Comprendre et prédire l'effet des modes de conduite des vignes sur la genèse du ruissellement

Adama Diedhiou

▶ **To cite this version:**

Adama Diedhiou. Comprendre et prédire l'effet des modes de conduite des vignes sur la genèse du ruissellement. Sciences du Vivant [q-bio]. 2019. dumas-02364890

HAL Id: dumas-02364890

https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02364890

Submitted on 15 Nov 2019

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.

AGROCAMPUS OUEST

☐ CFR Angers

☑ CFR Rennes

Année universitaire : 2018 - 2019

Spécialité :

Transition Environnementale Agriculture et Milieux (TEAM-Milieux)

Spécialisation (et option éventuelle) :

Sol Eau Hydrosystèmes (SEH)

Mémoire de Fin d'Études

☐ d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage

☑ de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage

☐ d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Comprendre et prédire l'effet des modes de conduite des vignes sur la genèse du ruissellement

Par : Adama DIEDHIOU

Soutenu à 09h 35 le 19/09/2019

Devant le jury composé de :

Président : Anne Jaffrezic

Maître de stage : Paul van Dijk

Enseignant référent : Didier Michot

Autres membres du jury (Nom, Qualité)

Sébastien Salvador-Blanes, Maître de conférences

Youssef Fouad, Maître de conférences

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST

Remerciements

Je tiens tout particulièrement à remercier mon maître de stage Paul van Dijk pour la confiance qu'il m'accordée, son suivi constructif, ses conseils professionnels et surtout sa disponibilité et sa patience. J'aurais aimé écrire ces phrases en néerlandais mais le tableau était trop petit pour tout contenir. Pour autant je ne manquerai de vous dire « Dank u »

Je souhaite remercier le personnel de l'ARAA et de l'IRD-CRAGE de Schiltigheim : Remi Koller (bon repos !!!), Anne Schaub, Joelle Sauter qui m'ont accueilli durant mon stage et partagé dans la bonne humeur leurs connaissances pendant les pauses-café.

Je remercie également l'ensemble de l'équipe Service d'Expérimentation Agronomique et Viticole de l'INRA de Colmar (SEAV), pour m'avoir transmis les données indispensables pour ce travail. Merci à Marie Thiollet-Scholtus (SAD-ASTER), Lionel Ley, Serge Chaumonnot et Eve Durocher pour m'avoir accordé une partie de leur temps aussi précieux.

Ma reconnaissance va particulièrement à mon équipe encadrante, Didier Michot et Anne Jaffrezic qui m'ont suivi tout au long de mon parcours à AGROCAMPUS-OUEST. Vous m'avez beaucoup aidé à progresser. Je ne saurais vous remercier assez.

Merci aussi à tous les stagiaires IRD-CRAGE de Schiltigheim : Fanny Le Gloux, Arthur Specker et Anaïs Gravier.

En fin merci à toute ma famille en particulier ma maman et mes ami(e)s pour leur présence et leur soutien.

Table des matières

1. Introduction 1
1.1. Contexte 1
1.2. Les facteurs de ruissellement 3
1.2.1. Les facteurs de production du ruissellement 3
1.2.2. Les facteurs de transfert du ruissellement 7
1.3. Les outils d'estimation du ruissellement inexistants pour les vignes 9
1.3.1. Les modèles 10
1.3.2. Les indicateurs 13
1.3.3. Les outils candidats 13
1.4. Problématique, objectifs et questions de recherche 16
2. Matériel et Méthodes 18
2.1. Présentation des sites et des pratiques culturales 18
2.2. Inventaire des données disponibles 21
2.3. Dispositif des campagnes de mesure 2019 23
2.4. Traitement des données 25
3. Résultats 26
3.1. Résultats des Campagnes 2016 : 2018 26
3.1.1. Caractéristiques des événements pluvieux 26
3.1.2. Dynamique des états de surface (EDS) sous différentes techniques viticoles 28
3.1.3. Effet des modes de conduite sur le ruissellement. 34
3.1.4. Rôles des EDS et des facteurs climatiques sur genèse du ruissellement 35
3.2. Résultats campagne 2019 37
3.2.1. Effets des systèmes de conduite sur l'état structural du sol 37
3.2.2. Les relations entre les propriétés hydrologiques et les états de surface 40
3.3. Mise au point du prototype IDR-Vigne 43
3.3.1. Les modifications apportées dans l'IDR 43
3.3.3. Les résultats de simulation du ruissellement sur la modalité PI 46
4. Discussions générales 47
4.1. Dynamique des états de surface 47
4.1.1. Interprétation des photos 47
4.1.2. Caractérisation des états de surface 47
4.2. Effets des états de surface sur l'infiltration et le ruissellement 48
4.2.1. Effets sur les propriétés hydrologiques 48
4.2.2. Intérêt à utiliser la Da comme estimateur de l'infiltrabilité du sol 49
4.3. IDR-Vigne, un outil bientôt opérationnel 51
4.3.1. Outil fonctionnel mais pas encore opérationnel 51
5. Conclusion et perspectives 53
Références bibliographiques 55

Liste des tableaux

Tableau 1: Classification des modèles 10
Tableau 2: Conditions d'éligibilité des outils 14
Tableau 3: Les caractéristiques pédologiques du sol à 20 cm 20
Tableau 4: Les pratiques d'entretien du sol du site de Wintzenheim 23
Tableau 5 : Les caractéristiques des états de surface des différents groupes de la CAH, méthode Ward 30
Tableau 6 : Variables explicatives de la variabilité du ruissellement à Wintzenheim 36
Tableau 7 : Résultats des tests LSD de Da des motifs d'une même modalité (lettres Majuscules) et entre les motifs des différentes modalités (lettres minuscules) 38
Tableau 8 : Résultats des tests LSD de Ks des motifs d'une même modalité (lettres Majuscules) et entre les motifs des différentes modalités (lettres minuscules en Gras) 39
Tableau 9 : Résultats des tests LSD de SWCi des motifs d'une même modalité (lettres Majuscules) et entre les motifs des différentes modalités (lettres minuscules en Gras) 40
Tableau 10 : Relations entre les propriétés hydrologiques et variable d'EDS dans les sites d'étude 41
Tableau 11 : Variables déterminantes du ruissellement sur le site de Wintzenheim 42

Liste des figures

Figure 1: Outils candidats d'estimation du ruissellement utilisables à l'échelle de la parcelle de vigne 14
Figure 2 : Schéma simplifié du fonctionnement de l'indicateur de la dynamique de ruissellement (IDR) 16
Figure 3: Localisation des sites d'étude 18
Figure 4: Les modalités du site de Rouffach, (1) la modalité classique et (2) la modalité pied à pied en 2016 19
Figure 5 : Les modalités du site de Wintzenheim. à gauche la modalité PI et à droite la modalité RES2 en 2016 20
Figure 6: Estimation de différentes variables d'EDS par la méthode des carreaux. En bleu la végétationvivante et rouge les résidus 22
Figure 7 : Dispositif d'échantillonnage de la campagne 2019 à Wintzenheim 24
Figure 8 : Les intensités moyennes et hauteurs de pluie des événements survenus sur les périodes de suivi (2016 – 2018) à Wintzenheim 27
Figure 9: Les intensités moyennes et lame d'eau journalière des événements pluvieux survenus sur les périodes de suivi (2015 – 2016) à Rouffach 28
Figure 10: Classification ascendante hiérarchique fournie par la fonction HCPC 29
Figure 11 : Test de corrélation entre les variables d'état de surface méthode de Spearman 33
Figure 12 : Le ruissellement cumulé (en haut) et distribution de la lame ruisselée (en bas par modalité en fonction des années 34
Figure 13 : Distribution du ruissellement en fonction des EDS et les facteurs climatiques 36
Figure 14 : Comparaison de la Da des différentes modalités du site Wintzenheim à différentes profondeurs du sol, en haut Da des 0-20 cm, en bas à gauche 0-5cm et bas à droite 15- 20 cm du sol 37
Figure 15: Comparaison de la conductivité hydraulique à saturation des différentes modalités du site de Wintzenheim 39
Figure 16 :Comparaison des teneurs en eau initiales entre modalités du site de Wintzenheim 40
Figure 17: Evolution de la couverture des résidus de la végétation spontanée simulés de l'inter-rang travaillé 44
Figure 18 : Photo montrant la couverture laissée après un travail mécanique du sol (29/05/2019) 45

Figure 19 : Evolution de la rugosité aléatoire simulée dans l'inter-rang travaillé de PI 45
Figure 20 : Evolution de la conductivité hydraulique à saturation simulée des différentes surfaces de l'inter-rang travaillé 46
Figure 21 : Comparaison des cumuls de ruissellement simulés (en rouge) avec ceux observés (bleu) dans la modalité PI du site de Wintzenheim 46
Figure 22 : Capacité d'infiltration sur 30mn des différentes surfaces de vigne en fonction de leur Da. A gauche les motifs du site de Wintzenheim et à droite les motifs de la modalité classique (plus ruisselante) du site de Rouffach 49
Figure 23: Comparaison de la dynamique simulée (bleu) et observée (rouge) 52

Liste des annexes

Annexe I : Dispositif de mesure du ruissellement site de Wintzenheim
Annexe II: Quelques techniques d'entretien du sol et de gestion d'adventices en viticulture
Annexe III : Synthèse des effets des pratiques viticoles sur les états de surface, l'infiltration, la détention superficielle et le ruissellement (-) effet négatif, (+) effet positif, (+/-) ambivalent
Annexe IV : Les facteurs et variables déterminants dans la formation et le transfert du ruissellement (***) très important, (**) important, (*) à considérer
Annexe V : Synthèse des données disponibles : site de Wintzenheim et Rouffach
Annexe VI : Formulaire de suivi des états de surface
Annexe VII : Nombre, intensités et cumul pluie des événements pluvieux survenus sur le site de Wintzenheim durant les périodes de suivi (2016, 2017 et 2018)
Annexe VIII : Caractéristiques des événements pluvieux à Rouffach sur les périodes de suivi 2015 et 2016
Annexe IX : Répartition des individus après CAH
Annexe X : Distribution des variables d'EDS par année
Annexe XI : Evolution des EDS en fonction du CPDT et par année (Cav = cavaillon ; IRH =inter-rang enherbé ; IRW =inter-rang travaillé)
Annexe XII : : Le ruissellement cumulé par modalité en fonction de l'année site de Rouffach
Annexe XIII : Distribution du ruissellement en fonction des EDS et les facteurs climatiques site de Rouffach
Annexe XIV :l'évolution du ruissellement de la pluie et du taux de fermeture de la surface en fonction du temps
Annexe XV : Résumé des modèles (GLM) d'évolution des états de surface du site de Wintzenheim
Annexe XVI : Tests de corrélation entre les EDS et les propriétés hydrologiques
Annexe XVII : Facteurs de variation du ruissellement du site de Wintzenheim

LISTE DES ABREVIATIONS

ACP : Analyse des Composantes Principales ---- 4
ACTMO : Agriculture Chimical Transport model---- 12
AIC : Critère d'information d'Akaike ---- 27
ARAA : Association pour la Relance Agronomique en Alsace ---- 15
BIO : Modalité conduite selon le cahier de charge de l'agriculture Biologique ---- 21
BV : Bassin Versant---- 11
CAH : Classification ascendante hiéarchique ---- 27
CEB : Coulées d'eau boueuse ---- 1
CPDT : Cumul de pluie entre Date de Travail du sol ---- 27
Cr : Coefficient de ruissellement ---- 4
Da : Masse volumique apparente---- 24
DIAR : Diagnostic Agronomique de Ruissellement---- 14
EDS : Etats de surface du sol ---- 2
GERIHCO : Gérer les risques et Histoire des Coulées d'eau boueuse ---- 2
GLM : Modèle linéaire généralisé ---- 27
IDR : Indicateur de la dynamique du ruissellement---- 14
IDR-Vigne : Indicateur de la Dynamique du ruissellement en Vigne ---- 17
INRA : Institut National de la Recherche Agronomique ---- 15
Ip : Intensité moyenne de pluie ---- 4
IRD-CRAGE : Service Innonvation Recherche et Développement de la Chambre Régionale d'Agriculutre Grand-Est---- 2
IRH : Inter-rang enherbé---- 23
IRu : Indicateur de Ruissellement vigne ---- 14
Ks : Conductivité hydraulique à saturation ---- 16
LHyGeS : Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie de Strasbourg---- 20
LISEM : Limburg Soil Erosion Model ---- 13
LS : Limono-sableuse ---- 20
LSD : Least Significant Difference ---- 42
MHYDAS : Modèle Hydrologique Distribué des Agrosystèmes---- 13
PACOV : Plateforme Alsacienne du Cuivre d'Origine Viticole---- 22
PaP : Modalité Pied à Pied ---- 20
PEPSVI : Plateforme d'Evaluation des Performances des Systèmes Viticoles Innonvants--- 20
PFS : Pourcentage de ferméture de la surface ---- 27
pH : Potentiel Hydrogène---- 15
PI : Modalité de la Protection Intégrale ---- 21
PPS : Produits phytosanitaires ---- 1
PSEM 2D : Plot Soil Erosion Model 2D ---- 13
R^2 : Coefficient de régression ---- 44
RES1 : Modalité de la variété 1 ---- 21
RES2 : Modalité de la variété 2 ---- 21
RUIS : Indicateur de ruissellement---- 14
S : Sorptivité---- 16
SL : Sablo-Limoneuse ---- 21
STREAM : Sealing and Transfert by Runoff and Erosion related to Agriculture---- 14

SWAT : Soil and Water Assessment Tool ---------- 12
TCSL : Techniques de Conservation Sans Labour ---------- 6
TR : Traces de roue---------- 25

1. Introduction

1.1.Contexte

Protéger les sols de la dégradation et les eaux de surface de la contamination par les produits phytosanitaires (PPS) sont des enjeux majeurs dans les vignobles du monde et de France en particulier. Ces zones se caractérisent tant par la sensibilité de leurs sols aux phénomènes de ruissellement et d'érosion chroniques (Le Bissonnais et al. 2002) que par leur consommation importante de produits phytosanitaires (Thiollet-Scholtus 2011). La coexistence de ces deux caractères conduit à des externalités environnementales négatives telles que les pertes de terre, les coulées d'eau boueuse (CEB) à l'occasion des événements pluvieux exceptionnels (Van Dijk et al. 2016) et la contamination des eaux superficielles et souterraines par les PPS (Bockstaller et al. 2013).

En France, les concentrations de pesticides de 0,5 µg/l acceptables pour la potabilité des eaux ont été largement dépassées dans 80 % des stations suivies pour les eaux de surface et 57 % pour les eaux souterraines (Aubertot et al. 2005). Les suivis de la qualité des eaux réalisés par l'agence de l'eau et APRONA dans les bassins versants alsaciens révèlent que les eaux adjacentes aux surfaces viticoles sont les principales "hotspot" de contamination. La dynamique des pics de concentration observée sur ces masses d'eau indique clairement que le ruissellement érosif est une voie préférentielle d'apport de substances actives et de leurs métabolites dans les hydrosystèmes (La Jeunesse et al. 2015). Le ruissellement érosif est la mise en mouvement des particules du sol par l'excès d'eau à la surface à la suite de précipitations. Cet excès d'eau est la résultante d'un refus d'infiltration induit soit par le dépassement de la capacité d'infiltration du sol, on parle de ruissellement hortonien; soit par le dépassement de la capacité de stockage du sol, ruissellement sur sol saturé ou hewlettien. Dans les vignobles alsaciens (France), le ruissellement érosif, généralement observé en période estivale (Auzet 1987; Armand 2009) s'est accrue ces dernières années sous les effets combinés de l'évolution des pratiques d'entretien des sols, du paysage et des changements globaux du climat (Van Dijk et al. 2016). Dès lors, il devient important de comprendre les conditions d'apparition du ruissellement érosif polluant pour développer des stratégies agronomiques efficaces permettant de reconquérir de la qualité des eaux de surface.

Si les thématiques d'acquisition de références sur les pratiques agroécologiques et de transfert PPS par les eaux abondent la littérature scientifique viticole, il n'en est moins concernant l'identification des facteurs à l'origine du ruissellement encore moins le développement d'outils d'évaluation ou d'estimation de ce risque. Les études sur ces deux

dernières thématiques sont lacunaires et ont été principalement menées dans les vignobles méditerranéens et rarement dans les vignobles soumis au climat semi continental comme l'Alsace. Néanmoins, ces études ont montré que la formation du ruissellement, en milieu viticole, est plus liée à l'hydrodynamique superficielle et donc à dominance hortonien (Lefrancq 2014). Ce type de ruissellement est contrôlé par la dynamique des états de surface (EDS) et du sol (texture, structure) (Albergel et al. 1986; Malam Issa et al. 2011; Lacombe et al. 2018). En outre, de nombreux auteurs ont montré que la trajectoire des EDS est sous la dépendance des effets combinés de la pluie (intensité, hauteur et durée) (Arnaez et al. 2007; Defersha and Melesse 2012; Sofia et al. 2019; Yu et al. 2019) et du mode conduite de la culture (enherbement, paillage et itinéraires techniques) (Biddoccu et al. 2016; Prosdocimi et al. 2016; Biddoccu et al. 2017). Ces types de connaissances acquises pour les systèmes de grandes cultures (maïs) ont pu être mobilisées par certains auteurs ou organismes pour construire des outils d'estimation du ruissellement. Cependant, la plupart des modèles et indicateurs existants ne quantifier que l'effet d'une technique culturale (paillage, enherbement) sur la production et le transfert du ruissellement. Or ces techniques sont souvent combinées dans une parcelle de vigne. Cette hétérogénéité spatiale dans les parcelles de vigne pose deux difficultés au développement d'outils de diagnostic du ruissellement. La première est liée au manque de références sur la dynamique spatio-temporelle des facteurs qui sous-tendent ce processus. Et la seconde, plus inhérente à la modélisation, est liée au choix du niveau optimal de discrétisation des parcelles de vigne.

C'est pour lever ces deux verrous et développer un outil de diagnostic du ruissellement spécifique au vigne que le service Innovation, Recherche et Développement de la Chambre Régionale d'Agriculture Grand Est (IRD-CRAGE), en synergie avec le programme "Gérer les risques et Histoire des Coulées d'eau boueuse" (GERIHCO) ont lancé ce stage.

Ce travail s'inscrit dans ce vaste chantier et tente d'adapter un outil parmi ceux existant au système viticole. La construction de tels outils repose sur l'identification et l'agrégation de facteurs, principalement leurs variables, dans des systèmes d'équations et/ou de scores pour traduire l'aléa ruissellement. Il est alors primordial d'identifier les variables pertinentes à considérer dans une étude de ruissellement en milieu viticole.

L'état d'art qui suit aborde d'une part le rôle de différents facteurs conditionnels de l'infiltration et du ruissellement dans les vignes. Il tente dans la mesure du possible de hiérarchiser l'importance relative des variables de chaque facteur. Les outils d'évaluation des risques de ruissellement existants sont abordés en fin de chapitre. Nous nous focalisons que sur ceux utilisables à l'échelle parcellaire.

1.2. Les facteurs de ruissellement

Les écoulements observés à la surface d'un sol résultent de nombreux échanges d'eau entre différents compartiments de l'environnement (l'atmosphère, végétation et le sol). Ces échanges font intervenir des mécanismes d'interception végétale, d'infiltration et de détention superficielle de l'eau. Toute goutte d'eau précipitée subi au moins un de ces mécanismes pendant son trajet. Lors ce que l'eau échappe à ces trois compartiments, elle se concentre vers l'aval sous l'effet des facteurs prédisposants comme la pente, les traces de roue, les sillons, etc.). C'est pourquoi il est distingué dans les études de ruissellement les facteurs de production (transformation de la pluie en lame d'eau disponible au ruissellement) à ceux qui assurent le transfert de la lame produite, mouvement de la lame d'eau vers l'exutoire de la parcelle ou du bassin versant**.**

1.2.1. Les facteurs de production du ruissellement

Les EDS contrôlent la formation du ruissellement hortonien

Les états de surface (EDS) est un vocable pour désigner généralement la couverture et l'état des premiers centimètres (5 cm) du sol. Il s'agit pour (Armand 2009) de l'état structural, hydrique et micro-topographique de la surface. L'état de surface regroupe donc deux notions : **la couverture** du sol (par les végétaux vivants, les résidus et les cailloux) et **la morphologie de la surface** définie par les variables comme la rugosité (irrégularités à la surface), les croûtes (structurale, sédimentaire…), les turricules etc. L'état de la surface du sol détermine la répartition de l'eau entre l'infiltration, la détention superficielle et le ruissellement. La dynamique spatio-temporelle des variables d'EDS permet alors d'estimer la réponse hydrologique d'une surface face à des précipitations (Lacombe et al. 2018).C'est la raison pour laquelle leur dynamique est utilisée pour modéliser le ruissellement hortonien (*Le Bissonnais, 1996*; *Armand, 2009*).

En effet, plusieurs études ont établi des liens entre les types d'états de surface et le potentiel de ruissellement (*Armand, 2009;Malam Issa, 2011* ; *Lacombe, 2018* ; *Sofia, 2019* ; *Yu, 2019*). En étudiant les facteurs de ruissellement en milieu viticole méditerranéen, *Arnaez (2007*) trouve, à partir d'une régression linéaire multiple, que le développement de croûtes, la rugosité et la couverture du sol sont les éléments majeurs de la production du ruissellement. Le rôle important de ces trois variables avait été déjà souligné par *Le Bissonnais (2005*) qui indique que la dynamique de ces variables d'état de surface est à l'origine de plus de 50 % de la variabilité du ruissellement observé. Il note par ailleurs que la présence de croûte réduit l'infiltrabilité et augmente le ruissellement. Alors que le taux de couverture, l'activité des organismes vivants du sol et la rugosité favorisent l'infiltration et le stockage. En plus, il est

souligné en contexte de grandes cultures qu'une couverture de 30 % du sol par les résidus végétaux permet de mitiger le ruissellement. Par ailleurs, la connectivité des écoulements était plus corrélée (négativement) à la rugosité et à la masse volumique apparente des premiers centimètres du sol (Cerdan et al. 2002).

L'influence de l'activité biologique du sol (vers de terres et termites) sur le ruissellement a été spécifiquement évaluée en observant l'évolution de la biomasse, abondance, et pourcentage de turricules en fonction du ruissellement (Jouquet et al. 2008, 2012). A travers une analyse des composantes principales (ACP), l'auteur trouve une opposition entre les paramètres de l'activité des vers de terre et ceux du ruissellement. Ce qui montre que l'activité des organismes du sol permet d'améliorer l'infiltrabilité et concomitamment de réduire les risques de ruissellement. En effet, la faune du sol modifie la porosité totale d'un sol, crée de la rugosité (turricules) et améliore la percolation de l'eau dans sol (Le Bayon and Binet 2001).

Les caractéristiques de la pluie

L'apparition du ruissellement est intuitivement associée à la présence de fortes précipitations. La définition hortonienne[1] du ruissellement (mécanisme sur lequel ce travail se concentre) en est la preuve. Dans cette définition l'idée d'une forte précipitation se traduit en une intensité de pluie (Ip). Celle-ci est sans doute le premier facteur mis en cause dans l'évolution des EDS et du ruissellement. Une augmentation linéaire de la quantité d'eau ruisselée en fonction de l'Ip avait été soulignée dans différents contexte d'étude (méditerranéen, atlantique, tropical). Ces résultats convergents s'expliquent par le fait qu'une augmentation de l'érosivité de la pluie entraîne une plus grande désagrégation des mottes. Ce qui réduit la rugosité créée par le travail du sol et libère les particules fines venant obstruer les voies d'écoulement préférentielles et in fine produire du ruissellement. Des études plus récentes (Defersha and Melesse 2012; Sofia et al. 2019; Yu et al. 2019) réaffirment la prédominance de l'Ip sur la genèse du ruissellement et soulignent également l'existence d'une corrélation positive entre la durée des pluies, l'humidité du sol (précipitations précédentes) et le coefficient de ruissellement (Cr), défini comme le rapport du volume d'eau ruisselé et de la hauteur de pluie tombée en un endroit donné. Ces corrélations positives montrent qu'une pluie de faible intensité mais de durée longue peut dégrader la structure de la surface et provoquer du ruissellement. De nombreux tableaux de correspondance de l'évolution de la dégradation

[1] Ruissellement hortonien se produit quand l'intensité des précipitations dépasse l'infiltrabilité du sol. Il se distingue du ruissellement par saturation qui se produit quand le sol est saturé et la pluie supplémentaire mène à un « débordement » (notamment en hiver dans les zones de concentration d'eau comme les talwegs, bas de pente, zones proches des cours d'eau).

structurale (faciès et rugosité) en fonction du cumul de pluie ont même été proposé (Casenave and Valentin 1989; Auzet 1987).

Les propriétés physiques du sol

Dans un contexte de ruissellement, la texture d'un sol détermine sa propension à la battance et à l'érodibilité (Braud et al. 2018). La battance est la sensibilité à la désagrégation et au colmatage de particules fines désagrégées à la surface du sol. Ce colmatage progressif contribue à la formation de croûtes tendant à réduire considérablement l'infiltration et à favoriser le ruissellement et l'érosion. Les croûtes de battance ont tendance à se former plus facilement sur des sols argilo-limoneux à faible teneur en matière organique. L'érodibilité définie la facilité avec laquelle les particules du sol se détachent sous l'effet des gouttes de pluies et des forces de cisaillement du ruissellement. Elle est plus marquée sur un sol limoneux toujours à faible teneur en matière organique. En effet, la présence de matière organique stimule l'activité des microorganismes du sol principalement les champignons et les vers de terre anéciques sécrétant des composés organiques qui augmentent la cohésion des particules, la résistance des agrégats et la stabilité structurale (Jeffery et al. 2013; Pérès et al. 2013). Ces organismes du sol participent aussi à la formation d'un microrelief qui contribue au ralentissement du ruissellement. Par exemple les turricules des vers de terre favorisent l'infiltration de l'eau et réduisent les pertes de nutriments et de terre (*Jouquet, 2008*, *2012*).

Les éléments grossiers du sol quant à eux ont un rôle ambivalent sur le ruissellement. En ce sens qu'ils permettent d'une part de protéger la surface de l'impact des gouttes de pluie. Ce qui limite les risques de ruissellement. Mais d'autre part et lors qu'ils sont scellés, ils constituent plus des éléments imperméabilisant à l'image des croûtes (*Casenave, 1989*).

Les techniques d'entretien du sol

En viticulture, la gestion des adventices est l'action majeure qu'un viticulteur réalise pendant les opérations d'entretien du sol. Les adventices concurrencent la vigne pour l'accès à l'eau, à la lumière et aux substances nutritives. Sous les cavaillons (sous les rangs), les adventices accentuent les risques de gelées printanières et d'infestations fongiques (Schoener and Stone 2019). Une meilleure gestion de ces adventices est donc nécessaire pour s'assurer d'une bonne conduite de la culture et d'une bonne production. Pour contrôler efficacement les adventices, les viticulteurs peuvent utiliser cinq types d'opérations complémentaires : le désherbage chimique, le travail mécanique du sol, la couverture temporaire ou permanente, le mulchage et l'empierrage (Annexe II). Chaque technique peut être réalisée sur tous les inter-

rangs mais très souvent elles sont associées afin de réduire la vigueur de la vigne et la concurrence imposée par les adventices ou herbes semés.

Le travail du sol est une opération culturale qui permet d'ameublir le sol et de contrôler les adventices. Dans les vignobles, le labour conventionnel (15 à 40 cm) est de plus en plus délaissé au profit des techniques de conservation sans labour (TCSL). Ces derniers regroupent les pratiques comme le labour superficiel (3 à 10 cm de sol travaillé), le pseudo labour (15 à 30 cm), et le décompactage (0 à 15 cm). Ces pratiques se réalisent sous les inter-rangs et sous cavaillon. Mais actuellement elles sont combinées, en raison d'un inter-rang sur deux, avec de l'enherbement. Le travail du sol crée des mottes qui participent à accroître la rugosité, l'infiltration et la détention superficielle (van Dijck and van Asch 2002; Armand 2009; Biddoccu et al. 2013, 2016). La comparaison des impacts environnementaux des techniques de travail du sol réalisée par *Heddadj et al. (2005*) montre que pendant les saisons très pluvieuses comme en hiver, les cumuls de ruissellement sont significativement plus élevés sous les TCSL que sous labour. Mais en périodes moins pluvieuses la sensibilité au ruissellement est plus faible sous TCSL que sous labour. Les auteurs considèrent qu'en période très pluvieuse le ruissellement est plus contrôlé par propriétés hydrodynamiques et les conditions hydriques du profil de sol alors qu'en période moins pluvieuse c'est l'état de surface qui contrôle le ruissellement. Toutefois, il est souligné que l'effet bénéfique du travail du sol (labour, pseudo labour) sur l'infiltration diminue avec la succession des événements pluvieux sur la parcelle. Car l'intensité et le cumul de pluie contribuent à la formation d'état structural dégradé. Ce qui conduit à augmenter le ruissellement et l'érosion (Ruiz-Colmenero et al. 2011).

