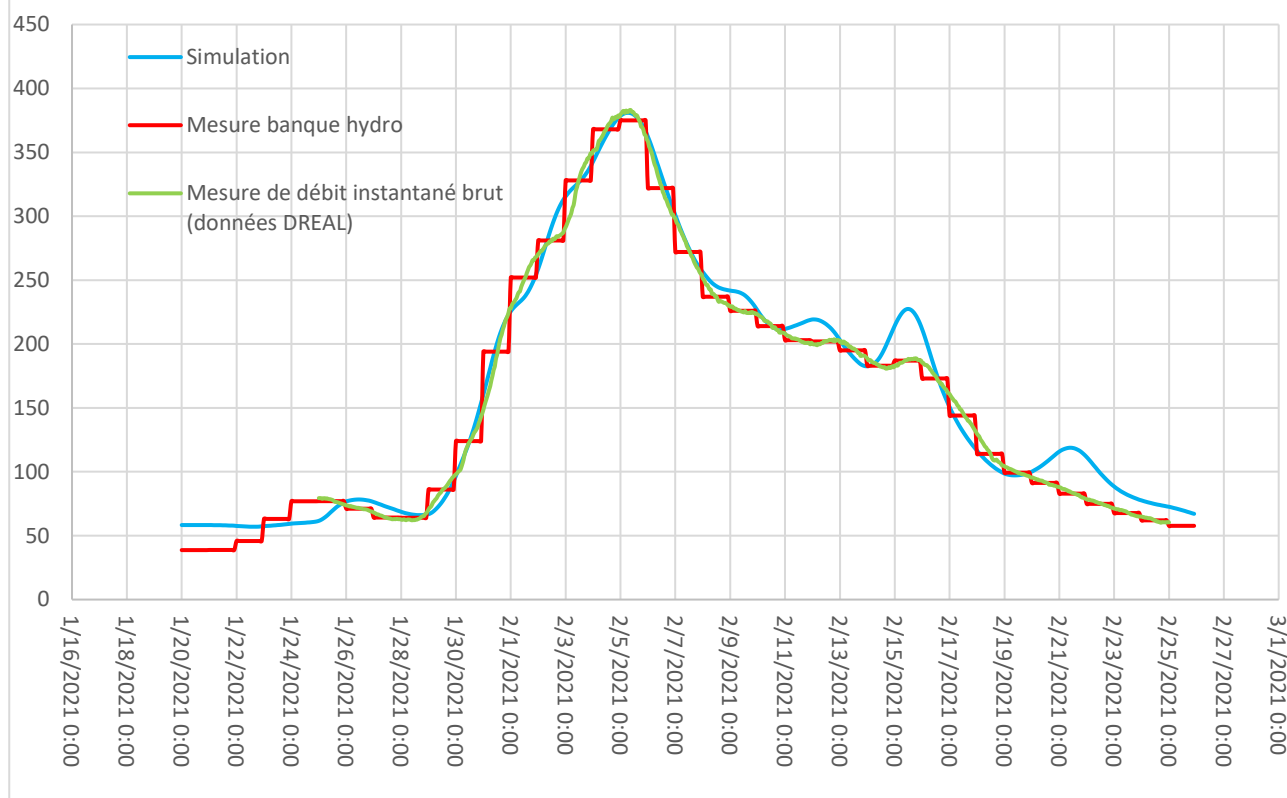
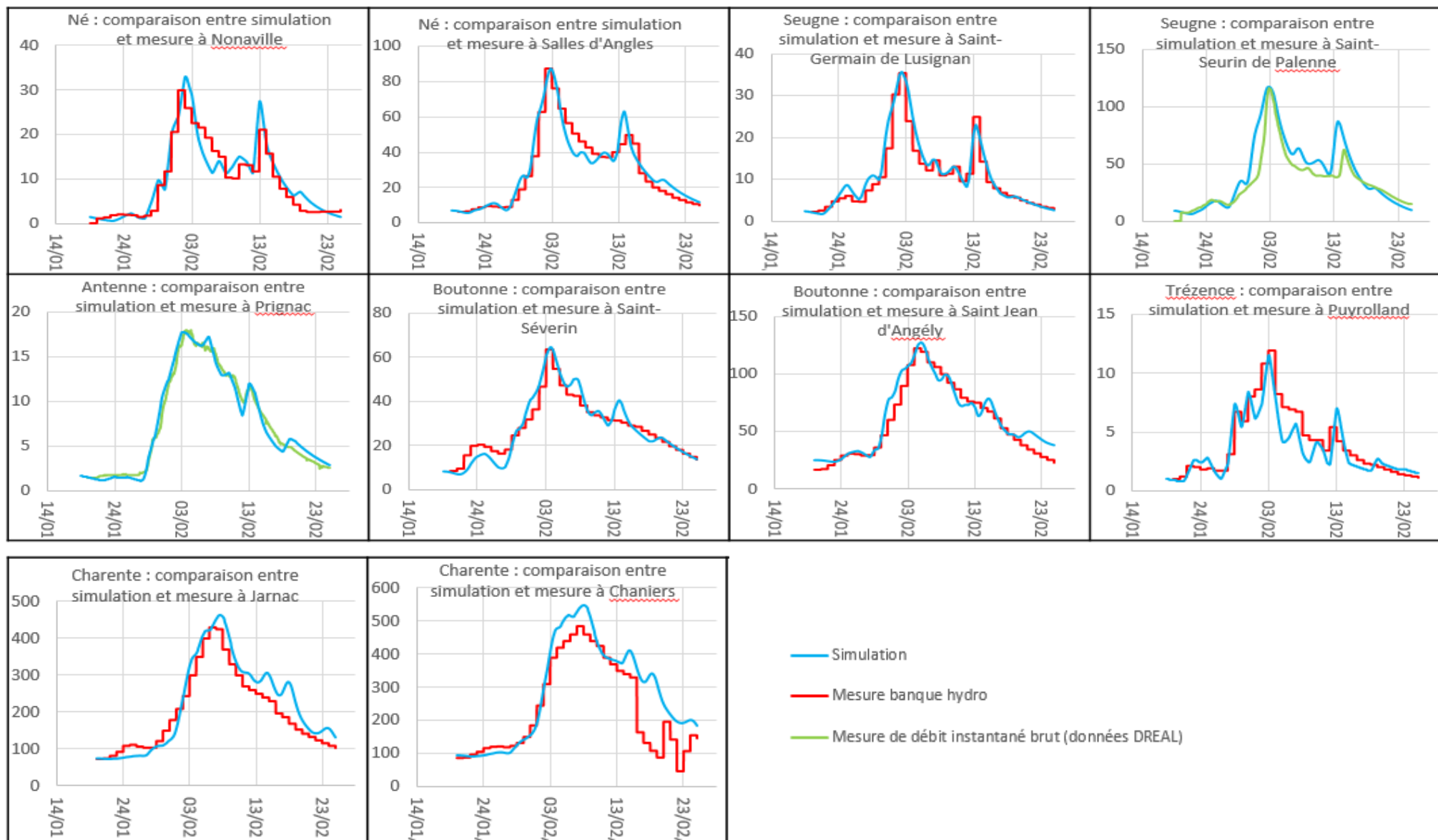


Figure 21 : Résultat du calage à Vindelle -Crue 2021

Les résultats obtenus à Vindelle sont très proches des mesures disponibles. L'intensité du pic et son heure d'arrivée est parfaitement représentée par le modèle hydrologique.



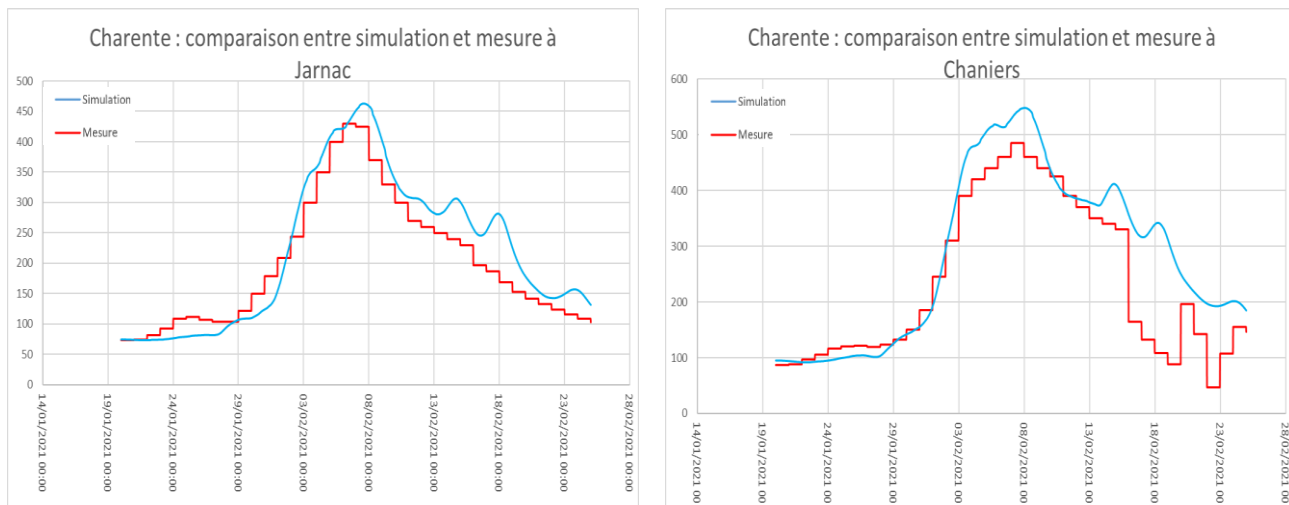


Figure 22 : Résultats du calage en aval de Vindelle -Crue de 2021

Il est à noter que les débits à Jarnac et à Chaniers sont issus d'appareils de mesure débitmétrique directe non fiabilisés en crue et qui ont sous-estimé le débit pour cette crue de 2021. Le débit jaugé à Jarnac par la DREAL a été de 460 m³/s.

Comme mentionné précédemment, les surestimations du débit des derniers pics pour les autres stations sont expliquées par les interprétations du modèle considérant que le sol est complètement saturé à partir d'un certain cumul de pluie. Il est à noter que les Curve Number pour cet événement, notamment sur la Charente amont ont été forcés pour bien représenter les débits mesurés. En effet, les données de pluie radar utilisées pour cette crue ont tendance à sous-estimer les cumuls de pluie réellement précipitée ce qui nous a contraint à forcer le ruissellement sur quelques secteurs du bassin versant.

Le critère de Nash calculé à Vindelle pour cet événement est de 0,959.

3.7. HORLOGE DES CRUES

L'horloge des crues présente les temps de propagation de l'onde de crue sur les affluents et sur le fleuve de la Charente. Elle permet de faire une analyse des concomitances et des déphasages des différents pics de crue calculés en aval de chaque sous-bassin versant. Les cartes présentées ci-dessous représentent les différences en heure entre le moment du pic de crue à l'exutoire de chaque sous-bassin et le moment du pic de crue à Vindelle (t_0) – donnée issue de la simulation. L'analyse de ces cartes doit permettre de repérer les bassins où il serait intéressant de ralentir les ondes de crue afin de les désynchroniser avec celles de la Charente.

Une analyse plus détaillée des déphasages entre le pic de crue de chaque affluent et celui à la confluence avec la Charente est présentée chapitre 4.2.1.

3.7.1. Crue de 1982

La carte de l'horloge des crues de la Charente est présentée ci-dessous :

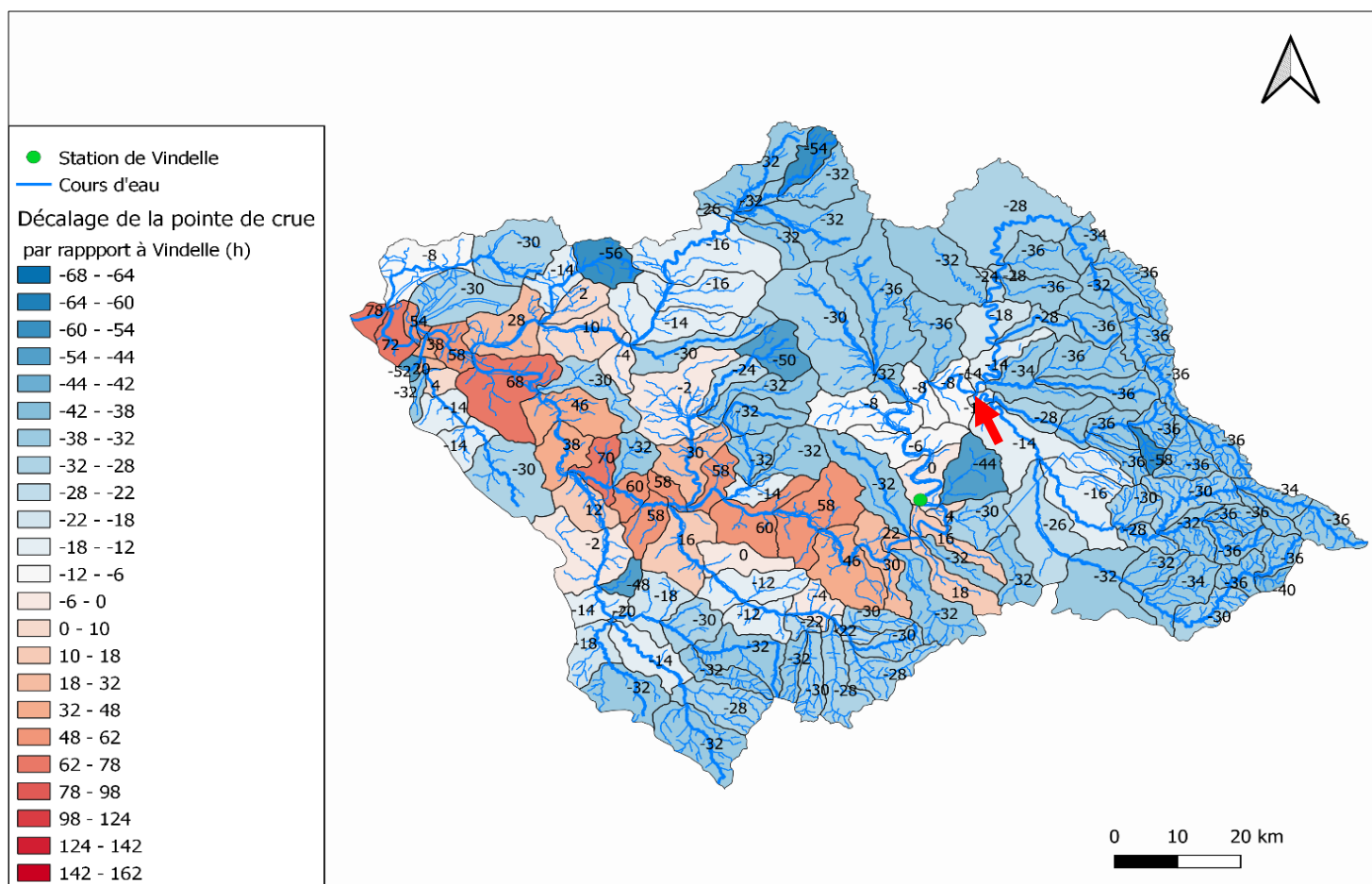


Figure 23 : Horloge de crue de 1982

Il ressort de l'analyse de cette carte que les pics de crue des affluents passent globalement bien avant celui de la Charente au niveau de chaque confluence. Cependant, on note une concomitance (à 4h près du pic de la Charente) avec l'arrivée du pic de crue sur la confluence Tardoire Bonnieure représentée par la flèche rouge sur la figure précédente.

Le pas de temps de calcul des modélisations hydrologiques étant de 2h, les ondes de crue d'un affluent et de la Charente sont considérées concomitantes à 4h près ($\pm 2h$).

La cartographie montre que les têtes de bassins versants réagissent sensiblement de manière simultanée, entre 30 et 40h avant d'observer la pointe de crue sur Vindelle.

De plus, on constate le long de l'axe Charente, d'amont en aval, un déphasage croissant entre le pic de crue de la Charente et ceux des affluents principaux :

- Une concomitance des pointes de crues entre la Charente et la confluence Tardoire Bonnieure,
- La pointe de crue de l'Antenne arrive à sa confluence avec la Charente 28h avant le pic de celle-ci,
- La pointe de crue du Né arrive 42h avant le pic de sa confluence avec la Charente,
- La pointe de crue de la Charente arrive 58h après celle de la Seugne.

Enfin la cartographie permet d'apprécier la vitesse de propagation de l'onde de crue le long des affluents. Par exemple, on constate que l'onde de crue du Né atteint l'axe Charente en 42h.

3.7.2. Crue de 2007

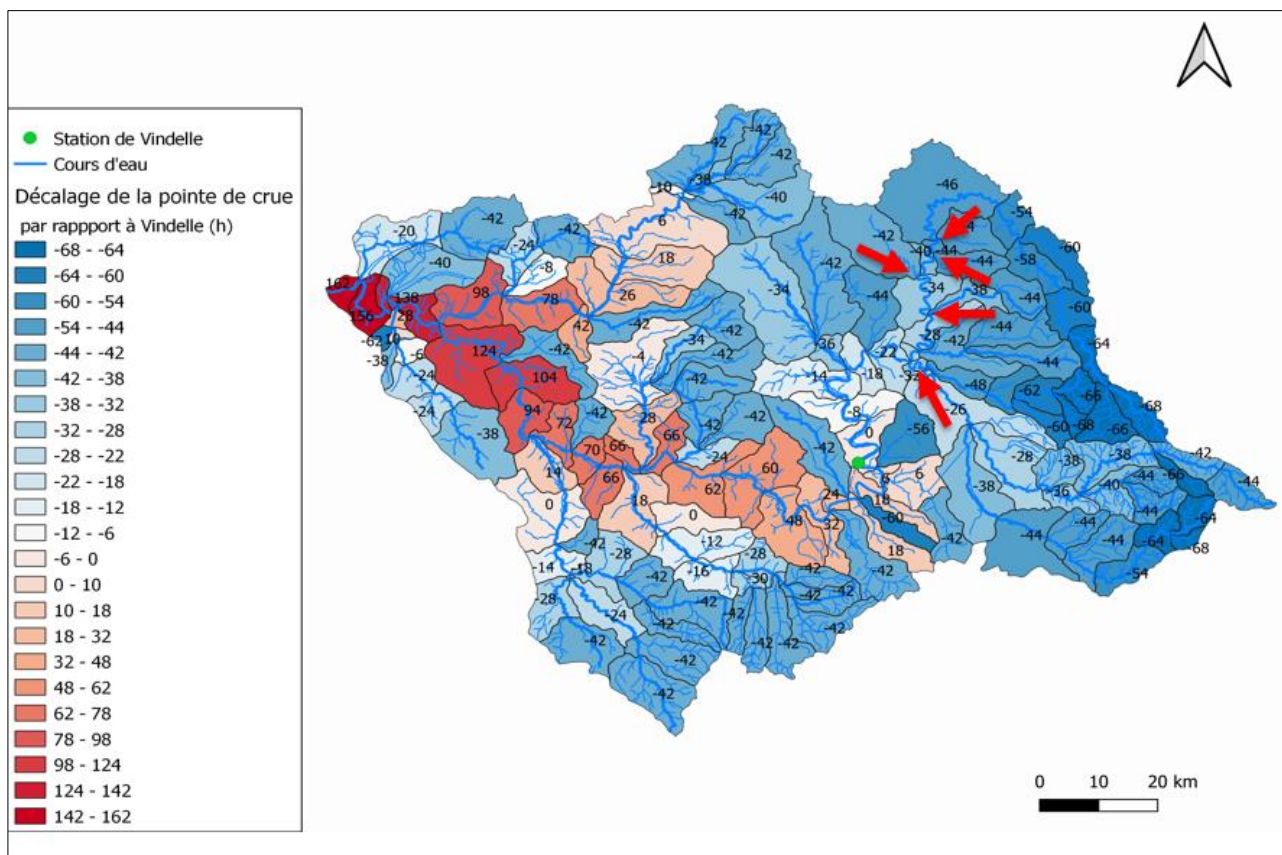


Figure 24 : Horloge de crue de 2007

Comme pour la crue de 1982, les pics de crue des affluents passent globalement bien avant celui de la Charente au niveau de chaque confluence.

La carte permet d'observer la variabilité de l'évènement avec des réactions des têtes de bassins versants à l'Est allant jusqu'à 68h avant la pointe de crue à Vindelle, contre 42h sur les têtes de bassins versants situées au Nord et au Sud de l'axe Charente.

Pour cette crue, des concomitances à 4h près sont observées avec l'arrivée du pic de crue sur la Charente sur les affluents suivants :

- Le Pas de la Mule ;
- La Lizonne ;
- L'Argent-Or ;
- La Péruse ;
- La Confluence Tardoire Bonnieure.

On observe ici aussi, comme identifié pour la crue de 1982, une croissance dans le déphasage des pointes de crue des principaux affluents le long de l'axe Charente.

L'horloge de crue de l'évènement de 2007 présente par ailleurs des similarités avec celle de 1982, ainsi un déphasage similaire est observé entre la confluence Tardoire Bonnieure, le Son-Sonnette, l'Argent-Or, la Péruse, le Bief, le Né et la Seugne avec la Charente.

Enfin on constate que l'affluent du Pas de la Mule atteint son pic de crue légèrement après le passage de celui de la Charente.

Enfin la cartographie permet d'apprécier la vitesse de propagation de l'onde de crue le long des affluents. Par exemple, on constate que l'onde de crue du Né atteint l'axe Charente en 48h.(similaire à la crue de 1982).

3.7.3. Crue de 2021

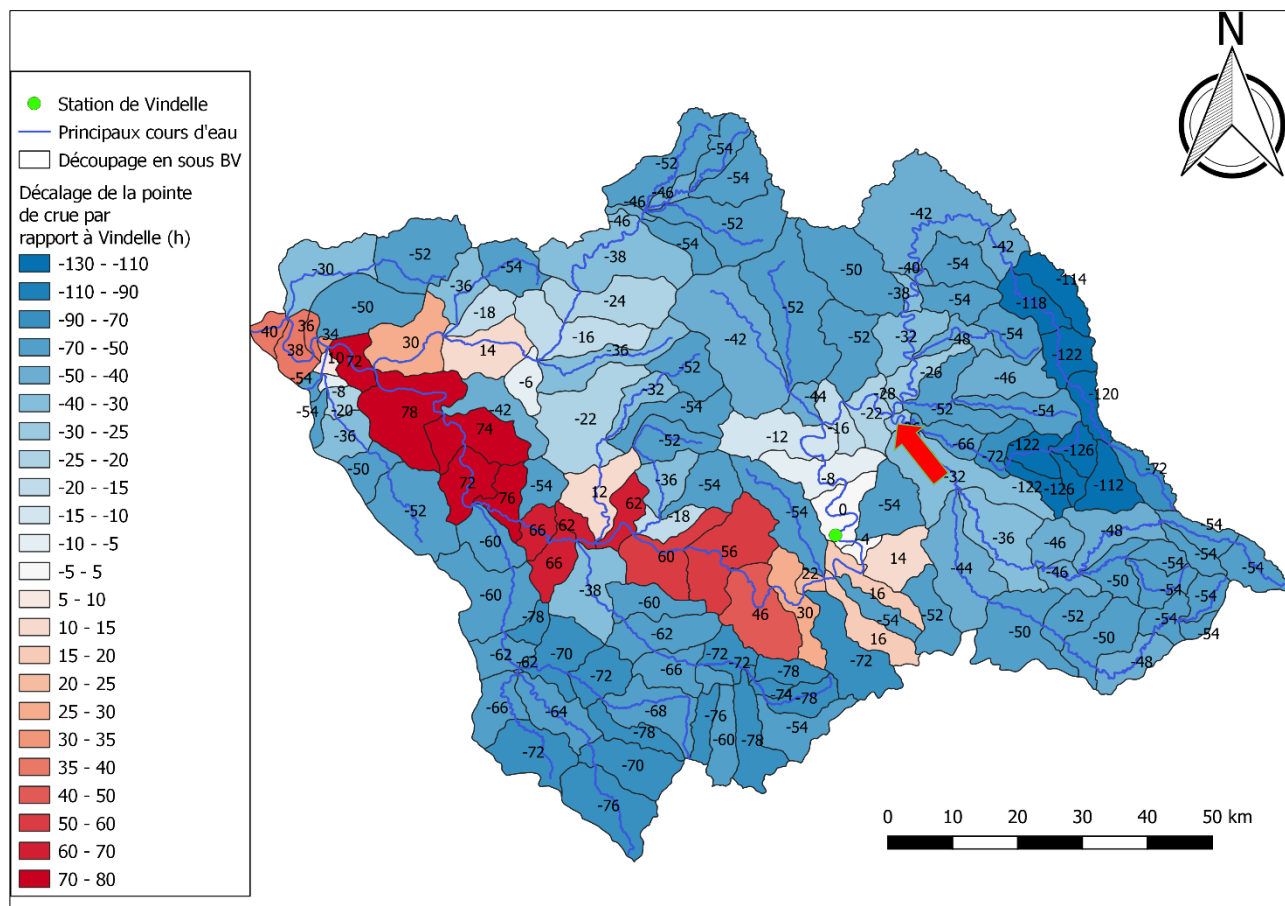


Figure 25 : Horloge de crues de 2021

A l'instar des événements de 1982 et 2007, les pics de crue des affluents passent globalement bien avant celui de la Charente au niveau de chaque confluence. Une concomitance sur la confluence Tardoire Bonnieure est également observée avec l'arrivée du pic de crue sur la Charente.

On constate, comme avec les événements étudiés précédemment, des déphasages des pointes de crue du même ordre de grandeur entre certains affluents (Soloire, confluence Tardoire, Bonnieure, Bief, Péruse, Aume Couture) et la Charente.

Pour cet événement, on constate que l'onde de crue du Né atteint l'axe Charente en 100h.

3.8. SYNTHÈSE DE LA PROPAGATION DES CRUES

Les graphiques présentés ci-après présentent les hydrogrammes de la Charente calculés depuis la confluence avec le Son-Sonnette jusqu'à Saintes pour les 3 événements étudiés. Ces graphiques permettent d'apprécier l'impact des apports des affluents principaux sur la propagation des crues de la Charente :

- Apports du bassin Bandiat Tardoire Bonnieure,
- Apports des bassins Aume Couture et Péruse Bief,
- Apports de la Touvre,
- Apports des bassins Antenne, Né et Seugne.

