



HAL
open science

Protocole de spatialisation et d'évolution d'états de surface de fossés

Jean-Stéphane Bailly, Cécile Dagès, Jeanne Dollinger, Marc Voltz, Philippe Lagacherie

► **To cite this version:**

Jean-Stéphane Bailly, Cécile Dagès, Jeanne Dollinger, Marc Voltz, Philippe Lagacherie. Protocole de spatialisation et d'évolution d'états de surface de fossés. [Rapport Technique] ONEMA-INRA. 2015, pp.60. hal-01496755

HAL Id: hal-01496755

<https://hal.science/hal-01496755v1>

Submitted on 30 Mar 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

LISAH

INRA, UMR LISAH
2, place Viala
F-34060 Montpellier

Protocole de spatialisation et d'évolution d'états de surface de fossés

Jean-Stéphane Bailly
Cécile Dagès
Jeanne Dollinger
Philippe Lagacherie
Marc Voltz

Livrable Numéro 3

Mars 2015



Convention d'études INRA-ONEMA 2013-2015

Table des matières

1	Définition du protocole	6
2	Typologies des états de surface des fossés	7
2.1	Bassins versants support des observations	7
2.2	Méthodes	7
2.2.1	Base de données d'observation des EDS	8
2.2.2	Campagnes de mesures d'infiltrabilité	8
2.2.3	Indices de sensibilité	8
2.2.4	Classifications	11
2.3	Typologie "Rugosité"	12
2.3.1	Choix des caractéristiques et pondération	12
2.3.2	Classifications	13
2.4	Typologie "Infiltrabilité"	15
2.4.1	Choix des caractéristiques	15
2.4.2	Régression	15
2.5	Typologies "Rétention"	17
2.5.1	Choix des caractéristiques et pondération	17
2.5.2	Classifications	20
2.6	Typologies globales	22
2.6.1	Typologie globale hydrophile	23
2.6.2	Typologie globale hydrophobe	25
2.6.3	Typologie globale fortement hydrophobe	27
2.7	Conclusion sur les typologies	30
3	Initialisation : Simulation spatiale des types d'EDS	34
3.1	Méthodes	34
3.1.1	Modèles de spatialisation	34
3.1.2	Co-variables paysagères	34
3.2	Modèles de spatialisation par bassin	35
3.3	Exemples de types initiaux simulés	37
3.4	Conclusion sur l'initialisation (spatialisation)	37
4	Évolution : Simulation annuelle des changements d'état des EDS	39
4.1	Simulation annuelle de pratiques d'entretien	39
4.1.1	Intensité annuelle des pratiques d'entretien	40
4.1.2	Simulation de pratiques par fossé	41
4.2	Conceptualisation des impacts par pratique sur les caractéristiques des typologies	42
4.3	Simulation de changements d'états d'EDS	43
4.4	Conclusion sur les changements d'état des EDS	44

5 Conclusion	45
A Grille d'observation des EDS	50
B Mise en équation de la rétention et d'un Kd équivalent	51
C Cartographies par bassin des covariables	53
D Modèles de spatialisation des types initiaux : typologie 'hydrophobe' et 'fortement hydrophobe'	54
E Spatialisation des types 'hydrophiles' Sur Roujan	56
F Outil de calcul de pente par bief	57
G Données supplémentaires sur les enquêtes de pratiques d'entretien	59

Liste des tableaux

1	Caractéristiques d'EDS des fossés utilisées : signification et codage en modalités, le cas échéant	10
2	Poids des caractéristiques dans la typologie "Rugosité". Les caractéristiques TCV_{EG} , $Embacles$, RV_F et RV_R sont de fait exclues de l'analyse compte tenu de leur non prise en compte dans les équations physiques	14
3	Correspondance entre types "infiltrabilité" et Ks moyens . . .	16
4	Poids des caractéristiques des typologies "Rétention". Les caractéristiques TCS_{EG} , $Embacles$, RV_F et RV_R sont de fait exclues de l'analyse compte tenu de leur non prise en compte dans les équations physiques	19
5	Hydrophile : distribution des types combinés et retenus	23
6	Hydrophobe : distribution des types combinés et retenus	25
7	Fortement hydrophobe : distribution des types combinés et retenus	28
8	Dénombrement par type - hydrophile	31
9	Dénombrement par type - hydrophobe	32
10	Dénombrement par type - fortement hydrophobe	32
11	Synthèse des enquêtes agriculteurs et collectivités : intensité annuelle d'entretien par élément	40
12	Synthèse des enquêtes agriculteurs et collectivités : période des pratiques d'entretien par élément	40
13	Caractéristiques discriminantes par typologie globale	42
14	Impact par pratique sur les modalités des caractéristiques discriminantes (et autres : HV_F et $Largeur$) <i>s.e.</i> signifie sans effet quantifié. Les cases vides supposent qu'il n'y a pas d'effet. . . .	43
15	Changement du type d'EDS "hydrophile" suivant chaque pratique	44
16	Enquêtes agriculteurs	59
17	Synthèse des enquêtes agriculteurs et collectivités : probabilité de recevoir une opération sur une année	59
18	Synthèse des enquêtes agriculteurs et collectivités : fréquence annuelle des pratiques d'entretien par élément entretenu	59
19	Synthèse des enquêtes agriculteurs et collectivités : période des pratiques d'entretien par élément	60
20	Synthèse des données observées : fréquence annuelle d'entretien par élément	60

Table des figures

1	Campagnes d'observation des états de surface de fonds de fossés et rases en 2013 et 2014. Les campagnes sont dites temporelles (suivi régulier dans le temps sur quelques fossés) ou spatiales (suivi irrégulier dans le temps mais quasi-exhaustif dans l'espace). Les nombres indiqués quantifie le nombre de fossés observés par campagne.	9
2	Notations sur un profil de fossé trapézoïdal symétrique avec végétation (vert). l et L (largeur en fond de fossé L) peuvent être aisément calculés à partir de W (<i>Largeur</i>), H_e (Profondeur d'eau) et m , fruit des parois.	12
3	Typologie "Rugosité" en 4 types (labels en bleu). Les chiffres rouges indiquent la répartition des 910 individus par type. . .	14
4	Typologie "Infiltration" en 5 types	15
5	Typologie "Rétention hydrophile" en 4 types	20
6	Typologie "Rétention hydrophobe" en 4 types	21
7	Typologie "Rétention fortement hydrophobe" en 5 types . . .	21
8	Typologie globale hydrophile	24
9	Typologie globale hydrophobe	26
10	Typologie globale fortement hydrophobe	29
11	Cartographie des types observés début 2014 (hydrophile : en haut, hydrophobe : au milieu, fortement hydrophobe : en bas). La couleur des points marque principalement la sous-typologie 'rugosité' puisque la palette de couleurs suit les valeurs numériques des codes et est donc adaptée aux ordres sur les centaines (rouge sombre : peu de végétation à vert sombre : beaucoup de végétation).	33
12	Indice topographique MRVBF [Gallant and Dowling, 2003] par bassin	35
13	Modèles (CART) de spatialisation par co-variables des types initiaux par bassin (dans ce mode de représentation de l'arbre, le critère au nœud est vérifié le long de la branche gauche et le type majoritaire est affiché dans chaque feuille.)	36
14	Spatialisation par simulation des types initiaux par bassin : exemple de la typologie hydrophile sur le bassin du Ruiné . .	38
15	Exemple de calendrier d'opérations d'entretien simulées pour 10 fossés du bassin de Roujan)	42

1 Définition du protocole

L'objectif de ce guide est de proposer un protocole qui puisse permettre sur un bassin versant agricole, de spatialiser un état observé ou simulé d'états de surface¹ de fossés infiltrants² selon des caractéristiques qui jouent sur les paramètres de transfert de pesticides et ceci à un instant donné ou en dynamique, sur une saison, une année.

Le protocole défini repose sur 3 étapes et différentes méthodes :

1. une première étape de définition de **typologies** des états de surface (EDS) des fossés, élaborées suivant des caractéristiques facilement observables à la surface des fossés et qui tiennent compte du type de caractéristiques physico-chimiques de molécules pesticides. Les typologies proposées ont pour objectif de réduire la variabilité de caractéristiques d'états de surface de fossés à prendre en compte *a priori*, et de cibler les caractéristiques principales impactant les paramètres de transfert. Les types proposés peuvent ensuite être cartographiés de manière efficace (nombre réduit) et ciblée (types définis suivant les caractéristiques les plus impactantes) par un levé terrain ou être cartographiés par "simulation" suivant un protocole de spatialisation défini en étape 2. Les modalités des caractéristiques, et par la suite les paramètres de transfert, peuvent ensuite être déduits du type de chaque fossé.
2. une deuxième étape qui définit un protocole de **spatialisation** de types de fossés initiaux sur un bassin, uniquement à partir de données spatiales standard, sans levé terrain ou en complément d'un levé terrain partiel, et pour trois types de bassin, situés dans des contextes pédo-climatiques contrastés.
3. une troisième étape qui définit un protocole d'**évolution** des types de fossés initiaux, observés ou simulés, à partir de la génération de calendriers de pratiques d'entretien qui impactent les types d'EDS, suivant également, trois types de bassin et suivant le type de gestionnaire des fossés (agriculteurs ou collectivités).

1. États de surface : observable à la surface

2. Une majeure partie de l'année

2 Typologies des états de surface des fossés

2.1 Bassins versants support des observations

Trois bassins situés dans des contextes pédo-climatiques différents de climats différents (Méditerranéen : Roujan(34) ; Semi-continentale : Morcille(69) ; Océanique : Ruiné (16)) ont été sélectionnés, au regard :

- de la présence fortement probable de fossés infiltrants sur une partie significative de l'année,
- de leur occupation du sol, essentiellement agricole,
- d'une connaissance minimum sur ces bassins, supports d'expérimentations hydrologiques (bassins expérimentaux agro-environnementaux)
- de leur diversité climatique.

2.2 Méthodes

Les méthodes mobilisées pour construire les typologies reposent sur :

- des bases de données d'observations réalisées sur une gamme de caractéristiques d'EDS de fossés sur les trois bassins : Roujan(34), Morcille(69) et Ruiné (16),
- des campagnes de mesures de paramètres (infiltrabilité, humidité, etc) réalisées conjointement aux observations de caractéristiques également sur ces trois bassins,
- des méthodes statistiques (analyse multivariée, classification) et de mesure d'importance des caractéristiques (indices de sensibilité) pour pondérer objectivement les caractéristiques dans la construction des typologies.

L'élaboration d'une typologie globale d'EDS des fossés, en lien avec les mécanismes de contamination des eaux par les pesticides, résulte de 3 sous-typologies construites de manière indépendante, puis ré-agrégées, qui ciblent chacune un paramètre lié au transfert, à savoir :

- la rugosité du fossé lié à la végétation qui contrôle le temps de séjour hydraulique, et dans une moindre mesure la hauteur d'eau, donc la charge (infiltration) et la surface d'échange surface-souterrain (infiltrabilité et rétention) sur un fossé de gabarit donné.
- l'infiltrabilité dans le fossé
- le coefficient de sorption (rétention) global des pesticides dans le fossé

Pour chacune de ces trois sous-typologies, le choix et la pondération des caractéristiques sont guidés par l'état de l'art (http://zonestampons.onema.fr/system/files/dollinger_at_al_2014.pdf), soit par l'estimation de mesures d'importance (indices de sensibilité) issus de modèles physiques ou conceptuels (hydraulicité, rétention) ou soit directement par construction d'un modèle statistique (infiltrabilité).

2.2.1 Base de données d’observation des EDS

Les états de surface (EDS) des fossés ont été observés sur les trois bassins, au cours des années 2013 et 2014 (Fig. 1).

Au total, 926 états de surface ont ainsi été observés, dont 910 sans donnée manquante, suivant 44 caractéristiques initiales selon la grille d’observation présentée en annexe A, grille issue de travaux précédents [Levavasseur, 2012, Lagacherie et al., 2006] et adaptée pour mieux prendre en compte des caractéristiques de litières. A noter que l’on considère par la suite les rases (nom régional propre au Bassin de la Morcille), comme des fossés ’intra-parcellaires’.

Une agrégation et un codage pour quelques variables a été réalisé sur cette base pour aboutir, *in fine* aux caractéristiques présentées dans le tableau 1, qui reprend uniquement les caractéristiques que nous mobiliserons dans la suite de ce guide.

2.2.2 Campagnes de mesures d’infiltrabilité

Des mesures automatisées d’infiltrabilité par double anneaux de Muntz https://www6.inra.fr/cahier_des_techniques/Media/racine-d-arborescence/annee-2014/N-3-2014/Garnier ont été réalisées sur les 3 bassins pour estimer la conductivité à saturation K_s (en $m.s^{-1}$) des fonds de fossés [Garnier and Elamri, 2014]. Au total 156 mesures ont été réalisées, associées aux observations des caractéristiques des EDS ainsi que des mesures d’humidité et de texture³. Sur un fossé à une date, 4 mesures par fossé ont généralement été mises en œuvre, ce qui donne potentiellement 37 mesures de Ks agrégées par fossé.

2.2.3 Indices de sensibilité

Dans le cas des typologies ”rugosité” et ”rétention”, le poids donné à chaque caractéristique X_i dans la construction d’une typologie est proportionnel, pour rester entier, à une mesure d’importance de la caractéristique à partir de son indice de sensibilité total S_i sur la variable ou le paramètre Y qui caractérise le processus visé (rugosité, infiltrabilité et coefficient de sorption). D’une manière générale, $S_i = \frac{\partial Y}{\partial X_i} \frac{X_i}{Y}$.

Nous retiendrons comme formulation générale de cet indice, un indice basé sur la variance, encore appelé indice total de sensibilité (car il tient compte des interactions entre les caractéristiques X_i) [Saltelli et al., 2008] :

$$S_i = \frac{E[Var(Y/X_{\sim i})]}{var(Y)} \quad (1)$$

où $X_{\sim i} = (X_j)_{j \neq i}$ désigne toutes les autres variables sauf X_i , E l’opérateur d’espérance et Var la variance.

