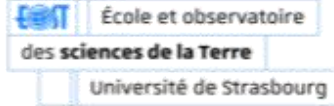




Ingénierie et géosciences
pour l'Environnement
Comprendre et gérer les risques
environnementaux de demain



École et observatoire

des sciences de la Terre

Université de Strasbourg



ÉCOLE NATIONALE DU GÉNIE DE L'EAU
ET DE L'ENVIRONNEMENT DE STRASBOURG




Gestion des risques
et histoire des coulées
d'eau boueuse

Université de Strasbourg
Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre
Master 2 « Ingénierie et géosciences pour l'environnement »

Rapport de stage

« VALIDATION D'UN INDICATEUR DE RUISSELLEMENT VIA LA DYNAMIQUE DES ÉTATS DE SURFACE DU SOL ARABLE »

05/02/2018 – 03/08/2018



Auteur : **SIVACHEVA Mariia**
Étudiante M2 ISIE

Tuteurs
professionnels : **Paul Van Dijk**
Chambre Régionale d'Agriculture Grande Est
Rémi Koller
Association pour la Relance Agronomique en Alsace

Tuteur
universitaire : **Sophie Rihs**
Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre

Structure
d'accueil : **Association pour la Relance Agronomique en Alsace**
Maison d'agriculture
Espace Européen de l'Entreprise
2, rue de Rome
Schiltigheim



Association pour la Relance Agronomique en Alsace



AGRICULTURES
& TERRITOIRES
CHAMBRE D'AGRICULTURE
GRAND EST

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier M. Paul Van Dijk et Mme Anne Schaub pour avoir vu mon potentiel et m'avoir donné cette possibilité d'effectuer mon stage au sein de l'équipe de l'Association pour la Relance Agronomique en Alsace.

J'exprime ma gratitude à M. Rémi Koller, directeur de l'ARAA, de m'avoir fait la confiance en m'intégrant au sein de son établissement et de partager ses connaissances et son expérience.

Je tiens à remercier vivement mon maître de stage M. Paul Van Dijk de m'avoir encadré durant toute la durée de mon stage et de m'avoir aidé dans la compréhension de mes missions et mes objectifs. Je vous remercie pour votre patience, vos explications et votre aide lors de la préparation de ce rapport.

Merci également à Joëlle Sauter d'avoir partagé avec moi ses connaissances du sol et de m'avoir acceptée pour la participation aux activités de l'association.

Un grand merci à toute l'équipe de l'ARAA pour votre accueil, votre gentillesse et votre passion du métier. Faire mon stage de dernière année dans votre entreprise a été un plaisir, j'ai pu découvrir le milieu des recherches agricoles et mieux m'orienter dans mes futurs projets.

Je tiens également à remercier l'ensemble du personnel de la Chambre d'Agriculture d'Alsace.

TABLE DE MATIERES

Introduction	3
1. Contexte	3
2. Objectif de stage	4
3. Structure d'accueil	4
Synthèse bibliographique	5
1. Importance du travail du sol: son impact sur la structure de sol	5
2. Influence des états de surface et du sol sur la genèse de ruissellements	6
3. Outils d'évaluation d'impact des EDS sur le ruissellement existant	7
Geispitzen : description du site	14
Méthodes d'observation	15
1. Schéma fonctionnel	15
2. Dynamique des états du sol	16
3. Pluviométrie et ruissellements	18
Jeu de données	19
Résultats et discussion	20
1. Dynamique des états de sol	20
2. Validation de modules de l'ldr	24
pistes d'amélioration	31
Conclusion	32
bibliographie	33
Annexe	36

TABLE DE FIGURES

Figure 1. Les données d'entrées, les processus et les résultats finaux de l'indicateur de dynamique du ruissellement	8
Figure 2. Le site de Geispitzen, 3 parcelles du dispositif	14
Figure 3. Le schéma fonctionnel du travail	16
Figure 4. Le dispositif de suivi de la qualité d'eau	18
Figure 5. L'exemple de mesure de la rugosité à la chainette	19
Figure 6. Pourcentage de la surface couverte par des résidus	20
Figure 7. L'évolution des états de surface au cours d'un mois selon le travail du sol	21
Figure 8. L'évolution des résidus sur la surface, Non-labour (parcelle C)	24
Figure 9. L'évolution de la rugosité aléatoire de surface des parcelles	25
Figure 10. La corrélation entre les valeurs de rugosité simulées et observées	25
Figure 11. La variation de l'humidité au cours d'une année	26
Figure 12. Les résultats de la première simulation, Labour (parcelle A)	27
Figure 13. Les résultats de la simulation finale, Labour (parcelle A)	27
Figure 14. La proportion des ruissellements simulés, Labour (parcelle A)	28
Figure 15. Les résultats de la première simulation, Non-labour (parcelle C)	28
Figure 16. Les résultats de la simulation finale, Non-labour (parcelle C)	29
Figure 17. La proportion de ruissellements simulés, Non-labour (Parcelle C)	30

TABLE DE TABLEAUX

Tableau 1. Classification de rugosité	17
Tableau 2. Classification de la quantité des croûtes de battance sur la surface	17
Tableau 3. Données disponibles pour le travail	19
Tableau 4. Comparaison des résultats d'estimations visuelles et de calculs	22
Tableau 5. Résultats de classification de la rugosité et de croûtes de battance	22
Tableau 6. Quantité de ruissellements sur la parcelle A et C	23

LISTE D'ABBREVIATIONS

ARAA - Association pour la Relance Agronomique en Alsace

CAA - Chambre d'Agriculture d'Alsace

CRA GE - Chambre Régionale d'Agriculture Grand Est

DIAR - Diagnostic Agronomique de Ruissellement

EDS - Etats De Surface

I_{DR} - Indicateur de la dynamique de ruissellement

INRA - Institut National de la Recherche Agronomique

LISEM - Limburg Soil Erosion Model

MESALES - Modèle d'Evaluation Spatiale de l'ALéa Erosion des Sols

SCEA - Société Civile D'exploitation Agricole

SD - Semis Direct

STREAM - Sealing and Transfer by Runoff and Erosion in relation with Agricultural Management

TCSL - Techniques Culturelles Sans Labour

USDA - United States Department of Agriculture

WEPP - Water Erosion Prediction Project

INTRODUCTION

1. Contexte

Avec 12% des surfaces agricoles Françaises présentant un risque majeur à l'érosion du sol (Pointereau et al, 2014) ainsi qu'avec l'augmentation de l'intensité des événements pluvieux (www.meteofrance.com), les coulées d'eau boueuse représentent une problématique préoccupante des points de vue environnemental, sociétal, économique et agronomique. Notamment en Alsace de nombreuses communes sont touchées par des coulées d'eau boueuse à la suite des fortes précipitations orageuses tombées sur des champs peu couverts par la végétation (Auzet et al. 2005 ; Van Dijk et al. 2016). C'est ainsi que cette année "l'Alsace a vécu un épisode particulièrement violent dans la nuit du 31 mai au 1er juin" (France 3) provoquant de nombreux dégâts pour les riverains en aval des zones cultivées. En outre, les agriculteurs sont aussi touchés car les ruissellements érosifs enlèvent une partie de la couche de terre arable et des fertilisants apportés, et peuvent plus en aval causer des dégâts aux plantules dans les zones de dépôts des sédiments. En Alsace, une analyse des évolutions des facteurs déterminants de l'érosion montre (Van Dijk et al. 2016) :

- Une forte augmentation de la part des terres arables exposée aux forces érosives sous l'effet de la spécialisation des productions végétales (maïs en particulier) et de la diminution de l'élevage ;
- Une augmentation probable de l'érosivité des précipitations due au changement climatique ;
- Une érodibilité des sols en augmentation en lien avec une décroissance du taux de matière organique des sols agricoles dans certains secteurs sous l'effet des changements des systèmes de culture.

Le diagnostic MESALES (Cerdan et al. 2006) réalisée par l'ARAA montre qu'environ 200 communes d'Alsace sont sensibles à l'érosion du sol. Les principaux secteurs concernés par les problèmes de l'érosion du sol sont le Sundgau, le Kochersberg, les collines de Brumath et l'Outre-Forêt. Ce sont les zones de collines limoneuses occupées pour la plus grande part de la surface agricole utile par des grandes cultures : maïs, céréales et betteraves (Van Dijk et Koller, 2015). La teneur en matière organique de ces sols est souvent faible ce qui augmente leur érodibilité autrement dit leur susceptibilité à l'érosion (Nouvelot, 1992). En plus ces régions naturelles sont caractérisées par un régime pluviométrique à fortes intensités en fin de printemps et début de l'été, à une période où les cultures d'été couvrent peu le sol.

Les pratiques agricoles en France s'appuient encore beaucoup sur le travail du sol profond car il est associé à un bon rendement agricole. Ce travail mécanique modifie fortement la structure du sol et les états de surface (EDS) (Auzet, Kirkby et Van Dijk, 2005) tels que la microtopographie et la couverture du sol par les résidus de culture. Le travail du sol impacte ainsi l'infiltration et le stockage d'eau en surface (Armand 2009 ; Bouchra, 2008). De plus le travail du sol conditionne la profondeur de la distribution des matières organiques et l'activité biologique et ainsi la stabilité structurale du sol proche de la surface. Cette dernière est étroitement liée à la sensibilité à la battance c'est-à-dire la formation des croûtes très peu perméables sous l'impact de la pluie. Les EDS jouent le rôle d'indicateurs permettant d'expliquer l'apparition des événements de ruissellement hortonien (Armand, 2009).

Dans le cadre de la lutte contre l'érosion du sol, les Chambres d'Agriculture travaillent avec plusieurs acteurs et propose différentes mesures : l'installation des fascines, l'assolement concerté, les bandes enherbées ou encore les Techniques Culturelles Sans Labour (TCSL ou "non labour") (www.alsace.chambagri.fr/eau-et-agriculture.html). Parmi ces mesures, les TCSL peuvent être considérées comme des mesures préventives car elles augmentent l'infiltrabilité du sol et la résistance du sol à l'arrachement. C'est pourquoi elles "font partie des itinéraires privilégiés" (Fritsch, 2015) pour lutter contre l'érosion. Ces techniques sont caractérisées par l'absence de retournement du sol et la présence d'un mulch constitué de résidus de cultures sur la surface. Ces résidus protègent le sol contre l'impact de la pluie. Un autre effet des TCSL est l'augmentation progressive à moyen terme de la stabilité structurale du sol (Le Bissonnais, 2000 ; Boizard, 2014).

Dans ce contexte l'Association pour la Relance Agronomique en Alsace (ARAA) a développé un outil permettant d'évaluer la dynamique du ruissellement sur une parcelle agricole en fonction des caractéristiques de son sol et de la conduite de la parcelle sur une succession culturale, en reconstituant l'évolution temporelle des états structuraux du sol et de sa surface durant la succession de cultures. Cette méthode nommée « indicateur de dynamique de ruissellement » (I_{DR}) a pour objectif de trouver des solutions pour limiter les ruissellements en intervenant dans le système de culture. Ainsi l'agriculteur peut lui même intervenir pour limiter l'érosion sur ces parcelles et contribuer à diminuer l'ampleur des coulées d'eau boueuse dans les villages en aval.

2. Objectif de stage

L'objectif principal de ce stage est de contribuer au développement de l'indicateur de ruissellement I_{DR} pour l'évaluation des périodes à risque élevé de genèse de ruissellement par la validation des différents modules d'outils, en valorisant les données collectées sur le site d'observation de Geispitzen dans la période de 2006 à 2013. Cette mission principale se divise en deux missions précises :

- Créer une base de données des mesures réalisées sur le site, incluant les débits du ruissellement, les événements pluvieux, la couverture par les résidus de cultures, la rugosité de surface et la densité apparente de la terre végétale
- Valider le fonctionnement du modèle par la confrontation des résultats de simulations aux observations. Au passage, l'identification des faiblesses du modèle et la proposition des pistes d'amélioration sont attendues.

Ce travail va également permettre de mieux comprendre les liens entre la dynamique des états de surface, les caractéristiques du sol et la genèse du ruissellement sur des parcelles agricoles ainsi que définir les conditions ruisselantes.

3. Structure d'accueil

L'Association pour la Relance Agronomique en Alsace créée en 1984 travaille dans le domaine de la recherche appliquée et met en œuvre l'appui technique agronomique aux différents acteurs agricoles régionaux afin de répondre aux enjeux du contexte dans la région. Son activité se base sur deux programmes principaux :

- Un programme agronomique régional (appui technique au conseil agricole) ;
- Un programme de recherche et développement (en partenariat avec l'INRA Colmar)

Les buts des travaux réalisés à l'ARAA sont de répondre aux questions actuelles agricoles, telles que la productivité et la qualité des productions végétales dans un contexte environnemental concerné par la préservation du sol et la qualité des eaux. Ils visent aussi à établir un dialogue entre les agriculteurs, les conseillers, les porteurs d'enjeux et les chercheurs.

Les membres de l'équipe de l'ARAA travaillent pour développer une agriculture durable en Alsace en 3 missions :

- Renforcer la connaissance des sols
- Elaborer les nouvelles références techniques
- Prévoir l'impact des pratiques agricoles sur les milieux, l'évaluer et agir

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Sur les territoires de grandes cultures, plusieurs facteurs naturels et anthropiques liés aux modes d'occupation du sol et aux techniques culturales augmentent la sensibilité du sol à l'érosion. L'érosion hydrique commence lorsque les eaux de pluies ne peuvent plus être absorbées par le sol et ruissellent en surface.

Ce chapitre rappelle les facteurs qui influencent l'apparition de ruissellement sur terre agricole, ainsi que la dynamique des états de surface du sol. Il s'agit d'appréhender pourquoi et comment le travail du sol peut affecter la structure du sol et l'évolution de la surface pour après caractériser les conditions ruisselantes.

Les outils de modélisation permettant d'évaluer l'impact de différents états de surface sur la formation de ruissellement seront ensuite présentés.

1. Importance du travail du sol : son impact sur la structure de sol

Plusieurs auteurs soulignent les incidences du travail de sol sur l'évolution structurale proche de la surface de sol. En effet, la structure du sol évolue à la suite de plusieurs types de processus : naturels, abiotiques ou ceux liés à l'activité agricole, surtout le travail mécanique du sol.