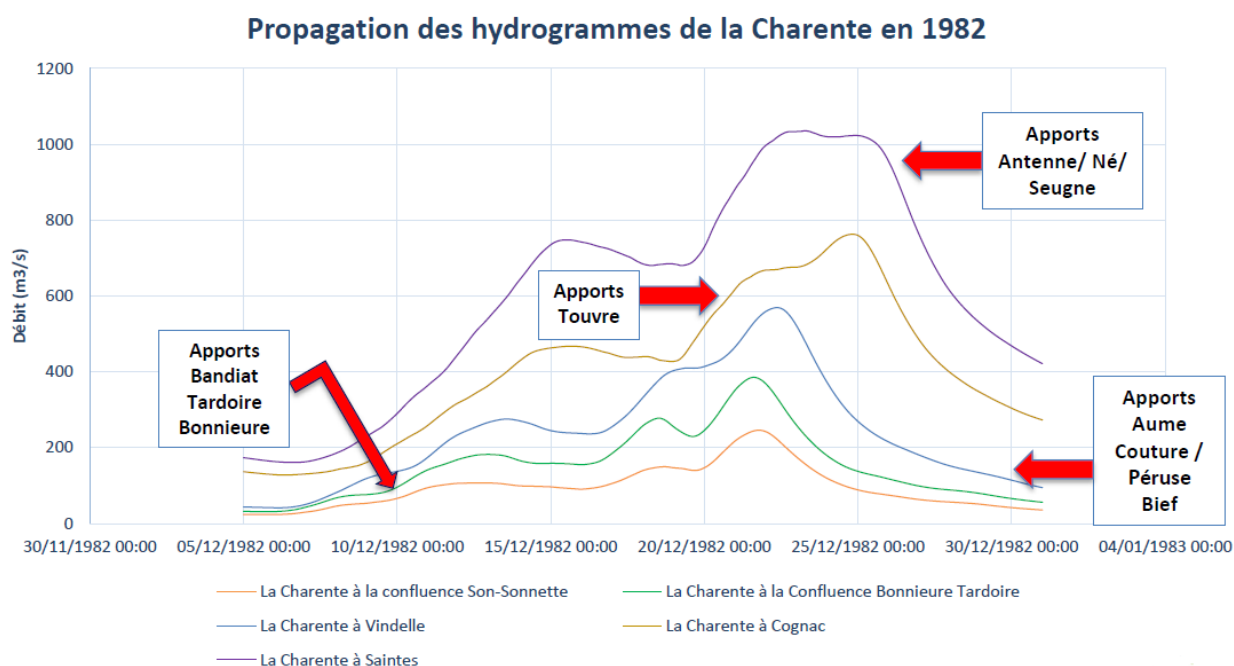


Figure 26 : Propagation des hydrogrammes de la Charente en 1982

Le graphique permet d'apprécier la propagation de l'onde de crue le long de la Charente. On peut ainsi observer un pic de crue modélisé à la station de Vindelle atteint vers le 22 décembre, alors que le pic n'est atteint à Cognac que le 24 décembre. Le graphique montre également un pic de crue à Saintes durant plusieurs jours causé par les apports des bassins de la Seugne et du Né notamment.

Le graphique permet en outre d'observer les apports linéaires et ceux des principaux affluents de la Charente en observant la différence entre deux hydrogrammes. Par exemple, on observe entre l'hydrogramme de la Charente à la confluence Bonnieure, Tardoire et celui à Vindelle une augmentation du pic de crue de l'ordre de $200 \text{ m}^3/\text{s}$, traduisant des apports importants.

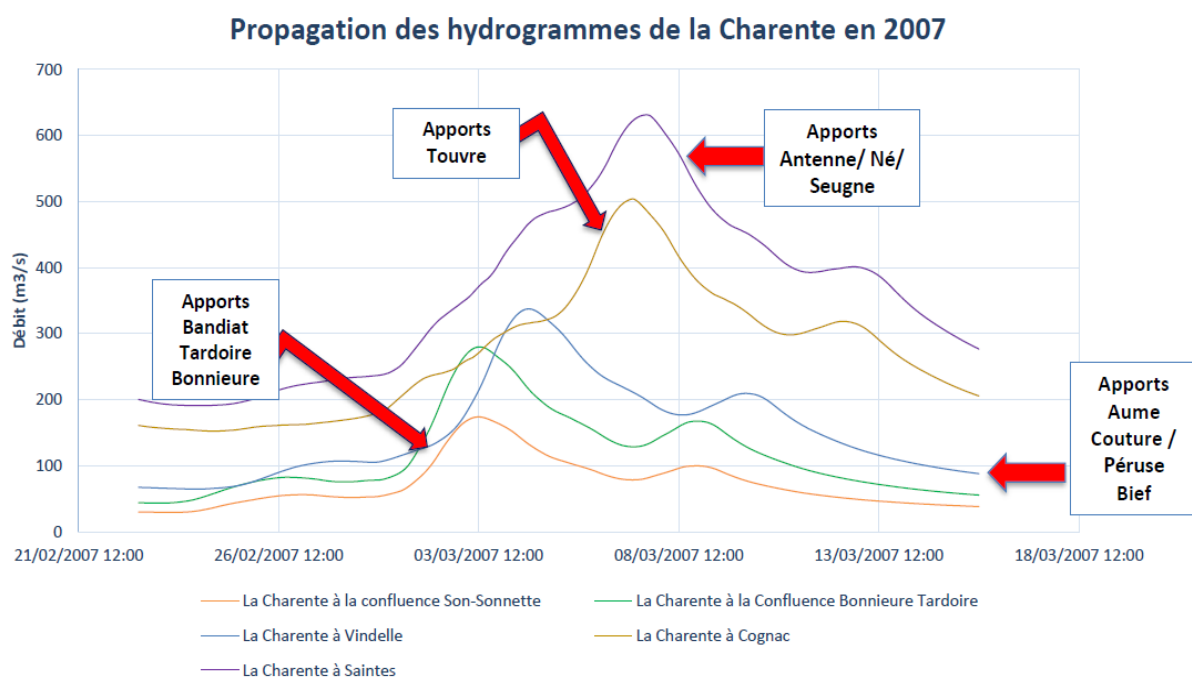


Figure 27 : Propagation des hydrogrammes de la Charente en 2007

Le graphique permet d'observer un décalage du pic de crue de la Charente suite aux apports de la Touvre. En effet, le pic de crue à Vindelle est atteint vers le 4 mars, alors que le pic à Cognac n'est atteint que vers le 7 mars (même ordre de grandeur que pour la crue de 1982). On peut également observer que les apports de l'Aume Couture et Péruse Bief induisent un décalage du pic de crue d'environ 2 jours pour la crue de 2007.

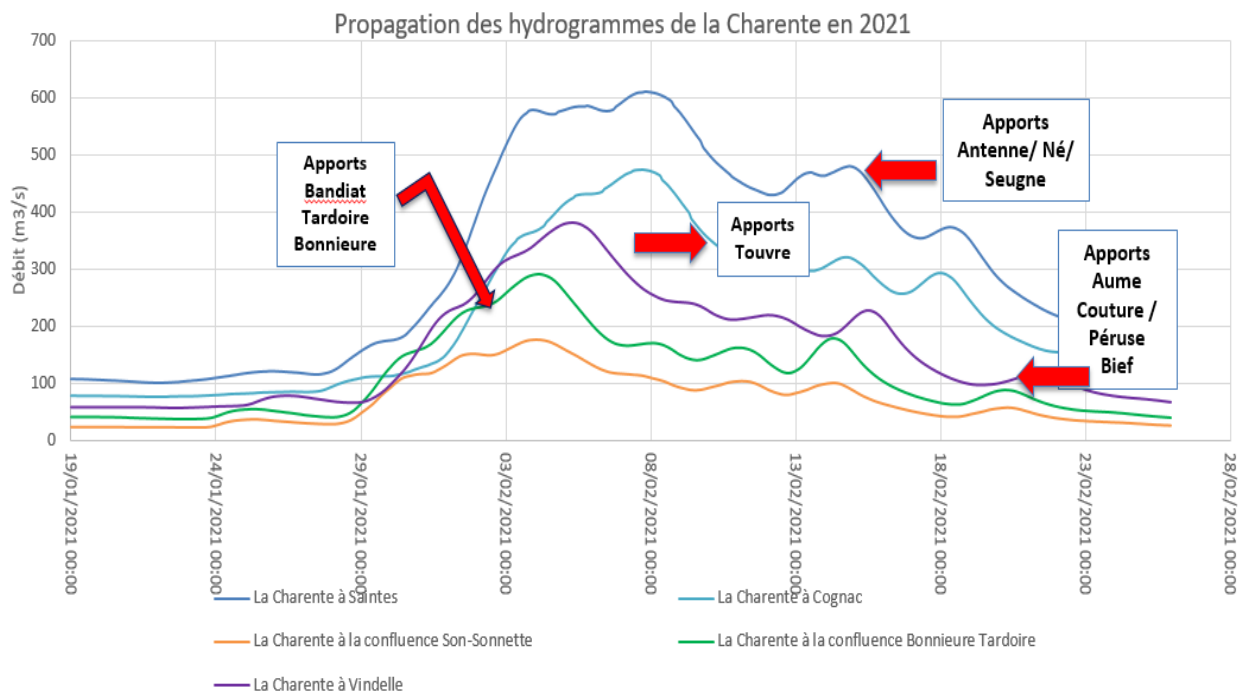


Figure 28 : Propagation des hydrogrammes de la Charente en 2021

Enfin pour la crue de 2021, nous pouvons observer que les apports du secteur Bandiat Tardoire Bonnieure sont importants. En effet, on observe une augmentation du pic de crue d'environ $120 \text{ m}^3/\text{s}$ entre l'hydrogramme de la Charente à la confluence Bonnieure, Tardoire et celui à Vindelle. Nous observons également que la forme de l'hydrogramme a changé suite aux apports de l'Antenne, la Seugne et le Né. En effet, l'hydrogramme de la Charente à Saintes présente une montée plus rapide avec un pic qui dure plus longtemps.

3.8.1. Méthodologie d'analyse des contributions

L'objectif de cette partie est de déterminer, par grands secteurs, les bassins les plus contributeurs aux crues de la Charente.

Afin d'analyser ces apports, nous avons procédé à des regroupements entre les 150 sous-bassins versants du modèle hydrologique sur des territoires hydrauliquement cohérents. Certains secteurs correspondent ainsi à des bassins versants de la Charente et d'autres à des portions de la Charente incluant des petits bassins versants interceptés.

Afin de déterminer la part de contribution de chacun de ces secteurs, on procède par « effacement » successif de chacun des secteurs dans le modèle. On considère que toute la pluie tombée sur les sous-bassins versants le composant est totalement infiltrée. Le ruissellement pluvial lié à ce secteur ne va donc pas contribuer à la crue de la Charente. Le bassin « effacé » contribuera donc uniquement par son débit de base.

L'analyse des contributions se fait en se basant sur deux approches :

- Une approche absolue où l'on évalue la valeur brute de l'atténuation du débit de pointe (à Vindelle pour la partie amont et à la confluence Charente Seugne pour la partie aval) induite par chaque secteur.
- Une approche relative où la superficie des secteurs est prise en compte. La contribution est donc calculée à partir du ratio calculé comme suit :

$$\text{Ratio de contribution}_{\text{secteur}} = \frac{\text{Contribution}_{\text{secteur}}}{\text{Surface}_{\text{secteur}}} \bigg/ \frac{\text{Contribution}_{\text{totale}}}{\text{Surface}_{\text{totale}}}$$

Ce ratio permet d'évaluer la contribution de chaque secteur au regard de sa superficie, et de la comparer par rapport à la contribution moyenne du bassin versant global (ramenée sur une base 100). Si le ratio d'un secteur est supérieur à 100, la contribution de ce secteur est donc proportionnellement plus importante par rapport à sa superficie, et contribue plus que la moyenne des autres secteurs.

Le découpage suivant a été utilisé :

▪ **Partie amont :**

- Aume Couture
- Bandiat Tardoire Bonnieure
- Charente amont
- Charente Vouleme Vindelle
- Pas de la Mule / Lizonne / L'Argent Or
- Péruse Bief
- Son-Sonnette

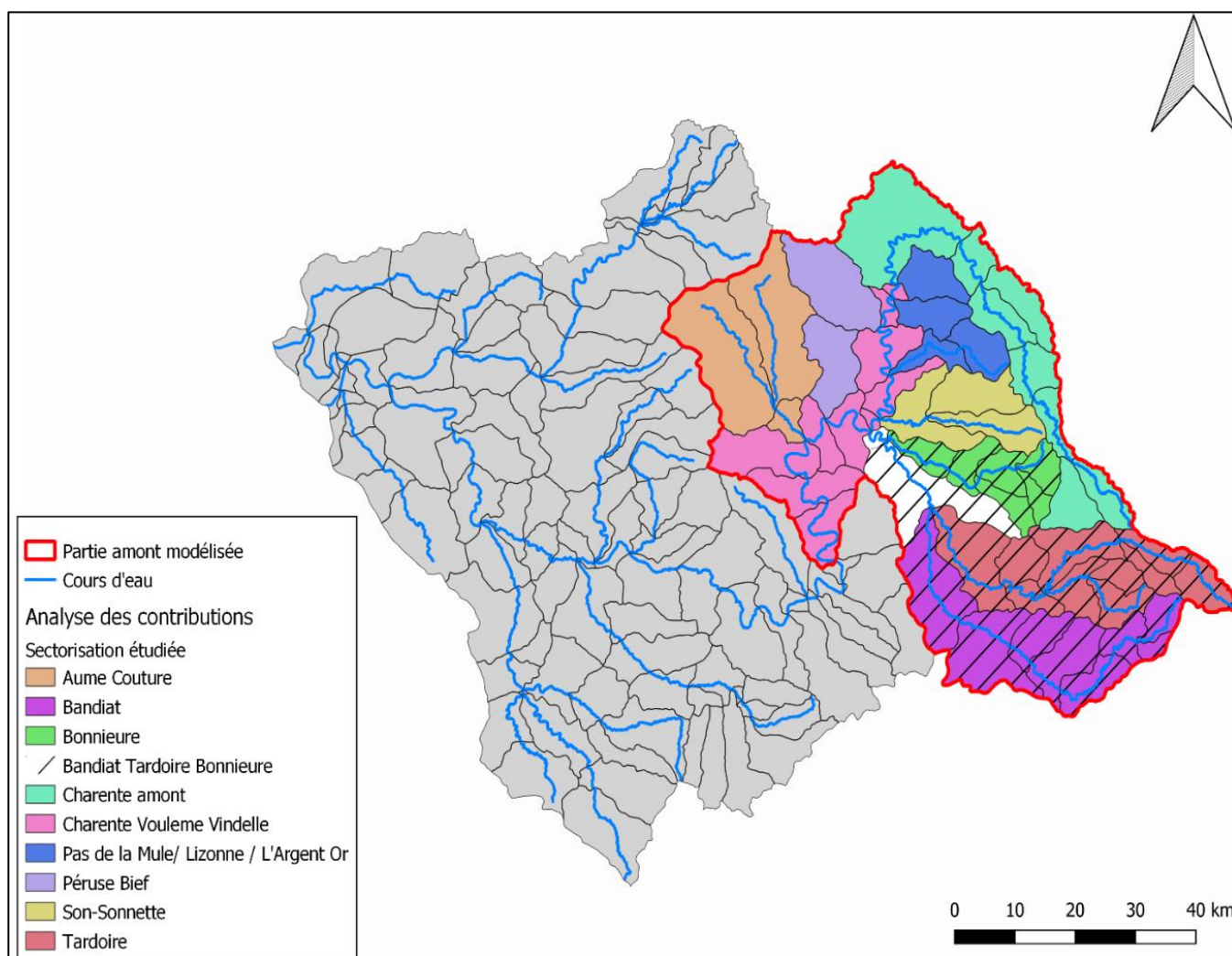


Figure 29 : Découpage en grands secteurs - Partie amont

▪ **Partie aval :**

- Touvre
- Nouère
- Charente aval
- Né
- Antenne Soloire
- Seugne

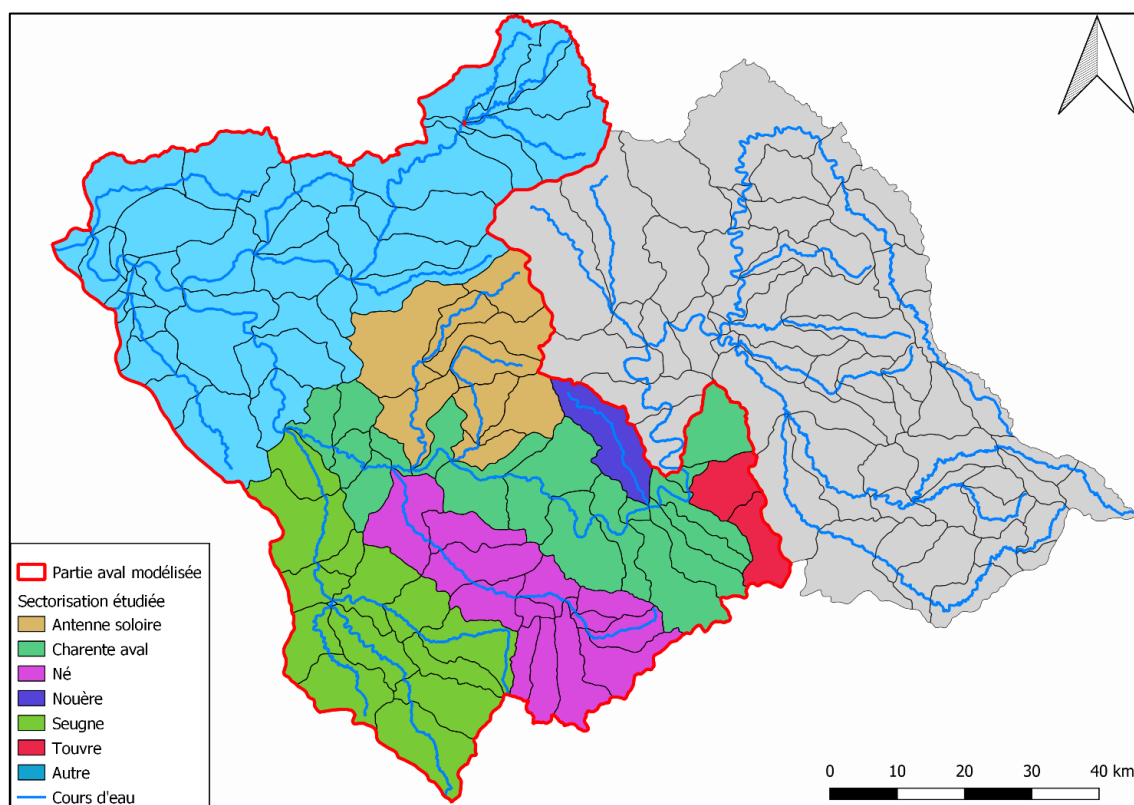


Figure 30 : Découpage en grands secteurs - Partie aval

3.8.2. Contribution absolue

Il a donc été analysé dans un premier temps la contribution absolue des différents grands secteurs présentés ci-avant. Cette contribution permet d'apprécier la proportion de chaque secteur au débit de pointe de la Charente observé à Vindelle pour les grands secteurs de la partie amont ou à Saintes pour la partie aval.

3.8.2.1. Crue de 1982

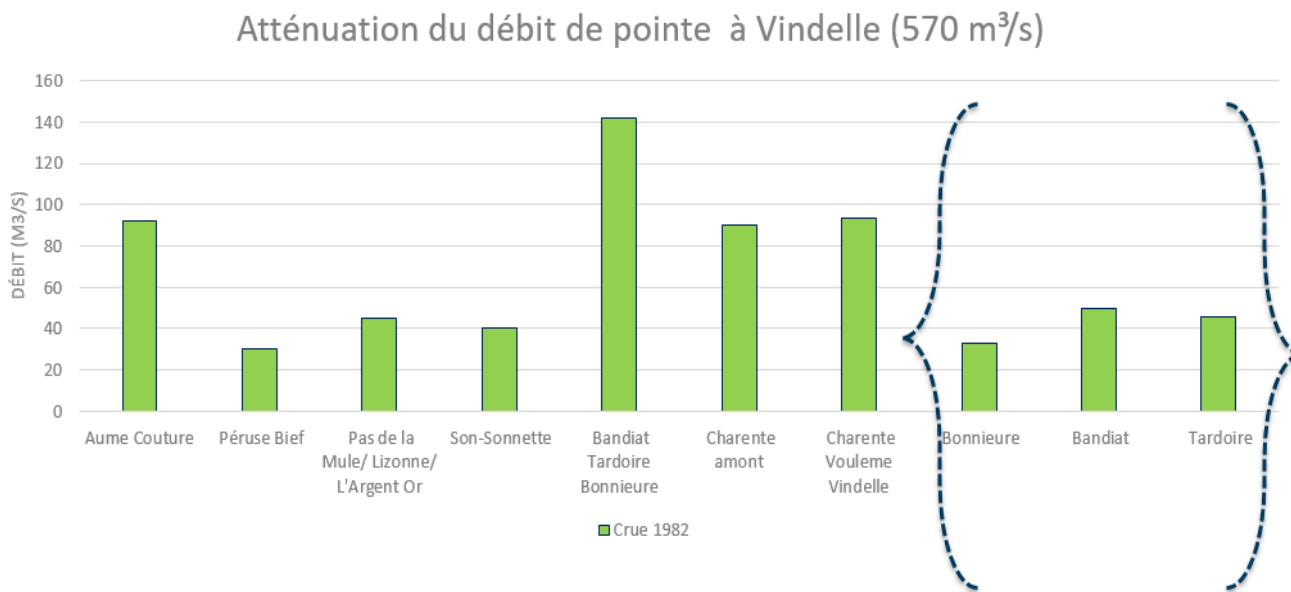


Figure 31 : Contribution absolue - Crue de 1982 (Partie amont)

Ainsi pour la crue de 1982, on observe que c'est le secteur Bandiat Tardoire Bonnieure qui contribue le plus au débit de pointe de la Charente à Vindelle. Les bassins Charente amont, Charente Vouleme Vindelle et l'Aume Couture contribuent à la même hauteur pour la crue de 1982. Les secteurs Péruse Bief, Pas de la Mule/Lizonne/Argent Or et Son-Sonnette ont peu contribué au pic de la Charente à Vindelle, ce qui peut s'expliquer par leurs faibles superficies.

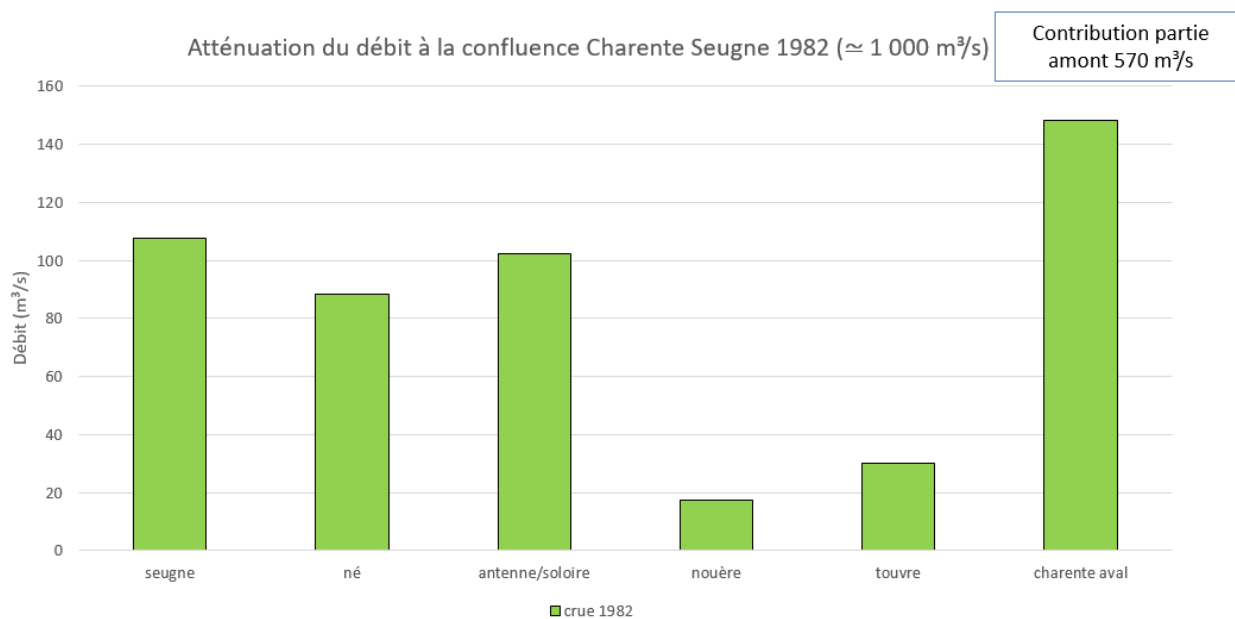


Figure 32 : Contribution absolue - Crue de 1982 (Partie aval)

En aval de Vindelle, on peut observer que le secteur Charente aval contribue de manière importante au pic de crue observé à Saintes. Les secteurs Seugne, Né et Antenne Soloire ont une contribution du même ordre de grandeur pour cette crue.

3.8.2.2. Crue de 2007

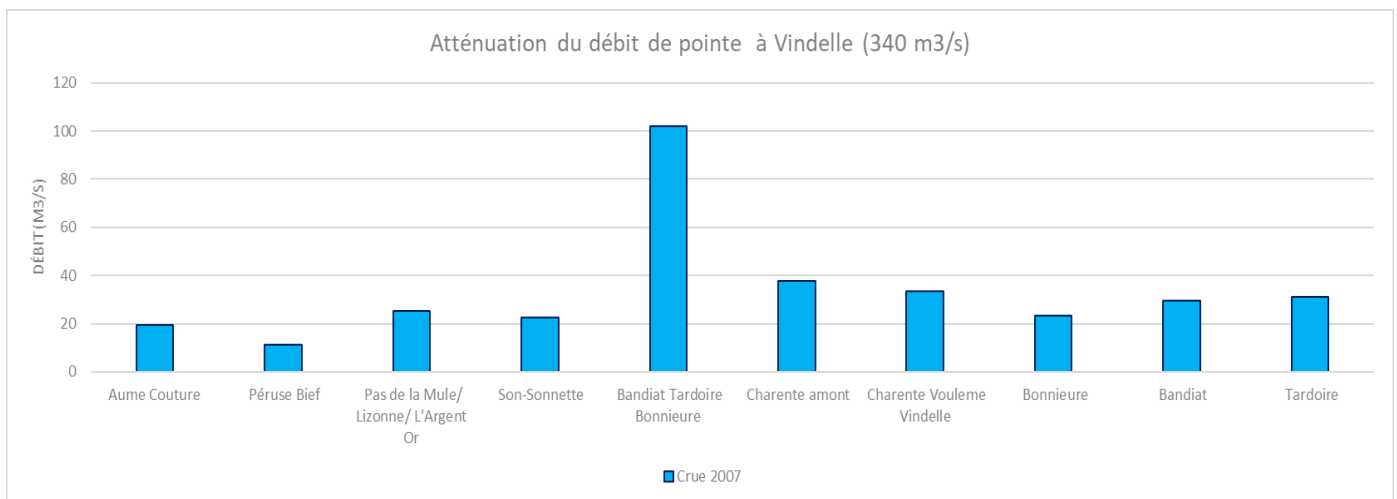


Figure 33 : Contribution absolue - Crue de 2007 (Partie amont)

Comme pour la crue de 1982, le secteur Bandiat Tardoire Bonnieure est le plus contributeur au pic de crue de la Charente à Vindelle. A l'inverse, la contribution de l'Aume Couture est moins importante pour l'événement de 2007 et s'approche des contributions des secteurs Son-Sonnette, Pas de la Mule/Lizonne/L'Argent Or et Péruse Bief.