3. Données à venir

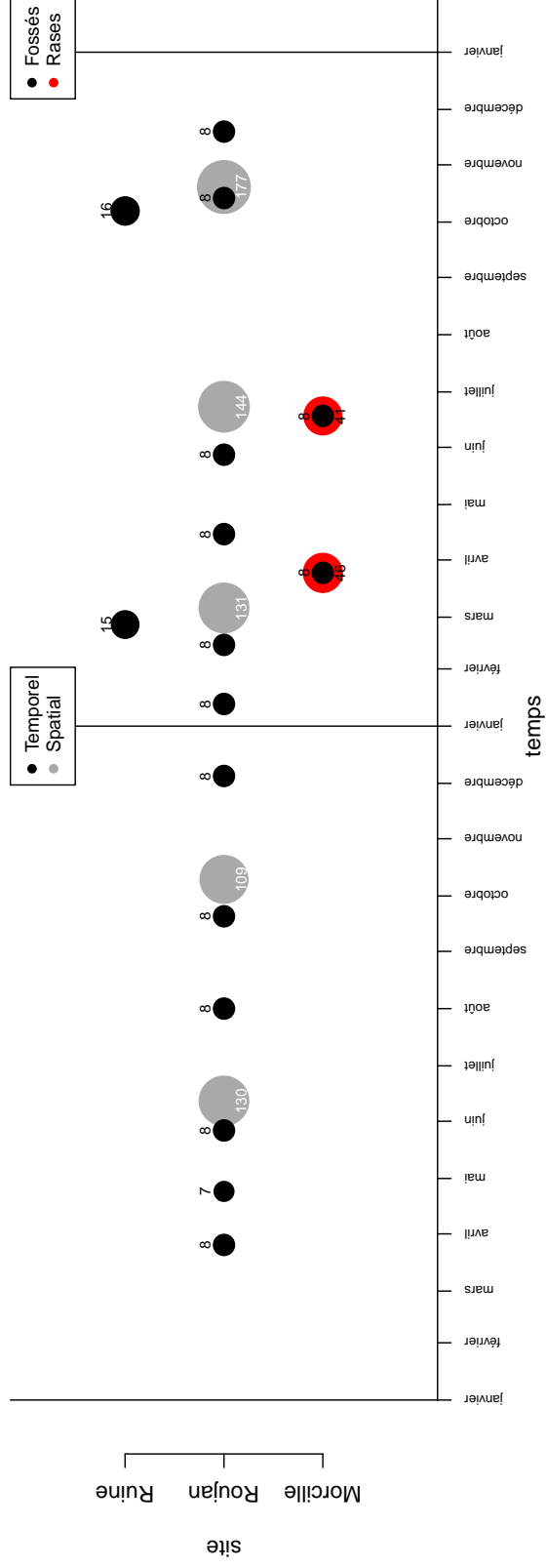


FIGURE 1 – Campagnes d’observation des états de surface de fonds de fossés et rases en 2013 et 2014. Les campagnes sont dites temporelles (suivi régulier dans le temps sur quelques fossés) ou spatiales (suivi irrégulier dans le temps mais quasi-exhaustif dans l’espace). Les nombres indiqués quantifie le nombre de fossés observés par campagne.

Nom	Unité	Acronyme	Modalités	Agrégation
Largeur	cm	<i>Largeur</i>	a : [0,60] b : (60,110] c : (110,500]	moyenne entre <i>Largeur_{inf}</i> et <i>Largeur_{sup}</i>
Largeur inférieure (Largeur de fond de fossé)	cm	<i>Largeur_{inf}</i>	continue	
Profondeur	cm	<i>Profondeur</i>	a : [0,30] b : (30,70] c : (70,150]	
Taux de couverture spatiale par la végétation en fond de fossé	s.u.	<i>TCV_F</i>	a : [0,0.05] b : (0.05,0.25] c : (0.25,0.5] d : (0.5,1]	
Hauteur de végétation en fond de fossé	cm	<i>HV_F</i>	a : 0 b : <15 c : <15 et >15 d : >15	
Taux de couverture spatiale par la végétation sur les parois	s.u.	<i>TCV_R</i>	a : [0,0.05] b : (0.05,0.25] c : (0.25,0.5] d : (0.5,1]	moyenne des 2 parois
Hauteur de végétation sur les parois	cm	<i>HV_R</i>	a : 0 b : <15 c : <15 et >15 d : >15	maximum des 2 parois
Taux de couverture spatiale par la litière	s.u.	<i>TCS_L</i>	a : [0,0.1] b : (0.1,0.3] c : (0.3,0.55] d : (0.55,1]	
Épaisseur de de la litière	cm	<i>EpLit</i>	a : 0 b : (0,1] c : (1,5] d : >5	
Taux de couverture par des cendres	s.u.	<i>Cendres</i>	a : 0 b : 0.5 c : 1	
Présence de litière de matière sèche 'tiges'	s.u.	<i>Litière_{MST}</i>	a : 0 b : 1	
Présence de litière de matière sèche 'feuilles'	s.u.	<i>Litière_{MSF}</i>	a : 0 b : 1	
Présence de litière de matière organique transformée	s.u.	<i>Litière_{MOT}</i>	a : 0 b : 1	
Présence de litière de matière organique et sédiments	s.u.	<i>Litière_{MOS}</i>	a : 0 b : 1	
Intensité de la présence d'embâcles	s.u.	<i>Embâcles</i>	a : 0 b : 0.5 c : 1	
Taux de couverture du fond par des éléments grossiers	s.u.	<i>TCS_{EG}</i>	a : [0,0.05] b : (0.05,0.175] c : (0.175,1]	
Type de végétation en fond de fossé	s.u.	<i>RV_F</i>	a : 0 b : herbacé c : mixte d : ligneux	
Type de végétation sur les parois	s.u.	<i>RV_R</i>	a : 0 b : herbacé c : mixte d : ligneux	
Présence d'atterrissements fluviaux		<i>Atterrissements_{flu}</i>	a : 0 b : 1	

TABLE 1 – Caractéristiques d'EDS des fossés utilisées : signification et codage en modalités, le cas échéant

S_i varie de 0 à 1. Plus il est proche de 1, plus la variabilité de la caractéristique X_i impacte Y , et donc plus son poids sera important. La somme des S_i peut être supérieure ou égale à 1. Lorsque elle est égale à 1 strictement, le modèle est alors purement additif sans interaction entre les variables X_i .

Cet indice est estimé soit par régression linéaire, soit par calcul (dérivation, modèle adjoints), soit par simulation Monte-Carlo (indices de Sobol).

2.2.4 Classifications

Pour aboutir aux types par processus et à leur interprétation, les méthodes statistiques suivantes sont successivement appliquées ("rugosité" et "rétention") :

1. une analyse multivariée (Analyse des correspondances multiples-ACM), avec pondération de variables [Josse et al., 2011], méthode développée spécifiquement pour ce projet et aboutissant à la définition de facteurs numériques résumant l'information contenue dans les variables de base. Cette étape permet de réduire la dimension des caractéristiques par la construction de facteurs qui sont des combinaisons des caractéristiques de base. Elle permet aussi de réaliser une classification sur facteurs quantitatifs et non-corrélés, donc une classification plus stable.
2. une première classification non supervisée sur facteurs par classification ascendante hiérarchique (CAH) qui aboutit à une première typologie (types ACH) optimisée selon la méthode de Ward [Ward Jr, 1963] regroupant les individus les plus ressemblants, sans considération sur le nombre d'individus par types (représentativité des types).
3. une seconde classification, supervisée cette fois-ci (modèle de discrimination), utilisant la méthode CART (Classification And Regression Tree) [Breiman et al., 1984] par apprentissage des types construits par l'ACH à partir des caractéristiques des EDS. Ce modèle permet d'interpréter directement et par simples règles binaires les types construits par l'ACH par rapport aux caractéristiques observées, mais aussi de les réarranger suivant de nouvelles classes (regroupements de types ACH peu représentés), de nouveaux types (feuille de l'arbre), qui préservent tout de même au maximum les types ACH (notion de taux recouvrement des types ACH évoquée par la suite). Ce modèle de discrimination permet d'affecter à un type un nouvel individu fossé observé. Ce sont les types issus de ce modèle CART (types CART) qui seront *in fine* retenus.

Dans le cas de la typologie "infiltrabilité", la disponibilité d'un jeu de données sur l'infiltrabilité observée conjointement aux caractéristiques d'EDS nous amène à construire des types qui expliquent directement la mesure d'infiltrabilité. Là encore, cette modélisation statistique est également réalisée à l'aide de la méthode CART, mais en mode "régression".

2.3 Typologie "Rugosité"

Nous utilisons pour résumer ce processus le paramètre de Strickler K exprimé en $m^{\frac{1}{3}}.s^{-1}$, inversement proportionnel à la rugosité.

2.3.1 Choix des caractéristiques et pondération

Pour cette typologie, les caractéristiques retenues *a priori* sont [Dollinger et al., Accepted] : *Largeur*⁴, TCV_F , HV_F , RV_F , TCV_R , HV_R , RV_R , TCV_{EG} , *Embacles* (Tab. 1).

La rugosité d'un fossé (Fig. 2) est composée par la rugosité du fond du fossé et la rugosité des parois.

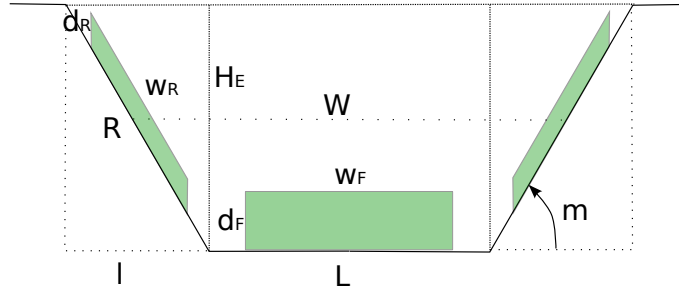


FIGURE 2 – Notations sur un profil de fossé trapézoïdal symétrique avec végétation (vert). l et L (largeur en fond de fossé L) peuvent être aisément calculés à partir de W (*Largeur*), H_e (Profondeur d'eau) et m , fruit des parois.

Pour cette loi de composition sur un fossé de largeur en fond de fossé L et de fruit⁵ m ⁶, on s'appuie sur la formule de Einstein [Einstein, 1934] :

$$\frac{(L + 2l)}{K^{\frac{3}{2}}} = \frac{L}{K_F^{\frac{3}{2}}} + \frac{2l}{K_R^{\frac{3}{2}}} \quad (2)$$

Les rugosités du fond K_F ou parois K_R du fossé liées à la végétation peuvent-être reliées au facteur de blocage B_x proposée par [Nepf, 2012] sur chaque section j qui mesure la part de la section occupée par de la végétation, et estimée à partir de nos caractéristiques selon :

$$B_x = \frac{wd}{WH_e} \quad (3)$$

où W et H_e sont respectivement la largeur moyenne (*Largeur*) et la hauteur d'eau de la section j considérée. w est assimilé au produit de la racine

4. intervenant uniquement dans la loi de composition du Strickler

5. pente

6. fruit médian des fossés de la base de données : 1.07

carrée du taux de recouvrement par la végétation sur la section considérée (TCV_F ou TCV_R) et d désigne la hauteur verticale de la végétation sur cette section (d correspond à HV_F ou HV_R), tous deux corrigés par un exposant du facteur f représentant la porosité⁷ de la végétation dans le volume englobant de la végétation décrit dans le produit $TCV_F * HV_F$. L'introduction de ce facteur f permet de tenir compte d'une surestimation systématique liée à l'observation du volume effectivement occupé par la végétation. On considère ce facteur f homogène dans toute les dimensions. Sur la section j de fossé considérée de largeur L_j (fond $j = F$, paroi gauche ou droite $j = R$), le produit wd est calculé par :

$$wd = \sqrt{TCV_j} * HV_j * f^{2/3} * L_j \quad (4)$$

Ensuite, en considérant que $B_x < 1$, on relie pour une section donnée le Strickler K au facteur de blocage B_x [Luhar and Nepf, 2013] en considérant une végétation émergente par :

$$K_j = \frac{\sqrt{g}}{nH_e^{\frac{1}{6}} \sqrt{\frac{C^*}{2}} (1 - B_x)^{\frac{-3}{2}}} \quad (5)$$

où g est la constante gravitationnelle, C^* une contrainte de cisaillement prise entre 0.05 et 0.13 [Nepf, 2012], et n un facteur introduit égal à $1m^{\frac{1}{3}}.s^{-1}$ pour conserver les bonnes dimensions.

Pour un profil trapézoïdal symétrique, on peut exprimer K à partir des caractéristiques observées suivant les equations 2, 3, 4, et 5, expression que nous ne détaillerons pas ici pour alléger l'écriture.

Pour des caractéristiques de fossés trapézoïdaux symétriques variables suivant des lois uniformes définies ci-après dans le système international (et avec tirages indépendants⁸), et résultant pour ses paramètres, des distributions observées, les indices de sensibilité S_i et les poids calculés sont détaillés dans le tableau 2. Dans cette analyse, on s'intéresse à des écoulements avec faibles hauteurs d'eau H_e comprises entre 0.01 et 0.3 m, pour viser les processus s'exerçant principalement lors d'écoulements fréquents dans les fossés (0.3 m sur le bassin de Roujan correspond par exemple à un écoulement de période de retour trimestrielle à l'exutoire du bassin [Benitou, 2013]).

2.3.2 Classifications

L'ACH réalisée après ACM avec pondérations des caractéristiques sur les 910 individus fossés nous conduit à retenir 4 types CAH optimisés. Ces 4 types s'expliquent à 100% (taux de recouvrement des types CAH par CART) par CART à partir de l'unique caractéristique TCV_F (Fig. 3). Les 4 types CART obtenus sont également ordonnés vis à vis de la rugosité : type 4

7. En fait, 1 moins la porosité

8. et donc d'hypothèse d'indépendance entre les différentes caractéristiques

Caractéristique	Loi	S_i	Poids
<i>Largeur</i>	U(0.3,1.5)	0.01	2
H_e	U(0.01,0.3)	0.35	-
TCV_F	U(0,1)	0.31	67
HV_F	U(0,1)	0.07	15
RV_F	-	-	0
TCV_R	U(0,1)	0.05	11
HV_R	U(0,1)	0.02	4
RV_R	-	-	0
TCV_{EG}	-	-	0
<i>Embacles</i>	-	-	0
I	U(0.0005,0.05)	0.00	-
C	U(0.05,0.13)	0.26	-
f	U(0.1,0.6)	0.27	-

TABLE 2 – Poids des caractéristiques dans la typologie "Rugosité". Les caractéristiques TCV_{EG} , *Embacles*, RV_F et RV_R sont de fait exclues de l'analyse compte tenu de leur non prise en compte dans les équations physiques

est plus rugueux que type 3, lui-même plus rugueux que type 2, lui-même plus rugueux que type 1. Ce résultat où seul, le taux de couverture par la végétation intervient est intuitif : c'est effectivement la seule caractéristique observée qui joue le même rôle, quelque-soit la débit ou la hauteur d'eau dans le fossé.

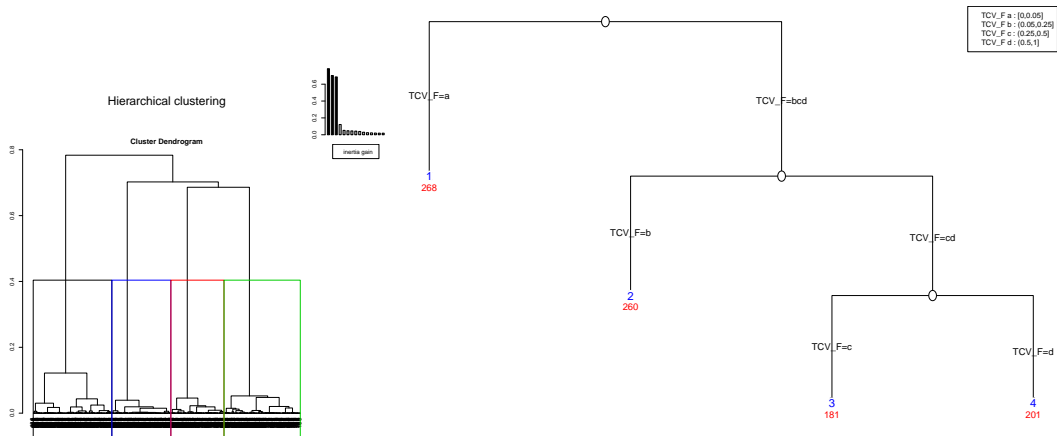


FIGURE 3 – Typologie "Rugosité" en 4 types (labels en bleu). Les chiffres rouges indiquent la répartition des 910 individus par type.

