Délimitation et caractérisation des têtes de bassin versant

Mise en œuvre de la disposition C27 du SAGE Charente : « Identifier et définir les modalités de gestion des têtes de bassin »

GUIDE D'INTERPRÉTATION ET D'UTILISATION

Travail réalisé par l'EPTB Charente et le Forum des Marais Atlantiques

Avec le soutien financier de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne

Délimitation et caractérisation des têtes de bassin versant

Mise en œuvre de la disposition C27 du SAGE Charente

C27 Identifier et définir les modalités de gestion des têtes de bassin

Dans un délai de 4 ans suivant l'approbation du SAGE, la structure porteuse met en place un groupe de travail afin de : déterminer des critères de délimitation des têtes de bassin adaptés au contexte du bassin de la Charente ; réaliser une pré-localisation des têtes de bassin ; analyser leurs caractéristiques et définir des objectifs et un panel de modes de gestion spécifiques.

La CLE souhaite que les têtes de bassin soient prises en considération dans les programmes d'actions comme des secteurs clés à préserver, gérer, voire restaurer pour l'atteinte des objectifs du SAGE.

Table des matières

Introduction 3
I - Construction des éléments cartographiques 4
CRÉATION DES ENTITÉS – Méthodologie de délimitation des têtes de bassin 4
1. Le choix du référentiel hydrographique 4
2. Délimitation des têtes de bassin à partir de la BD TOPAGE « tronçons hydrographiques » 4
3. Délimitation des têtes de bassin à partir d'un réseau d'écoulement théorique : 5
4. Fusion des deux méthodes et création de la couche composite : 5
CRÉATION DE LA BASE DE DONNEES - Caractérisation et hiérarchisation des têtes de bassin 7
1. Caractérisation des têtes de bassins : contraintes dans le choix des indicateurs 7
2. Méthode de hiérarchisation 10
II - Précautions d'usage 11
III - Perspectives d'utilisation et de valorisation 14
1. Contribuer à l'amélioration des connaissances et à l'enrichissement des inventaires 14
2. Hiérarchisations à l'échelle grand bassin 15
3. La hiérarchisation des têtes de bassin comme outil de priorisation 16
4. Un outil de priorisation parmi d'autres 18
5. Un outil de diagnostic préliminaire, qui permet d'orienter la stratégie d'action 20
6. Sensibiliser sur le chemin de l'eau et l'enjeu de solidarité amont-aval 21
Conclusion et remerciements 22
ANNEXE I – Déroulé de la démarche 23
ANNEXE II – Analyse de corrélation des variables pour épurer la liste d'indicateurs 24
ANNEXE III – Reproduire ce travail 30
ANNEXE IV – Bibliographie 32

Contacts :

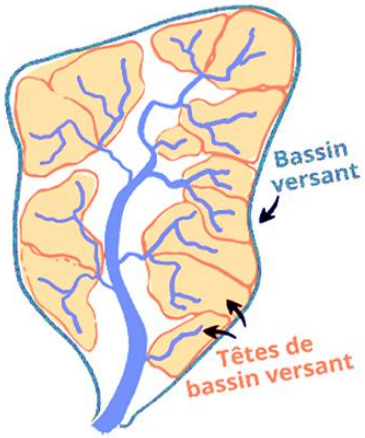
amelie.jugniot@fleuve-charente.net

marc-antoine.colleu@fleuve-charente.net

denis.rousset@fleuve-charente.net

Délimitation et caractérisation des têtes de bassin versant

Mise en œuvre de la disposition C27 du SAGE Charente



Introduction

Les têtes de bassin versant peuvent être définies assez largement comme les zones amont des réseaux hydrographiques.

Elles sont la clé de voûte du fonctionnement quantitatif, qualitatif et écologique du cours d'eau et des milieux aquatiques associés. Mal délimitées et longtemps considérées comme des milieux exempts de pressions anthropiques, ces zones sont en réalité particulièrement vulnérables et parfois très dégradées. Les altérations qu'elles subissent se répercutent et s'amplifient. Ruissellement intense, érosion des sols, altération des zones humides et qualité de l'eau médiocre sont des conséquences de la dégradation des têtes de bassins. Ces effets peuvent survenir dès la source et être visibles jusqu'à l'estuaire au travers des phénomènes d'inondations, de l'apport massif de sédiment ou des étiages marqués.

Dans un objectif d'adaptation au changement climatique sur un bassin versant en déficit hydrologique marqué, la préservation et la restauration de la ressource en eau est indispensable. L'intégration des têtes de bassins aux politiques de l'eau et à l'aménagement du territoire sera un pas en avant important dans l'atteinte de cet objectif et plus largement dans l'atteinte du bon état des milieux fixé par la Directive-Cadre sur l'Eau.

Le travail présenté ci-après a été réalisé dans le cadre de la mise en œuvre de la disposition C27 du SAGE Charente (approuvé en novembre 2019). Il a été harmonisé avec deux autres démarches menées sur le bassin :

- Un travail du Forum des Marais Atlantiques avec le SYMBA dans le cadre de l'appel à projets pour la préservation des zones humides lancé en 2020 par l'Entente pour l'eau du bassin Adour-Garonne
- Un stage de 6 mois à l'été 2021 au SBAISS : « Pressions et enjeux sur les têtes de bassin de l'Izonne, de l'Argentor et du Son-Sonnette »

Il est une boite à outils pour le gestionnaire de territoire, qu'il soit syndicat de bassin, maire de commune, Agence de l'Eau ou agriculteur sur le territoire du bassin de la Charente. Il a vocation à présenter les éléments structurant des têtes de bassin versant à l'échelle du bassin Charente et leur état afin d'être utilisé comme un outil appliqué d'aide à la décision. Chaque acteur pourra ainsi localiser les sous-territoires impactés ou préservés afin d'orienter au mieux les actions de restauration de la ressource en eau. Plusieurs méthodes pour orienter ces choix sont possibles, elles sont présentées dans cette note technique.

I - Construction des éléments cartographiques

CRÉATION DES ENTITÉS – Méthodologie de délimitation des têtes de bassin

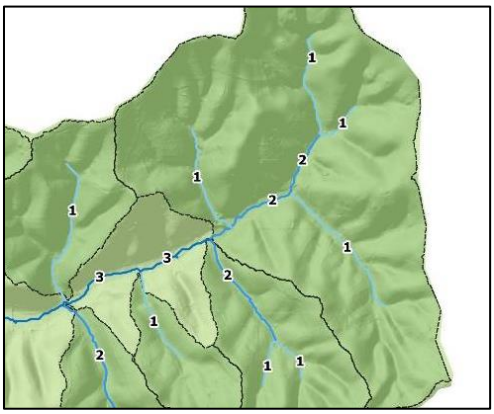
1. Le choix du référentiel hydrographique

Les têtes de bassin versant sont ici définies comme les bassins versants des tronçons hydrographiques de rangs de Strahler 1 et 2.

Le rang de Strahler dépend de la précision du référentiel hydrographique utilisé pour le calculer : ainsi, le choix de ce référentiel influe sur la délimitation des têtes de bassin versant. Les cartographies police de l'eau (DDT) et inventaires locaux réalisés par les syndicats ont été écartés [1]. La BD TOPAGE est disponible à cette échelle et est le fruit d'un croisement de différentes bases de données (Carthage, Topo et remontées terrain) : elle a été considérée comme le référentiel le plus adéquat dans cette étude pour obtenir des résultats pertinents. Les acteurs locaux ont cependant soulevé des lacunes sur certains territoires et des incohérences dans la délimitation des têtes de bassin qui en découle (trop grande superficie, bassin entier identifié comme tête de bassin). Ainsi, la méthode retenue prévoit, là où cela est nécessaire, de compléter la délimitation des têtes de bassin issue de la BD TOPAGE par une délimitation issue d'un réseau d'écoulement théorique (extrait du MNT).

2. Délimitation des têtes de bassin à partir de la BD TOPAGE « tronçons hydrographiques »

Ce travail a été réalisé par le Forum des Marais Atlantiques à l'aide de l'outil d'automatisation des traitements SIG de l'EPTB Sèvre Nantaise [2]. L'algorithme enchaine les étapes suivantes :



- Correction du référentiel hydrographique : spécificité « marais », reconnexion des tronçons déconnectés (par surcreusement du MNT), correction des anastomoses, création d'exutoire fictif en cas de multiples exutoires
- Calcul du rang de Strahler (les tronçons de moins de 100m ne sont pas pris en compte dans le calcul)
- Délimitation des bassins versants de chaque tronçon
- Construction des têtes bassin versant : les BV de rang > 2 ne sont pas pris en compte, les BV de rang 1 et raccordés à des tronçons de rang > 2 sont considérés comme des TdBV à part entières, les BV de rangs ≤ 2 sont fusionnés quand le point exutoire final forme un rang 3.

Remarques :

- Un nettoyage de la couche SIG a été réalisé (par l'EPTB et le FMA avec vérification des syndicats) : les têtes de bassin trop petites (superficie < 10ha), mal délimitées (biais lié à l'utilisation d'un algorithme) ou situées en lit majeur ont été supprimées
- Les secteurs de marais sont exclus car le calcul du rang de Strahler n'y est pas pertinent

[1] La mise à jour de la cartographie des cours d'eau était en cours et encore incomplète durant cette période. De même, les inventaires des syndicats sont amendés localement et ne sont pas une donnée homogène à l'échelle du bassin versant.

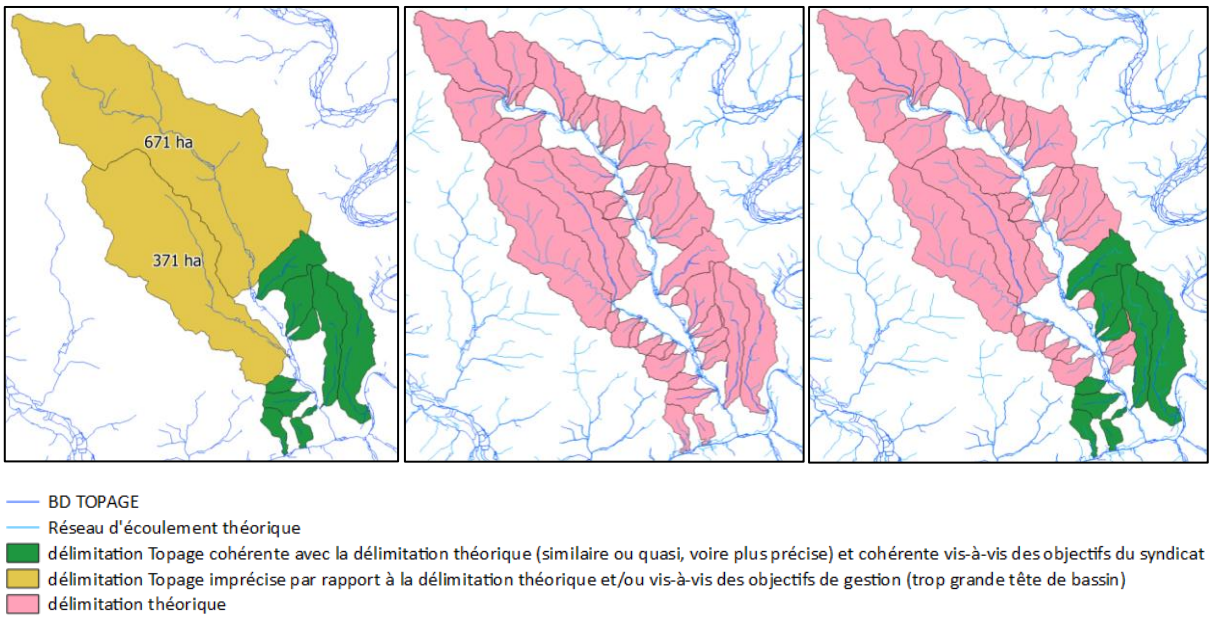
[2] *Localisation, caractérisation et hiérarchisation des têtes de bassin versant sur le territoire de la Sèvre Nantaise, A. Coudart, 2018*

3. Délimitation des têtes de bassin à partir d'un réseau d'écoulement théorique :

Un réseau d'écoulement théorique est extrait du MNT avec paramétrage d'une aire de drainage minimale de 40ha (choix arbitraire à l'issue de plusieurs tests, le but étant de disposer d'un réseau d'une précision similaire à celle de la BD Topage là où celle-ci est valide). Les têtes de bassin sont construites suivant les règles énoncées précédemment.

4. Fusion des deux méthodes et création de la couche composite :

Il s'agit de remplacer les têtes de bassin dont la délimitation est trop peu précise (trop grande superficie, en jaune sur l'exemple ci-dessous) par une sous-délimitation théorique (en rose [3]).



Ainsi la méthode permet de s'adapter aux spécificités de chaque territoire :

Secteurs	Contexte	Méthodologie
Charente amont, socle, SyBRA, SBAISS, Seugne, Né…	Lacunes (ponctuelles ou massives) dans la BD TOPAGE	Sous-délimitation théorique (là où la délimitation TOPAGE est moins précise)
SBAISS, Né, SMABACAB, SMCA, SyBRA…	Délimitation peu précise (trop grandes têtes de bassin) sans pour autant que la BD TOPAGE soit lacunaire (réseau hydro. peu dense car drainage, écoulements temporaires ou qui se perdent) [3]	Sous-délimitation théorique → tracé plus précis des écoulements même là où BD TOPAGE est complète [4]
SYMBA (Soloire, Gravelle), SMCA (Devise)	BD TOPAGE trop précise (tronçons qui n'existent pas ou plus)	Délimitation BD TOPAGE seule avec corrections ponctuelles

Remarques :

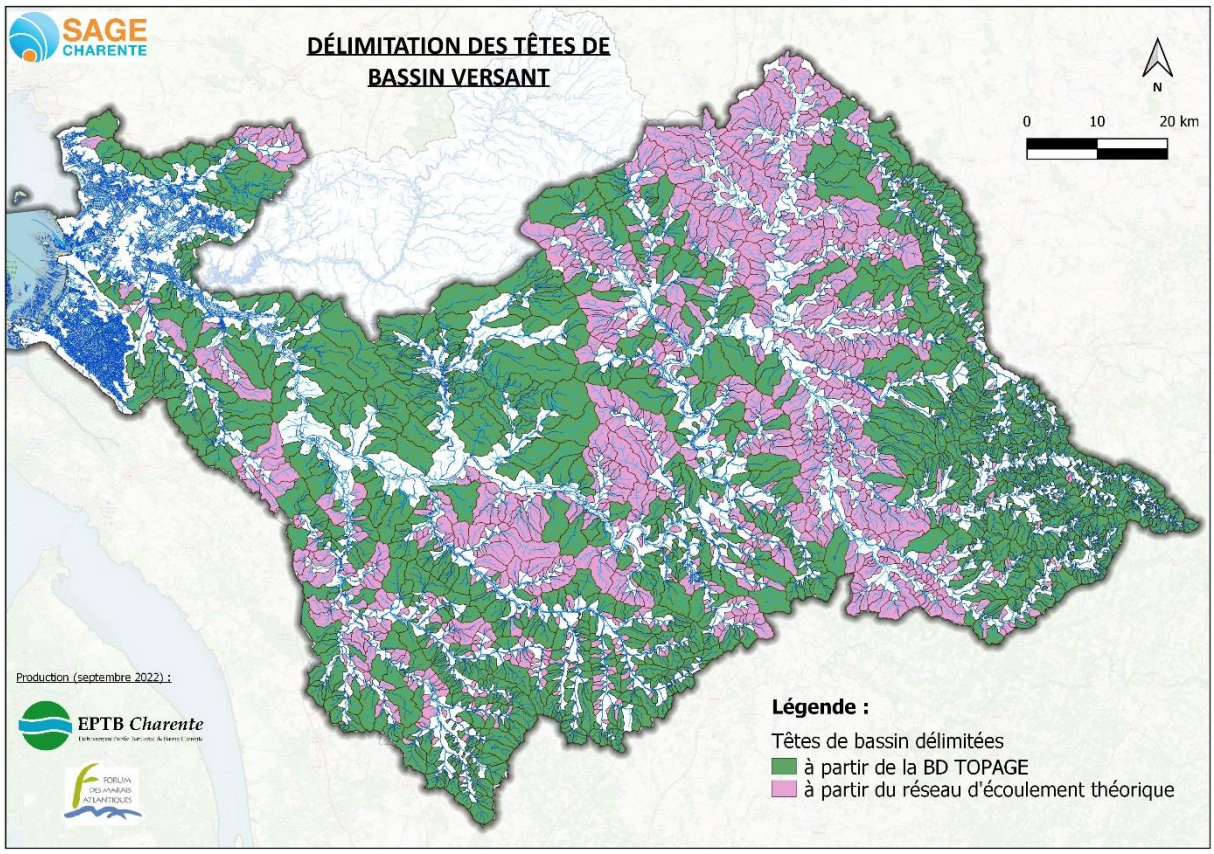
[3] Au niveau des zones karstiques (Karst de La Rochefoucauld, Péruse, Civraisien), la notion de tête de bassin atteint ses limites. La rareté des écoulements de surface rend peu précise la délimitation à partir de la BD TOPAGE (bassin versant entier identifié comme tête de bassin). Une telle délimitation, trop large, est peu utile pour la mise en place d'actions, il a donc été

choisi de conserver la sous-délimitation théorique. Elle permet également de cibler au mieux les pressions par une division plus précise du territoire. Pour des questions de clarté de la méthode seuls les bassins versants topographiques ont été utilisés. La prise en compte des circulations hydrogéologiques et souterraines est en effet inconnue ou trop complexe pour proposer un découpage.

[4] Certaines têtes de bassin ne correspondent donc pas à un cours d'eau pérenne, mais il s'agit malgré tout de combes sèches qui ont un rôle dans le fonctionnement hydro-écologique du milieu et des cours d'eau à l'aval. Il a donc été décidé de les conserver.