Diverses **techniques de couverture du sol** sont mobilisées pour réduire le ruissellement. Ces techniques sont entre autres l'enherbement et le mulchage. L'enherbement consiste à maintenir et à entretenir un couvert végétal sur les rangs et/ou sur les inter-rangs de manière temporaire ou permanente. Il est presque généralisé en Alsace (Ripoche 2009). L'enherbement permet d'intercepter et de réduire l'impact de la goutte de pluie sur sol. Il protège la surface du sol du phénomène splash et de la formation de croûte. Des auteurs comme (Hazbavi and Sadeghi 2016) ont montré qu'un dispositif en bande enherbé réduit deux fois plus le ruissellement que le travail du sol. Ce dispositif contribue à améliorer la structure du sol et à l'enrichir en matière organique dont la décomposition libère les éléments minéraux nécessaire à la croissance de la vigne. En plus quel que soit le contexte pédologique l'enherbement conduit systématique à accroître la rétention d'herbicides dans les premiers centimètre du sol (Madrigal et al. 2002).

Le suivi à long terme (2000 - 2013) des effets des pratiques d'entretien des sols réalisé par (Biddoccu et al. 2016) dans les vignobles du nord-ouest d'Italie montre à l'échelle d'une année, que les cumuls de ruissellement (saisonnier et annuel) ont été plus faibles sur une parcelle labourée que sur une parcelle enherbée (de 1 an) ou sur une parcelle avec un travail réduit du sol. Un an plus tard, en 2001, les auteurs constatent que les parcelles enherbées réduisaient respectivement de plus 20 % et 17 % le ruissellement par rapport aux parcelles labourées et pseudo-labourées. Après 10 ans, cette réduction a été estimée à 37 % rapport aux deux autres systèmes. En effet au fur et à mesure que les années passent, l'augmentation de la matière organique combinée à l'action des vers de terre et de l'activité racinaire permettent de créer de la macroporosité et d'améliorer la stabilité structurale. Ces effets se traduisent par une augmentation de la conductivité hydraulique, de l'infiltration et de la capacité de rétention de l'eau du sol.

Les passages des machines

Le passage des engins dans les parcelles viticoles a aussi des effets non négligeables sur le ruissellement. Les travaux de *van Dijck (2002*) et de *Biddoccu (2013*, *2017*) indiquent une compaction et une baisse de la conductivité hydraulique à la saturation sur ces surfaces de passage fréquent. Par exemple sur une parcelle enherbée la conductivité hydraulique à saturation était deux fois plus importante sur une zone de non passage comparée à une zone de passage fréquent (*van Dijck, 2002*). Parallèlement, une différence significative de la lame d'eau ruisselée a été aussi observée.

1.2.2. Les facteurs de transfert du ruissellement

La forme de la parcelle

La pente est considérée comme un accélérateur du ruissellement et sa longueur comme vecteur d'accumulation et de concentration. L'effet de la pente sur l'infiltration et le ruissellement est très discuté dans la littérature et dépend du type de sol, de son humidité et de l'intensité de la pluie. Les études du ruissellement conduites sur de faibles pentes (<15 %) montrent une augmentation progressive du ruissellement en fonction de l'intensité de la pente (Arnaez et al. 2007; Yu et al. 2019) . A l'inverse sur des sols limoneux encroûtés de fortes pentes (> 30 %) soumis à une intensité de pluie de 55 mm/h, *Defersha (2012*) note une diminution de 35 % des volumes ruisselés entre une pente de 9 % et de 45 %. Il indique qu'au-delà d'une intensité de pente de 50 % l'effet de pente s'estompe ou du moins n'est plus un facteur déterminant du ruissellement. Les raisons explicatives de cette ambivalence de l'effet intensité de pente ont été données par (Poesen 1986). La première raison est que pour

une pluie tombant à la verticale, le nombre de gouttes par unité de surface diminue lorsque la pente augmente. Il en est de même pour la composante verticale de la force d'impact qui varie en fonction du cosinus de l'angle que forme la surface du sol avec la verticale. La deuxième raison avancée est que l'érosion en nappe est suffisamment marquée pour déblayer les matériaux au fur et à mesure de leur détachement par la pluie, s'opposant ainsi à la formation d'une croûte. Et la troisième explication repose sur les griffes d'érosion qui présentent souvent une meilleure infiltrabilité que les surfaces inter-griffes.

En outre, la suppression des éléments interstitiels du paysage pendant les 50 dernières années est vue comme un facteur aggravant le ruissellement et l'érosion au sein d'un bassin versant (*van Dijck, 2002*; *Van Dijk, 2016*).

Travail du sol

L'utilisation de certains outils comme le chisel pendant les opérations d'entretien du sol contribue à créer des rills et des sillons. Ces éléments linéaires sont des canaux préférentiels de concentration des eaux dans une parcelle. Leur influence est d'autant plus marquée que le travail est fait dans le sens de la pente. Le buttage perpendiculaire au sens de la pente peut s'avérer être efficace pour réduire le ruissellement. Mais lors ce que la lame d'eau cumulée en amont de la butte devient supérieur à la hauteur de la butte, il se produit un violent débordement qui selon son énergie peut induire à la formation de rigoles.

Pratique de couverture du sol

L'épandage des résidus d'orge et des fragments de bois sur les inter-rangs des parcelles permet aussi de réduire drastiquement le ruissellement polluant (*Prosdocimi, 2016*). Cependant lorsque la quantité épandue est importante il se forme progressivement des rigoles, signe d'érosion diffuse. Une bonne maîtrise des quantités à apporter est donc nécessaire pour éviter de déplacer le problème. Ces conséquences secondaires freinent le développement de la pratique dans les vignobles. Les Annexe III et Annexe IV résument respectivement l'effet et des pratiques viticoles sur la dynamique des EDS et le ruissellement et l'importance de chaque facteur dans la formation et la propagation du ruissellement en milieu viticole.

Conclusion partielle

Nous avons vu que l'écoulement superficiel observé à la surface d'un sol agricole est le restant de la partition d'eau de pluie entre la végétation (interception), la matrice du sol (infiltration) et la surface (détention superficielle). Les ruissellements qui se produisent en milieu viticole pendant la période estivale sont généralement de type hortonien. Dans l'étude de ce type de ruissellement il convient de distinguer les facteurs de production à ceux du transfert vers l'exutoire de la parcelle. Comme dans cette étude nous nous intéressons à la production du ruissellement à l'échelle de la parcelle de vigne, il sera essentiel de mieux comprendre leur dynamique et leur influence selon les techniques culturales. Ces facteurs sont entre autres les EDS (la structure, le microrelief et la couverture), la pluie (intensité et hauteur, cumul), les pratiques viticoles et dans la moindre mesure la pente. En outre, les mesures agronomiques de gestion du ruissellement mises en œuvre actuellement par le viticulteur montrent des niveaux d'efficacité différents et parfois ayant des effets ambivalents à long terme. Ce qui traduit l'instabilité et hétérogénéité des réponses hydrologiques des surfaces de vigne. Cette variabilité spatio-temporelle des réponses peut rendre complexe la prédiction quantitative du ruissellement dans ces milieux. Reste à savoir s'il existe véritablement un tel outil ?

1.3. Les outils d'estimation du ruissellement inexistants pour les vignes

Il existe en général deux méthodes d'évaluation du risque de ruissellement : **les modèles et les indicateurs**. Le choix d'une de ces méthodes dépend des objectifs et de l'échelle d'étude mais aussi de la disponibilité des données. De ce fait les processus et la qualité des informations d'entrée et de sortie seront aussi différents selon que nous ayons utilisé telle ou telle méthode. Le problème qui se pose véritablement à ce stade est le *"scale mismatch",* le choix du niveau pertinent pour aborder le ruissellement et les problèmes écologiques en général. Il est admis que le niveau le plus pertinent d'étude du ruissellement érosif est le bassin versant alors que celui de l'étude de la complexité du phénomène et de la prise de décision est celui de l'exploitation agricole ou de la parcelle (Ronfort 2010). Des synthèses bibliographiques sur les outils d'évaluation du risque ruissellement à l'échelle du bassin versant (BV) ont été réalisée par (Payraudeau and Gregoire 2012) et (Devia et al. 2015). Nous nous intéressons ici aux outils adaptables à l'unité parcellaire et analysons les avantages et les limites de leur utilisation dans le contexte de notre étude : outil décrivant la production du ruissellement à l'échelle d'une parcelle.

1.3.1. Les modèles

Un modèle est une représentation simplifiée d'un processus ou d'un système complexe. Les modèles sont des outils privilégiés par les chercheurs qui, souvent par manque de données, les utilisent pour généraliser les résultats acquis d'expérimentations au laboratoire ou aux champs. Les modèles servent à faire des simulations de ruissellement à des échelles plus grandes que la parcelle agricole (région, bassin versant, pays…). Le bassin versant constitue actuellement l'échelle de référence pour les modèles simulant des processus hydrologiques et de ruissellement. L'étude du ruissellement à cette échelle permet d'avoir une vision d'ensemble du problème. Ces dernières années un nombre pléthore de modèles hydrologique ont été développés. Cette pluralité de modèles s'explique bien, puisque tout modèle part de quelque chose pour quelque chose. En ce sens, un modèle vient d'un problème qui conduit à des choix d'hypothèses de modélisation. Ces spécificités font que les modèles soient classés selon cinq niveaux complémentaires (Tableau 1).

Tableau 1: Classification des modèles

Niveaux de classification	Types de modèle
Nature des variables	Déterministe (non aléatoires) Stochastique (aléatoires)
Théorie et approche	Empirique Conceptuel Base physique Expert
Discrétisation spatiale	Global Distribué
Evolution temporelle	Statique Dynamique
Utilisateur	Recherche Gestion

Les modèles empiriques mettent en relation, à travers une boîte noire, les variables (e.g. pluies) et la réponse d'une entité (bassin versant) comme le débit instantané. Ces modèles considèrent le bassin versant comme une entité globale. C'est à dire ne prennent pas explicitement compte les processus physiques et la variabilité spatiale des variables et des réponses au sein du bassin versant. C'est le cas de la plupart des modèles qui utilisent les réseaux de neurone, de logique floue, etc. Leur mise en œuvre est rapide mais les incertitudes

associées aux résultats plus grandes et d'autant plus importantes quand ils sont utilisés en dehors des bassins versant ayant servi à établir la relation (*Regazzoni, 2010*). Ce type modèle n'est donc pas adapté à notre étude puisque et comme nous avons vu dans la conclusion partielle précédente que la parcelle viticole se caractérise par une hétérogénéité spatiale très marquées des réponses hydrologiques. Aussi, les actions de lutte contre le ruissellement demandent une analyse fine permettant d'identifier les parties de la parcelle qui produisent réellement du ruissellement.

Les modèles conceptuels sont des représentations simplifiées des processus hydrologiques au sein d'un système. Dans ces modèles, comme SWAT[2] (Arnold et al. 1993) ACTMO[3] (Frere et al. 1975) , le système est représenté en sous compartiments d'échange des flux à partir desquels est appliqué un bilan de masse. Les modèles conceptuels cherchent donc à reproduire le comportement d'un système et non à analyser les transformations qui s'y produisent. Les fonction de production utilisées pour reproduire la relation pluie-débit dans ces modèles sont essentiellement la méthode "soil conservation service (USDA 1972), l'approche de (Horton 1933), de (Smith and Parlange 1978) ou encore la fonction tangente hyperbolique de(Boughton 2009). Les modèles conceptuels sont les plus utilisés puisque leur mise en œuvre semble être rapide et plus réaliste que les modèles empiriques (Regazzoni 2010). Mais leur utilisation nécessite systématiquement une phase de calage (ajustement des paramètres avec des données mesurées).

Les modèles à base physique reposent sur l'utilisation des équations mathématiques pour traduire le cycle de l'eau et les différents processus physiques. Ces modèles sont généralement distribués. Les fonctions de production généralement associées à ces modèles comme Green et Ampt (1911), Swatre (1983) se basent sur la définition des paramètres d'état tels que la teneur en eau, la conductivité à saturation ou la sorptivité, etc. A titre d'exemple nous citerons le modèles LISEM[4] (*Roo, 1996*), MHYDAS[5] (*Moussa, 2002*) , Mike SHE (*Frana, 2012*)

A notre connaissance, les modèles suivants ont été utilisés pour simuler le ruissellement dans les systèmes de vigne, MHYDAS et PSEM 2D[6] et LISEM,

PSEM 2D, modèle numérique distribué à base physique, a pu être testé à l'échelle d'une parcelle viticole pour évaluer l'effet de l'intensité de pluie et de la longueur du versant sur le

[2] Soil and Water Assessment Tool
[3] Agricultural chimical Transport model
[4] Limburg Soil Erosion Model (LISEM)
[5] Modèle hydrologique Distribuée des Agrosystèmes (MHYDAS)
[6] Plot Soil Erosion Model 2D (PSEM 2D)

ruissellement (Nord and Esteves 2007; Nicolas 2010) . Mais les résultats de simulation n'ont pas été satisfaisants car surestiment très largement les volumes. Ces résultats sont supposés être liés à la microtopographie non considérée par le modèle. En plus, les essais de mise en œuvre des modèles à l'échelle parcellaire se sont confrontés à la représentation et la variabilité des propriétés hydrodynamiques de la surface du sol induite par les opérations culturales (Chahinian 2004) La plupart des modèles existants ne tiennent pas compte des états de surface et des opérations culturales.

MHYDAS est un modèle (une plateforme maintenant) de simulation des flux hydro-chimiques et sédimentaires en milieu agricole. C'est un modèle événementiel à base physique. Son module hydrologique a été utilisé dans le bassin viticole de Roujan (Hérault, Montpellier) pour évaluer l'influence des systèmes viticoles sur la formation du ruissellement (*Chahinian, 2004*). La stratégie a été de distinguer les systèmes viticoles selon la dominance d'une technique d'entretien des inter-rangs (enherbement, travail mécanique ou désherbage chimique). Ainsi, les systèmes ayant recours au désherbage mécanique, même alterné avec de l'enherbement (1 rang sur 2 ou 4), sont classés "labourés" et tout autre système est qualifié "non labourés". Paramétré sur cette base, le modèle a globalement bien simulé les réponses dans chaque système mais a aussi tendance à surestimer les volumes ruisselés surtout pour des événements de durée supérieures à 10h.

LISEM est un modèle événementiel distribué à base physique qui demande à entrer environ 30 paramètres utilisés dans les équations. L'utilisateur doit connaître pour une date donnée à chaque endroit les valeurs de ces paramètres. Les mailles utilisées sont généralement de 5*5 m ou supérieure. Ceci complique le paramétrage des motifs intra-parcellaire des vignes qui ont des dimensions inférieures (e.g. largeur des inter-rangs égale 1,6 m). LISEM a été utilisé dans une étude d'impact de changement d'occupation du sol en milieu viticole alsacien par l'ARAA et dans des études de recherche sur les transferts de produits phytosanitaires par le LHyGES de l'Université de Strasbourg. La stratégie a été de regrouper les parties enherbées et travaillées dans des unités spatiales compatibles avec le maillage et de paramétrer les surfaces regroupées des inter-rangs enherbées comme de l'herbe et les surfaces travaillées comme des terres arables. Ceci ne pose pas de problème tant que les cavaillons (rangs) des vignes sont orientés dans le sens de la pente. Mais lorsque les cavaillons sont dans le sens perpendiculaire de la pente, l'approche risque de générer des erreurs sur le comportement hydraulique de l'écoulement sur la surface.

1.3.2. Les indicateurs

Un indicateur est une variable ou un ensemble de variables agrégées et jugées pertinentes pour fournir des informations significatives sur l'état d'un système. Il facilite la compréhension et le jugement de l'état d'un système complexe en vue d'une prise de décision dans l'atteinte d'un objectif fixé.

Contrairement aux modèles, les indicateurs de risque du ruissellement ont retenu peu l'attention des hydrologues. A ce titre, nous dénombrons à l'échelle de la France que quatre indicateurs dont les trois, DIAR[7] (Martin et al. 2010), RUIS[8] (Steffan 2001) et IDR[9] (*Sivacheva, 2018*), sont pour les systèmes de grandes cultures. L'Indicateur de Ruissellement Vigne - IRu[10] (Tribouillard 2004) est le seul indicateur d'évaluation du ruissellement pour les vignes. Cet indicateur (IRu) est une version adaptée de RUIS. Il s'agit d'un indicateur de type expert qui utilise les données de littérature, d'expérimentations, d'expertise et de règles de décision du modèle STREAM[11] (Cerdan et al. 2002) pour déterminer l'état de la surface. Les tests de validation de l'indicateur montrent qu'il est capable d'identifier les périodes sensibles mais tend à surestimer les valeurs de ruissellement du fait de l'utilisation du coefficient de ruissellement. En plus les simulations au pas de temps décadaire ne permettent pas de prendre suffisamment en compte les processus à l'origine du ruissellement hortonien dominant dans les vignobles alsaciens.

1.3.3. Les outils candidats

L'analyse brève des outils d'évaluation du risque de ruissellement précédente a permis de définir six (6) critères pour identifier les outils candidats. C'est à dire ceux potentiellement utilisables dans notre étude. Ainsi l'outil doit au moins remplir les ⅔ de critères présentés dans le Tableau 2 suivant :

[7] Diagnostic Agronomique de Ruissellement (DIAR)
[8] Indicateur de ruissellement (RUIS)
[9] Indicateur de la dynamique de ruissellement (IDR)
[10] Indicateur de ruissellement vigne (IRu)
[11] Sealing and Transfer by Runoff and Erosion related to Agricultural Management (STREAM)

Tableau 2: Conditions d'éligibilité des outils

Critères	Exigences	Signification	Justification
Critère 1	Parcellaire	Utilisable à l'échelle de la parcelle	Prise de décision
Critère 2	Segmentation de la parcelle en motifs	Surfaces ayant un comportement hydrologiques identiques	Effet des modes de conduite
Critère 3	Itinéraires techniques	Considérer les opération culturales	
Critère 4	Calendrier cultural	Echelle temporelle de simulation	
Critère 5	Etats de surface et du sol	Prendre en compte l'évolution des EDS et les propriétés hydrodynamiques	Ruissellement hortonien
Critère 6	Sorties quantitatives		Evaluation

Les outils potentiellement utilisables sont représentés à la Figure 1. Parmi ces derniers, l'indicateur de la dynamique du ruissellement (IDR) remplit toutes nos conditions.

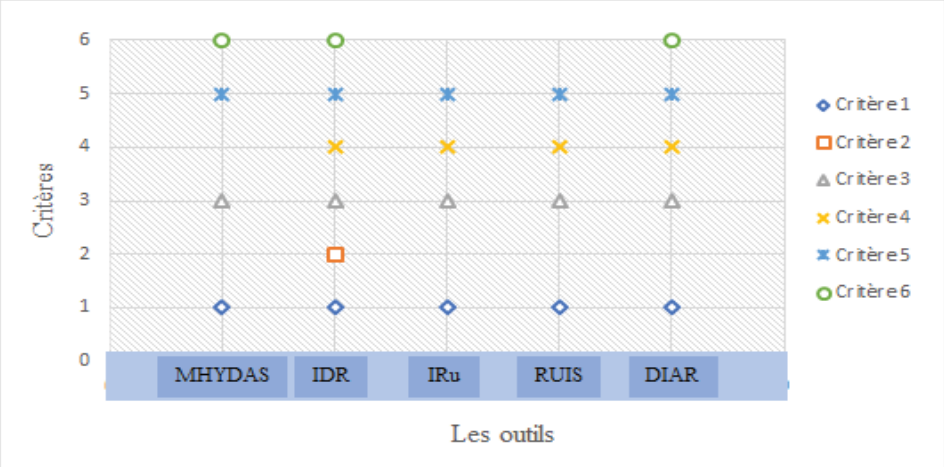


Figure 1: Outils candidats d'estimation du ruissellement utilisables à l'échelle de la parcelle de vigne

L'IDR est un outil développé par ARAA en collaboration avec l'INRA de Colmar. Il évalue la production du ruissellement en fonction du climat (régime pluviométrique, température), du sol (texture, matière organique, pH) et du système de culture (rotation, travail du sol, gestion des résidus) d'une parcelle agricole au cours d'une rotation. L'indicateur sur sa forme actuelle (Figure 2) calcule d'abord la lame d'eau ruisselante de **trois surfaces élémentaires à savoir les surfaces nues, les surfaces protégées par résidus et les surfaces occupées par la culture**. Cette lame est estimée en croissant la précipitation instantanée à l'infiltration instantanée et à la détention superficielle instantanée. Les deux

derniers processus sont dynamiques car dépendent du climat du secteur, des caractéristiques du sol (texture, matière organique), des états de surface (microrelief, structure, couverture et humidité) et du système de culture. La lame d'eau ruisselante de la parcelle est ensuite estimée égale à la moyenne pondérée par de chaque surface élémentaire.

Les processus dynamiques estimés sur chaque type de surface élémentaire par l'indicateur sont ainsi qui suit :

- **Les pluies instantanées** sont générées par désagrégation des pluies du secteur d'étude en événement en s'appuyant sur les techniques stochastiques (Connolly et al. 1998). Ces pluies instantanées ont des caractéristiques différentes selon le mois et la saison.

- **L'infiltrabilité instantanée** est calculé à partir de l'équation de *Philip (1957*) en considérant deux paramètres, la conductivité hydraulique à saturation (Ks) et la sorptivité (S). La conductivité hydraulique à saturation est définit comme la capacité d'un sol saturé à laisser s'écouler l'eau via les macropores sous l'effet de la gravité (Banton et al. 1991). Elle est déterminée dans l'IDR en deux temps. D'abord est déterminé une Ks matricielle de base par des fonctions de pédotransfert utilisant que la texture, les teneurs en matière organique et en cailloux du sol (*Saxton et Rawls 2006*). Cette Ks matricielle est ensuite modifiée en prenant en compte les effets sur la porosité du travail du sol et de la reprise en masse après travail du sol (dégradation structurale). Ces effets sur la porosité sont estimés à partir de la masse volumique apparente.

La sorptivité S est la capacité d'un sol à absorber l'eau par capillarité (Chossat 2005). Elle est fonction de l'humidité initiale et est calculée au moyen d'une fonction établit pendant le stage de (Winterer 2011). L'humidité initiale est estimée à partir de l'indice de précipitation antécédente.

- **La détention superficielle** est quant à elle calculée selon l'équation de (Kamphorst et al. 2000). Elle prend en compte la pente et la rugosité aléatoire. L'évolution de cette dernière (rugosité) tout comme la reprise en masse sont fonction des précipitations cumulées depuis le travail du sol, de la stabilité structurale et de la couverture du sol.

- **La couverture de la surface par la culture** est déterminée en utilisant une équation de croissance de l'espèce cultivée ou semée.

- **La couverture de la surface par les résidus** est estimée en tenant compte de la biomasse résiduelle, de la profondeur de travail du sol et de la vitesse de décomposition fonction de la température, humidité antécédente et du rapport C/N.

L'ensemble de la méthode IDR et les équations sont documentées dans le rapport de stage de *Sivacheva (2018*).

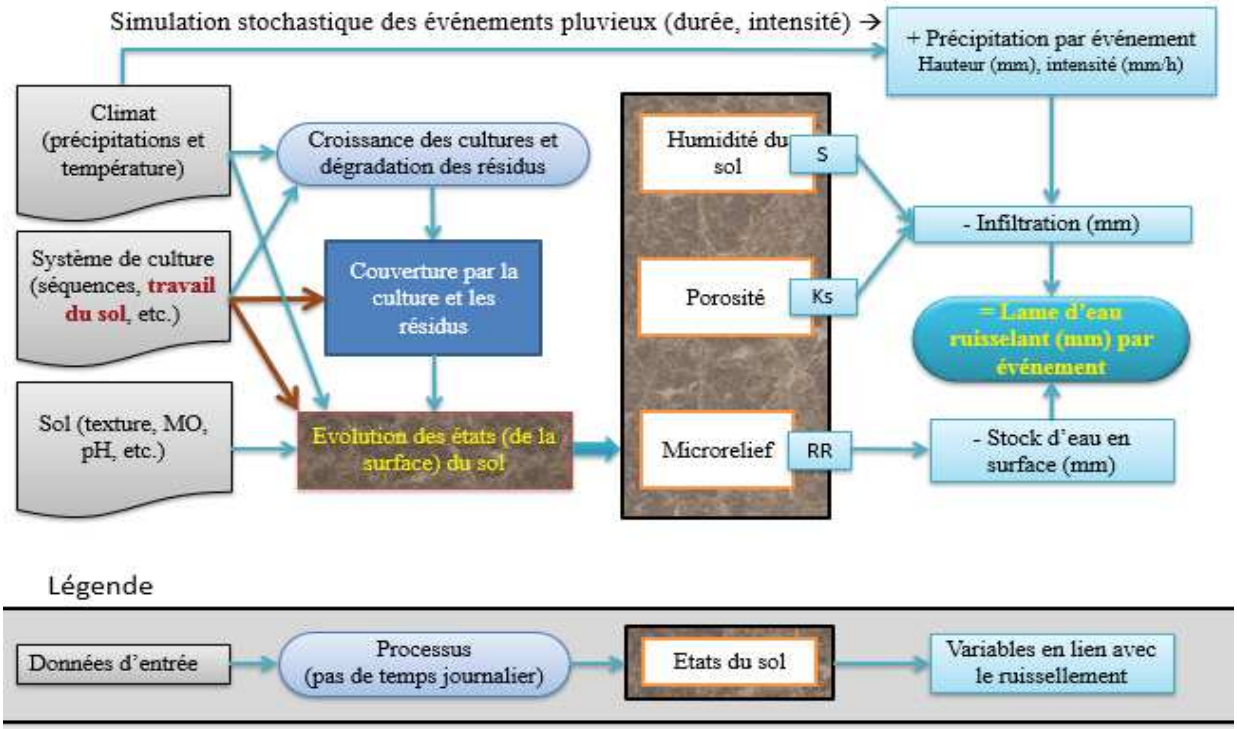


Figure 2 : Schéma simplifié du fonctionnement de l'indicateur de la dynamique de ruissellement (IDR)

1.4. Problématique, objectifs et questions de recherche

L'indicateur tel que conçu est très spécifique aux parcelles de culture annuelle. Or la structure spatio-temporelle de ces parcelles est très différente de celle des vignes. Dans la parcelle de vigne sont combinées plusieurs techniques culturales (paillage, enherbement, travail mécanique du sol). Ces motifs agraires semblent avoir des dynamiques d'EDS différentes. Le travail ici présenté se donne comme mission d'adapter l'indicateur de la dynamique du ruissellement au contexte viticole. Il est baptisé par la suite IDR-Vigne. Ce dernier doit être utilisable sur une large gamme des types de sol. L'indicateur doit aussi être capable d'identifier les périodes à risque et de bien simuler l'effet d'une technique d'entretien du sol sur ruissellement. Ces nombreuses contraintes, nous amène à poser la problématique suivante : **Comment rendre sensible l'IDR à la variabilité intra et inter-parcellaire des réponses hydrologiques qui caractérisent les surfaces de vigne ?** Ceci nécessite la recherche de données sur :

- Les surfaces ayant des différences de réponses hydrologiques ; appelées ici surfaces élémentaires.
- Sur les mécanismes qui président à la genèse du ruissellement et leurs effets en fonction du type de sol et des itinéraires techniques viticoles.

- Les liens qui existent entre les propriétés hydrologiques et les états de surfaces
- et sur les variables déterminantes du ruissellement

La démarche utilisée dans cette étude s'articule sur deux approches. La première est expérimentale**.** Elle s'appuie sur les données de deux sites expérimentaux pour comprendre les liens entre la **dynamique les états du sol et la genèse du ruissellement**. A travers ce diagnostic, nous cherchons principalement à obtenir des références sur les facteurs expliquant la variabilité du ruissellement observée entre différents systèmes de conduite de vigne. La seconde approche est dédiée essentiellement à **l'identification des modifications nécessaires à apporter dans IDR** pour le rendre opérationnel en vigne. Ces modifications proposées seront intégrées dans un prototype IDR-Vigne et testées dans la mesure du possible (si le temps le permet).

Il s'agit plus concrètement (1) d'analyser à l'échelle annuelle et pluriannuelle la dynamique croisée des états de surface, de la pluie et du sol. (2) D'identifier les déterminismes du ruissellement sous différents modes de conduite des vignes. Les variables ainsi identifiées sont utilisées (3) pour donner des pistes de modification de l'IDR. Nous testons les hypothèses suivantes :

- Nous supposons que la dégradation structurale du sol (et surface) sera plus importante sur surface non couvert que sur sol couvert surtout avec résidus ;
- Les motifs agraires (cavaillons, inter-rangs) auront des propriétés hydrologiques différentes ;
- Pour un même type de sol, les différences d'états de surface seront à l'origine de la variabilité du ruissellement observée entre modalités.