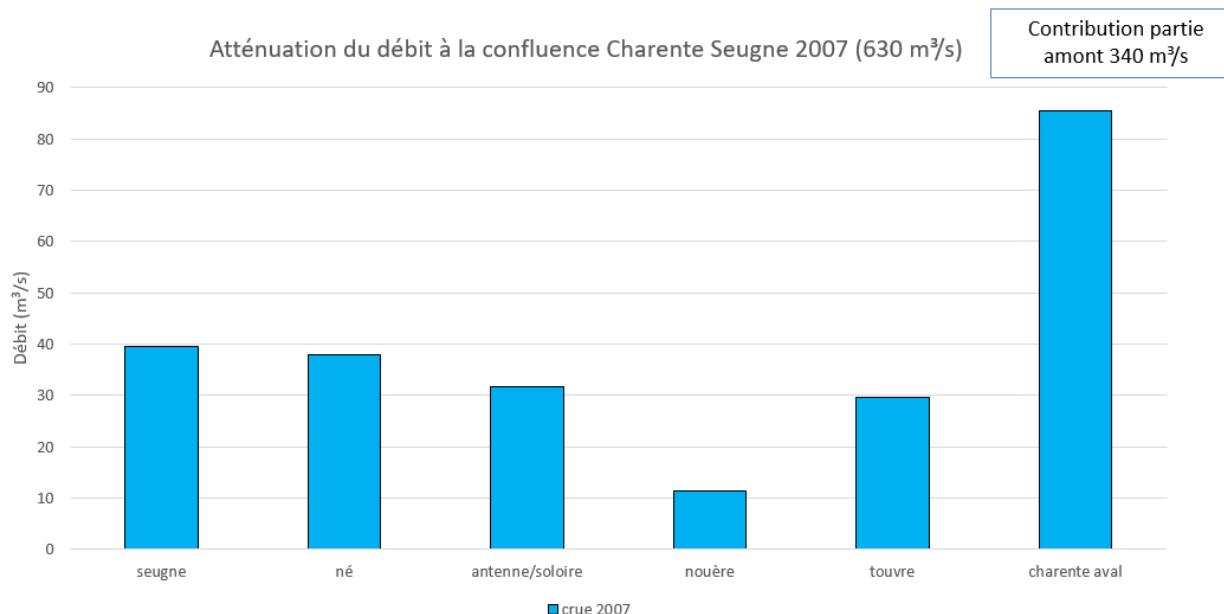


Figure 34 : Contribution relative - Crue de 2007 (Partie aval)

Comme pour l'événement de 1982, la Charente aval est le contributeur le plus important au pic de crue observé à Saintes. Ensuite, les secteurs Seugne, Né et Antenne Soloire contribuent de manière similaire. Il est à noter que la contribution de la Touvre est faussée par les apports de la zone karstique.

3.8.2.3. Crue de 2021

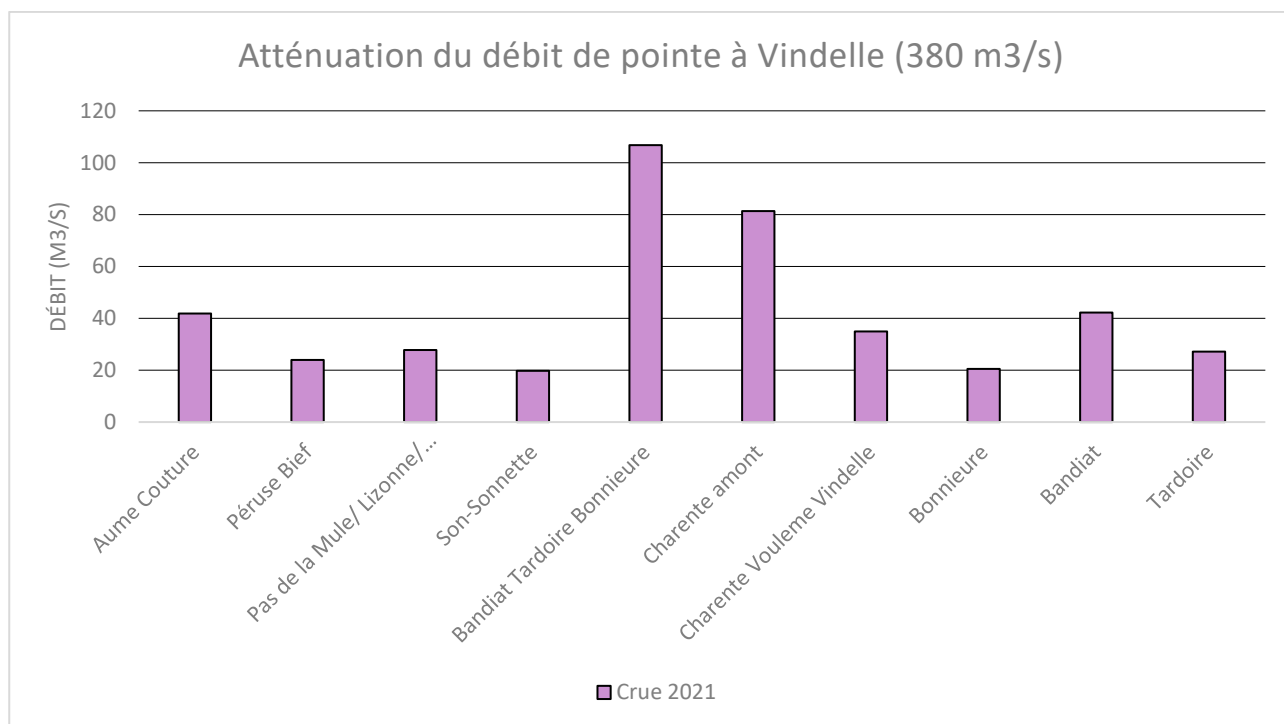


Figure 35: Contribution absolue - Cruet de 2021 (Partie amont)

Concernant la crue de 2021, nous retrouvons ici aussi une grande contribution du secteur Bandiat Tardoire Bonnieure. A l'inverse des événements de 1982 et 2007, la contribution du secteur Charente amont est nettement plus importante que le secteur Charente Vouleme Vindelle qui s'approche pour cet événement des contributions des secteurs Aume Couture et Pas de la Mule/Lizonne/Argent Or.

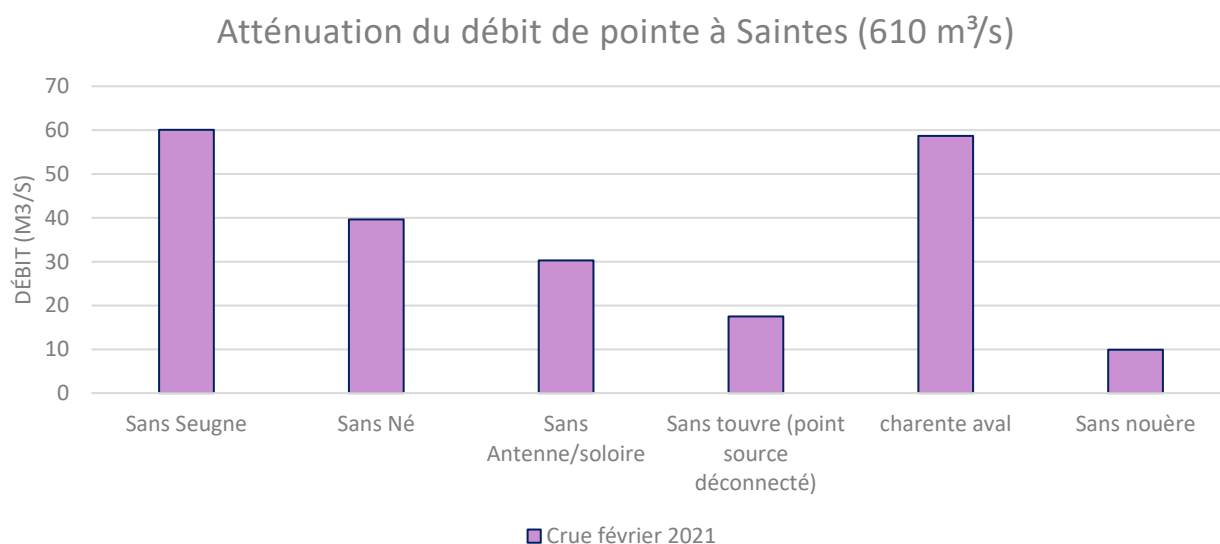


Figure 36 : Contribution absolue - Cruet de 2021 (Partie aval)

Pour la crue de 2021, les deux secteurs Charente aval et Seugne ont contribué à la même hauteur contrairement aux événements de 1982 et 2007 pour lesquels la Seugne avait une plus faible contribution au pic observé à Saintes.

3.8.3. Contribution relative

L'analyse s'est ensuite portée sur les contributions relatives des grands secteurs afin d'évaluer, au regard de leur superficie, l'impact sur les débits de pointe de la Charente.

L'analyse concerne les trois crues simultanément afin d'observer les variations de contribution de chaque secteur selon l'évènement.

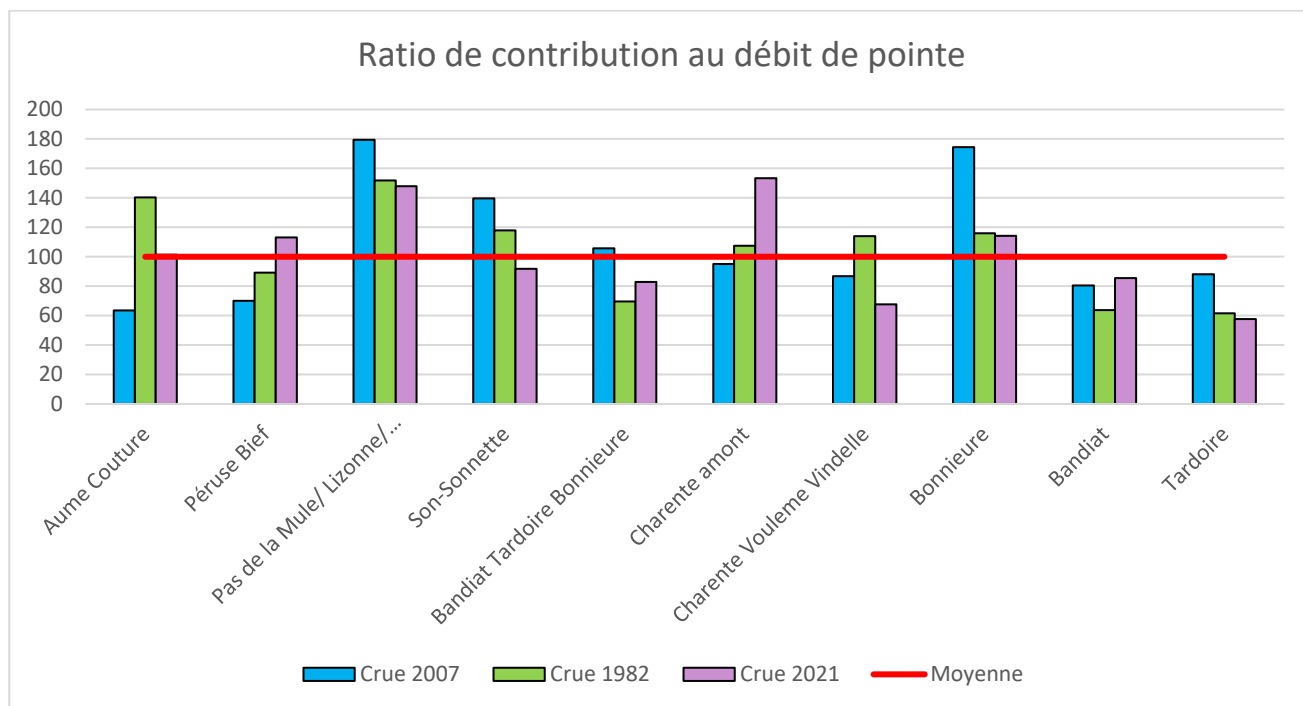


Figure 37 : Contribution relative (Partie amont)

Il ressort de l'analyse de ce graphique que les secteurs Pas de la Mule/Lizonne/L'Argent Or, Son-Sonnette et Charente amont sont des secteurs plus producteurs du ruissellement, au regard de leurs superficies, par rapport aux autres secteurs de la partie amont du territoire. Il est également à noter que les secteurs Aume Couture et Charente Vouleme Vindelle ont beaucoup contribué, en relatif, pour la crue de 2007.

Bien que le secteur Bandiat Tardoire Bonnieure est le plus contributeur en absolu pour tous les événements étudiés, sa contribution relative est inférieure à la moyenne du territoire global.

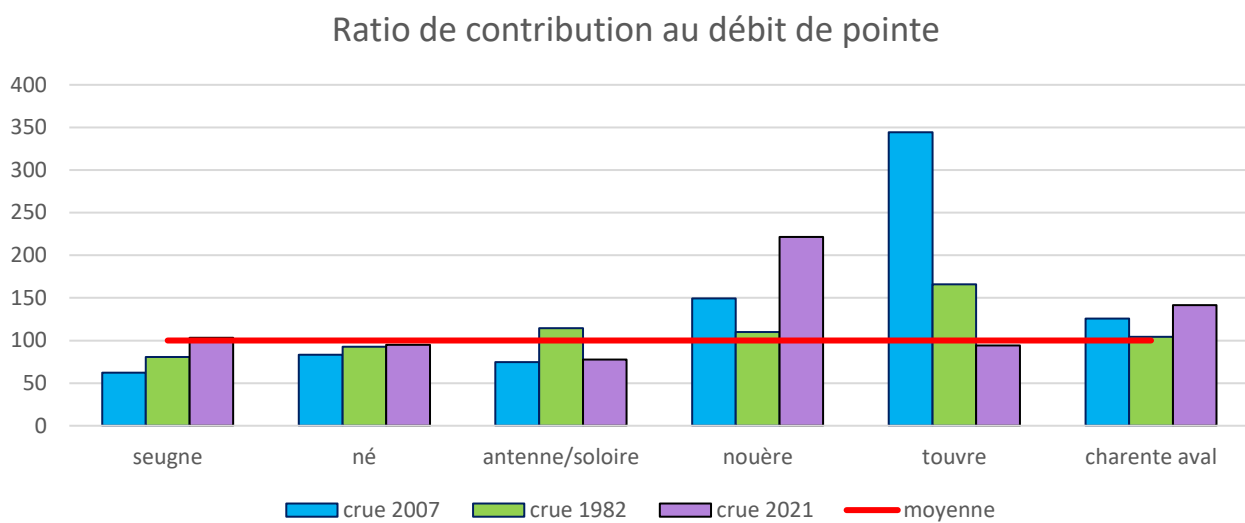


Figure 38 : Contribution relative (Partie aval)

Les secteurs Nouère et Charente aval contribuent en moyenne plus que les autres secteurs, au regard de leurs superficies. Pour rappel, la contribution de la Touvre n'est pas à considérer car faussée par les apports de la zone karstique.

4. DEFINITION DE LA STRATEGIE GLOBALE

4.1. REFLEXION GLOBALE

Les analyses menées précédemment permettent de comprendre le fonctionnement spécifique de chaque sous-bassin versant et ainsi de proposer une stratégie d'aménagement globale, pertinente et adaptée aux territoires et à leurs fonctionnements hydrauliques.

Rappelons que l'objectif de cette stratégie concerne la réduction du risque sur les enjeux du TRI Saintes-Cognac-Angoulême.

Afin de réduire le risque inondation sur ce territoire, la stratégie globale de ralentissement dynamique s'articule autour de 2 typologies d'action :

- le déphasage de la pointe de crue des affluents concomitants avec la Charente par la mise en place d'actions locales,
- la diminution du ruissellement à l'échelle globale du bassin versant de la Charente par la mise en place d'actions diffuses de ralentissement dynamique.

Le logigramme ci-dessous illustre la méthodologie d'élaboration de cette stratégie globale :

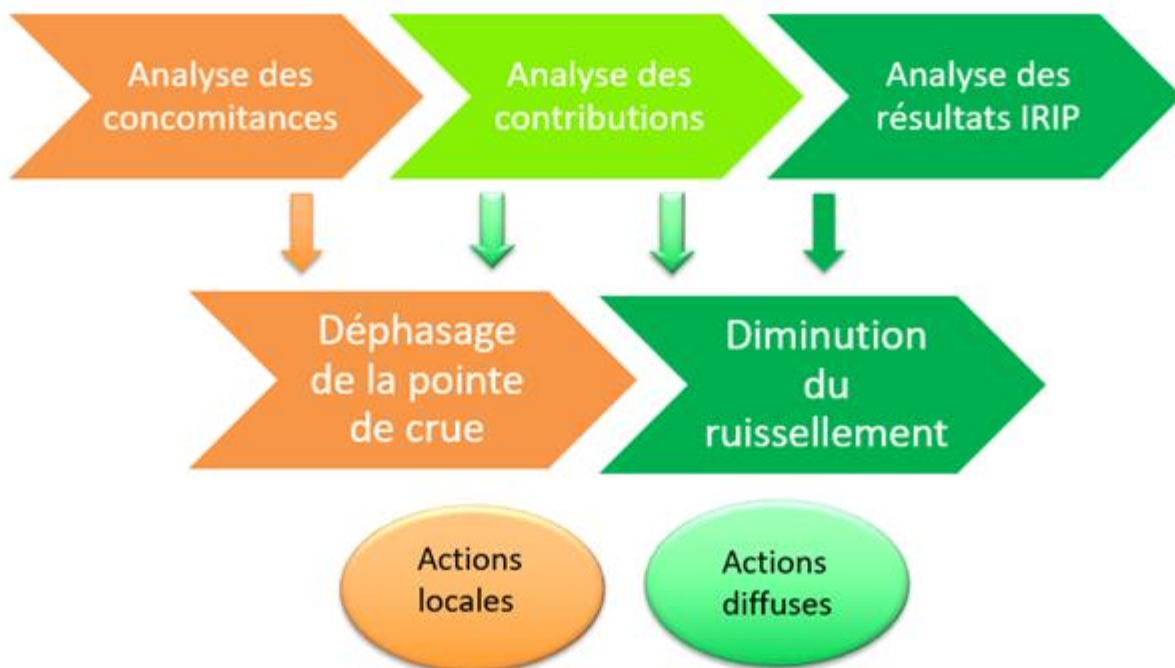


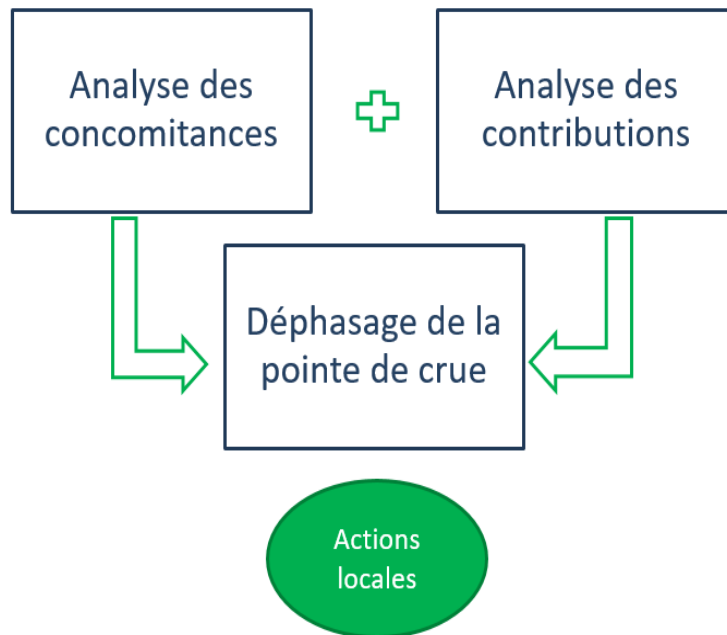
Figure 39 : Logigramme d'élaboration de la stratégie de ralentissement dynamique

4.2. ACTIONS LOCALES

Ces actions ont pour but de déphaser les pointes de crues des affluents concomitantes avec celle de la Charente.

Afin d'identifier les sites propices à cette action, il est nécessaire d'analyser les concomitances entre les affluents et la Charente (à partir des horloges de crue) ainsi que les différentes contributions des sous-bassins versants.

Les actions prioritaires ont été identifiées sur les secteurs où la concomitance est observée et où les contributions sont importantes.



4.2.1. Analyse des concomitances

Il est détaillé dans le tableau ci-dessous les différences en heure entre le moment du pic de crue de chaque affluent et celui à la confluence avec la Charente (*donnée issue de la simulation hydrologique*). Cette différence a été analysée pour les trois crues simulées.

Pour rappel, le pas de temps de la modélisation est de 2h.

Tableau 2 : Analyse des concomitances pour les 3 crues

	1982	2007	2021
Affluent(s)	Déphasage (h)		
Charente amont			
Pas de la Mule	-8	2	-12
Lizonne	-8	0	-14
Argent-Or	-10	-4	-16
Son-Sonnette	-20	-14	-26
Confluence Tardoire Bonnieure	-2	-4	2
Péruse	-8	-2	-12
Bief	-28	-22	-30
Confluence Aume Couture	-18	-24	-28
Charente Vouleme Vindelle			
Touvre	-34	0	10
Nouère	-50	-60	-70
Charente aval			
Né	-42	-48	-100
Antenne	-28	-38	-50
Soloire	-74	-86	-78
Seugne	-58	-58	-136

Il ressort de l'analyse de ce tableau que le secteur concomitant (à 4h près) pour les trois événements est **la confluence Tardoire Bonnieure**. Il s'agirait donc d'un secteur où il serait intéressant d'intervenir en lit mineur/lit majeur afin de déphaser l'onde de crue.

Quelques secteurs apparaissent en concomitance avec la Charente pour l'évènement de 2007 qui a la particularité d'être une crue relativement rapide par rapport aux 2 autres événements étudiés. Ce type de crue étant relativement rare sur le bassin versant, nous ne proposerons pas d'aménagements sur ces secteurs car pour les événements de 1982 et 2021 les pics de crues de ces cours d'eau passent bien avant le pic de la Charente. Ainsi, des actions de ralentissement dynamique sur ces bassins versants pourraient potentiellement remettre en concomitance les crues des affluents avec celles de la Charente et entraîner une aggravation du risque.

Par conséquent, les actions proposées se concentreront sur le secteur Bandiat-Tardoire-Bonnieure ainsi que sur la Charente elle-même. En effet, le pic de la Charente passe déjà après les pics de la plupart des affluents. En ralentissant encore la propagation sur l'axe Charente, nous augmenterons le déphasage ce qui pourrait permettre d'atténuer l'intensité du pic de crue.

4.2.2. Analyse des contributions

Cette analyse a pour but de mettre en avant les secteurs qui contribuent le plus au pic de crue de la Charente.

Un indicateur global faisant intervenir la contribution à la fois absolue et relative a été utilisé. Cet indicateur permettra de prioriser les secteurs où il est pertinent de mettre en place des actions locales. En effet, pour que l'impact de ces actions soit significatif, il est important que le secteur choisi soit un contributeur important au débit de pointe de la Charente dans l'absolu, mais également vis-à-vis de sa surface : un affluent qui contribue beaucoup proportionnellement à sa surface mais qui représente un débit très faible ne sera donc pas intéressant, tout comme un cours d'eau avec un débit important mais dont la contribution est déjà faible (à priori moins de marge de manœuvre sur ce type de secteur).

L'indicateur global utilisé a été calculé comme étant la moyenne des indicateurs contribution des trois crues.

$$\text{Indicateur contribution} = \% \text{ contribution absolue} \times \% \text{ contribution relative} \times 100$$

$$\text{Indicateur global} = \sum \text{Indicateurs contribution}$$

Le tableau suivant présente les résultats obtenus pour les trois crues.

Tableau 3 : Analyse des contributions

Secteurs			Indicateur contribution			Indicateur global
			1982	2007	2021	
Vindelle	1	Charente amont	16,95	10,53	32,94	60,42
	2	Pas de la Mule/ Lizonne/ Argent Or	12,05	13,27	10,83	36,15
	3	Son-Sonnette	8,30	9,22	4,77	22,29
	4	Bandiat/Tardoire/Bonnieure	17,45	31,74	23,33	72,52
	5	Péruse Bief	4,68	2,29	7,14	14,11
	6	Aume couture	22,57	3,63	11,14	37,34
	7	Charente Vouleme Vindelle	18,66	9,36	6,25	34,27
Saintes	8	Touvre	7,98	28,94	10,80	47,73
	9	Nouère	3,10	4,81	3,90	11,81
	10	Charente aval	24,73	30,48	15,41	70,63
	11	Né	13,15	8,91	10,07	32,12
	12	Antenne Soloire	18,83	6,65	6,60	32,08
	13	Seugne	13,98	9,09	17,29	40,36

L'analyse de ce tableau fait ressortir trois secteurs dont l'indicateur global de contribution est important :

- Charente amont
- Bandiat Tardoire Bonnieure
- Charente aval

Il s'agirait donc des secteurs sur lesquels agir en matière **d'actions locales**.

Au contraire, l'indicateur global permet d'identifier des secteurs peu impactants en termes de contribution, comme la Nouère, le secteur Péruse / Bief ou encore le bassin Né. Cela peut s'expliquer par la faible superficie des bassins (exemple : Nouère, Péruse/Bief), ou par un déphasage avec la pointe de crue de la Charente trop important (Né).

En outre, la Touvre n'est pas analysée ici puisqu'elle est impactée par les apports souterrains de la zone karstique située sur le bassin Bandiat, Tardoire. Ces apports ayant été modélisés comme une source, ils faussent l'analyse de la contribution de la Touvre seule.

La cartographie ci-dessous résume les indicateurs calculés selon les secteurs :

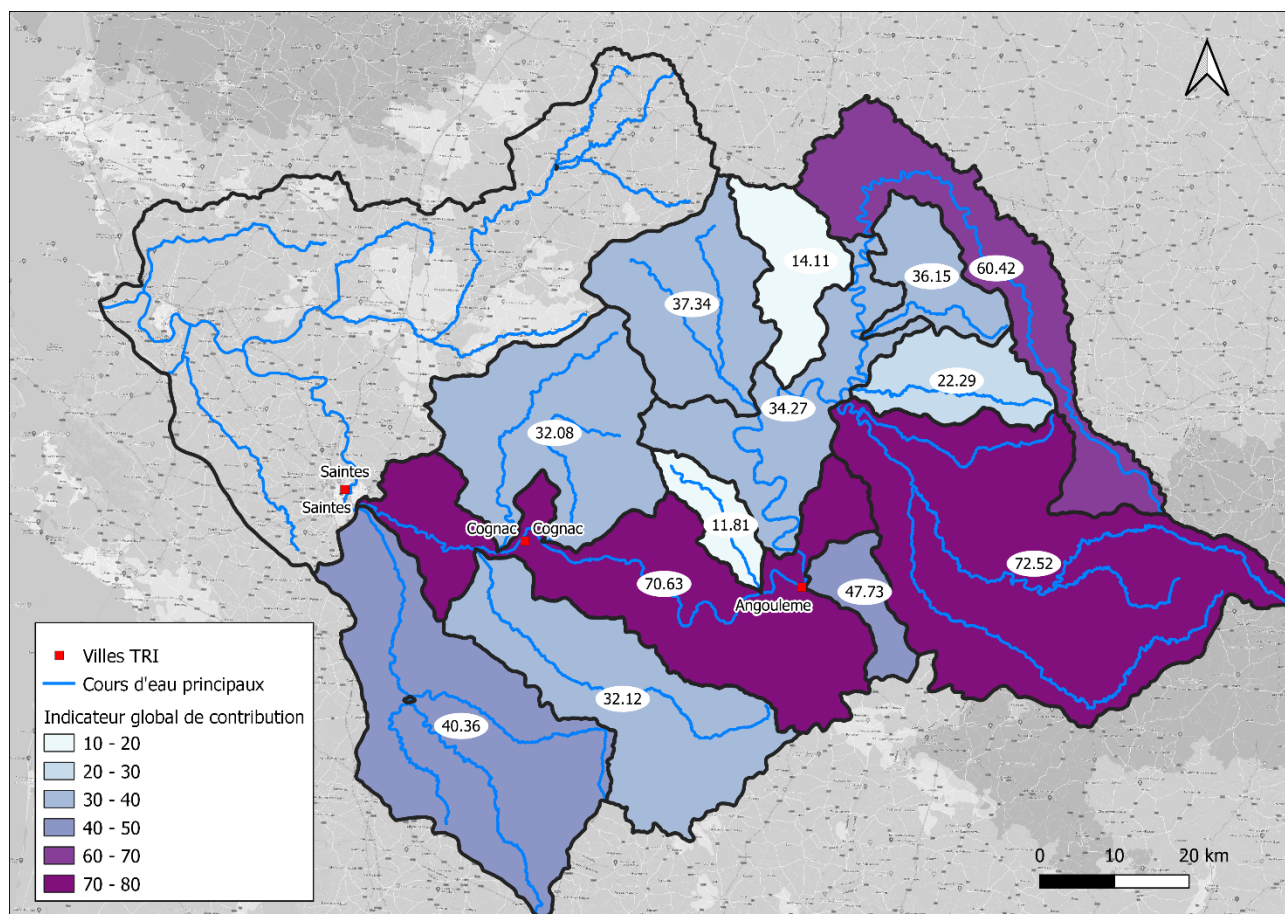


Figure 40 : Carte des indicateurs de contribution par secteur

4.2.3. Démarche d'identification des sites propices au ralentissement dynamique

Les analyses précédentes ont montré un intérêt d'actions locales dans les secteurs Charente et Bandiat Tardoire Bonnieure.