Le terme de système de culture a été défini par Sebillotte (1974) comme suit : « un système de culture est l'ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles cultivées de manière identique. Chaque système se définit par : la nature des cultures et leur ordre de succession, les itinéraires techniques appliqués à ces différentes cultures, ce qui inclut le choix des variétés ». L'itinéraire technique ayant été lui-même défini comme une « combinaison logique et ordonnée de techniques qui permettent de contrôler le milieu et d'en tirer une production donnée. » (Sebillotte, 1974). Le travail mécanique du sol ayant un effet global sur les caractéristiques des sols représente une composante importante des systèmes de culture. Ce terme rassemble toutes les opérations mécaniques fragmentant le sol. Les impacts directs ou indirects de ce travail déterminent la répartition verticale des résidus de cultures, du stock de graines d'adventices, des amendements ou des minéraux dans les couches superficielles du sol. Les autres caractéristiques chimiques, physiques, organiques, biologiques et hydriques de la terre se différencient aussi selon le type d'opérations appliquées. Le travail du sol impacte la structure physique du sol et le système poral par sectionnement, découpage, éclatement, retournement, soulèvement et/ou affinement en fonction du type d'éléments travaillants (dents, disques, lames, bêches). Ces actions créent des mottes, de la terre fine, des tassements, des cavités et des dépressions sur la surface. De plus la présence ou non du labour détermine la quantité de résidus présents en surface qui ont un rôle important dans la protection contre l'érosion du sol et commande la répartition de flux d'eau et de chaleur (Labreuche et al, 2014). Les travaux plus grossiers peuvent assurer une meilleure résistance à la dégradation alors qu'un fort affinement conduit à une reprise en masse plus rapide à la suite des précipitations.

Il est possible de distinguer trois grands types du travail de sol : Labour – travail profond, Techniques Culturelles Sans Labour (TCSL) et Semis Direct (SD) – absence du travail du sol (Labreuche et al, 2014). Le labour est un travail du sol conventionnel qui consiste en un retournement du sol après la récolte. Les techniques sans labour visent à travailler le sol sans le retournement avec un mélange de résidus dans le volume travaillé ; les interventions sont constituées de passages d'outils à dent ou à disques principalement. Enfin le semis direct n'envisage aucun travail du sol sauf le semis de la culture directement dans les résidus de cultures précédentes. Encore une opération intermédiaire entre TCSL et SD nécessite d'être expliquée : le Strip Till. Le Strip Till présente un travail du sol superficiel en bandes uniquement dans les lignes de semis ; la surface entre ces lignes n'est pas modifiée.

Les systèmes de culture en interaction avec les traits du climat au cours d'une année et le type du sol induisent un certain "calendrier" de la dynamique des états de surface et de la structure de l'horizon travaillé (Imeson et Kwaad, 1990). Ils sont conditionnés par les cultures présentes dans la région et le type d'opération appliquées à un moment donné. Par exemple, le travail du sol (labour et préparation de semis) conduit d'abord à une augmentation immédiate de l'infiltrabilité du sol par la création d'une porosité d'origine mécanique importante : les agrégats ne sont pas liés entre eux, la surface est meuble, poreuse. Par la suite cette porosité est diminuée sous l'effet des précipitations par la reprise en masse de la couche travaillée et/ou par la formation des croûtes de battance (Papy et Boiffin, 1988). Ceci conduit à une diminution progressive et parfois importante de l'infiltrabilité en fonction du caractère des précipitations et de la stabilité structurale du sol proche de la surface. Les facteurs naturels tels que les racines, la faune, le climat, les précipitations agissent également sur la structure de sol.

2. Influence des états de surface et du sol sur la genèse de ruissellements

Les précipitations et leurs ruissellements constituent la cause principale de l'érosion du sol. Cependant ce processus peut se produire plus ou moins vite en fonction des autres facteurs tels que la nature et la structure du sol, la couverture végétale, la pente et l'action anthropique (Nouvelot, 1992). Quant à la surface du sol, ses caractéristiques tels que la cohésion des particules, la rugosité du sol, sa couverture par les végétaux et les résidus, les croûtes, ... influencent à la fois le fonctionnement hydrologique du sol (infiltration) et hydraulique car ils définissent la résistance hydraulique rencontrée par l'eau qui s'écoule sur la surface. Ainsi une surface rugueuse (motteuse, avec des obstacles végétaux) va limiter la vitesse du ruissellement et son érosivité et de ce fait favoriser l'infiltration. Les états de surface (EDS) jouent donc un rôle crucial dans la formation du ruissellement et son comportement (Armand et al, 2009 ; Rabot et al, 2018).

Les états de surface des parcelles et les caractéristiques des pluies sont mis en relation avec les processus de dégradation des couches superficielles. La probabilité d'érosion dépend du degré de développement de croûtes de battance, de la rugosité de surface, de la présence de traces de roue et de la teneur en matière organique dans le sol (Boiffin, 1988). Lorsque les ruissellements ont lieu sur les terres agricoles ce sont donc les paramètres sur lesquels les solutions peuvent être apportées. Le but de ce travail est de préciser la dynamique de ces caractéristiques et leur contribution à la genèse de ruissellements, ainsi que de valider un outil informatique développé à l'ARAA permettant d'évaluer le potentiel d'apparition d'écoulements.

Les ruissellements apparaissent lorsque le sol ne peut plus absorber les eaux de pluies. Ils démarrent quand l'intensité de pluie dépasse l'infiltrabilité de la surface, soit le ruissellement hortonien, ou encore quand le sol est saturé – le ruissellement par saturation. La genèse du ruissellement se produit en plusieurs étapes. Premièrement, une partie des précipitations est interceptée par la végétation et le reste atteint le sol directement et va s'infiltrer. Si une partie de la pluie qui tombe sur la surface ne peut plus s'infiltrer (soit car l'intensité de pluie est supérieur à l'infiltrabilité du sol, soit parce que le sol s'est saturé ("le seau déborde")) des flaques se forment en surface. Cet excès d'eau occupe alors les dépressions dans le microrelief du sol (agrégats créés par le travail du sol, résidus de culture). Lorsque le volume d'eau dans les cavités dépasse leur capacité de stockage, le ruissellement se forme. Une fois formé, il continue son mouvement dans le sens de la pente ou dans le sens des motifs agraires tels traces de roues, des dérayures, des sillons, et peut arracher au passage des particules de terre. Cet arrachement se traduit en formation de traces d'érosion du sol avec les écoulements boueux par la suite.

L'évolution des EDS est fonction de la pluie et de la stabilité structurale du sol. La stabilité structurale définit la résistance du sol à la dégradation sous l'action de l'eau (Le Bissonnais et Le Souder, 1995 ; Rabot et al, 2018). La dynamique de la stabilité structurale en fonction des modes de travail ou non-travail du sol fait l'objet de nombreuses études. Très souvent c'est la matière organique qui est son paramètre déterminant. En travail réduit, la présence d'une litière à la surface

du sol favorise le développement des champignons et l'abondance des vers de terre anéciques. Ces organismes agissent en sécrétant des composés organiques qui sont des ciments et augmentent la cohésion entre les particules. Ceci rend les agrégats plus résistants aux actions de pluie (Le Bissonais et Le Souder, 1995 ; Boizard, 2014). En revanche, le travail du sol perturbe les processus d'agrégation et la stabilité structurale décroît avec les temps (Bronick et Lal, 2005). Quant aux résidus, eux-mêmes se décomposent sous l'effet de la température, l'humidité, pH du sol, ainsi que du ratio entre Carbone et Azote, des propriétés biologiques, de l'âge et la taille des matériaux (Gregory, 1985).

Pour pouvoir ruisseler, l'eau doit dépasser les obstacles en forme de résidus ainsi qu'éviter le piégeage par la surface ouverte tels que les zones motteuses perméables, les fissures et les pores. L'importance de ces zones est traduite par la rugosité de surface. C'est un élément important et déterminant dans l'étude de l'érosion et des ruissellements. La rugosité des lits de semis peut être caractérisée par le paramètre "rugosité aléatoire" (anglais : random roughness ; Zobeck et Onstadt, 1987) qui représente l'écart type des altitudes à l'échelle des éléments rugueux (agrégats). Après le travail du sol, l'action dégradante des pluies engendre une diminution progressive de la rugosité. L'hypothèse faite est que celle-ci ralentit les ruissellements d'eau non-infiltrée.

Les résidus végétaux présentent pour de nombreux auteurs la réserve d'enrichissement en matière organique et donc la contribution à la stabilité structurale du sol (Armand, 2008 ; Roger-Estrade, 2010). En outre, ils composent une protection physique de la surface en interceptant la pluie et diminuent son énergie cinétique. En plus le mulch représente des petits obstacles pour le ruissellement et ralentit la propagation d'eau en aval.

Sur les sols limoneux, la quantité de mottes scellées dans les croûtes est un indicateur du niveau de dégradation du sol (Le Bissonais, 2000 ; Armand, 2008). C'est un critère important affectant l'infiltrabilité du sol et agissant sur la formation de coulées de boue. Le scellement de mottes est défini comme la fusion de la base des mottes avec les croûtes environnantes. Dans un premier temps le sol est meuble et poreux après le travail du sol. Il a une forte infiltrabilité et capable d'infiltrer la plupart des pluies. Cependant, les précipitations, intervenant, colmatent la surface en détachant des particules. Les croûtes structurales se forment alors sous l'effet des pluies. La formation de croûtes sédimentaires est due aux dépôts des particules détachées dans les flaques et elles sont caractérisées par une stratification et une surface très lisse (Le Bissonais, 2000). Les gouttes de pluies par leur énergie cinétique provoquent l'arrachement des particules du sol. L'eau ruisselée les transporte lors de mouvements et les particules sédimentent dans les micro-dépressions topographiques en formant les croûtes sédimentaires. Si la plupart de la surface est couverte par les croûtes structurales ou sédimentaires, sa porosité structurale est très faible tandis que la densité apparente est plus importante. De façon paradoxale : la formation de croûte de battance augmente la résistance du sol à l'arrachement mais elle diminue énormément l'infiltrabilité (Van Dijk et al, 1996). C'est la condition favorisant les écoulements.

3. Outils d'évaluation d'impact des EDS sur le ruissellement existant

Il existe différents modèles permettant diagnostiquer la dynamique de la production des ruissellements sur des parcelles agricoles liées aux systèmes de culture. Un des outils marqués dans la littérature est le modèle DIAR – Diagnostic Agronomique de Ruissellement – développé à l'INRA Versailles-Grignon. Cet outil permet d'évaluer la pression de ruissellement issue des différents types d'exploitation agricole en tenant compte le système de culture utilisé. Il donne les résultats décennaires et peut être utilisé en couplage avec des modèles hydrologiques spatialisés tels que STREAM ou LISEM. Les résultats de DIAR permettent de raisonner la gestion des parcelles pour réduire la production de ruissellement qui génère de coulées boueuses (Martin et al, 2010). DIAR utilise 6 phases pour décrire l'évolution des états de surface du sol qui sont ensuite utilisées pour déterminer le « curve number » (SCS, 1956 et 1972). Il s'appuie sur des données pluviométriques avec un pas de temps journalier ce qui n'est pas compatible avec une appréciation

juste du risque de ruissellement hortonien pour lequel les intensités des précipitations sont déterminantes. Dans notre travail, un autre outil est utilisé et il sera présenté dans le chapitre suivant.

Indicateur de dynamique du ruissellement

L'Indicateur de dynamique du ruissellement I_{DR} est un outil informatique développé à l'ARAA permettant d'évaluer le potentiel de ruissellement au cours d'une rotation sur une parcelle agricole. Ce potentiel est déterminé par la simulation de l'évolution de la structure de surface en fonction des multiples facteurs tels comme le climat (pluviométrie, températures), le sol (texture, teneur en matière organique) le type de travail du sol et les autres facteurs tels que rotation, couvert végétal, gestion de résidus. Cet outil permet de diagnostiquer les périodes à risques élevés de ruissellement et rechercher les solutions pour les agriculteurs pour limiter ces risques. Les moyens peuvent s'appuyer sur la gestion des résidus (récolter ou pas), la rotation, les outils de travail du sol (type) et leur profondeur, les couverts végétaux et l'ensemble de tous les facteurs (Van Dijk, 2014).

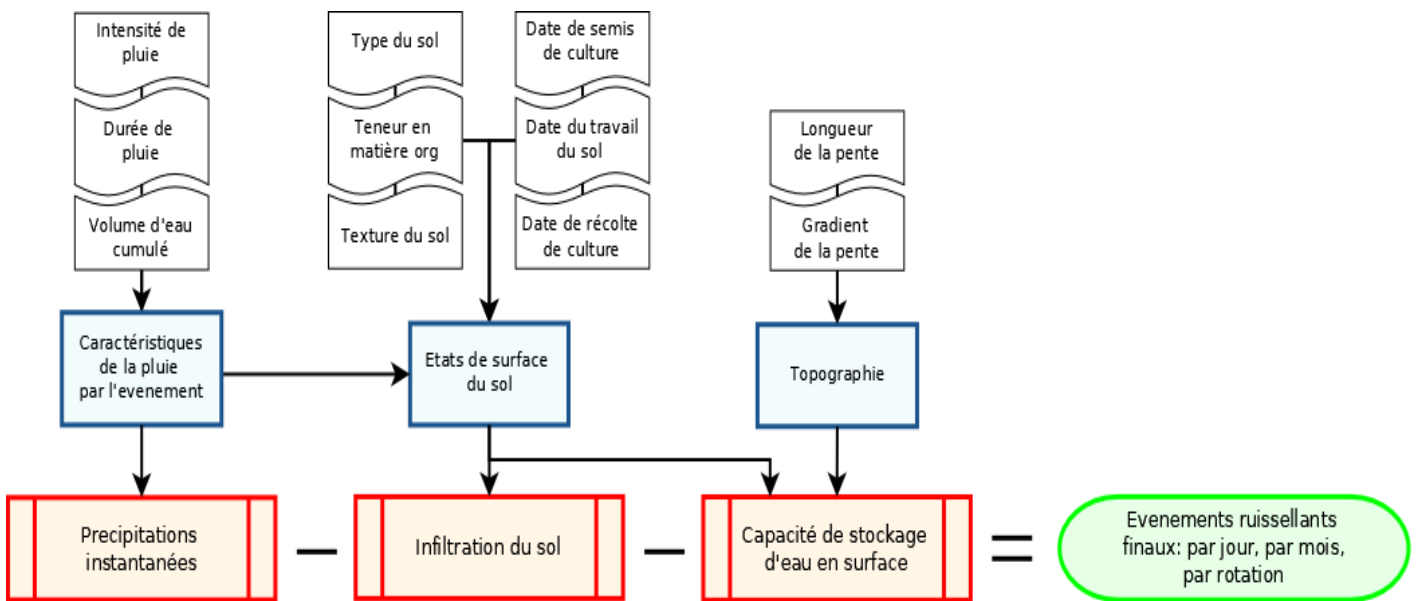


Figure 1. Les données d'entrées, les processus et les résultats finaux de l'indicateur de dynamique du ruissellement

Les principes de l' I_{DR} sont présentés sur la Figure 1. L'excès d'eau est estimé en comparant l'infiltrabilité du sol et la précipitation instantanée. Une fois que le surplus de pluie dépasse la capacité de stockage du sol, il peut provoquer les ruissellements superficiels.