2.4 Typologie "Infiltrabilité"

2.4.1 Choix des caractéristiques

Pour cette typologie, les caractéristiques retenues *a priori* sont [Dollinger et al., Accepted] : TCV_F , RV_F , $Atterrissement_{flu}$, TCS_{EG} , TCS_L , $Litiere_{MST}$, $Litiere_{MSF}$, $Litiere_{MOT}$, $Litiere_{MOS}$, $EpLit$, $Cendres$ (Tab 1).

Pour ce processus, nous disposons d'un jeu de données sur l'infiltrabilité observée (mesures de K_s) conjointement aux caractéristiques d'EDS observées. Ceci nous amène à construire des types qui expliquent directement la mesure d'infiltrabilité à partir des caractéristiques d'EDS. La pondération des variables résulte directement de cette modélisation statistique.

2.4.2 Régression

Après avoir agrégé les répétitions par fossé et par date suivant la médiane des mesures (pour éliminer l'effet de valeurs extrêmes), un modèle de régression par CART a donc été construit pour expliquer les valeurs de K_s , quantitatives, en fonction des caractéristiques d'EDS observées sus-citées, qualitatives.

En autorisant un nombre minimum d'individus par feuille fixé à 4, le modèle obtenu explique 33% des K_s médians.

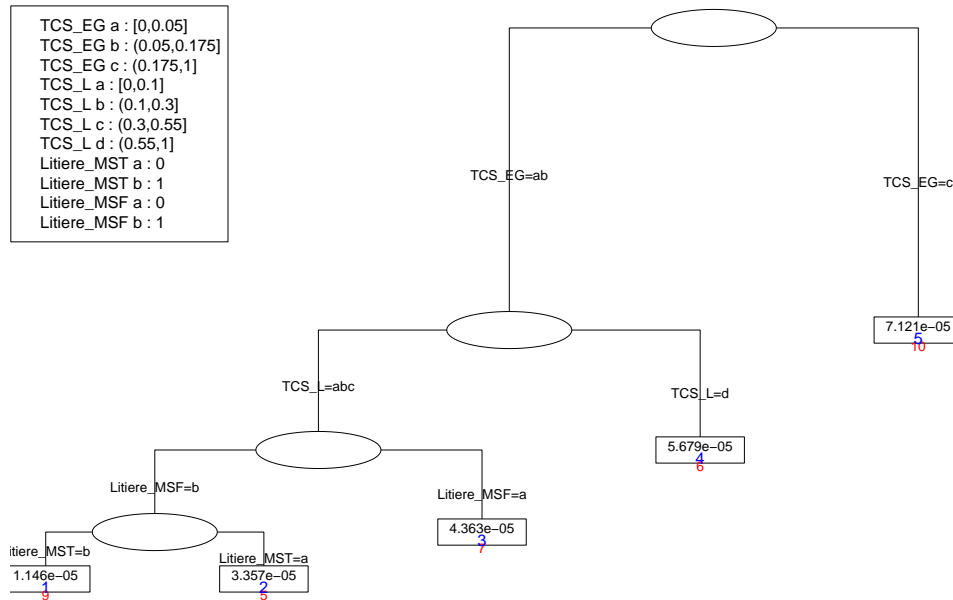


FIGURE 4 – Typologie "Infiltration" en 5 types

Ce modèle fait intervenir par ordre d'importance (hauteur des branches) les variables : TCS_{EG} , TCS_L , $Litiere_{MSF}$ et $Litiere_{MST}$. En affectant le type 1 à 5 à chaque feuille de cette arbre, nous obtenons une typologie en 5 types, auxquels on peut directement rattacher une valeur moyenne de K_s (Tab. 3). Ces 5 types CART sont ordonnés vis à vis de l'infiltrabilité.

Type	K_s ($m.s^{-1}$)
1	1.15e-05
2	3.36e-05
3	4.36e-05
4	5.68e-05
5	7.12e-05

TABLE 3 – Correspondance entre types "infiltrabilité" et K_s moyens

L'interprétation du modèle CART montre un effet direct ou indirect des variables sur le K_s :

- un taux de couverture du fond du fossé en éléments grossiers favorise l'infiltrabilité,
- une couverture quasi-recouvrante du fond du fossé par de la litière favorise l'infiltrabilité,
- pour des taux de couverture en litière plus faibles, la présence de litières sous forme de tiges ou feuilles sèches diminuent l'infiltrabilité. Ce dernier cas est plus difficilement interprétable et il concerne peu d'individus.

Les variables explicatives sont en effet celles qui marquent les régimes d'écoulement du fossé (vitesses) qui contrôle pour partie la morphogénèse des sols de fond de fossé.

Il est à noter que, si on rajoute les mesures d'humidité initiale également mesurées dans le modèle, on n'explique pas plus de variabilité du K_s . Ceci conforte l'effet significatif des variables sélectionnées.

2.5 Typologies "Rétention"

Trois typologies rétention sont constituées, par type de comportement de molécule :

- une typologie rétention hydrophile (comportement "Glyphosate")
- une typologie rétention hydrophobe (comportement "Diuron")
- une typologie rétention fortement hydrophobe (comportement "Chlorpyrifos")

2.5.1 Choix des caractéristiques et pondération

Pour ces trois typologies, les caractéristiques retenues *a priori* sont quasiment les mêmes que pour l'infiltration, à savoir [Dollinger et al., Accepted] : TCV_F , HV_F , RV_F , $Atterrissement_{flu}$, TCS_L , $Litiere_{MST}$, $Litiere_{MSF}$, $Litiere_{MOT}$, $Litiere_{MOS}$, $EpLit$, $Cendres$ (Tab. 1).

Pour ces trois typologies, le paramètre cible est le coefficient de sorption du bief Kd^* exprimé en $cm^3.g^{-1}$.

Comme pour l'hydraulicité, le poids attribué à chaque caractéristique est issu des indices de sensibilité totaux de la rétention selon l'équation du Kd^* du bief et les gammes de valeurs issus des travaux réalisés dans les autres tâches du projet⁹ et dans le travail de thèse en cours de Jeanne Dollinger.

Sous hypothèse de processus de sorption à l'équilibre (rétention hydraulique suffisante), on obtient une expression de la rétention (exprimée en %) dans un bief de longueur unitaire (1 mètre de long) présentée en annexe B. Par décomposition de la rétention, on obtient une formulation du Kd^* du bief avec pour formulation générale (Eq. 6)(Voir le détail de la mise en équation en annexe B) :

$$Kd^* = \frac{M_s}{M} Kd_s + \frac{M_v}{M} Kd_v + \frac{M_l}{M} Kd_l + \frac{M_c}{M} Kd_c \quad (6)$$

avec :

- M , la masse totale des compartiments solides, somme de M_s , la masse de sol (sédiments), M_v la biomasse fraîche (végétation), M_l , la masse de litière et M_c , la masse de cendres, toutes exprimées en g .
- Kd_s, Kd_v, Kd_l, Kd_c désignent les coefficients de sorption (en cm^3/g) respectivement du sol, de la végétation de la litière et des cendres, dépendant du type de molécule (hydrophile, hydrophobe, fortement hydrophobe).

Pour estimer les différentes masses pour une hauteur d'eau H_e dans le fossé, on considère :

- $M_s = Largeur_{inf} * 100 * 2 * d_{sed}$, avec M_s exprimée en g , $Largeur_{inf}$ en cm , et avec d_{sed} la densité du sol. On considère en effet un zone de mélange homogène sur 2 cm du sol de fond de fossé sur ce fossé unitaire de 100 cm de long.

9. rapport intermédiaire 2014

- $M_l = Largeur_{inf} * 100 * \min(EpLit, H_e) * TCS_L * d_{lit}$, avec M_l exprimée en g, $Largeur_{inf}$ en cm, et avec d_{sed} la densité de la litière dominante
- $M_v = Largeur_{inf} * 100 * \min(HV_F, H_e) * TCV_F * f * d_{veg}$, avec M_v exprimée en g, $Largeur_{inf}$ en cm, avec d_{veg} la densité de la végétation fraîche, et f le même facteur correctif de porosité de la végétation que celui introduit pour l'hydraulique.
- $M_c = Largeur_{inf} * 100 * \min(EpCen, H_e) * Cendres * d_{cendres}$, avec M_c exprimée en g, $Largeur_{inf}$ en cm, avec $d_{cendres}$ la densité de la cendre et $EpCen$ l'épaisseur de la cendre (caractéristique non observée).

Pour des caractéristiques variables suivant des lois uniformes définies ci-après¹⁰ (et avec tirages indépendants), et résultant des distributions observées pour leurs paramètres, les indices de sensibilité S_i et les poids calculés sont détaillés dans le tableau 4.

10. Pour les données de Kd sur les cendres pour le Chlorpyrifos, nous faisons l'hypothèse que $Kd_c = 100 * Kd_s$

Caractéristique	Loi	S_i (ex : Hydro- phile)	Poids Hydro- phile)	Poids (Hydro- phobe)	Poids (Fort Hydro- phobe)
$Largeur_{inf}$	U(10,100)	0	0	0	2
H_e	U(1,30)	0.14	-	-	-
TCS_L	U(0,1)	0.02	6	19	50
TCV_F	U(0,1)	0.18	58	20	7
$Cendres$	U(0,1)	0.00	0	35	29
d_{sed}	U(1.1,1.7)	0.01	-	-	-
d_{lit}	U(0.1,0.8)	0.01	-	-	-
d_{veg}	U(1.3,1.7)	0.00	-	-	-
$d_{cendres}$	U(0.7,0.9)	0.00	-	-	-
$EpLit$	U(0.1,7)	0.02	6	16	11
f	U(0.1,0.6)	0.07	-	-	-
HV_F	U(0,50)	0.09	30	11	1
$EpCen$	U(0.1,0.5)	0.00	-	-	-
Glyphosate					
Kd_s	U(50,320)	0.13	-	-	-
Kd_v	U(0.3,2.1)	0.00	-	-	-
Kd_l	U(0.8,9.6)	0.00	-	-	-
Kd_c	U(23,35)	0.00	-	-	-
Diuron					
Kd_s	U(2.5,18.5)	-	-	-	-
Kd_v	U(3.7,5.2)	-	-	-	-
Kd_l	U(26,260)	-	-	-	-
Kd_c	U(540,1200)	-	-	-	-
Chlorpyrifos					
Kd_s	U(18,85)	-	-	-	-
Kd_v	U(550,2200)	-	-	-	-
Kd_l	U(1.8e04,2e04)	-	-	-	-
Kd_c	U(1800,8500)	-	-	-	-

TABLE 4 – Poids des caractéristiques des typologies "Rétention". Les caractéristiques TCS_{EG} , $Embacles$, RV_F et RV_R sont de fait exclues de l'analyse compte tenu de leur non prise en compte dans les équations physiques

2.5.2 Classifications

Typologie rétention hydrophile Pour la typologie hydrophile, l'ACH réalisée après ACM avec pondérations des caractéristiques sur les 910 individus fossés propose 4 types qui correspondent aux modalités de la caractéristique TCV_F (Fig. 5). Ces 4 types s'expliquent à 100% (taux de recouvrement des types CAH par CART) par CART à partir de l'unique caractéristique TCV_F (Fig. 5). Les 4 types CART obtenus sont également ordonnés vis à vis du Kd^* du bief : type 1 > type 2 > type 3 > type 4.

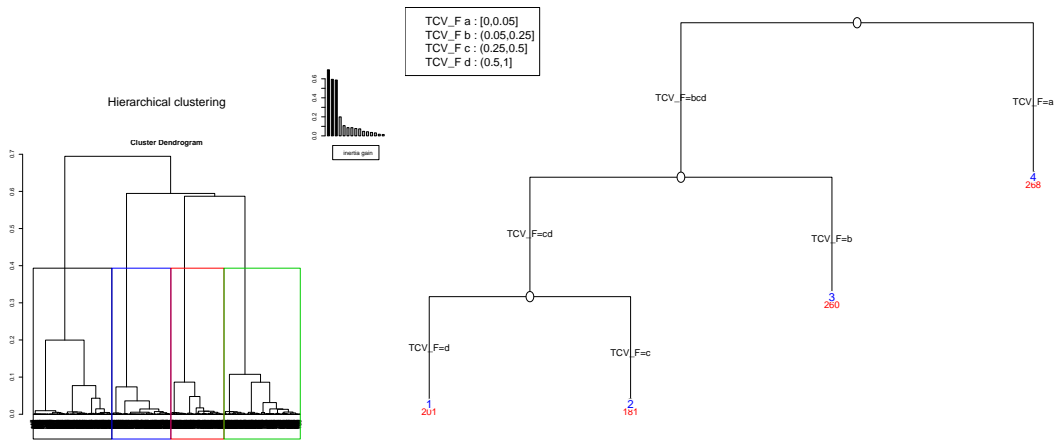


FIGURE 5 – Typologie "Rétention hydrophile" en 4 types

Typologie rétention hydrophobe Pour la typologie hydrophobe, 5 types CAH sont proposés (Fig. 6). 4 de ces 5 types s'expliquent à 98% (taux de recouvrement des types CAH par CART) par CART à partir des caractéristiques TCS_L et TCV_F (Fig. 6). Les 4 types CART obtenus ne sont pas complètement ordonnables vis à vis du Kd^* du bief.

Typologie rétention fortement hydrophobe Pour la typologie fortement hydrophobe, l'ACH réalisée après ACM avec pondérations des caractéristiques sur les 910 individus fossés propose 6 types. Ces 6 types s'expliquent à 98% (taux de recouvrement des types CAH par CART) par CART à partir des caractéristiques TCS_L et $EpLit$ (Fig. 7). Les 5 types CART obtenus sont ordonnés vis à vis du Kd^* du bief et de la rétention.

