

# CARACTÉRISATION ET CARTOGRAPHIE DES TÊTES DE BASSINS VERSANTS DU SAGE "ESTUAIRE DE LA GIRONDE ET MILIEUX ASSOCIÉS"

CHOIX DE MÉTHODOLOGIES EN FONCTION DES UNITÉS  
MORPHOSTRUCTURALES

BASSINS VERSANTS TEST : PRÉ-LOCALISATION DES ZONES HUMIDES  
POTENTIELLES DE TÊTE DE BASSIN VERSANT

Etude réalisée par :

Alexandre POIRAUD (Inselberg – [apoiraud@inselberg.fr](mailto:apoiraud@inselberg.fr))

Romain DUPERE (Eco-Metrum, [contact@eco-metrum.fr](mailto:contact@eco-metrum.fr))

Commanditaire : Syndicat Mixte pour le Développement Durable de l'Estuaire de la Gironde (SMIDDEST)

Financeurs :

\*\*\*

Septembre 2022



RÉGION  
Nouvelle-  
Aquitaine



# SOMMAIRE

<b>PREAMBULE</b>	<b>4</b>
<b>CARTOGRAPHIE ET CARACTERISATION DES TBV SUR LE TERRITOIRE DU SAGE</b>	<b>5</b>
<b>1. LA QUESTION DE LA CARTOGRAPHIE DES TBV</b>	<b>6</b>
L'ordination de Strahler	6
La notion de chenal colluvial et alluvial	6
La question des modalités d'alimentation	7
Applications à la cartographie	8
<b>2. LA METHODE RETENUE POUR UNE APPLICATION DE LA CARTOGRAPHIE DES TBV SUR LE TERRITOIRE DU SAGE</b>	<b>8</b>
<b>3. PRINCIPAUX RESULTATS</b>	<b>11</b>
Choix des facteurs explicatifs	11
Analyse à l'échelle des Unités Morphostructurales	12
<b>4. LES MODELES OBTENUS ET LA CARTE DES TBV</b>	<b>14</b>
Côtes du Royannais (Figure 11)	15
Littoral fossile de vitrezay (Figure 12)	15
La cuesta de mirambeau (Figure 13)	15
La Province Saintongeoise (Figure 14)	16
Les collines du Blayais (Figure 15)	16
Les collines de l'Entre-Deux-Mers (Figure 16)	17
Les Collines de St-Estèphe (Médoc)	18
Finalisation et cartographie	18
<b>5. DISCUSSION</b>	<b>20</b>
<b>PRELOCALISATION DES ZONES HUMIDES (ZH) SUR LES TBV DE 3 BASSINS VERSANTS « TEST »</b>	<b>22</b>
<b>6. LES CONDITIONS DE LA PRELOCALISATION DES ZH</b>	<b>23</b>

<b>7. METHODOLOGIE</b>	<b>23</b>
<b>Définition des BV test</b>	<b>23</b>
<b>Jeux de données</b>	<b>24</b>
Jeu d'entraînement	24
Jeu des covariables	25
<b>Procédure d'analyse et de modélisation</b>	<b>25</b>
<b>8. PRINCIPAUX RESULTATS</b>	<b>27</b>
<b>Le Taillé</b>	<b>27</b>
<b>La Livenne</b>	<b>29</b>
<b>Le BV de la Jalle de Castelnaud</b>	<b>31</b>
<b>Conclusion sur les travaux de modélisation</b>	<b>34</b>
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	<b>35</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>36</b>
<b>RESUME</b>	<b>39</b>

---

# PREAMBULE

« Le Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux de l'Estuaire de la Gironde et milieux associés, approuvé le 30 août 2013, constitue un outil de planification destiné à promouvoir une gestion concertée, équilibrée et durable de la ressource en eau et des milieux aquatiques. [...] Les zones humides présentes sur le territoire de l'estuaire de la Gironde et milieux associés revêtent une importance de premier ordre, tant par leur surface que par leurs caractéristiques variées et multifonctionnelles, que par la richesse de leurs réservoirs de biodiversité. Elles sont une des composantes majeures de l'identité Estuarienne. [...] Le SAGE donne aux têtes de bassin versant (TBV) ce caractère particulier, du fait de leur forte contribution à la régulation des débits, à la qualité des milieux aquatiques et rivulaires ainsi qu'aux équilibres écologiques. » [Extrait du Cahier des Clauses Techniques Particulières du 6 novembre 2020].

Ce contexte a conduit le SMIDDEST à réaliser une étude en 2016 qui avait pour objectif de tester une méthodologie de cartographie des TBV sur le territoire test d'Artigues et Macqueline, avec une extension des résultats sur l'Unité Morphostructurale des « Terrasses Garonnaises » (Poiraud, Laveuf, et al., 2016).

Ce concept de TBV est notamment caractérisé en France par les normes de l'Agence Loire-Bretagne qui a très tôt investi dans des cartographies et ainsi stabilisé les critères de choix cartographiques, ainsi que les méthodologies liées aux **Systèmes d'Information Géographique** (SIG) pour y parvenir. Cependant, si les critères de l'Agence Loire-Bretagne peuvent avoir une certaine pertinence dans les secteurs continentaux non karstiques et à relief modéré, ces derniers s'avèrent plus délicats à appliquer dans le contexte estuarien du SAGE, qui plus est, avec de larges secteurs inféodés au système landais pour lequel le concept de TBV reste sujet à discussion.

La méthode mise en œuvre à l'époque était donc un compromis entre une approche « française » du problème (ordination de Strahler) et une approche anglo-saxonne basée sur les surfaces drainées, prenant en compte indirectement l'hydrodynamisme réel des organes hydrologiques (indirectement, le débit). L'étude de 2016 proposait également un tableau de bord des méthodologies de cartographie des TBV pressenties pour les autres territoires du SAGE.

La présente étude a donc repris la suite de celle de 2016 en étendant la cartographie des TBV à l'ensemble du territoire du SAGE. Sur la base des unités morphostructurales déjà établies en 2016, elle a adapté les méthodes à chaque contexte physiographique permettant d'aboutir à une cartographie générale des TBV à l'échelle du territoire du SAGE. Ce travail a été enrichi sur 3 bassins versants test par une pré-cartographie des zones humides (PCZH) au sein des TBV établie à partir de modélisations « floristiques ».

\*\*\*

Le document est construit en deux parties dissociables pour plus de facilité d'utilisation : la première partie concerne l'ensemble du travail sur les TBV, la deuxième partie concerne le travail sur la prélocalisation des ZH (PCZH). Chaque partie présente les éléments de méthode, les résultats et l'analyse critique.

Ce rapport ne présente que les éléments majeurs de l'étude, le détail ayant fait l'objet de présentations en COPIL et de rapports de travail plus détaillés, fournis au SMIDDEST.

Un atlas à l'échelle 1/25000 accompagne ce rapport. Il présente les cartes finalisées des TBV et de la prélocalisation des ZH sur les bassins test.

# Partie 1

---

## CARTOGRAPHIE ET CARACTERISATION DES TBV SUR LE TERRITOIRE DU SAGE

# 1. LA QUESTION DE LA CARTOGRAPHIE DES TBV

La question du concept des TBV et de leur signification fonctionnelle a déjà été traitée dans la synthèse bibliographique de l'étude de 2016 (Poiraud, Laveuf, et al., 2016). Nous nous concentrerons ici sur les aspects de cartographie.

La question de la cartographie des TBV s'appuie essentiellement sur des concepts phares qu'on peut spatialiser : la surface drainée et l'ordination de Strahler sont les plus couramment utilisées, tout comme la pente longitudinale. Cependant, d'autres critères plus élaborés comme le niveau piézométrique statique peuvent également être utilisés pour la cartographie, mais ils demandent un jeu de données conséquent et rarement disponible.

## L'ORDINATION DE STRAHLER<sup>1</sup>

Strahler (1957) retient les ordres 1 et 2 dans le **système d'ordination de Horton-Strahler** pour définir les têtes de bassin versant ou les zones « sources ». Sur cette base, Hack (1965) et Hack & Goodlett (1960) proposent une sectorisation des TBV en 4 zones avec :

1. les versants en connexion directe,
2. les BV d'ordre 0,
3. les écoulements chenalés d'ordre 0 et 1 temporaires,
4. et les chenaux de sortie du système d'ordre 1 à 2.

Cette définition, bien que paraissant simple, demeure cependant sensible à la définition des données d'entrée (Gomi et al., 2002) et pose le problème des surfaces d'initiation des réseaux hydrographiques à retenir. En effet, l'implémentation de l'algorithme de hiérarchisation impose de fournir un réseau constitué, ce qui impose sa cartographie et dont des choix parfois arbitraires quant à l'initiation des ruisseaux. Or, comme nous l'avons montré lors des ateliers du Forum des Marais Atlantiques à Lathus (Poiraud, Sorrel, et al., 2016), le contexte géomorphologique et hydrogéologique va très fortement influencer sur la densité du réseau hydrographique et sur la signification hydrologique et hydrodynamique des niveaux d'ordre. L'utilisation de l'ordination de Strahler impose donc une certaine prudence et une analyse experte géomorphologique en amont pour l'appliquer à bon escient.

Cette définition est celle actuellement utilisée et recommandée par l'Agence Loire-Bretagne, avec notamment de nombreuses études réalisées (Choucard, 2011; Coudart, 2018; Henner, 2013; Joly, 2014; Le Bihan, 2018; SIGAL, 2015).

## LA NOTION DE CHENAL COLLUVIAL ET ALLUVIAL

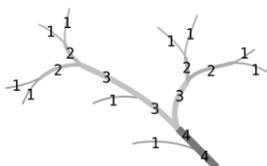
Dietrich & Dunne (1993), reprenant la théorie de Hack (1965) et Hack and Goodlett (1960), la précisent en intégrant la notion de "tête de chenal" qui est pérenne dans le temps et s'observe lors des orages. Ce point assure la transition entre les écoulements diffus et les écoulements concentrés et chenalés. Cette première approche ouvre la voie au développement d'une approche par type de chenal.

Montgomery & Buffington (1997) introduisent le concept de "**chenal colluvial**" qui est un chenal s'écoulant sur un lit colluvial avec un matériel fourni essentiellement par les versants. Pour ces auteurs, le chenal colluvial caractérise la tête de bassin versant qui s'étend depuis l'initiation des chenaux à écoulement temporaire, jusqu'à l'initiation des chenaux alluviaux, dominés par les processus longitudinaux et donc allochtones. Cette notion implique une variation de la taille des TBV dans le temps moyen à long en fonction du bilan de la compétition entre transfert transversal et transit longitudinal issu du jeu complexe entre facteurs climatiques, anthropiques et réponses hydrogéomorphologiques (Defive et al., 2017; Delile et al., 2016).

La notion de chenal colluvial est très liée au couplage entre la pente locale et l'aire drainée (**relation Slope/Area**). Les travaux menés sur les TBV aux USA montrent bien la rupture de cette relation *Slope/Area* entre les chenaux colluviaux

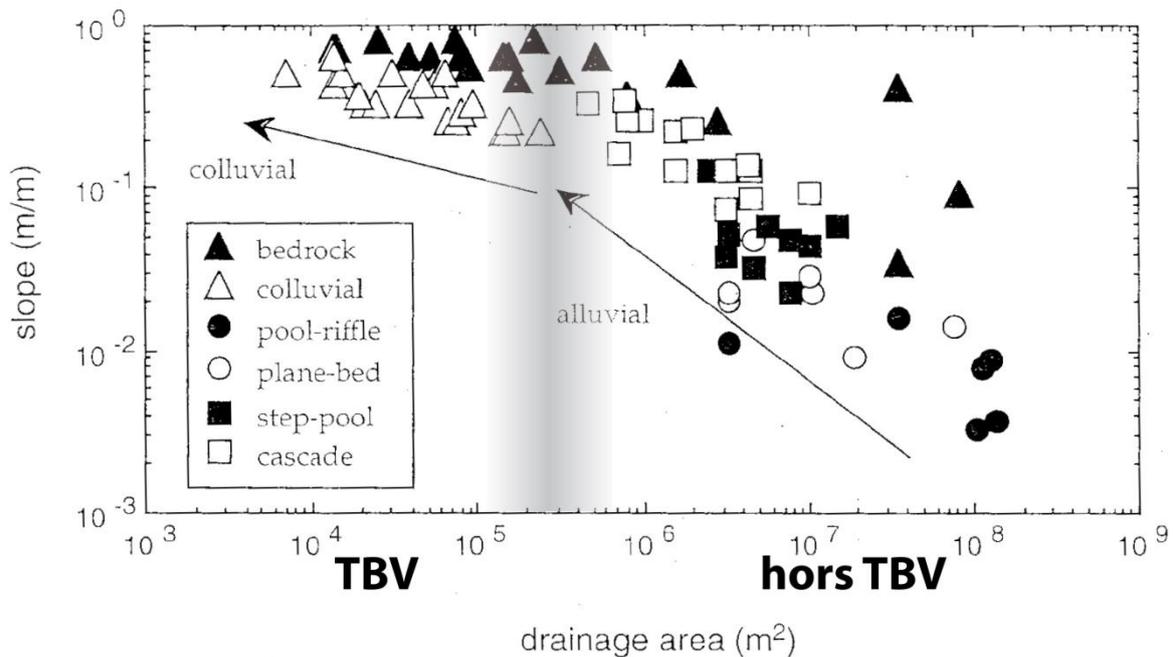
---

<sup>1</sup> **Ordination de Strahler** : "Ordination numérique des affluents d'un cours d'eau partant de la source et s'incrémentant à chaque confluence jusqu'à son exutoire final".



et les chenaux alluviaux (Montgomery & Buffington, 1997; Montgomery & Dietrich, 1989; Montgomery & Foufoula-Georgiou, 1993).

Woods et al. (1995), à partir de données de terrain sur plusieurs bassins versants, proposent une surface de transition entre les processus de versant et les processus fluviaux aux alentours de 1 km<sup>2</sup>. Les bassins versants élémentaires sous cette surface seraient donc dominés par des processus de versant et donc considérés comme des TBV. Ces conclusions convergent parfaitement avec celles de Montgomery and Foufoula-Georgiou (1993) qui observent qu'au-delà d'une surface de BV de 1 km<sup>2</sup>, la relation surface/pente change dans les BV, situant le passage des dynamiques de versant à la reprise fluviale et au début d'incision. Les auteurs interprètent cette limite surfacique comme une limite entre les dynamiques colluviales et alluviales (Figure 1).



**Figure 1. Relation Slope/Area.** Modifiée de Montgomery et Buffington (1997). On voit sur cette figure que la limite entre les TBV et les chenaux drainants des bassins non considérés comme TBV se situe entre 1 et 3 km<sup>2</sup>.

Ces conclusions sont particulièrement intéressantes pour la cartographie, car elles permettent de formaliser la spatialisation des TBV à partir du type de chenal (colluvial), des surfaces drainées ( $\pm 1$  km<sup>2</sup>) et de la relation entre la surface drainée et la pente locale.

Là encore, ces critères sont à tester en fonction des conditions physiographiques, les chenaux colluviaux pouvant exister pour des aires drainées importantes. En effet, dans les régions très planes à hydrodynamisme faible, il faudra cumuler plus de surface drainée pour que le ruisseau atteigne une force tractrice suffisante permettant le transport sédimentaire et donc la domination des processus longitudinaux sur les processus transversaux. Si le principe semble acquis, les seuils sont à adapter à chaque contexte.

## LA QUESTION DES MODALITES D'ALIMENTATION

Pour Burt (1992), les TBV sont des bassins versants avec des écoulements quasi-exclusivement contrôlés par les ruissellements superficiels qui fournissent la majorité des écoulements. Cette vision est en contradiction avec les travaux de Rogers (2010) qui montrent dans le bilan hydrologique total, sur une TBV côtière, la part importante occupée par les écoulements hypodermiques<sup>2</sup> dans ces systèmes amont. Les divers travaux menés par exemple dans les bassins versants expérimentaux de tête de bassin versant dans les Vosges montrent à quel point le débit des ruisseaux dépend plus des apports hypodermiques et souterrains que des ruissellements superficiels (Ambroise et al., 1996; Idir et al., 1999).

Nous n'avons pas trouvé de références spécifiques à la cartographie des TBV en contexte karstique.

<sup>2</sup> **Hypodermique** : écoulement de subsurface, au niveau des horizons supérieurs des sols, sous la surface topographique

Les modalités d'alimentation vont également jouer sur les surfaces d'initiation des cours d'eau et influencer sur la cartographie des TBV. Elles vont également contrôler le déplacement longitudinal de la source, dans le temps et saisonnièrement. Cette question demeure ouverte encore aujourd'hui (Lapides et al., 2021).

## APPLICATIONS A LA CARTOGRAPHIE

La cartographie des TBV passe par deux voies non exclusives entre elles : la cartographie directe sur le terrain et la modélisation.

La **cartographie directe** sur le terrain est la méthode la plus certaine et la plus robuste, tant est qu'elle soit appliquée par un opérateur ayant déjà une certaine expérience. Le repérage pour chaque tronçon hydrologique, des transitions entre chenaux colluviaux et alluviaux permet de faire la cartographie des BV amont et ainsi produire la carte des TBV. Cette manière de procéder a l'avantage de combler les manques des cartes topographiques, notamment concernant les chenaux à écoulement temporaire (Brooks & Colburn, 2011; Colson et al., 2008; Fritz et al., 2013; Lapides et al., 2021). L'inconvénient majeur de cette technique est qu'elle demande énormément de temps de terrain dès lors qu'il s'agit de faire une cartographie sur des zones d'études de plusieurs dizaines de km<sup>2</sup>.

La **modélisation numérique** passe par plusieurs voies et vise à établir et formaliser les règles des concepts énoncés précédemment. Cette approche s'appuie systématiquement sur le traitement d'un MNT<sup>3</sup> avec toutes les difficultés que cela entraîne dans le filtrage de la donnée altimétrique (Costa-Cabral & Burges, 1994; Garbrecht & Martz, 1997; Hutchinson, 1989; O'Callaghan & Mark, 1984; Planchon & Darboux, 2002; Soille, 2004; Tarboton, 1997). Les méthodes multivariées (Clarke et al., 2008; Russell et al., 2015; Villines et al., 2015), mécanistes (Srinivasan & McDowell, 2009; Whiting & Bradley, 1993) ou probabilistes (Istanbulluoglu et al., 2002) foisonnent dans la littérature scientifique.

## 2. LA METHODE RETENUE POUR UNE APPLICATION DE LA CARTOGRAPHIE DES TBV SUR LE TERRITOIRE DU SAGE

L'étude de Poiraud, Laveuf, et al. (2016) préconisait déjà des orientations de méthodologie pour chaque unité morphostructurale du territoire du SAGE (*se reporter à ce rapport de 2016 pour avoir le détail des différentes unités morphostructurelles identifiées sur le territoire*). De manière générale, côté charentais, les méthodes par ordination ou du moins, par approche numérique étaient préconisées mais avec l'intégration d'une part d'expertise eu égard aux complexités géomorphologiques induites par la présence de paléo-rias<sup>4</sup> et de segments hydrauliques purement côtiers. Coté médocain, la présence du plateau landais en amont des réseaux hydrographiques rendait la cartographie compliquée, car cette unité avait été considérée comme à exclure.

Finalement, suite à plusieurs essais avec l'ordination de Strahler, nous avons dû abandonner cette approche du fait de la trop forte anthropisation du réseau hydrographique. En effet, les fortes densités de réseau, notamment sur le Plateau landais et le BV de la Livenne, induisait une augmentation rapide de la hiérarchie des niveaux d'ordre qui rendait caduque cette approche (Figure 2).

L'analyse du réseau issu de la BD-TOPO (*référentiel cartographique français de l'IGN, bases de données permettant de réaliser toutes les cartographies*) permet de nous renseigner plus en avant sur la structure hydrographique du territoire du SAGE. En effet, 80% du réseau cartographié est « naturel » et 20% est artificiel. Plus des 2/3 des sections hydrologiques cartographiées sont intermittentes, pour 1/3 de permanentes. Les rapports entre ruisseau pérenne et intermittent, en longueur et en densité, varient énormément selon les unités morphostructurelles (Figure 3), ce qui justifie pleinement une approche individualisée par grande unité. Par exemple, on observe très bien une très forte densité de réseau sur les Collines de l'Entre-Deux Mers avec une majorité de rivières pérennes.