L'ensemble des états de surface ainsi que la texture du sol et sa teneur en matière organique et l'humidité au début d'événements pluvieux déterminent l'infiltrabilité du sol. Comme le montre la Figure 1 les caractéristiques du système de culture et travail du sol influencent les états du sol tels que la rugosité de surface et la porosité de la couche arable. Le labour par exemple a un impact direct alors que la couverture par les plantes donne un effet indirect en protégeant la surface. En plus les gouttes de pluies, par leur énergie cinétique, influencent les états de surface du sol en entraînant les processus de battance, d'encroûtement et de consolidation après le travail du sol. L'infiltrabilité présente une forte variation selon la période d'année. De plus, la température et les précipitations conditionnent l'humidité initiale du sol qui impacte les processus d'infiltration. Enfin, les états de surface du sol et la teneur en matière organique conditionnent la vitesse de dégradation du sol en affectant sa stabilité structurale. Tous ces processus sont liés par des équations trouvées dans la littérature et données ci-dessous.

Calcul de la rugosité de surface :

L'évolution de la rugosité est estimée à l'aide des équations utilisées dans le projet de prévision de l'érosion hydrique (WEPP) et inspirées de Potter et al (1990). La rugosité aléatoire après de passage d'un outil du travail, dite initiale, est calculée selon la formule suivante :

$$RR_i = f_{sol} RR_{i-outil} \frac{100 + 0.5C_r}{100}$$

Où RR_i - rugosité aléatoire initiale directement après le passage de l'outil de travail du sol ($t=0$) en fonction de l'outil et la texture du sol, m

$RR_{i-outil}$ - rugosité aléatoire créée par l'outil de travail de sol, en fonction de ces caractéristiques, la profondeur de passage, et la vitesse d'avancement. Les valeurs de base sont issues des tableaux de correspondance de WEPP (USDA, Flanagan et al, 1995), m

f_{sol} - facteur de rugosité lié au sol, valeurs par classe texturale dans un tableau de correspondance (USDA, 2003), ici 1.02 pour le sol du site de Geispitzen à texture limono-argileuse (LA). Ce facteur est inférieur à 1 pour les sols sableux et supérieur à 1 pour les sols argileux qui laisse une surface plus rugueuse après le passage d'un outil de travail du sol

C_r - couverture par les résidus de culture, %. Ces résidus ont tendance à augmenter la rugosité du sol après un travail du sol.

L'évolution de la rugosité de sol nu sous l'influence de la pluie par la suite est calculée au pas de temps journalier :

$$RR_{sol\ nu,t} = RR_{sol\ nu,t-1} e^{-\frac{P_t}{S_{stab}}}$$

Où RR_t - rugosité aléatoire au jour t , m

RR_{t-1} - rugosité aléatoire au jour précédent de jour t , m

P_t - pluie tombée le jour t (mm)

S_{stab} - paramètre de stabilité structural du sol, fonction de la structure du sol via l'indice de battance (I_B)

$$S_{stab} = 1000/I_B$$

$$I_B = 5 (I_s - 0.2)$$

$$I_s = \frac{1.5L_f + 0.75L_g}{A + 10MO} - C$$

$$pH > 7 \rightarrow C = 0.2(pH - 7) ; pH \leq 7 \rightarrow C = 0$$

Où I_s , I_B : indice de stabilité, indice de battance (-)

L_f : limons fins (%)

L_g : limons grossier (%)

A : argiles (%)

MO : matières organiques (%)

En faisant l'hypothèse que la surface couverte par les résidus de culture n'est pas concernée par la dégradation ($RR_{resi} = RR_i$), la rugosité finale peut être calculée :

$$RR_t = \frac{(100 - C_{resi})RR_{sol\ nu,t} + C_{resi}RR_{resi}}{100}$$

Il faut noter que les résidus jouent un rôle important dans la détermination de la rugosité. Le sol nu est souvent moins rugueux que le sol couvert par les résidus après le travail du sol. Aussi la texture du sol définit cette caractéristique : les sols argileux sont plus rugueux et motteux que les sables. Par ailleurs, la valeur minimum de RR est fixée à 5 mm.

Calcul de la couverture de la surface par les résidus de culture :

Pour estimer le pourcentage de la surface couverte par les résidus de culture, l'approche de Gregory et al. (1985) est utilisée. L'équation calcule la matière sèche du jour t en fonction de la quantité de la matière sèche du jour précédent.

$$\frac{M}{M_0} = (1 - \alpha\tau)^2$$

Où M – masse de résidus, kg/ha

M_0 - masse de résidus initiale, kg/ha

α – constante issue de littérature, ici 1.1

τ - variable pondérée

Cette variable τ est une fonction de la température moyenne journalière, de l'indice de l'humidité antécédent et du rapport C/N du résidu de culture :

$$\tau = \frac{T_t A_m}{C/N}$$

Où t – temps, jour

T – température, °C

A_m – indice de l'humidité antécédent, mm

$$A_m = \sum_{i=1}^5 \frac{P_i}{i}$$

L'indice de l'humidité antécédent est une fonction de la pluie précédente des derniers 5 jours. Les valeurs supérieures à 0,01 m sont fixées à 0,01 m pour limiter la décomposition calculée pendant les périodes de fortes précipitations.

Calcul de l'humidité du sol :

L'approche pour estimer l'humidité du sol pour les couches superficielles est basée sur le modèle de Kohler et Linsley (1951) qui a l'avantage de rester simple et peu gourmand en données d'entrée :

$$API_t = P_t + API_{t-1}k_t$$

Où API_t - indice d'humidité au jour t, mm

P_t - précipitation du jour t, mm

k_t - coefficient du déclin est fonction du temps, la profondeur et les conditions météorologiques, estimé par la fonction inverse de la température:

$$k_t = k_{max} - \frac{T_t - T_0}{T_{mm} - T_0}(k_{max} - k_{min}) \quad \text{pour } T_t \geq T_0$$

Où k_t, k_{min}, k_{max} - coefficient de déclin le jour t, minimale et maximale respectivement

T_t - température au jour t

T_0 - température en dessous laquelle $k_t = k_{max}$, ici égale à 0 °C

T_t - température maximale en moyenne mobile sur 10 jours (°C), ici environ 26 °C

Le coefficient de déclin est également fonction de la profondeur du sol sur laquelle il serait intéressant d'évaluer l'humidité. Selon la littérature, ces grandeurs varient entre 0.72 pour faibles profondeurs et 0.99 pour les profondeurs plus importantes. Dans cette étude la couche superficielle du sol (0 à 15 cm) est plus essentielle, pour cette profondeur les valeurs suivantes sont retenues: $k_{min} = 0.91$ en juillet et $k_{moy} = 0.995$ en janvier selon Blanchard (1979). Par la suite une équation permettant de calculer la teneur en eau de la couche de 0 à 15 cm (sm_t) est appliquée:

$$sm_t = 1.992 + 0.992 \left(\frac{API_t}{10} \right)^{0.61}$$

La teneur en eau est divisée sur 15 après afin de trouver l'humidité volumique.

Calcul de la densité apparente du sol :

La dynamique de la densité apparente du sol est calculée comme la fonction du travail du sol et de la pluie. La densité apparente est réduite par le travail du sol, car la macroporosité est très augmentée. Par la suite, la prise en masse de la couche travaillée du sol sous l'effet de la pluie augmente la densité et peut atteindre sa valeur matricielle.

La densité matricielle est estimée selon approche Saxton et Rawls (2006). La formule est présentée dans **Annexe 1. Formules pour estimer les caractéristiques du sol.**

Par la suite l'effet du travail du sol est pris en compte selon la formule suivante :

$$DA_t = DA_{t-1} - F_p DA_{t-1} + \frac{2}{1 + f_{sol}} F_p \frac{2}{3} DA_{matr}$$

Où DA_{matr} - densité apparente matricielle, g/cm³

DA_{t-1} - densité apparente au jour précédent, g/cm³

F_p - fraction de la surface du sol perturbée par le travail

L'hypothèse faite que le travail du sol diminue la densité apparente matricielle à $\frac{2}{3}$ est inspirée des valeurs mesurées directement sur la parcelle après le semis.

Les jours sans intervention de travail du sol, la densité apparente augmente sous l'effet de pluie. La démarche de calcul est similaire à celle pour la rugosité aléatoire, le calcul est également fait pour trois surfaces distinguées :

$$DA_{sol\ nu,t} = DA_{sol\ nu,t-1} + (DA_{matr} - DA_{sol\ nu,t-1})\left(1 - e^{-\frac{P_j}{S_{stab}}}\right)$$

$$DA_{resi,t} = DA_{resi,t-1} + (DA_{matr} - DA_{resi,t-1})\left(1 - \frac{2 + e^{-\frac{P_j}{S_{stab}}}}{3}\right)$$

$$DA_{cult,t} = \frac{DA_{resi,t-1} + DA_{sol\ nu,t}}{2}$$

Où $DA_{sol\ nu}$; DA_{resi} ; DA_{cult} - densité apparente de la surface non couverte par les résidus ou la végétation, de la surface couverte par les résidus de culture et de la surface couverte par des cultures respectivement, g/cm^3

Calcul des ruissellements :

Le ruissellement final est considéré comme une moyenne pondérée des ruissellements par type de surface. Trois types de surface sont intégrés dans le modèle : le sol nu, le sol couvert par les végétations et par les résidus. Pour chacune d'elles la capacité du stockage d'eau sur la surface et l'infiltration dans le sol sont calculés afin d'estimer l'excès d'eau sur la surface.

La quantité d'eau stockée dans le microrelief est trouvée selon l'équation de Kamphorst et al. (2003) et est une fonction de la pente et de la rugosité aléatoire.

$$M = 0.112RR + 0.031RR^2 - 0.012RR^3St$$

L'infiltrabilité du sol dépend de la conductivité à saturation et de la sorptivité. Celle dernière représente la capacité du sol d'absorber l'eau par la capillarité. La valeur d'infiltrabilité est déterminée selon l'équation de Philip (1957 ; 1988) :

$$I_t = i * t_p + S(t - t_0)^{0,5} + A(t - t_p)$$

Où I_t – infiltrabilité du sol, mm

i – intensité de la pluie, mm/h

t_p – le temps jusqu'à la formation des flaques en fonction de la conductivité à saturation, la sorptivité et l'intensité de la pluie, h

$$t_p = \frac{S^2(i - \frac{K}{2})}{2i(i - K)^2}, \text{ pour } i > K$$

S – sorptivité, $mm/h^{0.5}$

t – temps, h

A – constante, liée la sorptivité et la conductivité à saturation (K_{sat}) par le facteur de conversion F .

$$A = FK_{sat}$$

La sorptivité est calculée comme la fonction de l'humidité du sol, dont la formule est établie par Winterer (2011) dans le cadre de son stage. L'humidité initiale est estimée selon l'approche API présentée dans le paragraphe précédent.

Le facteur de conversion (F) est une constante issue de la littérature. Sa valeur dépend de la teneur en eau initiale. Cependant, il a été démontré que pour les sols relativement secs F varie entre 1/3 et 2/3, pour la majorité d'eux le facteur obtenu égale 0.357. Cette valeur est donc retenue pour le modèle.

Le calcul de la conductivité hydraulique à saturation est divisé en deux étapes car elle dépend à la fois des propriétés matricielles du sol et des propriétés structurales. Elle est estimée pour chaque type de la surface séparément. La conductivité de base d'un sol consolidé est calculée avec les fonctions de pédotransfert de Saxton et Rawls (2006) (**Annexe 1. Formules pour estimer les caractéristiques du sol**) en fonction de la dynamique de la densité apparente du sol comme décrit dans le paragraphe précédent sous l'effet du travail du sol et les précipitations. Ensuite sa dynamique est modifiée en fonction du travail du sol et de la prise en masse de la terre.

En plus, si l'utilisateur n'a pas de données des précipitations à pas de temps de 10 min ou moins, elles peuvent d'être simulées par une approche stochastique qui génère des événements pluviométriques à partir des tirages dans des distributions mensuelles sur les durées et intensités des événements pluvieux. Cependant il est nécessaire d'avoir minimum les données mensuelles des précipitations et de la température. Pour l'étude de validation de l'indicateur nous utilisons bien évidemment les enregistrements réels des événements pluvieux.

Enfin, pour déterminer le volume de ruissellement la différence entre les précipitations instantanées et la quantité d'eau infiltrée par le sol ainsi que la quantité stockée dans le microrelief est calculée selon la formule suivante :

$$Ruis = P - I - M$$

GEISPITZEN : DESCRIPTION DU SITE

Geispitzen est une commune située dans le département du Haut-Rhin, en région Grand Est à 288 mètres d'altitude au sud-ouest de Mulhouse. Elle se trouve dans les contreforts du Sundgau. De l'année 2000 jusqu'à 2016 cette commune disposait d'un site permettant de capter l'eau de ruissellement provenant des trois parcelles conduites en monoculture de maïs et faisait partie des dispositifs d'expérimentation suivis par l'ARAA et Arvalis-Institut du végétal en collaboration avec la SCEA Schneider.

Le site de mesures de Geispitzen a été créé en 2000 grâce à l'appui financier de Syngenta, du Conseil général du Haut-Rhin et de la Chambre d'agriculture du Haut-Rhin pour évaluer et confirmer l'impact d'une bande enherbée et des techniques culturales sans labour sur le transfert par ruissellement des pesticides du maïs. En 2005, la politique agricole commune a rendu obligatoire l'installation des bandes enherbées le long de tous les cours d'eau. Cela a conduit au changement des objectifs principaux à partir de 2008. Les travaux se sont concentrés autour des incidences de programmes de désherbage et des techniques sans labour. Le site se trouve sur un territoire sensible à l'érosion : le secteur de collines limoneuses avec une dominance de la culture de maïs est très vulnérable à la battance, la pluviométrie est élevée en printemps et en été. Il a donc été choisi pour observer les états de surface du sol et leurs conséquences sur la production du ruissellement et sur les transferts des produits phytosanitaires et notamment pour étudier l'influence des techniques sans labour du point de vue de la limitation du ruissellement.

Les sols sont de type lœssique à texture limono-argileuse, plus précisément des sols bruns calcaires sur lœss à sols bruns calciques à calcaires sur lœss. A noter qu'en bas de pente, le long du fossé les sols sont bruns colluvionnés sains calcaires à décarbonatés, constitués sur le dépôt des fines particules de terre entraînées par l'eau de ruissellement de l'amont. Les sols du site de Geispitzen contiennent 22% d'argile, 72% de limon et 5% de sable en valeurs moyennes. La teneur en matière organique est comprise entre 1.5% et 2.0%.

La région du Sundgau est une région pluvieuse et humide. Les précipitations moyennes annuelles sont d'environ 772 mm (<http://www.meteofrance.com>). Les mois les plus humides sont généralement de mai à août, ils sont caractérisés par des fortes averses et orages (entre 70 et 90 mm de pluie par mois). Les températures moyennes mensuelles selon Météo-France varient entre 6°C et 26°C.