2. Matériel et Méthodes

Le piémont viticole vosgien dans le Haut Rhin est l'un des secteurs de la région Grand Est (France) qui concentre plusieurs problèmes environnementaux. D'une part ce secteur est classé zone sensible au ruissellement et à l'érosion (ARAA[12], 2016). D'autre part il constitue une zone prioritaire d'action en termes de contamination des eaux par les PPS. Ce secteur est sous influence du climat semi-continental caractérisé par une pluviométrie annuelle de 607,5 mm sur la période 1981-2010 (météo France) avec de forts orages en saison estivale. Nos deux sites d'étude se localisent dans ce secteur (Figure 3).

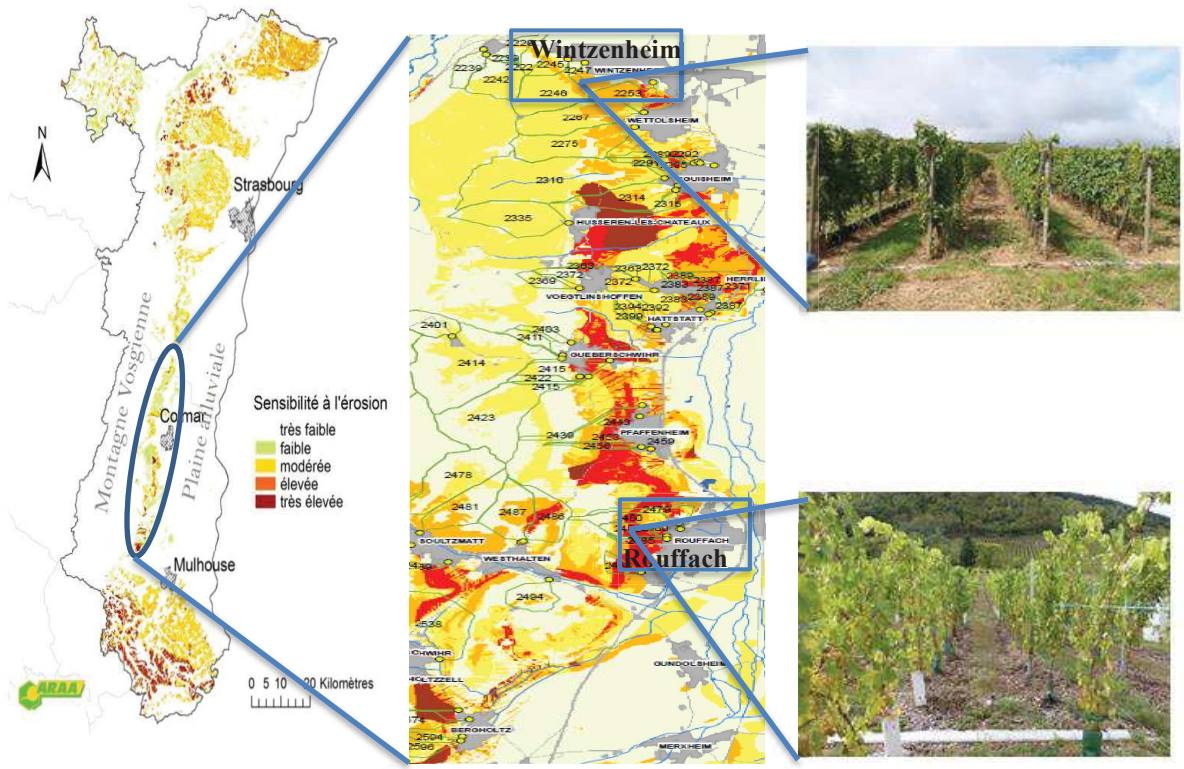


Figure 3: Localisation des sites d'étude

2.1. Présentation des sites et des pratiques culturales

Le site expérimental de Rouffach

Situé dans le bassin versant de Hohrain, le site expérimental du lycée viticole de Rouffach a été installé en 1998 dans le but d'évaluer l'influence des modes de conduite sur le régime hydrique, la qualité du sol et l'état général de la vigne. Ce site a fait l'objet de plusieurs programmes de recherche (*Tournebize, 2001*; *Domange, 2005*; *Madier, 2007*).

[12] Association pour la Relance de l'Agriculture en Alsace

Le site est subdivisé en deux modalités de 0,15 ha (87,4 m * 17 m). Chaque modalité comprend 10 rangs de vigne implantés selon un écartement inter-rang de 1,7 m et un espacement inter-ceps (inter-pieds) de 1,3 m.

L'une des modalités est conduite selon les pratiques d'entretien du sol plus représentées de la région, dénommée ici « classique ». Les inter-rangs de cette modalité sont enherbés ou désherbés mécaniquement en raison d'un inter-rang sur deux. Les cavaillons larges de 20 cm sont habituellement désherbés chimiquement. Cette année (2019), le désherbage chimique sous les cavaillons est remplacé par le semis du trèfle souterrain.

La seconde modalité appelée pied à pied (PaP) pour caractériser l'entretien homogène du sol d'une ligne de cep (pied de vigne) à l'autre. Un inter-rang sur deux et demi-cavaillon sont travaillés, et un inter-rang sur deux plus demi-cavaillon enherbés. Chaque cavaillon est alors pour moitié travaillé et moitié enherbé. Cette gestion est introduite pour réduire le surcroît du temps de travail que pourrait générer la non-utilisation d'herbicide de synthèse.

Ces deux modalités se distinguent donc par le mode de gestion des cavaillons et la largeur des inter-rangs (Figure 4).

D'un point de vu pédologique, le site couvre des Calcosols profonds développés sur du lœssique (Référentiel pédologique 2008). Les analyses granulométriques réalisées en mai 2014 par le LHyGeS, mettent en évidence une texture limono-sableuse (LS), avec 54 % de limon, 30 % de sable, 16 % d'argile, 19 % de calcaire en surface et 7 % d'éléments grossiers (Tableau 3).

Figure 4: Les modalités du site de Rouffach, (1) la modalité classique et (2) la modalité pied à pied en 2016

Le site PEPSVI de Wintzenheim

Ce site expérimental de 1,35 ha est géré par l'INRA de Colmar. Il est constitué de trois blocs comprenant chacun quatre modalités de 0,11 ha. En 2014 dans le cadre du projet PEPSVI, deux modalités du site ont été plantées avec du pinot blanc et deux autres avec des

variétés résistantes au mildiou et à l'oïdium. Les écartements inter-rangs (1,6 m) et inter-ceps (1,2 m) et le nombre de rang (6) sont cependant les mêmes dans toutes les modalités. Ces quatre modalités constituent les systèmes de production de vigne testés dans le cadre du projet PEPSVI (2014 - 2018) : **l'agriculture biologique (BIO)**, la **protection intégrée (PI), variété résistante 1 (RES1) et variété résistante 2 (RES2)**. Tous les cavaillons sont travaillés mécaniquement mais ceux de BIO et de RES2 ont reçu en plus des plaquettes de bois forestier respectivement en 2014 et en 2016 (Figure 5). Il faut souligner que du fait des opérations de débuttage réalisées sur les cavaillons, une partie des plaquettes se retrouvent sur les inter-rangs des modalités BIO et RES2.

Les sondages et les analyses granulométriques réalisés sur le bloc 1 classent les sols de site parmi les Brunisols sablo-limoneux (SL) profonds (plus de 100 cm) développés sur du lœssique (Tableau 3).

Les deux sites sont instrumentés pour disposer de données relatives aux précipitations, à la quantité et qualité des eaux de ruissellement. Ainsi, une gouttière est installée à l'exutoire de chaque modalité pour intercepter l'eau de ruissellement lors des événements pluvieux. Afin d'évaluer le ruissellement sur une surface précise (68 m² pour Wintzenheim), il est installé une rigole en amont de chaque gouttière pour détourner les eaux venant de la partie amont. Les gouttières sont reliées à des systèmes de bacs répartiteurs (Annexe *I*) permettant de quantifier également les volumes écoulés lors des événements importants de ruissellement. Les volumes dans les bacs sont estimés tous les 15 jours puis les bacs sont vidés.

Figure 5 : Les modalités du site de Wintzenheim. à gauche la modalité PI et à droite la modalité RES2 en 2016

Tableau 3: Les caractéristiques pédologiques du sol à 20 cm

Caractéristiques du sol (0 - 20 cm)	Rouffach		Wintzenheim
	Classique	PaP	BIO ; PI ; RES1 et RES2
Type de sol	Calcosols	Calcosols	Brunisols
Texture	LS	L	SL
Limon (%)	47,33	61,56	30
Sable (%)	38,34	21,37	60
Agrile (%)	14,33	17,07	10
Calcaire (%)	19	19	-
Cailloux (%)	10	7	15
Ph	8,1	8,1	7
Masse volumique apparente (cm3/g)	1,46	1,56	1,6
Matière organique (%)	5,71*	5,5*	1,17
Pente (%)	7	7	10

* méthode perte à feu (probable surestimation)

2.2. Inventaire des données disponibles

Dans cette étude nous avons utilisé plusieurs types de données pour caractériser les états de surface et leur dynamique sous l'effet de la pluie et des opérations culturales. Les données proviennent des projets PACOV et PEPSVI respectivement pour le site de Rouffach et de Wintzenheim. Ces données concernent les états de surface, les précipitations, le ruissellement, les résultats d'analyse de sol et les itinéraires techniques.

Données de précipitations

Les données de pluie disponibles sont enregistrées sur la période 2015-2019 à l'aide d'un pluviographe à auget basculeur (0,2 mm) installé sur chaque site. Ces enregistrements ont été désagrégés en événements en utilisant deux conditions : (1) un événement doit avoir au moins deux enregistrements, c'est à dire avoir une lame précipitée supérieure à 0,2 mm. (2) Une durée de 30 minutes sans enregistrement marque la fin d'un événement. Ce traitement nous a permis d'obtenir 417 événements pour le site de Wintzenheim et 302 événements pour Rouffach. Les caractéristiques de ces événements sont décrites à la section (2.3.1).

États de surface (EDS)

Les données EDS du site de Wintzenheim sont des photos de micro-parcelle prises au courant des années 2016, 2017 et 2018. Les périodes de suivi s'étalent du 01 mars au 31 octobre.

A chaque date de terrain, des photos d'état de surface sont prises sur un cavaillon (Cav), un inter-rang travaillé (IRW) et un inter-rang enherbé (IRH) de chaque modalité, soit au total 12 photos par date. Ces surfaces sont appelées ici « motif ». Ainsi, 288 photos (12*24 dates) ont pu être interprétées en posant une grille sur la photo et en comptant le nombre de carreaux entièrement couverts (à +75%) par la végétation vivante, les résidus (sarments, plaquettes de bois) et les croûtes sédimentaires (Figure 6). Le nombre de carreaux que compte la variable est rapporté au nombre total de carreaux de la grille (17*36 = 612 cases) pour avoir le pourcentage de surface couverte par la végétation, les résidus, les mottes et les croûtes sédimentaires. Du fait qu'il est difficile de juger la proportion de surface présentant des croûtes structurales, surtout sur les inter-rangs enherbés, nous l'avons estimée égale à la proportion de surface nue ni mottes ni croûtes sédimentaires. Cependant, si la date de travail de sol est suffisamment proche de la date de terrain (<10 jours) nous avons considéré qu'il ne peut y avoir de formation de croûte de battance et une valeur zéro est affectée à la croûte structurale et sédimentaire.

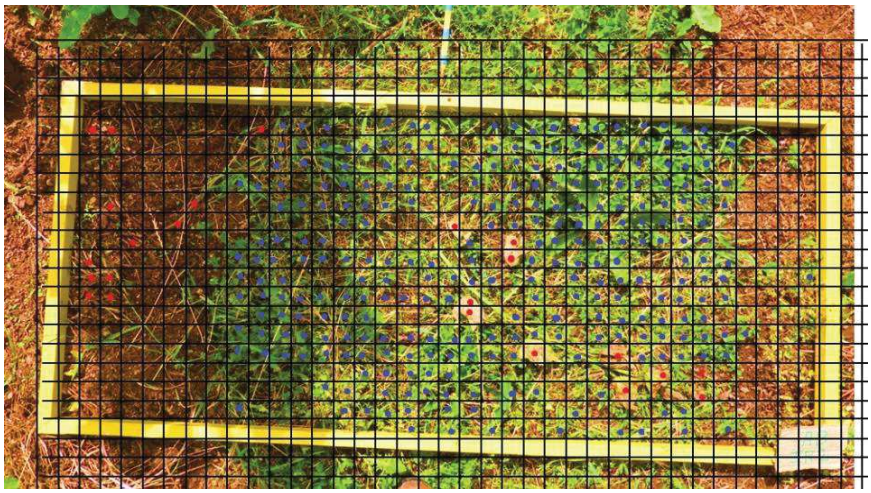


Figure 6: Estimation de différentes variables d'EDS par la méthode des carreaux. En bleu la végétationvivante et rouge les résidus

Pour le site de Rouffach, c'est une base de données des états de surface de 2016 qui nous a été fournie. La description des EDS est faite visuellement sur le terrain. Les variables décrites sont les mêmes qu'à Wintzenheim. Cette base ne compte que quatre (4) dates, soit 24 observations (4 dates * 3 motifs * 2 modalités * 1 répétition). Nous utilisons principalement dans l'analyse de la relation EDS – ruissellement.

Ruissellement

Les mesures des volumes d'eau contenus dans les bacs associés à chaque modalité se font au maximum tous les 15 jours ou en cas d'orages particuliers. Ce sont des mesures

globales par modalité et sur un temps donné. Dans cette étude nous ne considérons que les mesures effectuées pendant les périodes de suivi des états de surface. Au total, nous disposons de 59 dates mesures de ruissellement pour le site de Wintzenheim et de 61 dates de mesures pour le site de Rouffach.

Itinéraires techniques (ITK)

Toutes les opérations culturales réalisées sur les modalités de chaque site ont été consignées dans des feuilles Excel et nous ont été transmises. Ces données brutes ont été par la suite réorganisées en 3 types d'opérations : travail du sol, gestion du couvert (fauchage) et entretien de la vigne (traitements phytosanitaires et rognage). De ces tableaux, nous déduisons le nombre d'opérations et de passages par modalité et par motif. Le Tableau 4 un résumé des opérations d'entretien du sol réalisées sur les périodes de suivi à Wintzenheim. En Annexe V se trouve la synthèse de toutes les données disponibles.

Tableau 4: Les pratiques d'entretien du sol du site de Wintzenheim

Années	Modalités	Motifs	Pratiques	Outils de travail	Profondeur Travail	Nombre d'interventions
2016	BIO RES2	Cav	TCSL + amendement	Intercep planet Soc débuttage	5 à 10 cm	5
		IRH	Enherbement	Herse rotative	10 à 25 cm	7
		IRW	Labour	Herse rotative	10 à 25 cm	7
	PI et RES1	Cav	TCSL	Intercep planet Soc débuttage	5 à 10 cm	5
		IRH	Enherbement	Herse rotative	10 à 25 cm	7
		IRW	Labour	Herse rotative	10 à 25 cm	7
2017	BIO et RES2	Cav	TCSL + amendement	Intercep planet + Soc débuttage	5 à 10 cm	5 en BIO ; 2 RES2
		IRH	Enherbement	chisel*	10 à 20 cm	1
		IRW	Labour	Herse rotative	10 à 25 cm	4
	PI et RES1	Cav	TCSL	Intercep planet + Soc débuttage	5 à 10 cm	5
		IRH	Enherbement	chisel*	10 à 20 cm	1
		IRW	Labour	Herse rotative	10 à 25 cm	4
2018	BIO et RES2	Cav	TCSL + amendement	Rasette + Soc débuttage	5 à 10 cm	5
		IRH	Enherbement			
		IRW	Labour	Herse rotative	10 à 25 cm	2
	PI et RES1	Cav	TCSL	rasette + Soc débuttage	5 à 10 cm	5
		IRH	Enherbement			
		IRW	Labour	Herse rotative	10 à 25 cm	2

*Chisel est utilisé pour préparer le sol avant le semis de l'herbe

2.3. Dispositif des campagnes de mesure 2019

Le manque de données sur les propriétés hydrodynamiques des sols de chaque modalité nous a amené à réaliser deux campagnes de mesure dans les deux sites d'étude. Les paramètres mesurés durant ces deux campagnes de terrain sont spécifiquement la masse volumique apparente (Da), la vitesse d'infiltration, la couverture et le microrelief. Vu que les passages répétitifs d'engins modifient la structure physique du sol (van Dijck and van Asch

2002), nous avons ajouté un quatrième motif que nous appelons « traces de roue » (TR). En plus, pour prendre en compte la variabilité intra-motif de la couverture et du microrelief nous définit deux zones d'observation des EDS sur chaque motif (Figure 7).

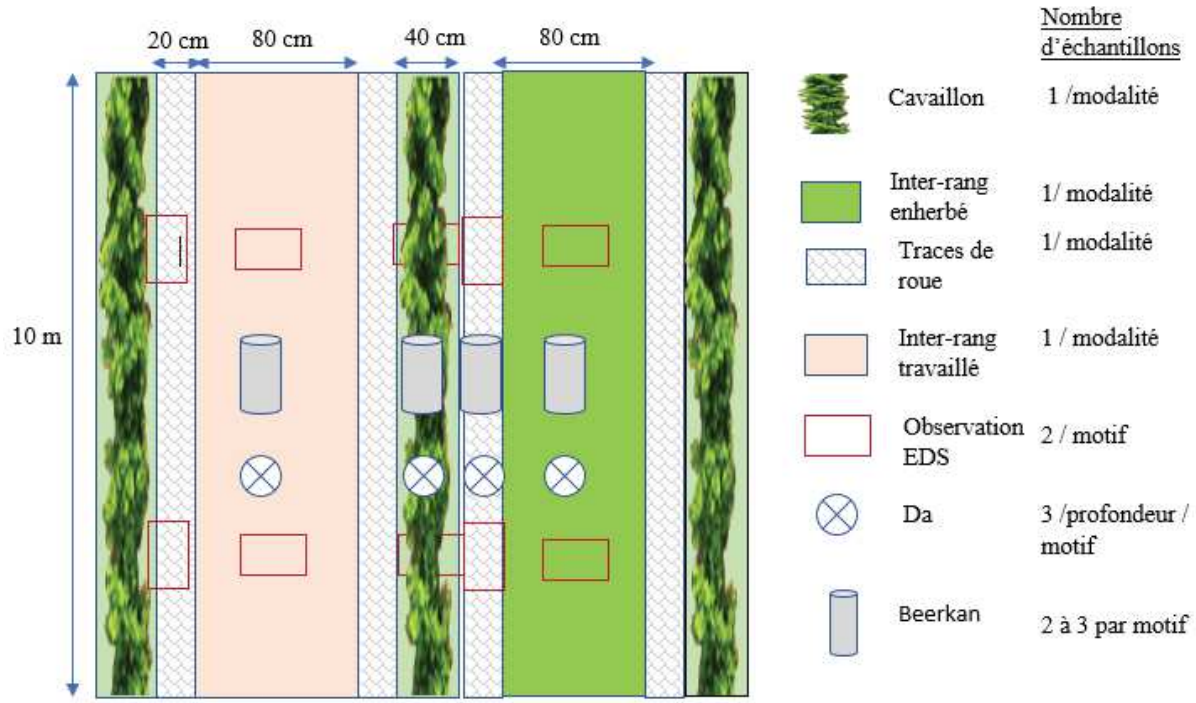


Figure 7 : Dispositif d'échantillonnage de la campagne 2019 à Wintzenheim

➢ Description du microrelief et de la couverture de la surface du sol

Nous posons sur chaque motif deux micro-parcelles de 70*40 cm et décrivons visuellement les états de surface conformément au formulaire utilisé dans le cadre du programme RIDES (Ruissellement, Infiltration et Dynamique des Etats de Surface) par(Auzet 2000). Les variables mesurées dans ce protocole sont essentiellement le taux de **couverture** du sol par les résidus et par la végétation vivante, le type et la couverture en **mottes**, la proportion de surface occupée par **les croûtes** (structurales et sédimentaires), la hauteur seuil à franchir dans le sens de la pente, et des densités de **fentes** et de **trous** (Annexe VI)

➢ Compaction du sol et propriétés hydrodynamiques

Les prélèvements d'échantillons de sol pour les mesures de la **masse volumique apparente (Da)** sont effectués à l'aide de trois cylindres de 100 cm^3 sur deux profondeurs (0-5 cm et 15-20cm). Les échantillons sont d'abord pesés (masse humide) puis passés à l'étuve à 105 °C pendant 24 h. Après séchage les échantillons sont à nouveau pesés pour la détermination de la masse sèche. Les formules ci-dessous sont appliquées pour calculer la Da et la teneur en eau volumique (SWCi).

$$Da\ (g/cm3) = \frac{masse\ sèche\ (g)}{volume\ cylindre\ (cm3)}$$

$$SWCi\ (cm3/cm3) = Da * \frac{masse\ humide\ -\ masse\ sèche}{masse\ sèche}$$

Les tests d'infiltration ont été réalisés in situ en utilisant la méthode Beerkan (infiltromètre à simple anneau). Elle consiste à enfoncer un anneau (10 cm de diamètre) à environ 2 cm d'une surface de sol plane de préférence. Un volume V de 85 ml (équivalent à 10 mm de de hauteur d'eau dans le cylindre) est ensuite versé dans l'anneau, le temps d'infiltration est chronométré et l'opération est réitérée jusqu'à l'obtention d'un temps d'infiltration stable (stead state). Deux à trois tests sont réalisés par motif. La courbe d'infiltration obtenue permet de déterminer une infiltrabilité finale qui peut être utilisé ensuite pour estimer la conductivité à saturation Ks. Il existe différentes équations dans la littérature pour cette estimation de Ks (Reynolds and Elrick 1990; Elrick et al. 1995; Wu and Pan 1997). Elles ont toutes pour but de corriger l'infiltrabilité finale observée pour les effets 3D du cône d'humectation liée à l'utilisation d'un anneau qui augmente l'infiltration par rapport à une pluie naturelle qui crée un front d'humectation. Les corrections prennent en compte notamment la texture du sol (effet capillarité) et la géométrie de l'anneau. Nous avons choisi d'utiliser l'équation proposée par (Wu and Pan 1997) car l'étude de (Winterer 2011) avait montré qu'elle donne des résultats plus stables contrairement à certaines méthodes qui mènent parfois à des valeurs de Ks négatives (Winterer, 2011). Il est bien de noter que les Ks obtenues à l'issu de la méthode Beerkan sont des valeurs maximales d'infiltration et ne reflètent pas la réalité sous condition de pluie naturelle mais nous les utilisons pour comparer les motifs et les modalités à travers une analyse de la variance. Nous avons calculé la sorptivité (S) en se basant de l'équation de (Philip 1957).

2.4.Traitement des données

Pour les analyses de comparaisons statistiques entre modalité et/ou motif, il est d'abord réalisé le test de normalité de la variable expliquée (Y) au moyen du Test **Shapiro Wilk**. Si la normalité est confirmée (p-value >0,05) nous réalisons le **Test de Fisher** pour comparer les différentes modalités et lorsque la différence entre modalité existe (p-value >0,05), nous réalisons le **Test Student** pour comparer les motifs d'une même modalité. A contrario si la normalité de la variable expliquée n'est pas confirmée (p-value <0,05) nous appliquons les Tests de **Kruskal-Wallis** et de **Wilcoxon** respectivement pour les différentes modalités et motifs.

- Relation états de surface, techniques viticoles et facteurs climatiques

Dans un premier temps les relations entre les variables d'état du sol sont explorées par des tests de corrélation. Une classification ascendante hiérarchique (CAH) est aussi réalisée sur les variables d'état de surface pour définir une typologie d'états de surface et in fine les types de surface de la parcelle. Cette classification devra aussi nous permettre d'identifier les caractéristiques des états de surface initiaux et finaux de chaque motif et de dégager les modalités ayant tendance à se dégrader plus rapidement.

L'évolution des paramètres EDS est suivie en fonction des variables de pluie comme le cumul pluie entre date de travail du sol (CPDT). Afin d'avoir une information synthétique sur le motif nous avons calculé le pourcentage de fermeture de la surface (PFS) selon la méthode *Sabir (2004*). Le PFS est le pourcentage total de croûte de battance et de mottes, de cailloux et résidus scellés observé sur la micro-parcelle.

- Choix des paramètres d'intérêt

Un modèle linéaire généralisé (GLM) est utilisé pour ajuster les modèles. La procédure descendante a servi à la sélection de variables. Elle consiste, par itération, à ajuster un premier modèle avec toutes les variables explicatives puis à éliminer progressivement du modèle le paramètre ou le facteur le moins significatif (p-value> 0,05) et jusqu'à obtenir un modèle final présentant un Critère d'Information d'Akaike (AIC) plus faible. Nous vérifions la validité du modèle par l'analyse de la normalité des résidus studentisés. L'ensemble des tests statistiques sont réalisés avec le logiciel R version 3.4.3.

3. Résultats

3.1. Résultats des Campagnes 2016 : 2018

3.1.1. Caractéristiques des événements pluvieux

Site de Wintzenheim

Les cumuls des averses survenues sur le site de Wintzenheim durant les périodes de suivi sont proches des normales climatiques (460 mm) excepté 2017, qui enregistre un déficit de 90,6 mm (Annexe VII). Une variabilité interannuelle des événements en nombre et en volume est notée. Le plus grand nombre d'événements est obtenu en 2016 (442 événements) avec un cumul de 442 mm. Les intensités moyennes sur les périodes de suivi sont faibles (< 10 mm/h).

La Figure 8 montre par jour les intensités moyennes et la hauteur des événements pluvieux. La majorité des événements ont une hauteur de pluie inférieure à 15 mm avec des max pouvant atteindre les 30 mm. Les intensités de ces événements sont aussi majoritairement faibles (<10 mm/h). Par ailleurs, trois événements particuliers (06/06/2017 ; 30/10/2017 ; 23/08/2018) sont observés sur les trois années de suivi. Ces événements ont des intensités moyennes > 30 mm/h. Les années présentent une variabilité d'événements intéressants pour étudier l'effet de l'intensité de pluie sur la dynamique des états de surface et sur le ruissellement.

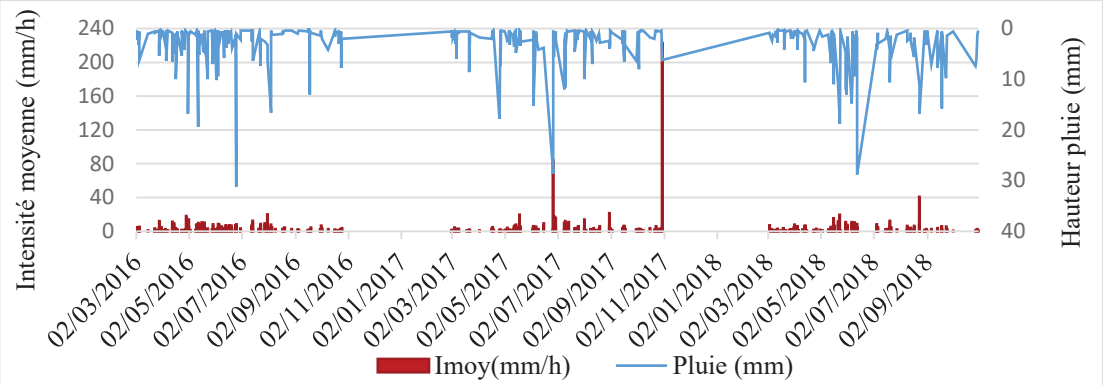


Figure 8 : Les intensités moyennes et hauteurs de pluie des événements survenus sur les périodes de suivi (2016 – 2018) à Wintzenheim

Site de Rouffach

Les cumuls pluviométriques enregistrés à Rouffach entre le 01 mars et 31 octobre 2015 et 2016 sont respectivement de 428,6mm et 413,8mm (Annexe VIII). Ces hauteurs de pluies sont conformes aux moyennes sur cette période (460mm). Comme à Wintzenheim, les intensités moyennes sur les périodes de suivi sont faibles, environ 3 à 4 mm/h. Derrière ces moyennes se cachent une variabilité des événements.

Les hauteurs de pluie des événements sont comprises entre 3 et 55 mm et leurs intensités de 1,3 à 42 mm/h (Figure 9). Mais la majorité des événements ont des intensités <10 mm/h. Deux événements particuliers sont à signaler : 20 /07/2015 et 13 /09/2015. Ces deux événements ont des intensités moyennes > 30 mm/h et une lame précipitée > 15 mm.