Les zones d'expansion de crues, définies en phase 1 de la présente étude, relatives à ces secteurs ont donc été examinées de la manière suivante :

4.2.3.1. Evitement des zones à enjeux

Il a d'abord été identifié dans chaque zone d'expansion de crues les secteurs à enjeux, où l'occupation du sol est défavorable à la mise en place d'actions locales. Il s'agit ici des zones urbaines ou bien avec une forte concentration d'habitat diffus. Les actions sont ainsi concentrées sur les zones naturelles ou à vocation agricole.

Sur ces secteurs à éviter, la mise en place d'actions de ralentissement dynamique pourrait aggraver le risque au niveau des secteurs à enjeux humains

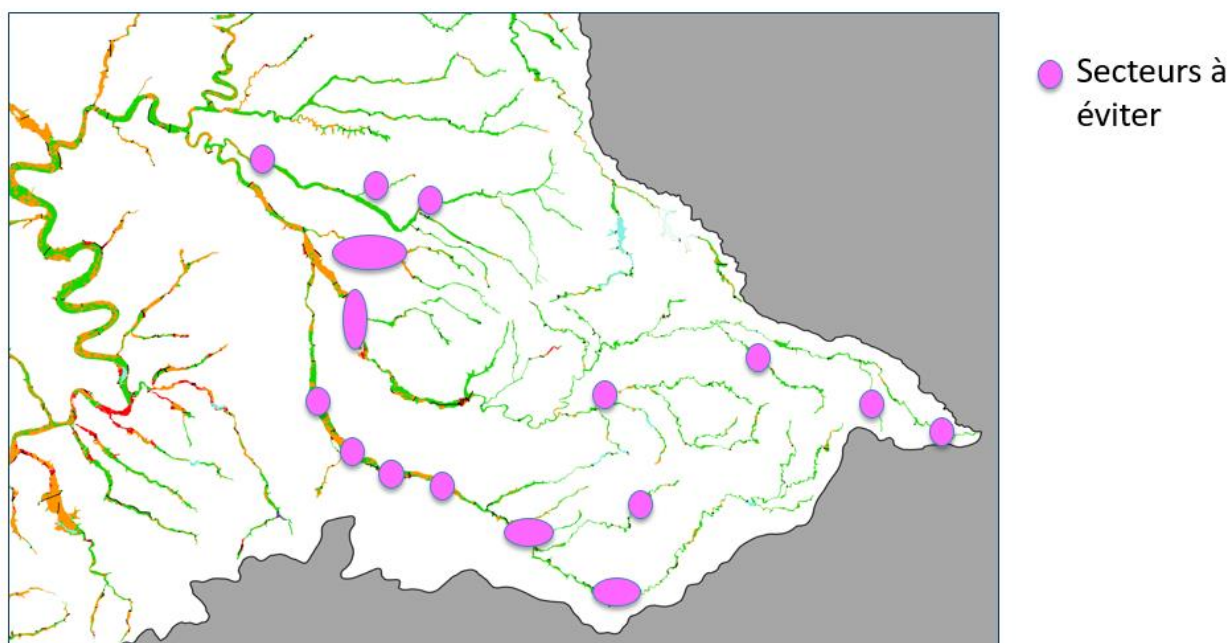


Figure 41 : Actions locales - Evitement des zones à enjeux (Secteur Bandiat Tardoire Bonnieure)

4.2.3.2. Identification des secteurs inondés

Il a ensuite été identifié les secteurs inondés d'après les retours terrain recueillis lors des réunions de concertation préalables à l'étude.

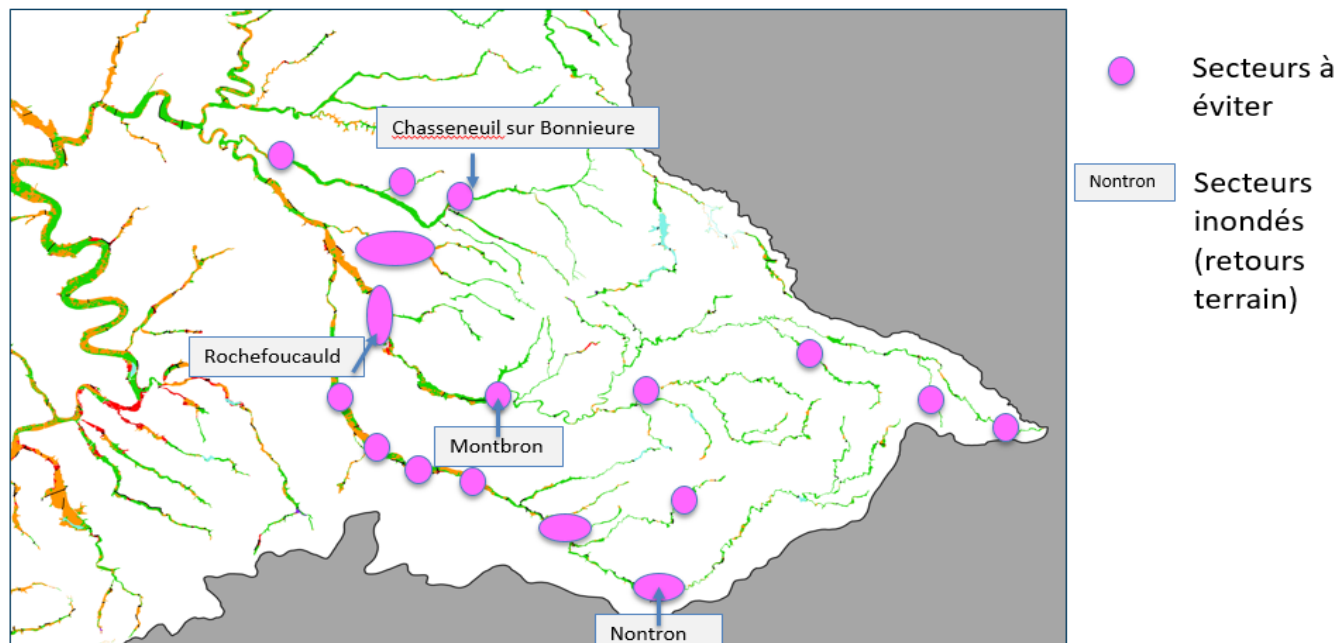


Figure 42 : Actions locales – Identification des secteurs inondés (Secteur Bandiat Tardoire Bonnieure)

4.2.3.3. Recherche des secteurs où les pentes et aires drainées sont favorables

L'idée ensuite est de se placer en amont de ces secteurs afin de les faire bénéficier des impacts de ces actions. Les sites choisis sont ceux où la pente est faible (< 1%), et l'aire drainée importante (>50 km²).

En effet, lors de la phase 1 de la présente étude, les tronçons de cours d'eau ont été caractérisés via leurs pentes locales et leurs aires drainées.

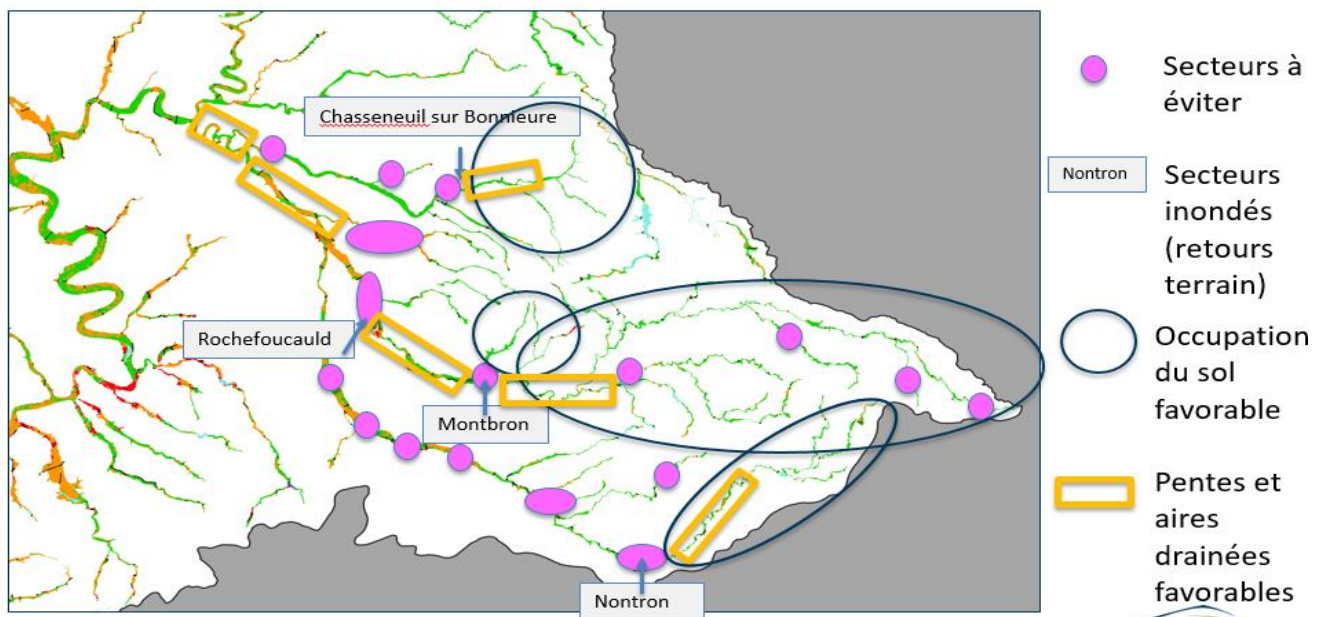


Figure 43 : Actions locales – Recherche des secteurs de pentes et aires drainées favorables (Secteur Bandiat Tardoire Bonnieure)

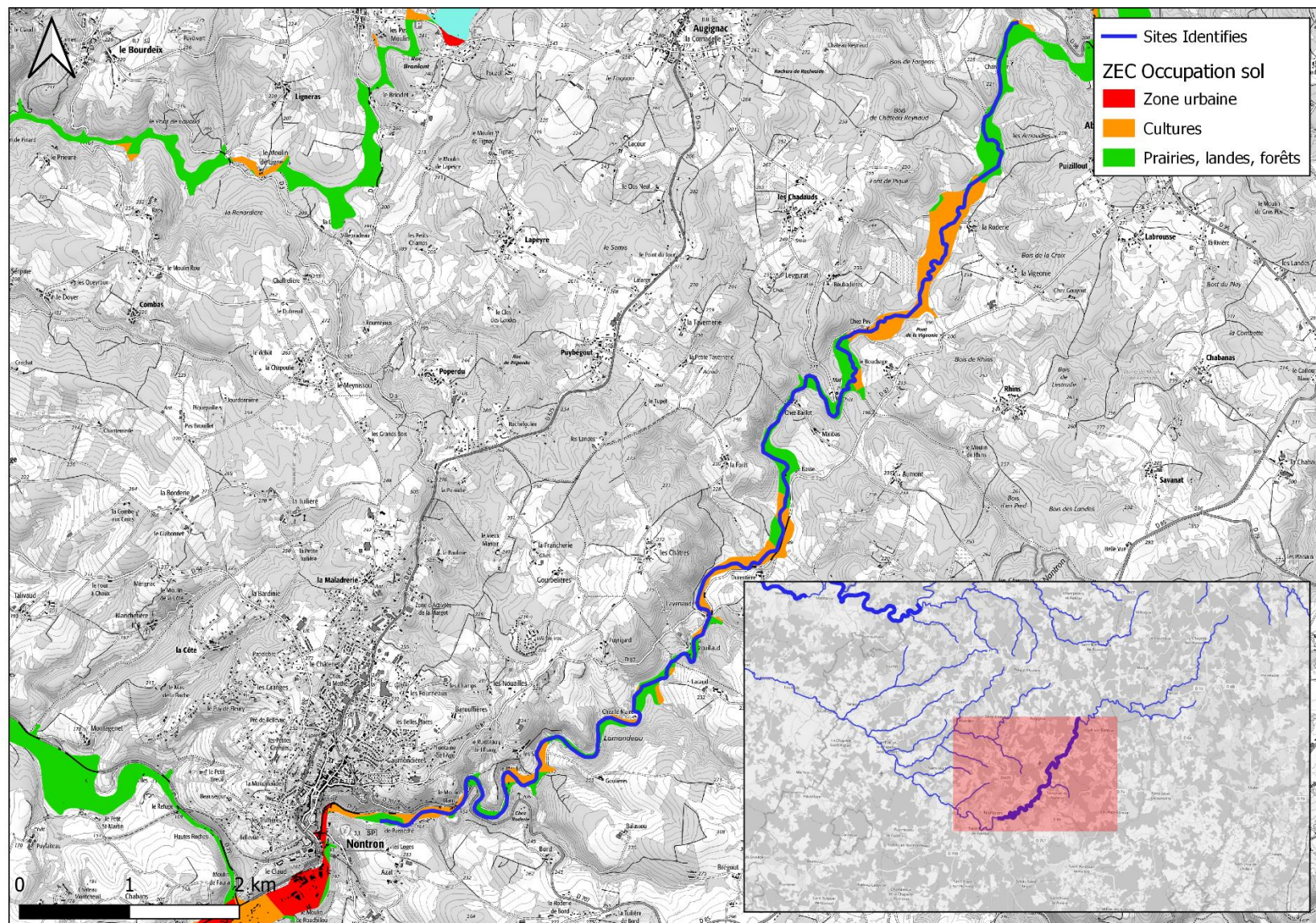
4.2.4. Sites identifiés

La démarche expliquée précédemment a permis d'identifier :

- 1 site sur le Bandiat
- 3 sites sur la Tardoire
- 1 site sur la Bonnieure
- 1 site sur la confluence Tardoire Bonnieure
- 4 sites sur la Charente amont
- 6 sites sur la Charente aval (zones de prescriptions dérogatoire – PPR Charente)

Soit un linéaire total d'environ **149 km**.

Les caractéristiques de ces sites et leurs localisations sont détaillées sur les figures suivantes :



14,5 km de linéaire
Aire drainée : 100
 km2
Pente globalement
 < 1%

Figure 44 : Action locales - Site Bandiat

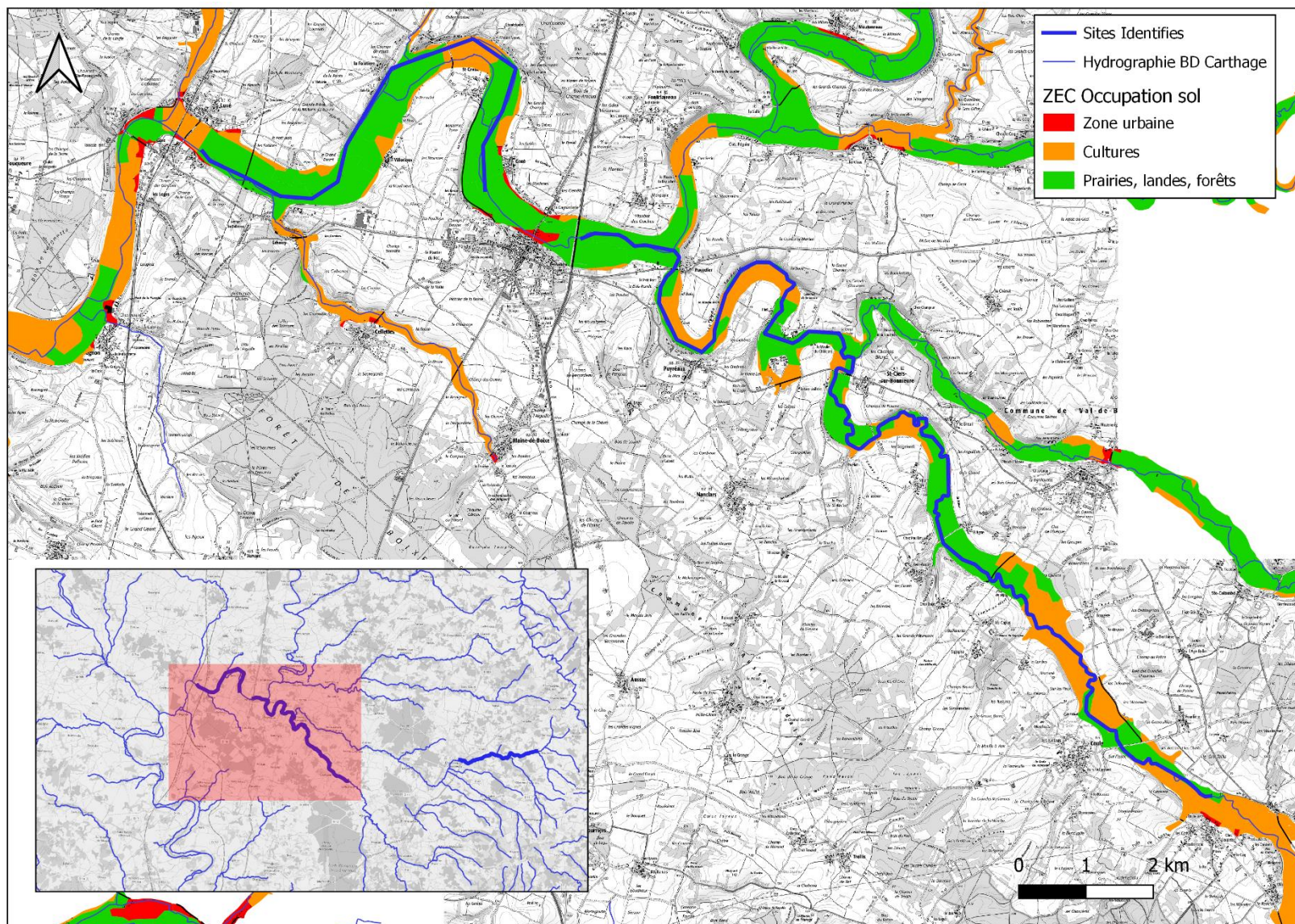
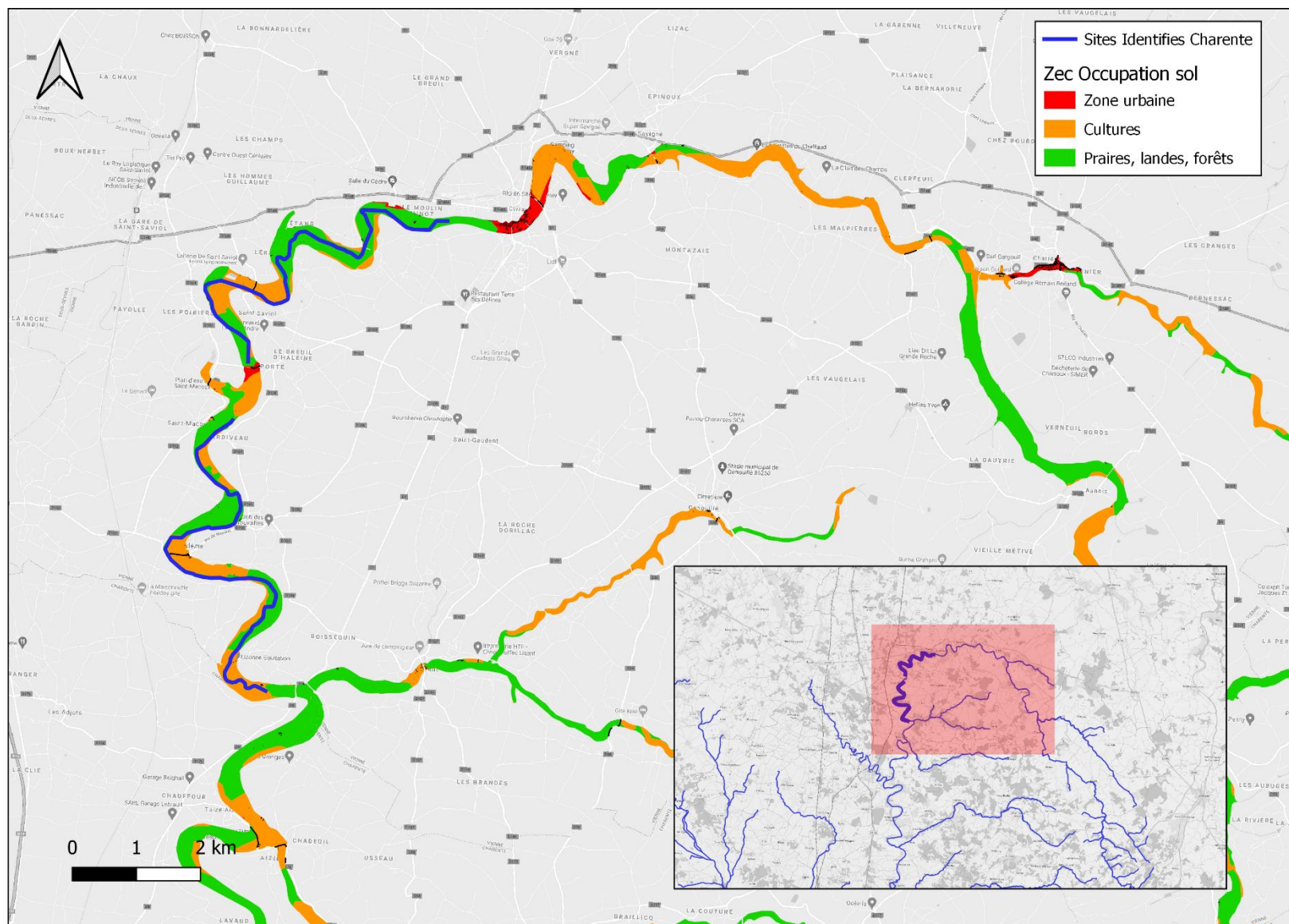
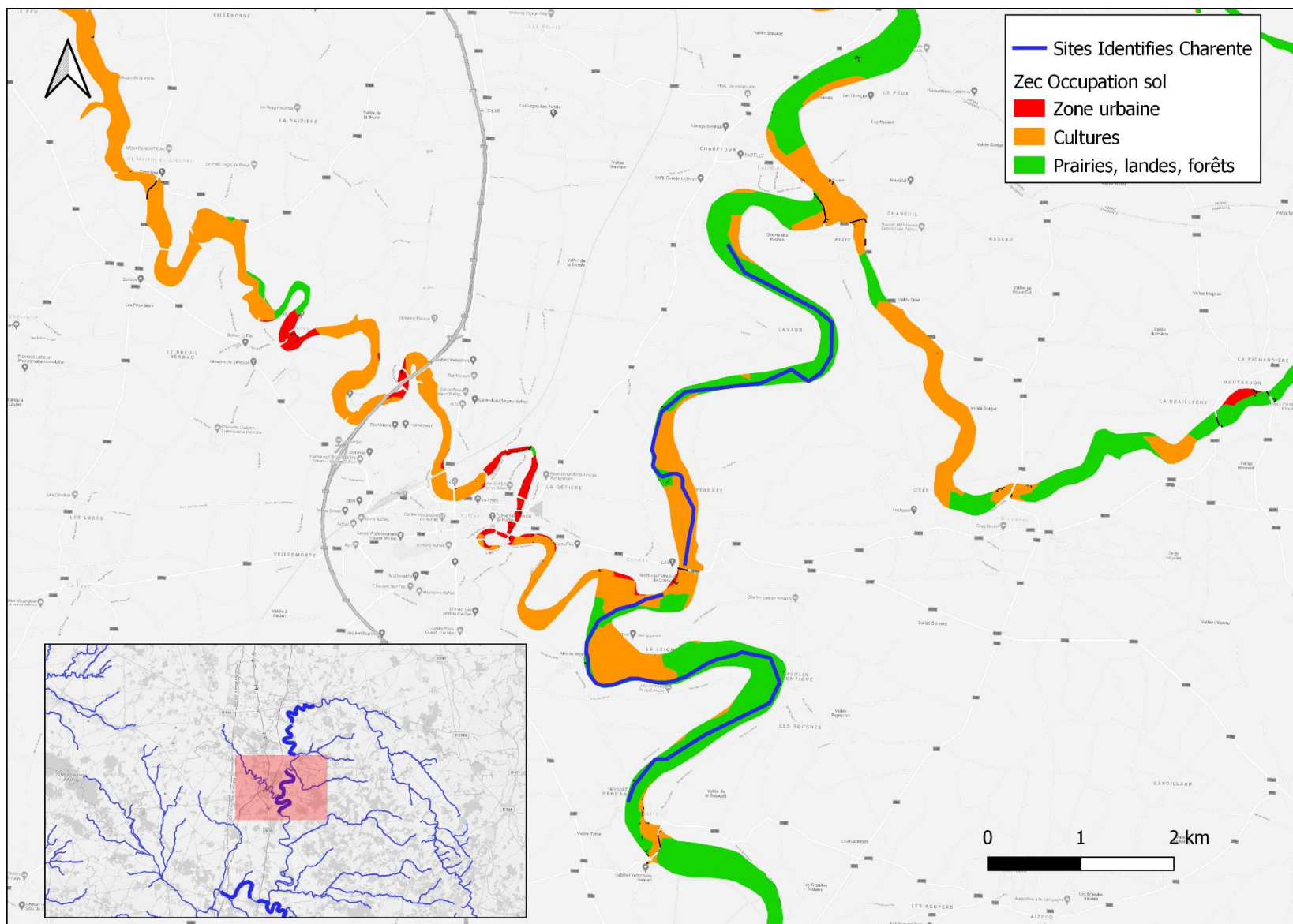


Figure 48 : Action locales - Site aval Tardoire et confluence avec la Bonniere + Charente