Les résultats de la délimitation donnent une superficie cumulée de têtes de bassin comprise entre 70 et 90% de la superficie totale du territoire d'étude, ce qui est pleinement cohérent avec la littérature scientifique.

FICHIERS SIG	TdBV_BVCharente.shp & TdBV_nomdusyndicat.shp
PRODUCTION	EPTB Charente et Forum des Marais Atlantiques, 2021-2022
EMPRISE GÉOGRAPHIQUE	Bassin versant de la Charente + périmètres des structures GEMAPI
GÉOMÉTRIE	Polygon (MultiPolygon)
PROJECTION	EPSG:2154 - RGF93 / Lambert-93



CRÉATION DE LA BASE DE DONNEES - Caractérisation et hiérarchisation des têtes de bassin

1. Caractérisation des têtes de bassins : contraintes dans le choix des indicateurs

Pour hiérarchiser les têtes de bassin, sont utilisées comme données :

- la pente moyenne et la forme du bassin versant : elles sont les caractéristiques physiques, intrinsèques, qui ne peuvent pas être modifiées par l'Homme mais qui rendent une tête de bassin plus ou moins vulnérable
- l'occupation du sol, la densité de haies, de zones humides et le taux de linéaire de cours d'eau impacté par un plan d'eau : ce sont les caractéristiques liées à la gestion du territoire par l'Homme qui induisent des pressions potentielles ou les atténuent

Le choix des indicateurs (voir tableaux ci-après) s'appuie sur la bibliographie scientifique, sur les méthodologies existantes et sur des échanges avec des experts (OFB Bretagne, FMA notamment). Le choix des indicateurs a également été contraint par la disponibilité de données à la fois homogènes et suffisamment précises pour travailler à l'échelle des têtes de bassin. Une étude statistique des corrélations inter-variables a également été réalisée afin de réduire la redondance au sein des indicateurs (voir Annexe II). Le diagnostic pourra être affiné et/ou complété localement avec des données plus précises et/ou supplémentaires.

Matrice physique / Vulnérabilité		
Indicateur		**Données utilisées**
Pente moyenne	Les fortes pentes sont considérées comme défavorables : elles déterminent la vitesse des écoulements (réaction du bassin à un évènement pluvieux et aux pollutions diffuses) et sa capacité d'infiltration	MNT (RGE 5m)
Coefficient de compacité de Gravélius	Dans un bassin allongé, la contribution de l'amont du bassin met plus de temps à arriver à l'aval que celle des petits tributaires, étalant ainsi le pic de crue. Un fort coefficient est donc considéré comme favorable.	Têtes de bassin délimitées $K_G = \frac{périmètre}{2\sqrt{\pi \times aire}}$
Densité de cours d'eau	Une forte densité de cours d'eau est ici considérée comme défavorable : plus la densité de cours d'eau est importante, plus il y a de chances de rencontrer des activités humaines susceptibles de le dégrader. **NB :** cet indicateur n'est pris en compte que lorsque la délimitation BD TOPAGE seule est considérée (SYMBA) : il n'est pas pertinent de considérer une densité de cours d'eau théorique	BD TOPAGE « tronçons hydrographiques »

<table>
<tr><th colspan="3">Pressions anthropiques / Gestion du territoire</th></tr>
<tr><th colspan="2">Indicateur</th><th>Données utilisées</th></tr>
<tr><td>Indicateur d'occupation du sol</td><td colspan="2">Fort coefficient = défavorable
<table><tr><th>classe</th><th>détail</th><th>coef.</th></tr><tr><td>Boisé</td><td>Forêts de feuillus et mixtes, landes ligneuses</td><td>0</td></tr><tr><td>Enherbé</td><td>Prairies permanentes ou temporaires, fourrages, landes et broussailles</td><td>0,3</td></tr><tr><td>Agricole</td><td>Grandes cultures, maraichage, arboriculture, vignes, forêts de conifères et peupleraies</td><td>0,6</td></tr><tr><td>Imperméable</td><td>Zones urbaines, voierie, surfaces en eau</td><td>1</td></tr></table>
$Indicateur\ OCS = \frac{(superficie\ boisée \times 0) + (superficie\ prairie \times 0{,}3) + (superficie\ agricole \times 0{,}6) + (superficie\ urbaine \times 1)}{superficie\ totale}$</td><td>Couche composite (© FMA, avec algorithme EPTB Sèvre Nantaise) : BD TOPO (IGN), OCS Theia 2017 (CNES-CESBIO) et RPG 2016

(voir Annexe II)</td></tr>
<tr><td>Densité de haies</td><td colspan="2">Une forte densité de haies est favorable (facteur d'atténuation des pressions) : ralentissement des écoulements, favorisation de l'infiltration, protection des sols, filtre d'éléments physico-chimiques, zone d'habitat, ombrage…</td><td>Dispositif National de Suivi des Bocages (IGN-OFB)</td></tr>
<tr><td>Densité de zones humides</td><td colspan="2">Une forte densité de zones humides est favorable (facteur d'atténuation des pressions) [4] : zones tampon contribuant à diminuer les pics hydrauliques, puits de carbone, filtres épurateurs, zones de stockage de l'eau en période humide et relargage en période sèche…</td><td>Pré-localisation EPTB Charente (2007, à l'échelle de l'ex-région Poitou-Charentes) + inventaire ZH du Limousin (Conservatoire Botanique National du Massif Central) pour le SYMBA-BT</td></tr>
<tr><td>Taux de cours d'eau impacté par un plan d'eau</td><td colspan="2">Un % important du linéaire impacté par un plan d'eau est défavorable : réchauffement de l'eau, stagnation défavorisant l'oxygénation, colmatage du substrat, rupture de continuité écologique… les plans d'eau déconnectés ont beaucoup moins d'effet sur les cours d'eau</td><td>Données plans d'eau : BD TOPO + données Theia</td></tr>
</table>

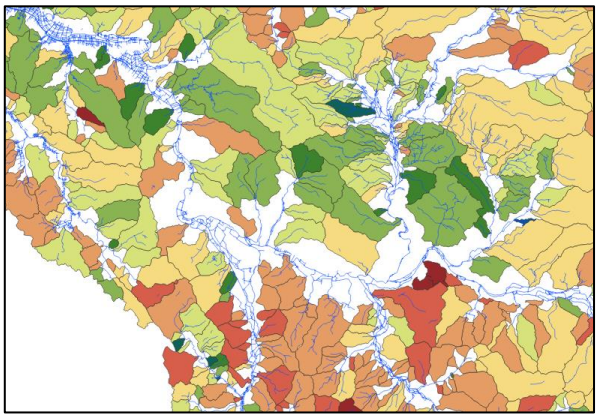
[4] Remarque sur l'indicateur « zones humides »:

En raison de l'absence d'inventaire global des zones humides à l'échelle du bassin Charente, la donnée utilisée pour cet indicateur est issue d'une carte de pré-localisation. Les secteurs qui se démarquent par leur forte densité de zone humides sont les zones très plates ou les zones de bas marais sur lesquels peuvent s'exercer des pressions (cultures, drainage…). Ils peuvent donc être largement altérés ou non fonctionnels et présenter un fort enjeu de restauration pour la ressource en eau en tête de bassin. C'est par exemple le cas de la vallée de l'Antenne. Par la résilience et la faculté d'auto-épuration des zones humides, il a été décidé de conserver cet indicateur comme un facteur d'atténuation des pressions mais de proposer une analyse complémentaire permettant de mettre en perspective le niveau probable de dégradation des ZH. La méthode présentée ici permet donc de faire ressortir les têtes de bassins où la densité de zone humides potentielles se confronte à une occupation du sol majoritairement agricole ou urbaine, ce qui laisse présager d'une dégradation de ces milieux.

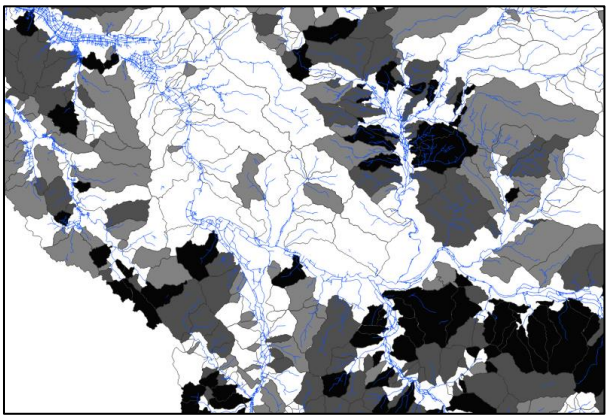
gid	Indicateurs (entre 0 et 1) *									% surfaces agricoles	% zones boisées	% prairies	% surfaces imperméables
	DEGRÉ D'EFFORT	VULNÉRABILITÉ	pente	compacité	PRESSIONS	densité de ZHP (pré-localisation EPTB, 2007)	densité de haies	impact des plans d'eau sur les cours d'eau	occupation du sol				
323	0,98	0,55	0,62	0,44	1,00	0,72	0,82	1,00	0,27	32,47	42,81	11,44	13,27
333	0,61	0,71	0,61	0,73	0,45	0,76	0,96	0,00	0,06	22,60	68,92	5,72	2,76
608	0,35	0,35	0,05	0,64	0,28	0,00 ⚠	0,66	0,00	0,43	65,35	6,86	24,36	3,42
663	0,56	0,38	0,03	0,72	0,54	0,25 ⚠	0,90	0,00	0,56	90,98	0,05	3,92	5,05
670	0,33	0,25	0,01	0,51	0,30	0,24 ⚠	0,45	0,00	0,57	90,83	1,07	1,80	6,29
792	0,44	0,09	0,05	0,17	0,53	0,30 ⚠	0,82	0,00	0,59	85,05	1,16	2,34	11,44
840	0,32	0,29	0,08	0,51	0,27	0,26	0,13	0,00	0,21	24,95	42,42	24,17	8,45
3471	0,82	0,65	0,35	0,89	0,75	1,00	0,39	0,00	0,59	84,89	0,52	3,67	10,91
3492	0,79	1,00	0,95	0,91	0,53	0,82	0,16	0,00	0,19	39,23	52,31	4,16	4,29
3556	0,62	0,80	0,77	0,74	0,41	0,77	0,15	0,00	0,00	8,72	76,60	10,42	4,26

Forte densité de zones humides potentielles mais occupation du sol essentiellement agricole → probable enjeu de restauration de la fonctionnalité des zones humides

Carte des pressions :



Niveau probable de dégradation des zones humides :



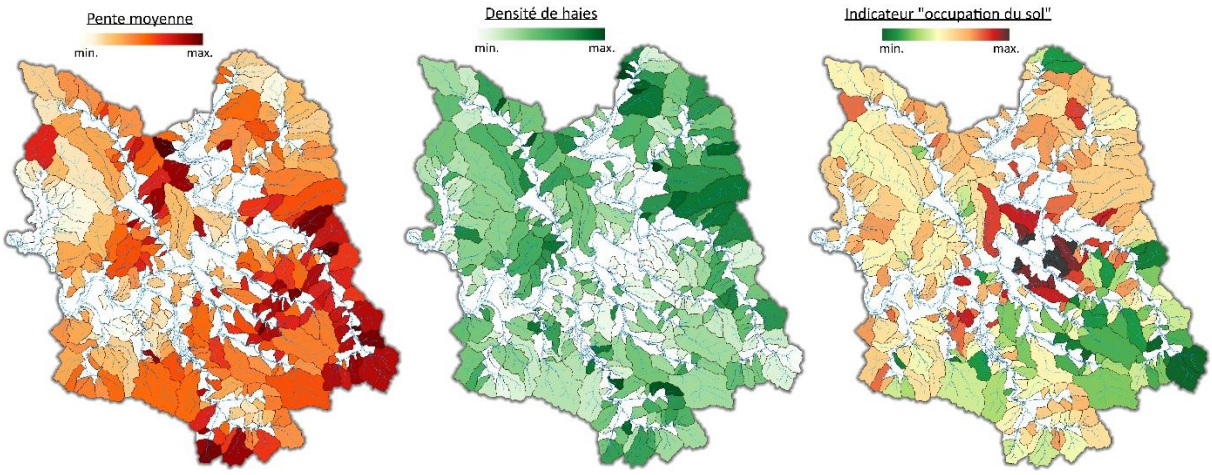
Niveau probable de dégradation des zones humides :		Densité de zones humides potentielles répartition des valeurs en 4 parts égales (quartiles)			
		min - Q1	Q1 - Q2	Q2 - Q3	Q3 - max
Superficie agricole et/ou urbanisée (% relatif à la superficie totale de la tête de bassin)	0 - 25%	1	1,5	2	2,5
	25 - 50%	1,5	2		
	50 - 75%	2	2,5	3	3,5
	75 - 100%	2,5	3	3,5	4

⚠ Les plus fortes densités de ZHP confrontées à une OCS majoritairement agricole et/ou urbaine

Cette remarque ne concerne pas le SYMBA-BT. La pré-localisation des zones humides ayant été réalisée à l'échelle de l'ex-région Poitou-Charentes, cette donnée n'était pas disponible sur le territoire du SYMBA-BT. Les données de l'inventaire des zones humides du Limousin, réalisé par le Conservatoire botanique national du Massif Central, ont été utilisées.

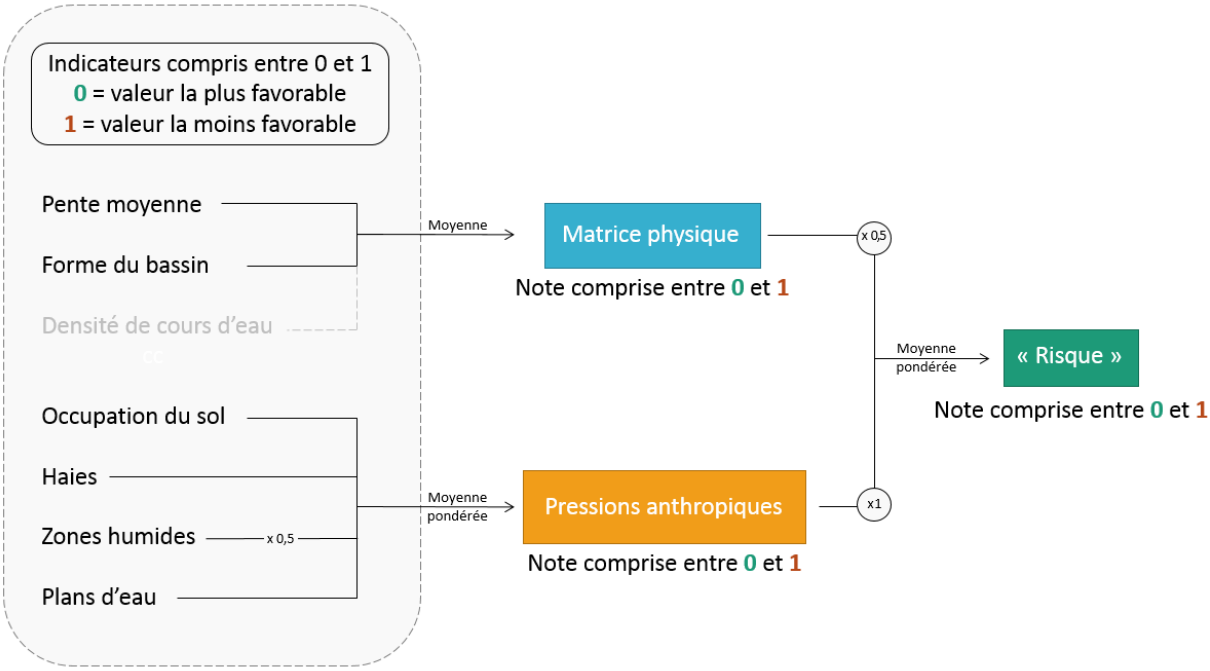
2. Méthode de hiérarchisation

Un premier niveau de hiérarchisation consiste à représenter les têtes de bassin selon la valeur de chaque indicateur, séparément, comme le montrent les exemples ci-dessous :



La hiérarchisation est réalisée à plusieurs échelles : à l'échelle du périmètre du SAGE, du bassin versant de la Charente et des périmètres de chaque syndicat. Le rang (et donc la couleur sur la carte) d'une tête de bassin peut donc changer en fonction des têtes de bassin auxquelles elle est comparée.

Les valeurs brutes de chaque indicateur sont bornées entre **0** et **1**, où 0 est toujours la **valeur la plus favorable** et 1 **la plus défavorable**, et les indicateurs sont alors croisés afin de calculer une note de « vulnérabilité » et une note de « pressions ». De la même manière, ces notes sont bornées entre 0 et 1 et le croisement vulnérabilité/pressions permet de calculer une note finale, appelée « risque » ici.



Plus l'on croise des données, plus l'interprétation des cartes est délicate. Toutes les précautions à considérer pour bien interpréter ces résultats sont détaillées plus amplement en partie II ci-après.