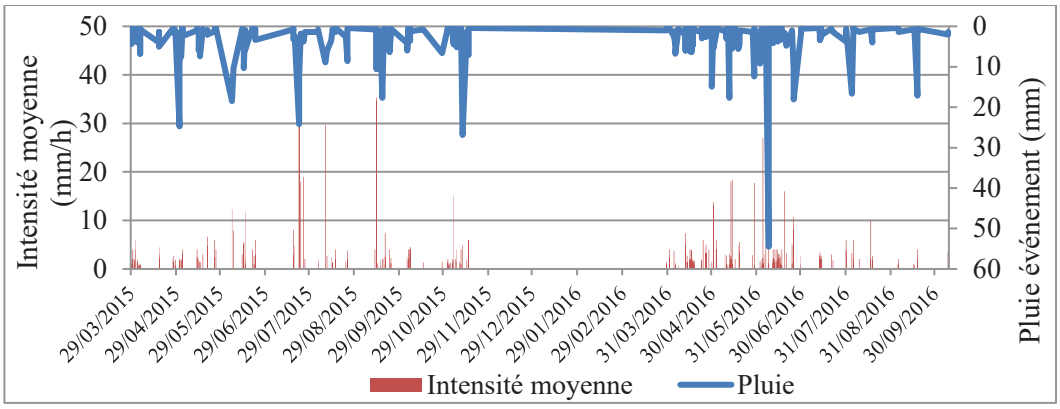


Figure 9 : Les intensités moyennes et lame d'eau journalière des événements pluvieux survenus sur les périodes de suivi (2015 – 2016) à Rouffach

3.1.2. Dynamique des états de surface (EDS) sous différentes techniques viticoles

Cette section ne concerne que les états de surface du site de Wintzenheim de 2016 à 2018. Son objectif est de comparer la dynamique des EDS sous les quatre modalités et répondre à deux de nos questions d'étude :

- Existe-t-il des différences d'EDS entre motifs. Si oui, ces différences correspondent elles à des différences de techniques viticoles ?
- Quels motifs/modalités se dégrade le moins ?

Deux approches complémentaires ont été mobilisées pour répondre à ces questions. La première est une classification ascendante hiérarchique (CAH) qui définit les différents types d'EDS. Les caractéristiques des groupes obtenus permettent de déterminer les EDS initiaux (moins dégradés avec plus de mottes) et finaux (plus dégradés avec plus de croutes de battance et moins de mottes)**.** La seconde approche repose sur une observation de l'évolution des EDS en fonction de cinq cumuls de pluie entre date de travail du sol (CPDT<10 mm ; CPDT< 40 mm ; CPDT <90 mm ; CPDT <180 mm et CPDT>180 mm).

Typologie des états de surface : des différences marquées entre techniques viticole

La classification ascendante hiérarchique utilisée est basée sur la méthode Ward pour l'agrégation et la méthode euclidienne pour la distance entre individus. Le dendrogramme de la fonction « HCPC » suggère de regrouper les états de surface en trois groupes (Figure 10). Mais en regardant de plus près le diagramme de gain d'inertie, nous avons plutôt opté pour une classification en quatre groupes.

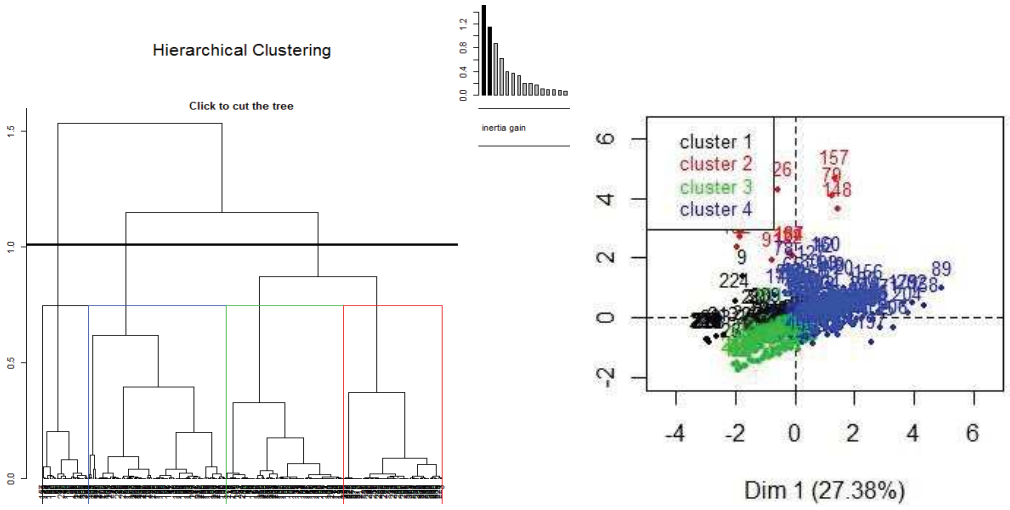


Figure 10 : *Classification ascendante hiérarchique fournie par la fonction HCPC*

Le groupe 1 comprend 58 individus (*Annexe IX*) et se caractérise par (Tableau 5):

- Une forte couverture par résidus (53 %) avec un écart-type égal à 26 %
- Un faible taux de végétation (8 %)
- Une présence faible de croûte structurale (36 %)
- Une absence totale de croûte sédimentaire.

Ce groupe est composé presque que d'individus des modalités RES2 et BIO (57 individus ; *Annexe IX*). Ces individus se localisent aussi bien dans les cavaillons (24) que dans les inter-rangs travaillés (19) et enherbés (14).

Le groupe 2 est le plus homogène en termes de composition. Il regroupe 26 individus issus des différentes modalités et motifs dans des proportions quasi égales, sauf l'inter-rang enherbé (*Annexe IX*). Ces surfaces se distinguent par :

- Une couverture importante des mottes (29 % total mottes)
- Une très faible couverture de la végétation vivante et de résidus (<10 %)
- Un plus faible taux de développement de croûte structurale (16 %)

Le groupe 3 est constitué de 63 individus qui se caractérisent par :

- Une forte couverture végétale (61 % ; écart-type =20 %)
- Une très faible couverture par les résidus (4 %)
- Une absence de croûte sédimentaire

Les surfaces qui composent ce groupe proviennent essentiellement des modalités BIO, PI et RES1 (54/63) et sont majoritairement des inter-rangs travaillés et enherbés (*Annexe IX*).

Le groupe 4 regroupe le plus grand nombre d'individus (129) dont 70 % sont issus des modalités PI et RES1 (Tableau 5). La modalité RES2 présente peu d'individus (19) dans ce groupe. Les individus de ce groupe présentent des surfaces marquées par :

- Un fort développement de croûte structurale (73 %)
- Une présence de croûte sédimentaire

Tableau 5 : Les caractéristiques des états de surface des différents groupes de la CAH, méthode Ward

Variables		Groupe 1 (%)	Groupe 2 (%)	Groupe 3 (%)	Groupe 4 (%)
Mottes diam<2cm	Moyenne	0,8	**9,8**	0,0	0,8
	Ecart-type	2,4	**4,2**	0,3	1,4
Mottes diam>2cm	Moyenne	0,2	**19,7**	0,2	1,8
	Ecart-type	0,7	**10,7**	1,1	3,2
Cailloux diam<2cm	Moyenne	1,2	-	1,6	3,3
	Ecart-type	0,9	-	1,1	2,0
Cailloux diam>2cm	Moyenne	0,1	-	0,2	1,0
	Ecart-type	0,3	-	0,5	1,0
Croûte structurale	Moyenne	36,4	15,9	31,8	**73,5**
	Ecart-type	24,0	22,2	20,4	**15,8**
Croûte sédimentaire	Moyenne	-	-	-	**1,0**
	Ecart-type	-	-	-	**2,8**
couverture végétale	Moyenne	7,8	4,9	**61,1**	12,6
	Ecart-type	9,9	7,9	**20,0**	11,2
Couverture résidus	Moyenne	**53,0**	-	4,5	4,7
	Ecart-type	**26,2**	-	8,4	8,0
Nombre d'individus	N	58	26	63	129

Le groupe 2 est commun à toutes les modalités. Il présente une répartition quasi égale des individus par modalité. La forte couverture en mottes qui caractérise ce groupe le rapproche des états initiaux des surfaces travaillées. En effet, à l'exception des inter-rangs enherbés, les autres motifs sont régulièrement travaillés pour contrôler le développement des adventices. La présence d'individus de l'inter-rang enherbé dans ce groupe est à mettre en relation avec les opérations d'enherbement. Pendant la phase de semis, l'inter-rang subi au préalable une préparation du sol avant le passage du semoir. L'utilisation du chisel pour effectuer cette opération explique la présence de mottes sur ce motif. En plus en 2016, les inter-rangs de toutes les modalités ont été systématiquement travaillés.

Le fort taux de couverture végétale des cavaillons et des inter-rangs du groupe 3 et l'apparition de croûte sédimentaire sur la surface des individus du groupe 4 montrent qu'il existe deux formes d'état final, une dégradée (groupe 4) et une autre non-dégradée (groupe 3) car protégée par la végétation et les résidus. Cet état final explique le nombre important

d'individus des inter-rangs travaillés (23) dans ce groupe. Le développement de la végétation spontanée dans les inter-rangs travaillés et les cavaillons est à considérer dans l'indicateur. On notera que dans les vignes, contrairement aux cultures annuelles, il se développe de la végétation sur les surfaces travaillées. Il n'y a donc pas vraiment de **surfaces nues tel que considérées dans l'IDR**. Par ailleurs, le nombre important de surfaces dégradées de PI et de RES1 laisse présager un effet positif des copeaux de bois apportés sur BIO et RES2.

Le groupe 1 est particulier car faisant ressortir une technique culturale spécifique aux modalités BIO et RES2 : l'apport de plaquettes de bois forestier. Les résidus sont épandus au départ sur les cavaillons de ces modalités. A force de travailler les cavaillons (buttage et décavaillonnage), les résidus se retrouvent progressivement dans les inter-rangs connexes. C'est la raison pour laquelle on retrouve certains individus des inter-rangs dans ce groupe.

Cette première étude de la dynamique des états de surface distingue bien deux types de pratique viticole sur le site expérimental de Wintzenheim : le paillage et non-paillage. A partir de cette distinction, nous avons vu clairement que le non-paillage présente un plus haut aléa ruissellement car étant plus dégradée.

Cette approche de caractérisation des EDS par CAH présente quelques cas particuliers. Par exemple, des individus appartenant au cavaillon de RES2 sont classés dans le groupe des surfaces dégradées (groupe 4). Ceci semble difficile à comprendre puisque ces cavaillons ont été entièrement recouverts par des résidus et ont été travaillés qu'à trois reprises depuis le 24/06/2016, date d'épandage. En plus, cette méthode basée sur la classification ne permet pas d'expliquer l'évolution des états de surface. Les analyses de covariances et les tests de corrélation avec les facteurs climatiques sont bien adaptés à cet exercice.

Effet des résidus sur la protection de la surface

Une dégradation progressive de la surface est observée avec le cumul de pluie depuis le travail du sol. Cette dégradation dépend du motif (cavaillon ou inter-rang) et de la modalité (Annexe XI : Evolution des EDS en fonction du CPDT et par année (Cav = cavaillon ; IRH =inter-rang enherbé ; IRW =inter-rang travaillé).

A l'état initial (CPDT< 10 mm), les cavaillons (Cav) des modalités PI et RES1 se caractérisent par une couverture relativement importante (25 %) en mottes de diamètre supérieur à 20 mm et une très faible couverture (< 5%) en mottes de diamètre inférieur à 20 mm. A l'inverse, les cavaillons de la modalité BIO et RES2, excepté 2018, présentent des états initiaux avec de très faibles couvertures de mottes (< 5 %) (Annexe XI). La couverture importante en mottes fines en 2018 dans les cavaillons des quatre modalités serait liée au

changement d'outil de travail. En effet, en 2018, les cavaillons ont été travaillés au moyen d'une « **patte d'oie** » et d'une « **rasette** » en remplacement d'un « **intercept planet** » habituellement utilisé. Le passage de la rasette dans les cavaillons après celui de la patte d'oie conduit à détruire les mottes issues de la scarification de la terre par la patte d'oie. Ce qui se traduit par une forte présence de mottes de diam < 20 mm.

Les couvertures initiales en mottes des inter-rangs travaillés (IRW) sont quasiment les mêmes pour toutes les modalités, environ 5 % pour les deux types mottes. Cette similitude en couverture initiale des mottes s'explique par l'uniformité des dates et de l'outil de travail du sol (herse rotative, voir Tableau 4).

La succession des événements pluvieux entraine une diminution de la couverture en mottes et d'une dégradation progressive de la surface marquée par l'extension des croûtes de battance. Les IRW et Cav de RES1 et PI sont des surfaces sensibles au développement de croûtes sédimentaires. Sur ces deux modalités, les croûtes sédimentaires apparaissent même pour des CPDT < 40 mm alors que sur les motifs de la modalité RES2, elles s'observent après un CPDT > 40 mm. L'extension des croûtes sédimentaires s'accompagne concomitamment d'une baisse de la couverture végétale (Annexe XI). Par ailleurs, on note une absence de croûtes sédimentaires dans les Cav de RES2 et les IRW et IRH de BIO. Ces observations mettent en exergue l'effet bénéfique de la végétation vivante et des copeaux de bois sur la protection de la surface du sol.

Les tests de corrélation (méthode Spearman) illustrés à la Figure 11 confirment ces relations entre variables d'état de surface et facteurs climatiques. En effet, l'extension des croûtes (crout.struct et crout.sedi) est négativement corrélée à la couverture en mottes (mot.2mm ; mot.2cm) et en résidus (couv.residus). A l'inverse, elle est positivement corrélée à la fermeture de la surface (surf.ferme) et aux variables de pluie comme l'intensité moyenne des événements (Imoy), la durée des événements (somme.duree) et le CPDT. Ces tests révèlent que la forte présence de cailloux (cail.2mm ; cail.2cm) à la surface est un signe de dégradation structurale. En effet après la pluie, la terre fine est emportée par le ruissellement laissant sur place les cailloux. Les corrélations négatives sont aussi observées entre la couverture en mottes et les facteurs climatiques tels que l'intensité moyenne des événements et le CPDT. Cependant, les corrélations négatives entre la couverture par la végétation vivante, la couverture par les mottes et par les résidus se justifient par le fait que le développement de la végétation tend à recouvrir la surface y compris les résidus et les mottes. La couverture en dessous de la végétation n'a pas été prise en compte dans notre étude car pas visible sur les photos.

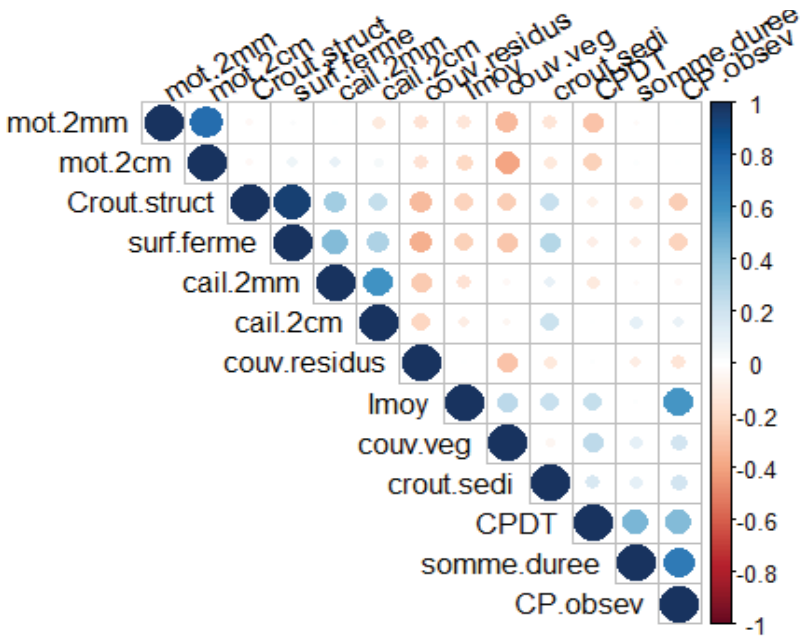


Figure 11 : Test de corrélation entre les variables d'état de surface méthode de Spearman

La CAH et les analyses graphiques des états de surface révèlent une influence du type de motif sur la trajectoire des états de surface. Le travail mécanique du sol présenterait le plus haut risque au ruissellement comparé à l'enherbement, fortiori, au paillage (résidus). Ce qui est conforme à la littérature (Blavet et al. 2004; Prosdocimi et al. 2016b; Keesstra et al. 2019). D'autre part, elles semblent montrer que le comportement (évolution) des états de surface est fonction du cumul de pluie. Le test de corrélation a lui confirmé l'effet protecteur de la surface par les résidus.

Sur la base de ces résultats, nous avons établi un modèle d'évolution pour chaque variable d'états de surface. Ainsi vu la distribution des variables (Annexe X) nous avons utilisé le modèle linéaire généralisé (GLM) de poisson (Log-linéaire) pour tester si l'évolution des variables d'états de surface dépendait du motif et/ou de la modalité. Les tests montrent que la dynamique des états de surface dépend effectivement du motif et de la modalité (p-value<0,05, Annexe XV).

Les comparaisons inter-motifs montrent que les cavaillons ont des états de surface très différents de ceux des inter-rangs. Cependant, il y a très peu de différence d'EDS entre les inter-rangs enherbés et travaillés. Ces inter-rangs se différencient que par le taux de couverte végétale, plus élevé dans l'inter-rang enherbé. En plus, il existe une variabilité temporelle significative des EDS pour un même type de motif. Mais les EDS des motifs de BIO et de RES2 sont relativement proches.

3.1.3. Effet des modes de conduite sur le ruissellement.

Ruissellement sur le site de Wintzenheim

Les modalités PI et BIO ont plus ruisselé en 2016. Leur lame d'eau cumulée sur la période de suivi est respectivement de 3,9 mm et de 2,7 mm contre 1,2mm pour RES2 et RES1 (Figure 12). En revanche les cumuls de ruissellement les plus important en 2017 et 2018 sont observés sur PI et RES1. Leur cumul de ruissellement en 2018 est 3 à 8 fois plus importants que celui de 2016. Mais les comparaisons des moyennes statistiques effectuées avec le test de Kruskal–Wallis n'indiquent pas de différences significatives des réponses hydrologiques entre modalités (p.chisq = 0,11), bien qu'en tendance PI et RES1 soient plus ruisselantes lorsque les intensités de pluie deviennent importantes.

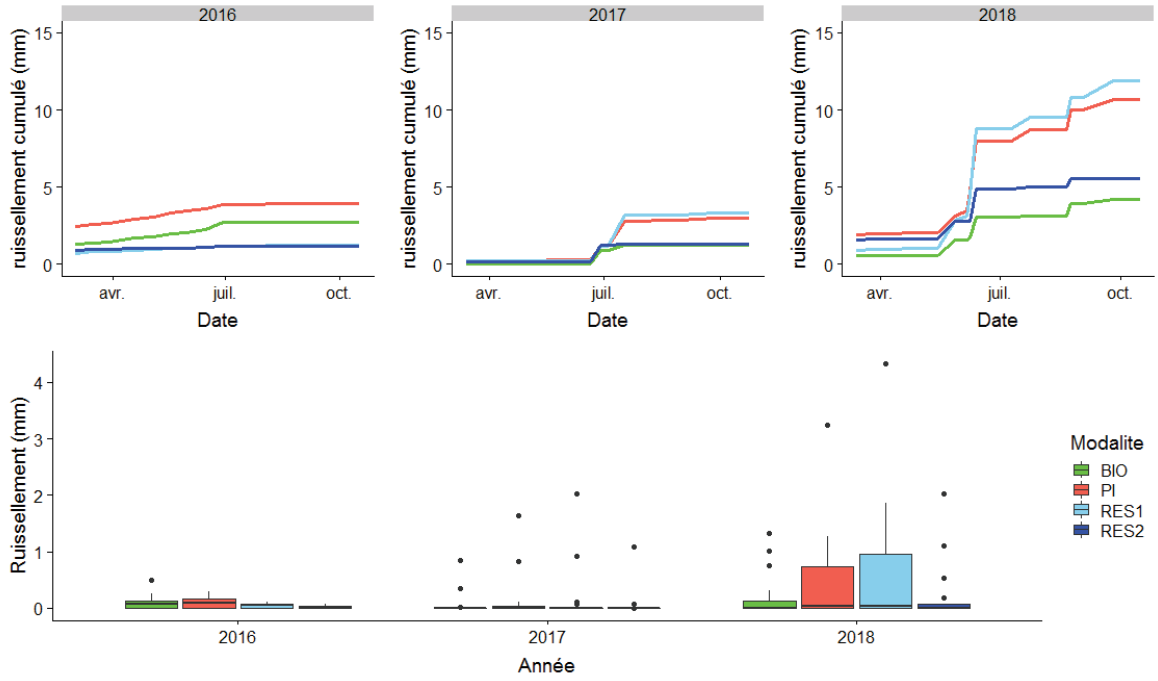


Figure 12 : Le ruissellement cumulé (en haut) et distribution de la lame ruisselée (en bas par modalité en fonction des années

Ruissellement sur le site de Rouffach

Contre toute attente, le site de Rouffach a très peu ruisselé. Les cumuls sur les deux périodes de suivi sont inférieurs à 1 mm quel que soit la modalité. Par ailleurs, la modalité classique est plus ruisselante. Le cumul de ruissellement de cette modalité en 2015 et 2016 est respectivement de 0,9 mm et 0,13 mm (Annexe XII).

3.1.4. Rôles des EDS et des facteurs climatiques sur genèse du ruissellement

Les mesures de ruissellement sont réalisées sur une surface de 68 m² (10 m *6,8 m) de chaque modalité. Les 6,8 m correspondent à la largeur de 4 inter-rangs (4*1,2 m) et de 5 cavaillons (5 * 0,4 m). Les résultats de la description des EDS vus dans la section 3.1.2. ont été rapportés à la surface totale par agrégation des pourcentages de chaque variable d'EDS proportionnellement à la surface du motif. Ce sont ces données de conversion qui sont utilisées pour analyser l'effet des EDS sur le ruissellement.

La distribution des volumes ruisselés en fonction des EDS et des facteurs climatiques (Figure 13**)** montre que le ruissellement augmente avec l'intensité moyenne, la hauteur des événements pluvieux et l'extension de croûtes sédimentaires. Les intensités moyennes (entre deux dates de mesure du ruissellement) potentiellement ruisselantes sont supérieures ou égale 3 mm/h. Pour le cumul de pluie on note deux phases de ruissellement. La première est plus précoce et intervient pour des cumuls de pluie inférieurs à 15mm. Ces ruissellements se produisent probablement sur les traces de roue. La seconde phase est une généralisation du ruissellement sur tous les motifs de la modalité PI, RES1 et BIO pour des hauteurs de pluie supérieures à 30 mm. Dans la modalité RES2 c'est plutôt une hauteur de 50 mm qui entraine du ruissellement. Ce dernier résultat peut s'expliquer par la forte couverture en résidus qui caractérise cette modalité, environ 30 à 40 % surface encore couverte par les résidus.

En Revanche, on observe une diminution des volumes ruisselés avec l'augmentation de la couverture végétale et surtout des résidus. En effet, le ruissellement est considérablement réduit au-delà d'une couverture de 20 % de la surface par résidus. Ce résultat est similaire à celui de *Armand (2009*) qui souligne, en contexte de grandes cultures, qu'une couverture de 30 % par les résidus permettrait de réduire le ruissellement .

En plus des résidus, on note une diminution du ruissellement lorsque le surface présente une couverture de plus de 6 % en mottes de diamètre supérieur à 2 cm. Ce qui veut dire en claire que le travail grossier du sol permet de limiter temporairement le ruissellement.

Ces relations entre variables d'EDS, facteurs climatiques et ruissellement sont aussi observées sur le site de Rouffach. Les résultats graphiques sont mis en Annexe XIII**.** La particularité sur ce site est qu'une couverture de 40 % de surface couverte par la végétation contribue à réduire considérablement le ruissellement. Ce qui permet de justifier les plus faibles volumes enregistrés sur de la modalité pied à pied. Car cette modalité à plus de surfaces couvertes et les inter-rangs enherbés sont plus larges. On peut donc dire que la largeur de la bande enherbée à un effet sur ruissellement.

Le taux de fermeture de la surface semble être un indicateur intéressant pour l'évaluer l'aptitude d'une surface à ruisseler. En Annexe XIV, est représenté l'évolution du ruissellement de la pluie et du taux de fermeture de la surface en fonction du temps pour chaque modalité. Sur ces graphiques, on remarque que le ruissellement est souvent enregistré après une fermeture de 40 % de la surface.

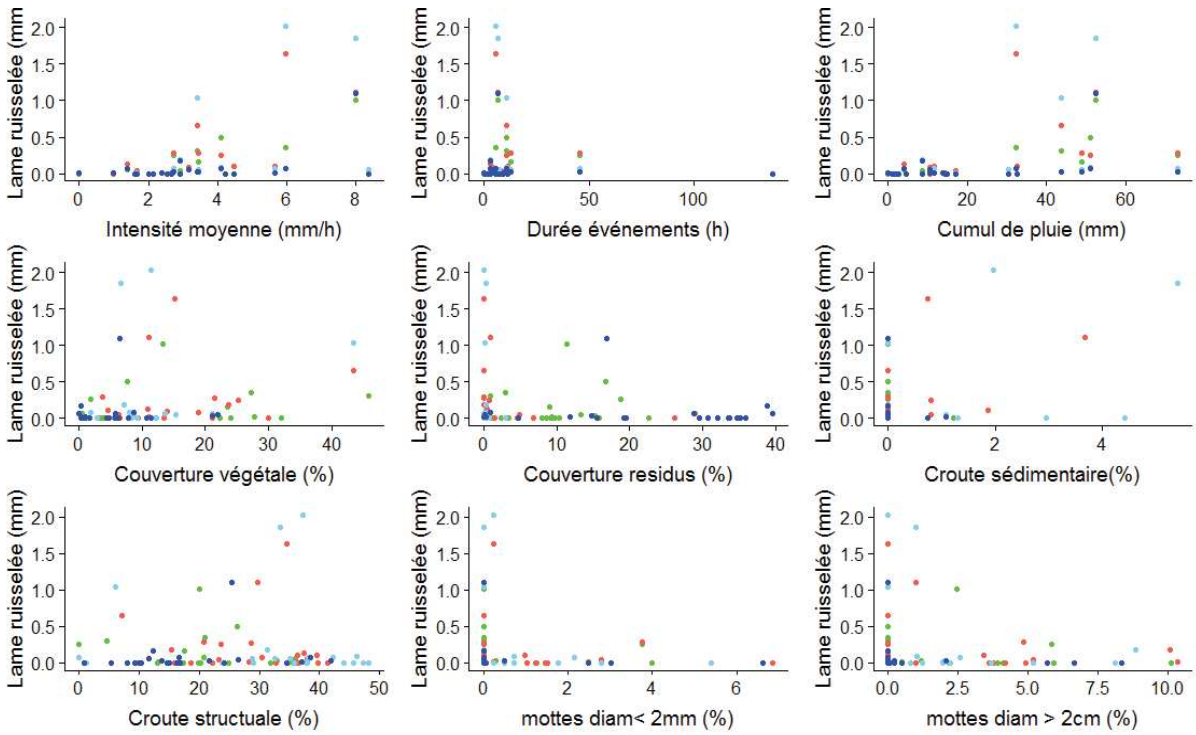


Figure 13 : Distribution du ruissellement en fonction des EDS et les facteurs climatiques

Sélection des variables d'intérêt : site de Wintzenheim

Les résultats de l'ajustement du modèle de ruissellement par GLM indiquent que l'intensité moyenne des événements (Imoy.jour), l'extension de croutes sédimentaires (crout.sedi) et la couverture par la végétation (couv.veg) sont les variables qui expliquent à 48 % la déviance du ruissellement à Wintzenheim (Tableau 6).

Tableau 6 : Variables explicatives de la variabilité du ruissellement à Wintzenheim

	LR Chisq	Df	Pr(>Chisq)	AIC	Pseudo R^2
Imoy.jour	32,480	1	1,204e-08		
crout.sedi	12,037	1	0,0005216	37,7	0,48
couv.veg	12,415	1	0,0004258		

3.2. Résultats campagne 2019

La campagne de mesure 2019 est conduite pour (i) voir si les modalités et les motifs agraire ont des effets sur l'état structural ; et (ii) établir les liens entre les propriétés hydrologique (conductivité hydraulique à saturation, sorptivité) et les variables explicatives relatives aux états de surface (Da, couverture par les copeaux et végétation, surface fermée et humidité initiale du sol). La distribution des fréquences statistiques de la masse volumique apparente, la teneur en eau initiale sont considérées normales, la conductivité hydraulique et la sorptivité ont été transformées en log-normal.

3.2.1. Effets des systèmes de conduite sur l'état structural du sol

- *La masse volumique apparente (Da)*

Les masses volumiques apparentes (Da) moyennes des 20 premiers centimètres sont comprises entre 1,3 à 1,6 g/cm^3 (Figure 14). Les analyses de variance révèlent des différences significatives entre les modalités d'un part et entre les motifs d'autre part. Les modalités non-paillis (PI et RES1) ont globalement des valeurs de Da significativement (p-value = 0,008) plus élevée. Ces différences de Da entre modalités du site de Wintzenheim sont d'autant plus vraies en surface (0-5cm). En revanche, la modalité BIO est la moins tassée (1,4 g/cm^3) en profondeur (15 à 20 cm).