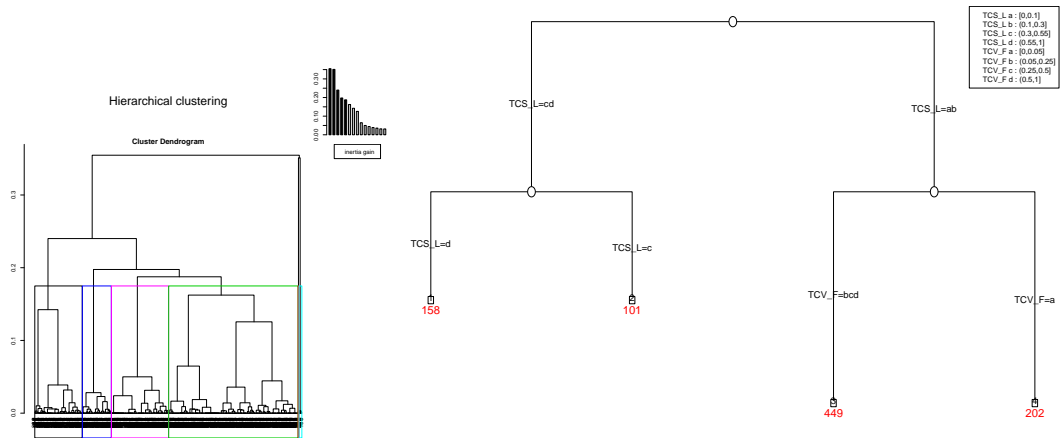


FIGURE 6 – Typologie "Rétention hydrophobe" en 4 types

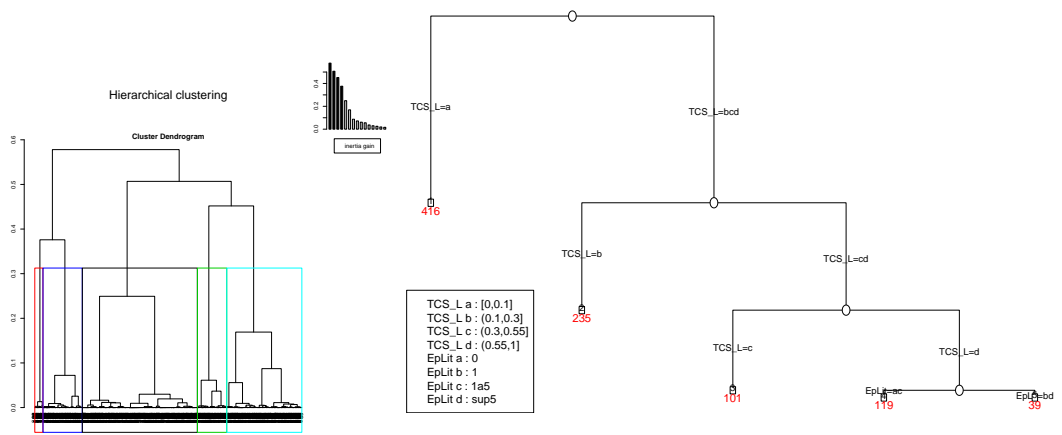


FIGURE 7 – Typologie "Rétention fortement hydrophobe" en 5 types

2.6 Typologies globales

Pour construire une typologie globale agrégeant les trois sous-typologies par processus ("rugosité", "infiltrabilité" et "rétention"), le principe est de s'intéresser aux combinaisons des sous-types et de ne retenir que les combinaisons les plus fréquentes, ce qui suppose de faire des regroupements. Pour ce faire, le même cortège de méthodes (CART) est utilisé, à savoir :

- le codage d'un type combiné défini par :

$$code_{global} = 100 * code_{type.rugosite} + 10 * code_{type.infiltrabilite} + code_{type.retenion}$$

Par exemple, un fossé de type 1 de la sous-typologie "rugosité" ($TCV_F = [0, 0.05]$), de type 5 de la sous-typologie "infiltrabilité" ($TCS_{EG} = [0.175, 1]$) et de type 2 de la sous-typologie "rétention hydrophobe" ($TCS_L = [0.3, 0.55]$) aura pour code global : 152.

- une méthode de regroupement par CART. On cherche dans ce cas, à expliquer ces types combinés à partir du groupe des caractéristiques d'EDS expliquant chaque sous-type par processus. On contrôle l'arbre formé en imposant un minimum d'individus par feuille (25 individus), ce qui permet de contrôler un seuil de fréquence des types combinés, un objectif fixé pour ces typologies globales étant d'aboutir à environ une quinzaine de types globaux.
- un forçage de certaines modalités afin d'inclure dans les types la présence de matière organique transformée et ou mélangées aux sédiments (modalités de litière MOS ou MOT), pouvant impactée de manière importante la rétention. Pour autant cette caractéristique ressort difficilement dans les typologies du fait du déséquilibre des modalités de ces caractéristiques ($Litiere_{MOS}$ ou $Litiere_{MOT}$) dans la base de données EDS. On démultiplie donc "à la main" pour un type global, la présence de d'une ou l'autre de ces modalités : $code_{global} - mo$.

2.6.1 Typologie globale hydrophile

On obtient 20 types combinés sur les $4 * 5 * 4 = 80$ possibles (Tab. 5). CART retient 12 types (80 % de recouvrement des 20 types) : "114" "134" "154" "223" "233" "243" "253" "322" "332" "352" "421" "431", discriminés par les caractéristiques suivantes (par ordre d'importance) : TCV_F , TCS_{EG} et $Litiere_{MSF}$ (Fig. 8). Est ajouté un type 243 – *mo*. La typologie globale "hydrophile" contient donc *in fine* **13 types**.

	114	134	154	223	233	243	243-mo	253	322	332	352	421	431
114	27												
124	18												
134		78											
144	22	12											
154			111										
213				28									
223				36									
233					74								
243						43							
243-mo							14						
253								65					
312									19				
322									24				
332										73			
342									16	13			
352											36		
411												13	
421												30	
431													133
441												3	4
451												7	11

TABLE 5 – Hydrophile : distribution des types combinés et retenus

TCV_F a :	[0,0,0,6]
TCV_F b :	[0,0,5,0,2,5]
TCV_F c :	[0,2,5,0,5]
TCV_F d :	[0,5,1]
Littere_MS F a :	0
Littere_MS F b :	1
TC S_EG a :	[0,0,0,6]
TC S_EG b :	[0,0,5,0,1,7,5]
TC S_EG c :	[0,1,7,5,1]
TC S_L a :	[0,0,1]
TC S_L b :	[0,1,0,3]
TC S_L c :	[0,3,0,5,5]
TC S_L d :	[0,5,5,1]

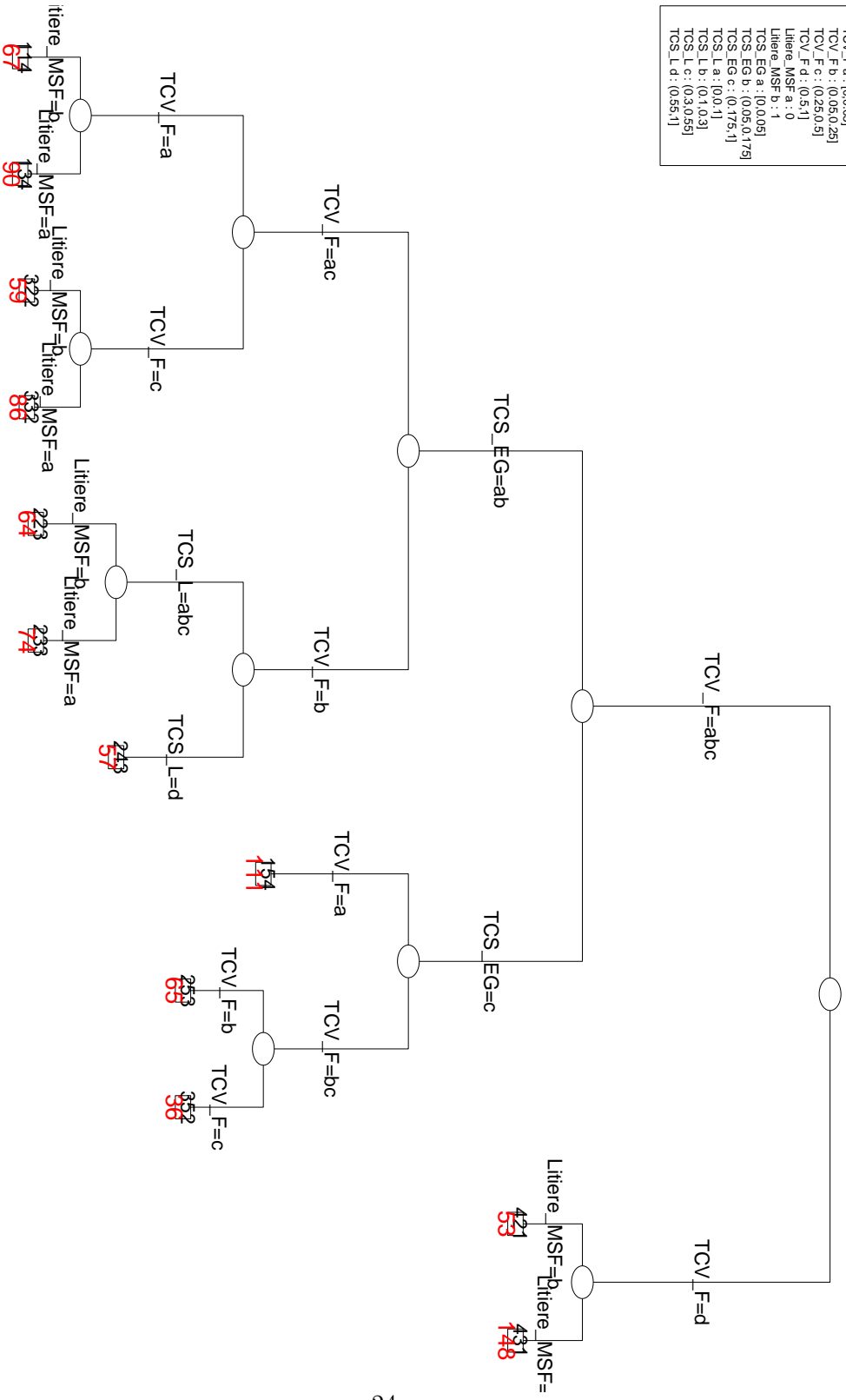


FIGURE 8 – Typologie globale hydrophile

2.6.2 Typologie globale hydrophobe

On obtient 39 types combinés sur les $4*5*4 = 80$ possibles (Tab. 6). CART avec des feuilles à 25 individus minimum, retient 14 types (78 % de recouvrement des 39 types) : "114" "134" "141" "154" "223" "233" "241" "253" "323" "333" "341" "353" "423" "433", discriminés par les caractéristiques suivantes (par ordre d'importance) : TCS_L , TCS_{EG} , TCV_F et $Litiere_{MSF}$ (Fig. 9). Est ajouté un type 241 – *mo*. La typologie globale "hydrophobe" contient donc **15 types**.

	114	134	141	154	223	233	241	241-mo	253	323	333	341	353	423	433
112	5														
114	22														
122	3														
124	15														
132		3													
134		75													
141			34												
151				9											
152				12											
154				90											
212					11										
213					17										
222					6										
223					30										
232						12									
233						62									
241							43	14							
251							10	2							
252									12						
253									41						
312										9					
313										10					
322										5					
323										19					
332											8				
333											65				
341												29			
351												7			
352													3		
353													26		
412														4	
413														9	
423														30	
432															7
433															126
441														3	4
451														1	2
452														1	
453														5	9

TABLE 6 – Hydrophobe : distribution des types combinés et retenus

2.6.3 Typologie globale fortement hydrophobe

On obtient 62 types combinés sur les $4 * 5 * 5 = 100$ possibles (Tab. 7). CART avec des feuilles à 25 individus minimum, retient 16 types (61 % de recouvrement des 62 types) : "131" "144" "151" "152" "221" "231" "232" "244" "244-mo" "252" "322" "331" "332" "344" "422" "431" "432", discriminés par les caractéristiques suivantes (par ordre d'importance) : TCV_F , TCS_{EG} , TCS_L et $Litiere_{MSF}$ (Fig. 10). Est ajouté un type 244 – mo. La typologie globale "fortement hydrophobe" contient donc **17 types**.

	131	144	151	152	221	231	232	244	244-mo	252	322	331	332	344	422	431	432
111	15																
112		7															
113		5															
121	8																
122		7															
123		3															
131	65																
132		10															
133		3															
144		24															
145		10															
151			67														
152				23													
153				12													
154				8													
155				1													
211					9												
212							8										
213							11										
221					16												
222							14										
223							6										
231						44											
232							18										
233							12										
244								33		9							
245								10		5							
251					6	18											
252										17							
253										12							
254								8		2							
255								2									
311												3					
312											7						
313											9						
321												5					
322											14						
323											5						
331												36					
332													29				
333													8				
344														20			
345														9			
351												16					
352											8		2				
353											2		1				
354														6			
355														1			
411																2	
412															7		
413															4		
421																14	
422															16		
431																83	
432																	43
433																	7
444															3		4
451																9	
452															3		2
453															1		
454																	2
455																1	

TABLE 7 – Fortement hydrophobe : distribution des types combinés et retenus

2.7 Conclusion sur les typologies

L'objectif des typologies présentées dans ce guide est de faciliter la représentation sur un bassin donné des paramètres clés, difficilement observables, jouant un rôle important sur les transferts de pesticides. Une dernière étape consiste derrière chaque type, à affecter une valeur de paramètre moyen du type pour les trois paramètres clés visés : Kd^* , Ks et K ¹¹.

Pour aller vers la quantification sur un bassin donné des fonctions des différents fossés vis-à-vis des risques de contamination par les pesticides (par exemple, dans une démarche de diagnostic), il convient de croiser chaque typologie globale proposée (variables intensives) avec des variables "dimensionnelles" de structure des fossés ou rendant compte des flux (variables extensives), aisément observables (par exemple, la largeur de fossés) ou calculables (la surface drainée de chaque fossé). Cette étape permettrait de définir une nouvelle typologie fonctionnelle du réseau de fossé dans un bassin donné, par type de molécule, à l'image de ce qui a été proposé dans [Lagacherie et al. \[2006\]](#).

Enfin les typologies sont par construction génériques à tous les bassins. Les distributions des types par bassin révèlent la présence de nombreux types sur chaque bassin (tableaux 8, 9 et 10). La figure 11 représente, en exemple, les types observés par bassin en début d'année 2014. Les différents types sont globalement présents sur chaque bassin mais dans des proportions différentes et des tendances de distribution se dégagent, surtout entre les bassins de Roujan et de la Morcille.

11. Étape en cours de consolidation avec les dernières valeurs expérimentales. Cette étape est au croisement de différentes tâches du projet.