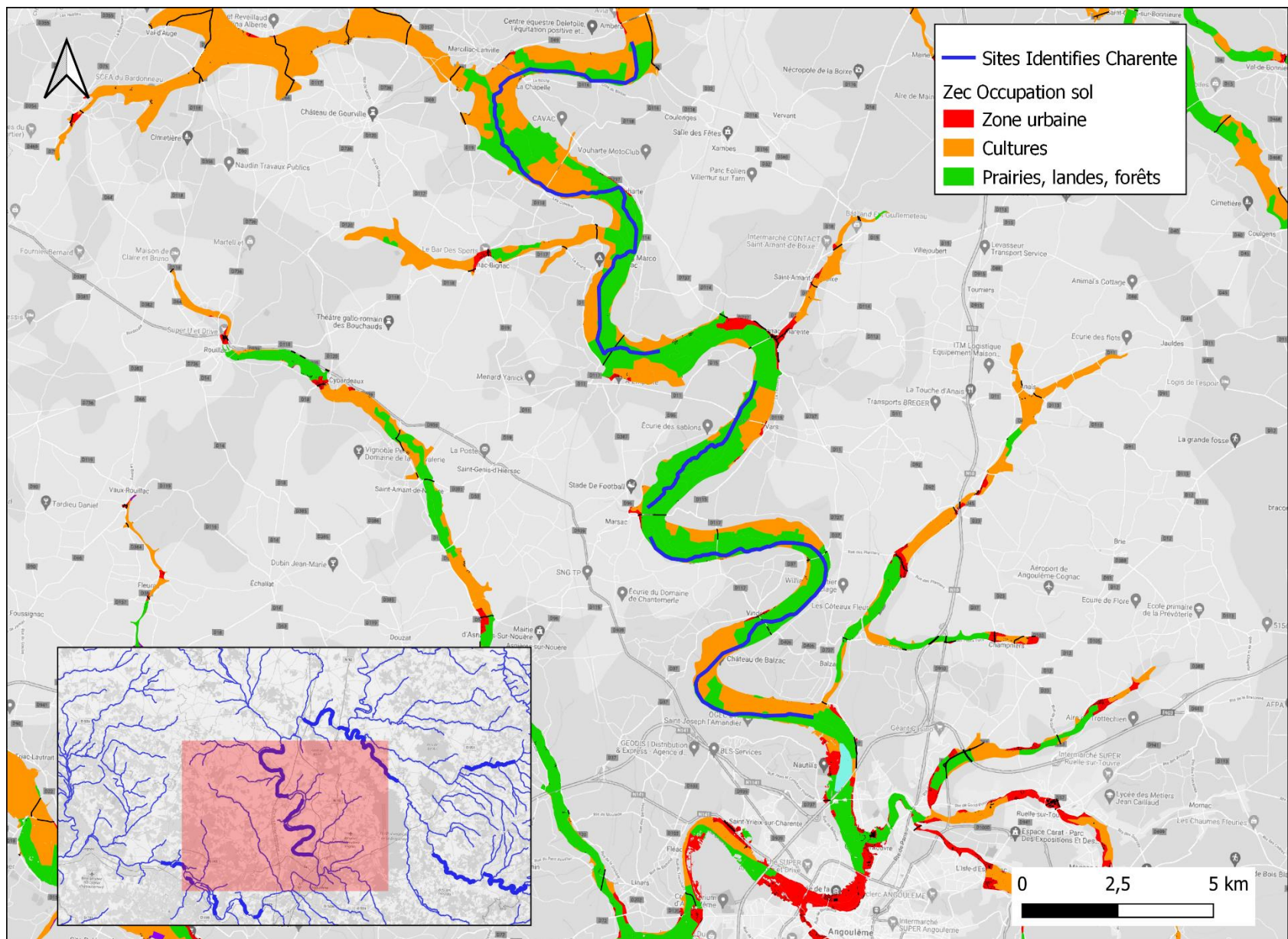
15,5 km de linéaire
(7,6+7,9 km)
Aire drainée : 582 km²
Pente maximale sur le linéaire < 1 ‰

Figure 49 : Action locales – Sites Charente amont 1



11,6 km de linéaire
 Aire drainée : 912 km²
 Pente maximale sur le
 linéaire < 5 ‰

Figure 50 : Action locales – Sites Charente amont 2



34 km de linéaire
Aire drainée : 3722
km2
Pente maximale sur le
linéaire < 1 ‰

Figure 51 : Action locales – Sites Charente amont 3

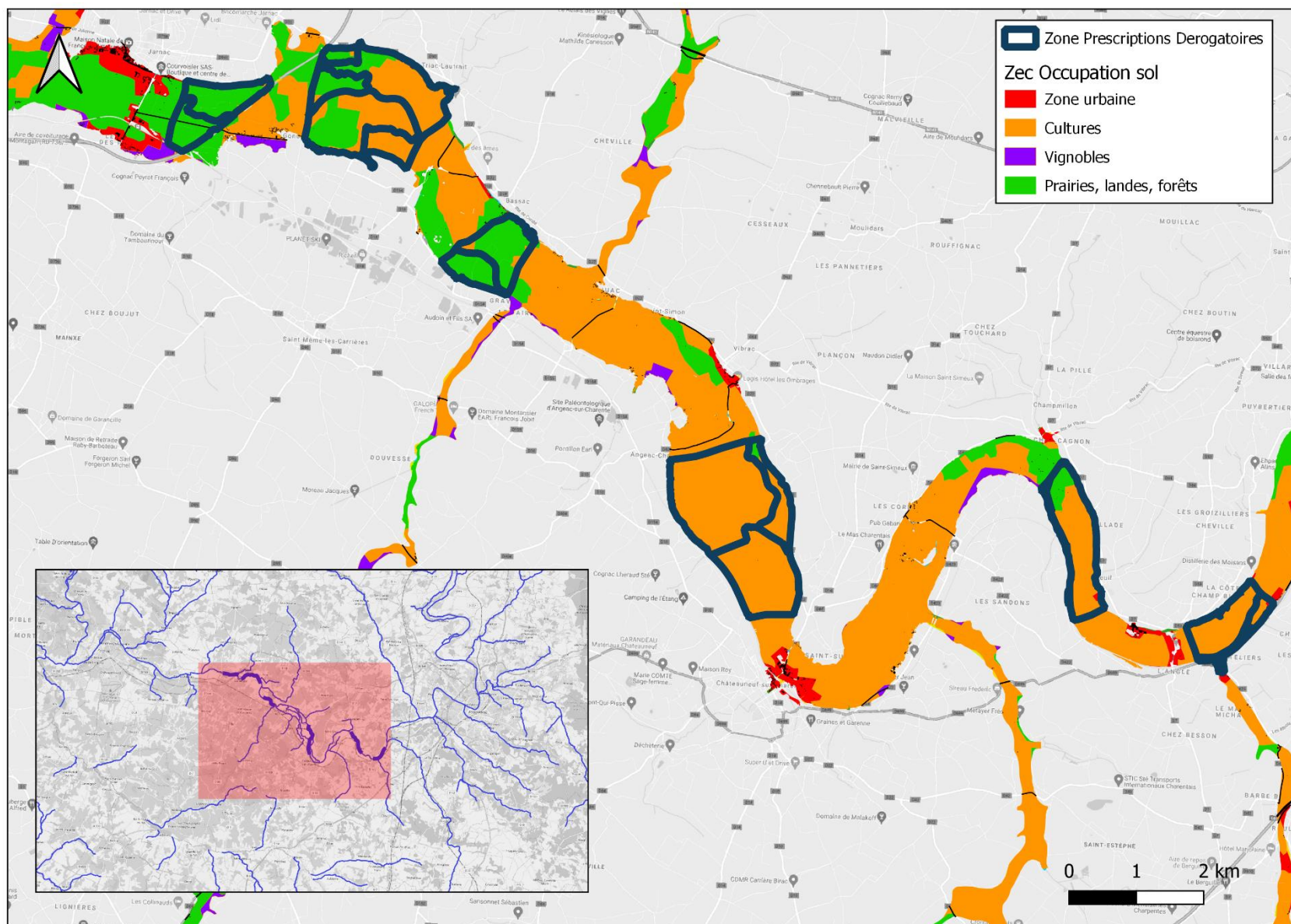


Figure 52 : Action locales – Sites Charente aval (Zones de prescription dérogatoires – PPR Charente)

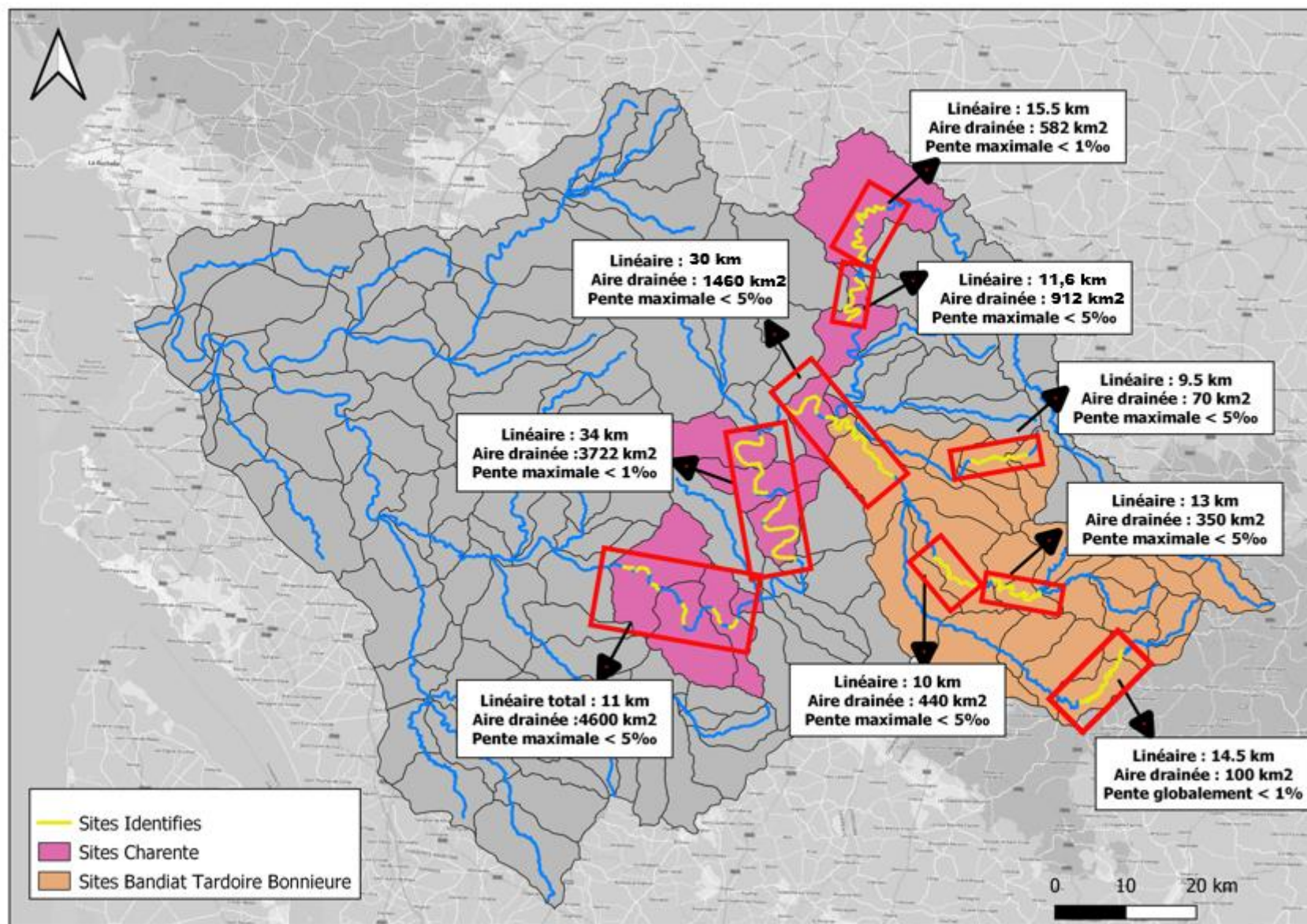


Figure 53 : Carte de synthèse des sites propices aux actions locales de ralentissement dynamique

4.2.5. Solutions d'aménagement proposées

4.2.5.1. Le rechargement alluvionnaire

Cette solution consiste à rehausser le fond d'un cours d'eau par l'injection de matériaux naturels (graviers, cailloux, pierre). En effet, cette solution facilite les débordements sur les sites sélectionnés, ce qui augmente le stockage en lit majeur et qui diminue la vitesse de propagation de la crue (l'écoulement est plus lent en lit majeur qu'en lit mineur).

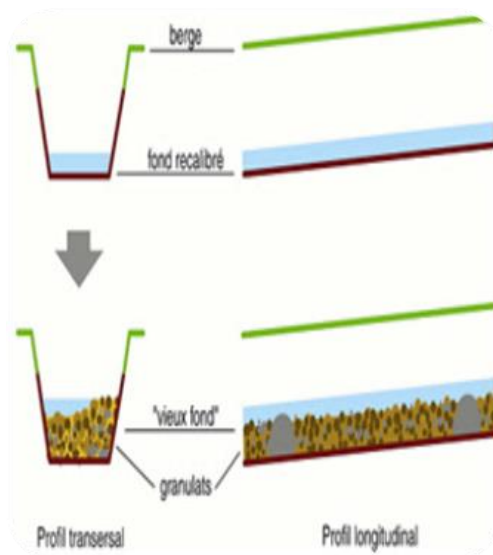


Figure 54 : Schéma explicatif du principe de rechargement alluvionnaire

Ce type d'aménagement peut être réalisé de 2 manières : soit un rechargement complet du lit sur tout un linéaire, soit par la mise en place de seuils successifs qui permettent de rehausser la ligne d'eau et d'augmenter la fréquence des débordements.

La présente étude permet de tester l'efficacité de ce type de solution mais son application nécessitera une concertation locale afin d'adapter la fréquence des débordements et de la rendre acceptable, notamment pour les enjeux agricoles.

4.2.5.2. Frein en lit majeur

Il s'agit de techniques favorisant la sur-inondation sur des secteurs à faible enjeu en mettant en place des aménagements d'hydraulique douce (haies, fascines, plantations denses) ou bien des aménagements plus conséquents de type merlon continus ou discontinus (hauteur à adapter).

Le frein viendra ralentir la propagation de la crue dans le lit majeur sans perturber l'écoulement dans le lit mineur en dehors des périodes de crue.

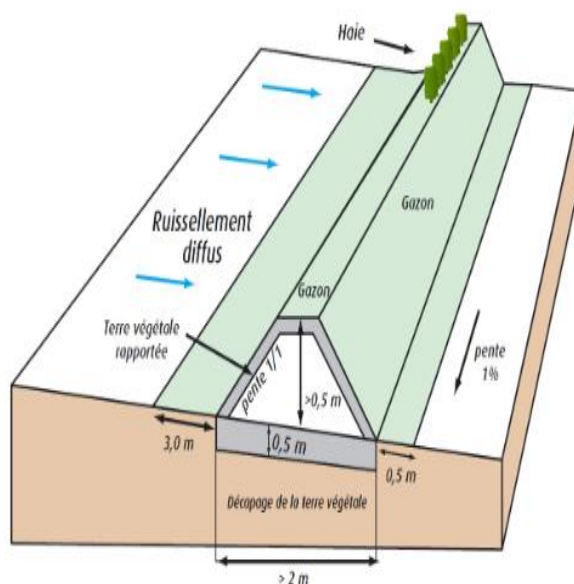


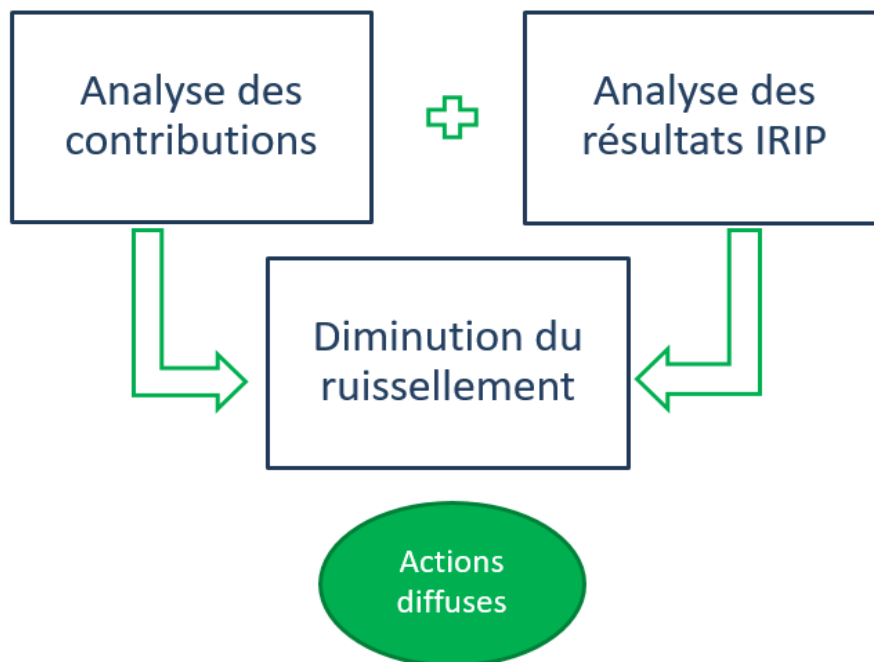
Figure 55 : Exemple de frein en lit majeur – Merlon

Ces deux solutions ont été testées sur les sites sélectionnés pour la mise en place d'actions locales. Les résultats sont présentés chapitre 5.5.

4.3. ACTIONS DIFFUSES

Ces actions ont pour but de diminuer le ruissellement à l'échelle du bassin versant de la Charente. Il est donc nécessaire de cibler en priorité les secteurs les plus contributeurs au regard de leurs surfaces. Cette analyse permettra de faire ressortir des grands secteurs où il faut agir en matière d'actions diffuses.

Une analyse fine des cartes de sensibilité IRIP produites à l'issue de la phase 1 de la présente étude peut permettre de localiser plus finement les secteurs propices à ce type d'actions et de mieux orienter les solutions à mettre en place.



4.3.1. Priorisation des secteurs - Analyse des contributions relatives

Afin de prioriser les secteurs où il est pertinent de mettre en place les actions diffuses, une analyse des contributions relatives par secteur a été réalisée pour les trois crues modélisées.

Les résultats montrent une certaine variabilité d'une crue à une autre c'est pourquoi un indicateur de contribution relative a été utilisé. Il représente la moyenne des pourcentages de contribution relative par crue.

Tableau 4 : Analyse des contributions relatives

	Secteurs		1982	2007	2021	Indicateur contribution	Actions diffuses
Vindelle	1	Charente amont	107%	95%	153%	118,33%	Priorité 1
	2	Pas de la Mule/Lizonne/Argent Or	152%	179%	148%	159,67%	Priorité 1
	3	Son-Sonnette	118%	140%	92%	116,67%	Priorité1
	4	Bandiat/Tardoire/Bonnieure	70%	106%	83%	86,33%	Priorité 3
	5	Péruse Bief	89%	70%	113%	90,67%	Priorité 2
	6	Aume couture	140%	63%	101%	101,33%	Priorité 2
	7	Charente Vouleme Vindelle	114%	95%	68%	92,33%	Priorité 2
Saintes	8	Touvre	166%	344%	221%	243,67%	Priorité 3
	9	Nouère	110%	149%	141%	133,33%	Priorité 1
	10	Charente aval	104%	126%	94%	108,00%	Priorité 2
	11	Né	93%	83%	91%	89,00%	Priorité 3
	12	Antenne Soloire	115%	74%	78%	89,00%	Priorité 3
	13	Seugne	81%	81%	103%	88,33%	Priorité 3

L'analyse de ce tableau fait ressortir des secteurs de priorité 1 pour lesquels l'indicateur de contribution est très important (largement supérieur à 100), des secteurs de priorité 2 (indicateur autour de 100), et des secteurs de priorité 3 pour lesquels l'indicateur de contribution est faible.

Comme expliqué au paragraphe 4.2.2, les apports karstiques de la Touvre ayant été modélisés sous forme de source, ils faussent l'analyse et dans le cas présent induisent des pourcentages de contribution très important par rapport à la superficie du bassin versant.

La carte suivante récapitule les priorités retenues pour la mise en place d'actions diffuses :

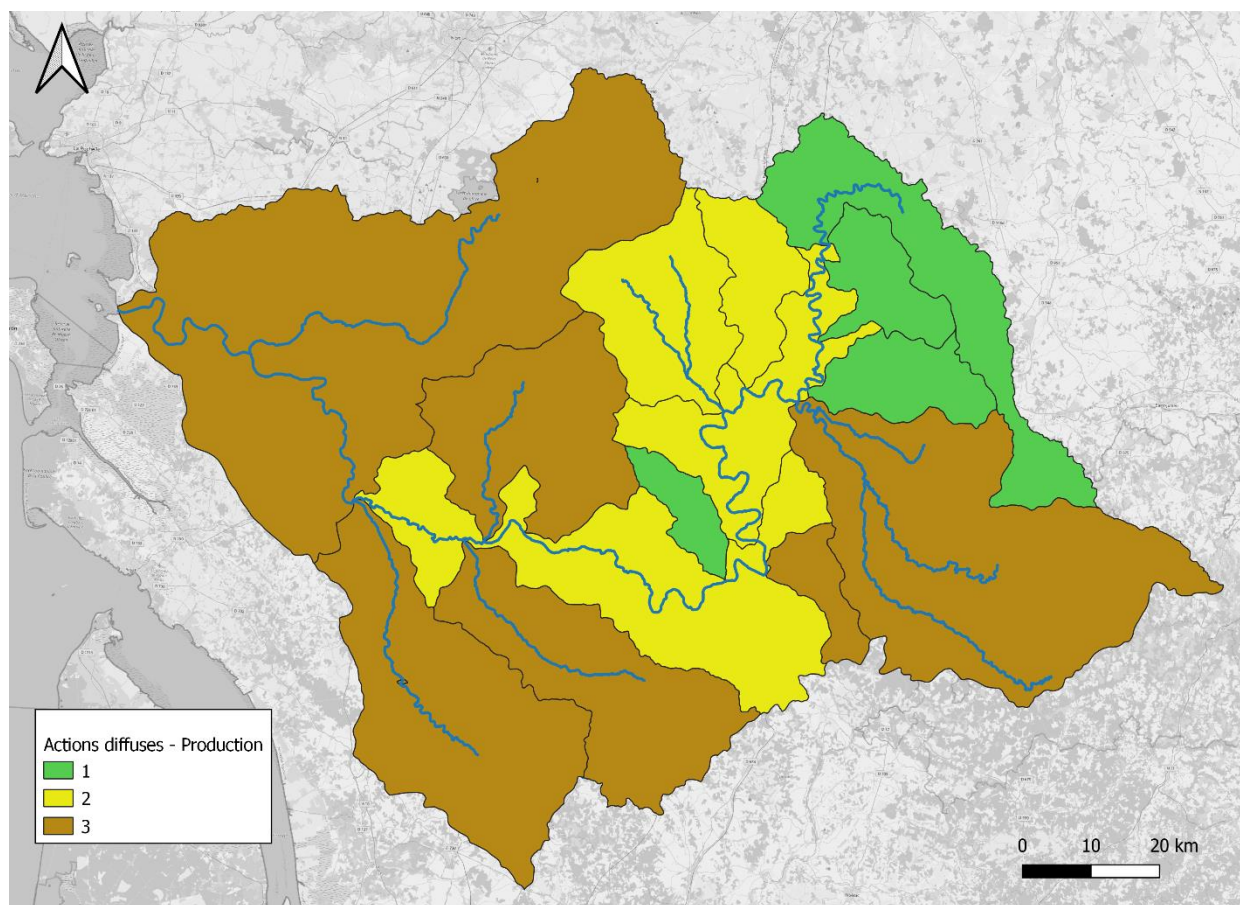


Figure 56 : Carte de priorisation des secteurs propices aux actions diffuses

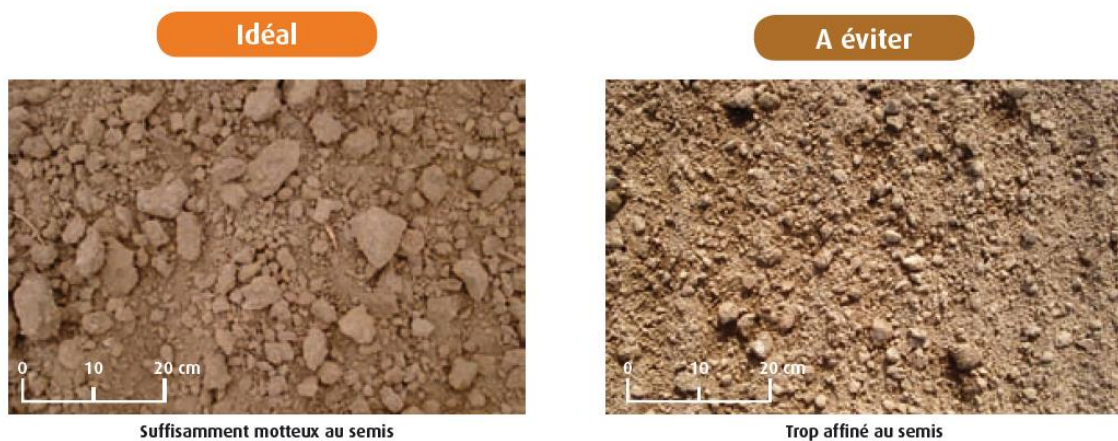
Il est important de souligner que les actions diffuses doivent être multipliées sur l'ensemble du bassin versant pour retrouver l'effet recherché du ralentissement dynamique. Ces grands secteurs prioritaires doivent être analysés plus finement en se basant sur les cartes IRIP pour mieux cibler les secteurs et mettre en place les solutions les plus pertinentes.

4.3.2. Solutions proposées

4.3.2.1. Actions sur les zones de production du ruissellement

Afin de limiter la production ruissellement à l'amont du bassin versant, les solutions suivantes peuvent être mises en place pour lutter contre l'imperméabilisation des surfaces :

- Limiter le ruissellement par les **pratiques culturales**. En effet, des pratiques adaptées au positionnement de la parcelle et au type de sol augmentent l'efficacité de la gestion hydraulique du bassin versant.
 - Structure : L'amélioration de la structure du sol passe par l'apport de matière organique, le chaulage, le décompactage.
 - Couverture des sols : L'implantation d'un couvert végétal permet de protéger le sol de la dégradation par les pluies. Grâce à la présence du système racinaire, l'infiltration du sol est augmentée.
 - Porosité et rugosité : Un travail du sol en conservant une forte proportion de mottes, ainsi que des cavités permettant la rétention d'eau est conseillé.