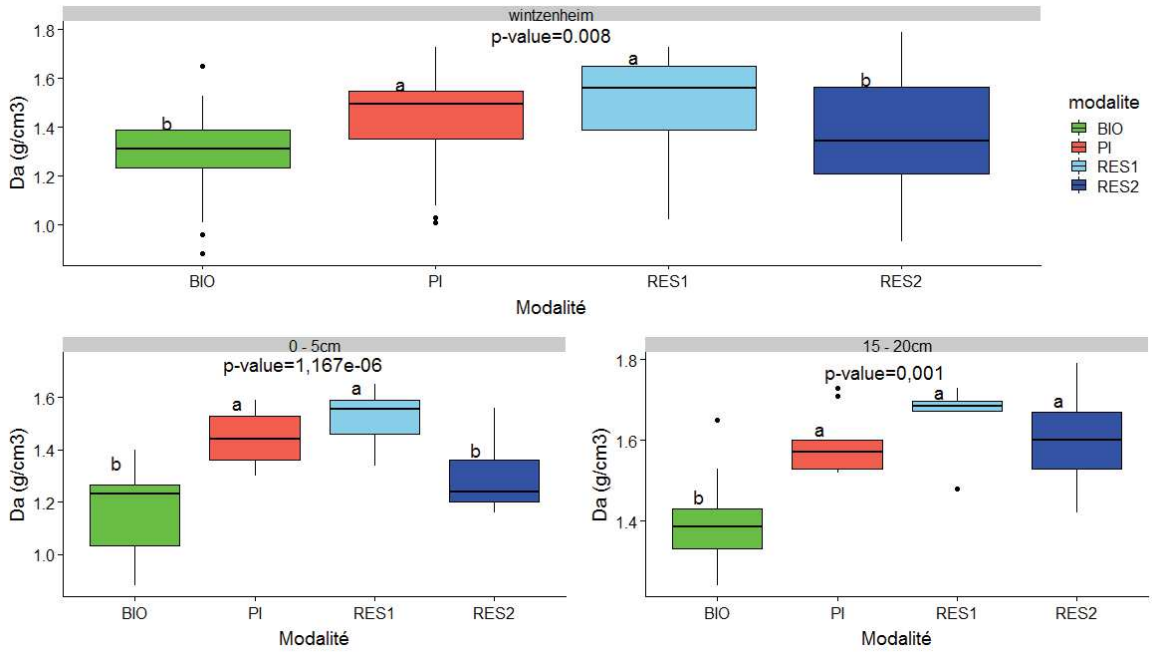


Figure 14 : Comparaison de la Da des différentes modalités du site Wintzenheim à différentes profondeurs du sol, en haut Da des 0-20 cm, en bas à gauche 0-5cm et bas à droite 15- 20 cm du sol

Les tests post hoc LSD (Least Significant Difference) de la Da sont présentés dans Tableau 7. Les différences entre un même type de motif sont signalées par des lettres minuscules en gras et entre les motifs d'une même modalité par des majuscules. On constate que la présence de résidus a un effet net sur la Da des couches superficielles (0-5cm). Dans les modalités paillis (BIO et RES2), les valeurs de Da les plus élevées (1,43 g/cm^3) sont enregistrées sur les inter-rangs enherbés (IRH) et les plus faibles (0,95 g/cm^3) sur les cavaillons. Dans les modalités non-paillis, les traces de roue (TR) présentent des valeurs de Da significativement plus élevées (1,59 g/cm^3) et les cavaillons les plus faibles (1,04 g/cm^3). Ces résultats renseignent deux choses. La première, plus classique, est que les horizons de surface des parties moins travaillées sont plus denses que celles régulièrement travaillées (Biddoccu et al. 2017b). La seconde est que le tassement du aux passages répétés de d'engins est plus important quand la surface n'est pas couverte par résidus ou par la végétation vivante.

Tableau 7 : Résultats des tests LSD de Da des motifs d'une même modalité (lettres Majuscules) et entre les motifs des différentes modalités (lettres minuscules)

Da : 0-5cm	BIO	PI	RES1	RES2
Cav	0,95 **b** C	1,03 **a** C	1,04 **a** C	0,97 **b** C
IRW	1,21 **b** B	1,37 **b** B	1,53 a AB	1,20 **b** B
IRH	1,26 **c** A	1,39 **b** B	1,51 **a** B	1,43 a**b** A
TR	1,24 **b** AB	1,55 **a** A	1,59 **a** A	1,21 **b** B

- *La conductivité hydraulique à saturation (Ks)*

Les modalités présentent une très grande variabilité de la Ks en surface. Les valeurs de Ks obtenues par la méthode Beerkan sur le site de Wintzenheim varient de 5 à 507 mm/h. Les valeurs les plus élevées sont enregistrés sous les cavaillons et les plus faibles dans les traces de roue. Les inter-rangs travaillés ont tendance à avoir des Ks plus élevées comparées aux inter-rangs enherbés (Tableau 8). Par ailleurs, les comparaisons des Ks moyenne par modalité illustré par la Figure 15, montrent que la conductivité hydraulique à saturation est 2 à 3 fois plus élevée dans les horizons surfaciques des modalités paillis que dans ceux non-paillis. En revanche, on ne note pas de différence significative de Ks entre les deux modalités paillis (RES2 : 253,80 mm/h ; BIO : 171,72mm/h) et pareillement, pas de différence significative entre les modalités non-paillis (RES1 : 128,72mm/h ; PI : 92,43mm/h). Le paillage semble améliorer la conductivité hydraulique de l'horizon de surface.

En plus, il existe une variabilité intra-motif (un même type de motif) très importante de la Ks. Excepté les traces qui ne présentent pas de différences significatives entre modalité, tous les autres motifs sont très hétérogènes. C'est-à-dire ont des valeurs moyennes de

conductivité hydraulique significativement différentes d'une modalité à l'autre. Ce qui signifie qu'on a un effet de la conduite sur la conductivité hydraulique à saturation. L'homogénéité relative des Ks dans les traces de roue peut s'expliquer par l'uniformité du matériel utilisé lors des interventions d'entretien du sol ou de traitements phytosanitaires.

Il est cas même important de noter si l'on compare les valeurs de Ks moyenne obtenues par motif aux valeurs d'intensité moyenne des événements, seules les traces de roue seraient susceptibles de ruisseler. Or les traces sédimentaires étaient observées sur les inter-rangs de la modalité PI (voir CAH). Des ajustements s'imposent sur ces valeurs de conductivité hydraulique à saturation avant de les utilisées dans l'estimation du ruissellement.

Tableau 8 : Résultats des tests LSD de Ks des motifs d'une même modalité (lettres Majuscules) et entre les motifs des différentes modalités (lettres minuscules en Gras)

0 – 5 cm	Motifs	BIO	PI	RES1	RES2
Ks (mm/h)	Cav	282,56 **b** A	120,30 **d** A	220,80 **c** A	415,37 **a** A
	IRW	207,50 **a** B	115,54 **c** B	66,46 **d** C	176,98 **b** B
	IRH	162,92 **b** C	80,58 **c** C	192,23 **a** B	162,92 **b** C
	TR	6,96 **a** C	13,79 **a** D	4,98 **a** D	7,56 **a** D

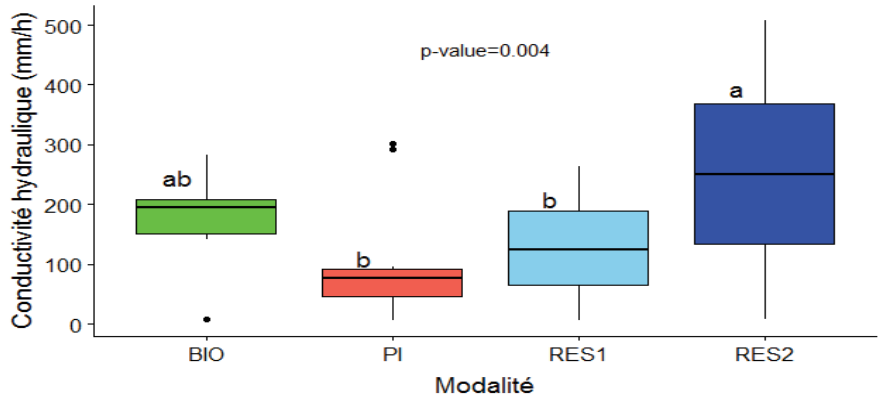


Figure 15: Comparaison de la conductivité hydraulique à saturation des différentes modalités du site de Wintzenheim

- *Teneur en eau initiale du sol (SWCi)*

En surface, les modalités n'ont pas des teneurs en eaux initiales (SWCi) significativement différentes. Mais les SWCi moyennes sont plus élevées dans la modalité BIO (0,25cm^3/ cm^3) que dans les modalités non-paillis PI (0,17 cm^3 /cm^3) et RES1 (0,18 cm^3/cm^3) (Figure 16). Ces différences de SWCi entre modalités sont peut-être liées à des différences de porosité et/ou de couverture végétale.

On observe aussi une variabilité des SWCi entre les motifs. Les traces de roue et les inter-rang enherbés présentent généralement des SWCi plus élevées que les cavaillons et les inter-rangs travaillés (Tableau 9). Ces différences entre motif étant significatives alors on peut dire que les surfaces les plus denses sont celles qui possèdent des SWCi plus élevées. Des résultats similaires ont été observés par (Biddoccu et al. 2013; Rodrigo Comino et al. 2016).

Tableau 9 : Résultats des tests LSD de SWCi des motifs d'une même modalité (lettres Majuscules) et entre les motifs des différentes modalités (lettres minuscules en Gras)

0 – 5 cm	Motifs	BIO	PI	RES1
SWCi (cm^3/ cm^3)	Cav	0,18 **a** C	0,12 **b** C	0,18 **a** B
	IRW	0,26 **a** B	0,20 **ab** B	0,17 **b** B
	IRH	0,25 **a** B	0,26 **a** A	0,20 **b** A
	TR	0,32 **a** A	0,25 **b** A	0,20 **c** A

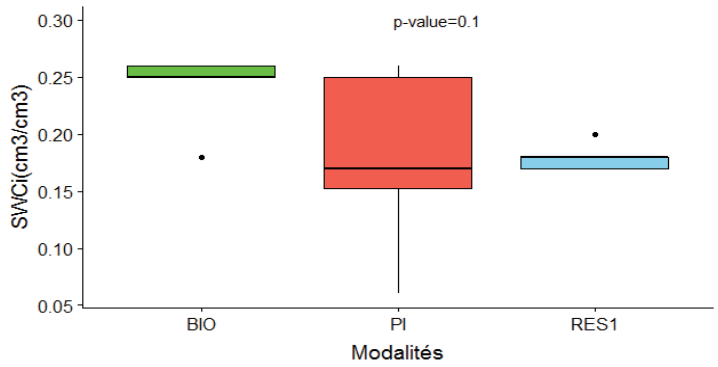


Figure 16 :Comparaison des teneurs en eau initiales entre modalités du site de Wintzenheim

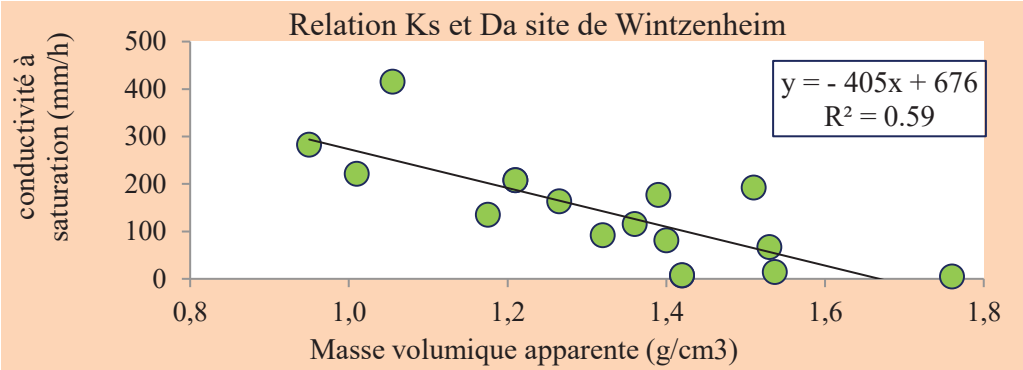
3.2.2. Les relations entre les propriétés hydrologiques et les états de surface

Les relations entre les propriétés hydrologiques et les états de surface sont explorées au travers un GLM pour savoir quels paramètres influencent de la conductivité hydraulique et la sorptivité. Quatre régressions dont deux par sites ont été effectuées. Les résultats de ces régressions sont indiqués dans le Tableau 10. Pour l'ensemble des sites, la masse volumique apparente est le paramètre d'état de surface le plus lié à la conductivité hydraulique et à la sorptivité. La masse volumique apparente est significativement corrélée (0,7) à conductivité hydraulique à saturation (site de Wintzenheim, Annexe XVI). Elle peut donc être utilisée pour estimer l'infiltrabilité. Cependant, sur le site Rouffach la relation entre la conductivité hydraulique à saturation et la masse volumique apparente nécessite la recherche d'autres facteurs pour améliorer la qualité prédictive du modèle. Ces facteurs peuvent être la teneur en matière organique, la stabilité structurale par exemple.

En ce qui concerne la sorptivité sur le site de Wintzenheim, la couverture par les résidus améliore la qualité du modèle d'estimation de la sorptivité. Cette variable est aussi significativement corrélée (0,5) à la sorptivité. L'effet des résidus est alors non négligeable sur sorptivité. Cet effet des résidus sur la sorptivité a été souligné par plusieurs auteurs (Shaver et al. 2013; Keesstra et al. 2019) qui estiment que l'accumulation de résidus dans le sol affecte indirectement la sorptivité via l'amélioration de la masse volumique apparente, de la porosité et in fine de l'infiltration.

Tableau 10 : Relations entre les propriétés hydrologiques et variable d'EDS dans les sites d'étude

	Wintzenheim		**Rouffach**	
	Variables	R^2	Variables	R^2
Ks	Da	0,59	Da	0,26
S	SWCi + Résidus + Da	0,46	SWCi +Da	0,9



Choix des variables déterminants du ruissellement

Le jeu de donnée utilisé dans cette analyse est constitué de deux dates d'observation des états de surface sur le site de Wintzenheim, donc comprend 32 observations (2*4 motifs *4 modalités). A chaque date correspond une mesure de ruissellement effectué après notre passage. Toutes les variables mesurées pendant cette campagne 2019 et les facteurs climatiques (intensité moyenne et lame cumulée sur 15 jours) ont été mises en relation avec les mesures de ruissellement. Toujours, le GLM est appliqué pour la sélection de variables.

Le modèle le plus parcimonieux indique une relation significative entre le ruissellement et 5 variables d'état de surface Annexe XVII). Il s'agit de la couverture végétale, de la couverture par les résidus, du développement de croûtes structurales et sédimentaires et taux de surface ouverte. Ces 5 variables expliquent à 90 % la variance du ruissellement sur le site Wintzenheim (

Tableau *11*).

Tableau 11 : Variables déterminantes du ruissellement sur le site de Wintzenheim

Ruissellement ~.	Pseudo R^2
Couverture végétale Couverture résidus Croûtes structurales Croûtes sédimentaires Surface ouverte	0,9

Conclusion sur l'étude Expérimentale

En conclusion de cette première partie de l'étude nous retiendrons que les états de surface influencent fortement les propriétés hydrologiques. La présence d'une couverture végétale et surtout des résidus à la surface accroissent la protection de la surface, améliorent la structure (la masse volumique apparente, la conductivité hydraulique et indirectement la sorptivité) de l'horizon de surface. Ce qui peut se traduire par une réduction considérable de la production du ruissellement sur ces surfaces. En effet, **une couverture de 20 % de la surface par les résidus** et/ou de **40 % par la végétation** permet de réduire significativement le ruissellement. En plus, les surfaces couvertes atténuent l'impact du tassement de la surface induit par le passage répété d'engins. Par ailleurs, une corrélation significative mais négative est observée entre la masse volumique apparente et la conductivité hydraulique à saturation de l'horizon de surface. Ce qui montre le lien fort entre les interventions d'entretien du sol et l'état structural. La masse volumique apparente peut donc être utilisée comme estimateur de la conductivité hydraulique. Ces paramètres sont variables dans l'espace. Sur le site de Wintzenheim comme de Rouffach, les motifs présentent des états structuraux significativement différents. Il faut donc les considérer séparément. Ainsi sur chaque modalité il y 'a lieu de considérer quatre motifs : **les deux inter-rangs, les cavaillons et les traces de roue.** Mais les dynamiques observées sur une trace de roue peuvent être généralisés sur toutes les autres surfaces marquées par des passages réguliers de tracteurs. Les dynamiques des états de surface à prendre en compte sur chacune de ces 3 surfaces (excepté les traces de roue) sont l'évolution de la **végétation semée** (inter-rangs enherbés), de la **végétation spontanée** (inter-rang travaillés et cavaillons), de la **couverture par les résidus** et les **mottes.** L'évolution de ces variables est liée aux interventions **(type de matériel utilisé**) et aux facteurs climatiques tels que l'intensité moyenne des événements et le cumul de pluie depuis le dernier travail du sol. Ces facteurs sont aussi déterminants dans la genèse du ruissellement. Car les cumuls de pluie de 35 mm suffisent à généraliser du ruissellement sur le site de Wintzenheim.

3.3. Mise au point du prototype IDR-Vigne

3.3.1. Les modifications apportées dans l'IDR

La conclusion partielle précédente a déjà tracé les contours des différentes modifications à apporter dans l'indicateur de la dynamique de ruissellement actuel. Ces modifications sont abordées en deux points :

(i) Choix des surfaces élémentaires

Nous avons vu que les motifs des différentes modalités présentaient des états structuraux très différents les uns des autres. Ces différences nous amènent à considérer que ces surfaces ont des comportements très différents vis-à-vis des précipitations. Les traces de roue ayant sensiblement les mêmes états, nous avons jugé nécessaire de partitionner la modalité en trois surfaces élémentaires. Pour rappel, les surfaces élémentaires sont définies ici comme des entités homogènes (de l'ordre du m²) supposées avoir les « mêmes » dynamiques d'état de surface quel que soit la période. Les trois surfaces élémentaires sont le **cavaillon, l'inter-rang travaillé** et **l'inter-rang enherbé.** Ces trois surfaces élémentaires se singularisent aussi par leur mode de gestion. Intégrer toutes ces spécificités, demande de reconfigurer profondément l'IDR. On ne considère plus qu'un itinéraire technique est appliqué sur la modalité mais au moins trois. A partir de cette nouvelle configuration nous renseignons la surface occupée par chaque motif sur la modalité et estimons la lame d'eau de base produite sur chaque surface. Ensuite est agrégé (sommation) les lames de base proportionnellement à la surface de chaque motif pour calculer la lame d'eau produite sur la modalité. En outre la liste de matériels d'entretien du sol existant et leurs effets sur propriétés physiques du sol ne correspondent pas aux types de matériels utilisés dans les vignes. Il fallut réactualiser la liste. Mais pour le moment seul le matériel utilisé sur le site Wintzenheim a pu être intégré.

(ii) Les nouveaux processus actifs approximés

Le développement de la végétation spontanée dans certaines surfaces élémentaires est un processus non encore estimé dans l'IDR. Cette végétation, constituée de plusieurs espèces, est caractéristique des inter-rangs travaillés. Sa prise en compte s'est faite en considérant qu'un semis de plusieurs espèces est réalisé après chaque opération d'entretien du sol. La croissance de ces espèces est ensuite calée avec les données obtenues à partir de l'interprétation des photos pour que leur dynamique ressemble à ce qui est observée.

La dégradation des résidus et leurs effets protecteurs de la surface, l'IDR a un module dédié aux calculs de la dégradation des résidus de culture et l'évolution de leur couverture du sol. Mais ce module ne semble pas adapté à l'estimation de la dégradation des copeaux de bois apportés sur le site de Wintzenheim. La vitesse de dégradation de ces copeaux de bois est très lente du fait du C/N très élevé et peuvent donc rester visibles sur la surface pendant quelques années encore (+3 ans). Nous avons donc utilisé une fonction sigmoïde pour estimer la dégradation de ces copeaux de bois. Cette fonction comprend deux phases, une première où la dégradation est active et une seconde avec une dégradation plus lente. Les paramètres du modèle ont été optimisés pour avoir une meilleure correspondance avec les données mesurées sur le terrain.

3.3.2. Premiers résultats de simulations

Les différents modules de IDR-Vigne configurés, nous allons chercher à voir si les processus actifs et d'état approximés sont bien pris en compte. Sans vouloir faire une évaluation des erreurs de prédiction des modèles (contraintes de temps), nous testons à juste titre la fonctionnalité des modules. Les résultats de simulations présentés dans cette section sont ceux de la modalité PI.

- *Couverture de la surface par les résidus de la végétation spontanée*

La simulation de la couverture par les résidus de la végétation spontanée est régulière. Cette couverture simulée varie de 7 à 50 % dans les inter-rangs travaillés et 0 à 80 % dans les inter-rang enherbés avec une couverture maximale intervenant après un travail du sol (Figure 17). On ne note pas de résidus dans les cavaillons car le développement de la végétation spontanée est considéré nul. Les valeurs simulées se trouvent dans la gamme de valeurs obtenues après interprétation des photos. La couverture maximale simulée dans les inter-rangs travaillés nous semble acceptable car le matériel d'entretien n'enfouie pas toute la végétation. La Figure 18 est une photo prise lors d'une intervention dans l'inter-rang travaillé. On peut y voir que la couverture laissée à la surface par l'outil est inférieure à 50 %.

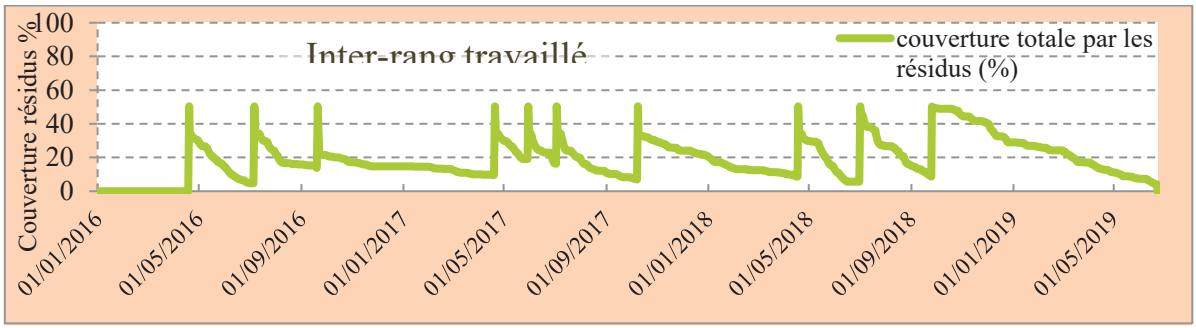


Figure 17 : Evolution de la couverture des résidus de la végétation spontanée simulés de l'inter-rang travaillé

Figure 18 : Photo montrant la couverture laissée après un travail mécanique du sol (29/05/2019)

- *Evolution de la rugosité aléatoire*

La rugosité aléatoire utilisée dans le calcul de la détention superficielle est simulée pour chaque surface élémentaire. Les oscillations sur la Figure 19 indiquent un travail mécanique du sol. La rugosité aléatoire simulée dans l'inter-rang travaillé est régulière et la rugosité créée à chaque date d'intervention est bien simulé. La gamme de variation des valeurs de la rugosité aléatoire créée par le matériel de travail du sol est bien respectée.

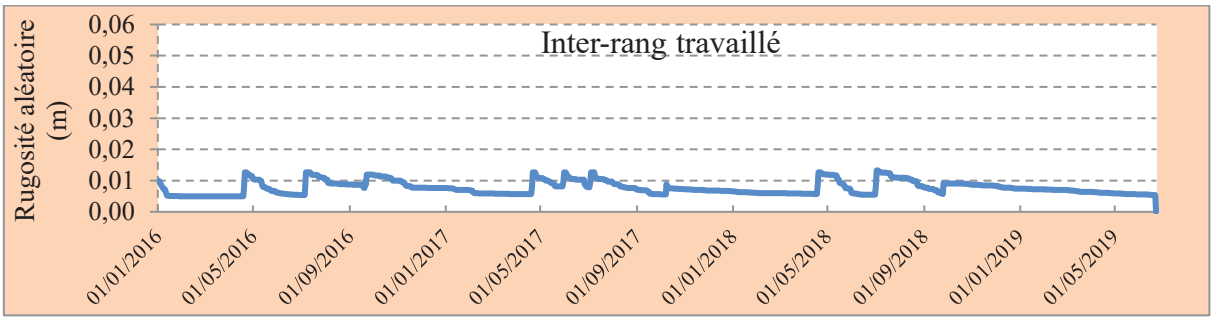


Figure 19 : Evolution de la rugosité aléatoire simulée dans l'inter-rang travaillé de PI

- *Evolution de la conductivité hydraulique à saturation*

Les valeurs de conductivité hydraulique à saturation reprennent bien la hiérarchie constatée dans la phase expérimentale, entre les différents motifs (plus élevés dans les cavaillons). Les valeurs simulées (40 à 150 mm/h) sont plus faibles que celles obtenues sur le terrain (80 à 415 mm/h). Ceci a été fait expressément pour que la conductivité hydraulique simulée reflète au mieux les conditions sous pluie naturelle (Figure 20). Mais en observant l'évolution des conductivités simulées par motif, on aperçoit que la courbe globale est très proche de celle des surfaces nues. Autrement dit la conductivité globale du motif est liée au pourcentage de surfaces nues qui le composent. Ceci peut permettre de prendre en compte l'effet des petits événements mais le risque de surestimation lors des grands événements sera important.

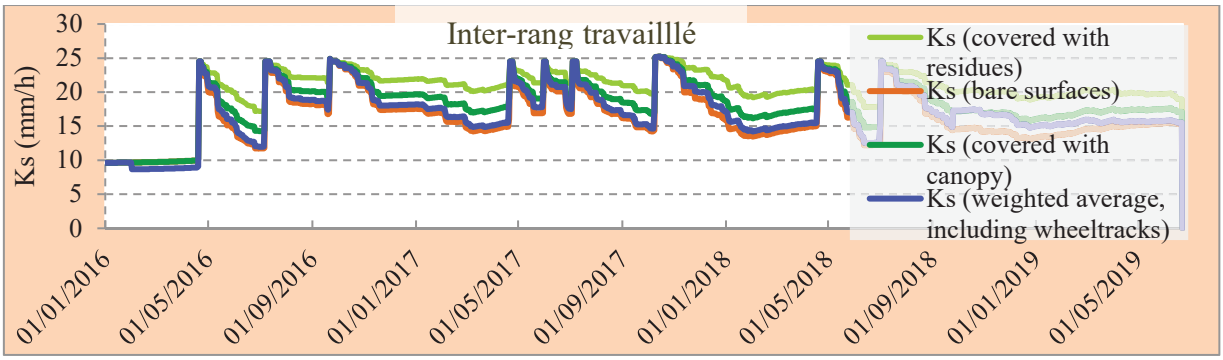


Figure 20 :Evolution de la conductivité hydraulique à saturation simulée des différentes surfaces de l'inter-rang travaillé

3.3.3. Les résultats de simulation du ruissellement sur la modalité PI

Le but de cette étude est bien de voir si après intégration des spécificités des vignes dans l'IDR on arrive à bien simuler le ruissellement observé sur chaque modalité. Les premiers de résultats de simulations du ruissellement sont illustrés par la Figure 21. Ces simulations ont été faites sur la modalité PI.

On constate que les périodes ruisselantes sont assez bien simulées, mais l'indicateur manque de sensibilité pour les petits événements et réagi trop fort aux événements pluvieux importants. Par exemple à l'événement particulier du 26/06/2017, le ruissellement simulé est triple de ce qui observé. Il convient de signaler que toute la lame ruisselée en cette date n'a pas été enregistrée du fait que les bacs ont débordé. Mais globalement l'indicateur surestime les volumes. Ceci pourrait être lié aux défauts signalés sur dans l'évolution de la conductivité. Il faut donc réajuster ces valeurs. En plus on note de petits décalages dans le temps. Mais ces décalages sont normaux car l'indicateur simule le ruissellement journalier tandis que le ruissellement observé est affiché à la date de mesure qui vient après l'événement ruisselant.