---

<sup>3</sup> MNT : Modèle Numérique de Terrain – fichier numérique avec des données d'altitude pour chaque position x ; y, tous les 5 mètres

<sup>4</sup> Paléo-rias : partie aval d'une vallée qui était autrefois envahie par la mer

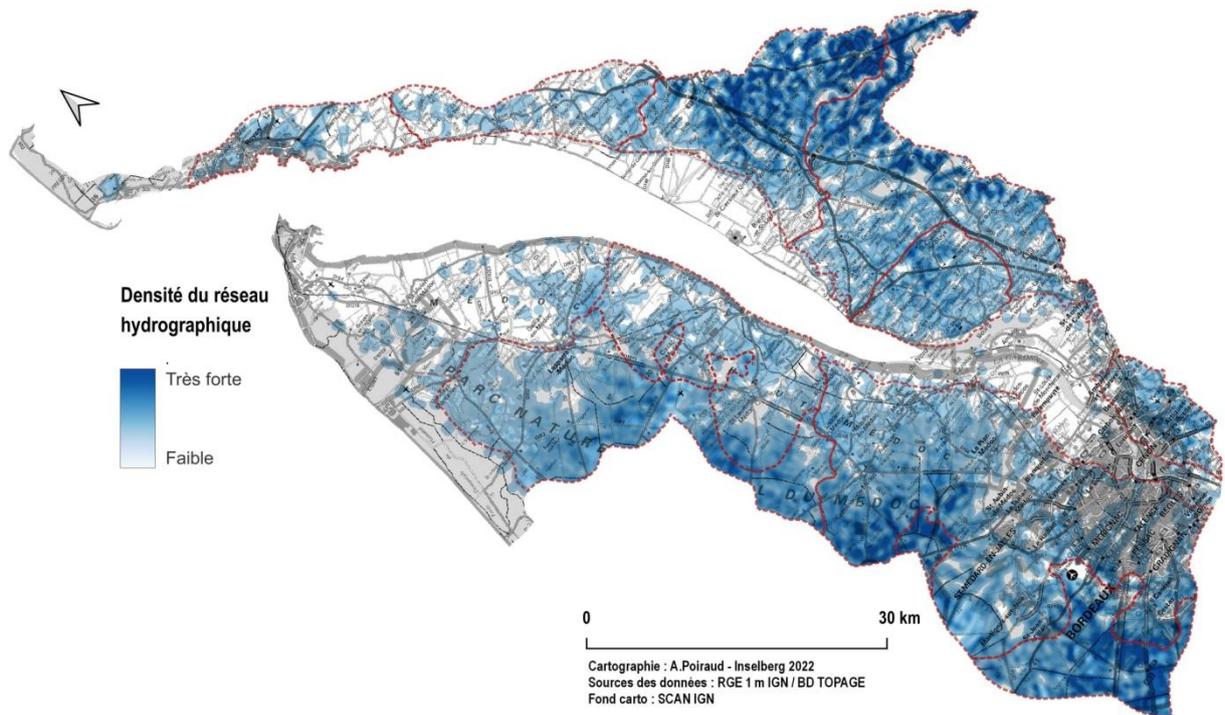


Figure 2. Densité du réseau hydrographique d'après la BD TOPAGE (Référentiel hydrographique français, IGN). Rotation du nord géographique de -50°. Extraction des zones de marais flamandais à forte densité de canaux.

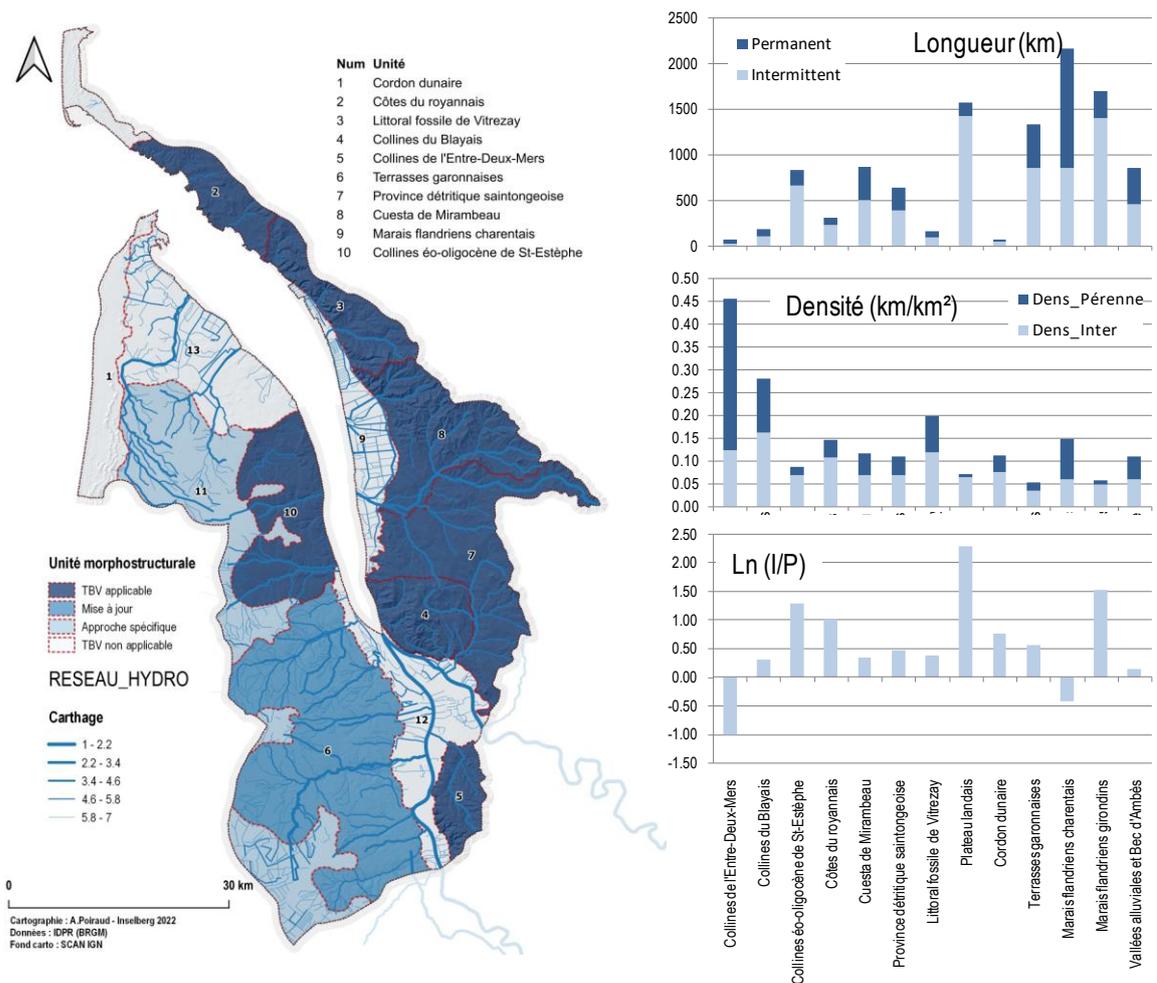


Figure 3. Structure hydrographique par Unité Morphostructurale, à partir de la BD-TOPO.

Nous avons donc analysé les facteurs qui pourraient expliquer les conditions d'initiation des réseaux permanents et intermittents, comme première approche de la discrimination des TBV (Figure 4).

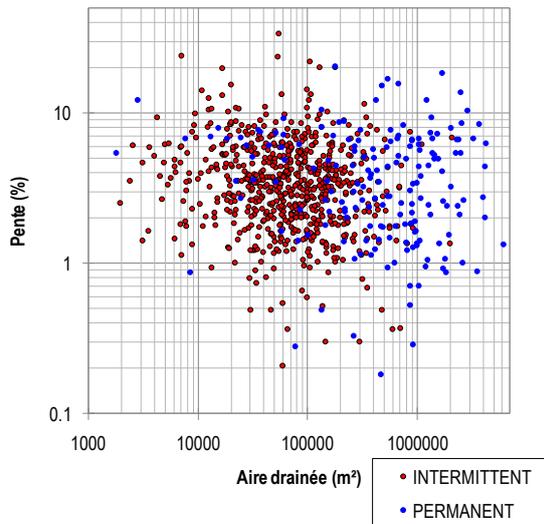


Figure 4. Distribution des points d'initiation des réseaux permanents et intermittents dans l'espace Aire/Pente. Données : BD-TOPO.

De manière générale, les surfaces drainées tendent à discriminer les initiations intermittentes des initiations permanentes, malgré un fort recouvrement des deux populations. Par contre, la pente s'avère être un critère non pertinent et qu'on ne pourra donc pas utiliser.

Ces premiers constats nous ont conduit à privilégier une approche mixte basée sur la définition, par bassin versant principal, des surfaces de transition entre chenaux colluviaux et alluviaux, à partir d'un jeu d'entraînement acquis sur le terrain. Cette approche combine donc la cartographie directe (observation sur le terrain) et la cartographie statistique (extraction des surfaces drainées permettant le passage colluvial -> alluvial par BV et inférence).

Nous avons donc réalisé au printemps et à l'été 2021, un échantillonnage sur l'ensemble de la zone d'étude, au niveau des chenaux d'écoulement, afin de caractériser le caractère colluvial, alluvial, colluvio-alluvial, etc. de chaque section hydrologique observée. Au total, nous avons réalisé 397 observations de terrain, constituant ainsi un jeu d'entraînement pour mieux contraindre les modèles par BV (Figure 5).

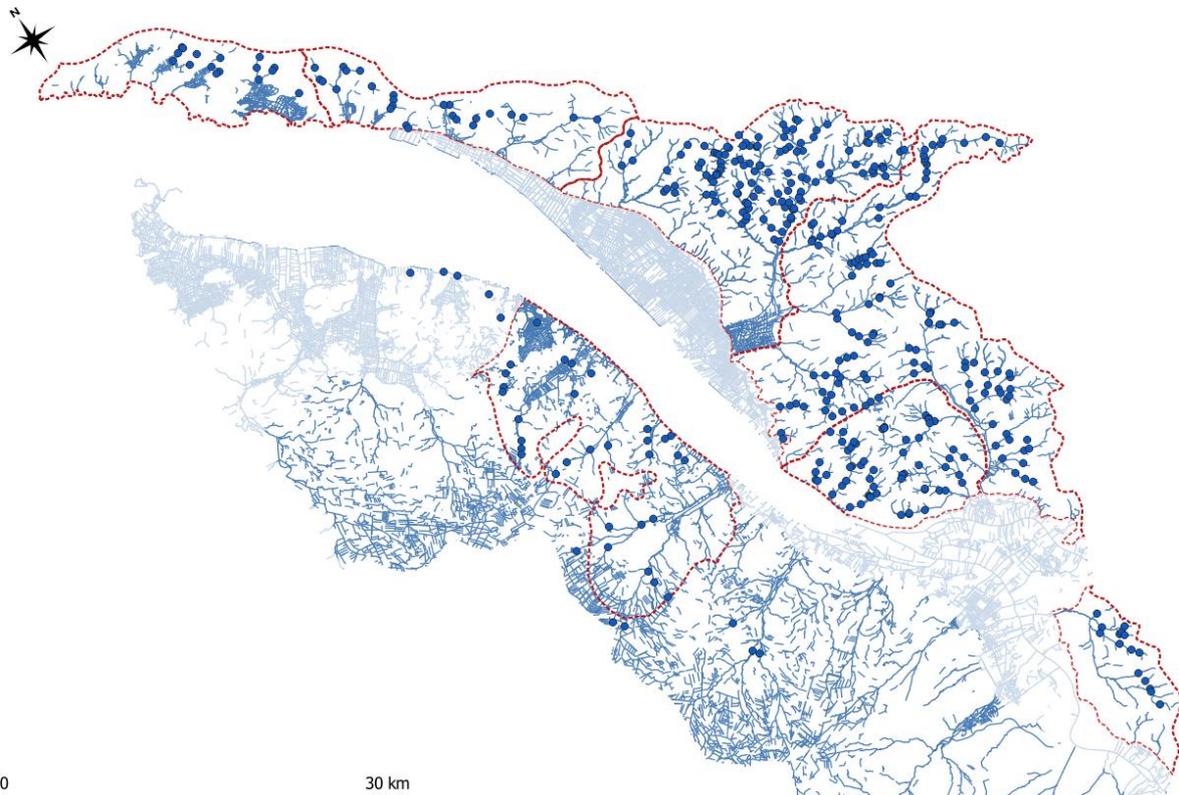


Figure 5. Observations de terrain réalisées en 2021. Point bleu = observation. Ligne bleu = réseau hydrographique issu de la BD-TOPO.

Nous avons retenus les critères suivants pour caractériser les chenaux colluviaux et alluviaux (Tableau 1) :

Tableau 1. Critères de différenciation entre chenaux colluviaux et alluviaux sur le territoire du SAGE gironde.

Chenal colluvial	Chenal alluvial
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Largeur du chenal faible, &lt; 2m</li> <li>▪ souvent recalibré en fossé drainant un thalweg simple</li> <li>▪ occupant souvent des vallons en berceau et encaissant les formations géologiques ou colluviales</li> <li>▪ connexion directe du chenal aux versants</li> <li>▪ dans certains cas, il s'agit de fossés drainant directement la nappe phréatique (système dit « landais »)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Largeur du chenal &gt; 2-3 m</li> <li>▪ débit minimal avec bon écoulement</li> <li>▪ présences de modelés alluviaux (rides de fond, banquettes latérales, surlargeur, terrasse, lit majeur)</li> <li>▪ contexte de vallée marquée</li> <li>▪ souvent présence d'une ripisylve</li> <li>▪ formation superficielle alluviale, mais difficile à observer dans la plupart des cas (matériel sableux)</li> </ul>

Ce jeu d'entraînement nous a permis de réaliser des analyses statistiques par type de chenal et par BV afin d'extraire les statistiques représentatives pour divers paramètres morphométriques. C'est à partir des analyses univariées que nous avons pu déterminer, pour chaque BV principal, des seuils de valeurs permettant de construire les modèles de généralisation.

### 3. PRINCIPAUX RESULTATS

#### CHOIX DES FACTEURS EXPLICATIFS

L'analyse croisée des observations et des points d'initiation des segments à écoulement permanent ou temporaire issus de la BD-TOPO avec les principaux facteurs potentiellement explicatifs permet dans un premier temps de ne conserver que les meilleurs facteurs à intégrer aux modèles.

Pour ce qui concerne les points d'initiation des segments permanents ou intermittents, seule l'aire drainée est significative avec une limite entre les deux populations autour de 0.1 km<sup>2</sup> (10 ha). Dans une moindre mesure, le *Topographic Wetness Index*<sup>5</sup> (TWI) est également discriminant autour de la valeur de 10. Les autres critères d'altitude et de divers dérivées de pente ne sont pas du tout significatifs pour séparer les deux populations.

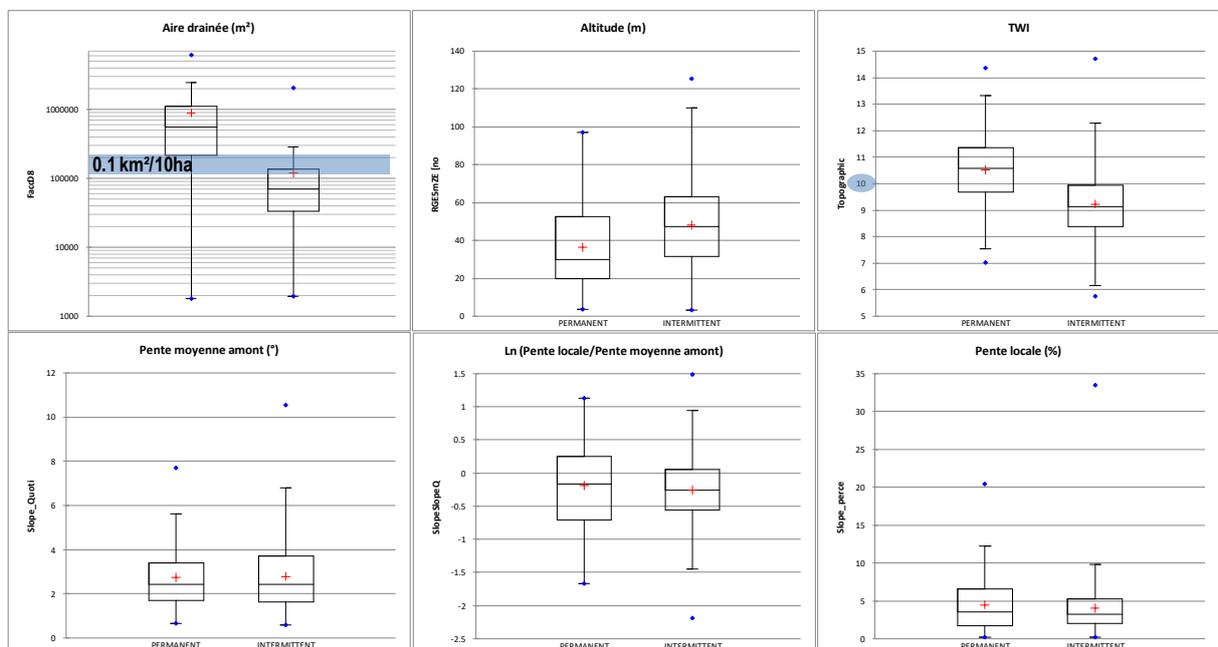


Figure 6. Box-plot des distributions des points d'initiation en fonction des facteurs explicatifs. Sources BD-TOPO. N permanent = 176 ; N temporaire = 652.

De la même manière, les résultats des croisements entre facteurs explicatifs et observations de terrain permettent d'extraire les principaux facteurs à retenir dans les modèles (Figure 7).

<sup>5</sup> Indice des capacités de rétention en eau de surface et subsurface (Beven & Kirkby, 1979).  $TWI = \ln \frac{A}{S}$ , avec A = aire drainée amont et S = pente locale

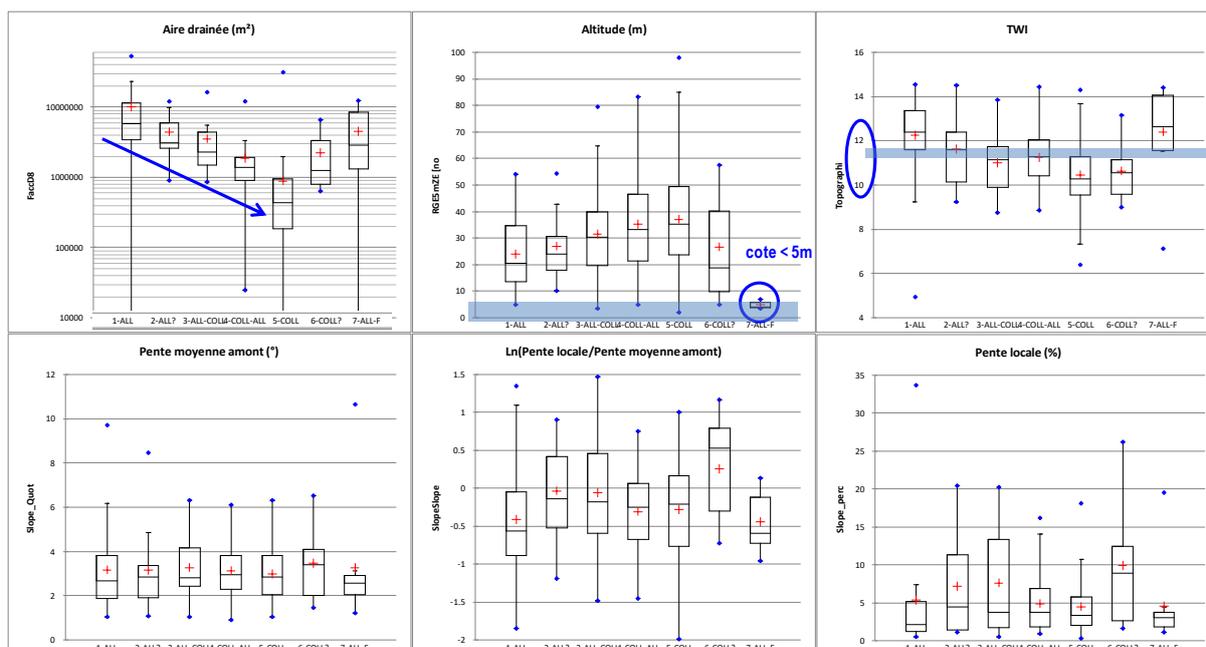


Figure 7. Box-plot des distributions des points d'initiation observés sur le terrain en fonction des facteurs explicatifs. 1-ALL = 58 ; 2-ALL? = 14 ; 3-ALL-COLL= 24 ; 4-COLL-ALL= 51 ; 5-COLL = 184 ; 6-COLL? = 11 ; 7-ALL-F = 9

L'aire drainée est significativement discriminante et permet même de mettre en évidence les gradients dans les transitions entre alluvial pur et colluvial pur. Selon ces résultats, 75% des chenaux alluviaux drainent une aire supérieure à 3 km<sup>2</sup> tandis que 75% des chenaux colluviaux drainent une aire inférieure à 1 km<sup>2</sup>. Entre ces deux seuils, s'étalent les gradients alluvio-colluvial à colluvio-alluvial avec une limite floue entre 1.5 et 2 km<sup>2</sup>.