II - Précautions d'usage

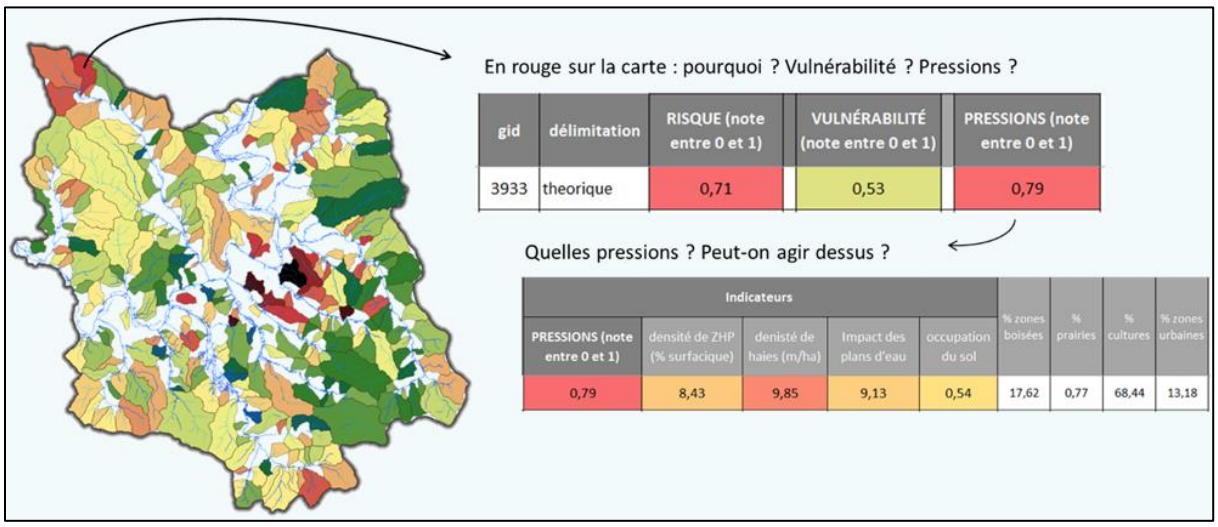
La suite du document vise à aider l'utilisateur à s'approprier les résultats, afin de bien interpréter les résultats, les utiliser à bon escient et ne pas commettre d'erreurs dans sa démarche. Il s'agit d'être conscient des limites de la méthode et du risque de confusion qu'elle peut engendrer.

✗ Ce que ce n'est pas	✓ Ce que c'est
Une **évaluation absolue** ou figée de l'état des têtes de bassin (pas de notion de seuil « bon ou mauvais »)	Une **évaluation relative** (hiérarchisation les unes par rapport aux autres)

La note obtenue par chaque tête de bassin pour chaque indicateur ne reflète pas un état mais reflète la situation de la tête de bassin par rapport aux autres têtes de bassin. Ainsi, une note de 0 ne signifie pas que la tête de bassin est en bon état, qu'elle n'est pas vulnérable et/ou ne subit aucune pression, mais bien qu'il s'agit de la tête de bassin la moins vulnérable et/ou celle qui subit le moins de pressions à l'échelle du syndicat considéré. Aussi, une note de 0 ne signifie pas qu'il n'y a rien à faire : si la tête de bassin subit *a priori* moins de pressions que les autres, il faut *a minima* la préserver.

✗ Ce que ce n'est pas	✓ Ce que c'est
Une carte **unique**	Un **ensemble** de cartes (indicateurs et notes issues du croisement de plusieurs indicateurs) à regarder individuellement

Les notes de vulnérabilité et de pressions (et *a fortiori* la note de risque) sont le croisement de plusieurs indicateurs. Leur caractère synthétique peut conduire à de mauvaises interprétation, il est donc indispensable de s'intéresser aussi au détail indicateur par indicateur afin de bien interpréter les résultats. Le **tableau de synthèse** (fichier Excel fourni en complément des couches SIG) permet de visualiser les résultats en détail : les couleurs représentent, pour chaque indicateur, la situation de la tête de bassin par rapport aux autres têtes de bassin.



✗ Ce que ce n'est pas	✓ Ce que c'est
Une méthode de diagnostic ou de priorisation des interventions sur les **cours d'eau** (≠ PPG)	Une hiérarchisation de **bassins versants** selon 6 indicateurs, complémentaire au PPG et qui peut être utilisée par d'autres acteurs souhaitant mettre en place des actions de restauration

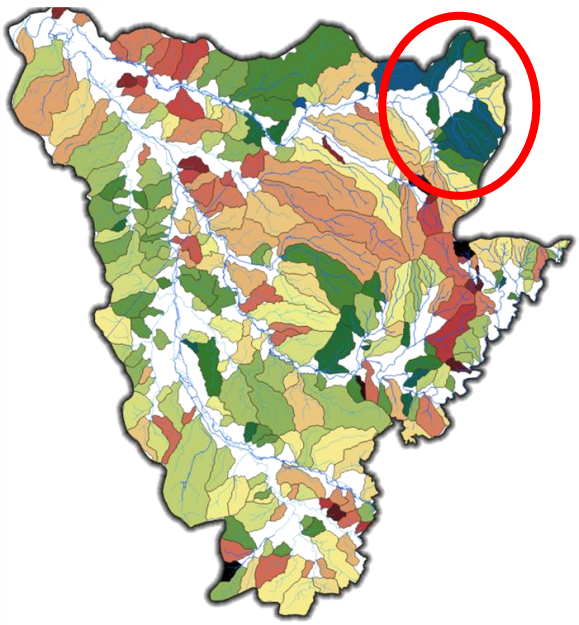
Par manque de données homogènes, aucun indicateur directement lié au lit mineur (état hydromorphologique, ripisylve…) n'a pu être pris en compte. Certaines zones de têtes de bassin versant peuvent ainsi apparaitre en vert tandis alors que les cours d'eau sont très dégradés, ou inversement. Ci-dessous un exemple sur le secteur du SyBTB. L'état des lieux du PPG montre que l'amont de la Bonnieure apparait comme dégradé du point de vue du recalibrage mais aussi d'autres critères (colmatage, fonctionnalité corridor biologique, maintien des berges…). La carte des pressions en tête de bassin, elle, fait ressortir l'amont de la Bonnieure en vert, notamment grâce à une occupation du sol majoritairement en prairie et une densité importante de haies. Le même constat peut être fait sur les secteurs aval, très plats donc considérés moins vulnérables et avec une forte densité de zones humides potentielles.

Il est donc indispensable de valoriser les données « cours d'eau », obtenues dans le cadre des diagnostics du PPG, et de les confronter au diagnostic « versants » pour éviter des erreurs d'interprétations. La connaissance des problématiques locales doit être et rester l'élément de fléchage des actions de restauration des cours d'eau dans les programmations pluri-annuelles. En aucun cas ce travail de hiérarchisation ne pourrait s'y substituer. A l'inverse il peut être utilisé en tant qu'aide à la décision pour choisir les sous-bassins versants sur lesquels des actions sur l'occupation du sol, les zones humides, les haies ou les plans d'eau peuvent être menées.

Marque de recalibrage (© PPG SyBTB)



Pressions en tête de bassin versant



✗ Ce que ce n'est pas	✓ Ce que c'est
Un outil **unique** et clé en main de caractérisation du territoire et de priorisation	L'**un** des éléments à prendre en compte pour caractériser et prioriser, un outil d'aide à la décision

Certains facteurs ne sont pas pris en compte dans la caractérisation des pressions : cette méthodologie permet un **diagnostic préliminaire qu'il est nécessaire d'affiner** en mobilisant d'autres données, ou d'autres diagnostics existants.

- Les caractéristiques relatives à la gestion des parcelles doivent être prises en compte. Les cultures sont considérées comme potentiellement plus impactantes en termes d'occupation du sol, mais il est nécessaire de tenir compte des pratiques agricoles (HVE, bio, 0 pesticides…). A l'inverse, les prairies et zones boisées sont considérées comme moins impactantes que les cultures mais peuvent s'avérer délétères si l'usage en local induit des dégradations sur le cours d'eau : colmatage du cours d'eau lié aux points d'abreuvement, dégradation des berges par les bovins quand absence de protection de berges, coupes rases, fermeture des milieux… Il est également possible de s'intéresser aux prélèvements ou aux cartographies des assecs.
- La densité de haies est prise en compte comme indicateur de pression, mais il faudrait idéalement prendre en considération l'efficacité de ces haies (nombre de strates de végétations, entretien, orientation par rapport à la pente…)
- Les problématiques liées à l'assainissement n'ont pas été prises en compte.
- Il est très difficile d'interpréter la pédologie et/ou géologie en termes de vulnérabilité (aspects contradictoires selon l'enjeu considéré) : il est préconisé de compléter le diagnostic en utilisant la pédologie, la géologie et l'hydrogéologie à partir de cartes spécifiques comme des données contextuelles.

✗ Ce que ce n'est pas	✓ Ce que c'est
un outil **évolutif**, de **suivi régulier** de l'état des têtes de bassin	Un diagnostic à un instant t, sur la base des données disponibles, qui **pourra éventuellement être mis à jour dans le futur** pour intégrer de nouvelles données

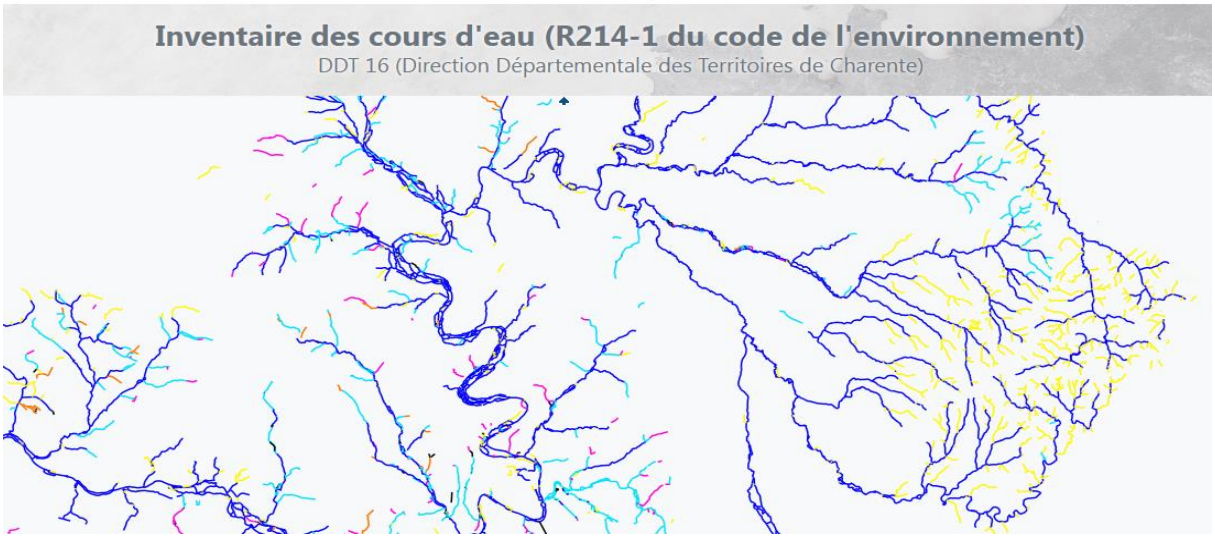
En dehors d'actions de grandes ampleur, et au vu des indicateurs et des données utilisés, les bénéfices des actions mises en place ressortiront peu sur les cartes synthétiques : il n'y a donc pas d'intérêt de réaliser cette caractérisation chaque année. Il sera en revanche possible de « mettre à jour » les résultats pour intégrer de nouvelles données : inventaires zones humides ou plans d'eau, relevés d'assecs... Cependant, cela ne sera possible qu'à condition que ces données soient disponibles de manière homogène *a minima* à l'échelle du syndicat. Ce travail pourrait être envisagé dans le cadre de la révision du SAGE.

III - Perspectives d'utilisation et de valorisation

1. Contribuer à l'amélioration des connaissances et à l'enrichissement des inventaires

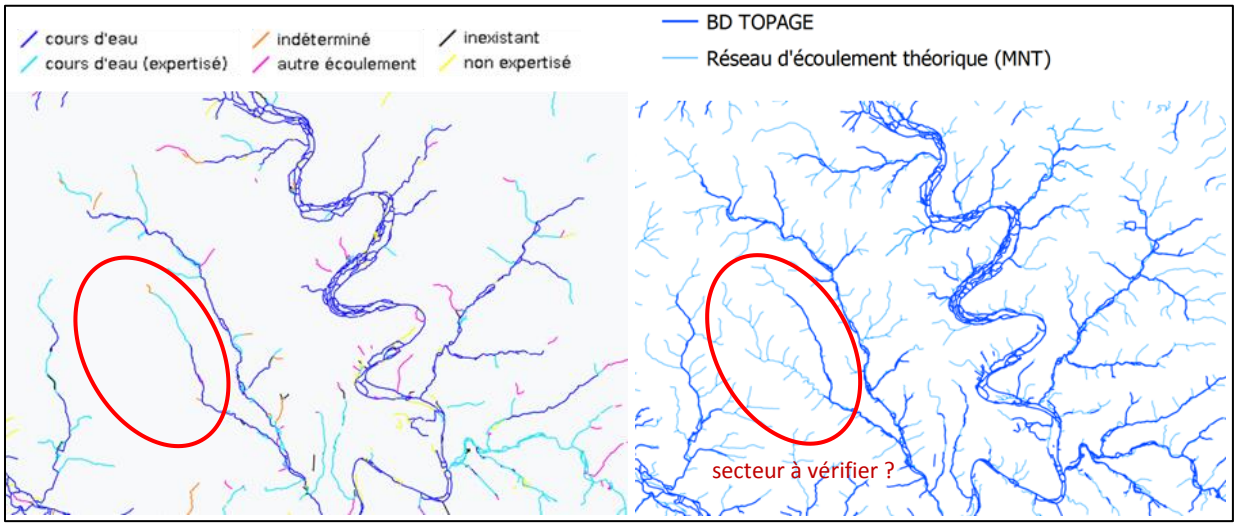
⇨ lien avec la disposition C28 du SAGE « Inventaire du réseau hydrographique »

Sur le bassin de la Charente, les cartes des cours d'eau « police de l'eau » sont encore en cours d'élaboration, car une partie du linéaire n'a pas encore été expertisée. C'est notamment le cas sur le secteur granitique (tronçons non expertisés en jaune sur la carte ci-dessous). De plus, les expertises sont réalisées sur la base de la BD TOPAGE, qui peut être lacunaire par endroits.



🔗 **Inventaire des cours d'eau - DDT 16**

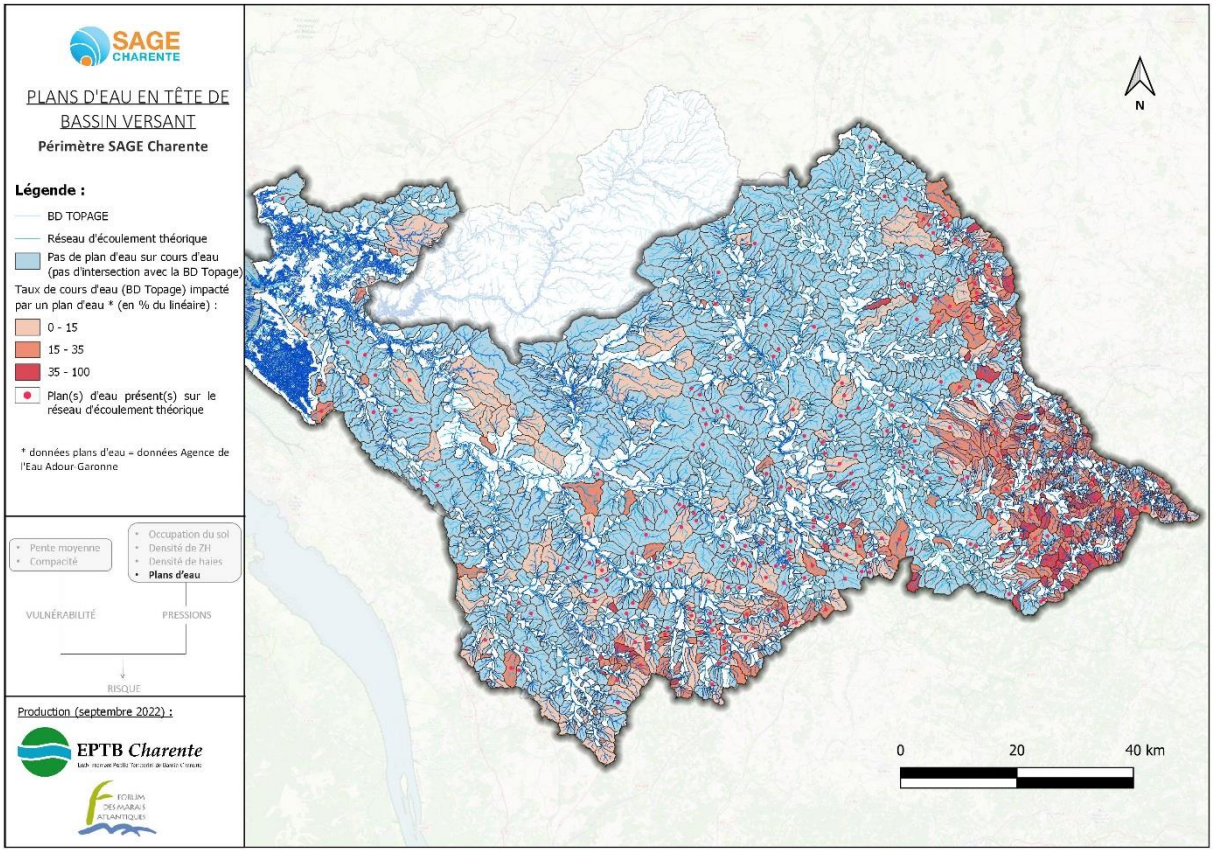
Dans le cadre de la démarche « têtes de bassin versant », les acteurs de terrain sont donc encouragés à bancariser et faire remonter aux services de l'État les données obtenues lors de vérifications terrain. Ces vérifications terrain peuvent s'appuyer sur le réseau d'écoulement théorique créé dans le cadre de cette étude, comme le montre l'exemple ci-dessous. Les critères législatifs actuels de définition des cours d'eau doivent ensuite être appliqués.