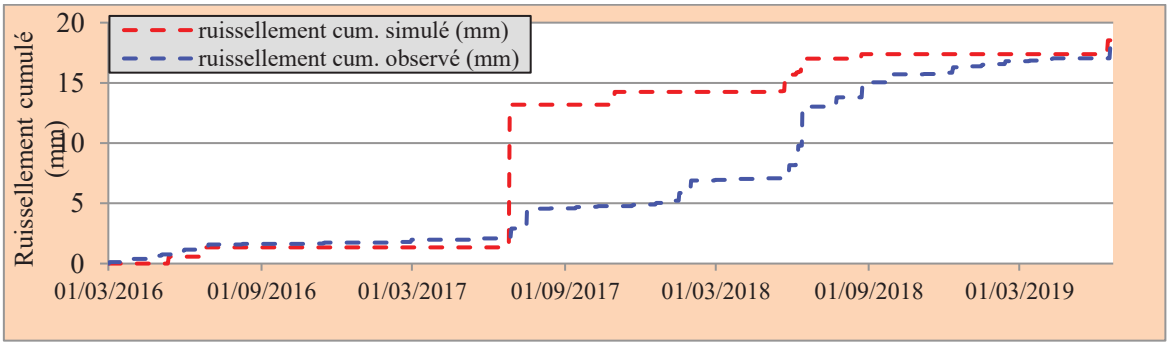


Figure 21 : Comparaison des cumuls de ruissellement simulés (en rouge) avec ceux observés (bleu) dans la modalité PI du site de Wintzenheim

4. Discussions générales

Les approches métrologiques appliquées dans cette étude nous ont permis d'une part de comprendre les liens qui existent entre les états de surface et le ruissellement et d'autre part de simuler le ruissellement à l'échelle de la parcelle de vigne. Il est important de discuter des résultats obtenus au vu des données, des hypothèses testées.

4.1. Dynamique des états de surface

4.1.1. Interprétation des photos

La méthode d'estimation des états de surface à partir d'une photo de micro-parcelles de dimension connue permet de déterminer, avec précision et sur de longues séries (2016 à 2018), l'évolution des croûtes sédimentaires et la couverture du sol par végétation vivante. Les données obtenues ont permis d'identifier ces deux variables comme variables explicatives du ruissellement. Ces deux variables et l'intensité moyenne des événements ont été responsables à 48 % de la variance des volumes ruisselés à Wintzenheim. Contrairement à nos attentes le modèle appliqué sur ce premier jeu de données, issu de l'interprétation des photos, a écarté la couverture par les résidus. Cela peut s'explique par la difficulté, sur certaines photos, à dissocier les surfaces nues des résidus. Dans ce cas nous avons considéré que c'est une surface nue. En outre, il était difficile d'estimer le taux de surface présentant des croûtes structurales et de mesurer la rugosité. Mais en se basant sur plusieurs publications (Peugeot et al. 1997; Vandervaere et al. 1997; Cerdan et al. 2002; Evrard et al. 2008) qui estiment que la généralisation des croûtes structurales est très rapide (10 à 20 mm de pluie) nous avons considéré que toutes les surfaces nues présentaient ces croûtes. Le calcul de cette variable a eu des répercussions sur la valeur du taux de surface fermée/ouverte. Ce qui peut expliquer en partie les corrélations moins nettes observées entre le ruissellement et notre paramètre synthétique (surface fermée/ouverte). En effet, les auteurs comme (Sabir et al. 2004; Bensalah et al. 2016; Cheggour et al. 2008) ont trouvé des corrélations significatives entre ce paramètre et la production du ruissellement et l'utilisent pour évaluer le risque de ruissellement.

4.1.2. Caractérisation des états de surface

La classification ascendante hiérarchique (CAH), technique souvent utilisée pour dresser une typologique des états de surface (Leonard and Andrieux 1998; Malet et al. 2003), a montré l'existence de deux types de pratiques viticoles qui se distinguent par leurs caractéristiques d'état de surface. Le critère fondamental de différenciation de ces pratiques était les résidus de copeaux de bois apportés sur les modalités BIO (en 2014) et RES2 (2016).

Ces résidus assurent la protection de la surface des impacts de pluie et limitent le développement des croûtes sédimentaires. En effet, les résidus dissipent l'énergie cinétique de goûtes de pluie et la quantité d'eau qui percole via les résidus arrive en douceur à la surface sans déformer la matrice poreuse du sol. Ce mécanisme assure sous peu la préservation du microrelief et augmente le temps de formation de croûte de battance (Findeling 2001). Ce qui est confirmé par l'analyse de l'évolution des états de surface en fonction du cumul de pluie après travail du sol (CPDT). Cette analyse a montré que les croûtes sédimentaires se développent plus rapidement sur les modalités n'ayant pas reçu les copeaux de bois. Les croûtes apparaissent pour CDPT inférieur à 40 mm alors qu'elles s'observent plus tard en présence de résidus (CPDT > 40 mm). Cependant, ces valeurs sont à relativiser puisque le fichier des itinéraires techniques mis à notre disposition n'indique pas clairement sur quel motif est réalisé l'intervention et à notre sens toutes les interventions n'ont pas été enregistrées. D'ailleurs ce qui fait que la courbe d'évolution de la couverture végétale en fonction du CPDT (Annexe XI) présente des irrégularités. Ceci a rendu un peu difficile le calage de la courbe de croissance de la végétation spontanée avec les données mesurées.

4.2. Effets des états de surface sur l'infiltration et le ruissellement

4.2.1. Effets sur les propriétés hydrologiques

Les analyses statistiques ont montré des effets significatifs de la modalité et du motif sur les propriétés hydrologiques de l'horizon de surface. Le paillage protège et améliore la structure et l'infiltrabité des horizons de surface. Ce qui est confirmé par la littérature (Shaver et al. 2013; Biddoccu et al. 2017b; Keesstra et al. 2019). Contrairement aux résultats de (Leonard and Andrieux 1998) dans les vignes du milieu méditerranéen, nous n'avons pas trouvé une relation significative entre la conductivité à saturation de la couche superficielle et la couverture par végétation à Wintzenheim. Ce sol à faible réserve utile retient peu d'eau dans sa matrice et empêche le développement d'une couche d'herbe et d'un mat racinaire dense correspondant. Souvent les densités de végétation spontanée dans les inter-rangs travaillés sont égales à celles des inter-rangs enherbés. Les densités d'herbe observées à Rouffach, avec un sol à texture plus limoneuse, sont beaucoup plus fortes et stables et influencent les paramètres comme la Ks (élevée dans l'inter-rang enherbé à Rouffach) et la sorptivité, contrairement à Wintzenheim. C'est donc le factor sol qui semble déterminant. En revanche, la présence des résidus de copeaux de bois a une influence considérable sur les propriétés hydrologiques et surtout sur la sorptivité des horizons de surface. Cette influence des résidus peut s'expliquer à deux niveaux. D'abord la nature poreuse des résidus en fait un réservoir susceptible d'absorber une partie de l'eau qui arrive à la surface. Ensuite enfouis

dans le sol, ces résidus de bois peuvent être décomposés par les agents biologiques (champignons) du sol et enrichi de facto le sol en matière organique. Ce qui contribue à la structuration du sol et l'amélioration de la conductivité et de la sorptivité. En plus, du fait que les résidus ont une faible surface de contact avec le sol leur couverture contribue à limiter l'évaporation et à mieux préserver l'humidité du sol. Globalement, la couverture de la surface par les résidus contribue à améliorer l'infiltration de l'horizon de surface.

4.2.2. Intérêt à utiliser la Da comme estimateur de l'infiltrabilité du sol

Dans les deux sites d'étude, la masse volumique apparente (Da) est la variable hydrodynamique la plus significativement corrélée aux propriétés hydrologiques (conductivité hydraulique à saturation et sorptivité). Ces corrélations font qu'on peut utiliser cette variable pour estimer l'infiltrabilité du sol. La portée de ce résultat est double :

- La masse volumique apparente est utilisée dans l'IDR pour corriger la Ks matricielle de l'effet des facteurs externes comme la reprise de masse et la porosité crée par un outil de travail.
- Ce résultat nous permet, sur chaque modalité, de connaître les surfaces les plus ruisselantes et surtout nous sert de base pour comprendre pourquoi le site de Rouffach ruisselle moins que celui de Wintzenheim. Pour ce faire des comparaisons de Da sont réalisées par modalité/site. Il en ressort que quel que soit la modalité considérée le site de Rouffach présente toujours des Da plus faibles. Ensuite à partir des données collectées sur le terrain, nous utilisons l'équation de (Philip 1957) pour calculer le cumul d'infiltration de chaque surface sur 30mn. Les résultats de ce calcul sont mis en relation avec les mesures de la Da de ces surfaces (Figure 22).

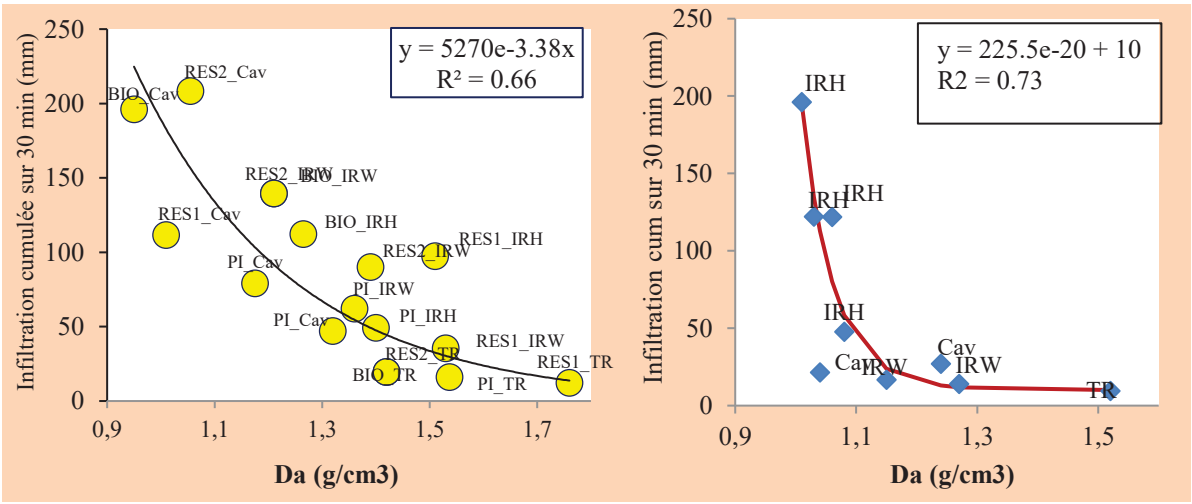


Figure 22 : Capacité d'infiltration sur 30mn des différentes surfaces de vigne en fonction de leur Da. A gauche les motifs du site de Wintzenheim et à droite les motifs de la modalité classique (plus ruisselante) du site de Rouffach

Nous observons dans les deux sites que les traces de roue ont infiltré au max un volume de 16 mm en 30 mn,. Ceci confirme les résultats obtenus dans la section 3.1.4 que la première phase de ruissellement qui intervient pour des cumuls de pluie inférieurs 15 mm se produisent bien dans les traces de roue. Par ailleurs, si nous considérons les gammes de variation des intensités moyennes des événements (1,3 à 42 mm/h pour Rouffach et 1,5 à 223 exceptionnellement à Wintzenheim), calculés sur l'hypothèse de 30mn, nous constatons qu'à Rouffach les seules surfaces potentiellement ruisselantes sont les inter-rangs travaillés (IRW), les cavaillons (Cav) et les traces de roue (TR). Les inter-rangs enherbés sont eux non-ruisselants. A contrario à Wintzenheim ce sont toutes les surfaces qui font probablement ruisselées. Ainsi, nous pouvons considérer à priori que les faibles ruissellement observés sur site de Rouffach par rapport à Wintzenheim sont dus à la forte capacité d'infiltration des inter-rangs enherbés. Cette forte infiltrabilité des inter-rangs enherbés du site de Rouffach peut s'expliquer par le type de sol (favorisant la rétension en eau) et par l'age de la plantation (installé en 1998). En effet au fur et à mesure que les années passent, l'augmentation de la matière organique combinée à l'action des vers de terre et l'activité racinaire dans ce motif permettent de créer de la macroporosité et d'améliorer la stabilité structurale. Ces effets se traduisent par une augmentation de la conductivité hydraulique, de l'infiltration et de la capacité de rétention en eau. (Biddoccu et al. 2016) note à ce titre qu'après 10 ans une plantation de vigne enherbée peut réduire jusqu'à 37 % le ruissellement par rapport à une jeune plantation de moins 2ans. Ceci montre que l'effet de l'enherbement sur le ruissellement est sur la durée alors que l'effet du paillage est immédiat (Blavet et al. 2009).

4.2.3. Effets sur le ruissellement

Les lames d'eau ruisselée sur les deux sites d'étude ont été très faibles durant les périodes de suivi. Malgré cela l'influence des états des états sur la répartition de la pluie entre infiltration et ruissellement a été bien confirmée. Les variables d'état de surface qui expliquent les volumes ruisselés sur le site de Wintzenheim sont celles généralement retrouvées dans la littérature. Il s'agit de croûte de battance (croûtes structurales, croûtes sédimentaires), de la couverture par résidus et par la végétation. La relation entre croûte de battance et le ruissellement est la plus courante (Vandervaere et al. 1997; Armand 2009; Blavet et al. 2009; Tribouillard 2004). Car l'extension de croûte de battance est associée à une diminution nette de l'infiltration.

La couverture de la surface par les résidus et par la végétation permet de réduire considérablement le ruissellement. Une couverture de 20 % de la surface par les résidus de copeaux de bois permet une réduction importante du ruissellement sur le site de Wintzenheim.

Sur le site de Rouffach, les analyses ont montré qu'une couverture de 40 % de la surface par végétation vivante a un effet réel sur le ruissellement. La réduction du ruissellement par ces deux variables est soulignée dans plus plusieurs contextes (Lamarca 1996; Blavet et al. 2009; Bagagiolo et al. 2017; Sauvadet et al. 2012; Keesstra et al. 2019). L'herbe et les résidus modifient les conditions hydrauliques de la surface en ralentissant l'écoulement. Ce freinage augmente l'épaisseur de la couche d'eau en surface (plus de charge positive) et la fraction de la surface couverte par l'eau (car une plus grande partie du microrelief sera sous l'eau). Ces deux effets augmentent l'infiltration réelle sur ces surfaces et réduisent les quantités d'eau transférées vers l'aval. En effet, les surfaces végétalisées sont considérées comme des zones de réinfiltration du ruissellement (Angermann et al. 2002; Nicolas 2010). Une couverture assez importante va réduire la connectivité de la surface, allonger le temps d'apparition du ruissellement à l'exutoire de la modalité et surtout favoriser l'infiltration.

4.3. IDR-Vigne, un outil bientôt opérationnel

4.3.1. Outil fonctionnel mais pas encore opérationnel

Les spécificités des vignes sont intégrées dans le nouvel IDR. Dans les modules, toutes les variables (couverture résidus, rugosité aléatoire, masse volumique apparente, etc.) sont simulées et les sorties montrent bien les différentes dates d'interventions sur chaque motif. L'IDR-Vigne est donc fonctionnel. Les premiers résultats montrent que L'IDR-Vigne est capable de simuler les périodes ruisselantes mais réagit très fort face aux importants événements et manque de sensibilité aux petits événements. Les surestimations des volumes simulés pourraient être liées à non prise en compte dans l'IDR-Vigne de l'effet de la végétation et des résidus sur la connectivité des écoulements en surface. En outre, un calibrage sur certaines variables est nécessaire pour que les simulations ressemblent aux données mesurées. A titre illustratif la Figure 23 compare la dynamique de la couverture végétale simulée de l'inter-rang enherbé de PI par IDR-Vigne (en bleu) à celle observée (bleu) sur les photos. Elle montre que le seuil maximal de couverture fixé à 85 % est acceptable. Mais la croissance simulée est plus rapide que celle observée. Ce qui explique le décalage constaté. Ce graphique confirme que certaines dates d'intervention n'ont pas été enregistrées dans le fichier des itinéraires techniques. Il faut donc les compléter avant de procéder au calibrage et à l'évaluation.

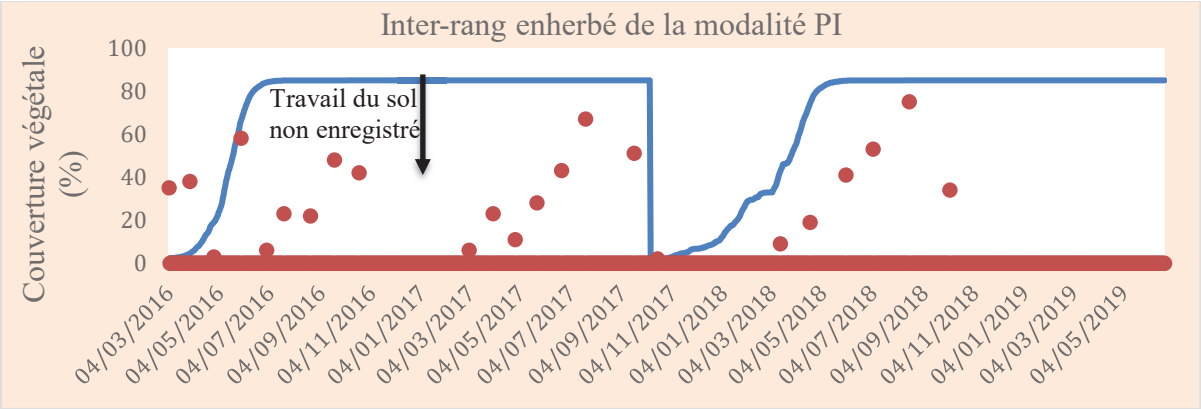


Figure 23: Comparaison de la dynamique simulée (bleu) et observée (rouge)

4.3.2. Les pistes d'amélioration de IDR-Vigne

L'indicateur de la dynamique du ruissellement dans les vignes (IDR-Vigne) est un outil qui ambitionne d'identifier les périodes de hauts risques de ruissellement associés à chaque pratique viticole et d'aider les viticulteurs dans le choix des techniques de gestion de ces risques. C'est un outil complexe dans sa conception mais pratique quand il est bien configuré. Car il peut être utilisé dans des démarches prospectives d'évaluation des risques de ruissellement et même de transfert de produits phytosanitaires. Mais pour l'instant des réajustements et des informations complémentaires devront être apporté pour le rendre opérationnel.

- Nous avons vu que le l'IDR-Vigne réagit très fort lors de l'événement particulier du 26/06/2017. Une calibration sur la conductivité hydraulique pourrait être utile pour améliorer la performance de l'IDR-Vigne Les valeurs de teneur en matière organique utilisées ont datées (2014) et méritent d'être actualisées.
- Le développement de la végétation vivante simulé est plus rapide que ce qui est observé. Puisque la trajectoire est bonne il faudrait l'optimiser avec les données issues de l'interprétation de photos qui semblent donner des résultats plus exacts de couverture végétale. De la même manière, l'approche de simuler le développement de la végétation spontanée en faisant comme il y avait du semis est acceptable. On peut l'améliorer en ne considérant que la croissance d'un ou trois espèces dominantes. Des relevés phytosociologiques ont été réalisés dans le projet PACOV. Il restera à exploiter ces résultats et chercher un modèle de croissance de l'espèce dominante.
- Une question importante concerne la modélisation de la dégradation des copeaux (Tissaux 2001). souligne que la dégradation de bois rameaux fragmenté suit une fonction sigmoïde (comme la fonction que nous avons intégré dans l'IDR-Vigne). Il indique que

durant la première phase on peut utiliser le rapport C/N pour estimer la dégradation. Mais pendant la deuxième phase il est plus intéressant d'utiliser le rapport 1ignine/N ou Iignine+polyphénols/N.

- La liste de matériel peut facilement être complétée car des annuaires de matériel viticole existent déjà. Nous en avons consulté un à l'INRA de Colmar.

5. Conclusion et perspectives

Le ruissellement est une voie préférentielle de transfert des produits phytosanitaires d'origine viticole vers les eaux superficielles. Dans la perspective de limiter le ruissellement et reconquérir la qualité des eaux, notre étude se propose d'adapter l'indicateur de la dynamique du ruissellement (IDR) aux systèmes de vigne afin de proposer des solutions pour gérer ces risques. L'adaptation de cet indicateur s'est faite en deux phases : expérimentale et simulation.

La phase expérimentale a consisté à identifier les surfaces pouvant avoir des réponses hydrologiques similaires, à comprendre les liens entre les états de surface, propriétés hydrologiques et le ruissellement et à déterminer les facteurs de variation du ruissellement entre modalités de conduite. Elle s'est articulée autour de 3 hypothèses :

Premièrement, l'étude confirme que les motifs ont des dynamiques d'états de surfaces différentes. Les motifs des modalités paillis se dégradent moins vites que ceux des modalités non-paillis. Les résidus de copeaux de bois assurent un rôle de protection de la surface du sol.

Deuxièmement, les motifs des modalités paillis ont présenté des masses volumiques apparentes (Da) significativement plus faibles que les motifs des modalités non-paillis. La Da étant négativement corrélée à la conductivité hydraulique à saturation (-0,7) et à la sorptivité (-0,2), ces motifs ont aussi des propriétés hydrologiques différentes. Ce qui confirme l'effet des résidus sur les propriétés hydrodynamiques de la surface du sol. L'effet de la couverture végétale sur ses propriétés se perçoit dans la durée.

Troisièmement, l'étude confirme que les états de surface commandent la répartition de la pluie entre infiltration et ruissellement. Les facteurs d'état de surface qui contrôlent ces processus sont la couverture de la surface par résidus et par la végétation vivante, l'extension des croûtes sédimentaires et le pourcentage de surfaces ouvertes. C'est pourquoi une couverture de 20 % de la surface par les résidus ou 40 % par la végétation vivante réduit considérablement le ruissellement.

Les motifs se différenciant notamment par ces variables, chaque motif a été considéré comme une surface à part. Ce faisant, les motifs ont été intégrés dans l'IDR-Vigne comme surfaces élémentaires sur lesquelles l'indicateur simule la dynamique des facteurs de variation et de la lame d'eau ruisselante de base.

La seconde phase a consisté à simuler le ruissellement. Les premiers résultats sont encourageants. L'IDR-Vigne simule bien les périodes ruisselantes mais surestime fortement le ruissellement quand surviennent les événements importants. L'indicateur manque de sensibilité pour les petits événements.

Un processus de calibrage sur certaines variables (conductivité hydraulique à saturation, croissance de végétation) est nécessaire pour améliorer la puissance prédictive de l'IDR-Vigne. En plus, l'effet de l'intensité des événements et du type de sol sur la dynamique des états du sol et du ruissellement méritent d'être approfondis. Les simulations de pluie sur les différents motifs des deux sites d'étude pourront aider à mieux caractériser les conditions ruisselantes sur chaque site.

Références bibliographiques

Albergel J, Casenave A, Valentin C (1986) Modélisation du ruissellement en zone soudanosahélienne: simulation de pluie et cartographie des états de surface. Journ Hydrol ORSTOM 17-19 Sept 1985 24–35

Angermann T, Wallender WW, Wilson BW, et al (2002) Runoff from orchard floors—micro-plot field experiments and modeling. J Hydrol 265:178–194. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00109-9

ARAA (2016) Ruissellement et érosion. In: ARAA. http://www.araa-agronomie.org/thematiques/ruissellement-erosion.html. Accessed 8 Oct 2019

Armand R (2009) Étude des états de surface du sol et de leur dynamique pour différentes pratiques de travail du sol. Mise au point d'un indicateur de ruissellement. Phdthesis, Université de Strasbourg

Arnaez J, Lasanta T, Ruiz-Flaño P, Ortigosa L (2007) Factors affecting runoff and erosion under simulated rainfall in Mediterranean vineyards. Soil Tillage Res 93:324–334. https://doi.org/10.1016/j.still.2006.05.013

Arnold JG, Engel BA, Srinivasan R (1993) Continuous time, grid cell watershed model, application of advanced information technologies. Eff Manag Nat Resour ASAE Publ 04–93

Aubertot J-N, Barbier J-M, Carpentier A, et al (2005) Réduire l'utilisation des pesticides et en limiter les impacts environnementaux. Rapp L'expertise Réalis Par L'INRA Cemagref À Demande Ministère L'agriculture Pêche MAP Ministère L'écologie Dév Durable MEDD Déc

Auzet A (2000) Ruissellement, érosion et conditions de surface des sols à l'échelle de versants et de petits bassins versants. Memoire D'Habilitation à Diriger Recherche

Auzet A-V (1987) L'érosion des sols cultivés en France sous l'action du ruissellement. Ann Géographie 96:529–556. https://doi.org/10.3406/geo.1987.20627

Bagagiolo G, Rabino D, Biddoccu M, Cavallo E (2017) Monitoring erosion in sloping vineyards: effectiveness of grass covering in different periods. Conference paper 5

Banton O, Côté D, Trudelle M (1991) Détermination au champ de la conductivité hydraulique saturée à l'aide de l'infiltromètre à charge constante de Côté: théorie et approximations mathématiques. Can J Soil Sci 71:119–126. https://doi.org/10.4141/cjss91-010

Bensalah N, Sabir M, Roose E, Laouina A (2016) Indicateurs des risques de ruissellement et d′érosion en vue d′une gestion durable des eaux et sols : (Bassin versant de Bouregreg, Maroc)1. In: Christophe B, Pérez R (eds) Agro-ressources et écosystèmes : Enjeux sociétaux et pratiques managériales. Presses universitaires du Septentrion, Villeneuve d'Ascq, pp 205–221

Biddoccu M, Ferraris S, Cavallo E, et al (2013) Hillslope Vineyard Rainfall-Runoff Measurements in Relation to Soil Infiltration and Water Content. Procedia Environ Sci 19:351–360. https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.06.040

Biddoccu M, Ferraris S, Opsi F, Cavallo E (2016) Long-term monitoring of soil management effects on runoff and soil erosion in sloping vineyards in Alto Monferrato (North–West Italy). Soil Tillage Res 155:176–189. https://doi.org/10.1016/j.still.2015.07.005

Biddoccu M, Ferraris S, Pitacco A, Cavallo E (2017) Temporal variability of soil management effects on soil hydrological properties, runoff and erosion at the field scale in a hillslope vineyard, North-West Italy. Soil Tillage Res 165:46–58. https://doi.org/10.1016/j.still.2016.07.017

Blavet D, De Noni G, Le Bissonnais Y, et al (2009) Effect of land use and management on the early stages of soil water erosion in French Mediterranean vineyards. Soil Tillage Res 106:124–136. https://doi.org/10.1016/j.still.2009.04.010

Blavet D, Noni GD, Roose É, et al (2004) Effets des techniques culturales sur les risques de ruissellement et d'érosion en nappe sous vigne en Ardèche (France). Sci Chang Planétaires Sécher 15:111–120

Bockstaller C, Cariolle M, Galan M-B, et al (2013) Evaluation agri-environnementale et choix des indicateurs : acquis, enjeux et pistes. Innov Agron 31:1–14

Boughton W (2009) New Approach to Calibration of the AWBM for Use on Ungauged Catchments. J Hydrol Eng 14:562–568. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000025

Braud I, Lagadec L-R, Moulin L, et al (2018) Development of an evaluation method for the IRIP method, mapping susceptibility to surface runoff, using proxy data: application to a 80 km railway using a runoff impact data base. p 3463

Casenave A, Valentin C (1989) Les états de surface de la zone sahélienne : influence sur l'infiltration. 231

Cerdan O, Souchère V, Lecomte V, et al (2002) Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff model: Sealing and Transfer by Runoff and Erosion related to Agricultural Management. CATENA 46:189–205. https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00166-7

Chahinian N (2004) Paramétrisation multi-critère et multi-échelle d'un modèle hydrologique spatialisé de crue en milieu agricole. Thèse Academique, Université de Montpellier II

Cheggour A, Simonneaux V, Asma S, et al (2008) Recherche d'indicateurs de ruissellement et des risques d'érosion au moyen de tests d'infiltrométrie dans le bassin versant du Rhéraya (Haut-Atlas occidental, Maroc). Rev Sci Eau 21:311. https://doi.org/10.7202/018777ar

Chossat J-C (2005) La mesure de la conductivité hydraulique dans les sols: choix des méthodes. Éd. Tec & doc

Connolly R, Schirmer J, Dunn P (1998) A daily rainfall disaggregation model. Agric For Meteorol 92:105–117

Defersha MB, Melesse AM (2012) Effect of rainfall intensity, slope and antecedent moisture content on sediment concentration and sediment enrichment ratio. CATENA 90:47–52. https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.11.002

Devia GK, Ganasri BP, Dwarakish GS (2015) A Review on Hydrological Models. Aquat Procedia 4:1001–1007. https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126

Elrick DE, Parkin GW, Reynolds WD, Fallow DJ (1995) Analysis of Early-Time and Steady State Single-Ring Infiltration Under Falling Head Conditions. Water Resour Res 31:1883–1893. https://doi.org/10.1029/95WR01139

Evrard O, Vandaele K, Bielders C, Wesemael B van (2008) Seasonal evolution of runoff generation on agricultural land in the Belgian loess belt and implications for muddy flood triggering. Earth Surf Process Landf 33:1285–1301. https://doi.org/10.1002/esp.1613

Findeling A (2001) Etude et modélisation de certains effets du semis direct avec paillis de résidus sur les bilans hydrique, thermique et azoté d'une culture de maïs pluvial au Mexique