Les marais flamandais se démarquent très nettement sous la cote altitudinale des 5 mètres NGF, mais ce critère n'est pas discriminant au-dessus de cette cote. Ces secteurs de marais flamandais sont exclus de l'analyse de TBV, soit toutes les surfaces situées à une altitude NGF < 4.5 mètres.

Le TWI apparaît également discriminant entre les chenaux alluviaux et colluviaux avec toute une transition entre les valeurs de 10 à 12. La valeur de TWI = 11 semble être une limite floue entre les chenaux alluviaux et colluviaux.

Les critères de pente ne sont significativement pas explicatifs.

## ANALYSE A L'ECHELLE DES UNITES MORPHOSTRUCTURALES (UM)

L'analyse des points d'initiation extraits de la BD-TOPO permet déjà, par UM, d'extraire des gammes de surface d'initiation (Figure 8).

En premier lieu, on observe une forte variabilité des surfaces drainées nécessaires à l'initiation des cours d'eau intermittents et permanents selon les secteurs. Les plus fortes surfaces d'initiation des cours d'eau intermittents sur le secteur charentais calcaire par rapport au secteur charentais sableux nous incitent à voir l'effet de la lithologie et des différences entre les systèmes aquifères de nappes profondes (calcaire) et des nappes plus superficielles (phréatique dans le cas des recouvrements sableux). L'effet de relief semble également jouer, car plus le relief est différencié, et moins les surfaces drainées sont importantes pour réaliser l'initiation des cours d'eau (ex. secteur du Blayais).

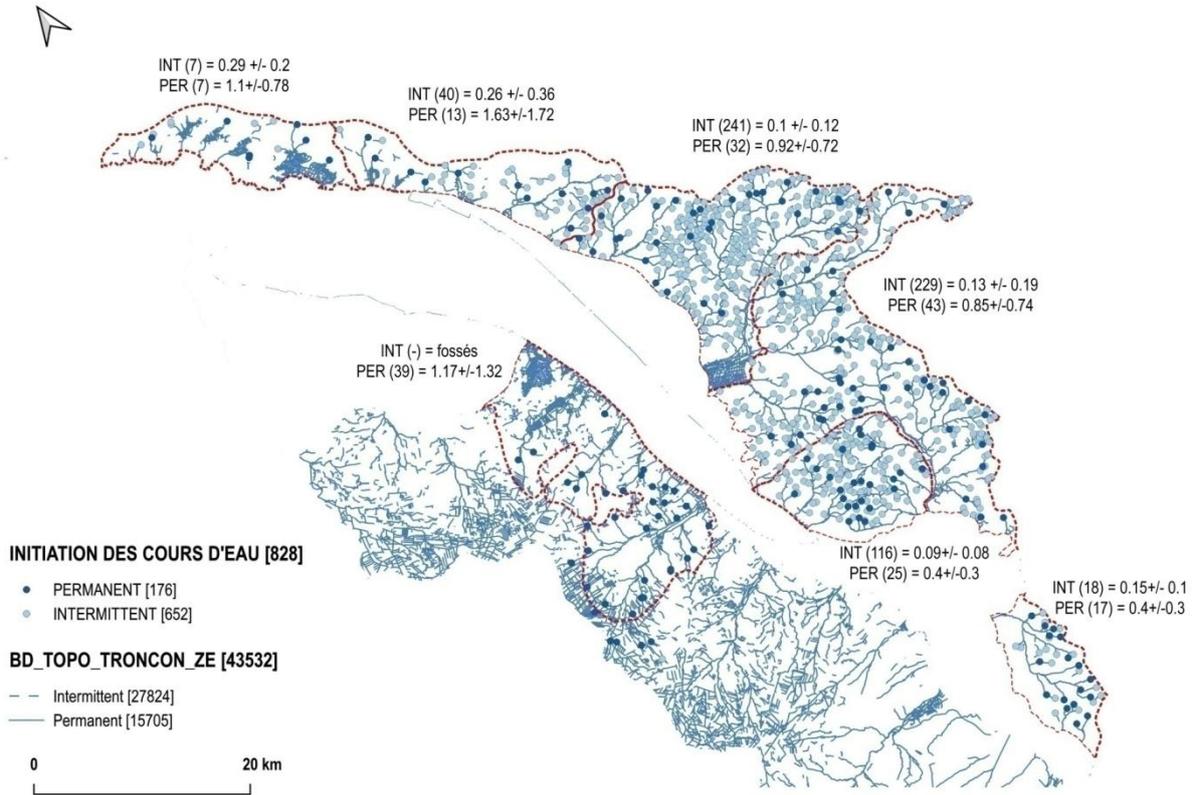


Figure 8. Surfaces d'initiation des ruisseaux par type, par UM. Données : BD-TOPO. INT = Intermittent ; PER = Permanent ; (7) = N individus ;  $0.29 \pm 0.2$  = moyenne et écart-type à  $1 \sigma$ , en  $\text{km}^2$

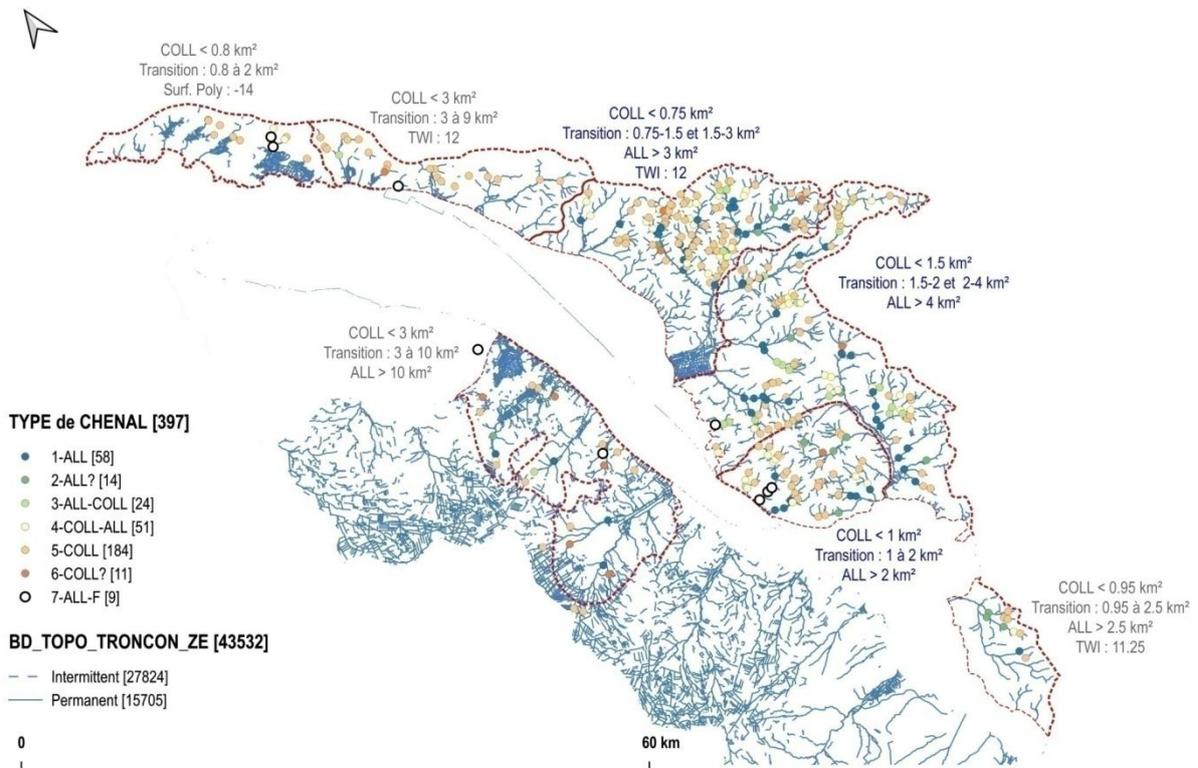


Figure 9. Surfaces d'initiation des chenaux par type, par UM. COLL = chenal colluvial ; Transition = transition et gradients entre chenaux colluviaux et alluviaux ; ALL = chenal alluvial ; Surf.Poly : facteur complémentaire, altitude en m ; TWI = facteur complémentaire, valeur de TWI seuil. En grisé, les UM pour lesquels les résultats sont en limite de significativité statistique.

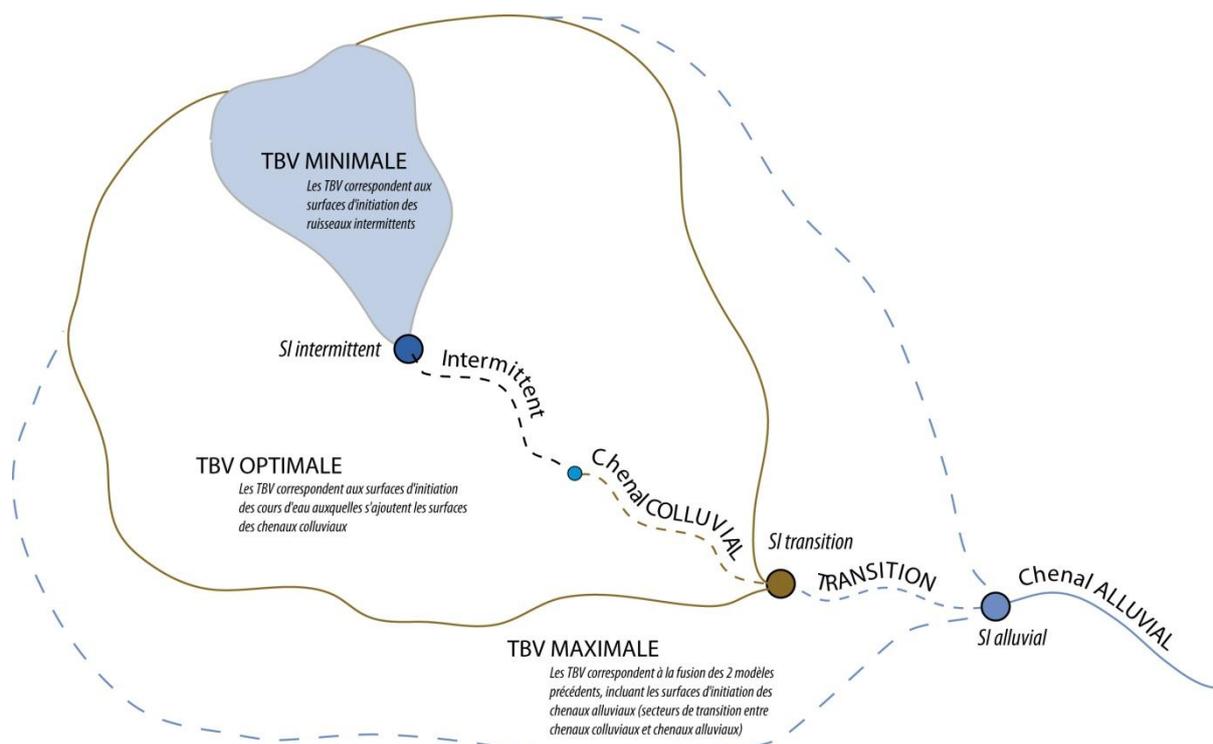


Figure 10. Conceptualisation du modèle cartographique à implémenter pour chaque UM.

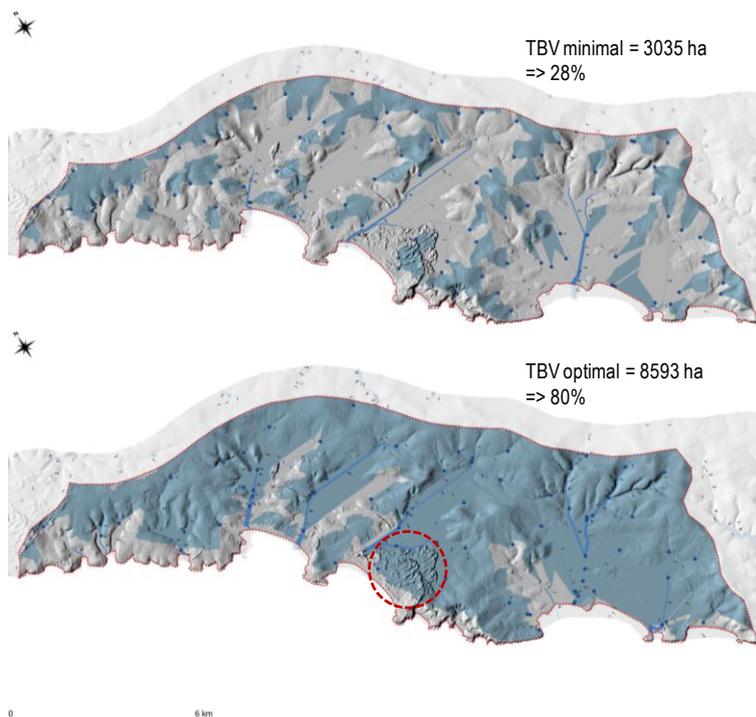
## 4. LES MODELES OBTENUS ET LA CARTE DES TBV

Les principaux paramètres des modèles pour chaque UM ont été reportés dans le Tableau 2 ci-après :

Tableau 2. Paramètres des modèles.

Paramètre	Côtes du Royannais	Littoral fossile de Vitrezay	Cuesta de Mirabeau	Province Saintongeaise	Collines du Blayais	Collines de l'Entre-Deux-Mers	Collines de St-Estèphe
	Aire drainée (km <sup>2</sup> )						
Intermittent	0.29+/-0.2	0.26+/-0.36	0.1+/-0.12	0.13+/-0.19	0.09+/-0.08	0.15+/-0.1	fossés
Permanent	1.1+/-0.78	1.63+/-1.72	0.92+/-0.72	0.85+/-0.74	0.4+/-0.3	0.4+/-0.3	1.17+/-1.32
Ch. colluvial	< 0.8	< 3	< 0.75	< 1.5	< 1	< 0.95	< 3
Transition	0.8 – 2	3 - 9	0.75-1.5 / 1.5-3	1.5-2 / 2-4	1-2	0.95-2.5	3-10
Ch. alluvial	-	-	> 3	> 4	> 2	> 2.5	> 10
TWI	-	12	12	-	-	11.25	-
Surf.Poly	-14	-	-	-	-	-	-
COMMENTAIRES	Modèle peu robuste problème des colmatages flandriens dans le modèle optimal	Modèle moyennement robuste mais cohérent	Modèle robuste	Modèle robuste peut être précisé par une implémentation à partir des observations	Modèle robuste	Modèle moyennement robuste mais cohérent	Modèle peu fiable Test avec les surfaces piézométriques

## COTES DU ROYANNAIS (FIGURE 11)



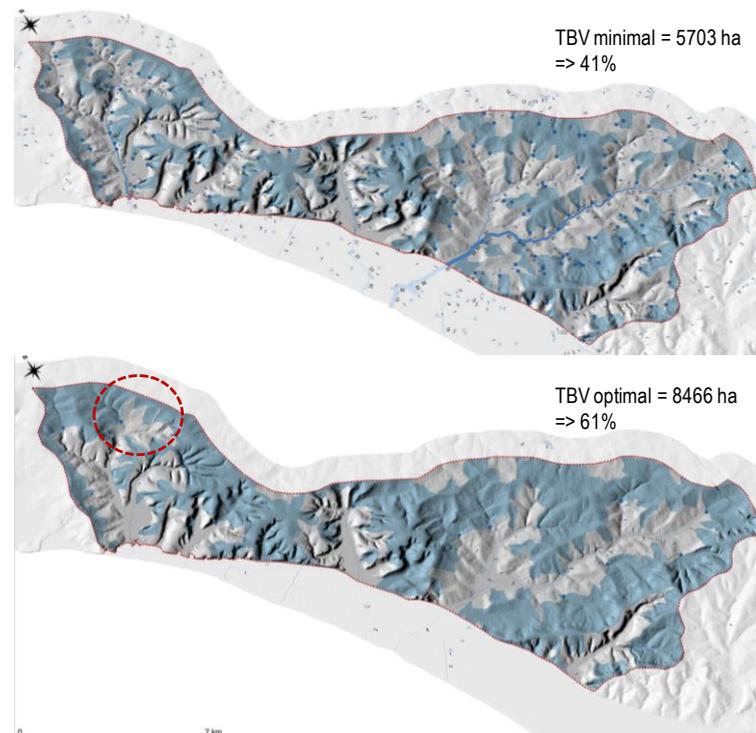
Ce modèle est peu robuste du fait de la configuration littorale de l'UM.

Figure 11. Modèles pour l'UM Côte du Royannais

L'écart est important entre les modèles minimal et optimal, le modèle maximal ne pouvant exister car il recouvre toute l'UM, ce qui n'est pas cohérent.

Cependant, du point de vue expert, le modèle optimal nous paraît trop étendu, car il recouvre des surfaces basses flandriennes, ce qui nécessite une rectification par un modèle d'altitude ainsi que des retouches manuelles. Le cercle rouge sur la Figure 11 figure une extension des modèles sur un cordon dunaire, ce qui est un artéfact.

## LITTORAL FOSSILE DE VITREZAY (FIGURE 12)



Ce modèle est moyennement robuste du fait d'un contrôle topographique qui n'est pas dominant sur les fonctionnements hydrologiques, les processus de nappe dans les calcaires faussant quelque peu la relation Chenal colluvial et surface d'initiation.

Figure 12. Modèles pour l'UM Littoral fossile de Vitrezay

Cependant, du point de vue visuel et expert, le modèle est cohérent car il recouvre bien les interfluves et ne colonise pas trop les sections basses. Nous relevons cependant quelques artéfacts (cercle rouge notamment) nécessitant des retouches manuelles.

## LA CUESTA DE MIRAMBEAU (FIGURE 13)

Ce modèle est robuste. Il est bien contraint par les observations, nombreuses dans cette UM, et la topographie contrôle assez bien les transitions colluvial -> alluvial. La gradation de surface couverte entre les 3 modèles est régulière et les modèles optimal et maximal recouvrent bien les interfluves.