2. Hiérarchisations à l'échelle grand bassin

Pour rappel, la hiérarchisation des têtes de bassin est réalisée à plusieurs échelles : à l'échelle du périmètre du SAGE et à l'échelle du périmètre de chacun des syndicats. La hiérarchisation à l'échelle du bassin de la Charente peut être utile :

- Pour situer un sous-bassin à l'échelle globale, justifier l'intérêt d'une action sur un secteur
- Pour mettre en avant le fait que chaque territoire est soumis à des problématiques spécifiques. Exemple : la carte de l'indicateur « plan d'eau » à l'échelle grand bassin permet de mettre en avant l'importance de cette problématique sur le secteur granitique.



La hiérarchisation des têtes de bassin à l'échelle du périmètre du syndicat est plus utile d'un point de vue opérationnel. Elle peut être utilisée **de plusieurs manières.**

3. La hiérarchisation des têtes de bassin comme outil de priorisation

Différentes stratégies de priorisation pourront être adoptées. Il s'agit bien ici d'un **outil d'aide à la décision qui ne doit pas prévaloir sur les connaissances locales et sur les opportunités** qui peuvent se présenter en matière de restauration de milieux.

Le couple vulnérabilité/pressions traduit un "degré d'effort" et peut permettre d'orienter vers une stratégie de priorisation ou de gestion.

		PRESSIONS				
		0 - 0,2	0,2 - 0,4	0,4 - 0,6	0,6 - 0,8	0,8 - 1
SENSIBILITÉ	0 - 0,2	0,0	0,2	0,3	0,5	0,7
	0,2 - 0,4	0,1	0,3	0,4	0,6	0,8
	0,4 - 0,6	0,2	0,3	0,5	0,7	0,8
	0,6 - 0,8	0,3	0,4	0,6	0,8	0,9
	0,8 - 1	0,3	0,5	0,7	0,8	1,0

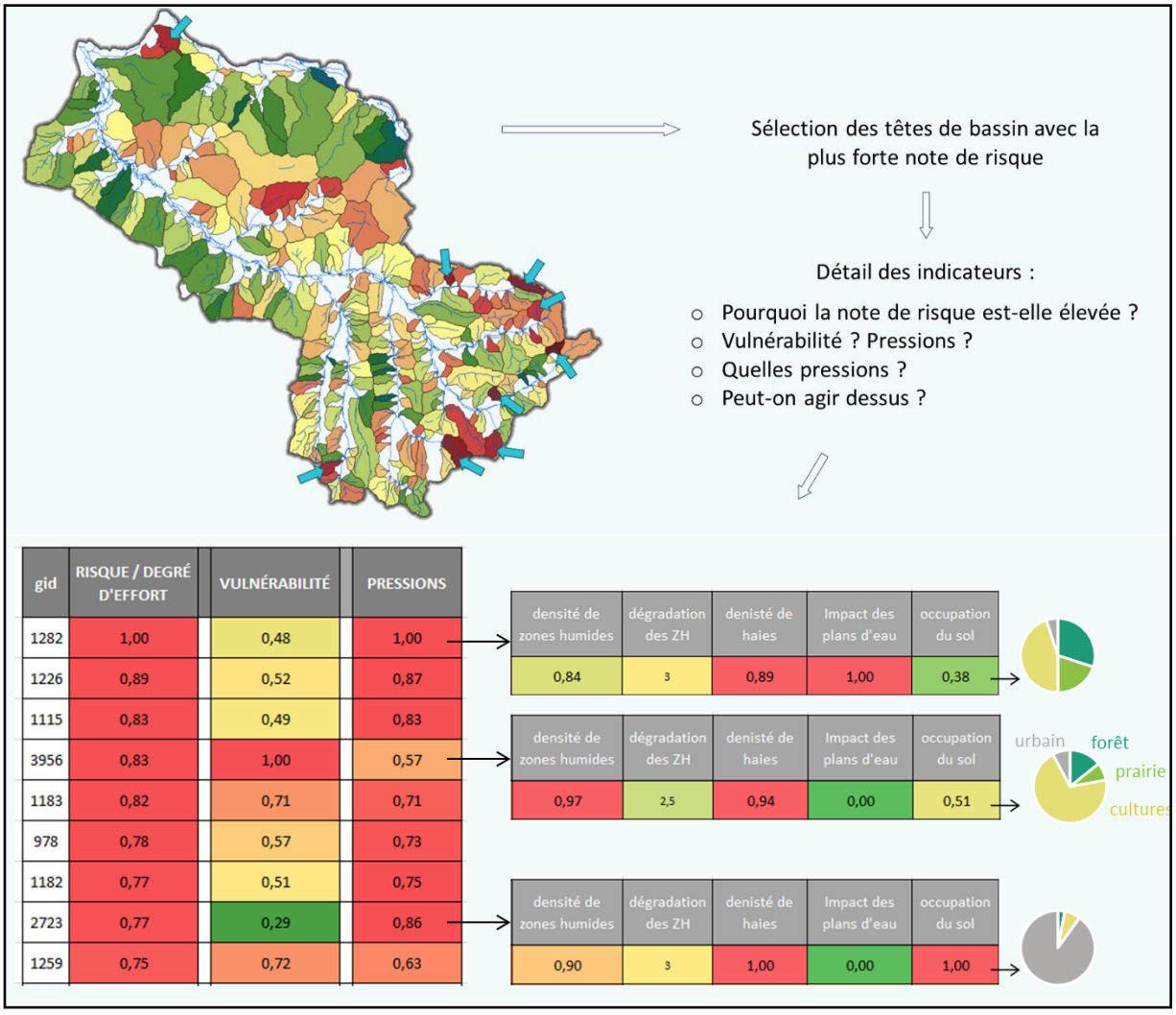
Fortes pressions mais bassin peu sensible : effort à fournir moins important

Pressions les plus fortes et sensibilité la plus forte : effort plus important à fournir

Pressions les plus faibles : stratégie de préservation (objectif de non détérioration)

Stratégie de diminution des pressions ou de leur impact sur le milieu

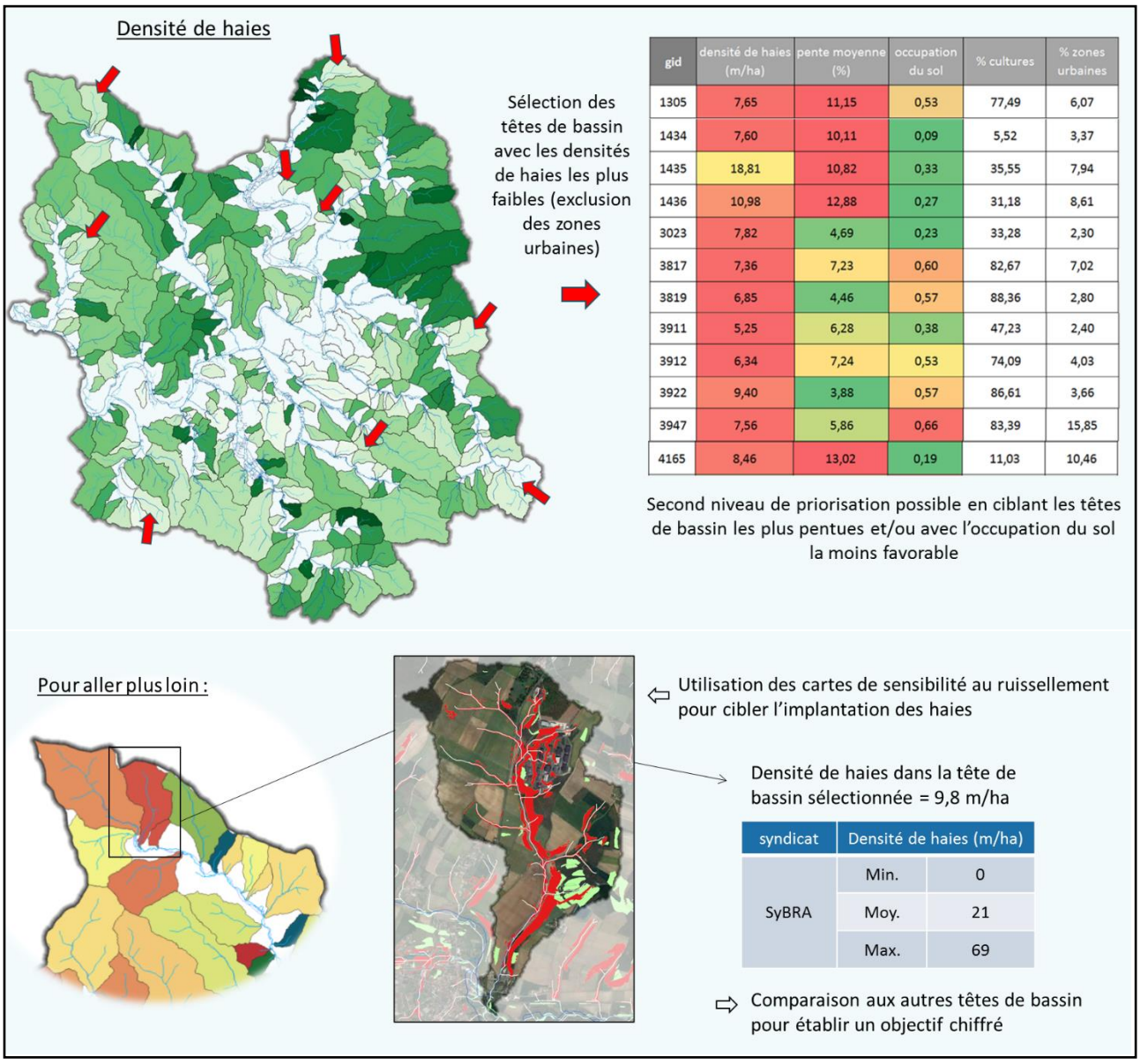
Ces notes sont cependant intégratrices de plusieurs indicateurs : elles permettent d'avoir une première idée du niveau de vulnérabilité et pressions que subit la tête de bassin mais peuvent masquer des informations. Il faudra s'intéresser au détail indicateur par indicateur pour interpréter ces notes.



Si l'on souhaite prioriser des zones pour la mise en place d'une action déjà définie, la hiérarchisation selon le ou les indicateur(s) associé(s) à cette action sera plus pertinente que la hiérarchisation selon les notes de vulnérabilité, de pressions ou de risque issues du croisement des indicateurs.

Par exemple, pour mettre en place des actions de plantation de haies, les indicateurs « densité de haies », « pente moyenne » ou encore « occupation du sol » peuvent être utilisés pour hiérarchiser les têtes de bassin versant. Les valeurs minimales et maximales de chaque indicateur, à l'échelle du syndicat ou du bassin de la Charente, peuvent également servir de référence pour fixer un objectif chiffré. Ces valeurs sont systématiquement indiquées sur les cartes.

Exemple : cibler des territoires pour la plantation de haies



gid	densité de haies (m/ha)	pente moyenne (%)	occupation du sol	% cultures	% zones urbaines
1305	7,65	11,15	0,53	77,49	6,07
1434	7,60	10,11	0,09	5,52	3,37
1435	18,81	10,82	0,33	35,55	7,94
1436	10,98	12,88	0,27	31,18	8,61
3023	7,82	4,69	0,23	33,28	2,30
3817	7,36	7,23	0,60	82,67	7,02
3819	6,85	4,46	0,57	88,36	2,80
3911	5,25	6,28	0,38	47,23	2,40
3912	6,34	7,24	0,53	74,09	4,03
3922	9,40	3,88	0,57	86,61	3,66
3947	7,56	5,86	0,66	83,39	15,85
4165	8,46	13,02	0,19	11,03	10,46

syndicat	Densité de haies (m/ha)	
SyBRA	Min.	0
	Moy.	21
	Max.	69

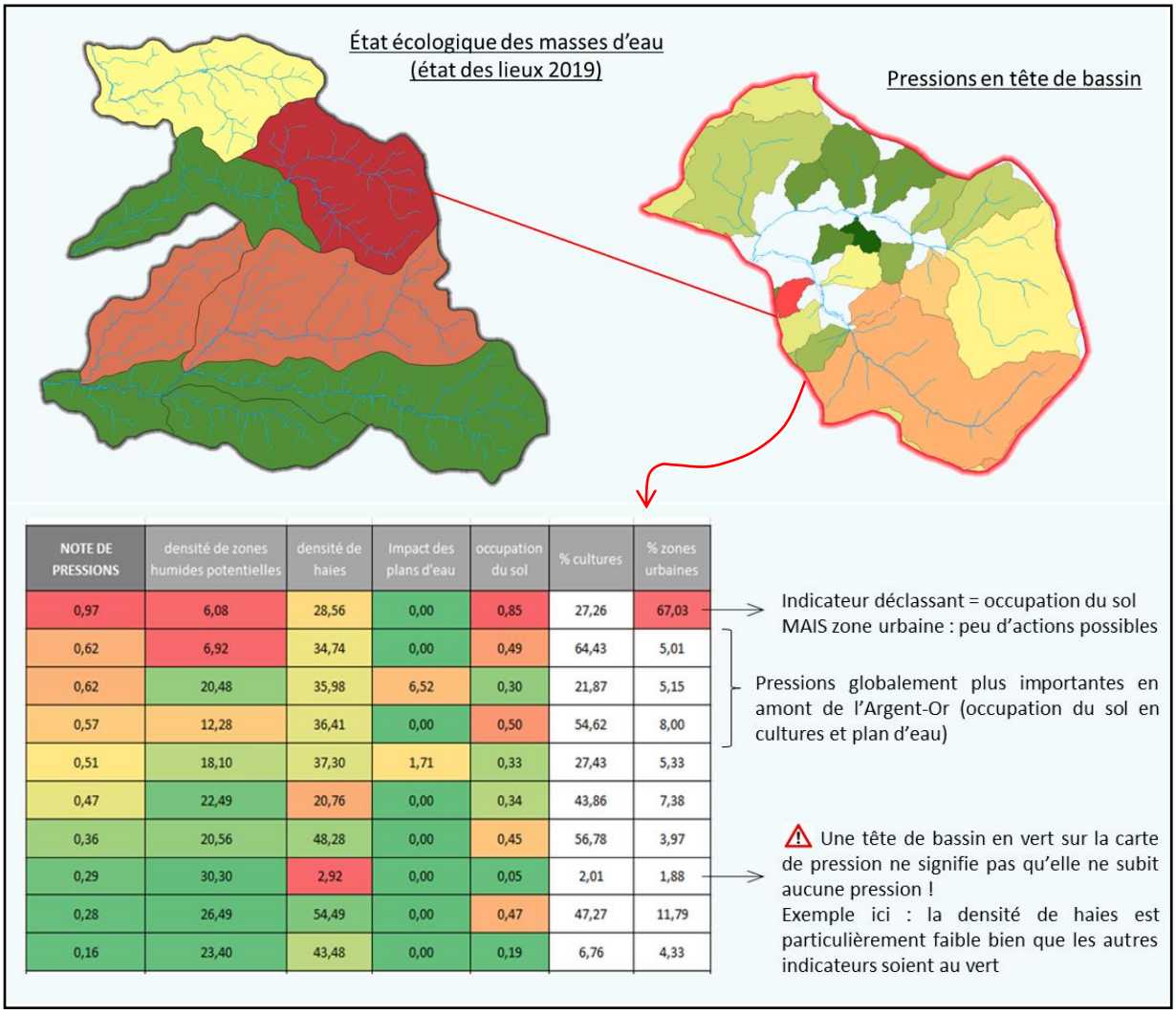
[Utilisation des cartes de sensibilité au ruissellement pour cibler l'implantation de haies]

4. Un outil de priorisation parmi d'autres

D'autres données peuvent être mobilisées pour prioriser : des données plus précises, à une échelle plus fine, des données de terrain ou bien au contraire des données plus globales.

Exemple : l'état des masses d'eau comme premier niveau de caractérisation/priorisation

La hiérarchisation des têtes de bassin peut être une première entrée pour mieux localiser les pressions au sein d'une masse d'eau et identifier des causes de dégradation. Pour prioriser, il est également possible de tenir compte du délai d'objectif d'atteinte du bon état de chaque masse d'eau.