Le site présente trois parcelles d'environ 3 ha chacune, occupant un versant de colline exposé sud avec un fossé d'écoulement situé en bas de la parcelle (Figure 2). Trois modalités du travail de sol sont définies:

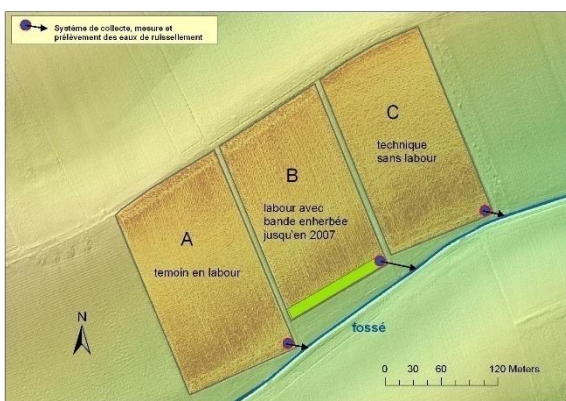


Figure 2. Le site de Geispitzen, 3 parcelles du dispositif (ARAA)

Parcelle A : travail du sol conventionnel dans le sens de la pente avec labour, présentant le témoin de l'expérimentation : labour en automne, préparation du lit de semence au vibroculteur en avril avant le semis;

Parcelle B : travail du sol de la même façon, mais jusqu'à 2007 possédait une bande enherbée de 12 mètres de largeur en bas de la parcelle. A partir de 2013, elle est traitée par StripTill;

Parcelle C : travail du sol sans labour à partir de 2002 (après un travail perpendiculaire à la pente entre 2000-2002). La charrue est remplacée par deux passages de chisel et d'un décompacteur.

Sur les trois parcelles les passages de vibroculteur en printemps précèdent le semis, un binage a lieu en juin.

METHODES D'OBSERVATION

1. Schéma fonctionnel

Le travail sur ce sujet est coupé en deux grandes parties : l'analyse de données existantes avec la création des bases de données et la calibration ou la validation de différents modules de l'indicateur.

L'analyse de données existantes est sous-divisée en quelques étapes incluant l'exploration des états de surface (la rugosité, les croûtes de battance, la couverture par des résidus) et l'analyse de l'information concernant les mesures de débits et de précipitations. De plus, une étude de résultats d'analyse de terre (l'état chimique visant à avoir les connaissances sur le stock de la matière organique du sol) est intégrée. Les résultats de ces étapes constitueront les dossiers pour l'évaluation de l'efficacité du modèle.

Ensuite, la validation de diverses étapes de calculs de simulation est effectuée, ainsi que la calibration de certains modules de l'indicateur : la rugosité de surface, la couverture par des résidus, l'humidité du sol. Finalement, la phase la plus importante est de s'assurer que l'Indicateur atteint des bons résultats finaux. Toutes les étapes de travail sont présentées sur **Figure 3** ci-dessous.

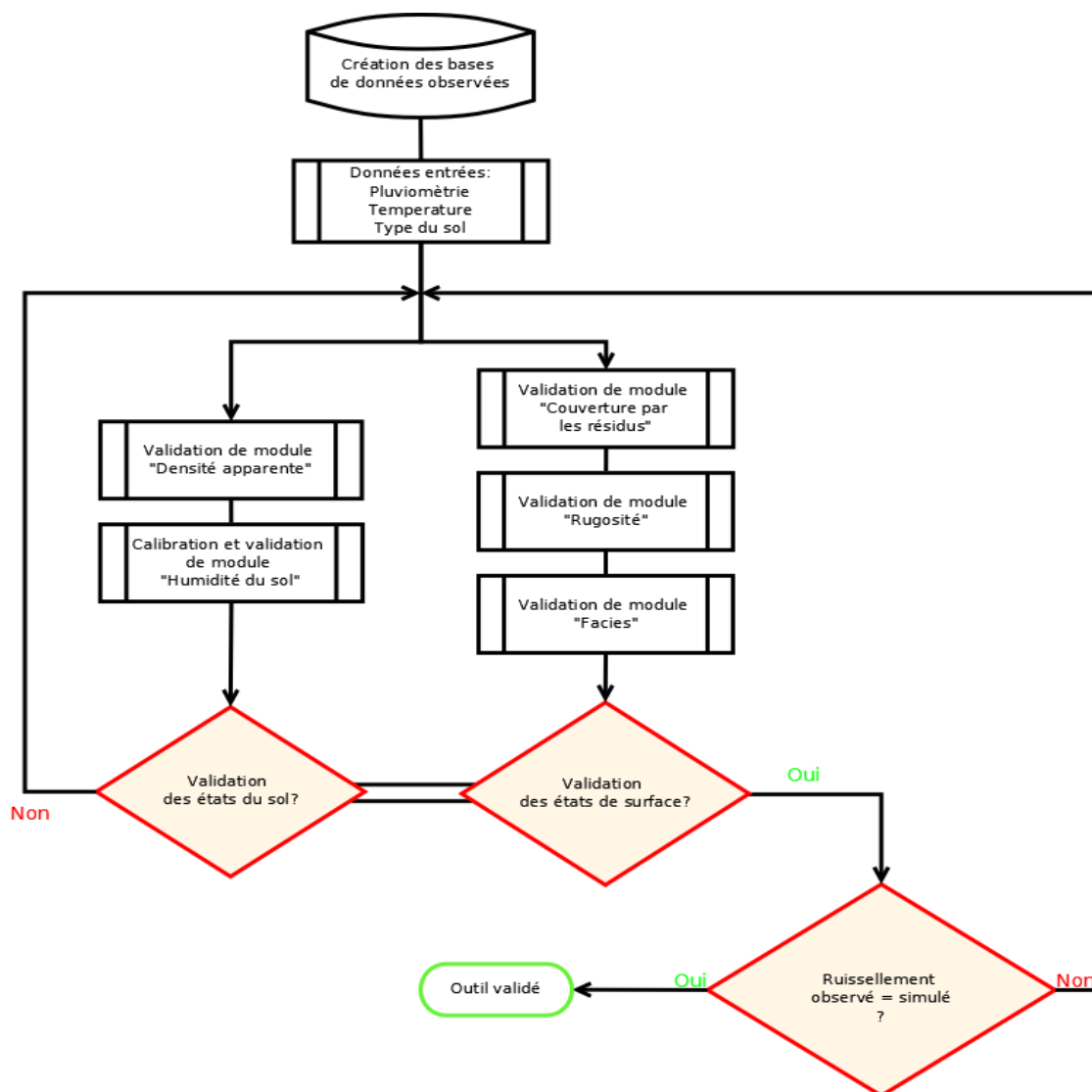


Figure 3. Le schéma fonctionnel du travail

2. Dynamique des états du sol

Dans le but de comparer les effets des pratiques culturales sur les évolutions des états de surface au cours du temps deux parcelles ont été choisies, celle travaillée en labour (parcelle A) et celle travaillée sans labour (parcelle C). La parcelle B est aussi travaillée en labour et donc ne présente pas d'intérêt supplémentaire pour cette étude. Ce choix permet aussi de voir directement l'impact de la couverture par les résidus en excluant l'influence de la bande enherbée se trouvant en bas de la parcelle B avant 2008.

Les EDS sont observés sur la ligne de semis, entre les lignes de semis (interrangs) et dans les traces des roues des engins agricoles, en bas et en haut de la parcelle. Les observations sont faites généralement dans la période d'avril à juillet à l'exception de certaines années quand les observations étaient faites en période hivernale.

Un des composants des EDS est le taux de couverture de surface par les résidus. Les résidus interceptent l'énergie des gouttes de pluie et des eaux ruisselantes. Il a été observé pendant les années 2015 et 2016 sur place pendant les visites grâce à la méthode du « transect » (Laamrani,

Joosse et Feisthauer, 2017). Le principe est de déterminer la quantité de résidus qui touchent une ligne droite matérialisée dans le milieu. La ligne est une corde avec de marques de couleur à intervalles réguliers (tous les 10 cm), la longueur est de 4 mètres. On note donc les résidus présents à chaque point coloré. Cette méthode pratique est facile à mettre en œuvre, et objective. Malgré cela, cette méthode a été utilisée seulement les deux dernières années du site. Toutes les années précédentes des photos de micro-parcelles ont été prises afin d'effectuer des estimations visuelles par la suite. Une micro-parcelle présente un rectangle de 40×60 cm encadré, à l'intérieur de laquelle on mesure la quantité de résidus. Pourtant l'analyse de toutes les données dans leur ensemble n'avait jamais été faite et il y a eu un certain nombre des photos non-traitées. La création d'une base de données comprenant les valeurs pour toutes les années a été fixée comme l'objectif pour cette sous-partie. Les résultats sont obtenus grâce à une grille (Excel) superposée sur la photo permettant de cocher les cases dans lesquelles se trouvent les résidus. Les observations de la couverture par les résidus sont effectuées principalement sur la parcelle C (en TCSL) car dans les parcelles labourées tous les résidus se trouvent en profondeur dans le sol après l'action de retournement par la charrue et le pourcentage est considéré comme nul. Cette méthode paraît être aussi objective que le « transect » et en plus permet d'évaluer les données « archivées ». L'exemple d'une grille est présenté dans l'annexe (voir **Annexe 2. L'exemple d'utilisation de la grille Excel pour cartographier les résidus**).

Les classes de rugosité sont déterminées selon la taille de cet écart en cm (**Tableau 1**). La rugosité de surface est également évaluée à partir de photos prises pendant les campagnes. Les approximations sont faites selon la classification trouvée dans la littérature.

Tableau 1. Classification de rugosité (J. Boiffin, F. Papy, M. Eimberck, 1988)

Classe	Ecart-type, cm	Situation agricole typique
0	0-1	Semis très battus ou chantiers de récolte très compactés
1	1-2	Semis légèrement battus
2	2-5	Semis récents à structure motteuse intacte, sans résidus
3	5-10	Labours récents, déchaumage récente avec résidus
4	> 10	Labours récents

Sous l'effet de la pluie la couche très superficielle de terre arable peut passer d'un état relativement poreux à un état très compact appelé croûtes de battance. La formation des croûtes de battance diminue la vitesse d'infiltration et favorise les ruissellements. La battance diminue la rugosité du sol, et ce lissage diminue le stockage d'eau en surface et augmente la vitesse des écoulements.

La classification de Boiffin (1988) qui décrit quatre stades permettant évaluer l'EDS a été développée et utilisée (**Tableau 2**). Le stade F1 a été divisé en deux sous parties pour une analyse plus précise car l'écart entre F1 et F2 est assez élevé.

Tableau 2. Classification de la quantité des croûtes de battance sur la surface (Boiffin, 1987)

F0	État initial conféré par le travail du sol
F11	Présence des croûtes structurales
F12	Croûtes sédimentaires uniquement dans les dépressions
F2	Croûtes sédimentaires à toute la surface

3. Pluviométrie et ruissellements

Dispositif de mesures sur le site

La situation pédo-topographique des 3 parcelles est très similaire ainsi que leurs surfaces. Chacune est isolée hydrauliquement par la présence du chemin d'exploitation en amont, par des ados enherbés de part et d'autre de chaque sous parcelle et par le barrage en tôle en aval. L'eau qui ruisselle sur la parcelle arrive donc vers le barrage de tôle pour être dirigée vers les collecteurs et les tuyaux d'écoulement. Le dispositif installé, montrant aussi le type de travail sur les sous-parcelles, est présenté ci-dessous dans la **Figure 4**.

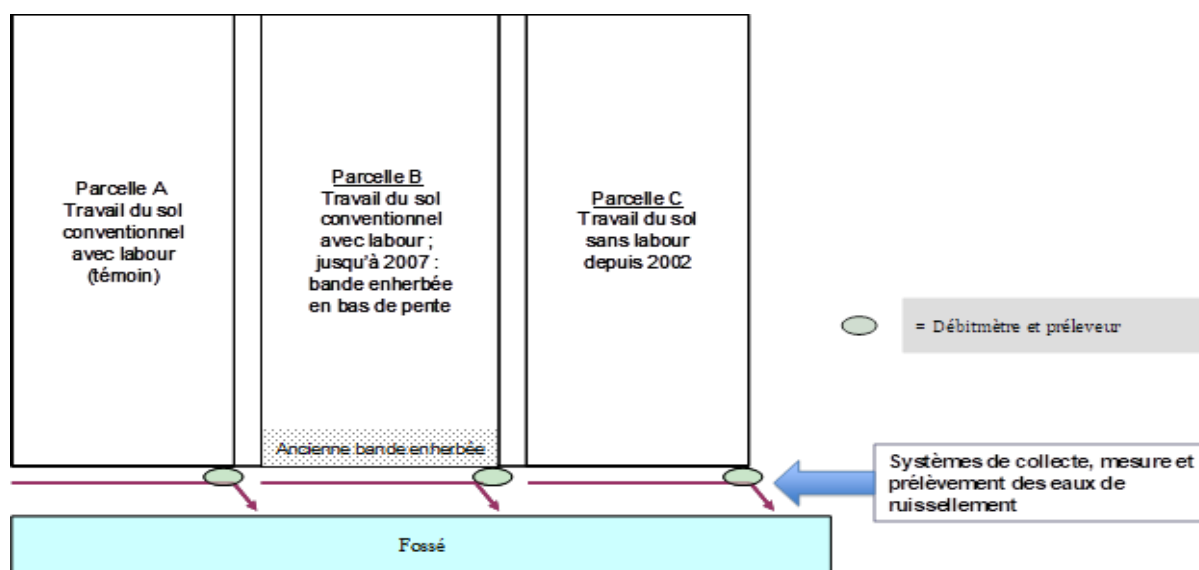


Figure 4. Le dispositif de suivi de la qualité d'eau

Le site dispose d'une station météorologique depuis 2000 et d'un second pluviomètre installé en 2007. La station permet d'avoir les données pluviométriques horaires ainsi que les températures minimum et maximum, le rayonnement global et l'hygrométrie. Le second pluviomètre produit les intensités, les débuts et les fins des épisodes pluvieux aux intervalles plus affinés.

Si un ruissellement a lieu, la quantité d'eau qui sort de la parcelle est enregistrée par un débitmètre pour chaque sous-parcelle individuellement. Un échantillon d'eau est prélevé automatiquement dans un récipient en verre (prélèvement automatique de 500 ml tous les 100 litres). Les échantillons sont stockés au congélateur à -18°C dans des flacons PET afin d'être envoyés au laboratoire pour des analyses (concentrations des substances actives phytosanitaires).

JEU DE DONNEES

Les campagnes d'observations ont été effectuées quelques jours après le semis et par la suite systématiquement quelques jours après les ruissellements entre les années 2000 et 2016 (**Tableau 3**). Au total environ 35 campagnes d'observations ont été menées. Les principales données disponibles sont les résultats des observations et des mesures des états de surface, les données pluviométriques et les mesures de débit.