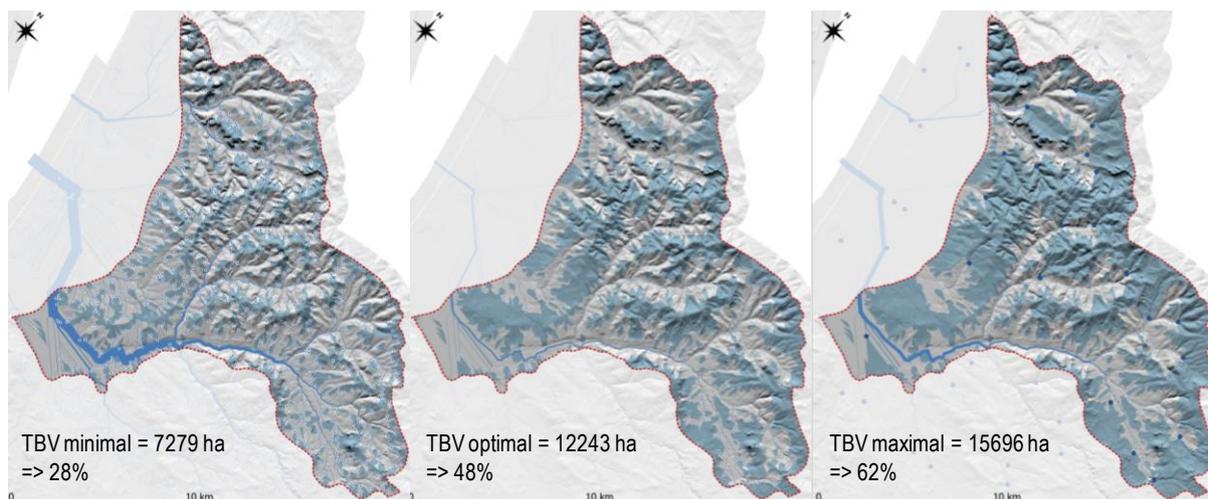


Figure 13. Modèles pour l'UM de la cuesta de Mirambeau

Ce modèle est un de celui qui répond le mieux de par le fonctionnement des BV dont la part des ruissellements de surface et hypodermiques semblent bien contribuer au contrôle des écoulements. Il y a donc une relation assez directe entre les surfaces drainées et l'hydrodynamisme observé.

### LA PROVINCE SAINTONGEOISE (FIGURE 14)

Ce modèle est également robuste, le fonctionnement hydrologique étant assez proche de celui de la cuesta de Mirambeau, pour les parties sableuses. Cependant, nous observons une large extension des TBV sur certains sous-bassins versants qui semblent relever d'artéfacts et de sur-généralisations. Bien que cohérents, les modèles optimal et maximal semblent surestimer l'extension des TBV dans certains secteurs.

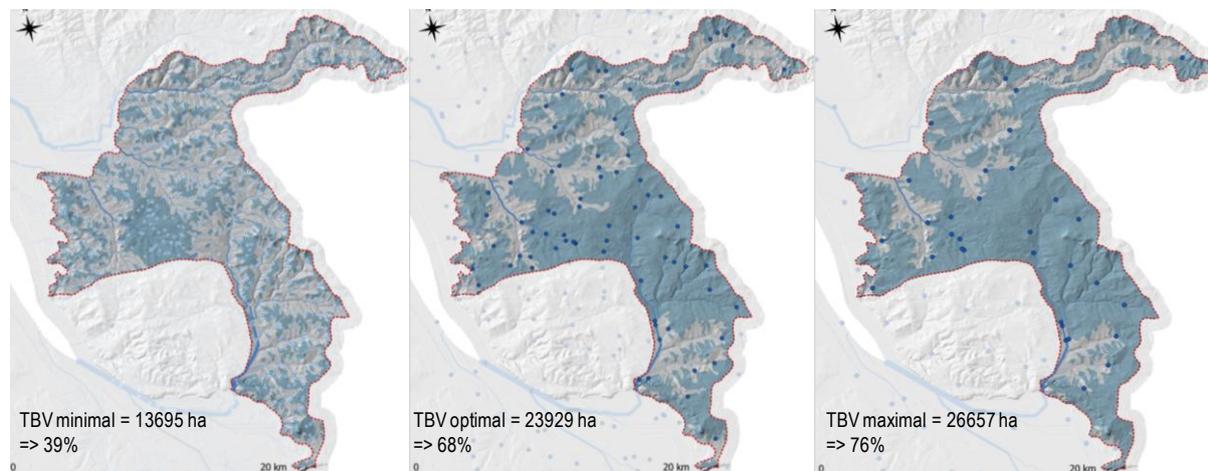


Figure 14. Modèles pour l'UM de la Province Saintongeaise.

Les recouvrements de sable induisent des fonctionnements phréatiques parfois proches des systèmes landais. Ce type de fonctionnement semble fausser quelque peu la relation entre aire drainée et type de chenal. Ce modèle, bien que contraint par beaucoup d'observations et assez robuste, implique des reprises ponctuelles manuelles dans les secteurs de trop forte extension des TBV.

### LES COLLINES DU BLAYAIS (FIGURE 15)

Ce modèle est bien contraint et répond bien avec une bonne couverture des interfluves et des versants, tout en ne s'étendant pas trop sur les parties basses des sous-BV. La gradation de l'augmentation des surfaces entre modèle est également régulière, sans à-coups.

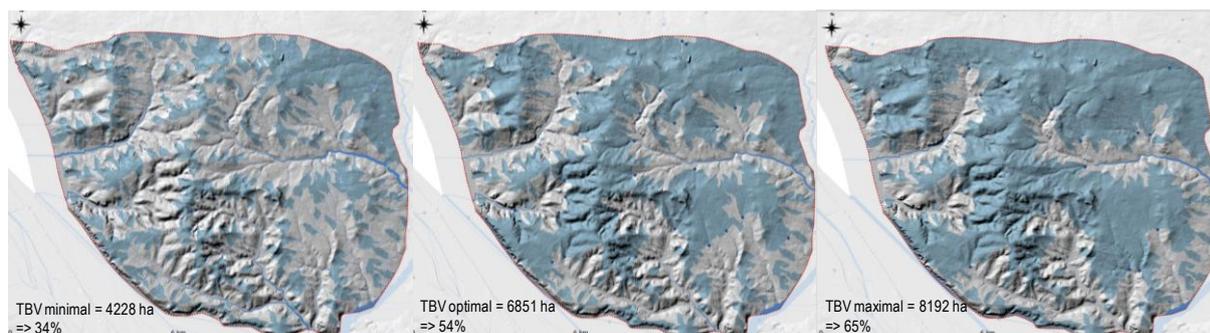


Figure 15. Modèles pour l'UM des Collines du Blayais.

Les collines du Blayais ont des sols moins filtrants permettant un ruissellement plus important et donc une influence plus directe des surfaces drainées sur l'hydrodynamisme observé. De ce fait, le modèle fonctionne plutôt bien sur ce secteur.

### LES COLLINES DE L'ENTRE-DEUX-MERS (FIGURE 16)

Ce modèle a été délicat à construire du fait de la forte urbanisation du secteur avec de longs tronçons hydrographiques qui passent en souterrain ou sont fortement modifiés (canalisation, etc.). De fait, les observations de terrain sont de moins bonne qualité et sont plus incertaines. Elles sont également beaucoup moins nombreuses car les fenêtres d'observation y sont plus rares.

Ce modèle a donc été construit à partir de celui des Collines du Blayais, morphologiquement proches et avec des formations géologiques susceptibles de donner des sols aux propriétés d'infiltration proches également. Il n'en reste pas moins que ce contexte est plutôt défavorable pour créer un « bon » modèle.

Les modèles optimal et maximal sont très recouvrants et laissent envisager une surestimation de la couverture des TBV. A noter que ce modèle a fait l'objet de remarques de la part de la technicienne en place sur le secteur.

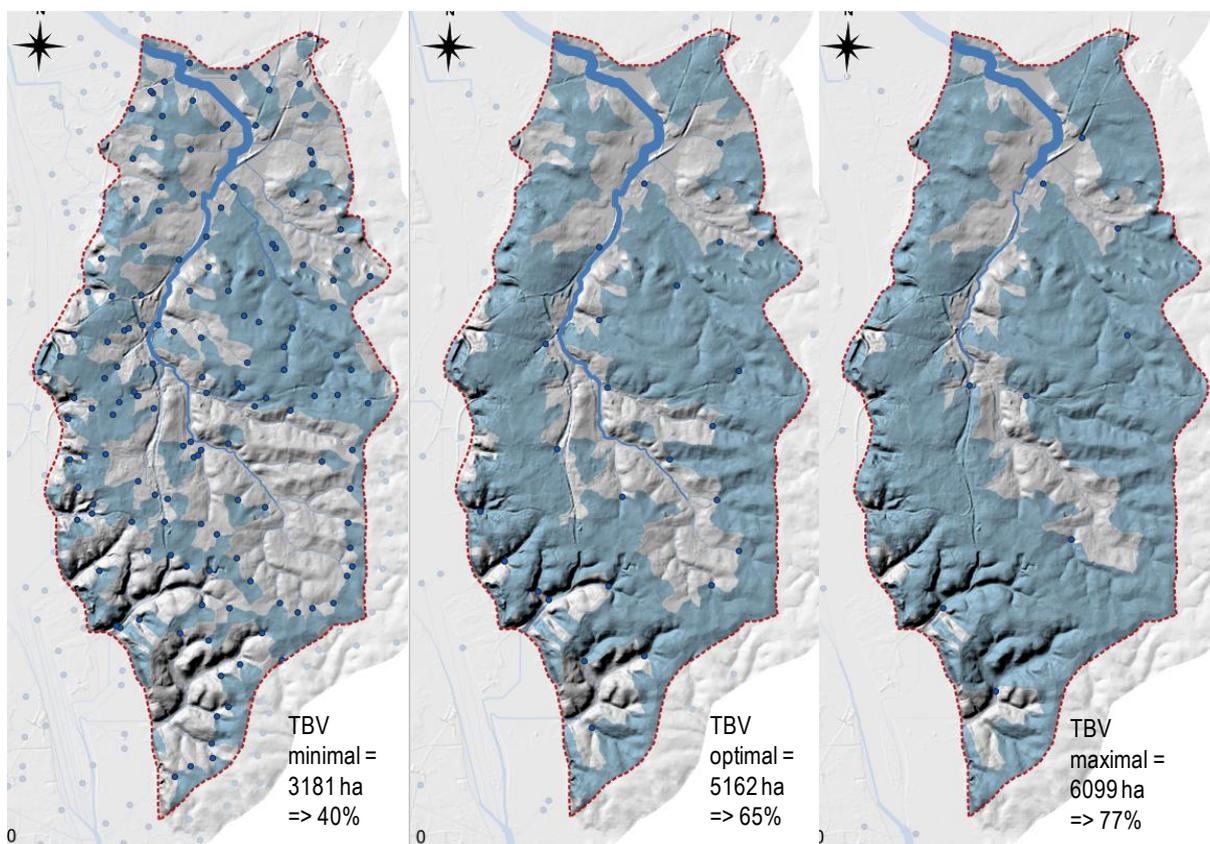


Figure 16. Modèles pour l'UM des Collines de l'Entre-Deux-Mers.

Ce modèle implique des retouches manuelles, mais avec finalement peu d'éléments pour guider cette reprise. Nous restons donc sur un transfert du modèle Blayais, ce qui n'est pas satisfaisant.

## LES COLLINES DE ST-ESTEPHE (MEDOC)

Ce modèle pose d'importants problèmes méthodologiques. En effet, le secteur des collines de St-Estèphe est en fait alimenté par l'UM du Plateau landais, lequel sort complètement de la définition classique des TBV. Cependant, constituant les amonts du réseau hydrographique des Collines de St-Estèphe, on ne peut pas l'ignorer. Les observations de terrain réalisées permettent d'avoir quelques chiffres sur les aires d'initiation, mais celles-ci sont largement faussées par le fonctionnement phréatique du plateau landais.

Les essais de modélisation donnent des résultats incohérents qu'on ne peut pas considérer. Nous les avons donc présentés au SMIDDEST mais pas retenus.

Conceptuellement, l'ensemble du Plateau Landais est une zone « source » pour le réseau hydrographique médocain. Vu sous cet angle, il peut constituer dans son ensemble une « TBV phréatique » contrôlée par la variation du niveau de nappes. Nous avons tenté d'approcher ce point de vue à travers le modèle d'inondation par remontées de nappe fourni par le BRGM et par un modèle comparant le niveau topographique au niveau piézométrique général de la nappe du Plio-quatenaire (Figure 17). Le modèle piézométrique nous paraît encore trop imprécis pour être utilisé. Celui des remontées de nappes pourrait tendre vers une première approximation de l'extension des TBV.

De notre point de vue, le Plateau landais pose toujours le problème de sa compatibilité avec le concept des TBV et ne peut y être intégré qu'avec une extension de la définition de TBV. **Un travail de recherche reste à mener sur ce cas particulier.**

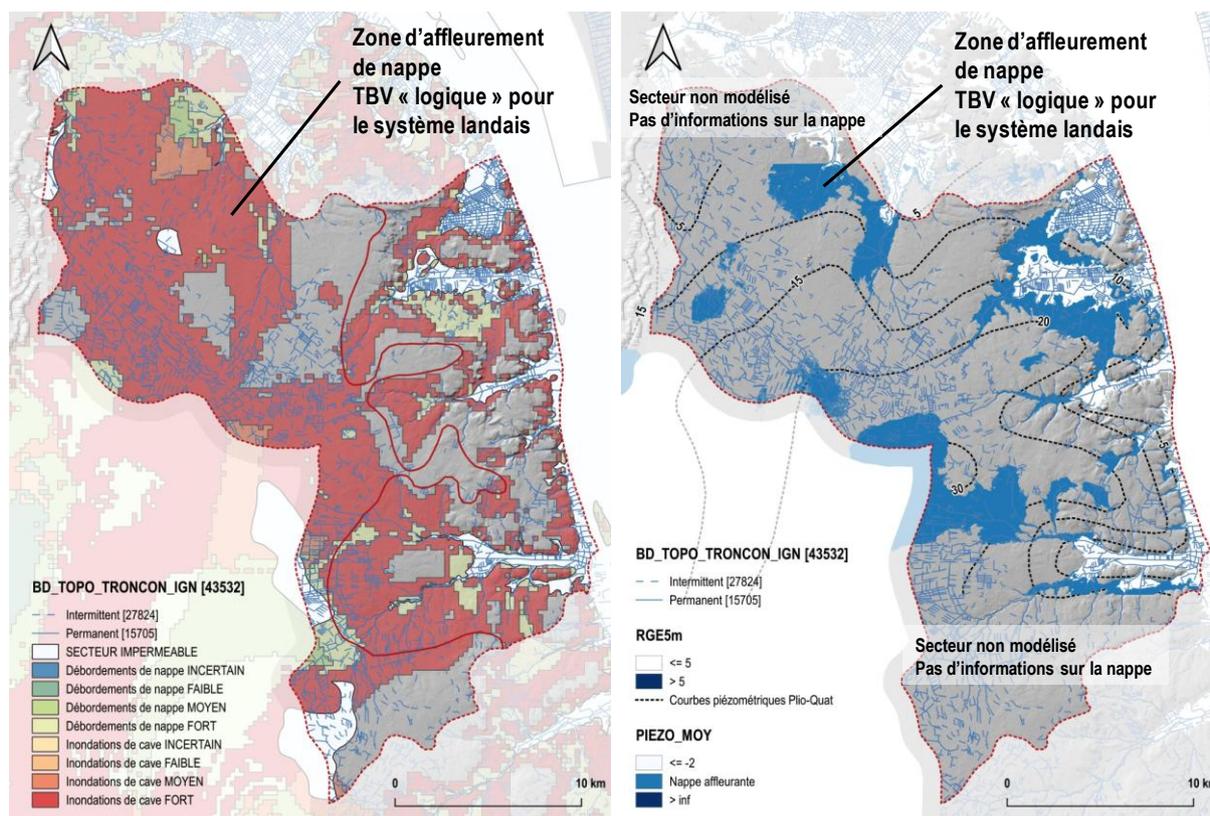


Figure 17. Modèles de nappes pour le Plateau Landais alimentant le système médocain. A gauche, carte des inondations par remontée de nappe (BRGM). A droite, secteur d'affleurement théorique de la nappe (différence niveau piézo/niveau topo). Les zones bleu correspondent aux affleurements théoriques de la nappe, donc à des zones fortement contributrice.

## FINALISATION ET CARTOGRAPHIE

Ces modèles ont fait l'objet d'une consultation auprès de chaque syndicat de bassin pour discussions et validation du modèle qui paraissait le plus pertinent par les techniciens de secteur. Les modèles validés ont ensuite été repris manuellement pour préciser certains contours, supprimer les artefacts inhérents à ce type de construction et parfois rectifier des erreurs. Nous y avons appliqué le filtre d'altitude > 4.5 mètres pour supprimer les colmatages flandriens.

La couche a été vérifiée topologiquement et est disponible sous format vectoriel en EPSG 2154 (Figure 18).

La base attributaire est composée de 17 champs :

Attributs de qualification	<p><b>Area</b> : surface en ha  <b>Perimeter</b> : périmètre en m  <b>TYPE</b> : type de TBV avec</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>I- TBV de tête à prioriser en termes d'action (parties les plus amont des BV avec une forte connexion aux versants bordiers et donc aux pratiques et usages anthropiques)</li> <li>II- TBV alimentant une section hydraulique mentionnée dans la BD-TOPAGE, en priorité 2 pour les actions de gestion</li> <li>TYPE III - Versant complexe alimentant des flux non référencés dans la BD-TOPAGE, secondaire</li> <li>TYPE LANDAIS - grandes zones phréatiques</li> </ul>
Attributs morphométriques	<p><b>SLOPE (mean)</b> : pente moyenne de la TBV en °  <b>SLOPE (STDD)</b> : écart-type à 1 sigma de la TBV en ° (plage de pente significative autour de la moyenne, c'est la variation de pente par rapport à la moyenne)  <b>TOPAGE</b> : linéaire de cours d'eau référencé dans la BD TOPAGE inclus dans la TBV, en mètre  <b>TOP-DENS</b> : densité de linéaire de cours d'eau référencé dans la BD TOPAGE inclus dans la TBV, en km/km<sup>2</sup>  <b>NETWORK</b> : linéaire de flux modélisés inclus dans la TBV, en mètre  <b>NET-DENSITY</b> : densité de linéaire de flux modélisés inclus dans la TBV, en km/km<sup>2</sup>  <b>IDPR_MOD</b> : Ln (TOP-DENS / NET-DENS), indice d'infiltration ou de phréatisme, + c'est bas, + ça s'infiltré et + c'est haut, + ça ruisselle ou que c'est phréatique</p>
Attributs hydrogéologiques dérivées de la BD-LISA ( <a href="https://bdlisa.eaufrance.fr/">https://bdlisa.eaufrance.fr/</a> )	<p><b>CodeEH</b> : code de l'entité hydrologique  <b>EtatEH</b> : synthèse du type de nappe  <b>NatureEH</b> : type d'unité selon leur degré de perméabilité  <b>MilieuEH</b> : modalité de l'aquifère principal  <b>ThemeEH</b> : grand domaine hydrogéologique  <b>OrigineEH</b> : origine de la donnée pour interprétation  <b>LIBEH</b> - libellé du code EtatEH</p>

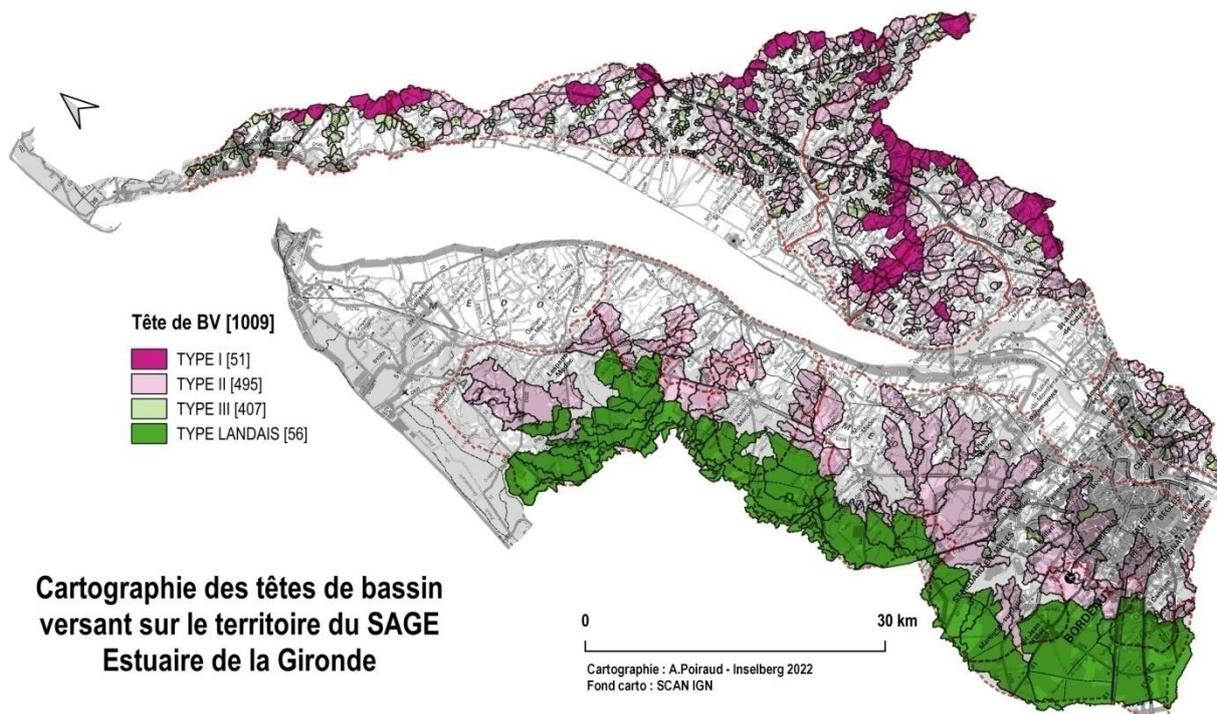


Figure 18. Carte finalisée des TBV sur le territoire du SAGE Gironde. Cette carte est disponible par planche à l'échelle 1/25000 dans l'atlas cartographique.