	Inter-parcellaire	Intra-parcellaire	Morcille	Roujan	Ruine	Total
114	64	3	5	60	2	67
134	88	2	4	83	3	90
154	47	64	69	35	7	111
223	64	0	0	64	0	64
233	74	0	3	69	2	74
243	43	0	2	39	2	43
243-mo	14	0	0	13	1	14
253	53	12	13	50	2	65
322	59	0	1	58	0	59
332	86	0	0	84	2	86
352	33	3	3	31	2	36
421	51	2	2	50	1	53
431	147	1	1	140	7	148

TABLE 8 – Dénombrement par type - hydrophile

	Inter-parcellaire	Intra-parcellaire	Morcille	Roujan	Ruine	Total
114	43	2	2	43	0	45
134	76	2	3	72	3	78
141	33	1	4	28	2	34
154	47	64	69	35	7	111
223	64	0	0	64	0	64
233	74	0	3	69	2	74
241	53	0	2	49	2	53
241-mo	16	0	0	15	1	16
253	41	12	13	38	2	53
323	43	0	0	43	0	43
333	73	0	0	72	1	73
341	36	0	1	34	1	36
353	26	3	3	24	2	29
423	51	2	2	50	1	53
433	147	1	1	140	7	148

TABLE 9 – Dénombrement par type - hydrophobe

	Inter-parcellaire	Intra-parcellaire	Morcille	Roujan	Ruine	Total
131	85	3	3	83	2	88
144	67	2	6	60	3	69
151	28	39	41	22	4	67
152	19	25	28	13	3	44
221	31	0	0	31	0	31
231	56	6	7	54	1	62
232	69	0	3	65	1	69
244	53	0	2	49	2	53
244-mo	16	0	0	15	1	16
252	23	6	6	21	2	29
322	44	1	1	44	0	45
331	58	2	2	56	2	60
332	40	0	0	39	1	40
344	36	0	1	34	1	36
422	34	1	1	34	0	35
431	107	1	1	103	4	108
432	57	1	1	53	4	58

TABLE 10 – Dénombrement par type - fortement hydrophobe

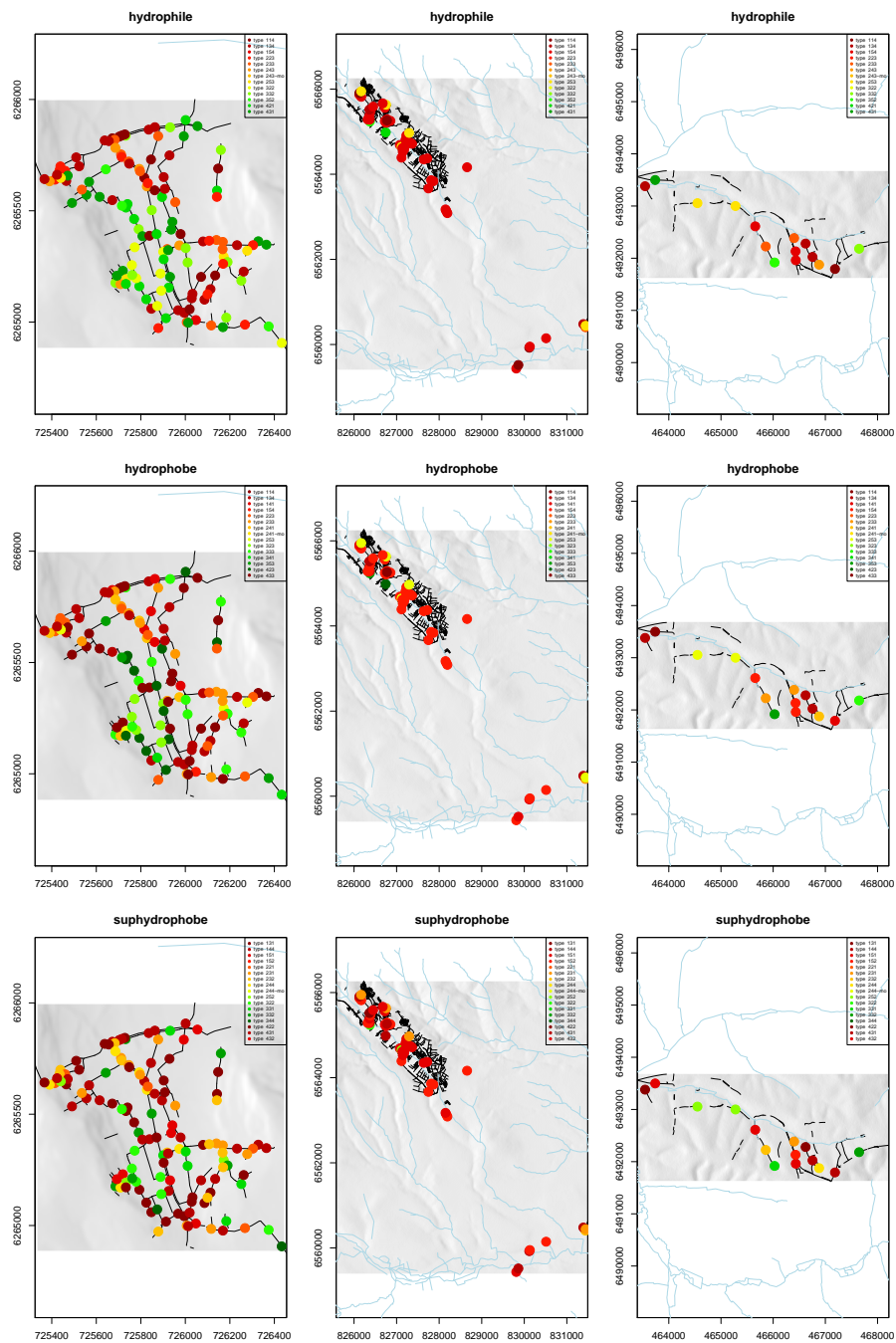


FIGURE 11 – Cartographie des types observés début 2014 (hydrophile : en haut, hydrophobe : au milieu, fortement hydrophobe : en bas). La couleur des points marque principalement la sous-typologie 'rugosité' puisque la palette de couleurs suit les valeurs numériques des codes et est donc adaptée aux ordres sur les centaines (rouge sombre : peu de végétation à vert sombre : beaucoup de végétation).

3 Initialisation : Simulation spatiale des types d'EDS

La typologie proposée dans le chapitre précédent permet de réaliser une cartographie des types de fossés sur le terrain par relevé des modalités des caractéristiques qui discriminent les types. Le rythme de levé terrain selon les typologies proposées peut-être estimé entre 5 et 10 km de linéaire de fossés levés par journée-homme, suivant la sinuosité du réseau, son accessibilité et son intensité de sectionnement en biefs [Levavasseur, 2012].

Si ce levé terrain semble trop fastidieux, si la surface à couvrir est trop importante, ou si le relevé terrain effectué n'est pas exhaustif (échantillonnage), ce chapitre propose une méthode qui permet de cartographier une répartition spatiale 'probable' des types à partir de données géo-référencées (co-variables paysagères) généralement disponibles, soit pour recréer une carte de types probables sans aucune référence terrain, soit pour interpoler un échantillonnage terrain. Dans ce chapitre, la typologie globale hydrophile est prise en exemple pour illustrer la démarche.

3.1 Méthodes

3.1.1 Modèles de spatialisation

Le modèle de spatialisation utilisé est basé encore une fois sur une classification supervisée, ou l'on essaie de prédire une distribution de types d'EDS à partir de co-variables paysagères. Un modèle est produit par bassin et par catégorie de fossé (intra-parcellaire ou non), par apprentissage sur les données de types d'EDS observés en début d'année 2014 (Fig. 11).

Là encore la méthode de classification utilisée est CART [Breiman et al., 1984] mais, où dans chaque feuille de l'arbre de classification, on ne prédit généralement pas un seul type mais une distribution de types. Sont générés des types par fossé par tirages aléatoires dans ces distributions par feuille [Biarnès et al., 2009].

La méthode proposée est stochastique. En sortie, la méthode ne propose donc pas une seule carte de types initiaux par bassin mais une collection de cartes iso-probables par bassin, qui représente l'incertitude de cet exercice de spatialisation.

3.1.2 Co-variables paysagères

Les covariables paysagères mobilisées pour expliquer la distribution spatiale des types initiaux sont de trois types :

- des covariables liées au relief (MNT) : pente, indice MRVBF (Multi Resolution Valley Bottom Flatness) [Gallant and Dowling, 2003], et altitude normalisée par bassin. L'altitude normalisée permet de rendre compte de la position amont-aval du bassin. L'indice MRVBF de la position du fossé dans une topo-séquence locale (Fig. 12). Cet indice

quantitatif indique une position sur versant ou sur une crête locale pour les faibles valeurs et une position en fond de vallée ou sur un plateau pour les fortes valeurs. La pente qui est affectée à chaque bief est calculée suivant le rapport entre la dénivelée des deux sommets du bief et sa longueur. Pour ce faire, un outil permettant son calcul automatiquement à partir du MNT et de la couche vecteur des fossés été réalisé et est mis à disposition (annexe F).

- une co-variable "type de sol", suivant les cartes de sol disponible sur le bassin. Ces cartes ne sont pas homogènes d'un bassin à l'autre.
- une co-variable qui spécifie si il s'agit d'un fossé agricole ou d'un fossé de bord de route.
- une co-variable qui spécifie si il s'agit d'un fossé intra-parcellaire (rases sur la Morcille) ou non.

Par soucis d'homogénéité des co-variables, les variables MNT sont toutes issus de MNT fixés à une résolution spatiale de 10 m¹², échelle compatible avec la longueur des éléments étudiées (longueur des fossés) et permettant une représentation de la topographie globale environnante des fossés. Les cartes de l'ensemble de ces co-variables par bassin sont présentées en annexe C.

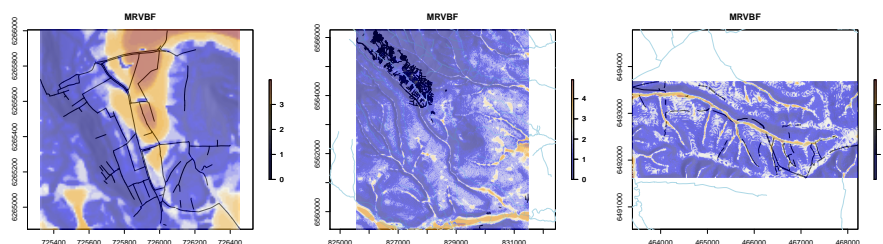


FIGURE 12 – Indice topographique MRVBF [Gallant and Dowling, 2003] par bassin

3.2 Modèles de spatialisation par bassin

Les modèles construits sont présentés ici uniquement sur la typologie 'hydrophile' (Fig 13). On trouve les modèles pour les autres typologies en annexe D. Ces modèles ont des performances différentes par bassin et par catégorie d'éléments où l'effet nombre dans l'apprentissage des modèles joue un rôle important. La performance d'un modèle de spatialisation est évaluée au travers d'une précision égale au taux de bon classement si on affecte à chaque feuille de l'arbre le type majoritaire. La co-variable type de sol n'intervient pas, du fait probablement de sa très forte corrélation avec les co-variables dérivées du relief. Les variables explicatives les plus fréquentes et les plus im-

12. Roujan : ré-échantillonnage d'un MNT à 5m; Morcille et Ruiné : ré-échantillonnage du MNT BD-ALTI©-IGN à 20m

portantes (plus une branche d'arbre est longue plus la variable utilisée dans le critère de segmentation au nœud est importante) sont la pente du fossé et le MRVBF. L'effet de gestion par des agriculteurs ($BORD=0$), ou par des collectivités ($BORD=1$) apparaît assez peu.

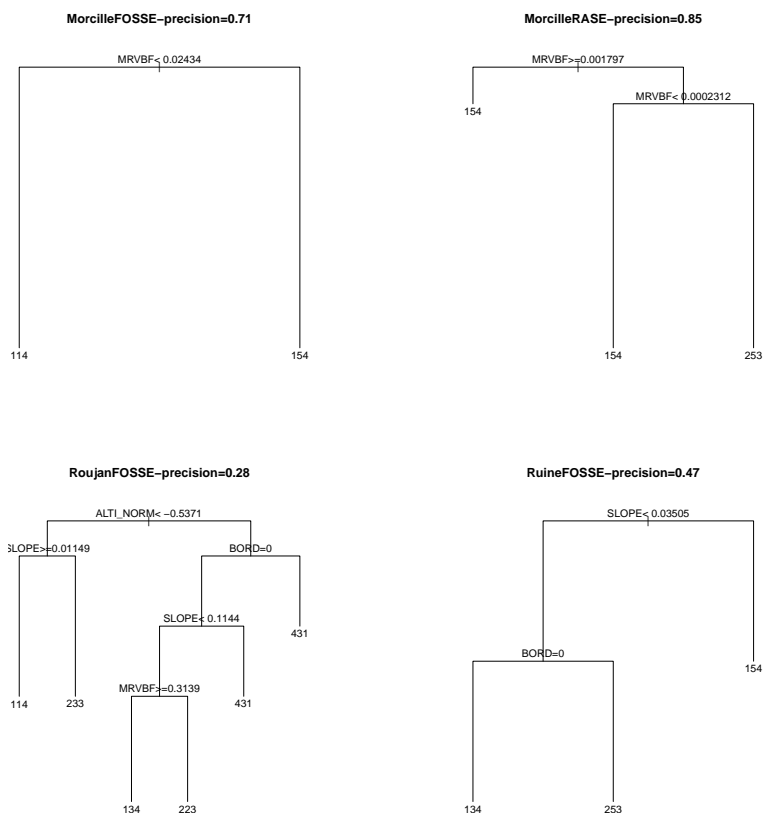


FIGURE 13 – Modèles (CART) de spatialisation par co-variables des types initiaux par bassin (dans ce mode de représentation de l'arbre, le critère au nœud est vérifié le long de la branche gauche et le type majoritaire est affiché dans chaque feuille.)

Les distributions dans les feuilles sont utilisées sous forme de probabilité pour simuler de nouvelles distributions spatiales de types initiaux (Fig. 14). Pour illustrer l'utilisation stochastique de ce modèle, prenons par exemple le modèle sur le Ruiné (Fig. 13) qui explique 47 % de la distribution spatiale. Si on prend la feuille la plus à gauche, où le type majoritaire est 134, la distribution de cette feuille sous forme de probabilité est en fait pour les types 114, 134, 154, 233, 243, 253, 332, 352, 431, le vecteur de probabilités sommant à 1 : 0, 0.6, 0.2, 0, 0.2, 0, 0, 0, 0. On a donc pour un fossé agricole

ayant les caractéristiques de pente pour se retrouver dans cette feuille 60 % de chance d’être de type 134, 20 % de chance d’être de type 154 et 20 % de chance d’être de type 243.

3.3 Exemples de types initiaux simulés

La figure 14 montre 4 exemples de types initiaux simulés pour la typologie globale hydrophile sur le bassin du Ruiné, et ce en comparaison des types observés (en haut à gauche). Si on regarde l’équivalent sur le modèle pour Roujan (28 % de pouvoir prédictif), on retrouve des motifs qui reproduisent globalement les effets de versant mais faiblement les effets de ressemblance entre fossés voisins (voir annexe E). Ces résultats sont toutefois à nuancer du fait que la légende des points reproduit principalement la sous-typologie ”rugosité ” et donc les modalités de la variable TCV_F .

3.4 Conclusion sur l’initialisation (spatialisation)

Les modèles de spatialisation proposés qui ont pour contrainte de rester génériques en mobilisant des co-variables spatiales elles aussi génériques, ont des performances mitigées et les incertitudes demeurent grandes. Les limites des modèles présentés sont :

- une généralité non testée,
- une difficulté à représenter les motifs spatiaux localisés (effets de voisinage) des types (ex : Roujan) que probablement d’autres co-variables, moins génériques, peuvent expliquer.