Les résultats de nombreuses observations d'EDS contiennent les résultats d'estimations visuelles de la rugosité (**Figure 5**), de l'extension des croûtes de battance et de la couverture par les résidus. Un exemple du formulaire d'observation d'EDS est présenté dans l'annexe (**Annexe 3. Le formulaire d'observation des états de surface sur le terrain**). En plus, les valeurs de la rugosité, de la densité apparente et de l'humidité mesurées précédemment ont été fournies pour le travail. Environ 700 photos à l'échelle des micro-parcelles ont été prises afin d'évaluer les EDS. Les résultats d'analyse chimique du sol pour des années 2002, 2008, 2013 sont également disponibles.



Figure 5. L'exemple de mesure de la rugosité à la chainette (ARAA)

Les données des ruissellements, des pluies (hauteurs et intensités), et des températures horaires pendant toute l'année complète et les mesures plus affinées entre le semis et la récolte sont accessible pour le travail, ainsi que les informations issues des systèmes de collecte et de prélèvement des eaux de ruissellement. Un des sous-objectifs de ce stage vise à créer une base de données regroupant toutes les données pour les années 2006-2016. Le choix de limiter la base de données à cette période est justifié par l'absence de données de débit fiables dans la période de 2000 à 2006, et des années sèches sans ruissellement de 2003 à 2005.

Tableau 3. Données disponibles pour le travail

Année	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
		15-mars	23-mai	23-avr	03-mai	26-avr	23-janv	23-avr		09-nov	22-mars
		27-avr		20-mai	18-mai	09-juin	19-juin				
Date disponible		18-mai		28-mai	11-juin	20-juin					
		31-mai				14-oct					
		05-juin									
		29-juin									
Commentaires	La date est inconnue		Strip Till								
Débitmètre	Débitmètre Arvalis		Débitmètre rénové, la quantification des volumes					L'arrêt de mesures de débits			
Pluviomètre	Données horaires "Geispitzen" station Arvalis Données pluviométriques détaillées à partir de 7/2007										

RESULTATS ET DISCUSSION

Dans un premier temps les résultats de suivi de la dynamique de dégradation de la surface seront présentés : l'évolution de la rugosité, des faciès et des états du sol; ainsi que l'évolution de la couverture de surface par les résidus. Les caractéristiques sont regroupées par le type de travail du sol : soit donc parcelle A - travail en labour ; parcelle C - travail sans labour. Ensuite les résultats de validation de différents modules de l'indicateur seront évalués pour finalement étudier son efficacité en simulation de ruissellements.

Le point de départ pour l'étude de la dynamique d'évolution des états de surface observés est fait à une date après la préparation du lit de semence. A ce moment les parcelles présentent un état quasiment similaire à part de la couverture par les résidus. Néanmoins quelques observations des EDS ont été faites en-dehors de la campagne du maïs pendant l'automne et l'hiver.

En ce qui concerne la validation de l'indicateur, les simulations concernent la période allant de 1/11/2005 à 18/09/2016. La première date correspond à la date du labour sur la parcelle A et au déchaumage sur la parcelle C après la récolte du maïs grains. Ces opérations laissent la surface fraîchement travaillée.

1. Dynamique des états de sol

Etat initial des parcelles

Au préalable, des différences correspondant aux deux pratiques agricoles au début du cycle de culture ont été observées. Pour la couverture par les résidus, le traitement en labour consiste à enfouir les débris de végétaux après la récolte dans le sol et à retourner le sol. Après cette action, plus de 95% de résidus sont enfouis dans le sol. Alors que dans le système du travail du sol sans labour, la charrue est remplacée par un chisel qui théoriquement laisse entre 50 et 70 % de résidus sur la surface (Massicotte, 2000 ; Stott, 1995). Par conséquent, une grande différence entre les parcelles A et C est observée : la couverture par les résidus est plus importante en non-labour qu'en labour. Après l'hiver, les résidus en non-labour vont progressivement se décomposer, et la préparation du lit de semis en avril va réduire encore un peu plus la couverture par les résidus. Entre 10 et 25 % de la surface du sol non-labouré est couverte directement après le semis : des valeurs faibles sont obtenues sur les lignes de semis, des valeurs élevées entre les lignes de semis et dans les traces de roue (**Figure 6**).

La préparation du lit de semis avec deux passages d'un vibroculteur est identique pour les parcelles A et C. Il en résulte que le microrelief initial des deux parcelles est assez similaire : la même classe de rugosité et l'absence de croûte de battance sont observées. Pour certaines années, le travail du sol en non-labour est plus grossier que celui en labour, certainement un effet des résidus de culture qui ont tendance à limiter la fracturation des mottes au moment du passage du vibroculteur. Cet effet est pris en compte dans l'indicateur de ruissellement. Les EDS sont différents selon les motifs agraires (lignes de semis, interrangs et trace de roue). Dans les lignes de semis le sol est beaucoup plus affiné pour assurer un bon contact entre le sol et les grains de maïs, alors que la surface des interrangs contient plus de mottes. En revanche, les traces de roue présentent plutôt une surface du sol très tassée liés aux passages des engins.

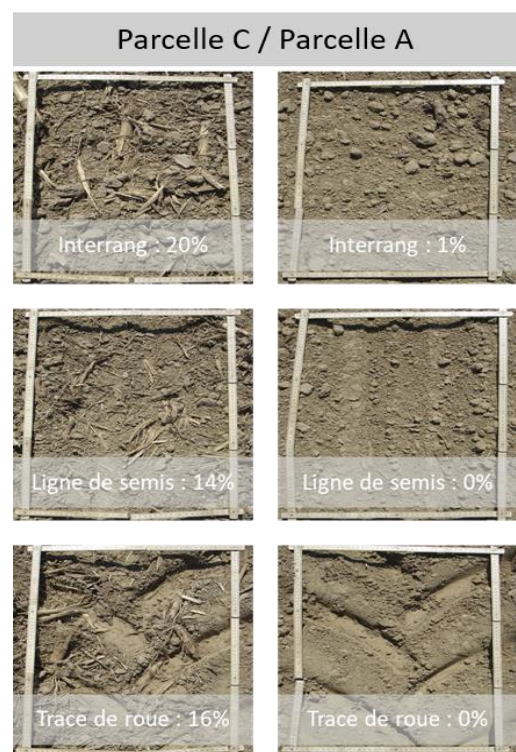


Figure 6. Pourcentage de la surface couverte par des résidus

Dynamique de dégradation des états de surface

Par la suite la dynamique d'évolution des états de surface des parcelles au cours d'une campagne culturale pour plusieurs années a été étudiée (Figure 7). L'évolution des EDS varie d'une année à l'autre en fonction des conditions climatiques et notamment du calendrier des événements pluvieux. Malgré cela la tendance générale de la surface à se dégrader a été confirmée. Les résultats mettent en évidence la variabilité inter-parcellaire des EDS lié au travail du sol. En plus, une variabilité entre les motifs distincts existe : les lignes de semis sont beaucoup plus sensibles aux précipitations et présentent une aptitude au ruissellement important, de même que les traces de roue qui sont compactées et peu poreuses.

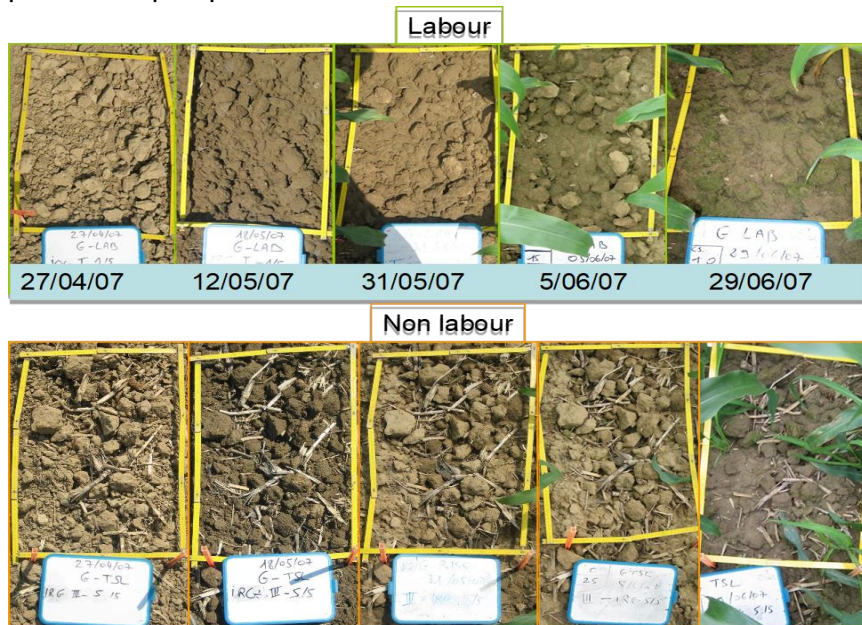


Figure 7. L'évolution des états de surface au cours d'un mois selon le type de travail du sol (photos R. ARMAND, IFMS)

Dans un premier temps le taux de couverture par les résidus de végétaux a été évalué. On remarque une certaine homogénéité de la quantité de résidus entre les motifs agraires au cours d'une campagne (**Annexe 4. Résultats d'observation de la quantité des résidus sur la surface**). A noter que les lignes de semis présentent une couverture en débris végétaux plus faible que les interrangs ou les traces de roue. Elle est entre 3% et 10%, alors que les interrangs sont couverts à 20-25% (**Annexe 4. Résultats d'observation de la quantité des résidus sur la surface**). Cette différence est due à l'effet du chasse-mottes installé sur le semoir qui écarte dans la ligne de semis non seulement les grosses mottes mais également une partie des résidus de culture.

La diversité de la couverture est relativement importante entre les années. En plus, compte tenu du passage de parcelle B en Strip-Till en 2013, il est intéressant d'évaluer l'incidence de cette technique sur la couverture protectrice par les résidus. Cette technique, présentant un quasi semis direct sans enfouissement de résidus, laisse environ 80% de la surface de la parcelle couverte.

D'une manière générale le pourcentage de surface couverte par les résidus montre une tendance à diminuer à 40-50% des valeurs initiales au cours de la campagne. Cette diminution est souvent expliquée par la dégradation des composants facilement décomposés soit les parties fines de résidus et les débris de petite taille. La décomposition est plus rapide durant la période estivale car les températures sont plus élevées.

Tableau 4. Comparaison des résultats d'estimations visuelles et de calculs

Rang	16	10	
	20	20	
	19	10	
	Interrang	18	20
		18	18
		15	
11/06/2010	Calculs	Estimations	
Rang	10	10	
	12	15	
	15	20	
Interrang	23	15	
	25	15	
	51	70	

Quant aux résultats des estimations visuelles de la couverture par les résidus, en générale ils correspondent assez bien aux résultats obtenus avec l'analyse détaillée des photos. Cependant, la méthode visuelle manque parfois de précision par rapports d'analyse de photos et les écarts importants sont observés. L'exemple de comparaison entre les estimations faites en 2010 et les résultats de calculs réalisés est présenté dans le tableau ci-dessus (**Tableau 4**). Les estimations visuelles sont faites par Bertrand Monteix pendant le stage effectué au sein de l'association Arvalis – Institut du végétal du 12 avril au 18 juin 2010.

La **rugosité** de surface traduit le microrelief de la parcelle. La classification est faite selon le tableau désignant différentes classes de rugosité et les situations typiques pour chaque classe. Un exemple des résultats pour l'année 2007 est présenté dans les tableaux (**Tableau 5**). Les résultats complets d'analyse sont donnés dans l'**Annexe 5. Résultats de la classification de rugosité de la surface**.

D'une manière générale, une diminution progressive de la rugosité a été constatée en fonction de la date des observations et les conditions météorologiques. A noter que la rugosité est minimale pour toutes les microparcelles déjà au mois de juin. Les résultats obtenus confirment l'impact positif du non-labour pour limiter la dégradation du sol. Par exemple, pour l'année 2007, année la plus riche en observations des EDS (5 dates), la rugosité de la couche superficielle de la parcelle A est de 2 à 5 cm en moyenne au

Tableau 5. Résultats de classification de la rugosité et de croûtes de battance (facies), l'année 2007

	Classification de rugosité du sol				Classification de croûtes de battance			
	R0	R1	R2	R3	F0	F11	F12	F2
Labour	PARCELLE A							
Interrang	0-1 cm	1-2 cm	2-5 cm	5-10 cm				
27/04/2007			♦			♦		
18/05/2007		♦				♦		
31/05/2007		♦					♦	
05/06/2007		♦*						♦
29/06/2007		♦*						♦
Non-labour	PARCELLE C							
Interrang	0-1 cm	1-2 cm	2-5 cm	5-10 cm				
27/04/2007			♦		♦			
18/05/2007			♦		♦			
31/05/2007		♦				♦		
05/06/2007		♦				♦		
29/06/2007		♦				♦		

mois d'avril juste après le travail du sol et se limite entre 0 et 1 cm déjà à partir de mi-mai. Alors que sur la parcelle C elle est de 2 à 5 cm presque jusqu'à la fin de mai et diminue jusqu'à 0-1 cm seulement à la fin du mois de juin. A remarquer également que les ruissellements d'eau suite aux fortes et longues pluies entre 10 et 11 juin 2007 ont accéléré la reprise en masse du sol, avec un changement brusque de la rugosité observé sur la parcelle C. L'effet des conditions météorologiques est confirmé en comparant les observations de différentes années : en 2010, l'année la plus sèche, les valeurs de rugosité sont plus élevées par rapport à celles des autres années pour les mêmes dates. D'une façon générale, les lignes de semis se lissent plus rapidement que les autres motifs. En plus, sur la parcelle C, les traces de roue perdent leur structure plus vite que les interrangs (**Annexe 5. Résultats de la classification de rugosité de la surface**).

L'analyse de l'extension des croûtes de battance est également effectuée selon la classification de Boiffin (1988) et exposée de même façon en forme des tableaux (voir **Annexe 5. Résultats de la classification de rugosité de la surface**). Avant d'effectuer le travail, il était nécessaire d'identifier les valeurs provisoires en pourcentage correspondant au stade F2. Il a été

décidé d'attribuer à cette classe les micro-parcelles ayant plus que 50% fermé par les apports sédimentaires.

Le développement des croûtes structurales est très rapide. Après les premières pluies une partie de surface est déjà couverte. Puis leur extension diminue avec le temps, ceci est expliqué par le développement de croûtes sédimentaires qui prennent le relais. La croissance de croûtes structurales se fait à la même vitesse sur toutes les deux parcelles mais il existe une hétérogénéité entre les motifs. Autrement dit, l'apparition des croûtes structurales de ce type occupe plus rapidement les lignes de semis de culture que les interrangs. Cela est lié au fait le sol dans les lignes de semis est plus affiné que dans les interrangs et que la dégradation de ces petites agrégats demande moins d'énergie cinétique des pluies. La formation de croûtes sédimentaires commence plus tard mais aussi d'abord dans les lignes de semis et dans les traces de roue. Les observations montrent que les croûtes sédimentaires se forment plus vite sur la parcelle en labour et que cette évolution est plus lente en non labour. Dans les années relativement sèches dans la période d'avril à juillet, l'état F2 avec des croûtes sédimentaires n'est jamais atteint (**Annexe 6. Résultats de classification de la présence de croûtes de battance sur la surface**).