Au total, 1009 TBV ont été cartographiées et caractérisées (Figure 19). Le type II domine largement en nombre et en surface couverte. Le type III est fréquent mais couvre une faible surface totale. Les types I et LANDAIS, bien que minoritaires en nombre, couvrent des surfaces importantes (1/3 pour le type LANDAIS). Les distributions des surfaces par type montrent que le type III est dominé par des petites TBV tandis que le type LANDAIS est constitué de grandes TBV.

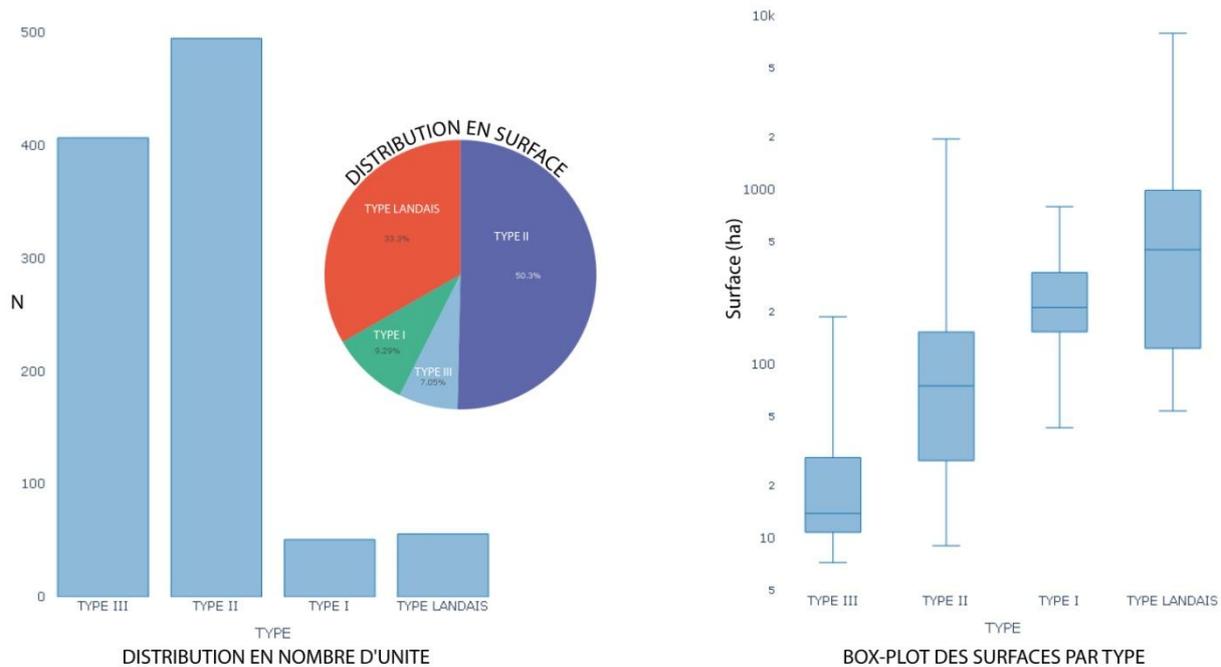


Figure 19. Statistiques de base sur la dispersion des TBV par type.

La carte permet également de voir que les TBV côté rive gauche sont largement plus étendues que celles côté rive droite (Figure 18). Ceci est directement dépendant du fonctionnement phréatique du Plateau Landais, en sachant que ces TBV sont en limite de définition.

## 5. DISCUSSION

Cette seconde phase du travail de cartographie et de caractérisation des TBV a permis d'approfondir la question dans un contexte physiographique limite pour l'application du concept de TBV.

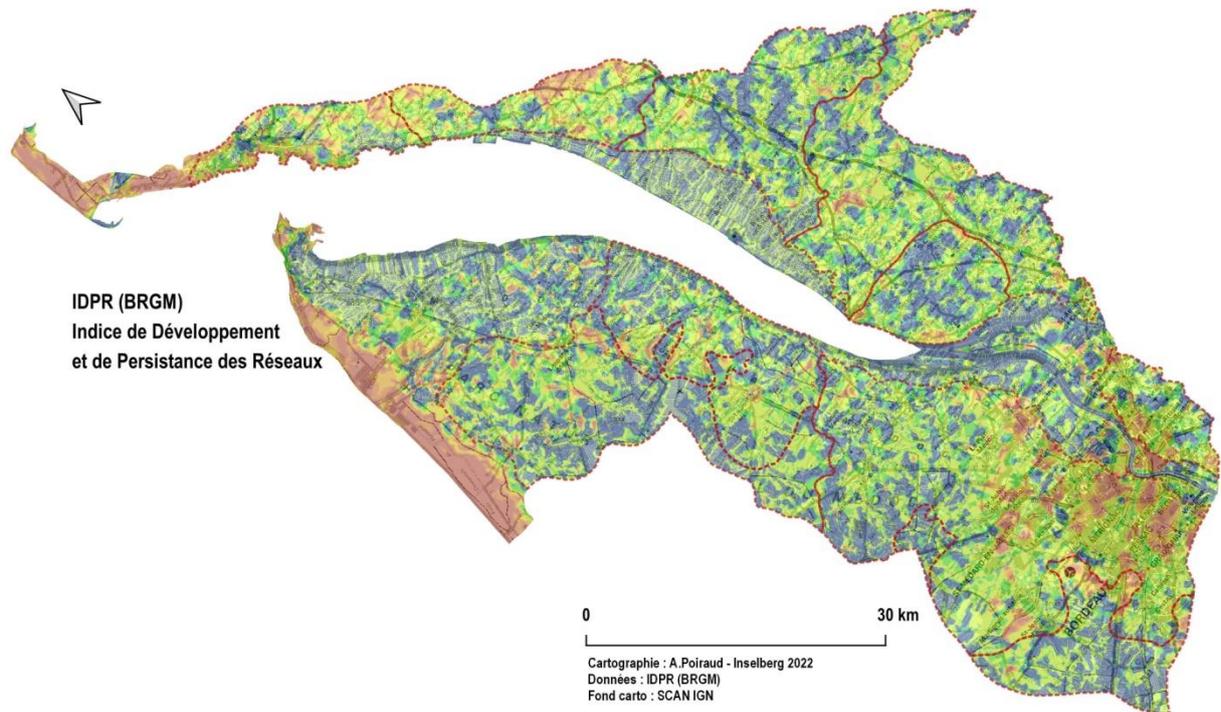
La pente, critère conseillée pour la détermination des TBV par l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, est ici inopérante pour discriminer les TBV. En effet, le territoire du SAGE girondin est caractérisé par une très faible différenciation du relief qui rend ce facteur caduque. L'ordination de Strahler, autre critère fortement recommandé par l'Agence Loire-Bretagne, est également difficile à utiliser ici du fait de la forte densité de fossés par endroit et de la forte artificialisation des réseaux hydrographiques. Les analyses croisées montrent que **la surface drainée est par contre un critère différenciant pour les ruisseaux intermittents et permanents.**

L'approche par type de chenal est une alternative acceptable pour le cas girondin. En effet, c'est un bon indicateur de terrain qui exprime les conditions hydrodynamiques des sections hydrologiques. Il est également utilisé dans la littérature et sa relation avec l'aire drainée a été mise en évidence dans plusieurs études.

Notre approche se voulait très modélisatrice en début d'étude. Finalement, au vu des difficultés évoquées précédemment, nous avons préféré redonner plus d'importance au terrain, en accord avec le SMIDDEST, pour mieux contraindre les modèles d'aire contributive. Les modèles sont de qualité variable. Ils paraissent robustes pour la rive droite non calcaire, mais sont plus imprécis pour les secteurs calcaires charentais et deviennent inopérants pour le Médoc. Le cas de l'UM des terrasses garonnaises ayant été traité auparavant, nous n'avons fait que réactualiser avec un MNT plus précis, le modèle précédemment construit.

Ces résultats aboutissent à soulever, pour le cas girondin et de manière plus générale, deux problématiques de fond.

La première est la difficulté d'appliquer l'approche « topographique » dès lors que les réseaux hydrographiques sont en partie gouvernés par des logiques de nappe profonde et de grands aquifères, comme c'est le cas pour le Royannais et le littoral fossile de Vitrezay. Les approches jusqu'à lors utilisées impliquent toujours des systèmes hydrographiques où la part des ruissellements de surface et hypodermiques reste importante voire majoritaire. L'utilisation de ces approches trouve ses limites dans les secteurs à forte infiltration en profondeur. La carte d'IDPR pointe bien ces secteurs royannais et de Vitrezay comme favorables aux infiltrations profondes (Figure 20).



**Figure 20.** IDPR. Rouge = infiltration majoritaire ; Bleu = ruissellement majoritaire

La deuxième difficulté, évoquée dès l'étude de 2016, est celle du traitement du Plateau Landais caractérisé par son système phréatique. Dans le cadre de la définition actuelle des TBV, ce système ne pourrait être intégré. Cependant, du point de vue fonctionnelle, il constitue une immense « zone source » alimentant l'ensemble des jalles médocaines. Son hyper-artificialisation, son fonctionnement phréatique, sa complexité stratigraphique et la quasi-inexistence d'un relief différencié en font un cas singulier dans l'application des méthodes et du concept de TBV. De notre point de vue, ce cas nécessite un effort de recherche pour préciser les contours conceptuels du Plateau Landais dans le cadre des TBV et une adaptation des approches opérationnelles pour cartographier les secteurs qui pourraient se raccrocher au concept de « TBV phréatique ». Nos premières réflexions autour d'une approche piézométrique semblent pouvoir apporter des avancées, mais elles se heurtent opérationnellement à la trop faible densité de piézomètres disponibles.

## Partie 2

---

# PRELOCALISATION DES ZONES HUMIDES (ZH) SUR LES TBV DE 3 BASSINS VERSANTS « TEST »

## 6. LES CONDITIONS DE LA PRELOCALISATION DES ZH

La cartographie des zones humides est réglementée par l'arrêté du 24 juin 2008 modifié et confortée par la loi portant sur la création de l'Office français de la biodiversité, du 26 juillet 2019, qui reprend dans son article 23 la rédaction de l'article L. 211-1 du code de l'environnement portant sur la caractérisation des zones humides, afin d'y introduire un "ou" qui permet de restaurer le caractère alternatif des critères pédologique et floristique. Ainsi, la délimitation d'une ZH s'assoit sur des critères pédologiques OU floristiques déterminés pour les sols par la classification GEPPA (la classe d'hydromorphie est définie d'après les classes d'hydromorphie du Groupe d'Étude des Problèmes de Pédologie Appliquée (GEPPA, 1981 ; modifié)) et pour la flore, à travers une liste d'espèce.

Le travail de prélocalisation est une étape indispensable et fondamentale du travail de délimitation. Il consiste à sectoriser l'espace pour cibler les zones à forte probabilité de présence de zones humides. Ce travail consiste essentiellement en une agrégation des données existantes, éventuellement des modélisations et une synthèse sous forme d'enveloppe de probabilités. Il existe plusieurs guides méthodologiques, dont celui du Forum des Marais Atlantiques par exemple ou le travail réalisé sur le territoire du SAGE par Bordeaux Science Agro (voir le Guide méthodologique pour la caractérisation des zones humides selon des critères pédologiques sur le territoire du SAGE "Estuaire de la Gironde et milieux associés", 2017).

L'approche géomorphologique est souvent utilisée car elle est rapide et peut être efficace sous couvert d'avoir un MNT de bonne résolution et des ZH qui sont contrôlées essentiellement par une saturation par ruissellement de surface et/ou hypodermique. Le TWI (Beven & Kirkby, 1979) est largement utilisé et a fait ses preuves. Cependant, dans le cas de ZH liées à des émergences de nappes sur des discontinuités lithologiques par exemple, ce critère devient moins opérant.

Des approches plus élaborées sont également possibles, notamment celles faisant appel à l'Intelligence Artificielle, via des modélisations utilisant des algorithmes d'apprentissage (Chignell et al., 2018; Lemerrier et al., 2013; Pantaleoni et al., 2009). Ces approches utilisent des jeux de données, par exemple une base de connaissance de sols hydromorphes ou de flore caractérisant des zones humides, et vont les confronter à des variables externes : topographie, géologie, climatologie, etc. A partir d'algorithmes d'apprentissage (régression multiple, logistique, Random Forest, régression multinomiale, etc.), il est alors possible d'optimiser le jeu de facteurs pour évaluer la probabilité de présence du jeu de données d'entraînement et ainsi prédire la probabilité de présence de ZH. Ces approches demandent déjà un certain niveau d'expertise et de compétence en modélisation.

Sur le SAGE Estuaire de la Gironde, notre approche est celle de l'apprentissage. Nous avons fait le choix, sur les 3 BV test, d'utiliser les données flore du Conservatoire Botanique National (CBN) complétée par des données habitats (souvent des cartes d'habitats de site Natura 2000). L'objectif a été de croiser ces données floristiques avec plusieurs variables externes pour essayer de voir les relations favorables à la présence d'espèces ou d'habitats exprimant un caractère humide et généraliser cette information. Notre approche s'est basée sur un mélange de l'approche experte formalisée (logique floue) avec un traitement statistique bayésien qui vise à associer la présence/absence de ZH avec des facteurs externes (géologie, topographie, etc.).

## 7. METHODOLOGIE

### DEFINITION DES BV TEST

Sur la base de notre travail sur les BV, nous avons proposé 3 BV test qui ont fait l'objet d'une discussion et d'une validation par le SMIDDEST et les partenaires (Commission "Zones Humides" du SAGE du 15/12/2021). Au total, ont été retenus le BV de la Jalle de Castelnau dans le Médoc (Syndicat Mixte des bassins versants de la Jalle de Castelnau et du Cartillon) sur la rive gauche et les BV du Taillé et de la Livenne sur la rive droite (Communauté de Communes Estuaire) (Figure 21).

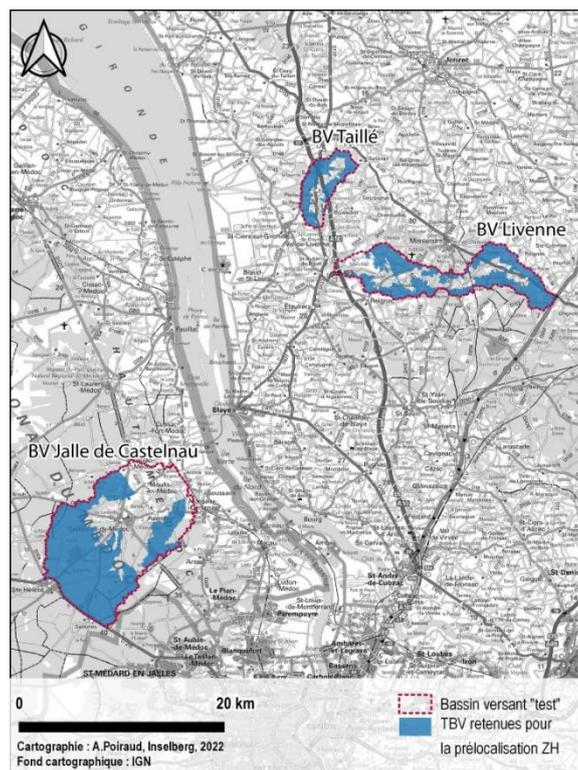


Figure 21. Choix des BV test pour le travail de prélocalisation ZH.

Ce choix a été guidé par plusieurs considérations techniques et politiques. Il assure un test à la fois en contexte « charentais » (rive droite) et médocain (rive gauche). De plus, il concerne des TBV à fonctionnement varié avec des fonctionnements « à problème » (cas du Médoc avec le Plateau landais), des fonctionnements plus classiques liés au ruissellement (Taillé) et des fonctionnements mixtes (Livenne).

Au sein de ces BV, la zone d'étude est circonscrite aux TBV, ce qui représente une surface cumulée de 14233 ha.

## JEUX DE DONNEES

Le jeu de données se sépare en deux groupes : le jeu d'entraînement et le jeu des covariables.

### JEU D'ENTRAINEMENT

Le jeu d'entraînement correspond aux données qui serviront pour l'apprentissage des modèles. Il s'agit, dans notre cas, d'indicateurs de présence de ZH au sens des textes réglementaires. Nous avons le choix entre deux jeux de données : un jeu de données floristiques et/ou un jeu de données pédologiques.

Les données floristiques ponctuelles correspondent aux relevés CBN, suite à l'extraction des taxons ZH selon la réglementation. Les données polygonales proviennent des cartes d'habitats Natura 2000 avec un classement selon la réglementation ZH. Le formatage des données selon la réglementation ZH a été assuré par Romain Dupéré (Eco-Metrum).

La source des données floristiques provient de l'« Observatoire de la biodiversité végétale de Nouvelle-Aquitaine (OBV-NA - [www.obv-na.fr](http://www.obv-na.fr)), extraction du 26/10/2021 ». Les données acquises recensent les espèces floristiques déterminantes de zones humides sur les périmètres indiqués (soit 3 478 observations). Il s'agit des taxons indicateurs de zones humides de l'annexe II table A de l'Arrêté du 24 juin 2008 précisant les critères de définition et de délimitation des zones humides en application des articles L. 214-7-1 et R. 211-108 du code de l'environnement. Les données Habitats ne représentent en aucun cas une connaissance exhaustive de la flore et la végétation de ces secteurs.

Nous avons coté chaque entité selon la nomenclature Corine Biotope et le même arrêté (Annexe II table B) :

- cote « H » : signifie que cet Habitat, ainsi que, le cas échéant, tous les habitats de niveaux hiérarchiques inférieurs sont caractéristiques de zones humides.
- cote « p » (pro parte) : l'Habitat d'un niveau hiérarchique donné ne peut pas être considéré comme systématiquement ou entièrement caractéristique de zones humides, soit parce que les habitats de niveaux

inférieurs ne sont pas tous humides, soit parce qu'il n'existe pas de déclinaison typologique plus précise permettant de distinguer celles typiques de zones humides. Pour ces habitats cotés « p » (pro parte), de même que pour les habitats qui ne figurent pas dans ces listes (c'est-à-dire ceux qui ne sont pas considérés comme caractéristiques de zones humides), il n'est pas possible de conclure sur la nature humide de la zone à partir de la seule lecture des données ou cartes relatives aux habitats. Une expertise des sols ou des espèces végétales doit être réalisée.

Au final, les extractions du CBN totalisent 276 polygones de 25m<sup>2</sup>, tandis que les cartes d'habitats totalisent 1849 polygones pour les codes « H », 4025 polygones pour les codes « p » (4025) et 878 pour les « non ». Ces polygones font également 25m<sup>2</sup>.

Nous bénéficions d'une couche de prélocalisation ZH établie précédemment sur des bases pédologiques. Le problème étant que cette couche était déjà un modèle, et nous l'avons donc écarté de la démarche pour limiter les effets d'accumulation d'erreur et parce nous ne maîtrisons pas toutes les étapes et les marges d'erreur de ce modèle. Une démarche similaire à la nôtre mais par une approche pédologique étant en cours en parallèle (L. Rigou), nous avons préféré abandonner l'approche pédologique, pour laquelle nous sommes moins compétents, et utiliser le travail de notre confrère pour comparaison finale et réflexion sur chacune de nos approches. Ainsi, nous avons bénéficié d'une étude similaire comparative sur les BV du Taillé et de la Livenne.