Cependant, il faut aussi voir ces modèles comme des outils d’interpolation de levés d’EDS échantillonnés sur le terrain pour un bassin donné. Dans ce cas l’incertitude globale de la spatialisation des EDS se réduit d’autant que le taux de sondage est grand.

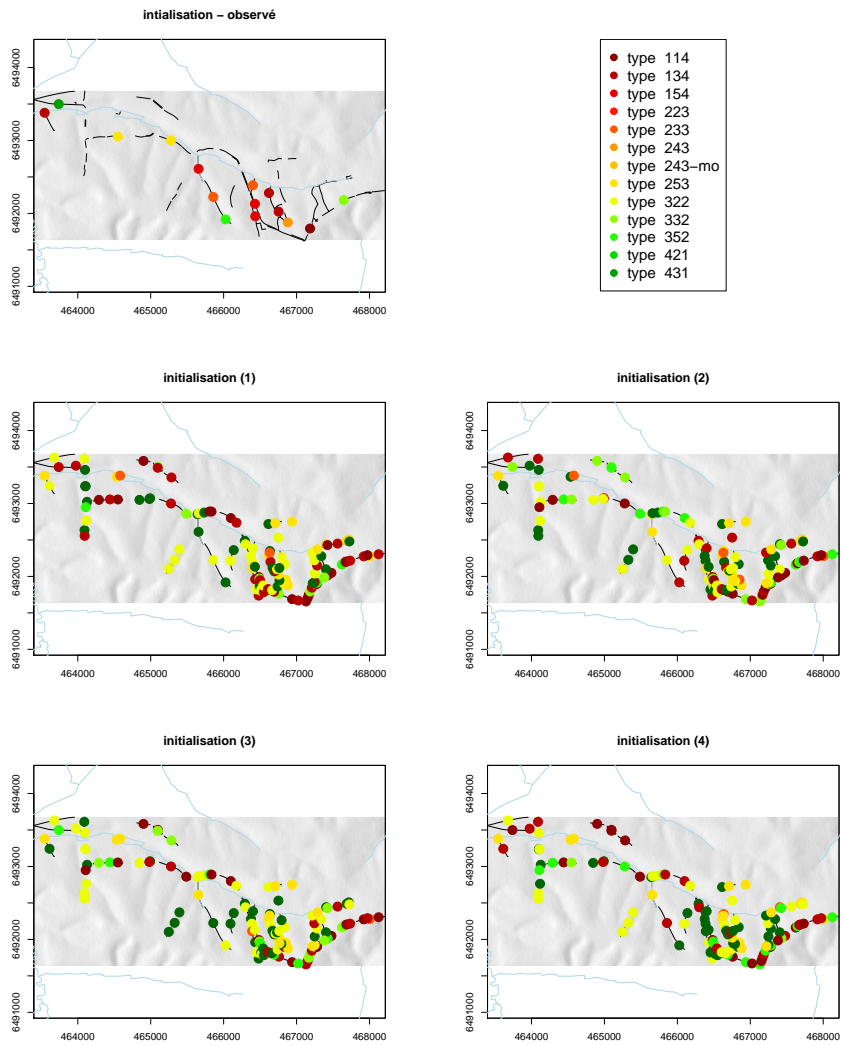


FIGURE 14 – Spatialisation par simulation des types initiaux par bassin : exemple de la typologie hydrophile sur le bassin du Ruiné

4 Évolution : Simulation annuelle des changements d'état des EDS

L'objectif de ce chapitre est de proposer une méthode qui permette d'anticiper pour un type d'EDS initial d'un fossé, son état à différents instants de l'année, en tenant compte principalement de l'effet de pratiques d'entretien qui se réalisent suivant un calendrier propre à chaque bassin et à chaque type de gestionnaires de fossés.

En théorie, la trajectoire du type d'EDS initial d'un fossé et de ses caractéristiques discriminantes sur un bassin donné résulte :

- du calendrier de pratiques d'entretien élémentaires (fauche, brûlis, curage et désherbage chimique) sur le fossé dépendant du type de gestionnaire du fossé (agriculteur ou collectivité),
- d'un effet continu dans le temps dit "climat" qui traduit le croissance voire la senescence de la biomasse végétale dans le fossé sur le cycle annuel, et donc impactent les caractéristiques de la végétation de fond de fossés (taux de couverture, hauteur de la canopée) présentes dans tous les typologies proposées. Nous ne tiendrons pas compte de cet effet en première approche qui nécessite au préalable la production d'un modèle ou de références écophysiological adaptées aux espèces et conditions particulières des fonds de fossés (effet diversité d'espèces et mode de dissémination hydrocore, effet durée de submersion, etc).
- d'autres facteurs, que nous ne simulerons pas également, faute de connaissances, de modèles préétablis ou de données (effet sol, etc).

Là encore, seul l'exemple de la typologie 'hydrophile' sera décliné dans le détail, le cas échéant, pour exposer la méthodologie dans les sections suivantes. Cette méthodologie vise principalement à simuler des opérations d'entretien dans le temps et à simuler leur impact "immédiat" sur un type d'EDS donné.

4.1 Simulation annuelle de pratiques d'entretien

La simulation d'une pratique annuelle sur un fossé résulte d'une suite d'opérations de base (fauche, brûlis, curage, désherbage chimique). Elle dépend du type de gestionnaire et du bassin. Cette simulation est basée sur une intensité de pratiques et un calendrier de pratiques possibles obtenus par enquêtes, bibliographie [Levavasseur, 2012] et confrontées aux observations de terrain.

Environ 10 enquêtes d'agriculteurs et 2 enquêtes de collectivité par bassin ont été réalisées (Annexe G). L'objectif des ces enquêtes étaient de relever les modalités d'entretien par bassin et par type d'élément (fossé inter- ou intra-parcellaire), de quantifier la fréquence annuelle de ces opérations d'entretien et leur calendrier type.

4.1.1 Intensité annuelle des pratiques d'entretien

Les modalités des opérations d'entretien des fossés relevées pour tous les bassins sont incluses dans l'ensemble : fauche, brûlis, curage et désherbage chimique. Seul le brûlis sur le bassin du Ruiné est une opération qui n'a pas été mentionnée. Ces opérations sont réalisées avec une fréquence annuelle différente d'un bassin à l'autre (Tab 11). Par la suite nous transformons cette fréquence annuelle en intensité annuelle d'une opération, pour se ramener à un cadre probabiliste (Loi de Poisson) qui permet de décrire ces opérations sur une année.

En pondérant les résultats des enquêtes réalisées par 1- ce qui est connu dans la bibliographie pour le bassin de Roujan (travaux de thèse de [Levavasseur \[2012\]](#)) ou 2- par confrontation aux pratiques observées indirectement sur le terrain en 2014 lors des relevés d'EDS (annexe G), sont retenues les intensités de pratiques consignées dans le tableau 11 ainsi que les périodes possibles indiquées sous forme numéros de mois dans le tableau 12.

	Cur	Fauc	Desh	Brul
Morcille-Agri-Fosse	0.36	2.75	0.75	0.00
Morcille-Agri-Rase	0.87	0.50	0.83	0.00
Morcille-Coll	0.50	2.00	0.25	0.00
Ruine-Agri	0.19	0.70	0.00	0.00
Ruine-Coll	0.16	1.25	0.00	0.00
Roujan-Agri	0.08	0.20	0.50	0.20
Roujan-Coll	0.10	1.50	0.10	0.00

TABLE 11 – Synthèse des enquêtes agriculteurs et collectivités : intensité annuelle d'entretien par élément

	Cur	Fauc	Desh	Brul
Morcille-Agri-Fosse	03 :06 ;12	03 :08	03 :06	
Morcille-Agri-Rase	03 :06	03 :09	03 :07	
Morcille-Coll	03 :06	05 :10		
Ruine-Agri	06 :09	03 :09		
Ruine-Coll	06 :10	06 :09		
Roujan-Agri	07 :12	04 :10	03 :06;08 :10	09 :12;01 :03
Roujan-Coll	09 :12	05 :06;08 :11		

TABLE 12 – Synthèse des enquêtes agriculteurs et collectivités : période des pratiques d'entretien par élément

Par exemple, un fossé du bassin de la Morcille est fauché en moyenne 2,8 fois par an, curé en moyenne 0,4 fois par an (une fois tous les 2,5 ans) et désherbé chimiquement en moyenne 0,8 fois par an.

Les deux matrices (Tableaux 11 et 12) sont donc des images des pratiques actuelles sur les trois bassins pour simuler selon un scénario de référence le calendrier de pratiques sur un fossé. La modification de ces deux matrices (par exemple, fauche d'intensité doublée mais sur la période juin-septembre uniquement, accompagnée d'une fréquence de désherbage quatre fois moins

intense pour les agriculteurs de la Morcille) sont également à la base de la construction d'autres scénarios explicites de pratiques par fossé.

4.1.2 Simulation de pratiques par fossé

Pour un fossé (ou rase) donné géré par un agriculteur ou une collectivité, on se reporte à l'intensité annuelle des opérations d'entretien et à leur calendrier d'intervention suivant les lignes correspondantes dans les tableaux 11 et 12.

Sur cette base, on simule des événements 'opérations' suivant un processus aléatoire de Poisson discret. Chaque événement "opération" est ensuite placé aléatoirement sur une journée dans son calendrier d'intervention. Le processus de simulation réalisé tel qu'évoqué suppose une indépendance entre opérations de base. Pour tenir compte tout de même d'une dépendance évidente, le processus de simulation du curage sur l'année est simulé en premier et il interdit toute autre opération sur l'année.

La figure 15 montre par exemple les pratiques annuelles simulées selon ce processus de Poisson pour 10 fossés gérés par des agriculteurs sur le bassin de Roujan. Sur le fossé numéro 5, nous avons deux opérations d'entretien successives : un brûlis en mars et un désherbage chimique en août.

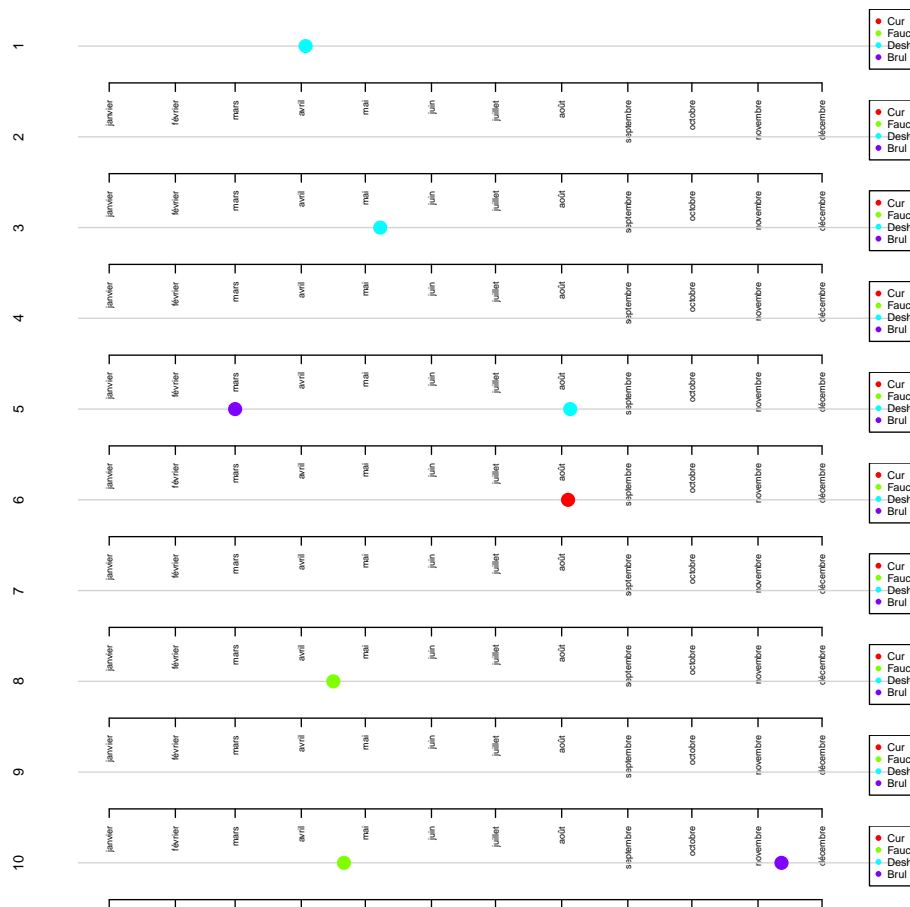


FIGURE 15 – Exemple de calendrier d’opérations d’entretien simulées pour 10 fossés du bassin de Roujan)

4.2 Conceptualisation des impacts par pratique sur les caractéristiques des typologies

Les caractéristiques discriminantes des typologies globales sont rappelées dans le tableau 13 :

Molécule	Caracteristiques
Hydrophile	TCV_F Litiere_MSF Litiere_MST TCS_EG TCS_L MOS MOT
Hydrophobe	TCV_F Litiere_MSF Litiere_MST TCS_EG TCS_L MOS MOT
Fortement hydrophobe	TCV_F Litiere_MSF Litiere_MST TCS_EG TCS_L EpLit MOS MOT

TABLE 13 – Caractéristiques discriminantes par typologie globale

Pour quantifier l’impact des opérations d’entretien de base sur chaque caractéristique à un instant donné, il n’existe que peu de références [Levasseur et al., 2014]. Ces impacts sont donc renseignés de manière simplifiée, principalement suivant les références présentées dans les thèses de Levasseur

[2012], p138 et Pare [2011]. Nous les consignons dans le tableau 14 ci-après :

	Curage	Fauche	Désherbage	Brûlis
TCV_F	→ 0 instantanément	→ 0.25 instantanément	→ 0.1 linéaire sur 25 jours	→ 0 instantanément
TCS_L	→ 0 instantanément	→ 0.6 instantanément	→ 0.6 linéaire sur 25 jours	→ 0 instantanément
TCS_{EG}	<i>s.e.</i>	<i>s.e.</i>	<i>s.e.</i>	<i>s.e.</i>
$EpLit$	→ 0 instantanément	→ +1 instantanément	<i>s.e.</i>	<i>s.e.</i>
$Litiere_{MSF}$	→ 0 instantanément	<i>s.e.</i>	<i>s.e.</i>	→ 0 instantanément
$Litiere_{MST}$	→ 0 instantanément	→ 1 instantanément	→ 1	→ 0
$Litiere_{MOT}$ ou $Litiere_{MOS}$	→ 0 instantanément			
HV_F	→ 0 instantanément	→ 0.1 instantanément	→ 0 linéaire sur 25 jours	→ 0 instantanément
$Largeur$	→ =min($Largeur, 60$) instantanément			

TABLE 14 – Impact par pratique sur les modalités des caractéristiques discriminantes (et autres : HV_F et $Largeur$) *s.e.* signifie sans effet quantifié. Les cases vides supposent qu’il n’y a pas d’effet.