NOTE DE PRESSIONS	densité de zones humides potentielles	densité de haies	Impact des plans d'eau	occupation du sol	% cultures	% zones urbaines
0,97	6,08	28,56	0,00	0,85	27,26	67,03
0,62	6,92	34,74	0,00	0,49	64,43	5,01
0,62	20,48	35,98	6,52	0,30	21,87	5,15
0,57	12,28	36,41	0,00	0,50	54,62	8,00
0,51	18,10	37,30	1,71	0,33	27,43	5,33
0,47	22,49	20,76	0,00	0,34	43,86	7,38
0,36	20,56	48,28	0,00	0,45	56,78	3,97
0,29	30,30	2,92	0,00	0,05	2,01	1,88
0,28	26,49	54,49	0,00	0,47	47,27	11,79
0,16	23,40	43,48	0,00	0,19	6,76	4,33

Indicateur déclassant = occupation du sol
MAIS zone urbaine : peu d'actions possibles

Pressions globalement plus importantes en amont de l'Argent-Or (occupation du sol en cultures et plan d'eau)

⚠ Une tête de bassin en vert sur la carte de pression ne signifie pas qu'elle ne subit aucune pression !
Exemple ici : la densité de haies est particulièrement faible bien que les autres indicateurs soient au vert

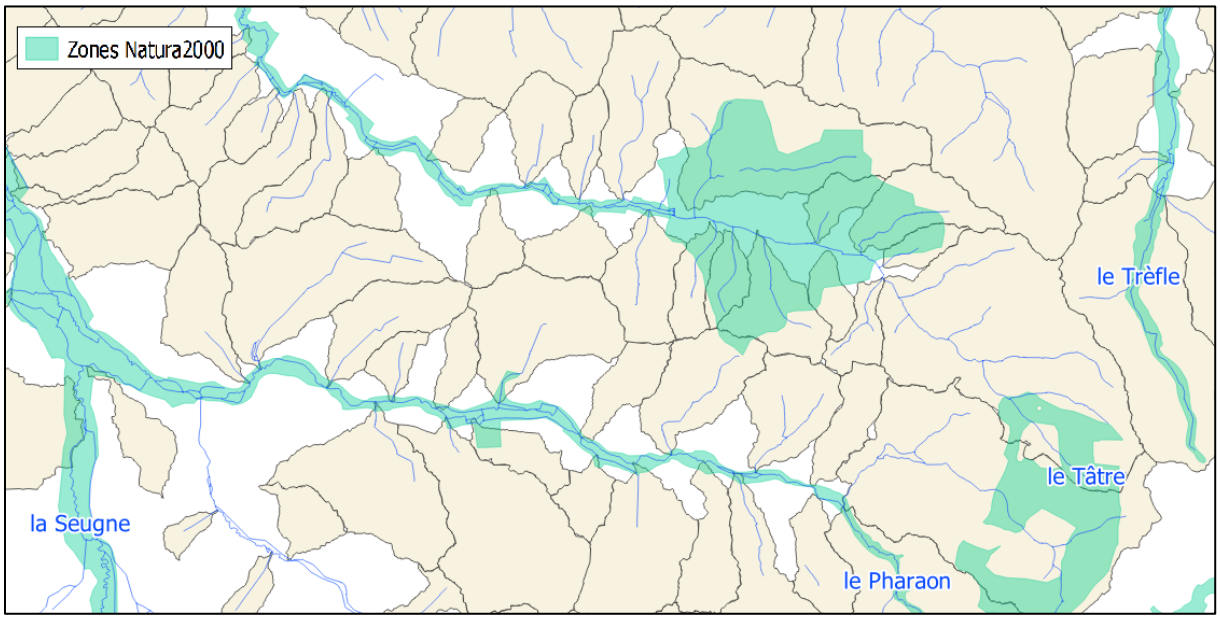
[État des lieux préparatoire à l'élaboration du SDAGE 2022-2027]

Il est également possible de prioriser des secteurs à enjeux.

- Pour une problématique pollution diffuse/qualité de l'eau, les têtes de bassin versant situées en amont d'un captage d'eau potable pourront être priorisées.
- Pour une problématique inondations, les cartes de zones inondables (Atlas des Zones Inondables, PPRI, étude de ralentissement dynamique…) ainsi que la localisation des zones habitées pourront être superposées à la délimitation des têtes de bassin.

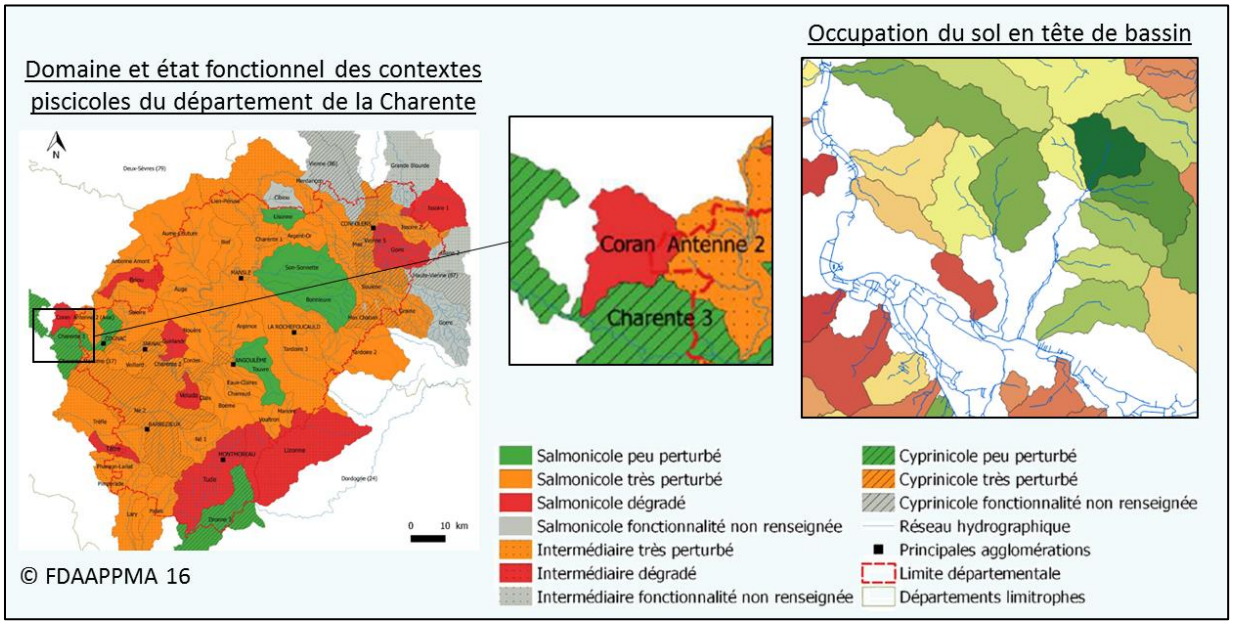
- En termes de préservation du patrimoine naturel, on pourra chercher à préserver ou améliorer l'état des têtes de bassin où des enjeux de biodiversité sont avérés (superposition de la délimitation des têtes de bassin versant aux zonages Natura 2000, ZNIEFF, Arrêtés de Protection de Biotope…)

Exemple : couplage de la délimitation des têtes de bassin avec des zones à enjeux environnementaux

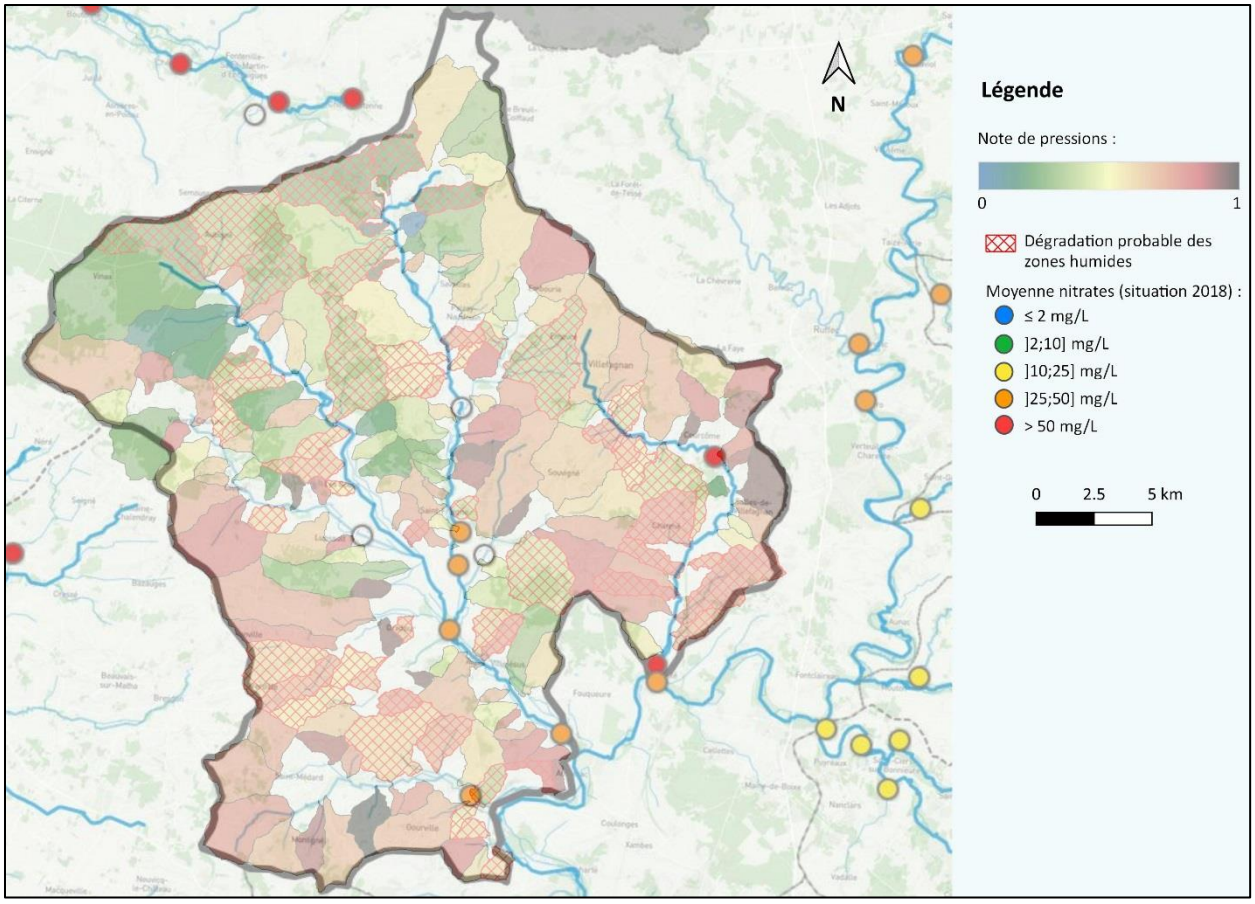


Exemple : couplage avec le diagnostic du Plan Départemental pour la Protection du milieu aquatique et la Gestion des ressources piscicoles (PDPG)

Il est également intéressant de valoriser les diagnostics de l'état des peuplements piscicoles réalisés par les fédérations de pêche. L'exemple ci-dessous montre que le diagnostic versants est plutôt bon sur le Coran, or il apparait comme dégradé d'un point de vue fonctionnel. Il est donc essentiel de coupler au diagnostic « têtes de bassin versant » un diagnostic « cours d'eau ».



Exemple : couplage avec des données qualité



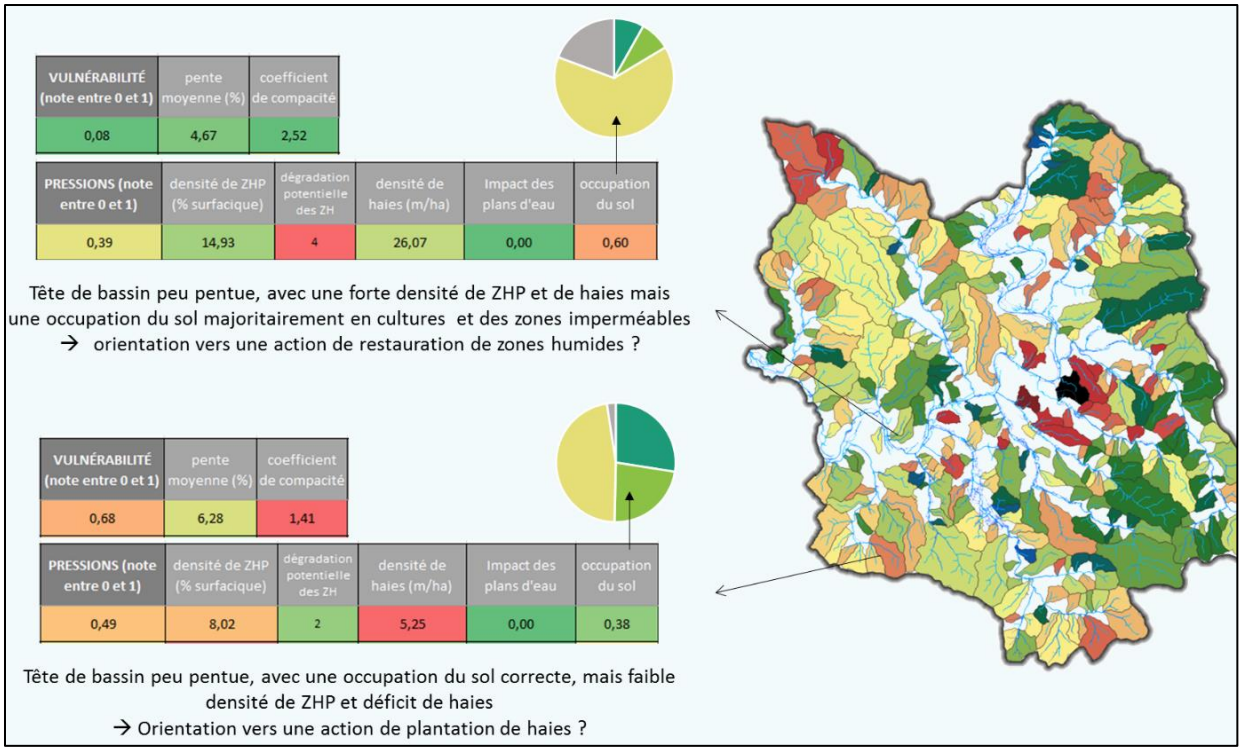
Plateforme e-qualité

5. Un outil de diagnostic préliminaire, qui permet d'orienter la stratégie d'action

La hiérarchisation ne pourra pas toujours être utilisée comme un outil de priorisation, dans la mesure où la sélection du secteur d'action se fait beaucoup à l'opportunité, avec des riverains volontaires. Dans ce contexte, l'outil peut davantage être vu comme un outil de diagnostic préliminaire d'un territoire.

Les indicateurs issus des données cartographiques permettent d'avoir un premier regard sur l'état de la tête de bassin et les pressions auxquelles elle peut être soumise. Les cartographies constituent un premier niveau d'information, dans l'idée d'un support à un éventuel diagnostic terrain. La hiérarchisation permet de placer la tête de bassin dans le contexte du territoire, d'orienter vers des actions ou de justifier la nécessité de mise en place de ces actions, en identifiant quel est l'indicateur « le plus déclassant » dans la caractérisation des pressions.

Exemple : diagnostic préliminaire des têtes de bassin versant et orientation vers des actions



6. Sensibiliser sur le chemin de l'eau et l'enjeu de solidarité amont-aval

Le réseau d'écoulement théorique et la délimitation des têtes de bassin versant peuvent constituer des outils intéressants pour communiquer sur le « chemin de l'eau », l'importance des petits chevelus à l'amont des réseaux hydrographiques et leur contribution pour l'aval. Les têtes de bassin versant représentent symboliquement l'enjeu de solidarité amont-aval et il peut être intéressant de chercher à valoriser l'attachement patrimonial du grand public aux zones de sources.

Ces espaces sont globalement méconnus. Si tant est que les cours d'eau de tête de bassin versant soient correctement indiqués sur les cartes, leur état est rarement évalué. A l'avenir, il est nécessaire de continuer à accumuler de la connaissance sur ces zones, de considérer davantage leur rôle et d'étendre la gestion des cours d'eau à la surface qu'ils drainent.

Conclusion

Le travail présenté ici est le résultat de réflexions entamées en avril 2021 dans le cadre de la mise en œuvre de la disposition C27 du SAGE Charente. Il a fait l'objet d'un sujet de stage de 6 mois à l'EPTB Charente, puis d'un recrutement.

La première difficulté rencontrée a été de définir la notion de « tête de bassin ». Elle a été précisée grâce à des recherches bibliographiques importantes et des échanges avec des experts référents. L'hétérogénéité du territoire a également été un challenge à surmonter dans l'élaboration de la méthodologie de délimitation et de caractérisation ; la grande superficie du territoire d'étude a nécessité de s'adapter à des contextes géologiques et hydrographiques très variés, tout en intégrant des contraintes de faible disponibilité de données à la fois précises et homogènes à grande échelle… Les choix méthodologiques effectués sont le fruit de nombreux échanges et ont tous été pleinement justifiés. Il est néanmoins important d'être conscient des limites de la méthode et d'en tenir compte, de même qu'il est possible qu'elle ne corresponde pas pleinement à des cas particuliers sur d'autres territoires.

A l'issue du travail de cartographie, il ne s'agissait pas simplement de définir un « panel d'actions » (déjà connu des acteurs de terrain) mais davantage de proposer des préconisations pour valoriser la délimitation et la caractérisation des têtes de bassin versant dans le but d'initier la mise en place de ces actions. Ce guide en fait état.

L'outil a essentiellement été élaboré avec et pour les structures GEMAPI, mais il a également un potentiel intéressant pour d'autres acteurs. En effet, dans la mesure où la marge de manœuvre des structures GEMAPI peut être limitée, notamment sur les actions touchant les versants (hors lit mineur des cours d'eau), élargir les destinataires de l'outil est tout à fait envisageable à condition de présenter les cartes adaptées ainsi que les explications nécessaires pour bien les interpréter. Certains acteurs locaux pourraient ainsi se servir de cet outil « têtes de bassins » comme appui dans la mise en œuvre de leurs programmes et études :

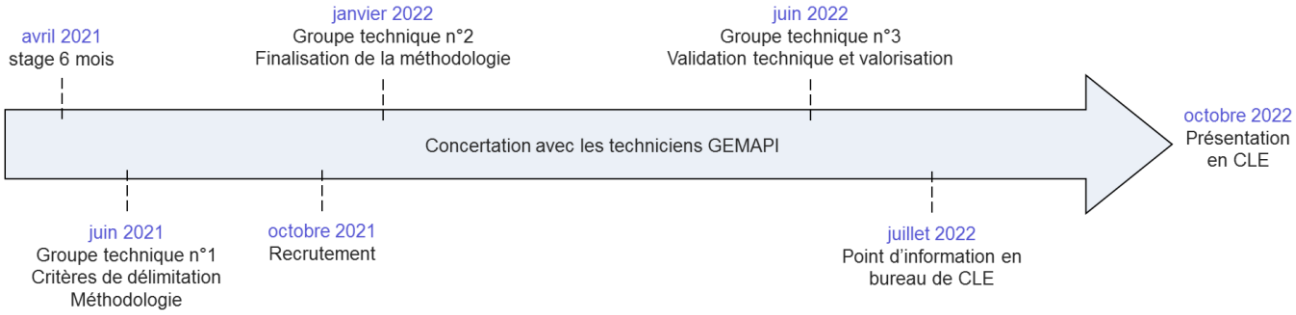
- Maisons de Cognac (exemple : projet plantation de haies Hennessy)
- EPCI : Grand Angoulême : étude pour désimperméabiliser la ville ?
- Communes : projets de plantation de haies à budget participatif, risque inondation
- Public (sensibilisation)
- Aires de captage (programme Re-Sources)

Nous tenons à remercier l'ensemble des personnes qui ont contribué à ce travail : les techniciens et techniciennes GEMAPI du bassin de la Charente qui nous ont accordé leur temps et partagé leurs connaissances du terrain ; Fabien BLANCHET (Forum des Marais Atlantiques) pour son travail ; Anthony COUDART, Mickaël LE BIHAN (OFB Bretagne) ainsi que l'EPTB Sèvre Nantaise pour leurs précieux conseils.