### JEU DES COVARIABLES

Les covariables sont rassemblées en deux grands thèmes : les dérivées du Référentiel à Grande Echelle RGE 5m (Taillé/Livenne) et LiDAR HD<sup>6</sup> (Jalle de Castelnaud) qui sont des variables numériques continues et les données thématiques qui sont des variables nominales (géologie, hydrogéologie, occupation du sol) :

- |   |  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• pente,</li><li>• orientation,</li><li>• densité de cours d'eau (3 approches),</li><li>• relief d'ordre 10,</li><li>• distance au réseau de la BD TOPAGE,</li><li>• TWI,</li><li>• MRVBF<sup>7</sup>,</li><li>• courbure en plan,</li><li>• LS-Factor<sup>8</sup>,</li><li>• Position sur le versant,</li><li>• Altitude</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Géologie (BD-CHARM 1/50000)</li><li>• BD-LISA avec notamment le masque karst</li><li>• Masque Zone Imperméable</li><li>• Remontée de nappe</li><li>• BD-FORET</li><li>• RPG 2020<sup>9</sup></li></ul> |
|---|--|

### PROCEDURE D'ANALYSE ET DE MODELISATION

Dans un premier temps, nous avons effectué des tests de qualité de la BD floristique afin d'éviter les erreurs topologiques, les erreurs d'écriture, etc. Nous avons bien vérifié la cohérence des attributs et avons réalisés quelques tests statistiques univariés pour vérifier la cohérence des populations.

L'analyse principale de croisement entre le jeu d'entraînement et les covariables est basée sur des analyses bivariées pour évaluer les associations entre la donnée floristique et les covariables, par bassin versant test et par source d'information. Les analyses bivariées sont de type fréquentiel pour les données numériques continues (analyse des fréquences par valeur pour les données chiffrées) et sous forme d'Odds Ratio pour les variables modales (rapport des cotes pour les variables non chiffrées).

Cette première série d'analyse a ensuite été complétée par des analyses corrélatoires entre covariables afin de tester l'indépendance des variables entre elles, pour chaque BV test et ne retenir dans les modèles que les covariables significatives et non redondantes entre elles.

Pour la modélisation, les variables ont été transformées soit par une fonction floue, soit par un opérateur bayésien afin de reclasser chaque variable en fonction de son degré d'association avec le jeu d'entraînement. Cette technique

<sup>6</sup> **LIDAR HD** : Détection et estimation de la distance par la lumière / HD : Haute Définition – il s'agit de modèle numérique de terrain de haute précision

<sup>7</sup> **MRVBF** : Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness = modèle topographique permettant d'individualiser les zones planes de fond de vallée et les secteurs à fort potentiel d'accumulation hydro-sédimentaire

<sup>8</sup> **LS-Factor** : Facteur topographique combinant la pente et la longueur du versant

<sup>9</sup> **RPG** : Référentiel Parcellaire Graphique = base spatiale déclarative des utilisations annuelles des parcelles agricoles

permet de linéariser chaque variable directement en fonction de sa fonction d'association. Chaque variable transformée est ensuite agrégée par un opérateur flou ou une moyenne algébrique, permettant d'obtenir des cartes de pseudo-probabilités de présence de « H » ou de « p ». Nous avons utilisé l'ensemble des données d'entraînement, le groupe de validation étant un jeu de données externe obtenu sur le terrain. Cette procédure permet en fait de « mesurer » la force des associations entre la présence des « H » (zones humides connues) avec des facteurs externes (topographie, géologie, etc.). On agrège ensuite ces diverses associations pour obtenir une cartographie de ces associations, les secteurs à forte valeur étant ceux qui cumulent les associations favorables et donc une probabilité importante qu'une zone humide soit présente.

Les modèles construits ont été soumis à une procédure de fitting (ou de contrôle) pour évaluer leur bonne correspondance ou non aux données d'entraînement, avec les courbes ROC<sup>10</sup>. A partir de ces résultats, nous avons construit un échantillonnage du groupe de validation à partir d'un tirage aléatoire de points à caractériser ensuite sur le terrain (80% dans les zones à forte probabilité, 20% dans des zones à faible probabilité).

Les critères utilisés sur le terrain pour la validation sont les mêmes que ceux de l' Arrêté du 24 juin 2008 : « Un espace peut être considéré comme zone humide si sa végétation est caractérisée par des espèces indicatrices de zones humides identifiées selon la méthode et la liste d'espèces figurant à l'annexe 1-2 ; par ses Habitats, caractéristiques de zones humides, identifiés selon la méthode et la liste correspondante figurant à l'annexe 2-2.

Les critères de base pour la délimitation des observations floristiques ont été respectés (Homogénéité et surface minimale).

- Etape 1 : Stratification verticale de la végétation ;
- Etape 2 : Identification des espèces dominantes de chaque strate ;
- Etape 3 : Liste des espèces dominantes dans la zone du relevé (sont retenues les espèces dont les pourcentages de recouvrement cumulés permettent d'atteindre 50% du recouvrement total de la strate et les espèces caractéristiques de zones humides ayant individuellement un pourcentage de recouvrement supérieur ou égal à 20 %).
- Etape 4 : Regroupement des espèces de chaque strate en une seule, même si il existe des redondances entre strates) ;
- Etape 5 : Pourcentage cumulé des espèces caractéristiques de zone humide. Celui-ci doit être supérieur ou égal à 50 % pour une classification en cote H.

La base attributaire est renseignée de la façon suivante :

<p>Id : Identifiant</p> <p>ZH_Flore : Classification réglementaire selon le critère espèces végétales des zones humides (selon Arrêté du 24 juin 2008 modifié en vigueur)</p> <p>Tax_ZH : Espèces caractéristiques de zones humides ayant individuellement un pourcentage de recouvrement supérieur ou égal à 20 % et dont les pourcentages de recouvrement cumulés permettent d'atteindre 50 % du recouvrement total de la strate.</p>	<p>Unite_Phyto : Typologie physiologique de végétation selon les taxons structurants</p> <p>Habitat_CB : Classification Corine Biotope</p> <p>ZH_Habitat : statut réglementaire « H », « p » ou non ZH de l'habitat (selon Arrêté du 24 juin 2008 modifié en vigueur)</p> <p>Mod_ZH : Classe extraite du Modèle de prédiction des zones humides</p>
---	---

Pour chaque BV test, il y a donc eu a posteriori de la construction des modèles, une session de terrain pour réaliser des relevés floristiques sur les points de validation tirés aléatoirement. Ce jeu de validation externe de terrain a ensuite été utilisé pour produire les courbes ROC et évaluer la qualité statistique des modèles. Une validation experte a également été réalisée, sur la base des comparaisons avec les orthophotographies Infra-Rouge (Tableau 3) :

Tableau 3. N groupe de validation.

Groupe de validation	BV Taillé	BV Livenne	BV Jalle de Castelnau
Relevé flore (400 m <sup>2</sup> terrain)	33 points	56 points	50 points + 10 transects
Photointerprétation IRC (500 à 1000 m <sup>2</sup> SIG)	50 polygones	50 polygones	120 polygones

<sup>10</sup> **Courbe ROC** : receiver operating characteristic, courbe permettant d'apprécier la performance d'un modèle à partir d'un jeu de données servant à l'évaluation mais n'ayant pas servi à construire le modèle. Plus la valeur de surface située sous la courbe (AUC) est proche de 1, meilleur est le modèle.

Pour Livenne et la Jalle de Castelnaud, les résultats obtenus étant assez décevants, nous avons opté pour une complexification des modèles à partir d'une analyse spécifique du MNT visant à reproduire le niveau piézométrique de la nappe phréatique dans les formations sableuses, en reproduisant le modèle conceptuel de Jolivet et al. (2007) sur le massif landais (Figure 22). L'approximation des niveaux de nappe phréatique a été obtenue par un lissage sur le RGE 5m et sur le LiDAR. Nous avons réalisé plusieurs essais de rayon d'application de l'algorithme et avons retenu un rayon de 100 mètres (200 mètres de diamètre). Visuellement et à partir de la construction de plusieurs coupes topo/surface piézo théorique, les résultats étaient très proches du modèle conceptuel de Jolivet.

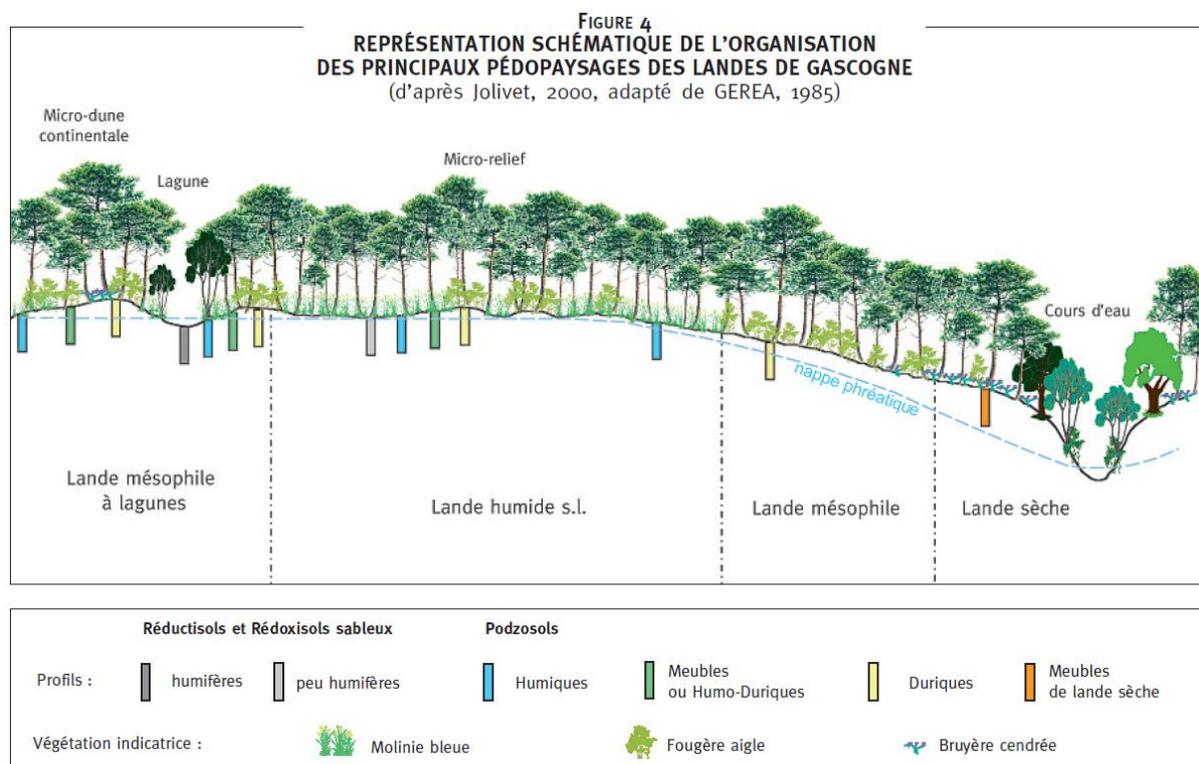


Figure 22. Modèle conceptuel de distribution de la nappe par rapport à la topographie sur le plateau landais et répartition des milieux associés. in Jolivet 2007

Ce second train de modèle a donné des résultats plus convaincants.

## 8. PRINCIPAUX RESULTATS

Nous renvoyons au rapport intermédiaire spécifique à la précartographie des ZH d'avril/mai/juin 2022 pour le détail des résultats. Nous ne présenterons ici que les résultats majeurs, par bassin versant.

### LE TAILLE

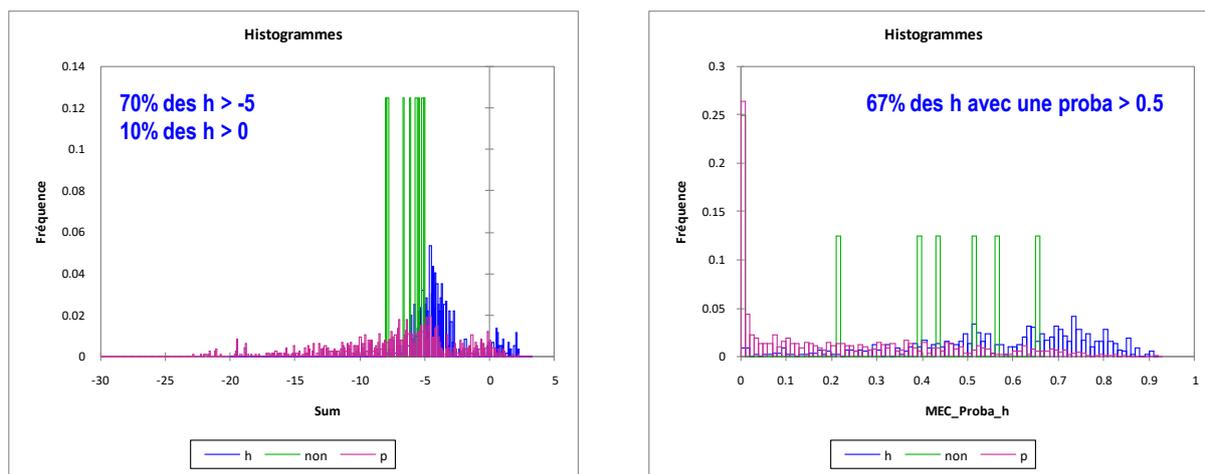
Les analyses bivariées montrent que la flore ZH est partiellement topo-dépendante et également associée à certains paramètres thématiques.

Paramètre	Favorable présence flore de ZH
RGP 2020	BDH (Blé dur d'hiver), FLA (Autres légumes ou fruits annuels)
BD Forêt	Jeune futaie de pin maritime, Taillis de châtaignier
BD GEOL	Formation de Guizengard (sables feldspathiques)
LS-Factor	> 1
Nappe	> 1.5/2
Altitude	> 40 m

Distance TOPAGE	< 20 m
TWI	Variable entre 6 et 10
Pente	< 5°

Cependant, les BD-Forêt et BD-GEOL sont moyennement dépendantes avec un V de Cramer<sup>11</sup> > 0.36. Nous avons utilisé ces deux données mais en prenant les précautions d'usage dans les interprétations.

Chaque covariable a été transformée en fonction de sa fonction d'association puis agrégée soit par une somme, soit par le classificateur Max Entropy (MEC, Jaynes, 1957)<sup>12</sup>. Les principaux résultats de contrôle donnent des résultats plutôt bons (Figure 23).



#### Area Under the Curve

Test Result Variable(s)	Area	Std. Error <sup>a</sup>	Asymptotic Sig. <sup>b</sup>	Asymptotic 95% Confidence Interval	
				Lower Bound	Upper Bound
Sum	,730	,012	,000	,707	,752
MEC_Proba_h	,863	,009	,000	,846	,880

Figure 23. Fitting des modèles. En haut, distribution fréquentielle des valeurs par groupe floristique H, p, non. En bas, résultats de l'analyse ROC. A gauche, modèle additif (somme), à droite, classificateur Max Entropy (MEC).

Les deux modèles montrent une relativement bonne discrimination des « H », « p » et « non », avec notamment une bonne adéquation de la présence des « H » sur les valeurs supérieures. Il existe cependant des recouvrements importants entre les types de flore sur les gammes de valeurs moyenne (-5 pour le modèle additif ou proba = 0.5 pour le MEC). La courbe ROC donne des résultats assez satisfaisants avec notamment une valeur d'AUC de 0.86 pour le MEC qui place ce modèle comme étant meilleur statistiquement.

Statut	Photointerpretation	Terrain	TOTAL
H	2	5	7
Non ZH	27	1	28
p	18	24	42
(vide)	3		3

La phase de validation de terrain permet d'asseoir le modèle avec un total finalisé de 77 points de validation. Les courbes ROC du modèle MEC donnent des résultats probants pour les sets de validation, avec notamment un ROC pour la prédiction des « H » de 0.78. Le recouvrement entre les « H » et les « p » de validation est par contre important, et il existe là un biais lié au classement initial « H » ou « p » sur les habitats.

<sup>11</sup> V de Cramer : Mesure d'association statistique classique entre deux variables nominales

<sup>12</sup> Max Entropy : classificateur probabiliste utilisé pour départager les individus d'une population, ici les « H » et les « p » en leur attribuant une probabilité d'appartenance

Le modèle pédologique fourni par L. Rigou, sur la prédiction des données de validation, est moins performant (AUC-ROC = 0.68), mais cela est également attribuable au type de données de validation (botanique) qui est différent de la donnée ayant servi à construire le modèle pédologique (pédologique).

A partir des données de validation, nous avons retenu le modèle MEC et l'avons discrétisé en 4 classes autour de la gamme de forte incertitude [0.35-0.65], les probabilités supérieures à 0.65 étant celles où la présence de ZH est hautement probable (Figure 24).

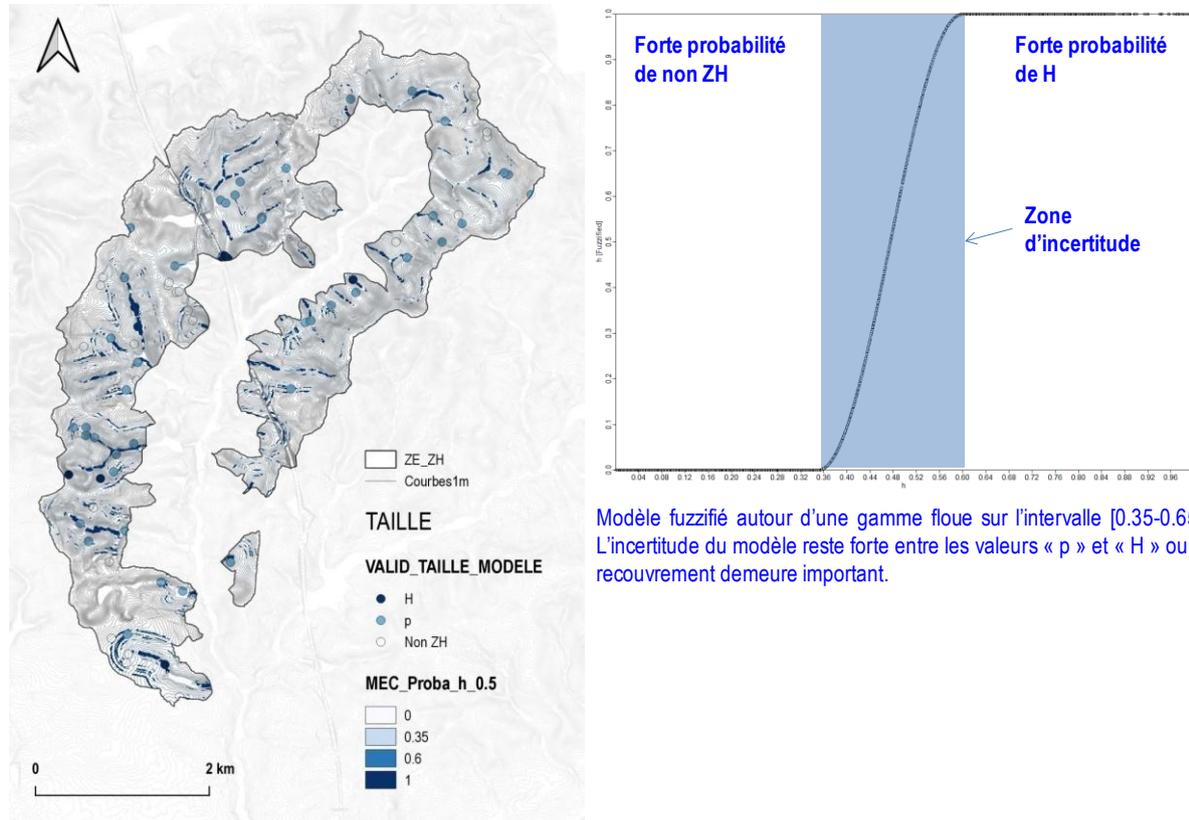


Figure 24. Modèle final de prélocalisation des ZH sur base floristique, sur le BV du Taillé

## LA LIVENNE

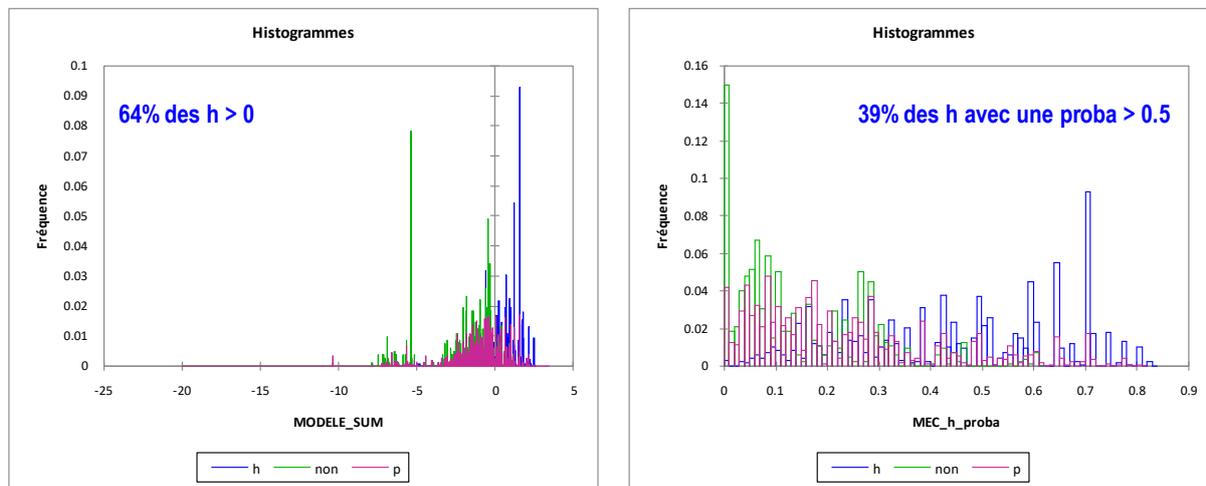
Les analyses bivariées montrent que la flore ZH est peu topo-dépendante et inégalement associée à certains paramètres thématiques. Nous signalons également qu'une erreur dans les contours de la carte géologique a biaisé les résultats. Il a fallu rectifier cette erreur pour relancer la série d'analyse.