4.3 Simulation de changements d’états d’EDS

Le tableau 15 simule pour les différents types de la typologie hydrophile (première colonne) le changement de type suivant chaque pratique. Compte-tenu des impact des pratiques sur les modalités des caractéristiques, (Tab. 14) les 13 types initiaux évoluent vers un sous-ensemble de 6 types. Cette matrice de transition peut également être établie pour les autres typologies, hydrophobes et fortement hydrophobes.

Sur un bassin présentant une répartition donnée entre fossés agricoles et fossés de bord de route, présentant une distribution initiale de types de fossés, cette matrice de transition multipliée par la matrice d’intensité actuelle des pratiques (Tab. 11) permet de simuler une distribution probable des états des fossés après pratiques, sous hypothèse de permanence de l’impact de chaque pratique dans le temps. De même, l’impact d’autres scénarios de gestion sur la distribution des types d’EDS après pratiques peuvent être simulés sur la base de la modification de la matrice d’intensité des pratiques (Tab. 11) et du calendrier associé (Tab. 12).

	Après Curage	Après Fauche	Après Désherbage	Après Brûlis
114	134	114	114	134
134	134	134	134	134
154	154	154	154	154
223	134	243	114	134
233	134	243	134	134
243	134	243	134	134
243-mo	134	243-mo	134	134
253	154	253	154	154
322	134	243	243	134
332	134	243	243	134
352	154	253	154	154
421	134	243	114	134
431	134	243	134	134

TABLE 15 – Changement du type d’EDS ”hydrophile” suivant chaque pratique

4.4 Conclusion sur les changements d’état des EDS

La méthode proposée de simulation des changements d’état des EDS au cours du temps est basée sur un calendrier de pratiques pour 4 opérations type, par bassin et par gestionnaire. En l’état cette méthode permet de simuler des calendriers d’opérations probables par fossé et de simuler leur impact en terme de changement d’état des EDS. Sous hypothèse (forte) d’un changement moyen et permanent d’état des EDS lors d’opérations d’entretien, la méthode permet de simuler des trajectoires d’EDS dans le temps. Afin de simuler en continu dans le temps de manière plus réaliste et plus différenciée l’évolution des EDS (par exemple prise en compte d’un effet climat), un couplage ou un apprentissage d’un modèle éco-physiologique adapté à la flore des fonds de fossés est nécessaire.

Enfin, au vu des faibles intensités des pratiques et des calendriers resserrés, la méthode ne tient pas compte de la dépendance d’opérations successives dans le temps, excepté pour le curage. Pour tenir compte de dépendances éventuelles entre opérations successives, réaliser une étude approfondie des déterminismes des itinéraires d’opérations par gestionnaire, en interaction avec les mécanismes biotiques (repousse végétale, dissémination des espèces) ou abiotiques (bilan sédimentaire par fossé) est là aussi nécessaire.

5 Conclusion

Ce guide propose un protocole qui permet sur un bassin versant agricole de spatialiser les états de surface de fossés infiltrants suivant un nombre réduit de types de fossés qui cible une gamme synthétique de caractéristiques fortement reliées aux paramètres qui contrôlent le transfert de pesticides. Du fait d'une différence de comportement dans les fossés, les typologies définies sont spécifiques suivant la molécule pesticide considérée : comportement hydrophile (par exemple, glyphosate), hydrophobe (par exemple, diuron) ou fortement hydrophobe (par exemple, chlorpyrifos). Suivant le type de gestionnaire des fossés, suivant le contexte pédo-climatique du bassin, ce guide propose aussi des références sur l'intensité des pratiques annuelles d'entretien des fossés et par conséquent des références sur la fréquence de changements des états de surface des fossés suivant les typologies définies.

Remerciements

L'élaboration de ce guide a été possible grâce aux contributions successives de François Garnier et David Combemale en premier lieu mais aussi de Yassin El Amri, Margot Lhoste, Laurent Prévot, Yannick Pépin, David Fages, Jean-Luc Belotti, Benoit Bellot, Marthe Lanoix, tous membres permanents ou temporaires du laboratoire LISAH.

Ce guide a aussi bénéficié d'un soutien important de nos partenaires d'IRSTEA : Véronique Gouy, Guy Le Hénaff, Françoise Vernier et Daniel Uny.

Enfin, les enquêtes d'agriculteurs sur le Ruiné et sa région ont été grandement facilitées par le soutien d'Angélique Quéraud, du SIAH du bassin du Né.

Références

- K. Benitou. Végétation de fond de canal et rugosité : Test d'un nouveau protocole expérimental. Master's thesis, AgroParisTech, Master Eau, 2013.
- A. Biarnès, J.S. Bailly, and Y. Boissieux. Identifying indicators of the spatial variation of agricultural practices by a tree partitioning method : the case of weed control practices in a vine growing catchment. *Agricultural Systems*, 99(2-3) :105–116, 2009.
- L. Breiman, J.H. Friedman, R.A. Olshen, and C.J. Stone. *Classification And Regression Tree*. London : Chapman and Hall, 1984.
- J. Dollinger, C. Dages, J-S. Bailly, P. Lagacherie, and M. Voltz. Managing ditches for agroecological engineering of landscape. a review. *Agronomy and sustainable development*, Accepted.
- A. Einstein. Der hydraulische oder proill-radius. *Schweiz. Bauztg.*, 103 : 89–91, 1934.
- J. C. Gallant and T. I. Dowling. A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas. *Water Resources Research*, 39(12), 2003.
- F Garnier and Y. Elamri. Automatisation du dispositif de muntz pour la détermination in situ de la conductivité hydraulique à saturation. *Les cahiers des techniques de l'INRA*, 83(3) :2014, 2014.
- J. Josse, J. Pagès, and F. Husson. Multiple imputation in principal component analysis. *Advances in data analysis and classification*, 5(3) :231–246, 2011.
- P. Lagacherie, O. Diot, N. Domange, V. Gouy, C. Floure, C. Kao, R. Moussa, J.M. Robbez-Masson, and V. Szeleper. An indicator approach for describing the spatial variability of human-made stream network in regard with herbicide pollution in cultivated watersheds. *Ecological indicators*, 6 :265–279, 2006.
- F. Levasseur. *Structure du paysage et fonctionnement hydrologique. Application aux réseaux de fossés en zone viticole méditerranéenne*. PhD thesis, Montpellier Supagro - École Doctorale SIBAGHE, 2012.
- F. Levasseur, A. Biarnès, J.S. Bailly, and P. Lagacherie. Time-varying impacts of different management regimes on vegetation cover in agricultural ditches. *Agricultural Water Management*, 140(0) :14–19, 2014.
- M. Luhar and H. M. Nepf. From the blade scale to the reach scale : A characterization of aquatic vegetative drag. *Advances in Water Resources*, 51(0) :305 – 316, 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.02.002>.

- H Nepf. Hydrodynamics of vegetated channels. *Journal of Hydraulic Research*, 50(3) :262–279, 2012.
- Nakié Pare. Pollution de l’eau par les pesticides en milieu viticole languedocien. construction d’un modèle couplé pression-impact pour l’expérimentation virtuelle de pratiques culturales à l’échelle de petits bassins versants. 2011.
- A. Saltelli, M. Ratto, T. Andres, F. Campolongo, J. Cariboni, D. Gatelli, M. Saisana, and S. Tarantola. *Global sensitivity analysis : the primer*. John Wiley & Sons, 2008.
- J. H. Ward Jr. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American statistical association*, 58(301) :236–244, 1963.

Annexes

A Grille d'observation des EDS

ID Fossé : Photo : Opérateur : Date :
Heure :

Homogénéité		
Le point enquêté est représentatif d'au moins 80 % du linéaire du bief	oui	non

Structure – Observation au niveau du point – à refaire si modification		
Largeur supérieure		cm
Largeur inférieure		cm
Profondeur		cm
Largeur intermédiaire		cm
Hauteur intermédiaire		cm

Végétation paroi rive droite – Observation sur un segment de 5m autour du point			
Taux de couverture spatiale par de la végétation vivante			%
Hauteur de la végétation vivante dominante	< 15 cm	> 15 cm	mixte
Rigidité de la végétation vivante dominante	herbacé	ligneux	mixte

Végétation paroi rive gauche – Observation sur un segment de 5m autour du point			
Taux de couverture spatiale par de la végétation vivante			%
Hauteur de la végétation vivante dominante	< 15 cm	> 15 cm	mixte
Rigidité de la végétation vivante dominante	herbacé	ligneux	mixte

Végétation fond de fossé – Observation sur un segment de 5m autour du point			
Taux de couverture spatiale par de la végétation vivante			%
Hauteur de la végétation vivante dominante	< 15 cm	> 15 cm	mixte
Rigidité de la végétation vivante dominante	herbacé	ligneux	mixte

Caractérisation de la surface du fond de fossé – Observation sur un segment de 5m autour du point				
Présence atterrissements de nature fluviale		oui	non	
Taux de couverture spatiale par des éléments grossiers (> 2 mm)			%	
Taux de couverture spatiale par de la litière			%	
Type de litière dominante	MST : Matière sèche (tiges)			
	MSF : Matière sèche (feuilles)			
	MOT : Matière organique transformée (humus)			
	MOS : Matière organique transformée (humus) et sédiments			
Épaisseur de litière	0 cm	<1 cm	1 cm < lit < 5 cm	> 5 cm
Dénivelée / sommet du témoin			cm	
Présence d'eau		oui	non	

Environnement du bief – Observation sur l'ensemble du bief						
Bief sous canopée arborée ou arbustive (au moins 80%)			oui	non		
Présence d'effondrement de berges			oui	non		
Présence d'embâcles		non	oui, ponctuelles		oui, généralisées	
Dernier Entretien Visible	Fossé non entretenu	Entretien non visible	Curage ponctuel	Fauche ponctuelle	Désherbage Chimique ponctuel	Brûlis ponctuel
			Curage généralisé	Fauche généralisée	Désherbage Chimique généralisé	Brûlis généralisé
Présence de cendres	non	ponctuel sur le bief	oui mais < 50 % de couverture du fond du fossé			
			oui mais > 50 % de couverture du fond du fossé			

Autres observations :

B Mise en équation de la rétention et d'un Kd équivalent

Rétention

Pour un milieu à l'équilibre entre phases solides et liquides, composés de n compartiments solides participant à la sorption du pesticide suivant des valeurs de Kd différents, on peut écrire :

$$\forall i \in 1, \dots, n, \frac{P_s^i}{M^i} = Kd^i \frac{P_l}{V_l} \quad (7)$$

où :

- P_s^i représente la masse de pesticides adsorbés sur le compartiment solide i (en g)
- M^i représente la masse du compartiment solide i (en g)
- P_l représente la masse de pesticides dans la partie liquide (en g)
- V_l représente la masse du compartiment liquide (en g)
- Kd^i est le coefficient de sorption pour le compartiment i (en cm^3/g , équivalent à les l/kg)

On peut donc en déduire que :

$$\forall i \in 1, \dots, n, \frac{P_l}{V_l} = \frac{P_s^i}{M^i * Kd^i} = \frac{P_s^1}{M^1 * Kd^1} \quad (8)$$

On sait par ailleurs (bilan des masses de pesticides) que :

$$\sum_{i=1}^n P_s^i + P_l = P_t \quad (9)$$

avec P_t , masse total des pesticides dans le mélange solide et liquide.

Par définition la rétention sur la phase solide à l'équilibre est définie par :

$$Retention = \frac{\sum_{i=1}^n P_s^i}{P_t} \quad (10)$$

Dans ces formules, P_s^i , P_l sont inconnues.

On choisit de tout exprimer en fonction de P_s^1 dans un premier temps.

On obtient donc :

$$\begin{aligned} Retention &= \frac{\sum_{i=1}^n P_s^i}{P_t} = \frac{\sum_{i=1}^n P_s^i}{\sum_{i=1}^n P_s^i + P_l} = \frac{P_s^1 + \sum_{i=2}^n P_s^i}{P_s^1 + \sum_{i=2}^n P_s^i + P_l} \\ &= \frac{P_s^1 + \sum_{i=2}^n P_s^1 \frac{M^i Kd^i}{M^1 Kd^1}}{P_s^1 + \sum_{i=2}^n P_s^1 \frac{M^i Kd^i}{M^1 Kd^1} + \frac{P_s^1 V_l}{M^1 Kd^1}} = \frac{1 + \sum_{i=2}^n \frac{M^i Kd^i}{M^1 Kd^1}}{1 + \sum_{i=2}^n \frac{M^i Kd^i}{M^1 Kd^1} + \frac{V_l}{M^1 Kd^1}} \end{aligned}$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^n \frac{M^i K d^i}{M^1 K d^1}}{\sum_{i=1}^n \frac{M^i K d^i}{M^1 K d^1} + \frac{V_l}{M^1 K d^1}} = \frac{\sum_{i=1}^n M^i K d^i}{\sum_{i=1}^n M^i K d^i + V_l}$$

donc la rétention en % s'exprime par (rapport de volumes, s.u) :

$$Retention\% = \frac{\sum_{i=1}^n M^i K d^i}{\sum_{i=1}^n M^i K d^i + V_l} * 100 \quad (11)$$

Kd équivalent

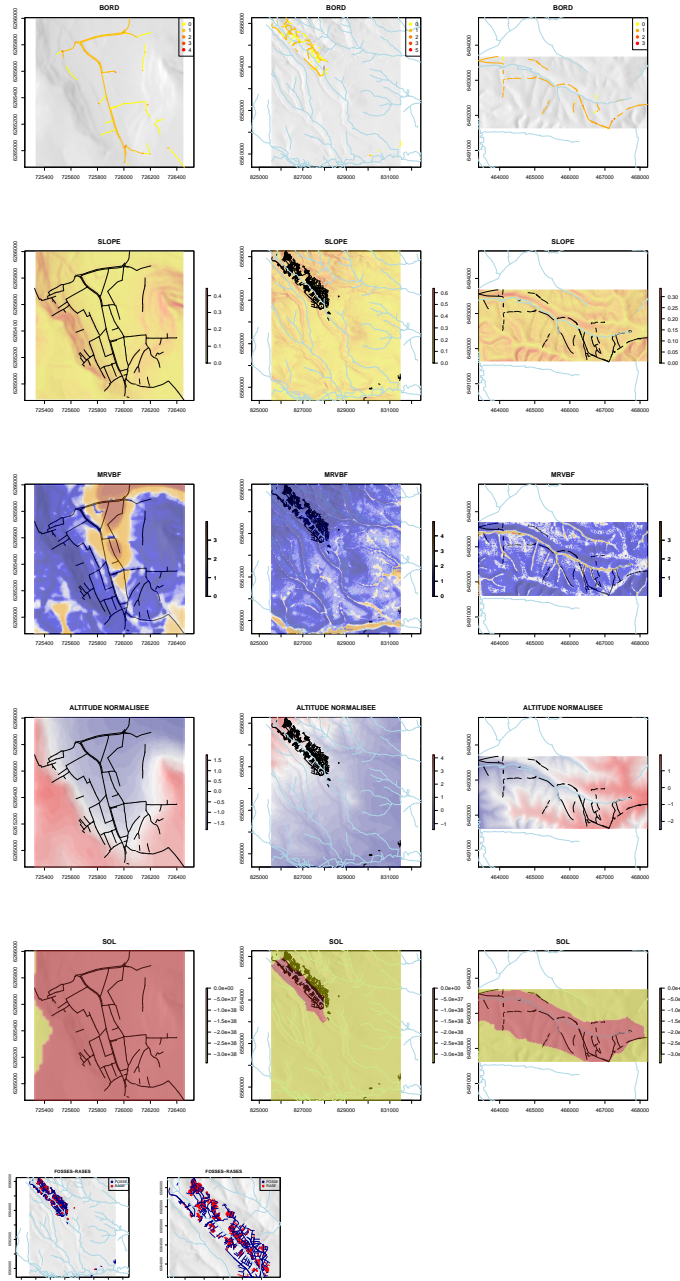
On cherche Kd^* , Kd équivalent du bief tel que :

$$Retention = \frac{\sum_{i=1}^n M^i K d^i}{\sum_{i=1}^n M^i K d^i + V_l} = \frac{MKd^*}{MKd^* + V_l} \quad (12)$$