Contacts :
amelie.jugniot@fleuve-charente.net
marc-antoine.colleu@fleuve-charente.net
denis.rousset@fleuve-charente.net

ANNEXE I – Déroulé de la démarche

Calendrier de la démarche :



Composition du groupe de travail :

- Agence de l'Eau Adour-Garonne,
- Région Nouvelle-Aquitaine,
- CD16,
- CD17,
- DDTM17,
- DREAL,
- Charente Eaux,
- Forum des Marais Atlantiques,
- structures GEMAPI :
    - CdC du Civraisien en Poitou,
    - SBAISS,
    - SBVNé,
    - SMABACAB,
    - SMACA,
    - SMCA,
    - SMCNDP,
    - SyBRA,
    - SyBTB,
    - SYMBA,
    - SYMBA-BT,
    - SYMBAS,
    - SYMBO,
- PNR du Périgord-Limousin
- Office Français de la Biodiversité

ANNEXE II – Analyse de corrélation des variables pour épurer la liste d'indicateurs

Le choix des indicateurs a largement été influencé par la disponibilité des données nécessaires pour les calculer et l'importance d'une homogénéité de la méthode à l'échelle du SAGE Charente. Les indicateurs sélectionnés doivent aussi être scientifiquement pertinents pour l'évaluation de la vulnérabilité et des pressions, ne pas être redondants ni contradictoires.

Le travail présenté ici s'appuie sur la liste d'indicateurs élaborée par le Syndicat Loire Aval (SYLOA) et reprise par l'EPTB Sèvre Nantaise. Cette liste a été largement remaniée : l'analyse critique des indicateurs était en effet considérée comme l'une des pistes majeures pour l'amélioration de la méthode de caractérisation.

Liste initiale d'indicateurs	
Indicateurs de vulnérabilité	**Indicateurs de pression**
- Superficie de la TdBV - Pente moyenne de la TdBV - Pente moyenne du chemin le plus long - Indice de compacité de Gravélius - Temps de concentration des pluies - Densité de cours d'eau - Densité de points bas - Position de la TdBV dans le réseau hydrographique	- Densité surfacique de zones humides - Densité de zones humides connectées au cours d'eau - Densité de haies - Densité de haies efficaces - Taux de cours d'eau avec ripisylve - Densité surfacique de plans d'eau - Densité surfacique de mares - Densité de mares dans la bande riveraine - Occupation du sol de la TdBV - Occupation du sol de la bande riveraine - Taux d'imperméabilisation de la TdBV - Taux d'imperméabilisation de la bande riveraine - Taux de cours d'eau impactés par un plan d'eau - Densité de prélèvement

Une étude des corrélations inter-critères a été réalisée. L'objectif de cette étude était d'identifier de potentielles redondances ou contradictions au sein des indicateurs.

Le calcul d'une matrice de corrélation permet d'examiner les éventuelles corrélations entre plusieurs variables. Le coefficient de corrélation entre deux variables est compris entre -1 et +1. Plus la valeur absolue du coefficient est importante, plus la corrélation entre les variables est forte. Le signe du coefficient, lui, indique si la corrélation est positive ou négative, c'est-à-dire si les deux variables évoluent dans le même sens. Le coefficient de corrélation de Pearson mesure une dépendance linéaire entre deux variables. Il est cependant très sensible aux valeurs de données extrêmes. De plus, la corrélation entre deux variables n'est pas forcément linéaire. Les méthodes de corrélation de Kendall et Spearman sont des tests de corrélation non-paramétriques et basées sur le rang. D'autres relations sont possibles (non monotones). Il est donc parfois judicieux de rechercher des corrélations de manière graphique, en observant le nuage de points. Il est enfin nécessaire de vérifier que la corrélation entre les variables est statistiquement significative en calculant la valeur de probabilité p (p-value). Pour étudier la corrélation en plusieurs variables, il est également possible de réaliser une Analyse en Composante Principales (ACP).

Les indicateurs de vulnérabilité et de pression ont été calculés manuellement, à l'aide de QGIS et Excel, pour chacune des têtes de bassin délimitées sur 4 secteurs tests. On dispose donc de 184 observations de 18 variables (7 indicateurs de vulnérabilité et 11 indicateurs de pression). Les variables de vulnérabilité et les variables de pressions ont été étudiées séparément. Les analyses ont été réalisées sous RStudio.

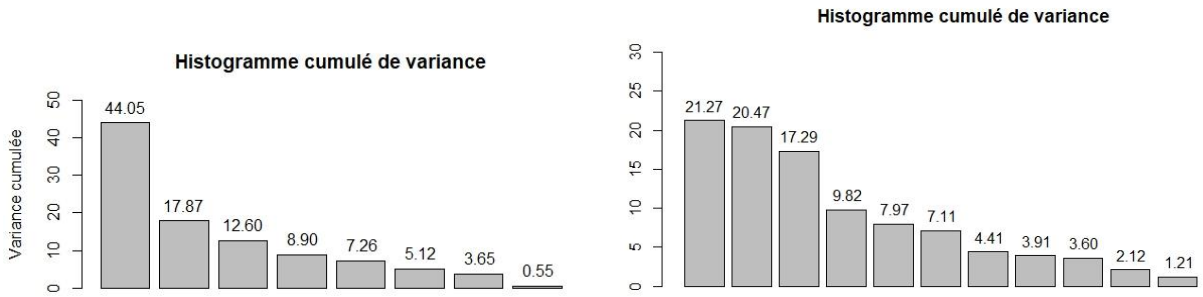


Figure 1 - Histogramme cumulé de variance pour les variables de vulnérabilité (gauche) et de pression (droite)

Pour les variables de vulnérabilité, les deux premiers axes de l'ACP représentent environ 62% de la variance, contre 42% seulement pour les variables de pression. La liste des indicateurs de vulnérabilité doit donc être revue de manière plus urgente, car il y a d'avantage de corrélations.

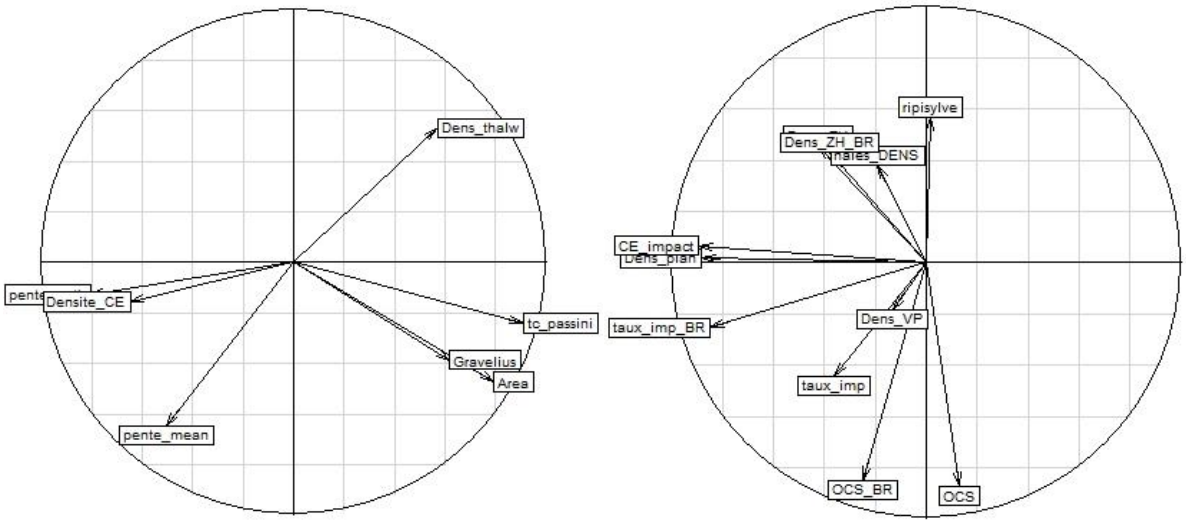


Figure 2 - Cercle de corrélation entre les variables de vulnérabilité (gauche) et de pression (droite)

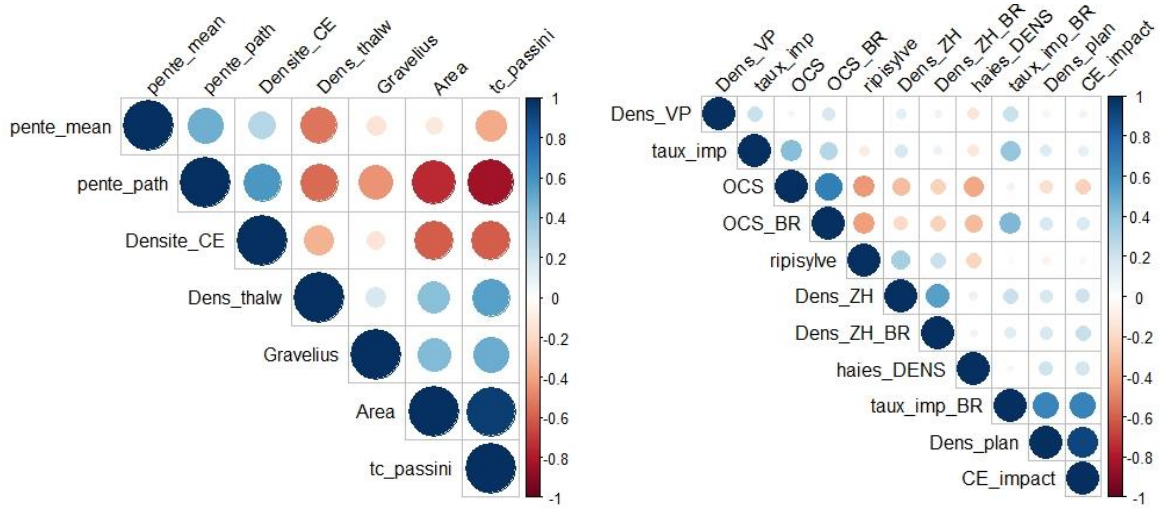


Figure 3 - Matrice de corrélation non linéaire (méthode de Spearman) entre les variables de vulnérabilité (gauche) et de pression (droite)

Indicateurs de vulnérabilité (méthode EPTB Sèvre Nantaise)		Justification
Superficie de la TdBV	×	Redondant (corrélé avec la pente, la densité de cours d'eau...) et pas pertinent : la superficie d'une tête de bassin ne la rend pas plus vulnérable. Grande aire de réception des précipitations favorable en été (alimentation des cours d'eau) mais défavorable en hiver (plus gros débits). Littérature scientifique mitigée : Hirsch (1962) conclut à l'absence de lien direct entre débit et superficie du BV, tandis que Faye (2014) ou Gregory & Walling (1973) ont montré l'inverse. D'après Faye (2014), les variables de superficie, de périmètre et de compacité sont généralement fortement liées entre elles.
Pente moyenne de la TdBV	✓	La topographie est la caractéristique la plus importante du BV : elle détermine la vitesse d'écoulement de l'eau (réaction du bassin à un évènement pluvieux et aux pollutions diffuses) et sa capacité d'infiltration.
Pente moyenne du chemin le plus long	×	Redondant, on conserve plutôt la pente moyenne car la démarche TdBV est davantage liée aux versants
Indice de compacité de Gravélius	✓	D'après Biswas et al. (1999), l'analyse morphométrique est une démarche importante pour la hiérarchisation des BV. D'après Faye (2014), le coefficient de compacité de Gravélius est l'un des paramètres principaux permettant de caractériser la géomorphologie d'un BV. D'après Gregory et Walling (1973) ou Reddy et al. (2004), le facteur de forme possède effectivement une relation directe avec le débit de pointe à l'exutoire du bassin.
Temps de concentration des pluies	×	Estimé à partir de la superficie et de la pente : redondance (corrélation des variables) + limite de l'estimation (dépend en réalité de l'aménagement du BV) + n'est pas constant et varie selon la durée et l'intensité de la pluie
Densité de cours d'eau	✓	Dans la méthode EPTB Sèvre Nantaise, la densité de cours d'eau est considérée comme un critère favorable (surface de connexion eau-sédiments importante → capacité d'auto-épuration). Selon Mikaël Le Bihan, cela est vrai en théorie, mais la fonctionnalité du cours d'eau est liée sa bonne gestion. Plus la densité de cours d'eau est importante plus elle a de chances de rencontrer des activités humaines susceptibles de la dégrader. On considérera donc ici la densité de cours d'eau comme un critère défavorable.
Densité de points bas	×	Redondant (corrélé avec la pente, la superficie et le temps de concentration)
Position de la TdBV dans le réseau hydrographique	×	Pas pertinent : une éventuelle pollution apicale sera certes moins diluée mais aura également plus de temps pour s'auto-épurer avant d'atteindre les enjeux à l'aval. De plus, les zones les plus apicales sont souvent des zones à bosquet, avec plus de relief, qui ont été préservées des activités humaines, contrairement aux têtes de bassin situées le long du drain principal qui ont été traitées comme le reste de la plaine et sont donc potentiellement plus dégradées.

Indicateurs de pression (méthode EPTB Sèvre Nantaise)		Justification
Densité surfacique de zones humides (pré-localisation)	✓	Zones humides = zones tampon contribuant à diminuer les pics hydrauliques, puits de carbone, filtres épurateurs, zones de stockage de l'eau en période humide et de relargage en période sèche… Les 2 informations sont importantes mais une seule est nécessaire dans la hiérarchisation
Densité de ZH dans la bande riveraine	×	
Densité de haies	✓	Ralentissement des écoulements, favorisation de l'infiltration, protection des sols, filtre d'éléments physico-chimiques, zone d'habitat, ombrage…
Densité de haies efficaces	×	Comment définir une haie efficace ? Orientation par rapport à la pente, continuité… paramètre incertain donc exclu
Densité surfacique de plans d'eau	×	Réchauffement de l'eau, stagnation défavorisant l'oxygénation, colmatage du substrat, rupture de continuité écologique… Les deux critères sont corrélés mais les plans d'eau déconnectés on beaucoup moins d'effet sur les cours d'eau.
Taux de cours d'eau impactés par un plan d'eau	✓	
Densité surfacique de mares	×	La distinction mares / plans d'eau est complexe. Le seuil réglementaire de 1000m² est trop grand : en tête de bassin, les mares devraient faire quelques dizaines de m² voire moins. Les données sont donc celles des plans d'eau et ne sont pas suffisamment précises pour recenser les mares (aucune entité n'est inférieure à 1000m²).
Densité de mares dans la bande riveraine	×	
Occupation du sol de la TdBV	✓	Méthode de calcul de l'indicateur simplifiée, 4 classes : milieux forestiers (pondération 0) ; surfaces enherbées (0,3) ; cultures et forêts de conifères (0,6) ; zones urbaines (1).
Occupation du sol de la bande riveraine	?	Le Corine Land Cover et la BD TOPO « Végétation » ne sont pas assez précises pour caractériser la ripisylve, et le RPG ne contient pas les zones boisées. Cet indicateur sera soit écarté soit remplacé par un autre indicateur, mieux adapté aux données : par exemple taux de cultures en bande riveraine (% de recouvrement de la bande riveraine par le RPG)
Taux d'imperméabilisation de la TdBV	×	Redondants avec les indicateurs d'occupation du sol
Taux d'imp. de la bande riveraine	×	
Taux de cours d'eau avec ripisylve	×	
Densité de prélèvement	×	Les données de la BNPE ne sont pas assez précises. Seuls les très gros prélèvements sont identifiés. De plus, des grosses approximations sont faites si dans la couche SIG les points sont localisés au niveau du siège d'exploitation (barycentre des communes) plutôt qu'au point réel de prélèvement.

Des réflexions sur la nécessité d'ajouter aux critères de vulnérabilité un indicateur lié à la géologie ou à la pédologie ont été menées. Il est très difficile d'interpréter la nature d'un sol en termes de vulnérabilité, car de nombreux aspects sont contradictoires. Une forte perméabilité, et donc une capacité d'infiltration rapide (par exemple un sol sableux, grossier, caillouteux), sera bénéfique pour l'aspect quantitatif (recharge) mais ne le sera pas pour le stockage de l'eau (réserve utile pour les plantes, formation de zones humides) ou pour le pouvoir protecteur du sol face à une pollution accidentelle (retard de la diffusion dans l'espace et le temps). La présence d'argile augmente le pouvoir tampon du sol face à de potentielles pollutions ou une acidification du sol, mais elle implique aussi un risque de retrait/gonflement, de matières en suspension, de la formation d'une croute de battance sur sol cultivé… Plusieurs travaux ont été réalisés en cartographie multi-critères, par exemple pour évaluer la vulnérabilité de la ressource en eau des milieux karstiques (méthodes EPIK, DRASTIC ou PaPRIKa développées par le BRGM). Ces études démontrent clairement la difficulté de hiérarchiser les paramètres permettant d'aboutir à une cartographie de vulnérabilité. Les rapports du BRGM indiquent également que la seule information d'une carte géologique ou pédologique n'est pas suffisante et doit être complétée par des visites de terrain, car « il n'est pas rare que la description lithologique d'une formation soit trop générale et ne détaille pas l'existence de variations latérales de faciès pouvant conduire à attribuer une autre note de vulnérabilité ». Ainsi il est plus raisonnable d'utiliser la géologie et l'hydrogéologie comme des données contextuelles, à utiliser pour l'interprétation des cartographies et expliquer les différences dans la structure du réseau hydrographique et dans le fonctionnement des têtes de bassin. Ce point de vue est partagé lors de plusieurs travaux sur les têtes de bassin par le passé : aucune des méthodologies existantes n'utilise la géologie comme un critère qui entre dans la notation. Les têtes de bassin pourraient aussi être superposées aux hydroécorégions pour montrer les différences de contexte à l'échelle du territoire.