Il est démontré que le sol cultivé avec des mottes de petits diamètres se transforme vite en une surface fermée par les croûtes (**Annexe 6. Résultats de classification de la présence de croûtes de battance sur la surface**). Alors que les grandes mottes demandent plus de temps pour être battues mais contribuent cependant au colmatage de la surface. Ces résultats montrent que la préparation d'un lit de semence trop affiné augmente et accélère le risque d'atteindre des conditions ruisselantes dans la campagne.

Incidence sur ruissellements

L'analyse des états de surface permet de conclure que les résidus protègent le sol de la force destructrice de pluie. Par conséquent, ils diminuent la vitesse de dégradation de la couche superficielle et jouent le rôle d'obstacles pour les ruissellements. Et en plus il a été démontré dans le rapport annuel du site de Geispitzen que la stabilité des agrégats du sol de la parcelle en non-labour est plus forte que celle de la parcelle en labour (Van Dijk et al, 2008). L'exploration des données issues des débitmètres installés à l'exutoire de chaque parcelle a montré que l'arrêt d'utilisation de la charrue est une mesure assez efficace dans la lutte contre l'érosion du sol. La quantité de ruissellements produits sur la parcelle en labour est beaucoup plus importante que sur la parcelle non-labourée. Le changement de pratique diminue le nombre des événements ruisselant d'environ 60% (**Tableau 6**). Soit donc 55 épisodes de ruissellement sur la parcelle A et seulement 18 sur la parcelle C.

Ces résultats montrent que le non labour permet de maintenir une infiltrabilité élevée pendant plus longtemps après le semis du maïs. Ceci s'explique par une reprise en masse et une dégradation des états de surface moins rapide, mais également par une activité de vers de terre augmentée notamment pour les lombriciens anéciques. Ces derniers vivent dans des galeries verticales permanentes, et se nourrissent principalement de résidus végétaux en surface. Ces galeries contribuent très certainement à l'infiltrabilité plus élevée en non labour. Plusieurs comptages de vers de terre sur le site de Geispitzen ont confirmé l'abondance renforcée des lombriciens anéciques en non labour.

Année	Labour (Parcelle A)	Non-labour (Parcelle C)
2006	19	12
2007	14	4
2008	2	
2009	10	
2011	5	
2012	2	2
2013	3	
Total général	55	18

Tableau 6. Quantité de ruissellements sur la parcelle A et C

2. Validation de modules de l'Idr

La première étape vise à valider les évolutions des états de surface. L'objectif de cette étape est de vérifier que la dynamique des états de surface du sol (résidus, rugosité, humidité de la couche superficielle) est correctement prédite par le modèle.

La surface couverte par les résidus :

Les techniques culturales sans labour présument une certaine couverture par les résidus restant sur la surface. Cette partie cherche donc à évaluer la capacité du modèle à reproduire correctement cette couverture. Vu que la parcelle A est labourée ne laissant quasiment aucun résidu en surface, la validation ici est faite seulement pour la parcelle C. L'effet du labour est correctement prédit par l'indicateur avec des couvertures simulées et mesurées entre 0 et 5% après le passage de la charrue.

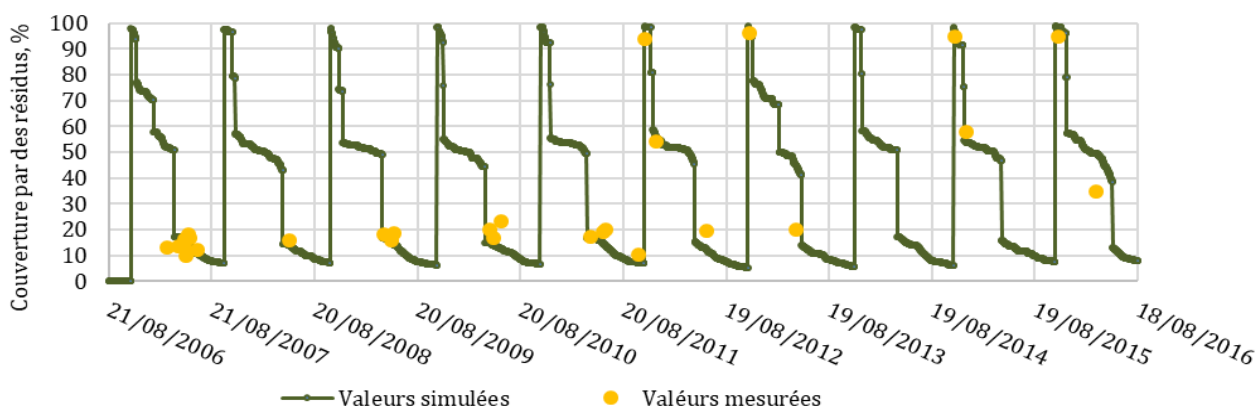


Figure 8. L'évolution des résidus sur la surface, Non-labour (parcelle C)

D'abord les résultats montrent une simulation plutôt régulière pour toutes les valeurs disponibles (**Figure 8**). L'analyse montre une corrélation importante entre les valeurs simulées et mesurées, le coefficient de corrélation est égal à 0,89. Puis il a été noté que l'effet 'enfouissement' de certains outils de travail du sol n'est pas pris en compte correctement, les paramètres concernés donc doivent être revus. En plus, en cas de deux passages de suite du même outil à la même profondeur, l'indicateur applique un même taux d'enfouissement pour les deux opérations ce qui n'est certainement pas juste et ce qui mène à des sur/sous-estimations des couvertures dans certains cas. Il convient de vérifier la pertinence de cette approche et de la modifier si nécessaire.

La rugosité de surface :

L'indicateur contient le module permettant de calculer la rugosité aléatoire de la surface influencée par la force mécanique de la pluie et par le travail du sol. Cette fonction est bien illustrée sur la **Figure 9**. Les montées et parfois les descentes abruptes correspondent aux différents passages des outils de travail du sol, par exemple, labour en décembre 2012 ou la préparation de lit de semence en avril. Alors que la baisse plus progressive est conditionnée par l'effet des événements pluvieux.

Pour valider ce module, les valeurs mesurées sur le terrain aux différents temps ont été comparées avec celles du modèle aux dates correspondantes. Pour cela les valeurs calculées par l'indicateur ont été transformées en classe. Les valeurs maximales de la rugosité correspondent à la classe R4 (état de surface juste après le labour), les valeurs minimales supposées correspondent à R0. Les valeurs intermédiaires sont interpolées selon les valeurs de la rugosité aléatoire.

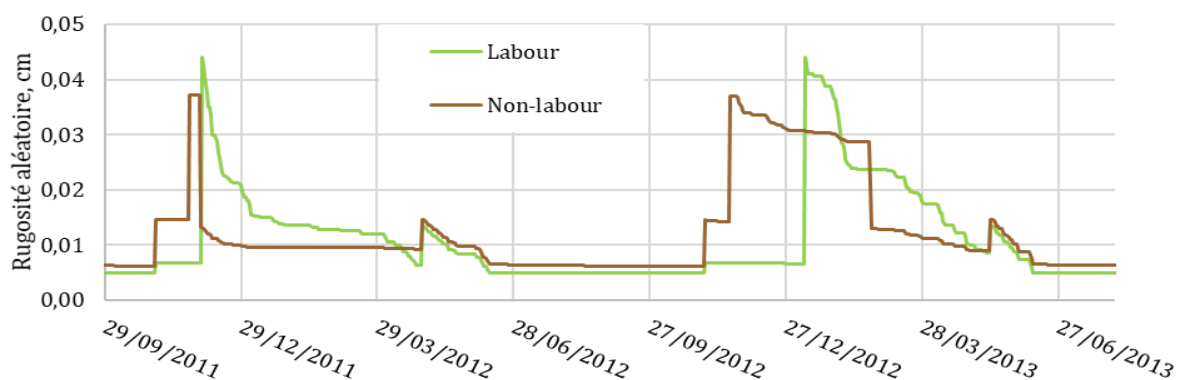


Figure 9. L'évolution de la rugosité aléatoire de surface des parcelles au cours des rotations

L'analyse de résultats montre que les grandeurs modélisées par l'indicateur se conforment avec celles observées sur le terrain à l'exception des périodes hivernales. Cette non-conformité est expliquée par le fait que la rugosité aléatoire calculée par le modèle ne rend pas compte de la rugosité orientée créée par la charrue et le chisel, alors que cette rugosité orientée domine les classes de rugosité de R3 et R4. Ce défaut donne lieu à un grand écart entre les données observées et simulées pour les situations après le passage de ces outils en automne. Les graphiques de résultats sont présentés ci-dessous (**Figure 10**).

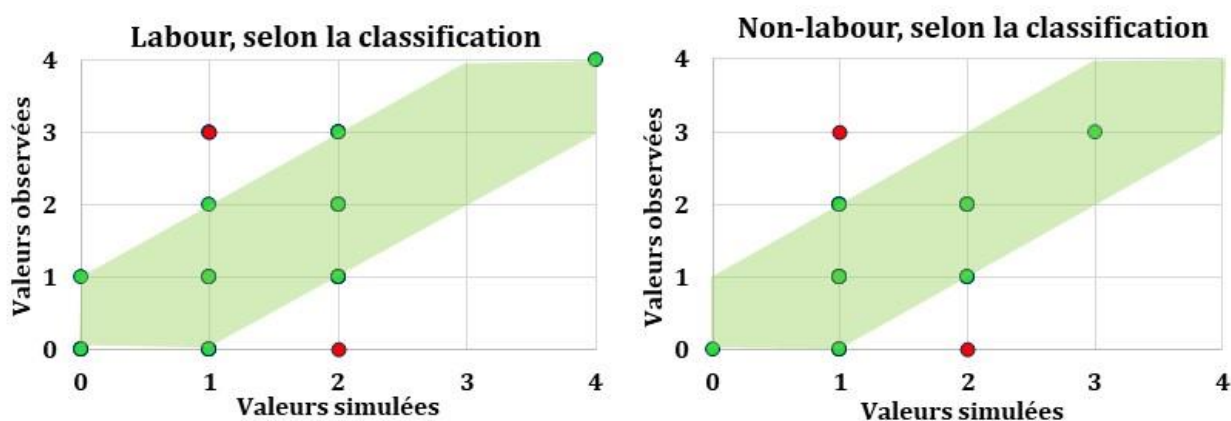


Figure 10. La corrélation entre les valeurs de rugosité simulées et observées

Au total, environ 50% de simulations sont exactes, 40% ont un écart d'une classe, donc considérées comme assez bonnes et 10% de simulations ne sont pas correctes dans le cas des deux parcelles. La corrélation est importante entre les valeurs simulées et observées (coef. Pearson = 0.604 – parcelle A ; 0.432 – parcelle B).

La prise en compte de la rugosité orientée créée par le travail du sol dans l'indicateur Idr, au delà de la rugosité aléatoire déjà prise en compte de façon satisfaisante, est donc une piste d'amélioration importante. Cette rugosité orientée intervient notamment dans les processus d'écoulement vers l'aval car elle détermine pour une grande partie le sens d'écoulement dans les parcelles ainsi que son comportement hydraulique.

L'humidité du sol en couches superficielles :

L'étape suivante est la validation du module calculant l'humidité du sol via différentes conditions. Par ailleurs, elle n'était pas mesurée pour le site de Geispitzen pendant les campagnes d'analyse. Cependant, un deuxième site avec des caractéristiques agro-pédologiques semblables (sols limon-argileux, grandes cultures avec dominance de cultures de printemps), le site de

Schwindratzheim, a pu être utilisé. Partant de ce fait les valeurs d'humidité ont été calculées en utilisant les données pluviométriques de Schwindratzheim.

La variation du coefficient de déclin au cours de l'année sur l'exemple de Schwindratzheim est présentée dans l'**Annexe 7. La variation de coefficient de déclin au cours d'une année**. Les résultats de calculs (**Figure 11**) montrent que l'approche simple de l'indicateur basé sur l'API est en mesure de globalement reproduire l'évolution des teneurs en eau du sol dans la couche superficielle du sol. L'écart moyen entre les valeurs mesurées et simulées égale 6 %.

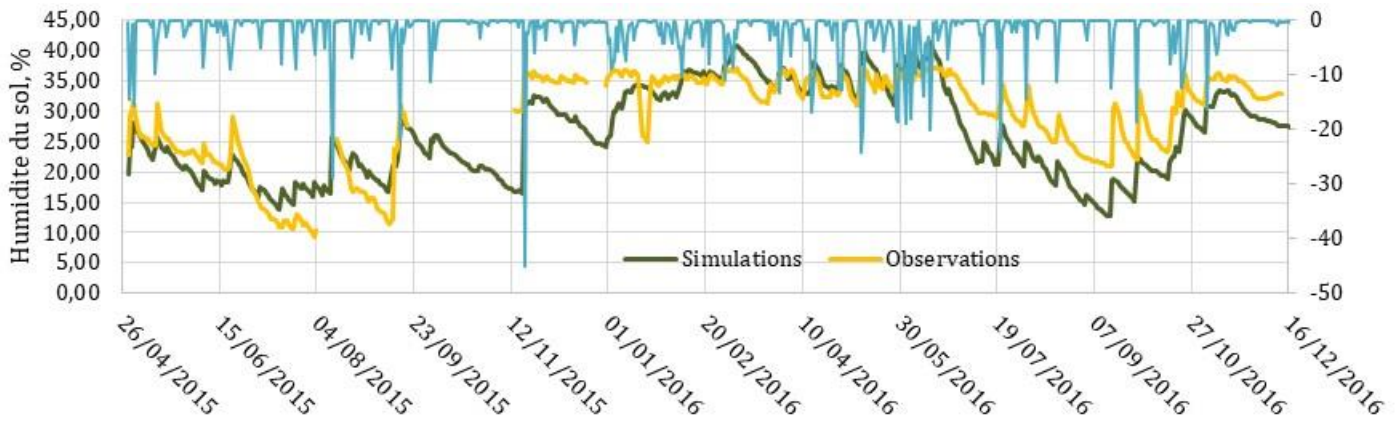


Figure 11. La variation de l'humidité au cours d'une année

Les ruissellements :

L'objectif principal de l'indicateur est d'estimer le potentiel d'une parcelle agricole à produire un ruissellement à la suite d'un évènement pluviométrique en fonction de la conduite de la parcelle. Idr calcule une lame d'eau ruisselante par la différence entre la hauteur de pluie tombée et les lames d'eau infiltrée dans le sol et stockée sur la surface. La donnée utilisée pour la validation n'est pas exactement de même nature : il s'agit des débits mesurés à l'exutoire des parcelles. Entre la production du ruissellement dans la parcelle et son transfert vers l'exutoire, des processus liés à l'hydraulique de l'écoulement peuvent modifier le transfert. Notamment les hauteurs d'eau en fonction de la rugosité orientée et de l'accumulation des flux, et la vitesse d'écoulement vers l'aval de la parcelle, vont modifier l'infiltration d'eau dans le sol et ainsi les volumes qui atteignent l'exutoire. Pour le moment, ces effets ne sont pas encore intégrés dans l'indicateur.