Paramètre	Favorable présence flore de ZH
RGP 2020	BOP (Bois pâturé), BTH (Blé tendre d'hiver), CZH (Colza d'hiver), SNE (Surf. Agricole non exploitée temporairement)
BD Forêt	Futaie mixte de pin maritime et feuillus, lande arbustive
BD GEOL	Formation des Calcaires crayo-marneux et calcaires graveleux bioclastiques à Orbitoïdes média (Campanien 4 ("Maestrichtien" auct., base ; biozone CVI) Alluvions fluviales récentes à actuelles (Holocène) Galets éolisés
Distance TOPAGE	Inférieure à 20 m

Les BD-Forêt et BD-GEOL sont moyennement dépendantes avec un V de Cramer = 0.29. Nous avons utilisé ces deux données mais en prenant les précautions d'usage dans les interprétations.

Statut	Photointerprétation	Terrain	Total
H	1	23	24
Non ZH	28	5	33
p	15	87	102
?	6	2	8

Chaque covariable a été transformée en fonction de sa fonction d'association (Odd) puis agrégée par une somme ou passée par le classificateur Max Entropy ou MEC (Jaynes, 1957). Les principaux résultats de fitting donnent des résultats plutôt bons (Figure 25).



#### Area Under the Curve

Test Result Variable(s)	Area	Std. Error <sup>a</sup>	Asymptotic Sig. <sup>b</sup>	Asymptotic 95% Confidence Interval	
				Lower Bound	Upper Bound
MODELE_SUM	,796	,007	,000	,783	,809
MEC_h_proba	,797	,007	,000	,784	,811

Figure 25. Fitting des modèles. En haut, distribution fréquentielle des valeurs par groupe floristique h, p, non. En bas, résultats de l'analyse ROC. A gauche, modèle additif, à droite, Max Entropy.

Les deux modèles montrent une discrimination moyenne des « H », « p » et « non », avec pas mal de recouvrements. Les deux modèles sont très proches en termes de performance. L'analyse ROC donne un résultat correct (proche de 0.8), mais l'analyse fréquentielle montre bien les importants recouvrements traduisant un modèle encore flouté et peu discriminant. Le modèle est donc difficilement utilisable en l'état car il est construit sur peu de variables répondant bien aux données d'entraînement et il existe un artéfact dans le domaine des calcaires créacé. Ce modèle nécessite d'être mieux contraint par d'autres données, notamment pédologiques. C'est pourquoi nous avons retravaillé ce modèle à partir du concept de Jolivet (2007). Le nouveau modèle a été intégré comme variable dans le processus de modélisation.

Le modèle botanique répond bien du point de vue qualitatif aux données de validation. Sa construction basée sur la surface piézo théorique montre un gain de performance net avec notamment 75% des points de validation « H » situés sous la cote -0.4 mètre. Le modèle donne près de 75% des points de validation « H » au-dessus à une valeur de probabilité > 0.4, valeur qui semble être une limite un peu floue, mais efficace pour discriminer les secteurs « H ». Le modèle pédologique est moins bien discriminant sur la donnée de validation botanique avec d'importants recouvrements entre les groupes. Le modèle botanique est bien calibré pour les zones « H » avec une AUC > 0.8. Par contre, il est considéré comme aléatoire pour les zones « p », donc mauvais. A l'inverse, il discrimine assez bien les zones « Non ZH ». Le modèle pédologique est moyen pour discriminer les zones « H », mauvais pour les zones « p » et tend à surévaluer la présence de ZH en secteur non ZH. A noter qu'il existe un biais certain avec le statut « p » sur Livenne

A partir des données de validation, nous avons retenu le modèle MEC et l'avons discrétisé en 5 classes, à partir d'une fuzzification autour de la gamme de forte incertitude [0.35-0.45], les probabilités supérieures à 0.45 étant celles où la présence de ZH est hautement probable (Figure 26).

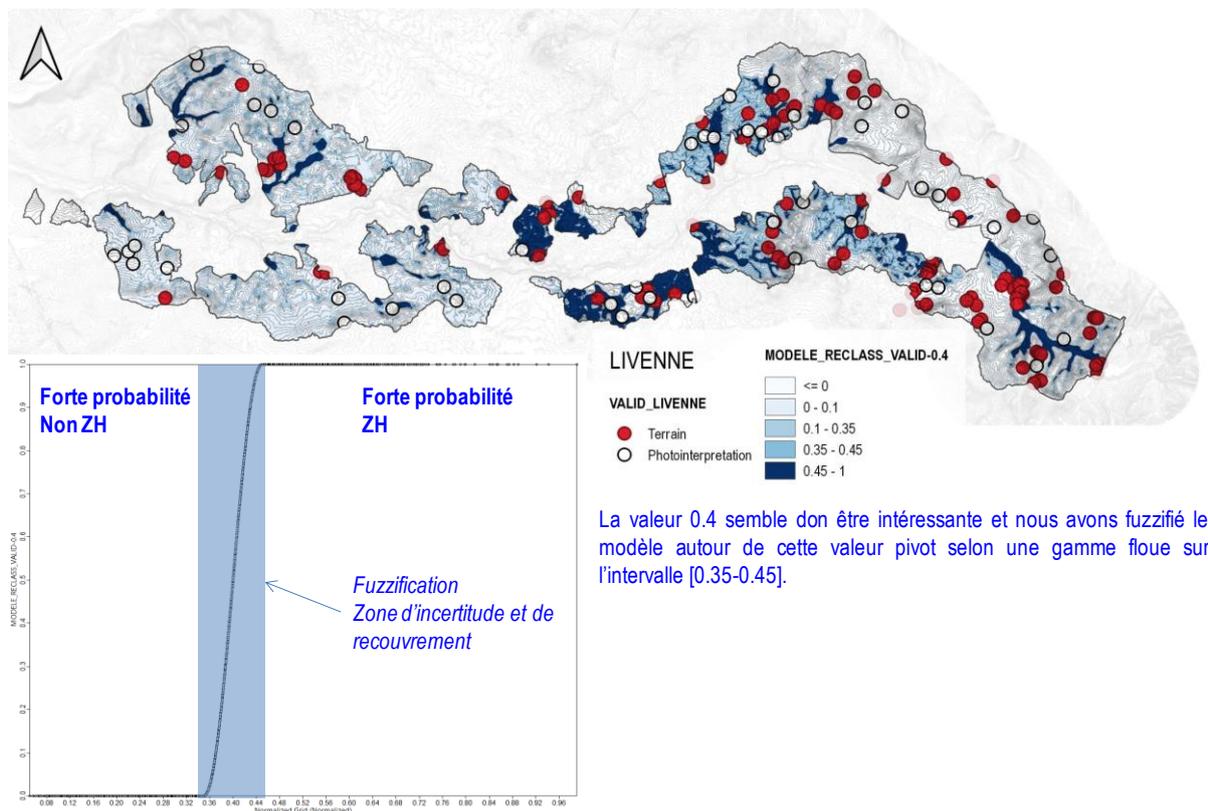


Figure 26. Modèle final de prélocalisation des ZH sur base floristique, sur le BV de la Livenne

## LE BV DE LA JALLE DE CASTELNAU

Nous avons peu de données d'entraînement sur ce BV ce qui est très contraignant. Les analyses bivariées montrent que la flore ZH est peu topo-dépendante et inégalement associée à certains paramètres thématiques.

Paramètre	Favorable présence flore de ZH
BD Forêt	Futaie de Pin Maritime, Grande lande
BD LISA	308AC01 (Sables des landes et de Castets (Plio-Quaternaire)), 308AC03 (Sables et graviers d'Onesse et de Belin (Plio-Quaternaire))
Distance réseau théorique	< 2 m (faible significativité)

Les associations avec les données topographiques sont très mauvaises sur ce BV et les associations thématiques ne sont pas discriminantes.

Les BD-Forêt et BD LISA sont moyennement dépendantes avec un V de Cramer = 0.32. Nous avons utilisé ces deux données mais en prenant les précautions d'usage dans les interprétations.

Chaque covariable a été transformée en fonction de sa fonction d'association (Odd) puis agrégée par une somme ou passée par le classificateur Max Entropy ou MEC (Jaynes, 1957). Les principaux résultats de fitting donnent des résultats plutôt bons.

Le contexte très homogène et le faible nombre de points de calage rendent l'analyse très lacunaire. Enfin, quasiment toutes les données d'entraînement sont en « H » ce qui donne un modèle final overfitté<sup>13</sup> et peu discriminant, car toutes les TBV sont en ZH ! Aucun modèle n'a été retenu car ils ne sont pas satisfaisants.

Nous avons donc construit un modèle uniquement basé sur la LRM (Local Relief Model, lissage du modèle), à savoir un lissage du LiDAR pour retranscrire ce que pourrait être le niveau piézométrique. La soustraction de la topographie à

<sup>13</sup> **Overfitting** : Modèle qui correspond trop étroitement à un ensemble de données de construction, et peut donc ne pas s'adapter à des données supplémentaires ou prédire de manière fiable les observations futures

ce modèle permet d'avoir un équivalent des secteurs où la nappe affleure ou subaffleure et correspondrait donc à des ZH.

Le jeu de validation n'a pu être constitué que des données terrain, car la photointerprétation s'est révélée inopérante dans la majeure partie des cas (couverture boisée trop homogène). De plus, les observations de terrain donnent très peu de « non ZH » francs et se composent donc de « H » et de « p », ce qui sous-entend d'importants recouvrements.

Les résultats de la validation (Figure 27) montrent en effet d'importants recouvrements entre les points d'observation « H » et « p » avec notamment une gamme très floue entre les valeurs de 0 à -0.25m de différence Piézo/Topo.

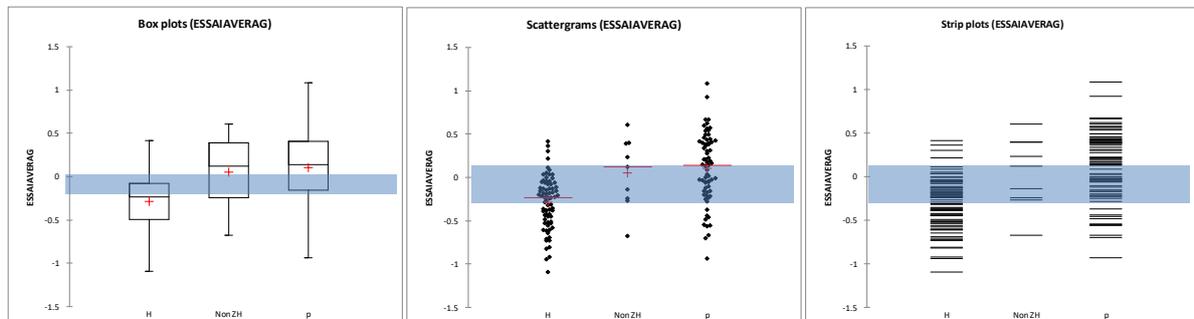


Figure 27. Validation des "h" et "p" sur la Jalle de Castelnau.

Les courbes ROC traduisent une mauvaise performance pour prédire sûrement les « H » (0.22), mais le modèle est meilleur pour les « p » (0.74), qui impliquent une validation pédologique pour trancher ! Le modèle est fitté aux données d'entrée mais peine à prédire les points nouveaux. La variable pédologique manque donc cruellement dans ce contexte pour pouvoir statuer sur la population des « p » et binariser la population de validation.

Nous pouvons cependant discrétiser en 3 classes le modèle afin d'extraire les zones à forte suspicion de « h », mais cette discrétisation impose d'accepter une large gamme d'incertitude, car il faut descendre la barre à -0.35 pour limiter les recouvrements entre « H » et « p » (Figure 28). La carte fournie est très « blanche » traduisant la très forte incertitude du modèle.

Cependant, les observations botaniques traduisent quasi-systématiquement un caractère humide ou potentiellement humide sous couvert d'une vérification pédologique. Pour information, le Référentiel Régional Pédologique à 1/250 000 considère tout ce secteur dans l'Unité de Pédopaysage n°62 dite « Lande Humide », constituée à plus de 45% de sols à nappe voire hydromorphes. **Quasiment la moitié de la surface de ces TBV est donc potentiellement une ZH sur la base des critères pédologiques !**

L'étude menée sur le Camp de Souge (Dupéré & Poiraud, 2017) a révélé l'importance de disposer d'un bon modèle piézométrique et d'un bon modèle topographique pour décrire et tenter de modéliser la finesse de la distribution spatiale des unités écologiques, qui sont finalement contrôlées par un jeu complexe et très fin de l'altitude relative du terrain par rapport au niveau piézométrique.

Dans le cadre de cette étude, ne disposant pas sur le BV de la Jalle de Castelnau d'un modèle piézométrique fin et robuste, nous sommes limités dans nos investigations.

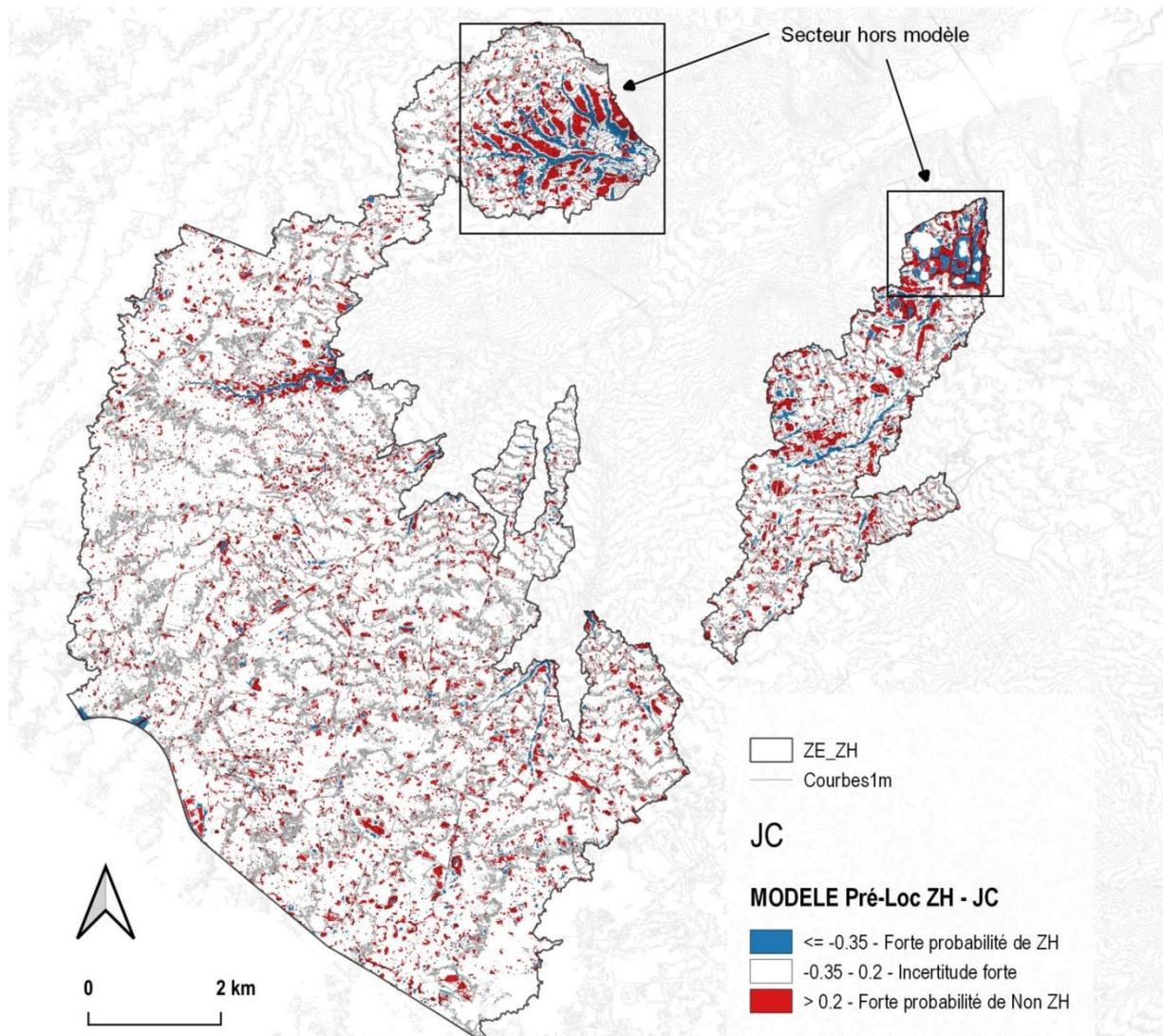


Figure 28. Modèle final de prélocalisation des ZH sur base floristique, sur le BV de la Jalle de Castelnau

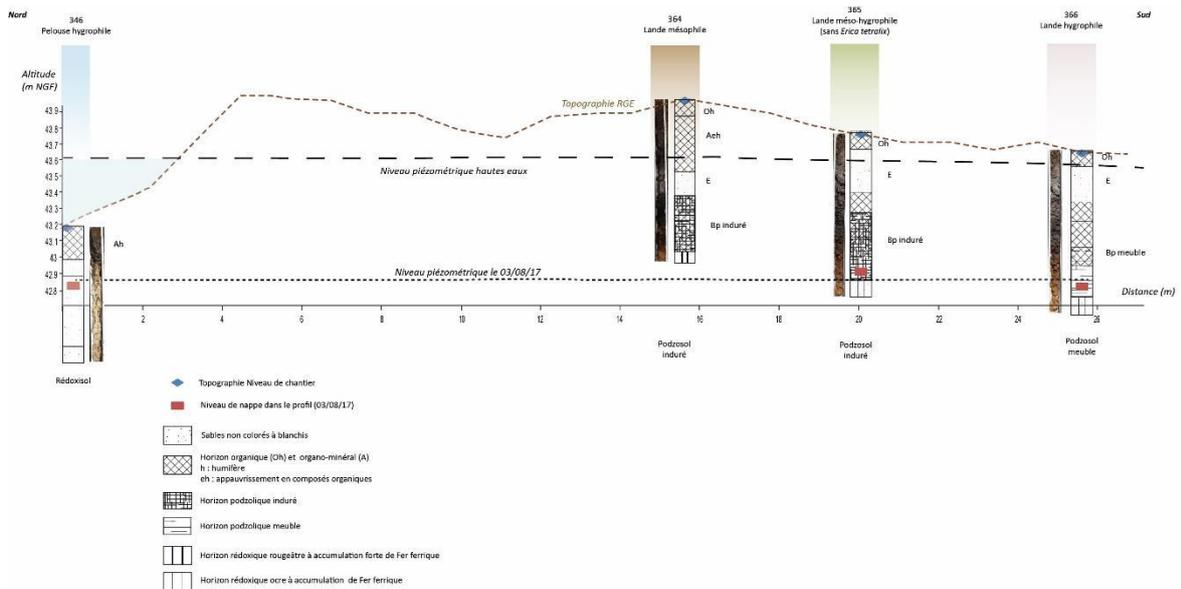


Figure 29. Modèle de répartition des unités fonctionnelles et de l'humidité sur un transect micro-topographique au Camp de Souge. in Dupéré et Poiraud (2017). On remarque bien sur ce profil que les unités écologiques dépendent fortement de leur altitude relative au niveau moyen de nappe et sont sensibles à des variations infra-décimétriques de cette altitude.