- Mise en place de **haies et bandes boisées**. En effet, celles-ci forment des barrières contre le ruissellement et permettent à l'eau de s'infiltrer. Elles peuvent être disposées comme sur la figure suivante :

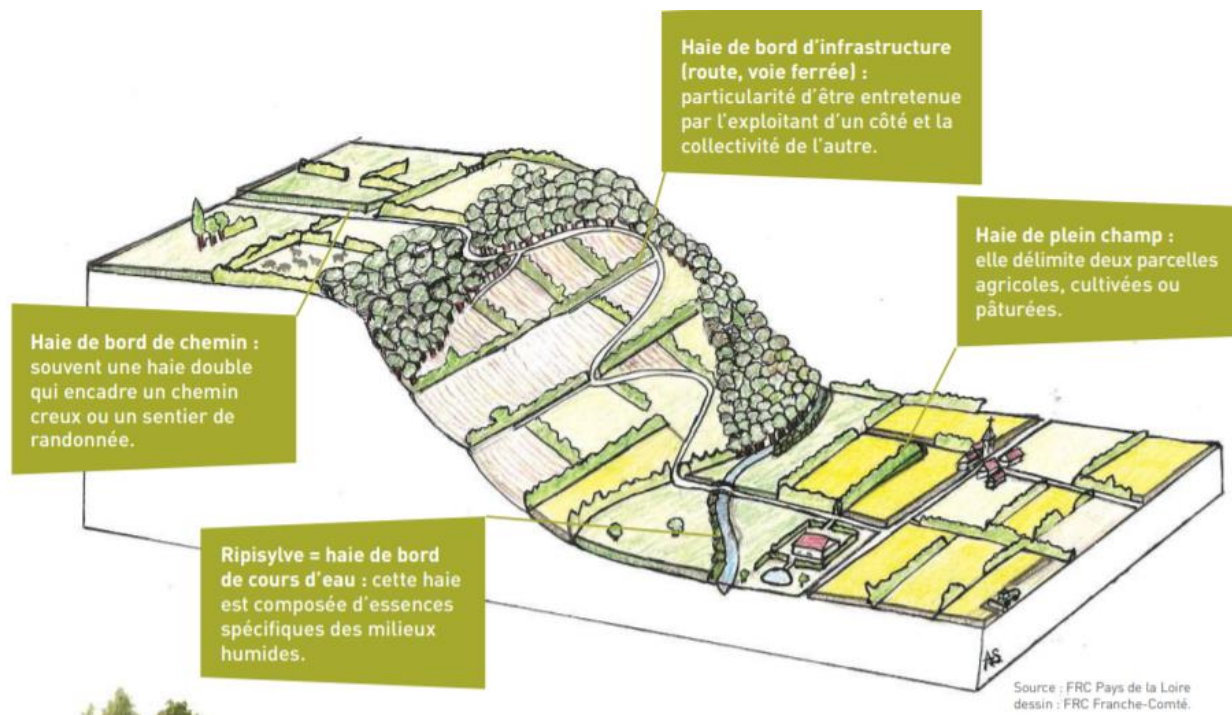


Figure 57 : Disposition des haies interparcellaires

- En matière d'urbanisme, il est important de **promouvoir un maximum de surfaces à faible coefficient de ruissellement**, et d'infiltrer ou temporiser les eaux issues des surfaces imperméabilisées.

4.3.2.2. Actions sur les zones du transfert du ruissellement

Il s'agit de zones où le ruissellement est concentré et souvent rapide. Les techniques à mettre en œuvre ici sont essentiellement destinées à guider l'écoulement et à le ralentir :

- Mise en place de fossés (classiques, à redent, noues enherbées) ou des petites digues afin de ralentir le transfert sur les axes où il est important.

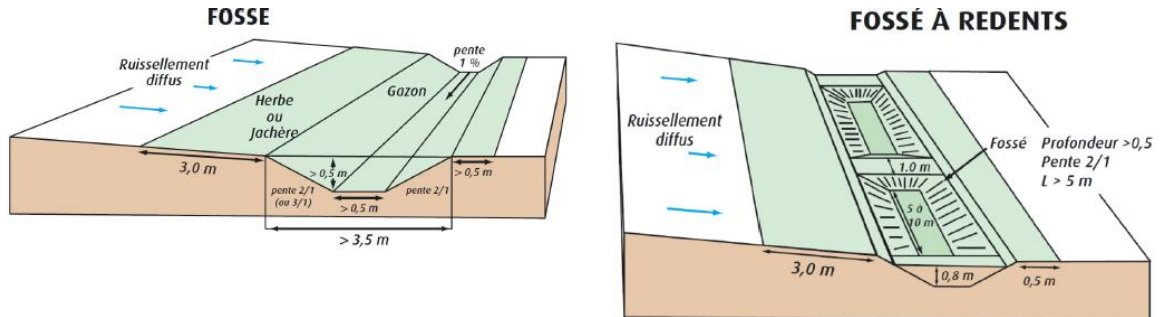


Figure 58 : Coupes types de fossés (Source : AREAS)

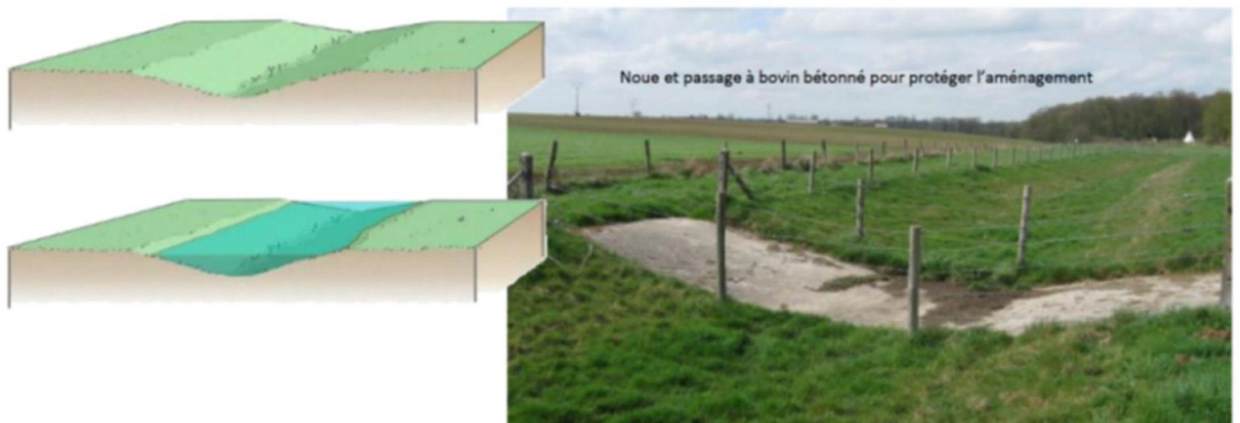


Figure 59 : Exemple de noue enherbée (Source : LIOSE)

- Sursemer dans l'axe de l'écoulement afin de limiter l'arrachement des particules du sol et ainsi ralentir les écoulements.

- Mise en place de chenaux enherbés dans les talwegs pour favoriser l'infiltration.



Figure 60 : Chenal enherbé implanté dans l'axe du ruissellement concentré (encart : situation initiale) (Source : LIOSE)

Afin de localiser les axes de transfert, la carte de sensibilité IRIP peut être exploitée. Un exemple d'application à une échelle locale est explicité ci-dessous :

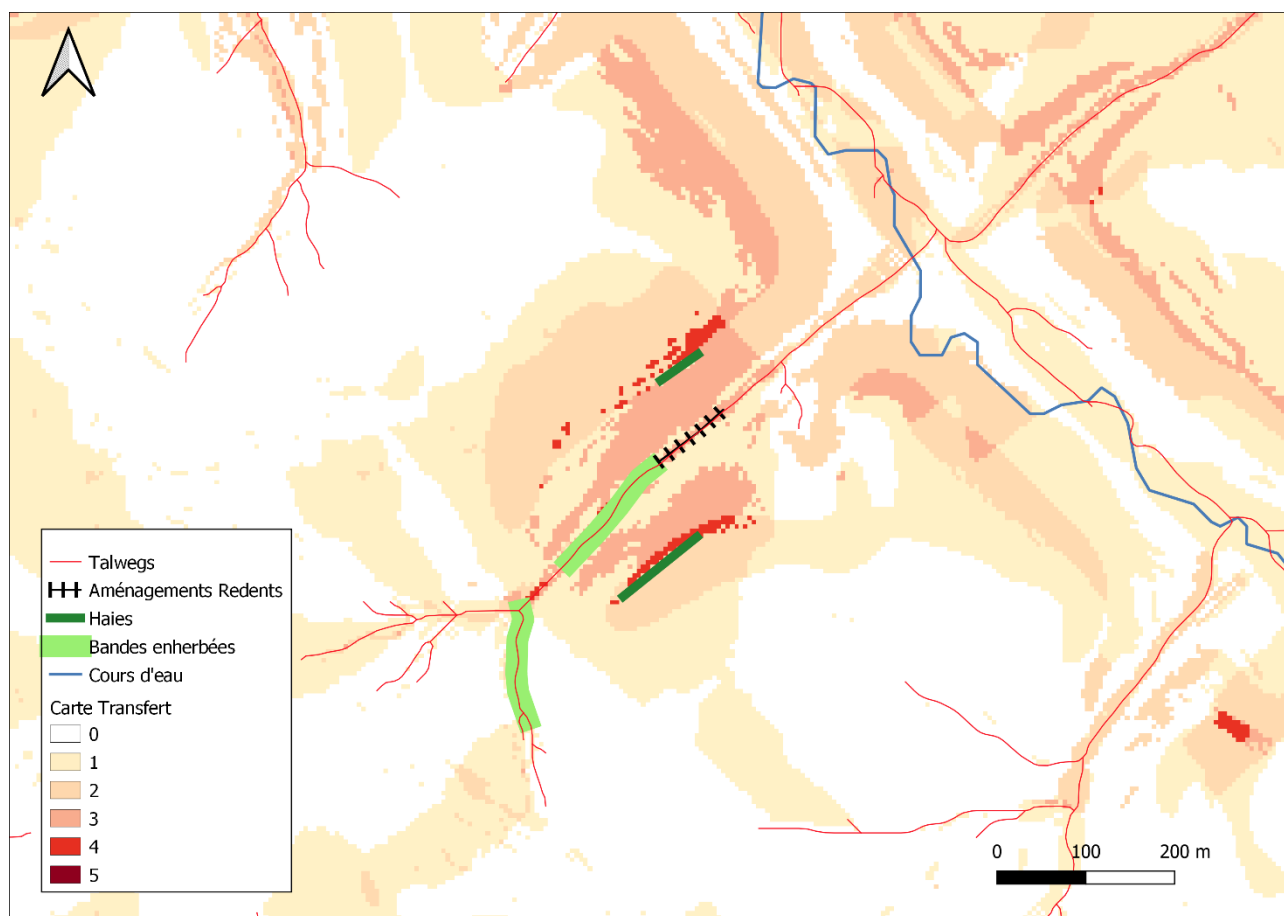


Figure 61 : Actions sur les zones de transfert - Exemple d'application (fond de plan IRIP)

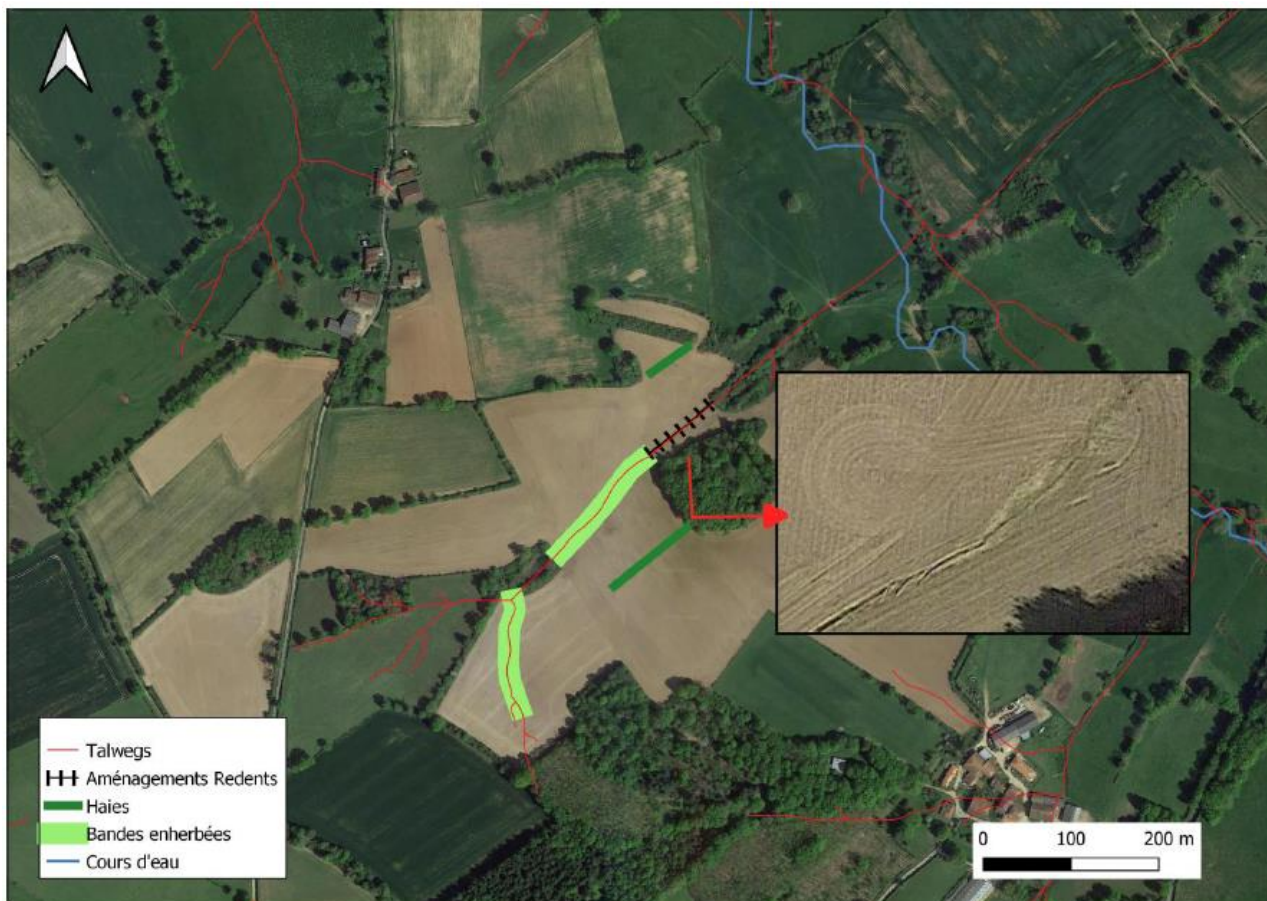


Figure 62 : Actions sur les zones de transfert - Exemple d'application (fond de plan photographie aérienne)

Des haies ont été positionnées sur les zones sensibles au transfert afin d'intercepter les écoulements avant leur arrivée à l'axe de transfert. Sur celui-ci, des bandes enherbées ont été mises en place pour favoriser l'infiltration, ainsi qu'un fossé à redent pour ralentir l'écoulement.

4.3.2.3. Actions sur les zones d'accumulation du ruissellement

Il s'agit de zones où les ruissellements viennent s'accumuler, ce qui peut être assimilé à des zones inondables. Les techniques à mettre en place sur ces zones auront donc pour but de stocker l'eau accumulée dans des secteurs préférentiels en amont des zones à enjeux afin de limiter ou supprimer ces phénomènes d'accumulation :

- Mise en place d'aménagements de stockage (bassins, noues, zones d'immersion temporaire, mares tampon, talus de plein champ) en amont des secteurs à enjeux :

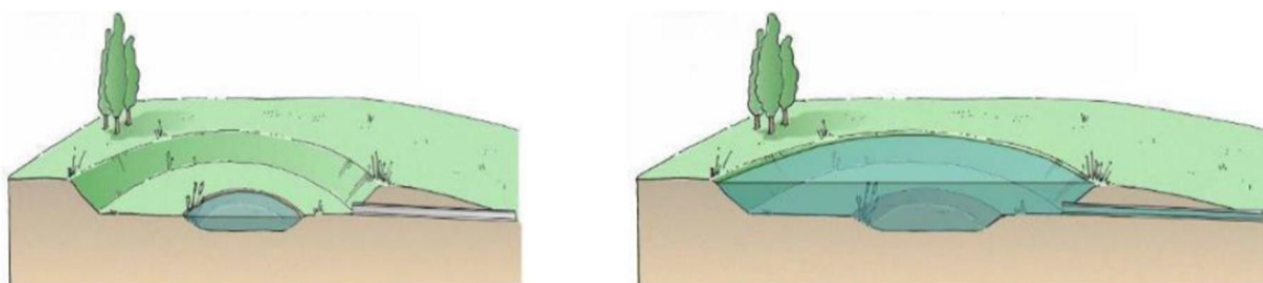


Figure 63 : Schéma de fonctionnement d'une mare tampon (Source : LIOSE)

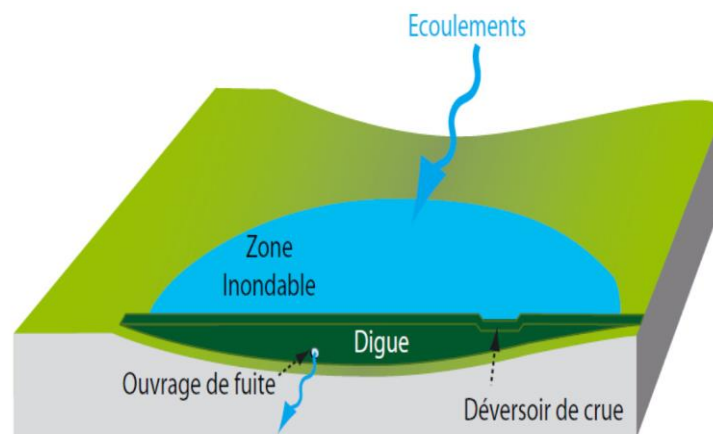


Figure 64 : Schéma type d'un talus de plein de champ (Source : LIOSE)

- Préservation des zones humides

Afin de localiser zones d'accumulation, la carte de sensibilité IRIP peut être exploitée. Un exemple d'application à une échelle locale est explicité ci-dessous :

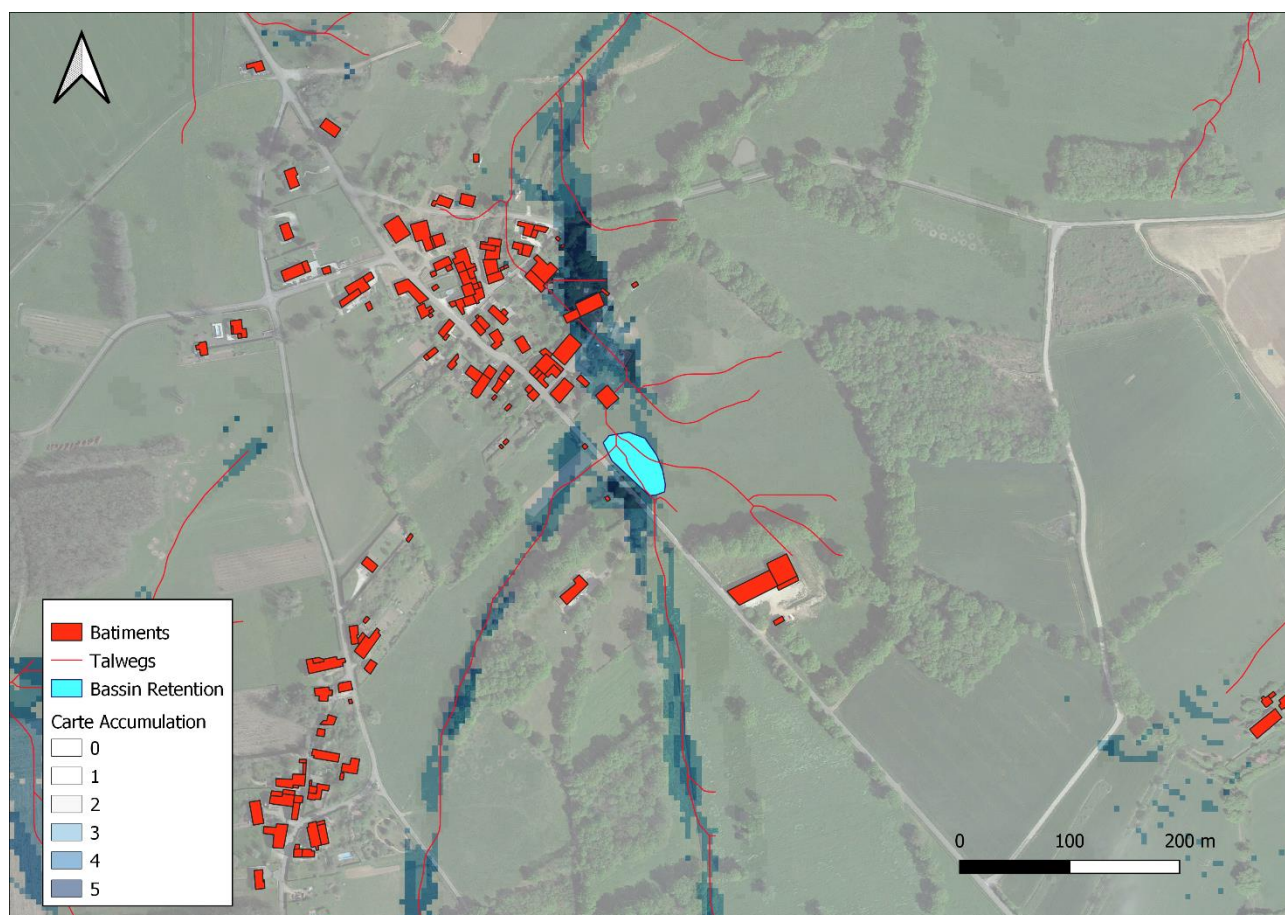


Figure 65 : Actions sur les zones d'accumulation - Exemple d'application

Un bassin de rétention a été positionné de manière à stocker l'eau en amont des bâtiments, dans une zone où l'accumulation est forte.

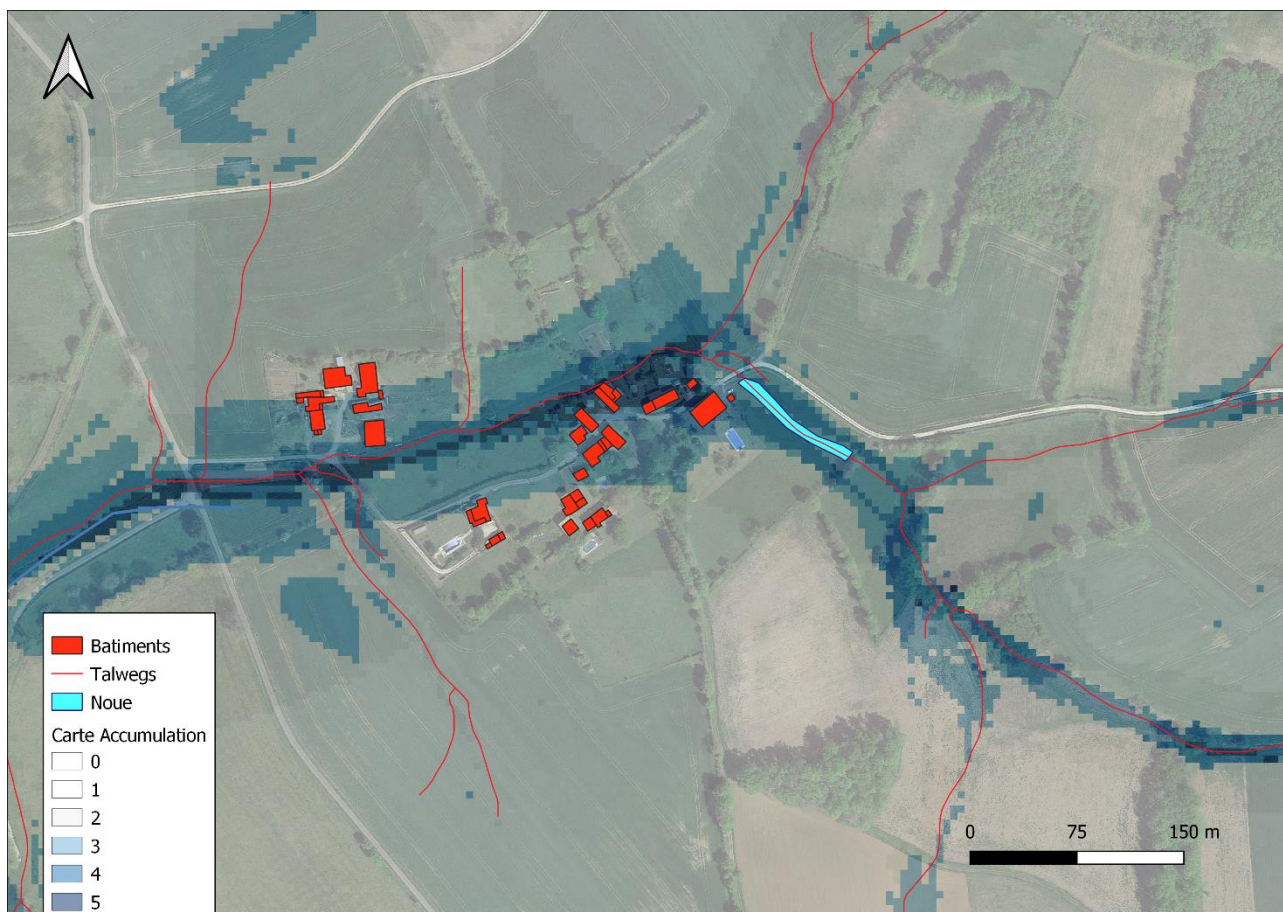


Figure 66 : Actions sur les zones d'accumulation - Exemple d'application

De la même manière, des noues peuvent être mises en place afin de stocker l'eau en amont des enjeux.

4.4. SYNTHÈSE DES PROPOSITIONS DE RALENTISSEMENT DYNAMIQUE

La stratégie proposée cible principalement l'objectif de prévention des inondations du territoire à risque important d'inondation Saintes-Cognac-Angoulême, notamment par les orientations d'aménagement locales.

Les actions diffuses de gestion douce permettront de réduire le ruissellement à l'échelle du bassin versant. Ces actions doivent être multipliées sur le territoire pour avoir un impact significatif. Afin d'affiner la sélection de sites où ces actions sont les plus pertinentes, il est important d'analyser à une échelle plus locale les cartes de sensibilité au ruissellement IRIP.