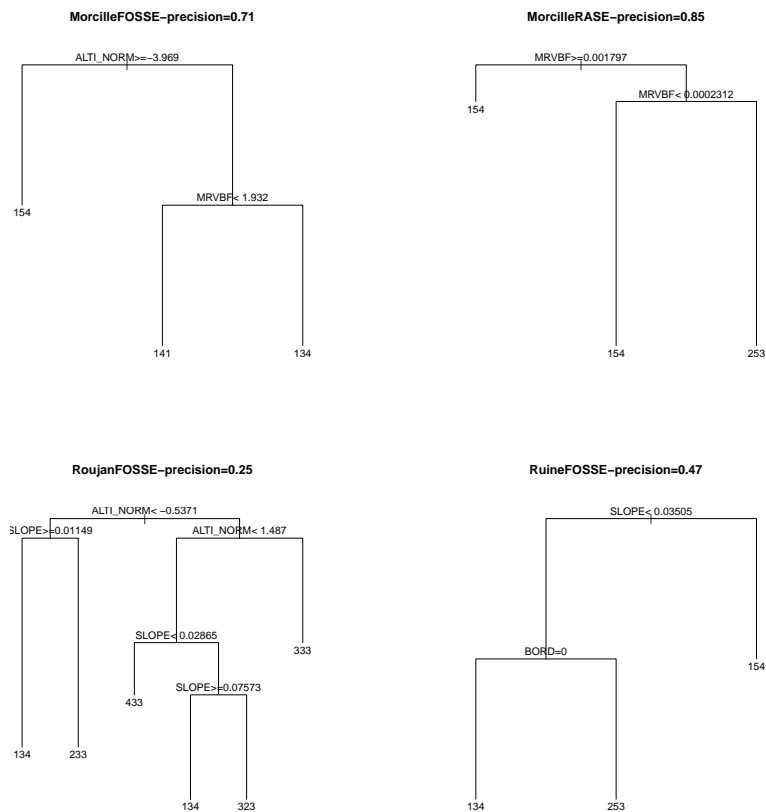
Avec $M = \sum_{i=1}^n M^i$. En posant $\alpha = \sum_{i=1}^n M^i K d^i$, il vient alors :

$$\begin{aligned} \frac{MKd^*}{MKd^* + V_l} &= \frac{\alpha}{\alpha + V_l} \\ \Leftrightarrow MKd^* &= \frac{(MKd^* + V_l) * \alpha}{\alpha + V_l} \\ \Leftrightarrow MKd^* * (\alpha + V_l) &= (MKd^* + V_l) * \alpha \\ \Leftrightarrow MKd^* \alpha + MKd^* V_l &= MKd^* \alpha + V_l \alpha \\ \Leftrightarrow MKd^* V_l &= V_l \alpha \\ \Leftrightarrow MKd^* &= \alpha \\ \Leftrightarrow Kd^* &= \frac{\alpha}{M} \\ \Leftrightarrow Kd^* &= \sum_{i=1}^n \frac{M^i}{M} K d^i \end{aligned}$$

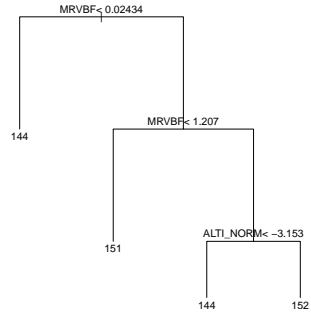
C Cartographies par bassin des covariables



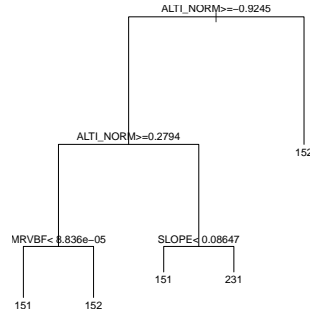
D Modèles de spatialisation des types initiaux : typologie 'hydrophobe' et 'fortement hydrophobe'



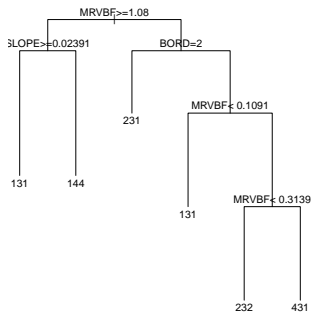
MorcilleFOSSE-precision=0.71



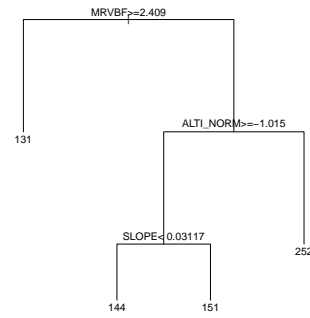
MorcilleRASE-precision=0.74



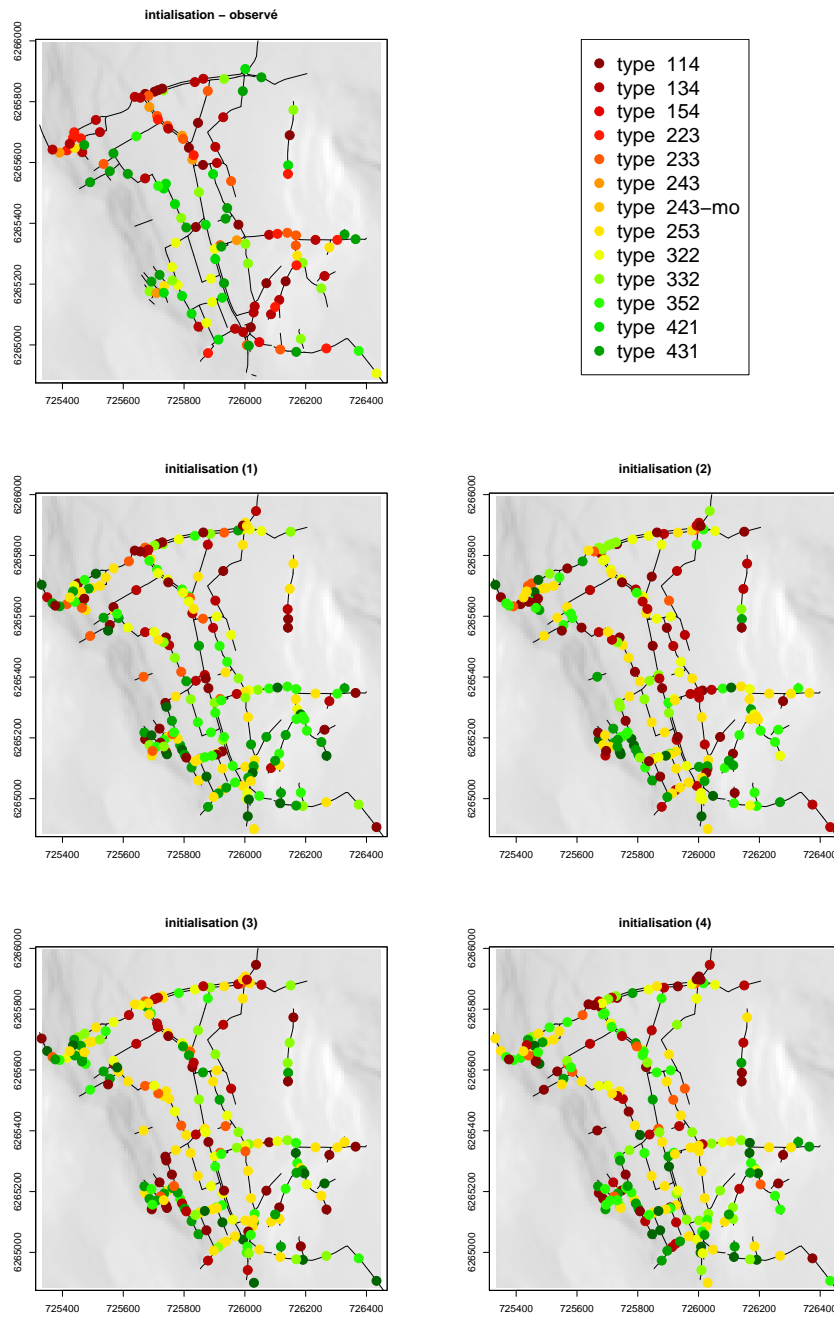
RoujanFOSSE-precision=0.27



RuineFOSSE-precision=0.47



E Spatialisation des types 'hydrophiles' Sur Roujan



F Outil de calcul de pente par bief

Cet outil est un script de R disponible en libre sur (toute plateforme) qui utilise des bibliothèques SIG raster (`raster`, `gdal`) ou vecteur (`rgeos`).

Cette fonction nécessite en entrée :

- le chemin vers un MNT dans un format raster lisible par `gdal` projeté en RGF93, spécifié dans le paramètre `dtm`,
- le chemin vers un shapefile de lignes correspondant aux fossés, projeté en RGF93, et spécifié dans le paramètre `shape`,
- le choix de calculer également l'altitude du milieu du bief (`mean.alti=TRUE`) ou non (`mean.alti=FALSE`).

Cette fonction retourne en sortie la table attributaire du shapefile modifiée avec deux champs supplémentaires :

- `SLOPE` : pente en %
- `ALTI` : altitude du milieu du bief (en m)

```
Add.Slope.Lines<-function(shape,dtm, mean.alti=TRUE)
{
#J.S. BAILLY,AgroParisTech, UMR LISAH, décembre 2014
library(raster)
library(maptools)
library(rgdal)
library(foreign)
library(rgeos)
reseau<-readShapeLines(paste(shape,'.shp',sep=''), proj4string=CRS("+init=epsg:2154
etendue<-extent(reseau)
dbf<-read.dbf(paste(shape,'.dbf',sep=''))
mnt<-readGDAL(dtm)
mnt<-raster(mnt)
names(mnt)<-"alti"
longueur<-gLength(reseau, byid=T)
tab<-NULL
for(i in 1:length(reseau@lines))
{
tab<-rbind(tab,c(i,coordinates(reseau@lines[[i]])[[1]][1,]),
c(i,coordinates(reseau@lines[[i]])[[1]][nrow(coordinates(reseau@lines[[i]])[[1]),]
)
)
}
z<-extract(mnt, tab[,2:3], method='bilinear')
deniv<-abs(z[seq(2,length(z),by=2)]-z[seq(1,(length(z)-1),by=2)])
slope<-deniv/longueur
dbf<-dbf[,!(names(dbf) %in% c('SLOPE','ALTI'))]
if(mean.alti==TRUE){
mdpt<-SpatialLinesMidPoints(reseau)
```

```
z.mid<-extract(mnt, coordinates(mdpt), method='bilinear')
dbf<-cbind(dbf, SLOPE=slope, ALTI=z.mid)} else {
dbf<-cbind(dbf, SLOPE=slope)}
write.dbf(dbf, paste(shape, '.dbf', sep=''), factor2char=TRUE)
}
```

G Données supplémentaires sur les enquêtes de pratiques d'entretien

	Nombre	FOSSE	RASE	Avec.Voisin	Role1	Role2
Morcille	10	4	6	0.29	Transport	InterceptionRuissellement
Roujan	9	9	0	0.5	Transport	InterceptionRuissellement
Ruine	9	9	0	0.14	Transport	Drainage

TABLE 16 – Enquêtes agriculteurs

	SansE	Cur	Fauc	Desh	Brul
Morcille-Agri-Fosse	0.00	0.75	1.00	0.75	0.00
Morcille-Agri-Rase	0.00	0.83	0.33	0.50	0.00
Morcille-Coll	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00
Ruine-Agri	0.29	0.66	0.77	0.00	0.00
Ruine-Coll	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00
Roujan-Agri	0.25	0.38	0.38	0.12	0.62
Roujan-Agri-Levava	0.17	0.58	0.49	0.28	0.54
Roujan-Coll	0.00	0.10	1.00	0.00	0.00

TABLE 17 – Synthèse des enquêtes agriculteurs et collectivités : probabilité de recevoir une opération sur une année

	SansE	Cur	Fauc	Desh	Brul
Morcille-Agri-Fosse	0.00	0.48	2.75	1.00	0.00
Morcille-Agri-Rase	0.00	1.05	1.50	1.66	0.00
Morcille-Coll	0.00	1.00	2.00	0.00	0.00
Ruine-Agri	0.00	0.28	0.91	0.00	0.00
Ruine-Coll	0.00	0.17	1.25	0.00	0.00
Roujan-Agri	0.00	0.30	1.00	1.00	1.00
Roujan-Agri-Levava	0.00	0.10	1.00	1.00	1.00
Roujan-Coll	0.00	0.10	1.50	0.00	0.00

TABLE 18 – Synthèse des enquêtes agriculteurs et collectivités : fréquence annuelle des pratiques d'entretien par élément entretenu

	SansE	Cur	Fauc	Desh	Brul
Morcille-Agri-Fosse		03 :06 ;12	03 :08	03 :06	
Morcille-Agri-Rase		03 :06	03 :09	03 :07	
Morcille-Coll		03 :06	05 :10		
Ruine-Agri		06 :09	03 :09		
Ruine-Coll		06 :10	06 ;09		
Roujan-Agri		04	04;06 :09	09	04;09;12;01 :03
Roujan-Agri-Levava		07 :12	04 :10	03 :06;08 :10	09 :12;01 :03
Roujan-Coll		09 :12	05 :06;08 :11		

TABLE 19 – Synthèse des enquêtes agriculteurs et collectivités : période des pratiques d’entretien par élément

	SansE	Cur	Fauc	Desh	Brul
Morcille-Agri-Fosse		0.00	0.53	0.45	0.00
Morcille-Agri-Rase		0.08	0.03	0.73	0.00
Morcille-Coll		0.25	0.75	0.25	0.00
Ruine-Agri		0.30	0.72	0.00	0.00
Ruine-Coll		0.00	1.78	0.00	0.00
Roujan-Agri		0.06	0.12	0.79	0.14
Roujan-Coll		0.21	0.71	0.17	0.05

TABLE 20 – Synthèse des données observées : fréquence annuelle d’entretien par élément