Frere MH, Onstad CA, Holtan HN (1975) Actmo—an agricultural chemical transport model ARS-H-3. Agric Res Serv USCA Hyattsville

Hazbavi Z, Sadeghi SHR (2016) Potential effects of vinasse as a soil amendment to control runoff and soil loss. SOIL 2:71–78. https://doi.org/10.5194/soil-2-71-2016

Heddadj D, Gascuel-Odoux C, Cotinet P (2005) Mode de travail du sol, ruissellement et propriétés hydrodynamiques sur un dispositif expérimental de l'Ouest de la France. Etude Gest Sols 14

Horton RE (1933) The Rôle of infiltration in the hydrologic cycle. Eos Trans Am Geophys Union 14:446–460. https://doi.org/10.1029/TR014i001p00446

Jeffery S, Gardi C, Jones A, et al (2013) Atlas Européen de la biodiversité des sols. Publications Office, Luxembourg

Jouquet P, Janeau J-L, Pisano A, et al (2012) Influence of earthworms and termites on runoff and erosion in a tropical steep slope fallow in Vietnam: A rainfall simulation experiment. Appl Soil Ecol 61:161–168. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.04.004

Jouquet P, Podwojewski P, Bottinelli N, et al (2008) Above-ground earthworm casts affect water runoff and soil erosion in Northern Vietnam. CATENA 74:13–21. https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.12.006

Kamphorst E, Jetten V, Guérif J, et al (2000) Predicting depressional storage from soil surface roughness. Soil Sci Soc Am J 64:1749–1758

Keesstra SD, Rodrigo-Comino J, Novara A, et al (2019) Straw mulch as a sustainable solution to decrease runoff and erosion in glyphosate-treated clementine plantations in Eastern Spain. An assessment using rainfall simulation experiments. Catena 174:95–103

Lacombe G, Valentin C, Sounyafong P, et al (2018) Linking crop structure, throughfall, soil surface conditions, runoff and soil detachment: 10 land uses analyzed in Northern Laos. Sci Total Environ 616–617:1330–1338. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.185

La Jeunesse I, Amiot A, Landry D, et al (2015) Transferts de pesticides dans un petit bassin versant viticole des coteaux du Layon : importance des pics lors du ruissellement. Norois n° 235:67–86

Lamarca CC (1996) Stubble over the soil: the vital role of plant residue in soil management to improve soil quality. American Society of Agronomy

Langhans C, Diels J, Clymans W, et al (2019) Scale effects of runoff generation under reduced and conventional tillage. CATENA 176:1–13. https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.12.031

Le Bayon R-C, Binet F (2001) Earthworm surface casts affect soil erosion by runoff water and phosphorus transfer in a temperate maize crop. Pedobiologia 45:430–442. https://doi.org/10.1078/0031-4056-00097

Le Bissonnais Y, Benkhadra H, Gallien E, et al (1996) Genèse du ruissellement et de l'érosion diffuse sur sols limoneux : analyse du transfert d'échelle du m2 au bassin versant élémentaire agricole/Runoff and interrill erosion on silty loamy soils: analysis of scale tranfer from m2 to small cultivated catchments. Géomorphologie Relief Process Environ 2:51–64. https://doi.org/10.3406/morfo.1996.885

Le Bissonnais Y, Cerdan O, Lecomte V, et al (2005) Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion. CATENA 62:111–124. https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.05.001

Le Bissonnais Y, Montier C, Jamagne M, et al (2002) Mapping erosion risk for cultivated soil in France. Catena 46:207–220

Lefrancq M (2014) Transport and attenuation of pesticides in runoff from agricultural headwater catchments : from field characterisation to modelling. Phdthesis, Université de Strasbourg

Leonard J, Andrieux P (1998) Infiltration characteristics of soils in Mediterranean vineyards in Southern France. CATENA 32:209–223. https://doi.org/10.1016/S0341-8162(98)00049-6

Madrigal I, Benoit P, Barriuso E, et al (2002) Capacités de stockage et d'épuration des sols de dispositifs enherbés vis-à-vis des produits phytosanitaires. Étude Gest Sols 16

Malam Issa O, Valentin C, Rajot JL, et al (2011) Runoff generation fostered by physical and biological crusts in semi-arid sandy soils. Geoderma 167–168:22–29. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.09.013

Malet J, Auzet A, Maquaire O, et al (2003) Soil surface characteristics influence on infiltration in black marls: application to the Super-Sauze earthflow (southern Alps, France). Earth Surf Process Landf J Br Geomorphol Res Group 28:547–564

Martin P, Ouvry JF, Bockstaller C (2010) Adaptation of the curve number approach to runoff estimation for loamy soils over a growing season for winter wheat: Comparison with the STREAM approach. Land Degrad Dev 21:376–387. https://doi.org/10.1002/ldr.957

Nicolas M (2010) Étude expérimentale et numérique du ruissellement de surface : effets des variations d'intensité de la pluie. Application à une parcelle de vigne en Cévennes-Vivarais.

Nord G, Esteves M (2007) PSEM_2D : UN MODÈLE D'ÉROSION HYDRIQUE À BASE PHYSIQUE À L'ÉCHELLE DE LA PARCELLE. Études Géographie Phys 12

Payraudeau, Gregoire (2012) Modelling pesticides transfer to surface water at the catchment scale: a multi-criteria analysis. Agron Sustain Dev 32:479–500. https://doi.org/10.1007/s13593-011-0023-3

Pérès G, Cluzeau D, Menasseri S, et al (2013) Mechanisms linking plant community properties to soil aggregate stability in an experimental grassland plant diversity gradient. Plant Soil 373:285–299. https://doi.org/10.1007/s11104-013-1791-0

Peugeot C, Esteves M, Galle S, et al (1997) Runoff generation processes: results and analysis of field data collected at the East Central Supersite of the HAPEX-Sahel experiment. J Hydrol 188:179–202

Philip JR (1957) The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. Soil Sci 84:257–264

Poesen J (1986) Surface sealing on loose sediments: the role of texture, slope and position of stones in the top layer. Assess Soil Surf Seal Crusting 354–362

Prosdocimi M, Jordán A, Tarolli P, et al (2016) The immediate effectiveness of barley straw mulch in reducing soil erodibility and surface runoff generation in Mediterranean vineyards. Sci Total Environ 547:323–330. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.076

Regazzoni C (2010) Synthèse bibliographique des outils d'évaluation du ruissellement. 22 http://enrhy.u-strasbg.fr/

Reynolds W, Elrick D (1990) Ponded infiltration from a single ring: I. Analysis of steady flow. Soil Sci Soc Am J 54:1233–1241

Ripoche A (2009) Modélisation de systèmes de culture adaptatifs : conception de stratégies flexibles d'enherbement en parcelles viticoles. Thèse académique 148

Rodrigo Comino J, Iserloh T, Lassu T, et al (2016) Quantitative comparison of initial soil erosion processes and runoff generation in Spanish and German vineyards. Sci Total Environ 565:1165–1174. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.163

Ronfort C (2010) Elaboration et évaluation environnementale de scénarios prospectifs d'occupation des sols à l'échelle locale : application au cas du ruissellement érosif dans le Pays de Caux, Haute-Normandie. Thèse académique 135, Université de Rouen

Ruiz-Colmenero M, Bienes R, Marques MJ (2011) Soil and water conservation dilemmas associated with the use of green cover in steep vineyards. Soil Tillage Res 117:211–223. https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.004

Sabir M, Barthes B, Roose É (2004) Recherche d'indicateurs des risques de ruissellement et d'érosion sur les principaux sols des montagnes méditerranéennes du Rif occidental (Maroc). Sci Chang Planétaires Sécher 15:105–110

Sauvadet M, Raclot D, Slimane AB, Bissonnais YL (2012) Déterminisme du ruissellement et de l'érosion hydrique de la parcelle au versant en milieu méditerranéen marneux. 7

Saxton KE, Rawls WJ (2006) Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. Soil Sci Soc Am J 70:1569–1578

Schoener G, Stone MC (2019) Impact of antecedent soil moisture on runoff from a semiarid catchment. J Hydrol 569:627–636. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.025

Shaver TM, Peterson GA, Ahuja LR, Westfall DG (2013) Soil sorptivity enhancement with crop residue accumulation in semiarid dryland no-till agroecosystems. Geoderma 192:254–258. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.08.014

Sivacheva M (2018) Validation d'un indicateur de ruissellement via la dynamique des états de surface du sol arable. ENSEES, Strasbourg

Smith RE, Parlange J-Y (1978) A parameter-efficient hydrologic infiltration model. Water Resour Res 14:533–538. https://doi.org/10.1029/WR014i003p00533

Sofia G, Ragazzi F, Giandon P, et al (2019) On the linkage between runoff generation, land drainage, soil properties, and temporal patterns of precipitation in agricultural floodplains. Adv Water Resour 124:120–138. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.12.003

Steffan I (2001) Mise au point d'un indicateur de ruissellement: RUIS. Université Louis Pasteur, Strasbourg

Thiollet-Scholtus M (2011) L'eau et la vigne. Evaluer l'impact des pratiques viticoles sur les qualité des eaux. Rev Oenologues Tech Vitivinic Oenologicques Mag Trimest Inf Prof 38:11–12

Tissaux J-C (2001) Caractérisation de bois raméaux fragmentés et indices de décomposition. Thèse Academique, Université de Laval 105

Tribouillard C (2004) Construction et validation d'un indicateur '"Ruissellement"'(IRu) basé sur un modele dans le cadre de la méthode INDIGO®. ENITA Bordx Gradignan Mém Fin D'études 69:

USDA S (1972) National engineering handbook, section 4: Hydrology. Wash DC

van Dijck SJE, van Asch ThWJ (2002) Compaction of loamy soils due to tractor traffic in vineyards and orchards and its effect on infiltration in southern France. Soil Tillage Res 63:141–153. https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00237-9

Van Dijk P, Rosenfelder C, Scheurer O, et al (2016) Une approche agronomique territoriale pour lutter contre le ruissellement et l'érosion des sols en Alsace. Agron Environ Sociétés 6:35–47

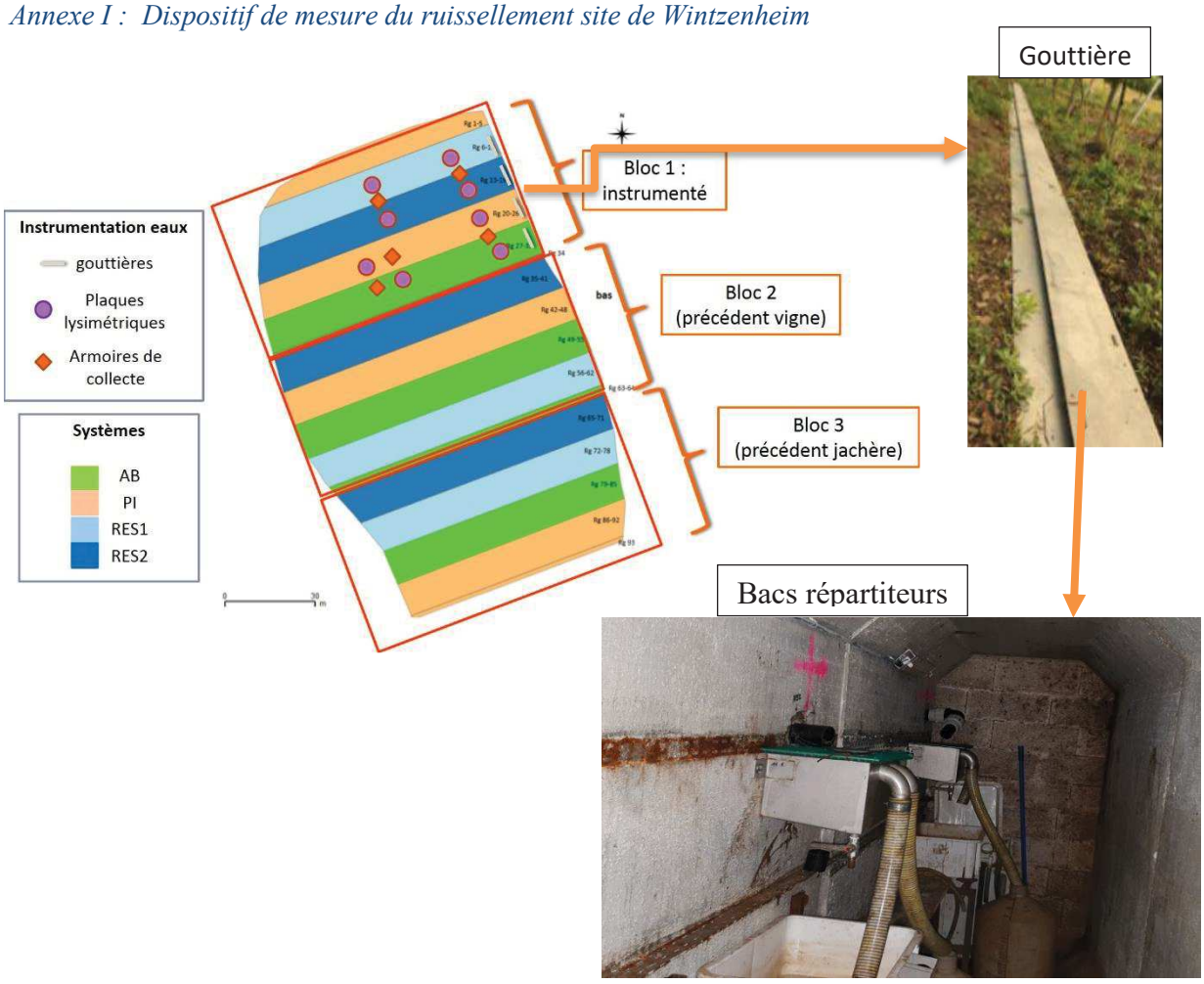
Vandervaere J-P, Peugeot C, Vauclin M, et al (1997) Estimating hydraulic conductivity of crusted soils using disc infiltrometers and minitensiometers. J Hydrol 188:203–223

Winterer (2011) Détermination des proriétés hydrodynamiques des sols alsaciens en fonction des techniques culturales. Université de Haut Alsace, Association pour la Relance Agronomique en Alsace

Wu L, Pan L (1997) A generalized solution to infiltration from single-ring infiltrometers by scaling. Soil Sci Soc Am J 61:1318–1322

Yu Y, Wei W, Chen L, et al (2019) Quantifying the effects of precipitation, vegetation, and land preparation techniques on runoff and soil erosion in a Loess watershed of China. Sci Total Environ 652:755–764. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.255

Annexe I : Dispositif de mesure du ruissellement site de Wintzenheim



Annexe II: Quelques techniques d'entretien du sol et de gestion d'adventices en viticulture

Type de Pratiques viticoles	Stratégie	Exemples d'espèces / profondeur	Motif
Enherbement	Spontané (temporaire ou permanent)		Cavaillon, inter-rang
	Engrais vert	Moutarde, Seigle, Céréale	Inter-rang
	Permanent semé	Ray grass, Trèfle souterrain, etc.	Cavaillon et Inter-rang
	Maraîchage	Tomate, melon, pomme de terre, petits pois, etc.	Inter-rang
Mulch	Bois Raméal Fragmenté		Cavaillon et inter-rang
	Paille	Orge, Miscanthus	Cavaillon et inter-rang
Travail mécanique	Labour	> 20 cm	Inter-rang
	TSL	< 15 cm	Inter-rang
Désherbage chimique	pré-levée ou post-levée		Cavaillon et inter-rang
Empierrage		25 à 30 %	Cavaillon et inter-rang

Annexe III : Synthèse des effets des pratiques viticoles sur les états de surface, l'infiltration, la détention superficielle et le ruissellement (-) effet négatif, (+) effet positif, (+/-) ambivalent

Pratiques	Rugosité	Croûtes	Couverture	Infiltration	Détention	Ruissellement
Labour (*Van Dijck, 2002)*	+	+	-	+	+	+
TCSL (Rodrigo Comino et al. 2016; Langhans et al. 2019)	+	-	+	+/-	+	+/-
Enherbement (Hazbavi and Sadeghi 2016)	-	-	+	+	+	-
Mulchage (Prosdocimi et al. 2016a; Keesstra et al. 2019)	+	-	+	+/-	+	-
Désherbage chimique (Le Bissonnais et al. 2005)	-	+	-	-	-	+
Empierrage (Blavet et al. 2009)	+	+	+	+/-	+	-

Annexe IV : Les facteurs et variables déterminants dans la formation et le transfert du ruissellement (***) très important, (**) important, (*) à considérer

Facteurs	Variables pertinentes	Ruissellement	
		Production	Transfert
EDS	Rugosité aléatoire	***	**
	Rugosité orienté	*	***
	Couverture	***	**
	Croûte de battance	***	**
Sol (texture et structure)	Texture	***	**
	Masse volumique apparente	***	
	Stabilité structurale	***	*
	Humidité initiale	***	**
	Eléments grossiers	*	**
Pluie	Intensité	***	
	Hauteur	**	
	Cumul (depuis dernier de travail du sol)	**	
Pente	Intensité	*	***
	Longueur et la forme		***
Travail du sol	Intensité, type d'outil	***	**

Annexe V : Synthèse des données disponibles : site de Wintzenheim et Rouffach

Site	Facteurs	Période suivi	Paramètres mesurés (année)	Méthode	Nombre (répétition)
Wintzenheim	Météo	2016 : 2018 (en continue)	Hauteur Intensité Durée	Pluviographe à auget basculeur (0.2 mm)	417 événements
	Flux d'eau	2016 : 2018 (Tous les 15 jours et après orages)	Lame d'eau ruisselée MES* [PPS]*	Mesure volume dans les bacs répartiteurs	113 dates de visite
	Sol	2016 : 2018 (Mars-Octobre)	% motte % végétation % résidus % croûtes	Décompte carreaux couverts à plus +75%	29 dates (1 photo par motif)
		2013 et 2018	Texture (2012) Da (2013) Stabilité structurale (2018)	Cylindre (100 cm3) MWD	1 date (3 par modalité)

	ITK	2016 : 2018	Nombre de passage Date de passage Outils		20 passages /par an en moyenne
Rouffach	Météo	2015 : 2016 (en continue)	Hauteur Intensité Durée	Pluviographe à auget basculeur (0,2 mm)	302 événements
	Ruissellement	2015 : 2016 (Tous les 15 jours et après orages)	Lame d'eau MES* [PPS]	Mesure volume dans les bacs répartiteurs	
	EDS (Base de données)	2016	% motte % végétation % croûtes	Visuelle (in situ)	4 dates
	Sol	2014	Texture Da Matière organique Infiltrabilité	Cylindre (100 cm3); Perte à feu ; Infiltromètre à disque	
	ITK	2015 -2016	Nombre de passage Date de passage Outils		

Annexe VI : Formulaire de suivi des états de surface

Suivi des microparcelles - Description des EDS

Localisation : **Observateur :**
Code microparcelle : **Date :**
Conditions hydriques : sec/humide **Pente (%) :**

Classifications EDS	
Facies (F0, F11, F12, F2)	
Classe de rugosité (R0 à R4)	
HSF (cm)	

mottes	% de la surface totale	scellement : oui / non
2mm - 2 cm		
≥ 2 cm		
piérosité		
2mm - 2 cm		
≥ 2 cm		

Croûtes	% de la surface totale
Structurales	
Sédimentaires	

Macropores						
Fentes					**Trous**	
Structure (pas, dispersée, lignes, polygones)	Nbre et classe de densité (pas, très faible, faible, moyenne, élevée)		Longueur (cm)	Largeur (cm)	Nombre et classe (0, <=5, 5 à 20, >20)	
	Nbre	classe			Nbre	classe

Microrelief : mesures chainette (longueur max = …… cm)					
Sens par rapport au travail du sol	**Mesure 1**	**Mesure 2**	**Mesure 3**	**Mesure 4**	**Mesure 5**
parallèle					
pénétromètre					

Direction principale du ruissellement éventuel : pente, travail du sol, autre……

Hauteur moyenne de la rugosité orientée : …… cm

Végétation			
végétation :		**Résidus de culture :**	
Couverture (%)		Couverture (%)	
Hauteur (cm)		Diamètre moyen	
		Scellé ? (oui/non)	

Remarques :

Annexe VII : Nombre, intensités et cumul pluie des événements pluvieux survenus sur le site de Wintzenheim durant les périodes de suivi (2016, 2017 et 2018)

	Caractéristiques	Wintzenheim (mars à octobre)		
		2016	2017	2018
Evènements Toutes les averses	Nombre	192	140	118
	Cumul pluie (mm)	442	334,4	409
	Cumul total pluie (mm)	479,2	369,4	436,6
Normales Colmar (1981 - 2010)		460	460	460
Intensité	Moyenne	3,2	5,4	3,8
	Ecart-type	3,1	20,1	4,7
	Moyenne maximale	19,9	223,2	40,9

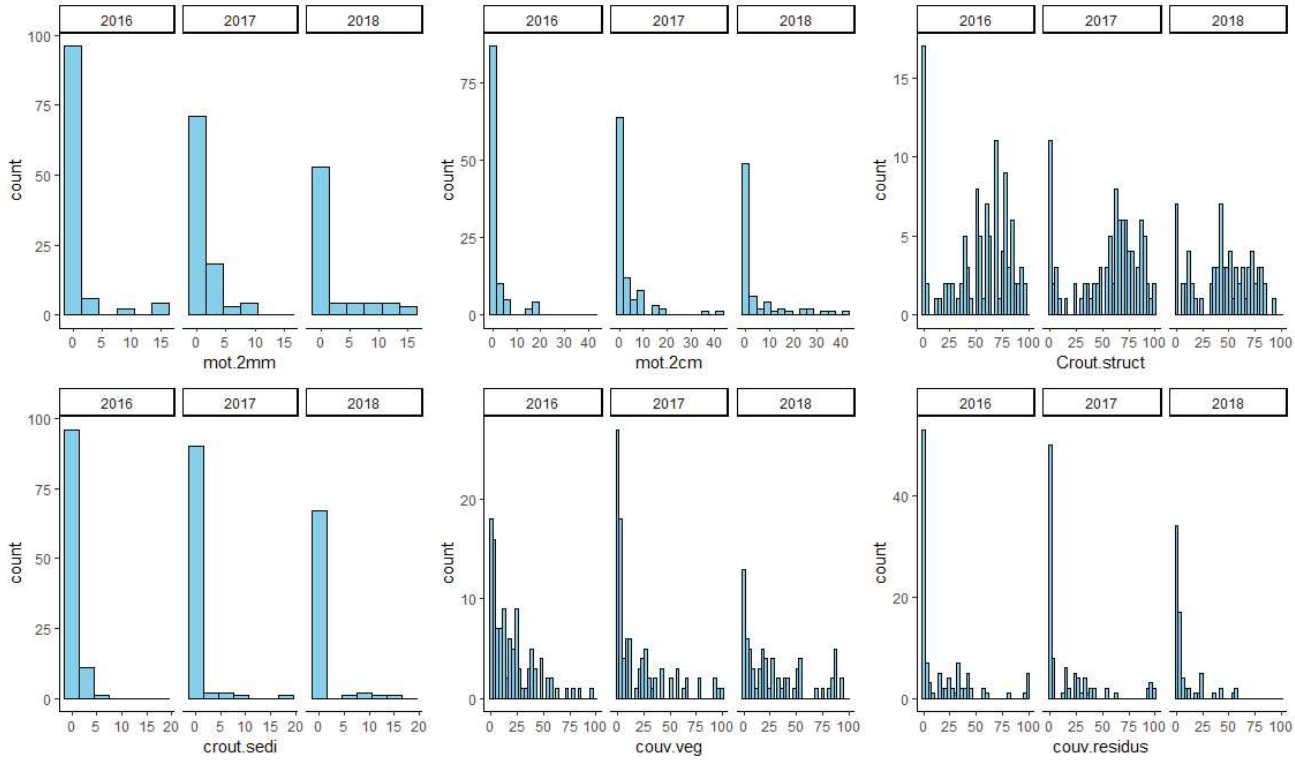
Annexe VIII : Caractéristiques des événements pluvieux à Rouffach sur les périodes de suivi 2015 et 2016

	Caractéristiques	Rouffach	
		2015	2016
Evénements Toutes les averses	Nombre	145	157
	Cumul pluie (mm)	428,6	413,8
	Cumul total pluie (mm)	453,8	434,6
Normales Colmar (1981 : 2010)		460	460
Intensité	Moyenne (mm/h)	4,0	3,1
	Ecart-type	6,8	3,8
	Moyenne maximale (mm/h)	42	27

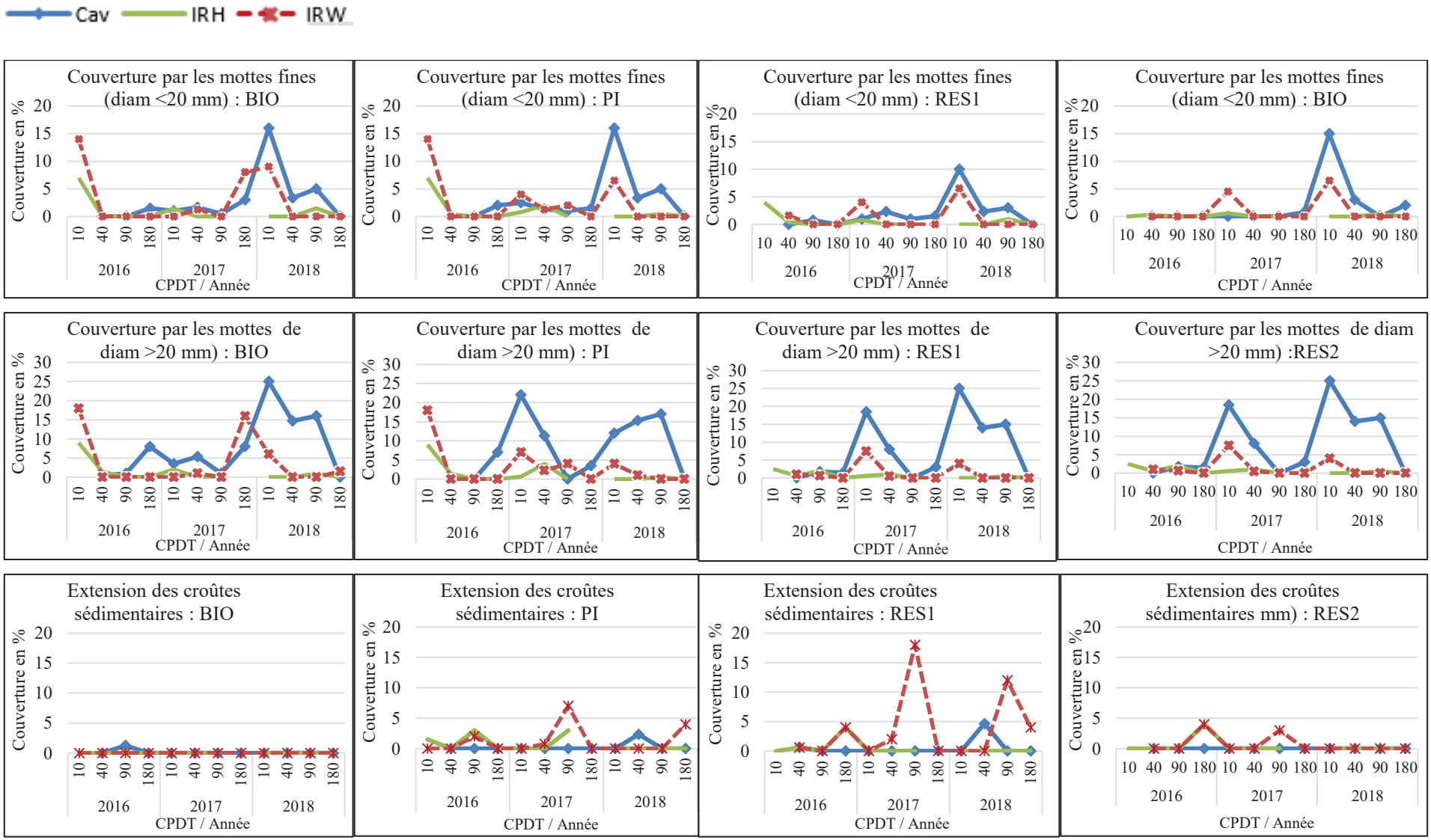
Annexe IX : Répartition des individus après CAH