L'indice global d'occupation du sol s'obtient en calculant les surfaces relatives occupées par chaque catégorie et en les pondérant par un coefficient proportionnel à leur impact sur les milieux aquatiques.

Les classes et coefficients de pondération associés ont été revus. Dans le tableau ci-dessous sont indiquées les classes créées par l'EPTB Sèvre Nantaise et les coefficients de pondération associés :

Occupation du sol	Pondération
Forêts de feuillus et mixtes, landes ligneuses	0,1
Surfaces toujours en herbe (prairies permanentes, landes et broussailles)	0,2
Prairies temporaires, fourrages, forêts de conifères et peupleraies	0,3
Surfaces urbaines perméables (espaces verts, parcs, jardins)	0,4
Grandes cultures	0,5
Maraichage, arboriculture et vignes	0,7
Surfaces imperméabilisées	1

Ces classes sont pertinentes, car inspirées de la méthodologie d'évaluation de l'hydromorphologie des cours d'eau en tête de bassin versant élaborée par l'OFB.

Certains points sont tout de même discutables, comme par exemple le fait de distinguer vignes et grandes cultures. Les zones viticoles font parties des masses d'eau les plus dégradées de France sous l'angle des intrants et, en Charente, l'impact des vignes reste globalement plus important que celui des grandes cultures. Pourtant, l'adaptation des pratiques de la viticulture a réduit les intrants et leurs impacts sur le milieu, notamment sous la pression des maisons de Cognac. Ainsi, dans certains cas,

l'impact des grandes cultures est plus important que celui des vignobles, et vice-versa : une note homogène pour ces catégories est donc plus raisonnable. Le choix de placer les surfaces urbaines perméables quasiment au même niveau qu'une prairie permanente est aussi discutable : perméable ou non, une zone urbaine est toujours dégradante. Il est enfin souhaitable de réduire le nombre de classes, notamment en vue de traduire ces classes sous SIG. A si grande échelle, il n'est pas judicieux de travailler avec un niveau de détail très fin.

Le choix des 4 classes et des coefficients de pondération associés présentés dans le tableau ci-dessous trouve une justification objective dans la littérature scientifique.

Occupation du sol	Pondération
Milieux forestiers	0
Surfaces enherbées	0,3
Terres labourables, forêts de résineux	0,6
Zones industrielles, résidentielles, mosaïque urbaine et plans d'eau en barrage	1

Il est avéré qu'une tête de bassin, dans son fonctionnement naturel, est un système boisé et que ce fonctionnement est basé sur la décomposition de la matière organique naturelle par des déchiqueteurs/détritivores. En tête de bassin, le passage en prairie constitue donc déjà une pression : sa pondération doit être bien distinguée de celle des forêts. Le choix de placer les forêts de résineux au même niveau que les grandes cultures n'est pas anodin. Les forêts de conifères sont des plantations mono-spécifiques, or c'est la diversité des essences qui structure la fonctionnalité des têtes de bassin. Elles contribuent à l'acidification des sols et des eaux, et on y trouve des parcelles coupées à blanc.

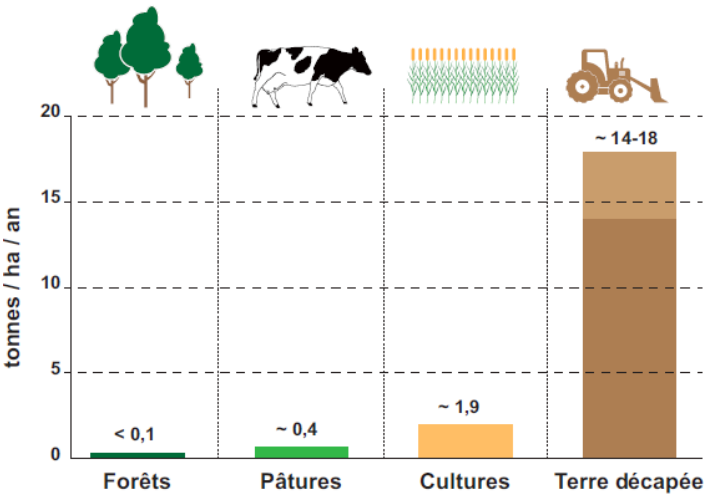


Figure 4 - Taux moyen d'érosion selon l'occupation des sols

Des peuplements non appropriés à ce type de milieux ne permettent pas de maintenir l'habitat en état, entraînant notamment une forte érosion des berges (Schneider, 2007).

L'impact des produits phytosanitaires en tête de bassin est reconnu, avec des concentrations biologiquement actives qui ont un effet néfaste sur l'ensemble des macro-invertébrés benthiques.

L'occupation du sol influence aussi le potentiel érosif des sols.

A l'échelle locale, il pourra être envisagé d'entrer plus dans le détail, en distinguant par exemple les types de cultures, ou en prenant en compte les surfaces en agriculture biologique, etc. Cette analyse est difficile à faire à grande échelle, d'autant que ce sont des informations qui évoluent d'année en année.

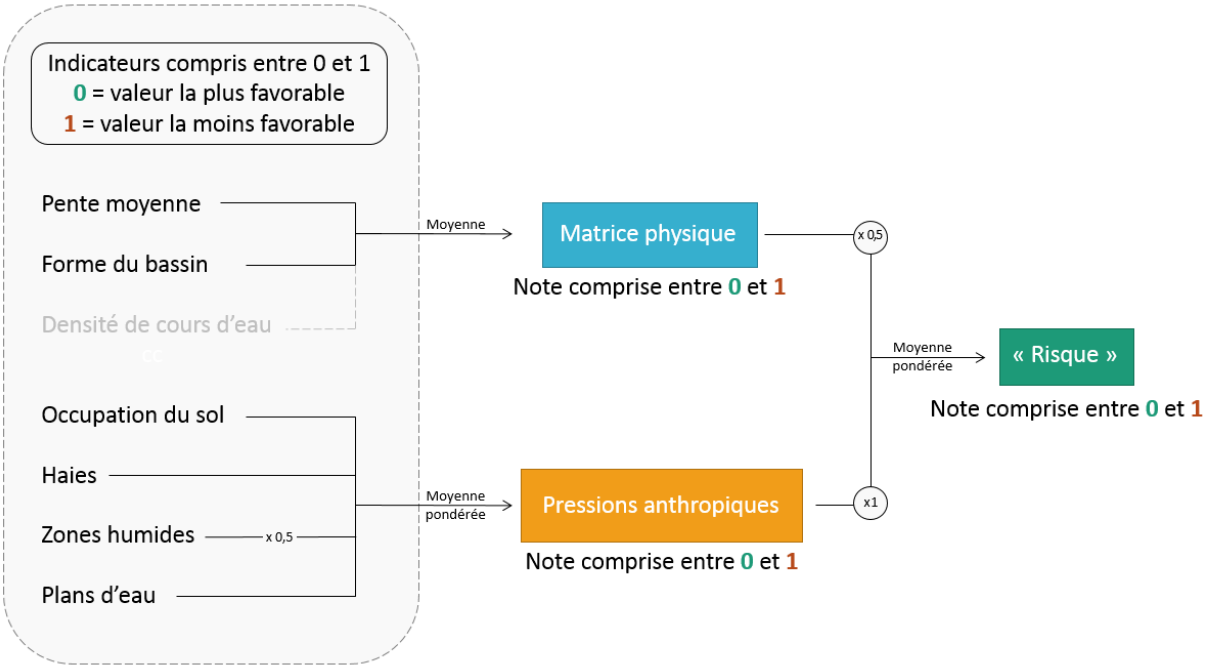
$$indicateur = \frac{[surface_{boisée} \times 0] + [surface_{prairies} \times 0{,}3] + [surface_{cultures} \times 0{,}6] + [surface_{urbain} \times 1]}{superficie\ totale\ tête\ de\ bassin}$$

ANNEXE III – Reproduire ce travail

Calcul des indicateurs avec QGIS

Indicateur		Calcul
VULNÉRABILITÉ	Pente moyenne	Pour extraire la carte des pentes au format raster à partir du MNT, utiliser la fonction Pente de la boîte à outils. Utiliser ensuite la fonction Statistiques de zone qui permet de calculer les statistiques d'une couche raster pour chaque entité d'une couche de polygones qui la recouvre.
	Indice de compacité de Gravélius	Utiliser la calculatrice de champ et entrer la formule `$perimeter/2*sqrt(pi()*$area)`
	Densité de cours d'eau	Utiliser la fonction Somme des longueurs des lignes afin de calculer la longueur totale de cours d'eau dans chaque tête de bassin. Diviser par la superficie totale de la tête de bassin.
PRESSIONS	Taux de cours d'eau impacté par un plan d'eau	Utiliser la fonction Couper afin d'extraire le linéaire de cours d'eau superposé à un plan d'eau. Utiliser ensuite la fonction Somme des longueurs des lignes afin de calculer la longueur totale de cours d'eau impacté par un plan d'eau dans chaque tête de bassin. Diviser cette longueur par la longueur totale de cours d'eau pour obtenir un taux.
	Densité surfacique de zones humides	Utiliser la fonction Rasteriser (vecteur vers raster) afin de convertir la couche ZH en raster. Utiliser la fonction Statistiques de zone (choisir le champ COUNT) afin de calculer le nombre de pixels de zone humide présents dans chaque tête de bassin. Pour calculer la superficie de zones humides, multiplier ce nombre par la résolution des pixels. Diviser par la superficie totale de la tête de bassin pour obtenir un pourcentage surfacique.
	Densité de haies	Utiliser la fonction Somme des longueurs des lignes afin de calculer la longueur de haies dans chaque tête de bassin. Diviser par la superficie totale de la tête de bassin.
	Indice de pression liée à l'occupation du sol	Dans la table attributaire de la couche OCS, ajouter un champ de façon à associer à chaque libellé un coefficient de pondération - 0 pour les milieux forestiers - 0,3 pour les prairies (permanentes et temporaires) et landes - 0,6 pour les grandes cultures, vignes, maraîchage, forêts de résineux et peupleraies - 1 pour les surfaces imperméables : zones industrielles, résidentielles, mosaïque urbaine et plans d'eau en barrage Rasteriser la couche OCS Rasteriser (vecteur vers raster) avec en choisissant le champ coefficient pour la valeur des pixels. Utiliser la fonction Statistiques de zone afin de calculer le calculer le coefficient moyen dans chaque tête de bassin.

- Calcul des notes de vulnérabilité, de pression et de risque



Afin de pouvoir croiser les indicateurs entre eux, il est tout d'abord nécessaire de mettre les données à la même échelle. On choisit ici de borner chaque indicateur entre 0 et 1, où est toujours la valeur la plus favorable et 1 la valeur la plus défavorable.

Pour les indicateurs pour lesquels la valeur minimale est la plus favorable, entrer la formule :

$$valeur_i\ bornée = \frac{valeur_i\ brute - \min(toutes\ les\ valeurs\ brutes)}{\max(toutes\ les\ valeurs\ brutes) - \min(toutes\ les\ valeurs\ brutes)}$$

Pour les indicateurs pour lesquels la valeur maximale est la plus favorable, entrer la formule :

$$valeur_i\ bornée = 1 - \left[\frac{valeur_i\ brute - \min(toutes\ les\ valeurs\ brutes)}{\max(toutes\ les\ valeurs\ brutes) - \min(toutes\ les\ valeurs\ brutes)}\right]$$

Calculer ensuite les notes de vulnérabilité et de pressions :

$$vulnérabilité = \frac{pente + gravélius\ (+densité\ cours\ d'eau)}{2\ (ou\ 3)}$$

$$pressions = \frac{0{,}5 \times densité\ ZHP + OCS + densité\ haies + impact\ plans\ d'eau}{3{,}5}$$

Pour croiser ces deux notes, il faut les mettre à la même échelle : borner à nouveau les valeurs entre 0 et 1 selon la méthode décrite précédemment. Calculer enfin la note de risque :

$$risque = \frac{0{,}5 \times vulnérabilité + pressions}{1{,}5}$$

ANNEXE IV – Bibliographie

ADAMS, R. K., & SPOTILA, J. A. (2005). The form and function of headwater streams based on field and modeling investigations in the Southern Appalachian Mountains. Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group, 30(12), 1521-1546.

ALEXANDER et al. (2007). The role of headwater streams in downstream water quality. Journal of the American Water Resources Association (JAWRA) 43(1):41-59.

AUGIER, Alix (septembre 2017). Étude sur les têtes de bassin versant en Finistère. Rapport d'un stage effectué au Forum des Marais Atlantiques en partenariat avec le Conseil départemental du Finistère (Cellule d'Animation sur les Milieux Aquatiques). École Polytechnique de l'Université François Rabelais de Tours (Polytech Tours), Spécialité Génie de l'Aménagement et Environnement. Document consultable et téléchargeable sur www.memoires.scd.univ-tours.fr.

BAUDOIN, J.M. (2007). Biodiversité et fonctionnement de cours d'eau forestiers de tête de bassin : Effet de l'acidification anthropique et d'une restauration. Thèse Discipline Ecologie, Spécialité Biodiversité et fonctionnement des écosystèmes. Université Paul Verlaine de Metz. 221 pages.

BEAUFORT A., SAUQUET, E., DATRY, T. (2019). Têtes de bassin versant, altérations hydrologiques et dynamique de la biodiversité. Caractérisation de l'hydrologie des assecs à partir de la base ONDE. [Rapport de recherche] IRSTEA. pp.74. hal-02608594

BENDA et al. (2005). Geomorphology of steepland headwaters : the transition from hillslopes to channels, Journal of the American Water Resources Association (JAWRA), 41 (4), 835-851.

BERTHOLD, Raphaël (2003). Méthodologie pour la gestion durable des têtes de bassins versants – De l'analyse globale des bassins versants au diagnostic écologique des systèmes ruisseaux, 6ème rencontre de Théo Quant., 11 p. http://thema.univ-fcomte.fr.

BISHOP et al. (2008). Aqua Incognita: the unknown headwaters. Hydrological Processes, vol. 22, no 8, p. 1239.

BISWAS S, SUDHAKAR S AND DESAI, V R. Prioritization of sub watersheds based on morphometric analysis of drainage basin. A remote sensing and GIS approach. Journal of Indian Society of Remote Sensing, 27(3): 155-166, 1999.

BOUAS, Guillaume (2016). Etude de la biodiversité (macro-invertebrés et ichtyofaune) des cours d'eau en tête de bassin versant. Rapport d'un stage effectué à la Direction Interrégionale Bretagne-Pays de la Loire de l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques en vue de l'obtention du Master Ingénierie des Milieux Aquatiques et des Corridors Fluviaux, Polytech Tours.

BRUMMER, C.J., MONTGOMERY, D.R. (2003). Downstream coarsening in headwater channels. Water Resources Research, 39 : 1-14.

CATALOGNE et al. (2017). Aménager le territoire et gérer les aménagements : les zones tampons sèches et humides, les fossés pour lutter contre les pollutions diffuses par les produits phytosanitaires dans les aires de captage. Innovations Agronomiques, INRAE, pp.117-139. hal-01656661.

CATALOGNE, C., LE HÉNAFF, G. (2016). Guide d'aide à l'implantation des zones tampons pour l'atténuation des transferts de contaminants d'origine agricole. [Rapport de recherche] IRSTEA. pp.69.

CHOUCARD, Pauline (septembre 2011). Elaboration d'une méthodologie d'inventaire cartographique et de hiérarchisation des têtes de bassin versant dans le contexte armoricain : Application au bassin versant du Couesnon. Rapport d'un stage effectué au Syndicat Mixte du SAGE Couesnon pour l'obtention du Master Gestion des Habitats et des Bassins Versants à l'Université de Rennes 1. Document consultable et téléchargeable sur www.sage-couesnon.fr.

CIROU, Julien (septembre 2017). Elaboration d'une méthode de délimitation et de caractérisation des têtes de bassin versant de la Vilaine par approche cartographique : application aux bassins versants de l'Aff et du Don. Rapport d'un stage réalisé à l'EPTB Vilaine en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage. Spécialité Génie de l'environnement, Spécialisation Préservation et Aménagement des Milieux, Ecologique Quantitative (PAMEQ). Document consultable et téléchargeable sur www.eptb-vilaine.fr.

CLINTON, Barton D., VOSE, James M. (2006). Variation in stream water quality in an urban headwater stream in the southern Appalachians. Water, Air, and Soil Pollution, vol. 169, no 1-4, p. 331-353.

COLIN, Marion (2015). Etude de l'hydromorphologie à l'échelle stationnelle des cours d'eau de tête de bassin versant. Evaluation de l'impact des travaux de chenalisation. Rapport d'un stage effectué à la Direction Interrégionale Bretagne-Pays de la Loire de l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques en vue de l'obtention du Master Gestion des Habitats et des Bassins Versants de l'Université Rennes 1.