Comme pendant les campagnes de mesures le débitmètre a eu les problèmes de fonctionnement et en plus n'était pas installé pendant la période d'automne-hiver, le choix des dates pour la validation s'est limité aux moments où le fonctionnement était assuré. Les observations relativement fiables ont été faites pendant les années 2007 à 2011 et généralement dans les mois d'avril à octobre. Pour la validation, les jours sans pluies ont été exclus ainsi que les jours avec la pluie moins de 3 mm, quantité considérée trop faible pour générer du ruissellement dans les parcelles.

Les résultats de la première simulation ont montré l'insuffisance des événements ruisselants prédits (**Figure 12**). Selon I_{DR}, ils se produisent seulement à la suite des précipitations importantes. Partant de ce fait, un premier problème a été détecté : la surface des traces de roue n'est pas prise en compte. Le modèle calcule le ruissellement séparément pour trois types de surfaces à l'intérieure des parcelles à savoir le sol nu, le sol couvert par la végétation vivante et les surfaces couvertes par les résidus. Le ruissellement final est calculé comme la moyenne pondérée en fonction de la proportion de chacune de ces surfaces dans la parcelle. Cependant, la partie qui ruisselle en premier est la surface couverte par les traces de roue. Le passage des engins agricoles entraîne un

tassement du sol cultivé, diminue la porosité du sol et ainsi la conductivité hydraulique. Tous ces raisons conduisent à un ruissellement rapide et plus fréquent. C'est pourquoi, il est nécessaire de distinguer également ces surfaces de traces de roues dans l'indicateur, car elles peuvent générer des ruissellements pendant des événements pluvieux relativement modestes. Elles pourraient expliquer en partie le faible nombre d'événements ruisselants simulés. Pour donner suite à ce constat, l'indicateur a été modifié.

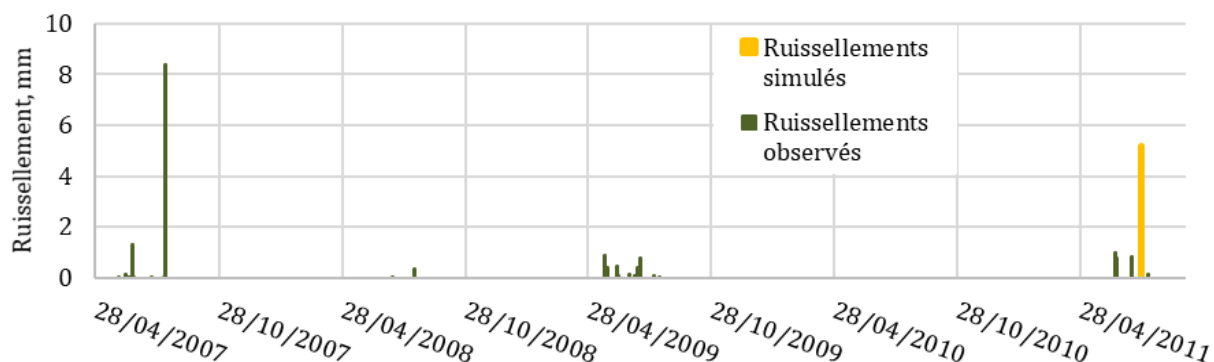


Figure 12. Les résultats de la première simulation, Labour (parcelle A)

L'infiltrabilité de la zone couverte de traces de roues est estimée selon la même formule que pour toutes les autres surfaces, mais avec une densité apparente plus élevée, ce qui diminue la conductivité à saturation.

Après avoir ajouté l'influence de traces de roue sur les ruissellements, une deuxième simulation a été réalisée (Figure 13). Les résultats montrent que plus de petits ruissellements se produisent sur la parcelle, mais toujours pas assez.

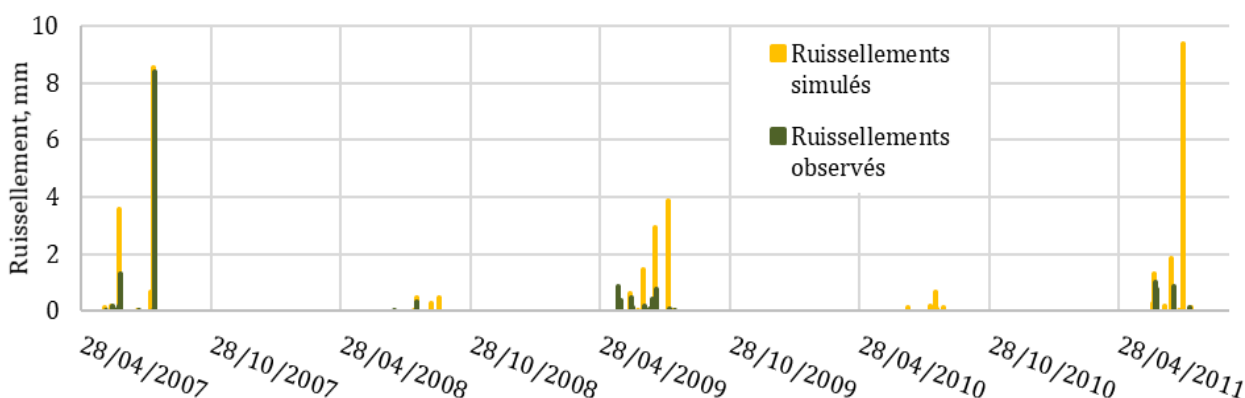


Figure 13. Les résultats de la simulation finale, Labour (parcelle A)

Compte tenu du fait que l'infiltrabilité du sol est déterminée par la conductivité à saturation et la sorptivité, il a été décidé de calibrer leurs valeurs afin d'atteindre les meilleurs résultats.

Généralement, après la calibration de ces deux paramètres, le modèle atteint des meilleurs résultats. Le graphique sur la Figure 14 montre la proportion des ruissellements simulés par rapport aux ruissellements enregistrés : la classe 4 présente les cas dans lesquels le ruissellement se trouve simulé, la classe 3 contient les jours avec une pluie importante mais sans ruissellements dans tous les deux cas, la classe 2 correspond aux ruissellements qui sont pas simulés et finalement la classe 0 – aux ruissellements simulés qui n'ont pas eu lieu en réalité. Au total, 22 événements ruisselants sur 30 enregistrés sont simulés (73%) sur la parcelle labourée. À contrario, dans 2.25% des cas de toute la période de la validation, des ruissellements sont simulés alors qu'ils ne sont pas observés. Les valeurs de coefficient de calibration retenus pour la conductivité à saturation, la sorptivité du sol

sur la parcelle et la sorptivité du sol dans les traces de roue sont respectivement $K_{K_{sat}} = 0,4565$; $K_{Ssol} = 0,6954$ et $K_{Sdr} = 0,806$.

Proportion de ruissellement simulé, Parcelle Labour

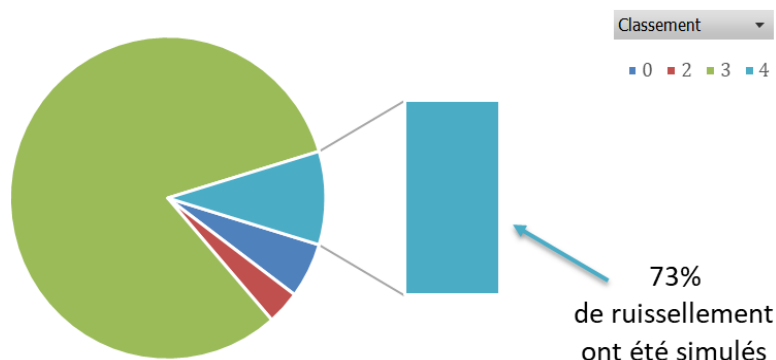


Figure 14. La proportion des ruissellements simulés, Labour (parcelle A)

Après avoir simulé les ruissellements sur la parcelle en non-labour avec les mêmes coefficients de calibration, la différence dans leur quantité en comparaison avec la parcelle en labour n'est pas marquée (**Figure 15**). C'est l'importance de la proportion de la surface couverte par les résidus qui différencie les résultats. C'est donc la première caractéristique qui doit être vérifiée. L'analyse de cette partie a montré que l'effet de la couverture par les résidus est souvent sous-estimé en période de risque. Alors que ce sont les résidus de culture qui ralentissent les écoulements, en jouant le rôle de freins hydrauliques, et favorisent l'infiltration plus importante. C'est en partie pour cette raison que les résultats ne sont pas très distincts.

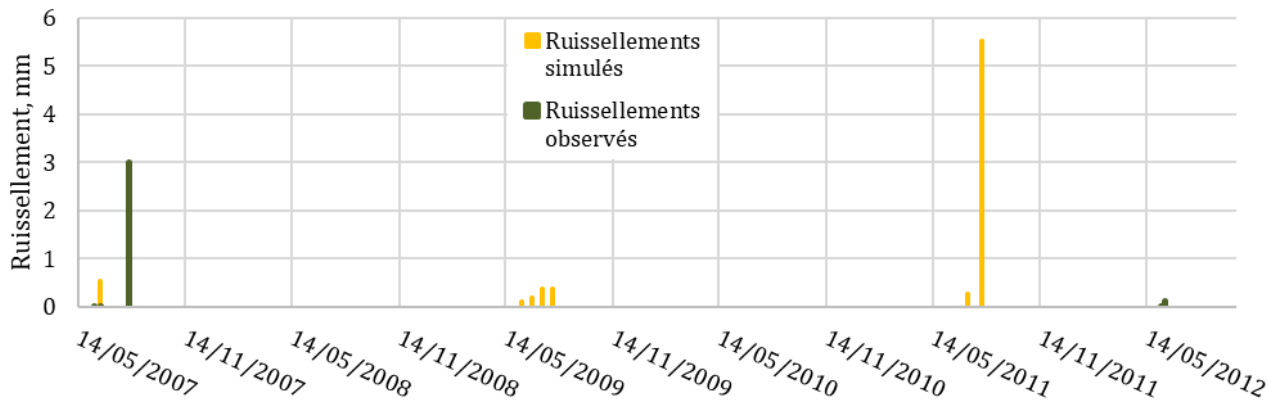


Figure 15. Les résultats de la première simulation, Non-labour (parcelle C)

Pour les calculs du risque de ruissellement, l'indicateur se base non seulement sur le taux de couverture mais aussi sur la teneur en matière organique du sol qui, via le paramètre de la stabilité structurale, conditionne la dégradation de la porosité et la diminution de l'infiltrabilité au cours de la campagne culturale. Les TCSL influencent également l'activité biologique du sol et en particulier des vers de terre. Ce dernier effet n'est pas pris en compte dans I_{DR} . L'effet des TCSL sur la teneur en matière organique du site de Geispitzen est non-significative et trop faible pour créer une différence suffisamment importante sur le ruissellement simulé par rapport à la parcelle en labour. Cependant, les mesures sur le terrain ont indiqué que la stabilité structurale du sol de la parcelle non-labourée est clairement plus élevée que sur la parcelle labourée et que cette stabilité ralentisse fortement la dégradation des EDS pendant la période à risque. Ce constat donc doit être pris en compte par la modification directe de l'indice de battance. L'indice de battance d'un sol très stable a été utilisé pour analyser la sensibilité d' I_{DR} à ce paramètre. Les résultats de cette simulation montrent que le volume de ruissellement diminue seulement de 3%. Compte tenu ce qui était dit précédemment, la stabilité des agrégats n'est pas prise en compte correctement et les ruissellements simulés ne semblent pas être suffisamment sensibles à cette valeur.

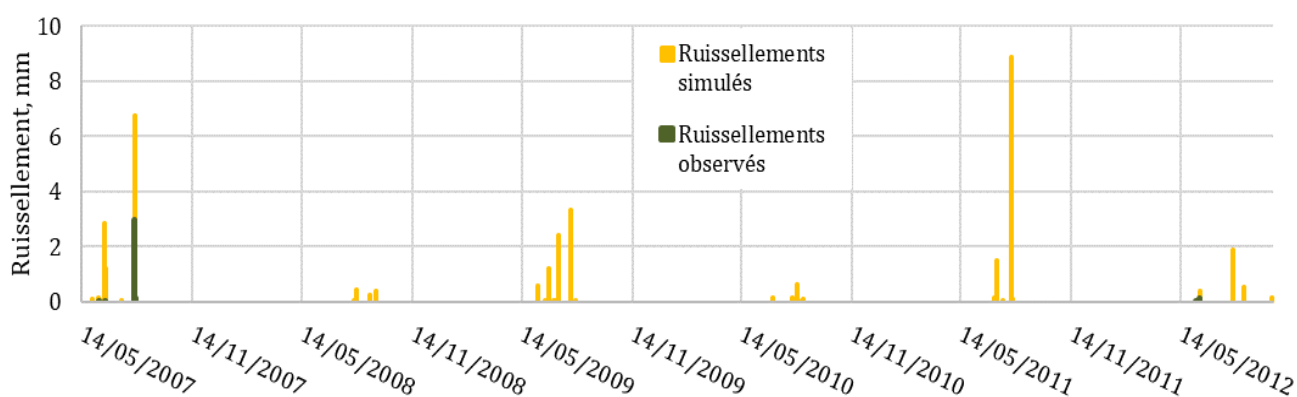


Figure 16. Les résultats de la simulation finale, Non-labour (parcelle C)

Quant aux effets de la vie biologique, l'activité des lombriciens anéciques contribue à la création de galeries verticales dans la terre et augmente la porosité dite biologique. Ceci n'est pas pris en compte par l'indicateur. Actuellement il est compliqué de trouver une fonction permettant de modéliser la vie biologique et un travail à ce sujet est à prévoir avec les spécialistes dans ce domaine. Il est probable que l'impact de ces galeries sur l'infiltrabilité domine l'effet des TCSL sur la diminution du ruissellement. Sa prise en compte semble donc indispensable pour améliorer la performance de l'indicateur.

D'autant plus qu'il était démontré dans la littérature que la sorptivité S domine plus souvent l'infiltration du sol. Il a fallu à vérifier cette hypothèse. Des nombreux articles sont écrits à propos de la sorptivité. Fasinmirin et al (2013) indiquent que la valeur moyenne de la sorptivité du sol, mesurée sur 10 cm de profondeur varie entre $0.77 \text{ mm/s}^{0.5}$ et $0.84 \text{ mm/s}^{0.5}$ selon le type de la jauge. La sorptivité simulée se trouve dans le même ordre de grandeurs, ce qui donne confiance dans l'approche retenue pour les calculs de la sorptivité dans I_{DR} . Les valeurs de la conductivité à saturation varient entre $3,62 \text{ mm/h}$ et $18,3 \text{ mm/h}$, qui correspondent aux valeurs indiquées dans la littérature.