La carte ci-dessous récapitule les sous-bassins prioritaires à la mise en place des actions diffuses, ainsi que les sites identifiés pour les actions locales :

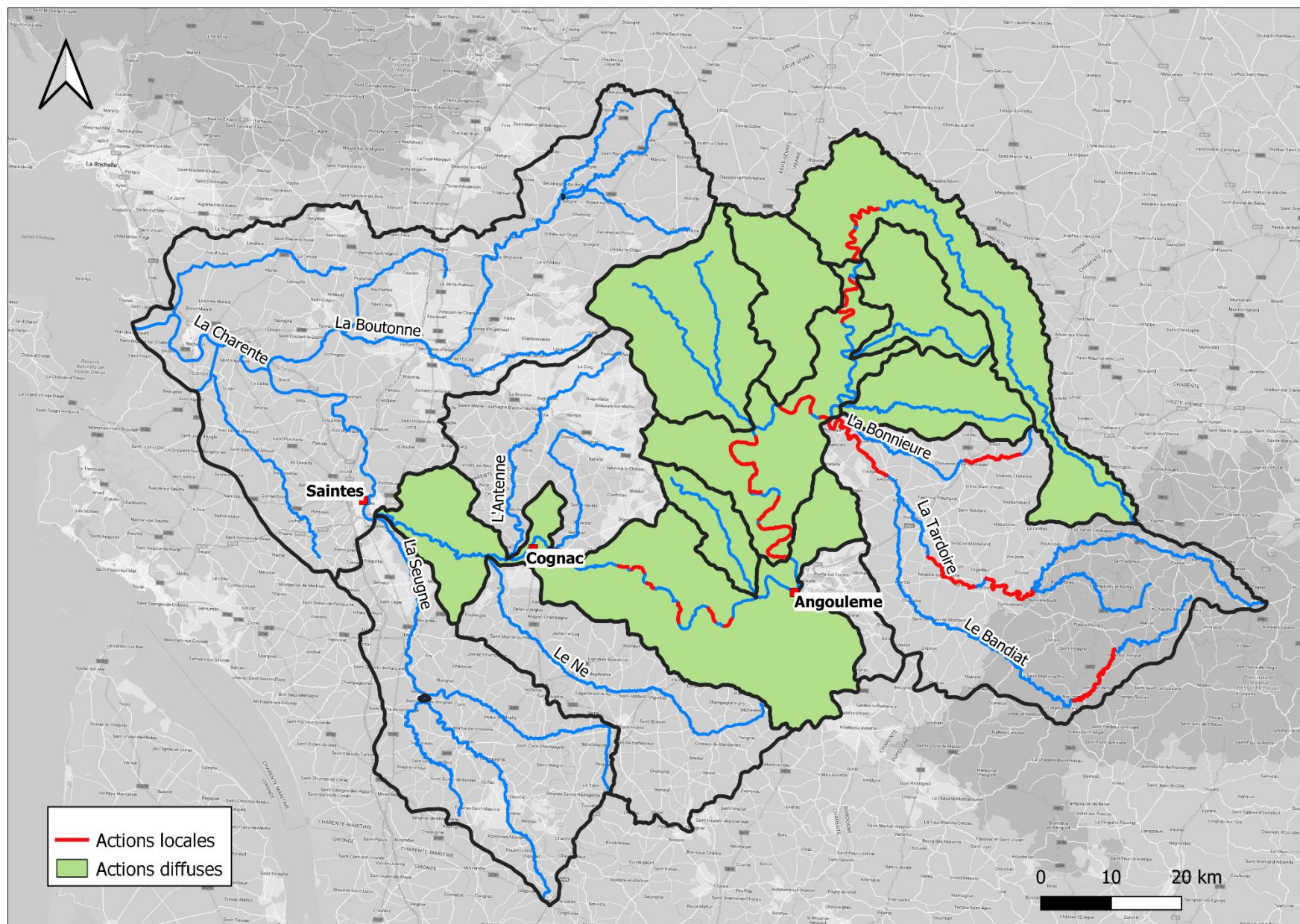


Figure 67 : Synthèse des préconisations de ralentissement dynamique

5. MODELISATIONS HYDRAULIQUE DES SOLUTIONS D'AMENAGEMENT

5.1. PRESENTATION DE LA MODELISATION HYDRAULIQUE 1D

5.1.1. Emprise modélisée

Le linéaire modélisé est d'environ 700 km et comprend les affluents principaux de la Charente :

- La Charente depuis l'embouchure jusqu'à l'amont de Civray,
- La Boutonne, de la confluence avec la Charente jusqu'à l'amont de Saint-Severin,
- L'Antenne, de sa confluence jusqu'à l'amont de Matha,
- La Seugne, depuis sa confluence jusqu'à l'amont de Jonzac,
- La Bonnieure, depuis la confluence jusqu'à l'amont de Chasseneuil-sur-Bonnieure, e Né, depuis la confluence jusqu'à l'amont de Nonaville,
- La Tardoire, de la confluence jusqu'à l'amont de Montbron,
- Le Bandiat, de la confluence avec La Tardoire jusqu'à Nontron.

Il est à noter qu'à l'issue des concertations avec les différents syndicats, il a été retenu d'intégrer l'Aume Couture à la modélisation

Les linéaires modélisés sont illustrés sur la carte ci-dessous :

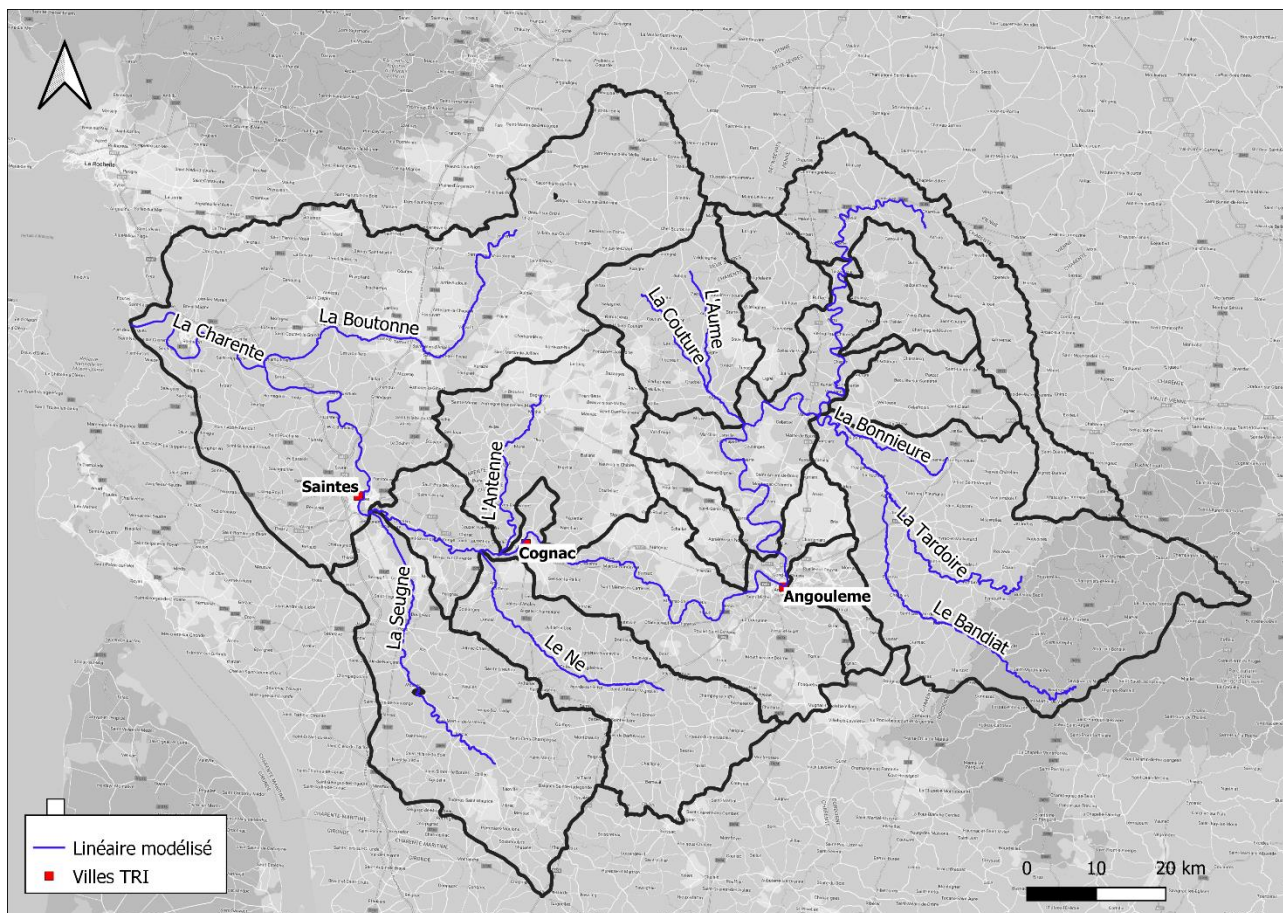


Figure 68 : Emprise du modèle hydraulique 1D

5.1.2. Données disponibles

Les affluents sur lesquels des données bathymétriques sur le lit mineur sont disponibles :

- Aume,
- Couture,
- Confluence Aume Couture,
- Tardoire,
- Antenne.

Par ailleurs, les modèles MASCARET suivants ont été utilisés :

- Modèle Civray Saint Saviol,
- Modèle Vindelle Cognac,
- Modèle Cognac Saintes,
- Modèle Boutonne,
- Modèle Seugne Jonzac,
- Modèle Seugne Pons.

Il a également été utilisé les modèles 2D suivants issus de précédentes études dont les emprises sont illustrées chapitre 5.5 :

- Modèle Saintes,
- Modèle Cognac,
- Modèle Angoulême.

Pour compléter ces données, le LIDAR a été utilisé conjointement au RGE Alti 5m afin de représenter le lit majeur.

5.1.3. Présentation du logiciel et lois utilisées

5.1.3.1. Le logiciel HEC-RAS

HEC RAS (Hydrologic Engineering Center River Analysis System) est un logiciel de modélisation hydraulique fluvial à licence gratuite développé par HEC, un département de l'US Army Corps of Engineers (USACE). RAS constitue un logiciel de modélisation hydraulique complet puisqu'il permet de modéliser des crues stationnaires, quasi stationnaires, instationnaires, des simulations de transports de sédiments et également de qualité d'eau, et ce à partir d'une unique géométrie.

HEC RAS résout les équations de Barré Saint Venant, sous forme simplifiées ou complètes selon le besoin et le choix de l'utilisateur. Dans son module 1D, il utilise une discrétisation sous forme de schéma de différence finie implicite.

Le logiciel permet de modéliser les cours d'eau ou canaux de plusieurs manières

- En 1 D
- En 1 D à casiers
- En couplage 1 D - 2 D
- En 2 D seul

Dans le cadre de l'étude, seule la modélisation 1D a été utilisée.

En pratique, le logiciel permet de représenter à grande échelle la propagation et la déformation de l'onde de crue au cours de son transfert vers l'aval, sous l'effet des élargissements de section et de l'apport des différents affluents. Il permet également de représenter de manière correcte les différents aménagements définis sur l'ensemble des cours d'eau pour améliorer la rétention des eaux et participer à l'écêtement des crues.

Le modèle construit sous HEC RAS d'un linéaire d'environ 700 km est représenté sur la figure ci-dessous :



Figure 69 : Modèle construit sous HEC RAS

Les lits mineurs et majeurs de la Charente et de ses principaux affluents ont été représentés par une succession de profils en travers simplifiés en se basant sur les levés topographiques quand ceux-ci sont disponibles, et en complétant par le LIDAR ou le RGE Alti 5m.

5.1.3.2. Loïs utilisées

Le logiciel HEC-RAS utilise les équations de Saint-Venant 1D ("shallow water equations" en anglais) pour relier les hauteurs d'eau et les débits. Ces équations se déduisent des équations de Navier-Stokes grâce à des simplifications liées au modèle de la rivière.

Pour résoudre ces équations, le logiciel utilise la théorie des différences finies qui est à la fois pratique et simple pour ce cas 1D.

Ces équations sont obtenues en faisant un bilan de conservation de la masse et de quantité de mouvement sur un petit volume de contrôle comme sur le schéma suivant :

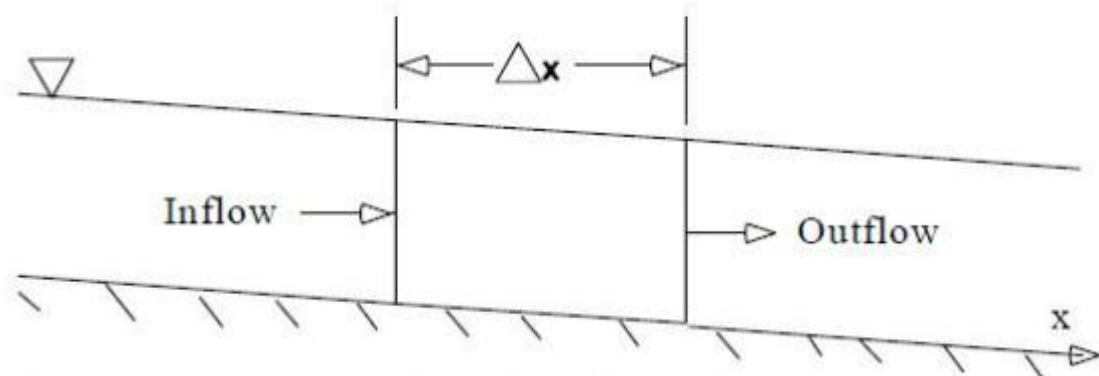


Figure 70 : Volume de contrôle élémentaire pour les équations de Saint Venant (Source : HEC RAS)

5.1.3.1. Conditions aux limites

Les conditions aux limites amont du modèle hydraulique sont constituées des hydrogrammes issus de la modélisation hydrologique

La condition aval est de type régime uniforme, sur lequel la pente est imposée.

Afin de réduire les temps de calculs et les instabilités liés à l’emprise du modèle, ce dernier a été réduit à l’axe Charente et aux affluents concernés par les sites identifiés dans le cadre de la stratégie globale.

Les apports hydrauliques des affluents non conservés sont pris en compte au niveau des profils en travers sur l’axe Charente correspondant à leur confluence. Sont ainsi conservés l’axe Charente dans sa globalité, la Tardoire, le Bandiat et la Bonnieure.

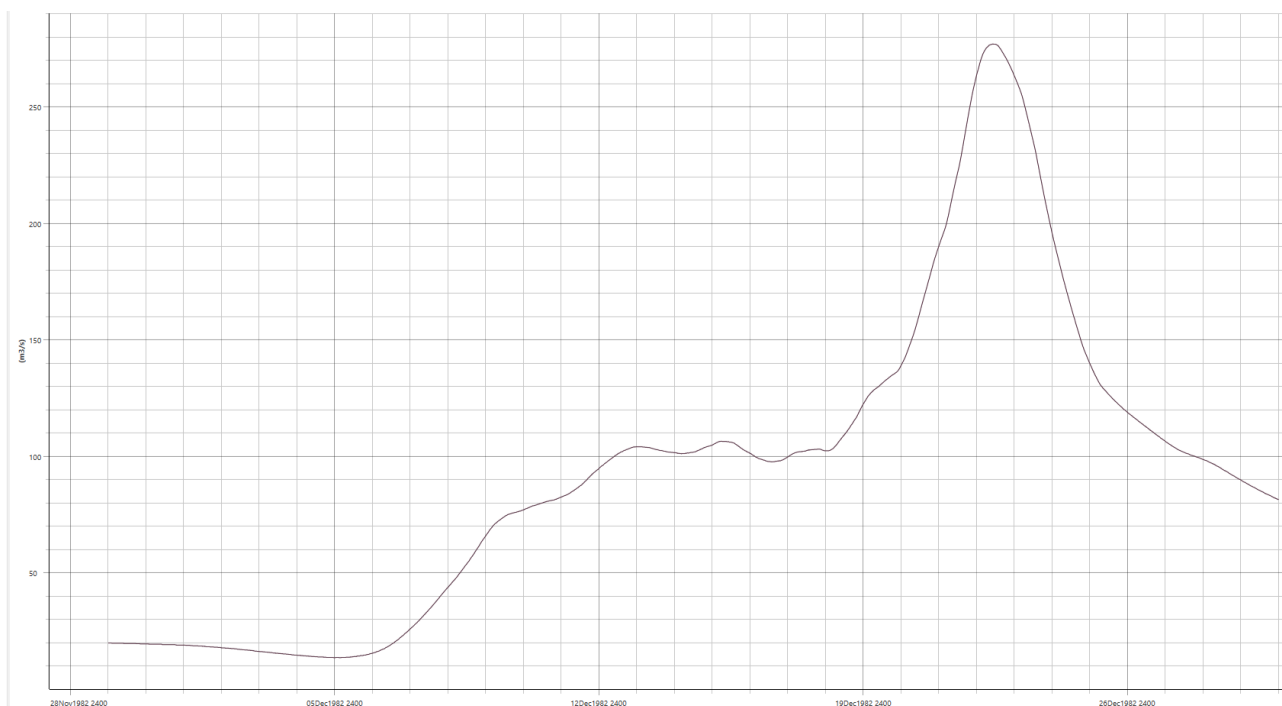


Figure 71 : Hydrogramme d'apports de la Boutonne à sa confluence avec la Charente - Crue 1982

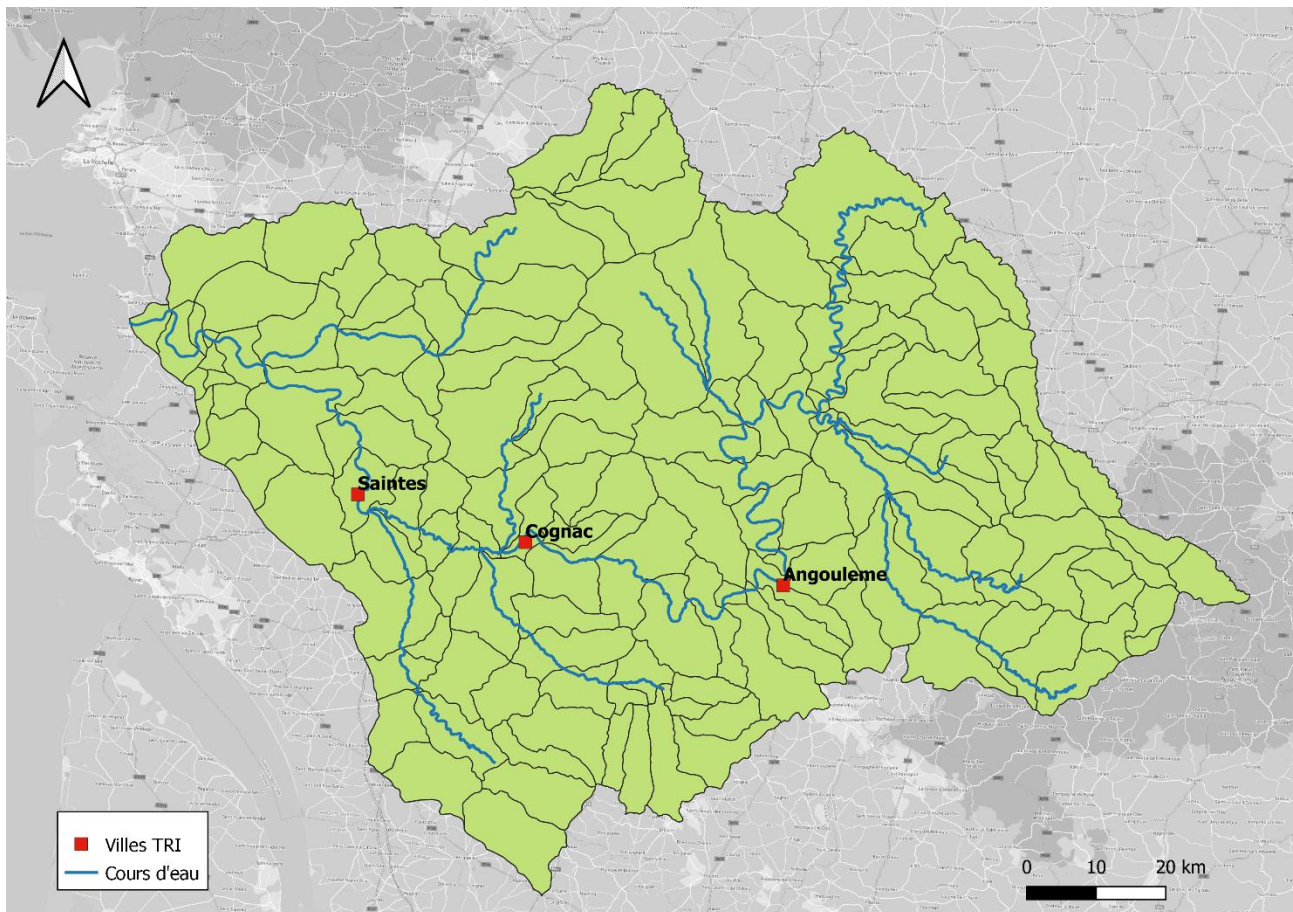
5.2. IMPACTS DES SOLUTIONS LOCALES

L'ensemble des aménagements évoqués dans la stratégie ont été modélisés pour les 3 crues étudiées précédemment (1982, 2007 et 2021).

L'objectif de ces modélisations hydrauliques est d'évaluer un ordre de grandeur de l'impact des différents aménagements proposés dans la stratégie au niveau du TRI.

Pour cela, on observe l'abaissement du niveau d'eau atteint en 3 endroits :

- Saintes, en amont du pont de l'avenue de Saintonge : D. 24,
- Cognac, en aval du pont de la RN. 141,
- Angoulême, en aval du pont Saint-Cybard, rue de Saintes.



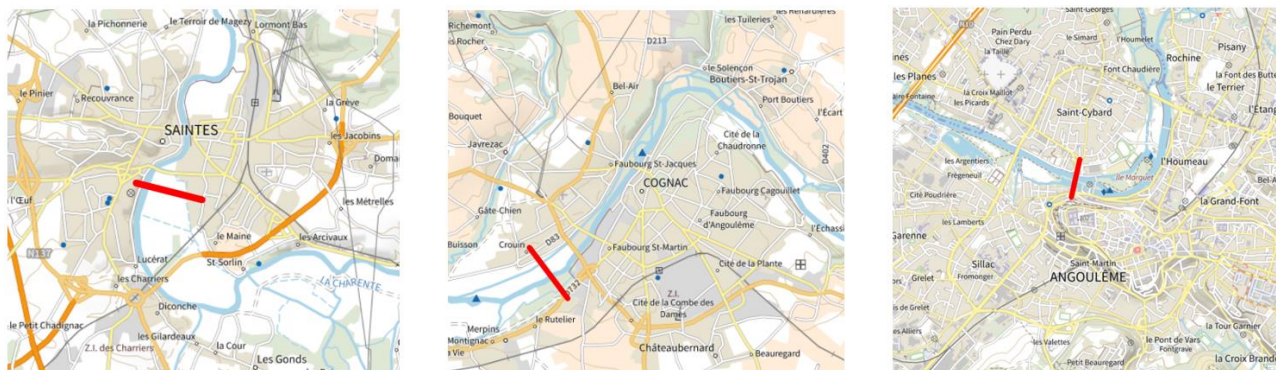


Figure 72 : Localisation des profils en travers d'observation

Une première modélisation hydraulique a été menée afin d'obtenir une valeur référence des niveaux d'eau atteints aux profils en travers étudiés.

Le modèle étant simplifié et non calé (l'exploitation du modèle hydraulique se faisant en relatif), les niveaux d'eau maximaux ainsi que les débits maximaux ont simplement été contrôlés afin de s'assurer d'une cohérence globale des résultats.

5.2.1. Frein en lit majeur

Afin de représenter un frein en lit majeur sur l'ensemble des sites identifiés dans la stratégie globale, le paramètre des frottements indiqué dans la modélisation (coefficient de Manning) a été modifié sur ces linéaires.

Initialement fixé en lit majeur sur l'ensemble du modèle à $0,05 \text{ s/m}^{1/3}$ – correspondant à une valeur usuelle dans la littérature pour représenter un lit majeur en prairie – il est alors modifié sur l'ensemble des sites identifiés dans la stratégie à $0,2 \text{ s/m}^{1/3}$ (valeur extrême correspondant dans la littérature à un lit majeur très encombré de bois et sous-bois).

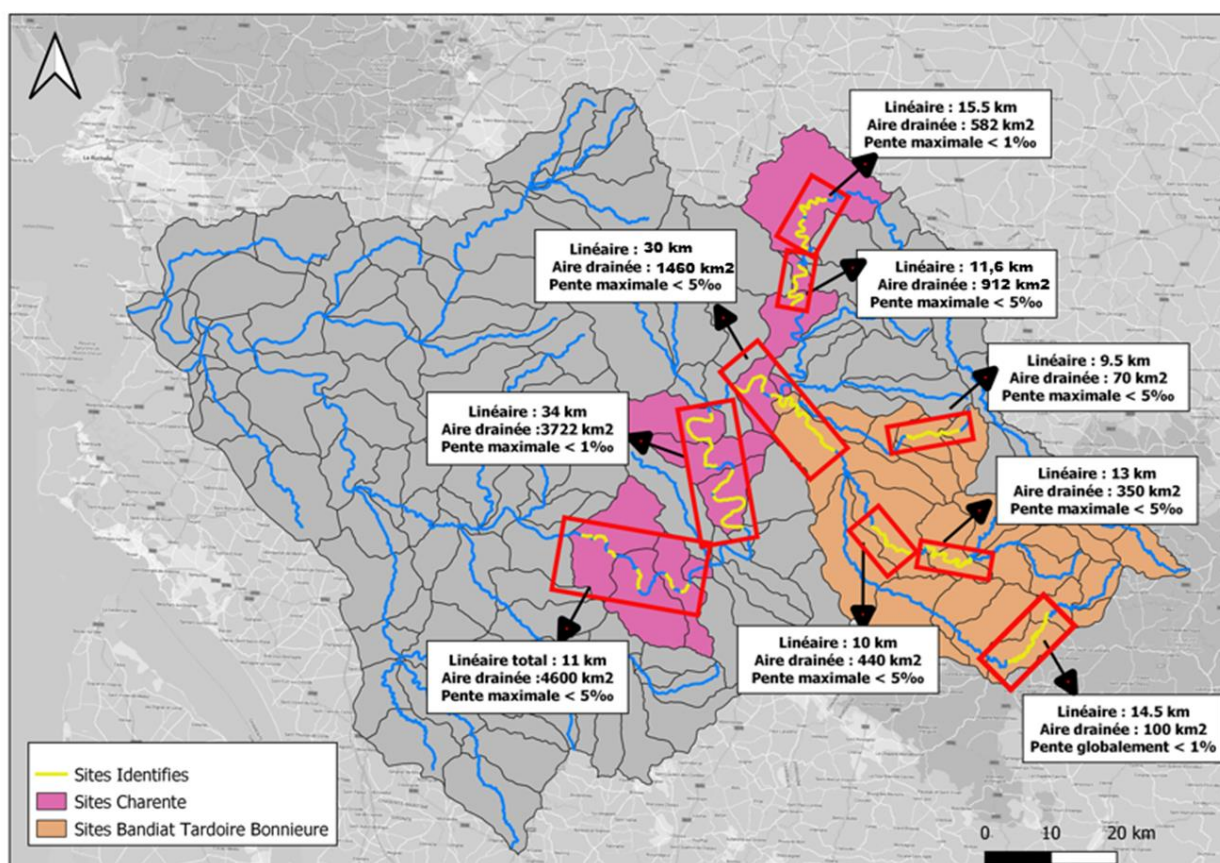


Figure 73 : Rappel des sites identifiés dans la stratégie pour la mise en place d'actions locales

Le tableau ci-après présente alors les impacts, sur le secteur du TRI, de la mise en place du frein en lit majeur :

Tableau 5 : Impact au niveau du TRI de la mise en place de frein en lit majeur sur l'ensemble des sites identifiés (Manning : 0,2 s/m^{1/3})

Crue	Observation de l'impact (m)		
	Saintes	Cognac	Angoulême
1982	-0.06	-0.07	-0.09
2007	-0.03	-0.05	-0.08
2021	-0.04	-0.05	-0.04

Les impacts varient selon les crues et les secteurs observés, tout en restant inférieurs à une dizaine de centimètres. L'effet de frein permet donc bien de diminuer les niveaux maximaux atteints par les 3 crues sur les secteurs urbains du TRI mais de manière limitée.

Afin d'analyser la sensibilité des résultats à ce paramètre, il a été testé une augmentation du coefficient de Manning jusqu'à 0,5 s/m^{1/3} au niveau de l'ensemble des sites identifiés.

Le tableau ci-dessous résume les impacts sur les niveaux d'eau, au niveau du TRI, de cette augmentation du coefficient de Manning :

Tableau 6 : Impact au niveau du TRI de la mise en place de frein en lit majeur sur l'ensemble des sites identifiés (Manning : 0,5 s/m^{1/3})

Crue	Observation de l'impact (m)		
	Saintes	Cognac	Angoulême
1982	-0.09	-0.11	-0.15
2007	-0.06	-0.07	-0.15
2021	-0.07	-0.08	-0.08

Les résultats montrent un abaissement allant jusqu'à une quinzaine de centimètres, selon la crue et le secteur observé. Cette valeur de coefficient de Manning fixée à 0,5 s/m^{1/3} est retenue dans la suite des modélisations réalisées.