Comité de bassin Adour-Garonne (mai 2020). Synthèse de l'état des lieux pour le bassin Adour-Garonne

Comité de bassin Adour-Garonne. Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux du bassin Adour-Garonne. SDAGE 2016-2021 : un nouvel élan pour l'eau. Projet adopté et approuvé par arrêté préfectoral le 01/12/2015. Document consultable et téléchargeable sur www.eau-adour-garonne.fr

Comité de bassin Loire-Bretagne. Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux du bassin Loire-Bretagne. SDAGE 2016-2021. Projet adopté le 04/11/2015 par le comité de bassin et approuvé par arrêté préfectoral le 18/11/2015. Document consultable et téléchargeable sur www.eau-loire-bretagne.fr

Comité de bassin Rhône-Méditerranée. Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux du bassin Rhône-Méditerranée. SDAGE 2016-2021. Projet adopté le 20/11/2015 par le comité de bassin et approuvé par arrêté préfectoral le 03/12/2015. Document consultable et téléchargeable sur www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr

Comité de bassin Seine-Normandie. Le SDAGE 2016-2021 du bassin de la Seine et des cours d'eau côtiers normands. Projet adopté le 05/11/2015 par le comité de bassin et approuvé par arrêté préfectoral le 01/12/2015. Document consultable et téléchargeable sur www.eau-seine-normandie.fr

CORTI, R. (2013). Assèchement des cours d'eau : effets sur les communautés d'invertébrés et la dynamique de la matière organique particulaire. Sciences de l'environnement. Doctorat Biologie, Université Lyon I.

COUDART, Anthony (septembre 2018). Localisation, caractérisation et hiérarchisation des têtes de bassin versant sur le territoire de la Sèvre Nantaise : l'open-source au service des chaînes et automatisations de traitements SIG. Rapport d'un stage effectué à l'EPTB Sèvre Nantaise en vue de l'obtention de la Licence Professionnelle Universitaire Systèmes d'Informations Géographique, Faculté de langues et sciences humaines de La Rochelle. Document consultable et téléchargeable sur www.biblio.sevre-nantaise.com.

COULOIGNER, Clément (juillet 2020). Analyse et suivi quantitatif sur la masse d'eau du Jeu et ses têtes de bassin versant. Rapport d'un stage effectué au Syndicat mixte de bassin versant Layon Aubance Louets. Cycle ingénieur AgroParisTech, deuxième année.

CURRY, R. Allen et al. (1997). Use of small streams by young brook trout spawned in a lake. Transactions of the American Fisheries Society, vol. 126, no 1, p. 77-83.

DATRY, T., LARNED, S.T., TOCKNER, K. (2014). Intermittent rivers : a challenge for freshwater ecology. BioScience, vol. 64, no 3, p. 229-235.

DATRY, Thibault et al. (2008). La zone hyporhéique, une composante à ne pas négliger dans l'état des lieux et la restauration des cours d'eau. Ingénieries eau-agriculture-territoires, no 54, p. p. 3-p. 18.

DATRY, Thibault, ARSCOTT, David B., et SABATER, Sergi (2011). Recent perspectives on temporary river ecology. Aquatic Sciences, vol. 73, no 4, p. 453.

DELAHAYE D, DOUVINET J, LANGLOIS P. De la morphométrie à un champ de mesure de l'efficacité structurelle d'un bassin versant. Actes du colloque international de Géomatique et d'Analyse Spatiale SAGEO'2007, Clermont-Ferrand, CD-ROM, 2007.

DESHAYES, Alexandre (août 2020). Etude des possibilités et des moyens d'entretien mécanisés des zones de sources en prairie humide de têtes de bassin versant. Rapport d'un stage réalisé à la Fédération de l'Indre pour la Pêche et la protection du Milieu Aquatique (FDPPMA36) pour l'obtention du Master Sciences de l'Eau et de l'Environnement de l'Université de Tours.

DIETERICH, Martin, ANDERSON, N. H., et al. (2000). The invertebrate fauna of summer-dry streams in western Oregon. Archiv für Hydrobiologie, vol. 147, no 3, p. 273-295.

DÖRFLIGER, N., PLAGNES, V. (2009). Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques. Guide méthodologie de la méthode PaPRIKa. Avec la collaboration de K. KAVOURI et J. GOUIN ; BRGM RP-57527-FR, 105pp., 55Ill., 4ann.

Etablissement public Loire (mars 2018). Délimitation et caractérisation des têtes de bassin versant sur le périmètre du SAGE Sioule. Phases 1 à 4 et rapport de synthèse. Documents consultables et téléchargeables sur www.sage-sioule.fr

FAYE, Cheikh (2014). Méthode d'analyse statistique de données morphométriques : corrélation de paramètres morphométriques et influence sur l'écoulement des sous-bassins du fleuve Sénégal.

Forum des Marais Atlantiques (2020). Les têtes de bassin versant : des zones essentielles pour la gestion des milieux aquatiques et de la biodiversité. Document réalisé dans le cadre de la Cellule d'Animation sur les Milieux Aquatiques et la Biodiversité du Conseil départemental du Finistère.

Forum des Marais Atlantiques (2021) dans le cadre du Réseau sur la restauration des zones humides de Bretagne. Zones humides de Bretagne – État de lieux des altérations, Enjeux de la restauration.

FREEMAN, Mary C., PRINGLE, Catherine M., JACKSON, C. Rhett (2007). Hydrologic connectivity and the contribution of stream headwaters to ecological integrity at regional scales. Journal of the American Water Resources Association (JAWRA), 43: 5–14.

FRITZ, Ken, JOHNSON, Brent (mai 2011). Headwater streams : what are they and what do they do ? United States Environmental Protection Agency (EPA). Office of Research and Development National Exposure Research Laboratory, Ecological Exposure Research Division. www.epa.gov.

GALINEAU, Maxime (2020). Étude exploratoire des rangs zéro sur le territoire Bretagne-Pays de la Loire. Stage effectué à la Direction Régionale Bretagne de l'Office Français de la Biodiversité en vue de l'obtention du Master Gestion des Habitats et des Bassins Versants (GHBV) de 'lUniversité Rennes 1.

GOMI, T., SIDLE, R.C., RICHARDSON, J.S. (2002). Understanding processes and downstream linkages of headwater systems. BioScience Vol. 52 No. 10.

GREGORY, Kenneth John, WALLING, Desmond Eric (1973). Drainage basin form and process. A Geomorphological Approach. Wiley, New York, 456p.

GRIEVE et al. (2018). Controls on zero-Order Basin morphology. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, vol. 123, no 12, p. 3269-3291.

GUILLERME, Noémie (2015). Caractérisation de la pression « enterrement des cours d'eau » sur le territoire Bretagne – Pays de la Loire. Rapport d'un stage effectué à l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA)en vue de l'obtention du Master Gestion des Habitats et des Bassins Versants de l'Université de Rennes 1. 31 p.

HENNER, Raphaëlle (septembre 2013). Les têtes de bassin versant, des espaces à considérer pour une gestion durable et intégrée de la ressource en eau. Identification cartographique, mise en place d'une méthodologie de caractérisation des pressions, proposition d'objectifs et de règles de gestion sur le bassin de la Sarthe. Rapport

d'un stage réalisé au Syndicat du bassin de la Sarthe pour l'obtention du Master de Géographie Sociétés, Territoires, Aménagement, Environnement et Risques à l'Université de Caen. Document consultable et téléchargeable sur www.bassin-sarthe.org

HIRSCH, François (1963). Méthode de prévision des débits des cours d'eau par l'analyse morphométrique des réseaux fluviatiles. Centre National de la Recherche Scientifique.

JAN, Alexandre (2012), Proposition d'une méthodologie de priorisation des cours d'eau de tête de bassin versant selon l'enjeu « morphologie ». Stage réalisé au Syndicat Mixte du SAGE Couesnon. Présentation PowerPoint. Document consultable et téléchargeable sur www.sage-couesnon.fr.

JOLY, Alban (septembre 2014). Identification cartographique et hiérarchisation des têtes de bassin versant sur les périmètres des SAGE Evre-Thau-STDenis et Layon-Aubance. Rapport d'un stage réalisé au Syndicat Mixte des Bassins Evre-Thau-STDenis en vue de l'obtention du Master d'hydrogéologie, hydropédologie, hydrobiogéochimie de l'Université de Rennes I. Document consultable et téléchargeable sur : www.evrethausaintdenis.fr.

KAGAN, Roland (2017). Cours d'eau de tête de bassin versant en bon état: quels enjeux et quelles actions de non dégradation ? Office International de l'Eau. https://www.oieau.fr/eaudoc/

KOSTASCHUK, R. A., MACDONALD, G. M., & PUTNAM, P. E. (1986). Depositional process and alluvial fan-drainage basin morphometric relationships near Banff, Alberta, Canada. Earth Surface Processes and Landforms, 11(5), 471-484.

LE BIHAN et al. (2017). Retours d'expériences techniques Chapitre 11 Tête de bassin versant.

LE BIHAN, Mikaël (2009). L'enterrement des cours d'eau en tête de bassin en Moselle (57). Rapport d'un stage réalisé à la Délégation Interrégionale (Alsace, Champagne-Ardennes, Lorraine) de l'ONEMA en vue de l'obtention du Master Environnement et Aménagement, Spécialité Gestion des Milieux Aquatiques et de la Ressource en Eau, de l'Université Paul Verlaine de Metz. 49 pages.

LE BIHAN, Mikaël (Agence Française pour la Biodiversité, Direction Bretagne, Pays de la Loire). Comment étudier les têtes de bassin versant ? Méthodes de cartographie, caractérisation et hiérarchisation des têtes de bassin versant sur un territoire. A l'occasion de la Journée ATBVB (Association des Techniciens de Bassins Versants Bretons) « Comment étudier les têtes de BV » du 7 décembre 2017. Consultable et téléchargeable sur www.atvb.fr.

LE BIHAN, Mikaël (Version V2.3 au 10/03/2020). Méthodologie d'évaluation de l'hydromorphologie des cours d'eau en tête de bassin versant à l'échelle linéaire. Guide de l'Office Français de la Biodiversité, Direction Interrégionale Bretagne. 36 pages.

LHÉRITIER, Nicolas (2012). Les têtes de bassin : de la cartographie aux échelles mondiales et françaises à la caractérisation des ruisseaux limousins. Thèse dirigée par L. Touchard en vue d'obtenir le grade de Docteur de l'Université de Limoges. Discipline : Géographie. Présentée et soutenue publiquement le 05 Janvier 2012. 481 p. Document consultable et téléchargeable sur www.conservatoirelimousin.com.

MACDONALD, Lee H., COE, Drew (2007). Influence of headwater streams on downstream reaches in forested areas. Forest Science 53(2), 148-168.

MATTHEWS, William J. (1998). Patterns in Freshwater Fish Ecology. Chapman and Hall, New York.

MCDONALD, D., DE BILLY, V., GEORGES, N. (2018). Bonnes pratiques environnementales. Cas de la protection des milieux aquatiques en phase chantier : anticipation des risques, gestion des sédiments et autres sources potentielles de pollutions des eaux. Collection Guides et protocoles. Agence française de la biodiversité. 148 pages.

MEYER et al. (2007). The contribution of headwater streams to biodiversity in river networks. Journal of the American Water Resources Association (JAWRA) 43(1): 86-103.

MEYER et al. (2007). Where rivers are born : The scientific imperative for defending small streams and wetlands. American Rivers and Sierra Club. 23p. www.americanrivers.org

MEYER, J. L., WALLACE, J. B., et al. (2001). Lost linkages and lotic ecology: rediscovering small streams. In : Ecology: achievement and challenge: the 41st Symposium of the British Ecological Society sponsored by the Ecological Society of America held at Orlando, Florida, USA, 10-13 April 2000. Blackwell Science, p. 295-317.

MONDÉSIR, Laura (2017). Synthèse des connaissances et validation de protocoles pour l'hydromorphologie et la biologie des cours d'eau en tête de bassin versant (Rang de Strahler 1). 2017 Bretagne – Pays de la Loire: Agence Française pour la Biodiversité.

MONTGOMERY, D.R. and FOUFOULA-GEORGIOU, E. (1993). Channel network source representation using digital elevation models. Water Resources Research 29:3925-3934.

NGUYEN VAN, Rémi (septembre 2012). Les altérations physiques en têtes de bassin versant sur les régions Bretagne Pays de la Loire : à la recherche d' « aqua incognita ». Rapport d'un stage réalisé à la Délégation Interrégionale (Bretagne – Pays de la Loire) de l'ONEMA pour l'obtention du Master Espaces et Milieux. Université Paris Diderot. 86 p. Document consultable et téléchargeable sur www.documentation.eauetbiodiversite.fr.

ORAISON, Federica, SOUCHON, Yves, et VAN LOOY, Kris (2011). Restaurer l'hydromorphologie des cours d'eau et mieux maîtriser les nutriments: une voie commune? [Rapport de recherche] IRSTEA. pp.41.

POIRAUD A., LAVEUF C., DULONG J. (2016). Identification et cartographie des têtes de bassin versant sur le territoire du SAGE Estuaire de la Gironde. In. Inventaire et caractérisation des zones humides situées en tête de bassin versant ; mise au point d'une méthodologie et test sur le BV d'Artigue-Maqueline. Rapport intermédiaire (phases 1 et 2) réalisé par le groupement Inselberg/Solenvie/Géréa pour le SMIDDEST, Mai 2016, 68 pages. Document consultable et téléchargeable sur www.smiddest.fr.

POIRAUD, A., SORREL, D.-L., LAVEUF, C. (2016). Cartographie des têtes de bassin versant sur le territoire du SAGE Estuaire de la Gironde - Principaux enseignements de l'étude SMIDDEST. Atelier « Zones humides et têtes de bassins versants ». Document consultable et téléchargeable sur www.forum-zones-humides.org.

PRATTE, Alexandre (2008). Relations entre variables morphométriques et données hydrogéologiques, bassins versants des rivières Châteauguay et Beaurivage, Québec. Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval dans le cadre du programme de maîtrise en génie civil pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.). https://www.collectionscanada.gc.ca

PROGAR, Robert A. et MOLDENKE, Andrew R. (2002). Insect production from temporary and perennially flowing headwater streams in western Oregon. Journal of Freshwater Ecology, vol. 17, no 3, p. 391-407.

RASMUSSEN et al. (2013). A catchment scale evaluation of multiple stressor effects in headwater streams. Science of the Total Environment, vol. 442, p. 420-431.

REDDY, G.P.O., MAJI, A.K., GAJBHIYE K.S. (2004). Drainage morphometry and its influence on landform characteristics in a basaltic terrain, Central India - a remote sensing and GIS approach. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, vol. 6, no 1, p. 1-16.

RICHARDSON, J.S., DANEHY, R.J. (2007). A synthesis of the ecology of headwater streams and their riparian zones in temperate forests. Forest Science 53: 131–147.

ROSSO, R., BACCHI, B., LA BARBERA, P. (1991). Fractal relation of mainstream length to catchment area in river networks. Water Resources Research Vol. 27, No. 3, Pages 381-387.

ROSSO, Renzo, LA BARBERA, Paolo (1989). On the fractal dimension of stream networks. Water Resources Research, Vol. 25, No. 4, Pages 735-741.

ROULET, Nigel T. (1991). Stormflow production in a headwater basin swamp. Hydrology Research, vol. 22, no 3, p. 161-174.

SAGE Sud Cornouaille. Rapports d'activités 2017, 2018 et 2019. Documents consultables et téléchargeables sur : www.sage-sud-cornouaille.fr.

SALPIN, Benoît (2016). Elaboration d'une démarche concertée d'inventaire cartographique et de caractérisation des têtes de bassin versant du SAGE estuaire de la Loire. Rapport de stage effectué au Syndicat Loire Aval en vue de l'obtention du Master Gestion des Habitats et des Bassins Versants de l'Université Rennes I.

SCHNEIDER, Jean-Baptiste (2007). Plaidoyer pour une restauration des cordons rivulaires naturels des ruisseaux et ruisselets forestiers. Forêt Wallonne, vol. 86, p. 43-57. https://www.foretwallonne.be

SHERIDAN, Chris D., SPIES, Thomas A. (2005). Vegetation environment relationships in zero-order basins in coastal Oregon. Canadian Journal of Forest Research, vol. 35, no 2, p. 340-355.

SIDLE, R.C., GOMI, T., TSUKAMOTO, Y. (2018). Discovery of zero-order basins as an important link for progress in hydrogeomorphology. Hydrological Processes, vol. 32, no 19, p. 3059-3065.

STOREY et al. (2009). Effects of development on zero-order streams in the Waikato region. Environment Waikato, 2009. https://www.waikatoregion.govt.nz

Stream Solute Workshop (1990). Concepts and methods for assessing solute dynamics in stream ecosystems. Journal of the North American Benthological Society, vol. 9, no 2, p. 95-119.

Syndicat Layon Aubance Louets (4 février 2021). Etude des têtes de bassins versant : Localisation & Caractérisation.

Tetra Tech, Kentucky erosion prevention and sediment control field guide, Kentucky Division of Water. Nonpoint Source Section and the Kentucky Division of Conservation (KDOC), Kentucky environmental and public protection cabinet, U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), USA, 89p.

THERIN Emmanuel, VAROQUIER Sébastien (Syndicat Mixte Environnemental du Goëlo et de l'Argoat). Exemple d'une évaluation des atteintes potentielles : caractérisation et hiérarchisation (2015). Présenté à l'occasion de la Journée ATBVB (Association des Techniciens de Bassins Versants Bretons) « Comment étudier les têtes de BV » du 7 décembre 2017. Consultable et téléchargeable sur www.atvb.fr.

Toronto and Region Conservation Authority (2007). The Natural Functions of Headwater Drainage Features : A Literature Review.

WIPFLI, M.S., RICHARDSON. J.S., NAIMAN, R.J. (2007) Ecological linkages between headwaters and downstream ecosystems : transport of organic matter, invertebrates, and wood down headwater channels. Journal of the American Water Resources Association (JAWRA) 43(1):72-85.

WOODS, R., SIVAPLAN, M., & DUNCAN, M. (1995). Investigating the representative elementary area concept: An approach based on field data. Hydrological Processes, 9(3-4), 291-312.