## CONCLUSION SUR LES TRAVAUX DE MODELISATION

Le travail de modélisation a demandé d'importants efforts d'adaptation selon les BV et il prouve une fois encore que ces démarches numériques i/ ne sont pas des presse-bouton, ii/ que le complément terrain est fondamental et iii/ qu'elle relève d'une vraie expertise et non pas juste d'une manipulation de données sous SIG.

En l'état, le modèle Taillé et dans une moindre mesure le modèle Livenne nous paraissent satisfaisants pour une utilisation informative et surtout pour préparer les futures cartographies ZH (Tableau 4).

Tableau 4. Synthèse de la qualité des modèles obtenus sur les 3 BV test.

BV	AUC training (H)	AUC validation (H)	Observation
Taillé	0.863	0.775	Modèle robuste (bon fitting) avec bonnes capacités de prédiction, mais manque de points de validation « H » pour asseoir les capacités prédictives
Livenne	0.678*	0.822	Modèle assez robuste, bonne capacité prédictive des « H » et des « non H » - demeure grossier sur la partie crétacé et manque de données pédologiques dans les zones de plateau sableux
Jalle de Castelnau	0.43*	0.219	Modèle très incertain, flou sur les capacités prédictives, l'entrée topographique et l'application du modèle conceptuel de Jolivet (2007) sont insuffisants. Complément hydrogéologique de détail et/ou pédologique nécessaire. <b>En l'état, au vu des données flore et des connaissances pédologiques sur le secteur, la meilleure conclusion est de dire qu'au moins une moitié de la partie landaise est humide !</b>

\* avant intégration du modèle LRM

L'ensemble des cartes de prélocalisation des ZH est disponible à l'échelle 1/25 000 dans l'atlas cartographique qui accompagne ce rapport.

---

## CONCLUSION GENERALE

Cette étude a pour objectif de clôturer l'action entreprise en 2016 de cartographie des têtes de bassin versant sur le territoire du SAGE « Estuaire de la Gironde et milieux associés ». Par une approche résolument géomorphologique et hydrogéomorphologique, elle conclut donc cette action. L'approche choisie est mixte, basée sur un important inventaire de terrain et un travail d'analyse et de modélisation qui a exploité la relation entre les surfaces drainées, les types de chenaux et les initiations des ruisseaux intermittents et permanents.

Cette étude a permis d'étendre la cartographie des TBV sur le territoire du SAGE à partir des deux variables majeures que sont l'aire drainée et le type de chenal d'écoulement, colluvial ou alluvial. Elle se distingue ainsi des protocoles couramment utilisés en France, notamment par l'Agence Loire-Bretagne, qui se basent sur l'ordination de Strahler et la pente longitudinale. Ce choix est justifié par les analyses statistiques qui démontrent bien l'inefficacité de la pente dans ces contextes à relief très peu différencié. De plus, la forte artificialisation des réseaux hydrographiques, la part importante du phréatisme dans les fonctionnements hydrologiques et le caractère parfois littoral ou côtier des organes hydrologiques rendent très délicate l'utilisation de l'ordination de Strahler qui impose de faire des choix arbitraires sur les surfaces d'initiation des réseaux. L'étude de Poiraud et al. (2016) avait déjà été confrontée à cette question et avait intégré l'aire drainée pour palier à ce problème. Ainsi, les spécificités physiographiques du territoire du SAGE ont amené à faire ces choix méthodologiques et conceptuels ce qui en fait une cartographie singulière dans le paysage français à l'heure actuelle.

Cette étude opérationnelle pose également des questions de recherche fondamentale, notamment concernant l'application du concept de TBV au Plateau Landais. Sans revenir en détail sur la problématique, nous insistons sur le fait que ce secteur géomorphologique et hydrogéologique bouscule le cadre et la définition des TBV et que nous proposons d'intégrer et de préciser le proto-concept de « TBV phréatique » pour tenter de résoudre le cas landais. Cette question mérite à notre sens un effort de recherche. En tout cas, l'approche géomorphologique y trouve ses limites et impose d'avoir recours à une approche couplée avec l'hydrogéologie ou l'hydropédologie.

En complément des développements sur la cartographie des TBV, cette étude a également posé quelques bases concernant la prélocalisation des ZH potentielles dans l'espace de ces TBV. Sur la base de 3 sous-bassins versants test et d'une approche floristique et de modélisation par apprentissage, l'étude propose 3 modèles de qualité diverse ; Là encore, le cas landais est celui qui pose les plus grandes difficultés eu égard à la finesse des relations entre unités écologiques, micro-topographie et niveau de nappe (phréatique et/ou superficielle/pédologique). Un essai de modélisation des niveaux de nappe par lissage de la topographie à haute résolution selon le modèle de Jolivet (2007) a donné des résultats intéressants mais pas encore convaincants. Sur la rive droite, les modèles sont plus robustes car les ZH sont mieux contrôlées par la topographie. Cependant, dans le détail, et grâce à la confrontation de nos modèles avec les modèles pédologiques de Laurent Rigou, nous notons encore des divergences avec la réalité-terrain et avec la pédologie. Ces constatations nous amènent à reconnaître que ces approches modélisatrices fonctionnent dès lors que les ZH sont contrôlées par des flux hydrologiques « simples » dépendants de la topographie, donc des ruissellements de surface et hypodermiques. Dès que les ZH sont plutôt contrôlées par des logiques de nappe, l'approche topographique et pédologique par toposéquence devient inefficace. C'est le cas pour le Plateau landais et pour l'amont du BV de la Livenne. Il reste donc des améliorations à apporter aux modèles par apprentissage, mais qui nécessitent une meilleure connaissance des dynamiques de nappe, sujet encore mal connu à un niveau de précision compatible à l'échelle 1/25000.

Au final, d'une étude opérationnelle, il ressort au moins deux axes de travail plus fondamentaux, essentiellement sur le cas landais, concernant l'évolution des définitions des TBV et la précision des modèles de prélocalisation, ces deux problématiques appelant à une démarche pluridisciplinaire pour les résoudre.

---

## BIBLIOGRAPHIE

- Ambroise, B., Freer, J., & Beven, K. (1996). Application of a Generalized TOPMODEL to the Small Ringelbach Catchment, Vosges, France. *Water Resources Research*, 32(7), 2147–2159. <https://doi.org/10.1029/95WR03715>
- Beven, K. J., & Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences*, 24(3), 43–69.
- Brooks, R. T., & Colburn, E. A. (2011). Extent and Channel Morphology of Unmapped Headwater Stream Segments of the Quabbin Watershed, Massachusetts1: Extent and Channel Morphology of Unmapped Headwater Stream Segments of the Quabbin Watershed, Massachusetts. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 47(1), 158–168. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2010.00499.x>
- Burt, T. P. (1992). The Hydrology of Headwater Catchments. In *The Rivers Handbook* (Blackwell, pp. 3–28). P. Calow and G.E. Petts (Editors).
- Chignell, S. M., Luizza, M. W., Skach, S., Young, N. E., & Evangelista, P. H. (2018). An integrative modeling approach to mapping wetlands and riparian areas in a heterogeneous Rocky Mountain watershed. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 4(2), 150–165. <https://doi.org/10.1002/rse2.63>
- Choucard, P. (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* [Mémoire de master]. Université de rennes I.
- Clarke, S. E., Burnett, K. M., & Miller, D. J. (2008). Modeling Streams and Hydrogeomorphic Attributes in Oregon From Digital and Field Data 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 44(2), 459–477. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2008.00175.x>
- Colson, T., Gregory, J., Dorney, J., & Russell, P. (2008). Topographic and Soil Maps Do Not Accurately Depict Headwater Stream Networks. *National Wetlands Newsletter*, 30.
- Costa-Cabral, M. C., & Burges, S. J. (1994). Digital Elevation Model Networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. *Water Resources Research*, 30(6), 1681–1692. <https://doi.org/10.1029/93WR03512>
- Coudart, A. (2018). *Localisation, caractérisation et hiérarchisation des têtes de bassin versant sur le territoire de la Sèvre Nantaise* [Mémoire de Licence]. Université de la Rochelle.
- Defive, E., Berger, J., Poiraud, A., Barra, A., Bouvard, E., Vermoux, C., Voldoire, O., Garreau, A., Miras, Y., Beauger, A., Cabanis, M., Gunnell, Y., Braucher, R., Dendievel, A., Nomade, S., Delvigne, V., Lafarge, A., Liabeuf, R., Guillou, H., & Raynal, J. (2017). Les flux hydro-sédimentaires dans le bassin supérieur du fleuve Loire (Massif Central, France) au cours des trois derniers millénaires: Archives séquentielles, chronologie et corrélations régionales. *Quaternaire*, vol. 28/3, 373–388. <https://doi.org/10.4000/quaternaire.8304>
- Delille, H., Schmitt, L., Jacob-Rousseau, N., Grosprêtre, L., Privolt, G., & Preusser, F. (2016). Headwater valley response to climate and land use changes during the Little Ice Age in the Massif Central (Yzeron basin, France). *Geomorphology*, 257, 179–197. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.01.010>
- Dietrich, W. E., & Dunne, T. (1993). The Channel Head. In *Channel Network Hydrology* (Wiley, pp. 175–219). K. Beven, and M.J. Kirkby (Editors).
- Dupéré, R., & Poiraud, A. (2017). *Pré-étude du fonctionnement éco-hydrologique du camp de Souge* (p. 48). Conservatoire d'espaces naturels d'Aquitaine.
- Fritz, K. M., Hagenbuch, E., D'Amico, E., Reif, M., Wigington, P. J., Leibowitz, S. G., Comeleo, R. L., Ebersole, J. L., & Nadeau, T.-L. (2013). Comparing the Extent and Permanence of Headwater Streams From Two Field Surveys to Values From Hydrographic Databases and Maps. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 49(4), 867–882. <https://doi.org/10.1111/jawr.12040>
- Garbrecht, J., & Martz, L. W. (1997). The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models. *Journal of Hydrology*, 193(1–4), 204–213. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03138-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03138-1)
- Gomi, T., Sidle, R. C., & Richardson, J. S. (2002). Understanding Processes and Downstream Linkages of Headwater Systems: Headwaters differ from downstream reaches by their close coupling to hillslope processes, more temporal and spatial variation, and their need for different means of protection from land use. *BioScience*, 52(10), 905–916. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052\[0905:UPADLO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0905:UPADLO]2.0.CO;2)
- Hack, J. T. (1965). *Geomorphology of the Shenandoah Valley, Virginia and West Virginia, and origin of the residual ore deposits* (Report No. 484; Professional Paper, Issue 484). USGS Publications Warehouse. <http://pubs.er.usgs.gov/publication/pp484>
- Hack, J. T., & Goodlett, J. C. (1960). *Geomorphology and forest ecology of a mountain region in the central Appalachians* (Report No. 347; Professional Paper, Issue 347). USGS Publications Warehouse. <http://pubs.er.usgs.gov/publication/pp347>

- Henner, R. (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* [Mémoire de Master 2]. Université de Caen Basse-Normandie, Département de Géographie.
- Hutchinson, M. F. (1989). A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology*, 106(3–4), 211–232. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(89\)90073-5](https://doi.org/10.1016/0022-1694(89)90073-5)
- Idir, S., Probst, A., Viville, D., & Probst, J.-L. (1999). Contribution des surfaces saturées et des versants aux flux d'eau et d'éléments exportés en période de crue: Traçage à l'aide du carbone organique dissous et de la silice. Cas du petit bassin versant du Strengbach (Vosges, France). *Comptes Rendus de L'Académie Des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, 328(2), 89–96.
- Istanbulluoglu, E., Tarboton, D. G., Pack, R. T., & Luce, C. (2002). A probabilistic approach for channel initiation. *Water Resources Research*, 38(12), 61-1-61–14. <https://doi.org/10.1029/2001WR000782>
- Jaynes, E. T. (1957). Information Theory and Statistical Mechanics. *Physical Review*, 106(4), 620–630. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.106.620>
- Jolivet, C., Augusto, L., Trichet, P., & Arrouays, D. (2007). Les sols du massif forestier des Landes de Gascogne: Formation, histoire, propriétés et variabilité spatiale. *Revue Forestière Française*, 1, Article 1. <https://doi.org/10.4267/2042/8480>
- Joly, A. (2014). *Identification cartographique et hiérarchisation des têtes de bassin versant sur les périmètres des SAGE Evre-Thau-Saint Denis et Layon-Aubance* [Mémoire de Master]. Université de Rennes I.
- Lapides, D. A., Leclerc, C. D., Moidu, H., Dralle, D. N., & Hahm, W. J. (2021). Variability of stream extents controlled by flow regime and network hydraulic scaling. *Hydrological Processes*, 35(3). <https://doi.org/10.1002/hyp.14079>
- Le Bihan, M. (2018, July). *Comment étudier une tête de bassin versant? Cartographie, caractérisation et hiérarchisation*. Journée technique d'échanges ATBVB.
- Lemercier, B., Lacoste, M., Loum, M., Berthier, L., Le Bris, A. L., & Walter, C. (2013). Apport de la cartographie numérique des sols pour prédire l'hydromorphie et l'extension des zones humides potentielles à l'échelle régionale. *Etude et Gestion Des Sols*, 20(1), 46–66.
- Montgomery, D. R., & Buffington, J. M. (1997). Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *Geological Society of America Bulletin*, 109(5), 596–611. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1997\)109<0596:CRMIMD>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1997)109<0596:CRMIMD>2.3.CO;2)
- Montgomery, D. R., & Dietrich, W. E. (1989). Source areas, drainage density, and channel initiation. *Water Resources Research*, 25(8), 1907–1918. <https://doi.org/10.1029/WR025i008p01907>
- Montgomery, D. R., & Foufoula-Georgiou, E. (1993). Channel network source representation using digital elevation models. *Water Resources Research*, 29(12), 3925–3934. <https://doi.org/10.1029/93WR02463>
- O'Callaghan, J. F., & Mark, D. M. (1984). The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 28(3), 323–344. [https://doi.org/10.1016/S0734-189X\(84\)80011-0](https://doi.org/10.1016/S0734-189X(84)80011-0)
- Pantaleoni, E., Wynne, R. H., Galbraith, J. M., & Campbell, J. B. (2009). A logit model for predicting wetland location using ASTER and GIS. *International Journal of Remote Sensing*, 30(9), 2215–2236. <https://doi.org/10.1080/01431160802549310>
- Planchon, O., & Darboux, F. (2002). A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models. *CATENA*, 46(2–3), 159–176. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(01\)00164-3](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00164-3)
- Poiraud, A., Laveuf, C., & Dulong, J. (2016). *Identification et cartographie des têtes de bassin versant sur le SAGE "Estuaire de la Gironde". Mise au point d'une méthodologie et test sur le BV d'Artigues-Macqueline*. (Rapport intermédiaire de phases 1 et 2; p. 68).
- Poiraud, A., Sorrel, D.-L., & Laveuf, C. (2016, November 21). *Cartographie des têtes de bassin versant sur le territoire du SAGE Estuaire de la Gironde*. Atelier «Zones humides et têtes de bassins versants», Lathus (86).
- Rogers, D. (2010). *A Study of Coastal Headwater Stream Hydrology: Bannockburn Plantation, Georgetown County, SC* [Thèse de doctorat, Clemson University]. [http://tigerprints.clemson.edu/all\\_theses/79](http://tigerprints.clemson.edu/all_theses/79)
- Russell, P. P., Gale, S. M., Muñoz, B., Dorney, J. R., & Rubino, M. J. (2015). A Spatially Explicit Model for Mapping Headwater Streams. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 51(1), 226–239. <https://doi.org/10.1111/jawr.12250>
- SIGAL. (2015). *ETUDE DES TETES DE BASSIN VERSANT DU BASSIN-VERSANT DE L'ALAGNON* (p. 153). Syndicat Interdépartemental de Gestion de l'Alagnon et de ses Affluents (SIGAL).
- Soille, P. (2004). Optimal removal of spurious pits in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 40(12), Article 12. <https://doi.org/10.1029/2004WR003060>
- Srinivasan, M. S., & McDowell, R. W. (2009). Identifying critical source areas for water quality: 1. Mapping and validating transport areas in three headwater catchments in Otago, New Zealand. *Journal of Hydrology*, 379(1–2), 54–67. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.09.044>
- Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions, American Geophysical Union*, 38(6), 913. <https://doi.org/10.1029/TR038i006p00913>
- Tarboton, D. G. (1997). A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33(2), 309–319. <https://doi.org/10.1029/96WR03137>

- Villines, J. A., Agouridis, C. T., Warner, R. C., & Barton, C. D. (2015). Using GIS to Delineate Headwater Stream Origins in the Appalachian Coalfields of Kentucky. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12350>
- Whiting, P. J., & Bradley, J. B. (1993). A process-based classification system for headwater streams. *Earth Surface Processes and Landforms*, 18(7), 603–612. <https://doi.org/10.1002/esp.3290180704>
- Woods, R., Sivapalan, M., & Duncan, M. (1995). Investigating the representative elementary area concept: An approach based on field data. *Hydrological Processes*, 9(3–4), 291–312. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360090306>

---

# RESUME

Le SMIDDEST a prolongé par cette étude son action de cartographie et de connaissance des têtes de bassin versant et de leurs zones humides associées sur le territoire du SAGE « Estuaire de la Gironde et milieux associés » entrepris dès 2016.

La présente étude propose une démarche mixte de terrain et de modélisation pour cartographier les têtes de bassin versant. Elle s'appuie notamment sur une démarche géomorphologique qui traduit le lien existant entre le type de chenal et la surface drainée, indice de terrain de l'hydrodynamisme des sous bassins versants. Sur cette base, et en adaptant à chaque contexte les seuils minimaux et maximaux encadrant l'existence des têtes de bassin versant, elle fournit une cartographie à 1/25000 du contour des têtes de bassin versant, à partir d'un travail scientifique, et d'une validation concertée par les partenaires techniques œuvrant sur le territoire du SAGE.

En parallèle, ce rapport présente les méthodologies et stratégies employées pour construire les modèles de prélocalisation de zones humides potentielles sur les têtes de bassin versant de 3 bassins versants test. Basée sur une démarche d'apprentissage et d'intelligence artificielle, elle fournit divers modèles de prélocalisation. La qualité des modèles est variable et se heurte à des difficultés importantes sur le secteur landais.

Outre les rendus opérationnels (cartographies des TBV et des ZH potentielles à 1/25000 dans l'atlas accompagnant le rapport), l'étude aborde des problématiques scientifiques fondamentales qui appellent à des prolongements de recherche. En effet, l'intégration du Plateau landais dans le champ conceptuel des têtes de bassin versant est questionnée et les auteurs amorcent la réflexion en introduisant timidement le proto-concept de « TBV phréatique ». De la même manière, les divers essais de modélisation des ZH potentielles sur la zone landaise soulèvent des questionnements méthodologiques et pointent l'importance d'une approche par le couplage entre la micro-topographie et les niveaux fins de la nappe phréatique (obtenue par des suivis piézométrique et/ou une bonne connaissance des sols). Une approche par l'altitude relative infra-décimétrique des unités écologiques est suggérée.