L'étude s'est ensuite intéressée à l'impact qu'aurait la mise en place de ces freins en lit majeur en distinguant les sites situés sur l'axe Charente, les sites situés sur l'axe Charente en amont de la confluence Charente – Bonnieure (au niveau de la commune de Mansle) et les sites situés sur le sous bassin versant du Bandiat, Tardoire, Bonnieure.

Ainsi les 3 tableaux ci-après synthétisent successivement les impacts sur les niveaux maximaux avec mise en place de frein en lit majeur sur :

- L'ensemble des sites situés sur l'axe Charente,
- Les sites situés sur l'axe Charente à l'amont de la confluence Charente – Bonnieure (soit à l'amont de la commune de Mansle),
- Les sites situés sur le bassin versant Bandiat, Tardoire, Bonnieure.

Tableau 7 : Impact au niveau du TRI de la mise en place de frein en lit majeur uniquement sur les sites identifiés sur l'axe Charente (Manning : 0,5 s/m^{1/3})

Crue	Observation de l'impact (m)		
	Saintes	Cognac	Angoulême
1982	-0.09	-0.11	-0.15
2007	-0.05	-0.07	-0.14
2021	-0.06	-0.07	-0.06

Tableau 8 : Impact au niveau du TRI de la mise en place de frein en lit majeur uniquement sur les sites identifiés sur l'axe Charente à l'amont de Mansle (Manning : 0,5 s/m^{1/3})

Crue	Observation de l'impact (m)		
	Saintes	Cognac	Angoulême
1982	0	-0.01	-0.01
2007	0	-0.01	-0.01
2021	0	0	-0.01

Tableau 9 : Impact au niveau du TRI de la mise en place de frein en lit majeur uniquement sur les sites identifiés sur le bassin versant Bandiat Tardoire Bonnieure (Manning : 0,5 s/m^{1/3})

Crue	Observation de l'impact (m)		
	Saintes	Cognac	Angoulême
1982	0	-0.01	-0.02
2007	-0.01	-0.01	-0.03
2021	-0.01	-0.01	-0.02

Les résultats montrent un impact très faible (de l'ordre du centimètre, voire nul) en considérant la mise en place de freins en lit majeur uniquement sur les sites à l'amont de Mansle ou sur les sites du bassin versant Bandiat, Tardoire, Bonnieure.

A l'inverse, ces résultats démontrent une efficacité relativement importante de la mise en place de ces actions sur l'ensemble des sites situés sur l'axe Charente, et notamment ceux situés à l'aval de la confluence Charente – Bonnieure.

5.2.2. Rechargement alluvionnaire du lit mineur

Le second type d'action locale de ralentissement dynamique étudié est le rechargement alluvionnaire. Cette opération n'a pas été envisagée sur la Charente, le cours d'eau ayant des dimensions trop importantes. Seuls les sites identifiés dans la stratégie et situés sur le bassin Bandiat, Tardoire, Bonnieure sont concernés.

Afin d'obtenir une idée de l'impact au niveau du TRI pour les crues étudiées du rechargement alluvionnaire du lit mineur, il a été décidé d'effectuer un comblement allant jusqu'à 50% de la section du lit mineur. Le tableau ci-dessous présente alors les impacts induits par ces aménagements :

Tableau 10 : Impact au niveau du TRI de la mise en place du rechargement alluvionnaire (inférieure à la moitié de la section d'écoulement) sur les sites identifiés du bassin versant Bandiat Tardoire Bonnieure

Crue	Observation de l'impact (m)		
	Saintes	Cognac	Angoulême
1982	0.00	0.00	0.00
2007	0.00	0.00	0.00
2021	0.00	0.00	0.00

On constate que ces aménagements n'engendrent aucune variation sur les niveaux d'eau atteints sur le linéaire du TRI pour les crues modélisées.

La Bonnieure étant un cours d'eau très incisé, le syndicat en charge de la GEMAPI sur ce secteur (SyBTB) a déjà mis en place du rechargement alluvionnaire pour reconnecter le cours d'eau et son lit majeur, avec un comblement de section allant jusqu'à 80% de la section.

Une seconde modélisation a donc été menée en amplifiant ce rechargement jusqu'à 80% de la section d'écoulement sur l'ensemble du linéaire de la Bonnieure modélisé tout en conservant un comblement s'approchant des 50% de section sur le reste des sites identifiés sur le Bandiat et la Tardoire. Le tableau ci-dessous présente les impacts au niveau du TRI mais également à l'aval immédiat de la Bonnieure :

Tableau 11 : Impact au niveau du TRI de la mise en place du rechargement alluvionnaire (inférieure à la moitié de la section d'écoulement) sur les sites identifiés du bassin versant Bandiat Tardoire, et à 80% sur l'ensemble du linéaire de la Bonnieure

Crue	Observation de l'impact (m)			
	Saintes	Cognac	Angoulême	Aval Bonnieure
1982	0.00	0.00	0.00	0.00
2007	0.00	0.00	0.00	0.00
2021	0.00	0.00	0.00	0.00

La modélisation ne montre là encore aucune baisse du niveau d'eau maximal atteint sur le secteur du TRI avec ces aménagements. De même, on ne constate aucune différence à l'aval de la Bonnieure. Ces aménagements semblent donc inefficaces vis-à-vis des 3 crues étudiées.

5.3. IMPACTS DES SOLUTIONS DIFFUSES

Pour représenter l'effet des actions diffuses sur le ruissellement, la modélisation hydrologique a été reprise. La modification d'occupation du sol se traduit dans le modèle par une modification du paramètre de ruissellement (Curve Number, noté CN dans la suite).

En effet, la mise en place de nombreuses actions diffuses sur l'ensemble du bassin versant pourrait se traduire par une baisse de ce paramètre de ruissellement.

Différents calculs ont été menés afin d'observer l'impact d'une diminution du CN sur les débits de pointes à Vindelle et Saintes. Les tableaux ci-dessous résument en absolu et en relatif ces impacts :

Tableau 12 : Impacts de la modification du CN sur les débits de pointe à Vindelle et Saintes pour les 3 crues étudiées

Vindelle		Diminution du CN		
		3%	5%	10%
1982	Pourcentage de diminution du débit de pointe	2,5%	4,2%	8,7%
	Atténuation du débit de pointe (m³/s)	14,1	23,8	49,4
2007	Pourcentage de diminution du débit de pointe	5,2%	8,8%	17,2%
	Atténuation du débit de pointe (m³/s)	17,6	29,7	57,8
2021	Pourcentage de diminution du débit de pointe	3,6%	6,0%	12,3%
	Atténuation du débit de pointe (m³/s)	13,6	23	46,9

Saintes		Diminution du CN		
		3%	5%	10%
1982	Pourcentage de diminution du débit de pointe	2,3%	3,9%	8,0%
	Atténuation du débit de pointe (m³/s)	23,8	40,2	82,6
2007	Pourcentage de diminution du débit de pointe	4,3%	7,2%	14,1%
	Atténuation du débit de pointe (m³/s)	26,6	44,8	87,6
2021	Pourcentage de diminution du débit de pointe	3,8%	6,3%	12,7%
	Atténuation du débit de pointe (m³/s)	23,4	38,6	77,5

Il est très difficile d'estimer à ce stade combien d'aménagement diffus seraient nécessaires pour arriver à une baisse de 3 ou 5 % du CN. L'objectif de cette analyse est plutôt de quantifier la sensibilité des résultats à une variation réaliste de ce paramètre. Pour la modélisation de cette solution, seule l'hypothèse d'une diminution de 3% du Curve Number (CN) a été retenue.

En prenant comme exemple un bassin versant de 20 Km² de cultures (CN moyen de 78), une diminution de 3% du CN moyen du bassin peut se traduire par :

- L'aménagement de 1 Km² en forêt (CN 30), soit 5% de la superficie du bassin,
- L'aménagement de 1.2 Km² de prairie (CN 40), soit 6,2% de la superficie.

L'hypothèse de baisse de 3% du CN a alors été appliquée à l'ensemble du bassin versant de la Charente.

Les hydrogrammes résultants de la modélisation hydrologique étant modifiés, ils sont alors mis à jour dans le modèle hydraulique. Le tableau ci-après présente ainsi les abaissements des niveaux d'eau maximaux au niveau du TRI selon les crues modélisées :

Tableau 13 : Impact au niveau du TRI de la mise en place de la modification de l'occupation des sols (baisse du CN de 3%) sur l'ensemble du bassin versant de la Charente

Crue	Observation de l'impact (m)		
	Saintes	Cognac	Angoulême
1982	-0.06	-0.05	-0.05
2007	-0.10	-0.07	-0.07
2021	-0.08	-0.07	-0.05

On observe un abaissement des niveaux d'eau au niveau du TRI allant de 5 cm et jusqu'à 10 cm pour la crue de 2007. Cet abaissement s'accroît d'amont en aval pour l'ensemble des événements modélisés. L'abaissement maximal est par ailleurs observé pour l'évènement de plus faible intensité : 2007. L'effet de saturation des sols engendré par des crues plus intenses (telles que 1982 et 2021) pourrait expliquer cette observation.

De plus, pour les crues de 1982 et 2007, on constate un abaissement similaire entre Angoulême et Cognac. Cela peut s'expliquer par une diminution des apports des affluents situés entre Cognac et Saintes (l'Antenne, le Né ou encore la Seugne) alors qu'il n'y a pas d'affluent principal situé entre Angoulême et Cognac.

5.4. IMPACTS DES SOLUTIONS LOCALES ET DIFFUSES

Il est ensuite étudié l'impact, sur le linéaire du TRI, de la mise en place des actions locales et diffuses.

Une première modélisation a permis d'étudier conjointement la modification de l'occupation des sols (abaissement du CN de 3%) et la mise en place de freins en lit majeur (Manning 0,5 s/m^{1/3}) sur l'ensemble des sites présélectionnés dans la stratégie. Les résultats au niveau du TRI sont présentés ci-dessous :

Tableau 14 : Impact au niveau du TRI de la modification d'occupation des sols (CN abaissé de 3%), avec mise en place de freins en lit majeur (Manning 0,5 s/m^{1/3}) sur l'ensemble des sites identifiés

Crue	Observation de l'impact (m)		
	Saintes	Cognac	Angoulême
1982	-0.15	-0.16	-0.20
2007	-0.16	-0.14	-0.22
2021	-0.15	-0.15	-0.13

On constate que les gains hydrauliques obtenus se cumulent avec la mise en place conjointe d'actions locales et diffuses.

Il est alors ajouté à cela le rechargement alluvionnaire (inférieur à la moitié de la section d'écoulement) sur les sites identifiés sur le Bandiat, la Tardoire et la Bonnieure :

Tableau 15 : Impact au niveau du TRI de la modification d'occupation des sols (CN abaissé de 3%), avec mise en place de freins en lit majeur (Manning 0,5 s/m^{1/3}) sur l'ensemble des sites identifiés dans la stratégie et rechargement alluvionnaire sur les sites du Bandiat, Tardoire, Bonnieure

Crue	Observation de l'impact (m)		
	Saintes	Cognac	Angoulême
1982	-0.15	-0.16	-0.20
2007	-0.16	-0.14	-0.22
2021	-0.15	-0.15	-0.13

Ici encore, les résultats ne montrent aucun impact sur le secteur du TRI du rechargement alluvionnaire sur les sites identifiés sur le secteur Bandiat, Tardoire, Bonnieure pour les crues étudiées. Les impacts sont identiques à ceux obtenus sans rechargement alluvionnaire.

5.5. ESTIMATION DE L'IMPACT SUR LES ENJEUX

Pour traduire l'impact des aménagements envisagés dans la stratégie préconisée sur les enjeux (bâti notamment), les résultats de la modélisation de la crue centennale des Plan de Prévention du Risque Inondation (PPRI) des villes de Saintes, Cognac et Angoulême ont été exploités.

La cartographie ci-dessous présente les emprises respectives de chacun des modèles utilisés :

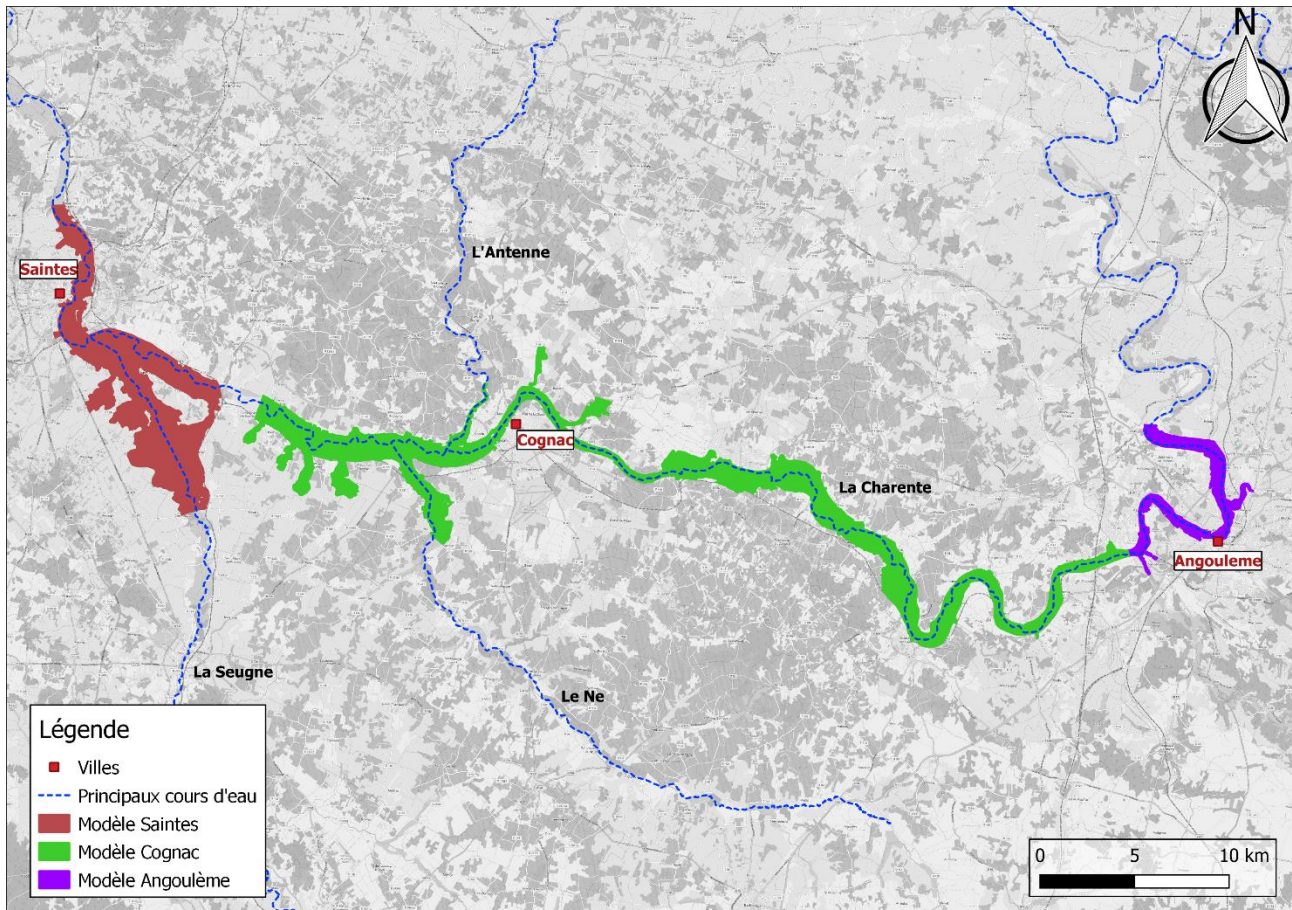


Figure 74 : Emprise des modèles utilisés pour la traduction sur les enjeux

Malgré des étendues ne coïncidant pas parfaitement entre les modèles de Saintes et Cognac, la quasi-totalité du linéaire du TRI est pris en compte.

L'abaissement des niveaux d'eau a été considéré uniforme sur chacune des emprises des modèles :

- 15 cm sur l'emprise du modèle de Saintes,
- 15 cm sur l'emprise du modèle de Cognac,
- 20 cm sur l'emprise du modèle d'Angoulême.

Ces valeurs proviennent des impacts maximums calculés avec la modélisation 1D (il ici a été retenu l'ordre de grandeur, le modèle 1D étant simplifié, le but étant d'avoir un ordre de grandeur des impacts sur les enjeux).

L'impact des aménagements s'observe tout d'abord sur les zones inondables :

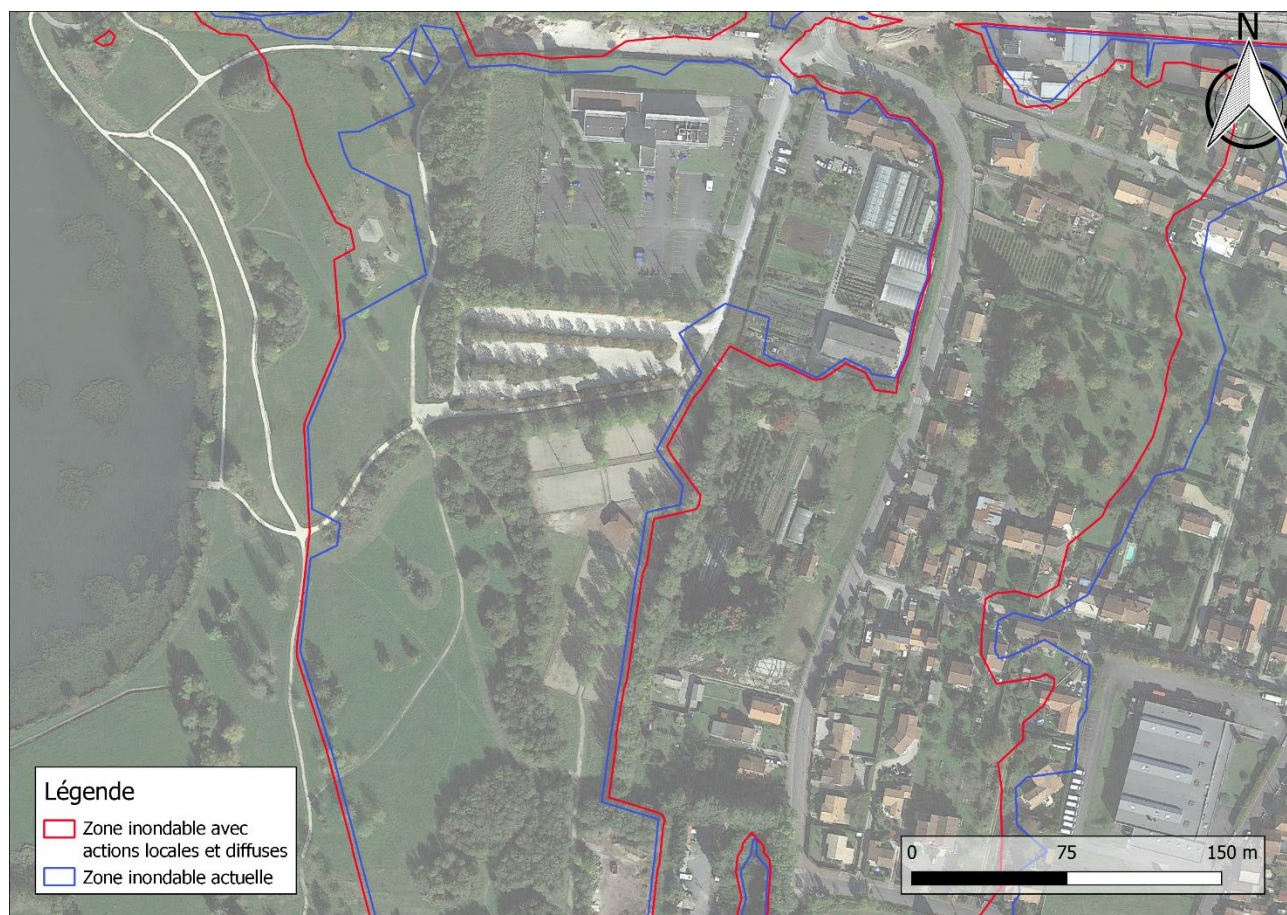


Figure 75 : Exemple de l'impact des aménagements sur la zone inondable (Saintes)

On constate que l'impact de l'abaissement des niveaux d'eau est variable selon le secteur étudié : la zone inondable reste inchangée par endroit, ou réduite jusqu'à une vingtaine de mètres).

L'étude considère alors les enjeux situés en zone inondable. Pour cela, la couche BATIMENT de la BDTOPO de 2019 est étudiée et les bâtis localisés dans chacune des zones inondables sont dénombrés. Le tableau ci-dessous résume le nombre de bâtis situés en zone inondable avant et après abaissement de la ligne d'eau.

Tableau 16 : Traduction de l'abaissement de la ligne d'eau sur les enjeux du TRI

Modèle considéré	Baisse considérée (cm)	Bâtis concernés actuel	Bâtis concernés avec abaissement	Différence (%)	Différence (nombre)
Saintes	15	4021	3498	13.0	523
Cognac	15	4847	4127	14.9	720
Angoulême	20	1509	1272	15.7	237
Total		10377	8897	14.3	1480

L'emprise du modèle d'Angoulême étant bien moins importante que celle des deux autres modèles, le nombre de bâtis est également plus faible.

Ces résultats montrent cependant des similitudes dans pourcentages de bâtis situés entre les zones inondables avant et après abaissement des niveaux d'eau. Ainsi, entre 13% et 15% des enjeux identifiés seraient impactés par les mesures proposées dans la stratégie.

6. CONCLUSIONS SUR LA STRATEGIE PRECONISEE

La modélisation hydrologique a permis d'analyser le fonctionnement des mécanismes de crue à l'échelle du bassin versant de la Charente. En effet, la contribution relative et absolue de chaque sous-bassin a été évaluée pour les trois crues modélisées : 1982, 2007 et 2021. L'analyse a également porté sur les déphasages entre les différentes crues des affluents et de la Charente.

Cette analyse de la genèse des crues de la Charente a permis alors de définir et de proposer une stratégie d'aménagement du territoire afin de réduire l'impact des crues de la Charente à l'échelle des enjeux du TRI Saintes Cognac Angoulême.

Il a donc été proposé de mettre en place des actions locales (frein en lit majeur) sur la Charente, entre l'aval de Mansle et Cognac, ainsi que des actions diffuses multipliées en priorisant certains bassins versants pour optimiser l'impact sur le TRI.

Ensuite, ces actions ont fait l'objet de tests via le modèle hydraulique 1D qui a pour but d'évaluer un ordre de grandeur de leurs impacts sur les niveaux d'eau sur le secteur du TRI. Pour cela, trois points de contrôle ont été utilisés : Saintes, Cognac, Angoulême. Il ressort de ces tests que la mise en place de l'ensemble des actions proposées dans la stratégie permettrait une baisse maximale d'une vingtaine de centimètres à Angoulême pour un événement de type crue de 2007 (plus faible crue modélisée). Cet abaissement se traduit par une réduction du nombre de bâtis situés en zone inondable de l'ordre 15%.

Au regard des résultats obtenus lors des tests menés il est préconisé de ne conserver dans la stratégie que les actions locales situées sur l'axe Charente à l'aval de Mansle et les actions diffuses sur l'ensemble du territoire. On peut également noter que les actions diffuses, bien que bénéfiques localement et globalement peuvent être prioritaires afin d'optimiser l'impact sur le secteur du TRI. La stratégie préconisée est ainsi résumée sur la cartographie ci-dessous :

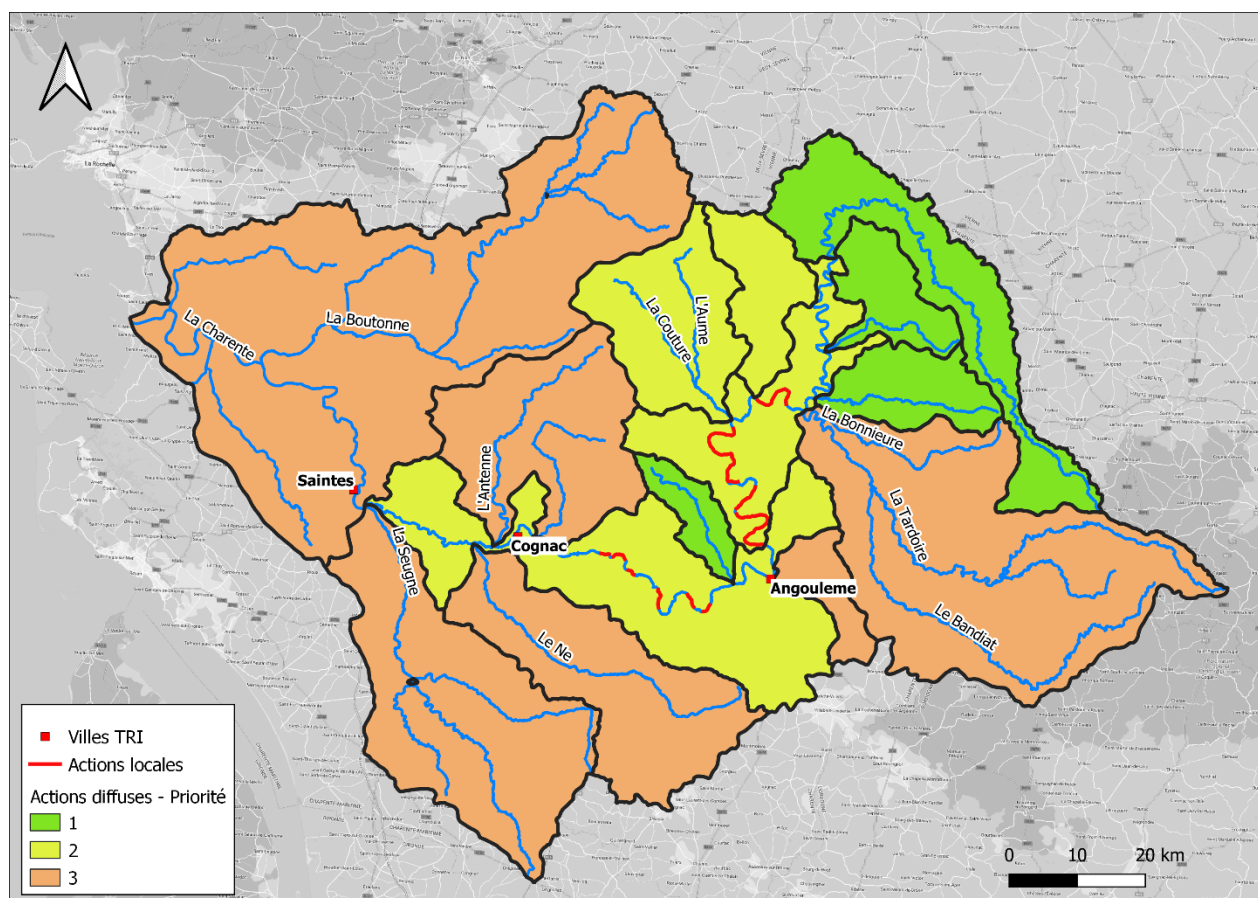


Figure 76 : Conclusion sur la stratégie préconisée