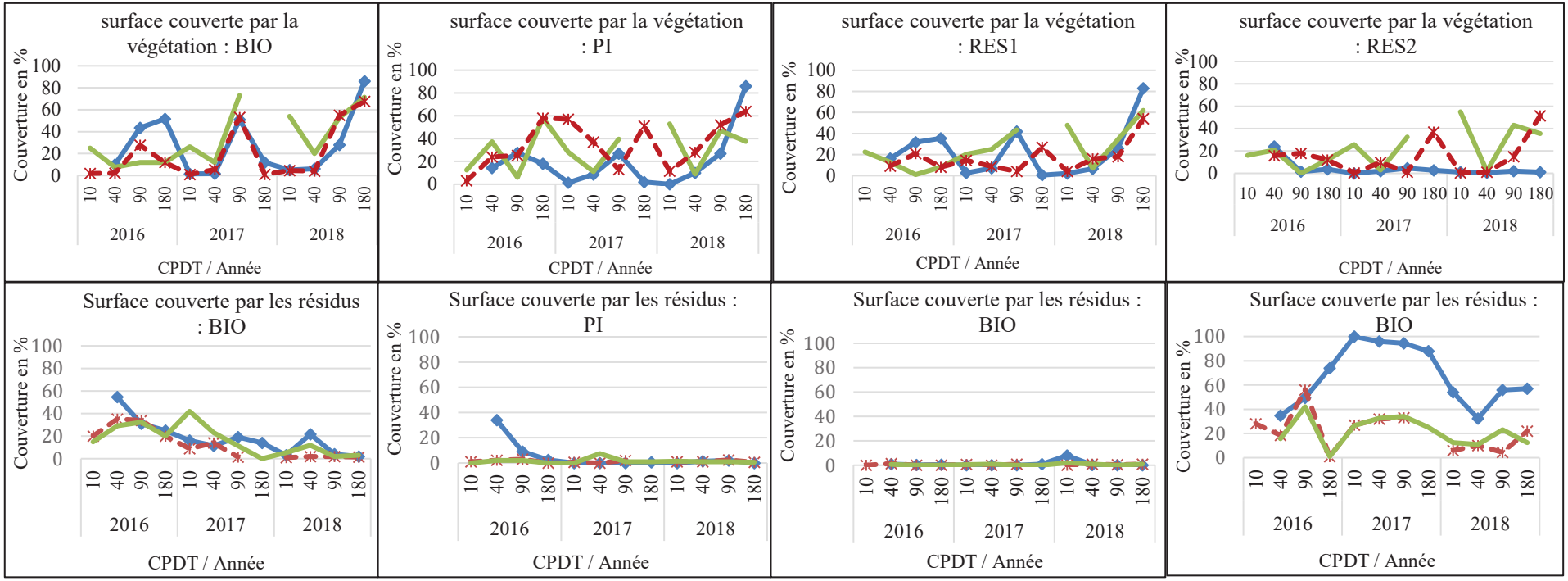
Groupe	Modalité	Cavaillons	Inter-rangs enherbés	Inter-rangs travaillés
Groupe 1	BIO	7	5	8
	PI	1	0	0
	RES1	0	0	0
	RES2	17	9	11
Groupe 2	BIO	3	1	3
	PI	4	1	3
	RES1	3	1	3
	RES2	2	0	2
Groupe 3	BIO	5	9	4
	PI	2	9	8
	RES1	6	8	3
	RES2	1	6	2
Groupe 4	BIO	8	8	8
	PI	16	13	12
	RES1	14	14	17
	RES2	3	8	8

Annexe X : Distribution des variables d'EDS par année

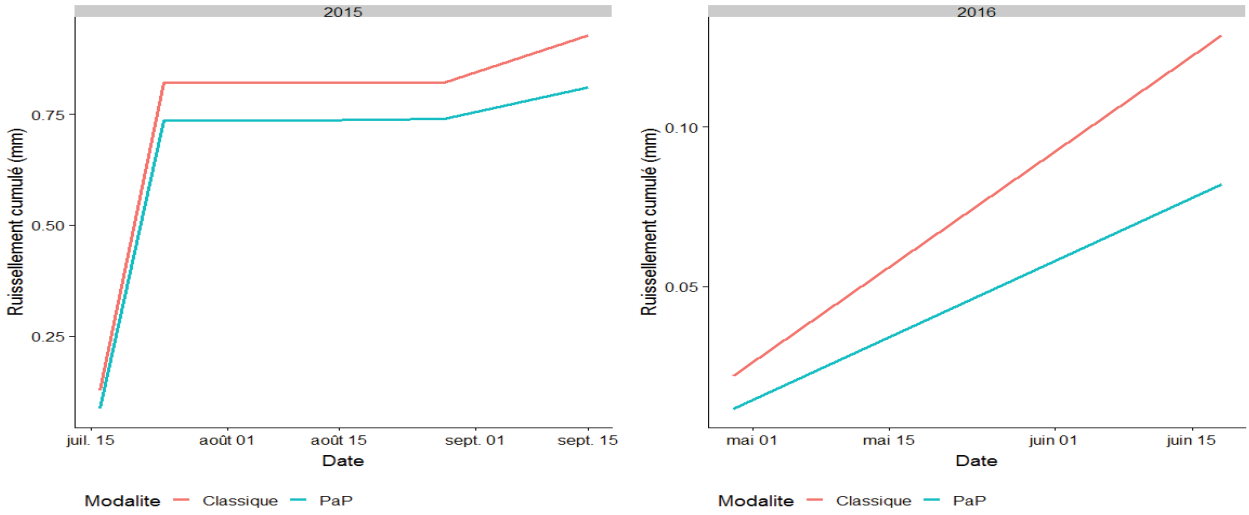


Annexe XI : Evolution des EDS en fonction du CPDT et par année (Cav = cavaillon ; IRH =inter-rang enherbé ; IRW =inter-rang travaillé)

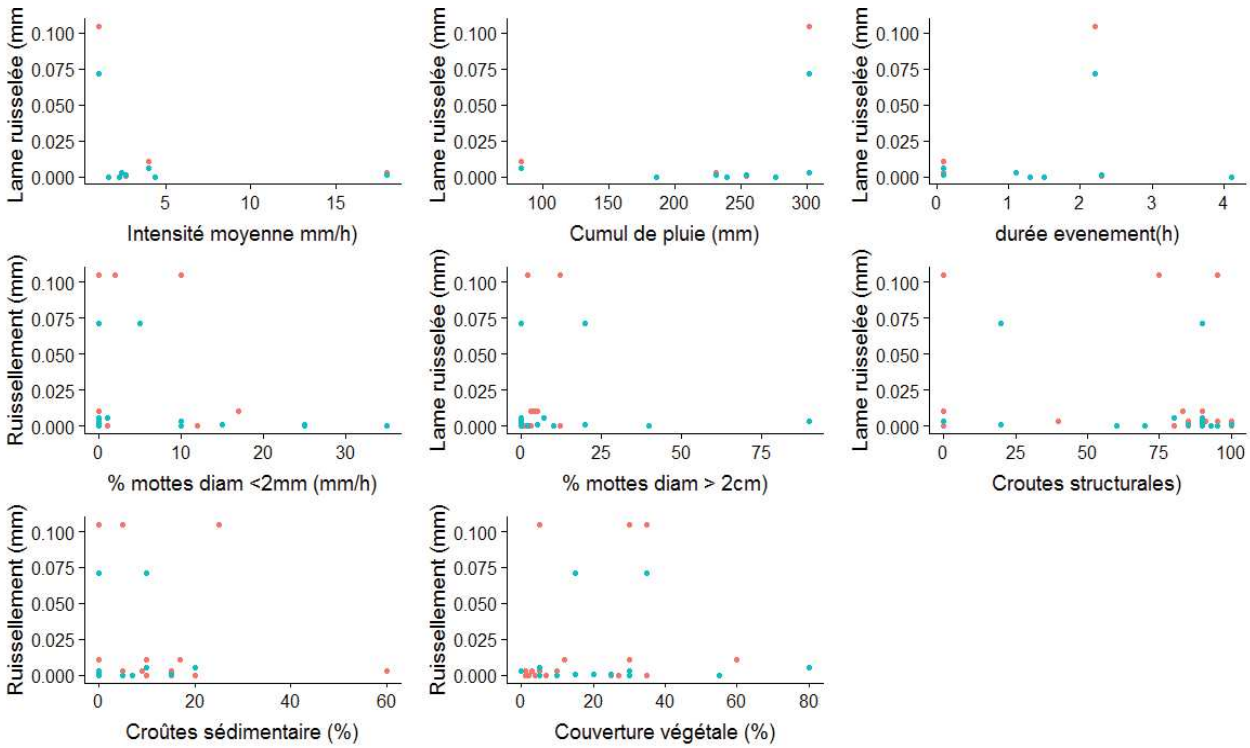



surface couverte par la végétation : BIO
surface couverte par la végétation : PI
surface couverte par la végétation : RES1
surface couverte par la végétation : RES2
Surface couverte par les résidus : BIO
Surface couverte par les résidus : PI
Surface couverte par les résidus : BIO
Surface couverte par les résidus : BIO
Couverture en %
0
20
40
60
80
100
10 40 90 180 10 40 90 180 10 40 90 180
2016
2017
2018
CPDT / Année

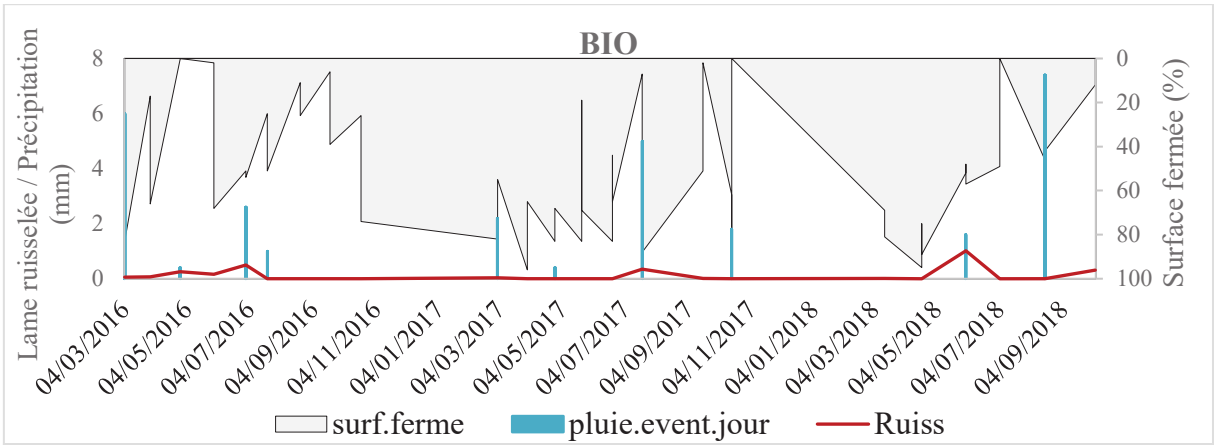
Annexe XII : : Le ruissellement cumulé par modalité en fonction de l'année site de Rouffach

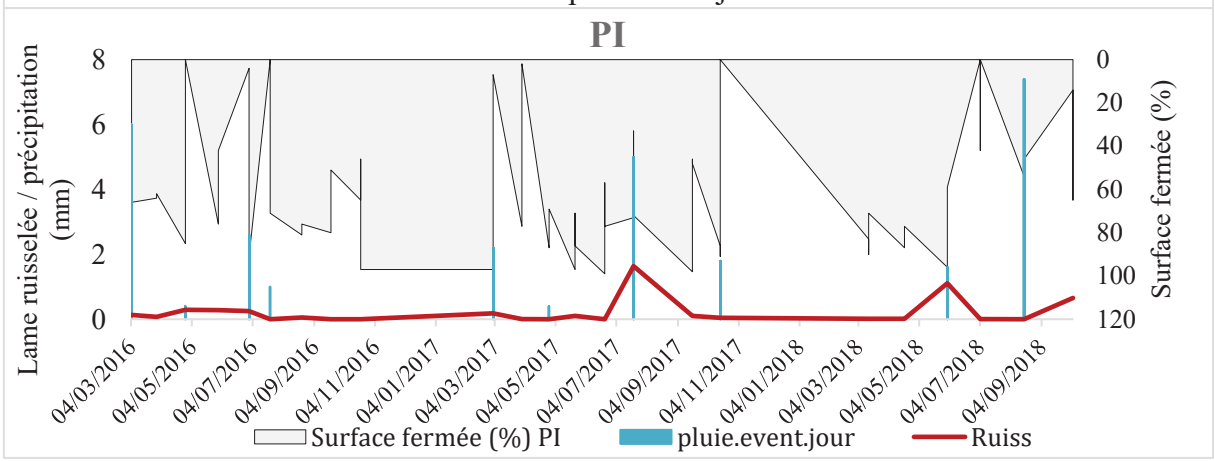


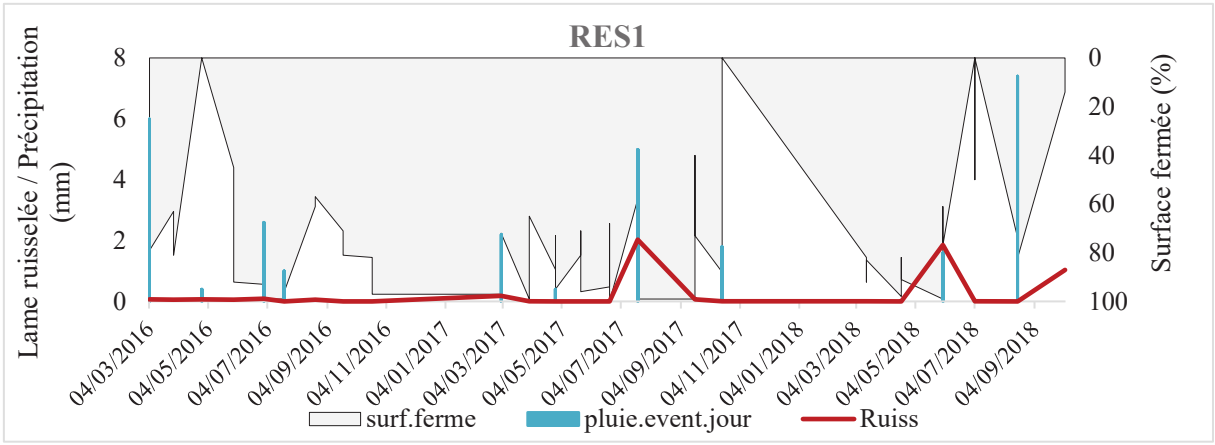
Annexe XIII : Distribution du ruissellement en fonction des EDS et les facteurs climatiques site de Rouffach

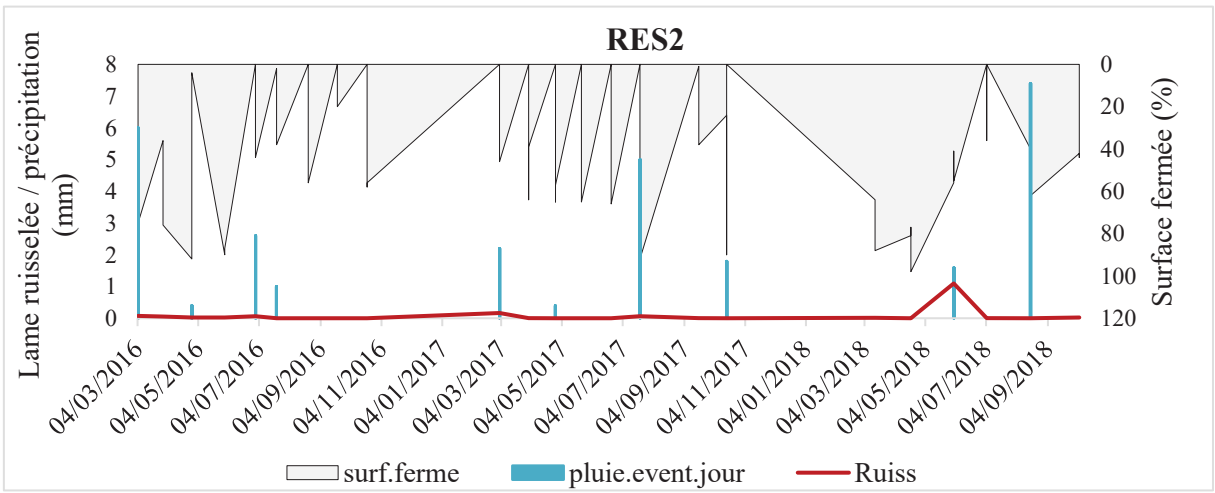


Annexe XIV :l'évolution du ruissellement de la pluie et du taux de fermeture de la surface en fonction du temps





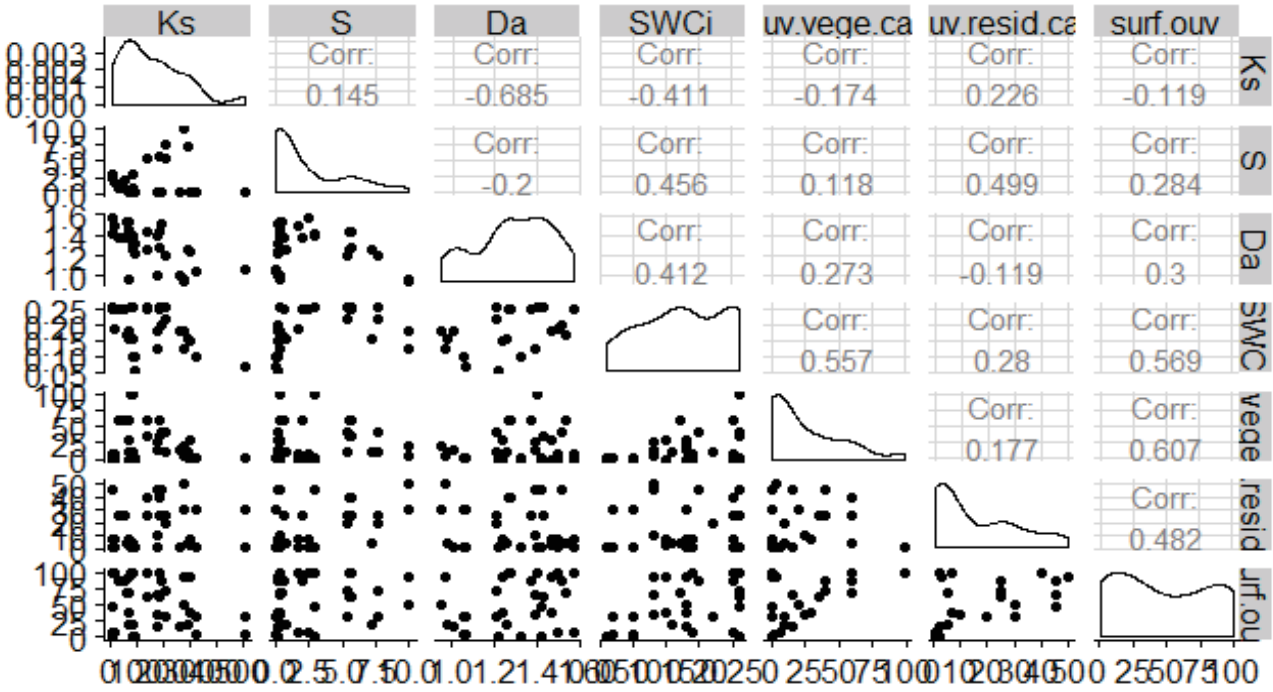




	Estimate	Std. Error	z value	Pr(>|z|)	signif	AIC
Mottes diam < 2mm	(Intercept)	2.554165	0.137622	18.559	< 2e-16	***	930.71
	ModalitePI	-0.164924	0.145129	-1.136	0.2558		
	ModaliteRES1	-0.780040	0.158225	-4.930	8.23e-07	***	
	ModaliteRES2	-0.497377	0.164497	-3.024	0.0025	**	
	MotifIRH	-0.601004	0.151795	-3.959	7.52e-05	***	
	MotifIRW	-0.221117	0.119727	-1.847	0.0648	.	
	CPDT	-0.014943	0.002113	-7.071	1.54e-12	***	
	duree.event	-0.408604	0.080868	-5.053	4.36e-07	***	
	couv.veg	-0.069464	0.007161	-9.700	< 2e-16	***	
	couv.residus	-0.028886	0.004366	-6.616	3.70e-11	***	
Mottes diam > 2cm	(Intercept)	3.296585	0.089098	37.000	< 2e-16	***	1716.4
	ModalitePI	-0.203266	0.099237	-2.048	0.040531	*	
	ModaliteRES1	-0.606650	0.105558	-5.747	9.08e-09	***	
	ModaliteRES2	-0.393790	0.119432	-3.297	0.000977	***	
	MotifIRH	-1.682956	0.115562	-14.563	< 2e-16	***	
	MotifIRW	-1.248261	0.089863	-13.891	< 2e-16	***	
	CPDT	-0.012017	0.001236	-9.721	< 2e-16	***	
	Imoy.jour	0.051083	0.019048	2.682	0.007323	**	
	couv.veg	-0.040703	0.003480	-11.695	< 2e-16	***	
	couv.residus	-0.029778	0.002813	-10.585	< 2e-16	***	
Croûtes structurales	(Intercept)	4.9157257	0.0302275	162.624	< 2e-16	***	3683.6
	ModalitePI	-0.0938478	0.0265236	-3.538	0.000403	***	
	ModaliteRES1	-0.1838954	0.0265119	-6.936	4.02e-12	***	
	ModaliteRES2	-0.1757594	0.0266541	-6.594	4.28e-11	***	
	MotifIRH	0.0325031	0.0224785	1.446	0.148187		
	MotifIRW	-0.0569019	0.0223194	-2.549	0.010790	*	
	mot.2mm	-0.1319754	0.0049654	-26.579	< 2e-16	***	
	mot.2cm	-0.0119505	0.0018594	-6.427	1.30e-10	***	
	Imoy.jour	-0.0181250	0.0047556	-3.811	0.000138	***	
	couv.veg	-0.0216591	0.0004765	-45.451	< 2e-16	***	
	couv.residus	-0.0232313	0.0006551	-35.462	< 2e-16	***	
Croûtes sédimentaires	(Intercept)	1.151011	0.913199	1.260	0.207519		459.3
	ModalitePI	1.569604	0.560526	2.800	0.005107	**	
	ModaliteRES1	1.416499	0.565242	2.506	0.012210	*	
	ModaliteRES2	-0.399061	0.635842	-0.628	0.530259		
	MotifIRH	-0.046320	0.319950	-0.145	0.884891		
	MotifIRW	0.936757	0.267465	3.502	0.000461	***	
	mot.2mm	-0.633973	0.166587	-3.806	0.000141	***	
	mot.2cm	-0.136205	0.074923	-1.818	0.069075	.	
	CPDT	0.008578	0.002018	4.250	2.14e-05	***	
	Imoy.jour	0.206526	0.035435	5.828	5.60e-09	***	
	Crout.struct	-0.029972	0.007568	-3.960	7.48e-05	***	
	couv.veg	-0.079080	0.010083	-7.843	4.40e-15	***	
	couv.residus	-0.069080	0.016249	-4.251	2.13e-05	***	
Couverture végétale	(Intercept)	3.5979099	0.0453465	79.343	< 2e-16	***	5362.8
	ModalitePI	-0.3181672	0.0354294	-8.980	< 2e-16	***	
	ModaliteRES1	-0.7232782	0.0385959	-18.740	< 2e-16	***	
	ModaliteRES2	-0.3673181	0.0397323	-9.245	< 2e-16	***	
	MotifIRH	0.2374377	0.0350367	6.777	1.23e-11	***	
	MotifIRW	0.0204189	0.0360452	0.566	0.571		
	mot.2mm	-0.2134777	0.0137340	-15.544	< 2e-16	***	
	mot.2cm	-0.0239494	0.0047486	-5.043	4.57e-07	***	
	CPDT	0.0048576	0.0002653	18.313	< 2e-16	***	
	Imoy.jour	-0.0359637	0.0066369	-5.419	6.00e-08	***	
	couv.residus	-0.0320644	0.0011927	-26.883	< 2e-16	***	

Couverture résidus	(Intercept)	3.3505377	0.0418533	80.05	<2e-16 ***	4097.8
	ModalitePI	-1.7179324	0.0711053	-24.16	<2e-16 ***	
	ModaliteRES1	-3.3148793	0.1469659	-22.55	<2e-16 ***	
	ModaliteRES2	0.5827049	0.0344909	16.89	<2e-16 ***	
	MotifIRH	-1.0016828	0.0401880	-24.93	<2e-16 ***	
	MotifIRW	-0.8201324	0.0379212	-21.63	<2e-16 ***	
	mot.2cm	-0.0422856	0.0036012	-11.74	<2e-16 ***	
	CPJ	0.0010829	0.0001083	10.00	<2e-16 ***	

Annexe XVI : Tests de corrélation entre les EDS et les propriétés hydrologiques



Annexe XVII : Facteurs de variation du ruissellement du site de Wintzenheim

```
glm(formula = Ruiss ~ couv.vege.cadr + crout.struct + crout.sedim +
    surf.ouv + couv.resid.cadr, data = EDS.Ks)

Deviance Residuals:
     Min        1Q    Median        3Q       Max
-0.72600  -0.34467   0.02093   0.26041   0.74355

Coefficients:
                Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)     -0.828426   0.387816  -2.136   0.0423 *
couv.vege.cadr  -0.035266   0.006689  -5.273 1.64e-05 ***
crout.struct     0.031633   0.005386   5.873 3.41e-06 ***
crout.sedim     -0.107063   0.014269  -7.503 5.76e-08 ***
surf.ouv         0.043679   0.004127  10.583 6.43e-11 ***
couv.resid.cadr -0.052164   0.007737  -6.743 3.73e-07 ***
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1

(Dispersion parameter for gaussian family taken to be 0.2544356)

    Null deviance: 67.1806  on 31  degrees of freedom
Residual deviance:  6.6153  on 26  degrees of freedom
AIC: 54.369
```

AGRO CAMPUS OUEST	Diplôme : Master Spécialité : Transition Environnementale Agriculture et Milieux (TEAM-Milieux) Spécialisation / option : Sol Eau Hydrosystèmes Enseignant référent : Didier Michot

Auteur(s) : Adama DIEDHIOU Date de naissance* : 22/07/1992	Organisme d'accueil : Chambre régionale d'agriculture Grand-Est Adresse : 9 rue de la Vologne, 54520 LAXOU Maître de stage : Paul van Dijk
Nb pages : 56 Annexe(s) :10	
Année de soutenance : 2019	

Titre français : Comprendre et prédire l'effet des modes de conduite des vignes sur la genèse du ruissellement

Titre anglais : Understand and predict the effects of vineyard management on runoff genesis

Résumé (1600 caractères maximum) :

Dans la démarche de lutte contre le ruissellement en Alsace (France), l'ARAA/CRAGE a développé un indicateur de la dynamique du ruissellement (IDR) pour prédire, en fonction du type de sol, des états de surface (EDS) et du climat, la production du ruissellement des systèmes de grandes cultures. L'objectif de cette étude est d'adapter cet indicateur aux systèmes viticoles. Les données de suivi (2015-2019) des EDS, d'infiltrométrie (Beerkan) et de ruissellement de 6 modalités de conduite des vignes ont été utilisées pour identifier les surfaces hydrologiquement homogènes, les facteurs de variation du ruissellement et leurs influences selon la pratique entretien du sol (enherbement, paillage et travail mécanique). Ces surfaces et facteurs sont ensuite utilisés pour configurer l'IDR-Vigne et simuler le ruissellement. Les résultats montrent un effet des pratiques sur les propriétés hydrologiques. Une couverture de 20 % de la surface par les résidus de bois ou 40 % par la végétation vivante permettent de réduire considérablement le ruissellement. Les corrélations significatives sont observées entre (i) la conductivité hydraulique à saturation et la masse volumique apparente (-0,7) ; (ii) la sorptivité et la couverture par les résidus (0,5), la teneur en eau initiale (0,45). Le modèle linéaire général a permis de sélectionner la couverture (végétale et résidus), les croûtes et l'intensité de pluie comme facteurs de variation du ruissellement. Les premières simulations de l'IDR-vigne sont encourageantes. Les périodes ruisselantes sont bien simulées mais l'indicateur manque encore de sensibilité.

Abstract (1600 caractères maximum) :

In the process to combat runoff in Alsace (France), the ARAA/CRAGE has developed an indicator of dynamic of runoff (IDR) to predict, depending on soil type, soil surface characteristics (SSC) and climate, the runoff production of arable crop systems. The aim of this study was to adapt this indicator to wine-growing systems. Monitoring data (2015-2019) from the SSC, infiltrometry (Beerkan) and runoff from 6 vine management methods were used to identify hydrologically homogeneous surfaces, factors of runoff variation and their influences according to soil practice (grassing, mulching and tillage). These surfaces and factors are then used to configure the IDR-Vine and to simulate runoff. The results show the practice effect on hydrological properties. Covering 20% of the surface with wood residue or 40% with vegetation can significantly reduce runoff. Significant correlations were observed between (i) hydraulic saturation conductivity and bulk density (-0.7); (ii) sorptivity and residue coverage (0.5), initial soil water content (0.45). The general linear model selected cover (vegetation and tailings), crust and rainfall intensity as factors of runoff variation. The first simulations of the IDR-Vine are encouraging. Runoff periods are well simulated, but the indicator still lacks sensitivity.

Mots-clés : états de surface du sol, IDR-Vigne, indicateur, résidus de bois, ruissellement.

Key Words: IDR-Vine, indicator, overland flow, soil surface characteristics, wood residue.