La calibration des paramètres K_{sat} et S montre effectivement que l'infiltrabilité est beaucoup plus élevée en TCSL notamment grâce à une sorptivité plus élevée : les coefficients retenus pour cette parcelle sont $K_{K_{sat}} = 0,4565$; $K_{S_{sol}} = 1$. La calibration de la sorptivité des traces de roue n'a pas été effectuée ($K_{S_{tdr}} = 0.806$) (Figure 16; Figure 17). Après la calibration 50% de ruissellement ont été simulés, mais il faut noter qu'il y a plus d'écoulements simulés en trop. Ces résultats confirment l'hypothèse que l'importance des résidus et de la vie biologique n'est pas considérée d'une manière correcte.

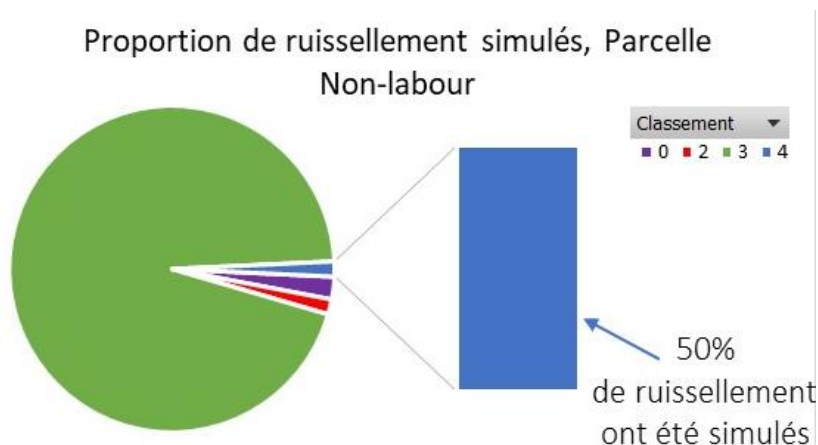


Figure 17. La proportion de ruissellements simulés, Non-labour (Parcelle C)

Par ailleurs les volumes d'eau ruisselée sont souvent surestimés en comparaison avec les résultats de mesures de débitmètre et notamment dans les mois d'août à octobre. Un décalage entre la dynamique des EDS et de l'infiltrabilité simulée et observée est détectée. Il semble que l'hypothèse d'une dégradation progressive et irréversible de la porosité et de l'infiltrabilité après le semis du maïs jusqu'au travail du sol suivant n'est pas toujours juste. Des observations sur le terrain pendant la campagne de 2011 permettent d'illustrer que cette dynamique peut être renversée par des processus biologiques. La première moitié de l'année, était relativement sèche, puis se sont succédées des précipitations intenses. Ce changement a provoqué une forte croissance de l'activité de vers de terre. Des mesures d'infiltrométrie sur les parcelles en labour et en non labour de Geispitzen en octobre 2011 juste avant la récolte ont démontré une très forte augmentation de l'infiltrabilité grâce à une abondance très forte des trous de vers de terre ($K_{sat} > 200 \text{ mm/h}$!), tandis que l'indicateur prédit une infiltrabilité faible avant la récolte (autour de 10 mm/h). Les photos des états de surface qui attestent l'évolution de la porosité biologique en surface au début et à la fin de la campagne sont présentées dans l'**Annexe 8. Les états de surface de la parcelle B au début et à la fin de la campagne, ARAA.**

PISTES D'AMÉLIORATION

L'indicateur de ruissellement est un moyen conçu pour prédire la réponse de la parcelle agricole aux précipitations en modélisant les processus impliqués. C'est pourquoi, il est désirable de s'approcher au mieux de la réalité. Pour cela, l'indicateur peut être renforcé à deux échelles : changement du modèle en général et la calibration et l'amélioration de certains modules.

Premièrement, des campagnes de mesures de la densité apparente doivent être effectuées en vue de garantir un bon fonctionnement de la partie la calculant. D'autant plus que cette caractéristique a un effet sur l'infiltrabilité du sol et donc sur l'apparition des écoulements.

Le fait que la simulation de ruissellement est peu sensible à la stabilité structurale du sol conduit à la surestimation du volume de ruissellement pour les parcelles en TCSL. Ce défaut est également dû à l'oubli de l'activité biologique agissant sur la structure du sol et sa porosité. Parmi les agents biologiques les lombriciens jouent un rôle important. Ils creusent des galeries verticales, en augmentant la porosité biologique du sol ainsi en favorisant l'infiltration verticale. Et en plus les champignons et les bactéries augmentent la cohésion entre particules en sécrétant des composés organiques tels que les ciments. L'activité des micro-organismes du sol dépend de la disponibilité de la matière organique. Dans la perspective où tous les processus naturels doivent être pris en compte, cette partie peut être ajoutée, avec une attention particulière à la dynamique saisonnière de ces processus biologiques.

Un problème dans le calcul de la rugosité a été identifié. Ce défaut est important car la rugosité conditionne le transfert de la lame d'eau ruisselante vers l'aval. Il est donc préférable de calibrer ce module en prenant en compte la rugosité orientée. Pour cela il est possible de prendre en compte l'angle entre le sens du travail du sol et celui de la pente. Cependant, si l'inclinaison de la pente n'est pas très importante les ruissellements vont apparaître toujours dans le sens de travail du sol. La correction permettra probablement d'éviter la production de ruissellement par l'outil durant la période entre la récolte et le semis consécutif.

CONCLUSION

L'objectif de ce travail consistait à étudier le lien entre les états de surface du sol et la genèse de ruissellement sur terres arables. L'impact des EDS sur l'infiltrabilité de la surface est utilisé dans la modélisation afin d'évaluer le potentiel de ruissellement.

La mission principale de ce stage était d'analyser des données de mesure pour valider un indicateur parcellaire. Cet indicateur permet de diagnostiquer les périodes à risques élevés de ruissellement et rechercher les solutions pour les agriculteurs pour limiter ces risques. Les données de mesures sont issues de campagnes d'observations sur le site de Geispitzen. Cette région naturelle est souvent soumise aux inondations boueuses. Une de tâches du travail visait à combiner ces données provenant de différents observateurs et former une base de données harmonisée. Environ 700 photos de micro parcelles ont été traités ainsi que les nombreux résultats de mesures précédentes tels que la rugosité, la densité apparente, d'analyses du sol et d'observations pluviométriques et débitométriques. L'analyse de ces mesures présentées dans ce rapport montre que le passage du labour au non-labour peut être très efficace pour limiter les problèmes sur les territoires vulnérables à l'érosion du sol. L'absence du labour permet de faire face à des enjeux environnementaux tels que les coulées de boues générées par les conditions climatiques exceptionnelles.

Les résultats des simulations montrent un bon fonctionnement de modèle. Néanmoins, il nécessite certaines améliorations. Notamment, un grand travail sur la prise en compte de l'activité biologique, et la validation des calculs de la densité apparente pourraient contribuer à une meilleure performance prédictive de l'indicateur. De plus, le calcul du transfert du ruissellement vers l'aval pour estimer les flux d'eau sortants de la parcelle mérite d'être intégré dans l'indicateur.

D'un point de vue personnel ce stage m'a permis de découvrir le milieu agricole, connaître les acteurs et les enjeux locaux, ainsi que de m'orienter vers les futurs projets. J'ai pu réaliser des activités variées : du travail avec les données, de la modélisation, des mesures sur le terrain ; qui m'ont offert des connaissances théoriques et techniques des phénomènes érosifs. Les contraintes rencontrées tels que l'absence de données ou leur non-conformité m'ont appris à m'adapter aux situations existantes et de trouver des solutions. Les tâches confiées et réalisées en plus de la mission principale ont élargi mon champ de compétences.

BIBLIOGRAPHIE

- Armand, R., 2009. Etude 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. Géographie. Université de Strasbourg.
- Auzet, A.-V., Heitz, C., Armand, R., Guyonnet, J., Moquet, J.-S., 2005. Les coulées de boue dans le Bas-rhin : analyse à partir des dossiers de demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle. Institut de Mécanique des Fluides et des Solides. Université de Strasbourg. 26p.
- Blanchard, B.J., McFarland, M.J., Schmutge, T J. & E. Rhoades, 1981. Estimation of soil moisture with API algorithms and microwave emission. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 17 (5), 767–74.
- Boiffin J., Papy F., Eimberck M., 1988. Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. I. – Analyse des conditions de déclenchement de l'érosion. Agronomie, EDP Sciences, 8 (8), p.663 - p.673.
- Boizard, H., Chenu, C., Labreuche, J. et Roger-Estrade, J., 2014. Dynamique de la structure du sol en travail et non travail du sol. Faut-il travailler le sol? Acquis et innovations pour une agriculture durable. – Editions Quae, 190 p.
- Bouchra, A., 2008. Typologie fonctionnelle des états de surface du sol [EDS] pour l'extrapolation des propriétés hydro-érosives. - UNIVERSITE LOUIS PASTEUR STRASBOURG, INSTITUT DE MECANIQUE DES FLUIDES ET DES SOLIDES, UMR CNRS 7507
- Bresson, L.M. and Boiffin, J., 1990. Morphological characterisation of soil crust development stages on an experimental fields. Geoderma, 47, p.301 - p.325.
- Bronick, C.J. and Lal, R., 2005. Soil structure and management: a review. Geoderma, 124(1-2), p.3 - p.22.
- Cerdan, O., Le Bissonnais, Y., Souchère, V., King, C., Antoni, V., Surdyk, N., Dubus, I., Arrouays, D., Desprats, J.-F., 2006. Guide méthodologique pour un zonage départemental de l'érosion des sols Rapport n°3 : Synthèse et recommandations générales. Rapport BRGM-RP-55104-FR, 85 p.
- Cerdan, O., Souchère, V., Lecomte, V., Couturier, A. & Le Bissonnais, Y., 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, p.189 - p.205
- Fasinmirin J.T., Reichert J.M., Ajayi A.E., August 2013. Development of mini-infiltrometer for soil sorptivity test in the humid tropical climate of Nigeria. Academic Journals, Vol. 8(30), p.1431 - p.1441.
- Flanagan, D.C., Ascough II, J.C., Nicks, A.D., Nearing M.A. and Laflen J.M., 1995. OVERVIEW OF THE WEPP EROSION PREDICTION MODEL. USDA- Water Erosion Prediction Project, p.1.1 - p.1.12.
- Fritsch, B., 2015. Les bonnes pratiques. L'Est Agricole et Viticole, N° 16, p.7.
- Gregory, J.M., Ghidry, F., McCarty, T.R., Alberts, E.E., 1985. Residue decay evaluation and prediction. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan, p.102 - p.105.
- Imeson, A.C., Kwaad, J.P.M., 1990. The response of tilled soils to wetting by rainfall and the dynamic character of soil erodibility. Soil erosion on agricultural land. John Wiley and Sons Ltd
- Kohler, M.A. & R.K. Linsley, 1951. Predicting the runoff from storm rainfall. US Weather Bureau Res. Paper 34.

- Labreuche J., Laurent F., Roger-Estrade J., coord., 2014. Faut-il travailler le sol? Acquis et innovations pour une agriculture durable. – Editions Quae, 190 p.
- Laamrani, A., Joosse, P., Feisthauer, N., 2017. Determining the number of measurements required to estimate crop residue cover by different methods *Journal of Soil and Water Conservation*, 72(5); p. 471- p.479.
- Le Bissonnais, Y., 2000. Analyse expérimentale des mécanismes d'érosion : la dégradation structurale superficielle et le détachement des particules des sols cultivés. Ingénieries - E A T, IRSTEA édition, p.27 - p.36.
- Le Bissonnais, Y., Le Souder, C., 1995. Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. *Etude et Gestion des Sols*, 2, 1, p.43 - p.56.
- Martin P., Bockstaller C., Ouvry J.F, 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 Degradation and Development*.
- Massicotte, D., Chouinard, P., Ménard, O., Laverdière, M.R., 2000. Guide des pratiques de conservation en grandes cultures. CPVQ. 8 p.
- Nouvelot, J.F., 1992. Erosion mécanique, transport solide, sédimentation dans le cycle de l'eau. Centre ORSTOM, Montpellier. 126p.
- Potter, K.N., 1990. Soil properties effect on random roughness decay by rainfall. *Transactions of the ASAE* 33, p.1889 - p.1892.
- Pointereau, P., Poux, X., 2014. L'agriculture à "haute valeur naturelle" en France métropolitaine. Un indicateur pour le suivi de la biodiversité et l'évaluation de la politique de développement rural. Rapport d'étude au Ministère de l'agriculture de l'agroalimentaire et de la forêt. ASca, SOLAGRO.
- Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S., Vogel, H.-J., 2018. Soil structure as an indicator of soil functions. *GEODERMA* 314, p.122 - p.137.
- Roo, P.J., Cees G. Wesseling, Jetten, V.G, Ritsema, C.J., 1996. LISEM: a physically-based hydrological and soil erosion model incorporated in a GIS. *HydroGIS 96: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management*. IAHS Publ. no. 235.
- Sebillotte M., 1990. Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes. *Les systèmes de culture*. Inra, Versailles : p.165 - p.196.
- Soil Conservation Service (SCS) (1956, 1972), 'Hydrology, National Engineering Handbook, Supplement A, Section 4, Chapter 10, Soil Conservation Service, U.S.D.A., Washington, D.C.
- Stott, D. E., Alberts, E. E., Weltz, M. A., 1995. RESIDUE DECOMPOSITION AND MANAGEMENT. USDA- Water Erosion Prediction Project, p.9.1 - p.9.16.
- Van Dijk, P., Koller, R., Lasserre, D., Gaudillat, D., 2008. L'impact du non labour sur la quantité et la qualité du ruissellement et de la production végétale. Résultats de la campagne 2008 sur le site de Geispitzen, ARAA, ARVALIS, 28p.
- Van Dijk, P., 2014. IDR : indicateur de dynamique du ruissellement des terres arables ; ARAA/INRA Colmar.
- Van Dijk, P., Koller, R., 2015. Ruissellement et érosion des sols en Alsace. Ampleur, évolution et leviers d'actions agronomiques ; ARAA, 13 p.

Van Dijk, P., Rosenfelder, C., Scheurer, O., Duparque, A., Martin, P., Sauter, J., 2016. Une approche agronomique territoriale pour lutter contre le ruissellement et l'érosion des sols en Alsace. Agronomie, environnement et société. - Association Française d'Agronomie (AFA), vol 6, N°1, p.35 - p.48.

Zobeck, T.M., Onstad, C.A., 1987. Tillage and rainfall effects on random roughness: a review. Soil Tillage Res., 9: 1--20.

www.alsace.chambagri.fr [15/07/2018] : L'érosion des sols et les coulées d'eaux boueuses, publié le 04/04/2018

www.france3-regions.francetvinfo.fr [15/07/2018] : Nuit d'orage en Alsace : gros dégâts, coulées de boue et inondations, publié le 01/06/2018 à 09:39

<http://www.meteofrance.com/climat/france> [15/07/2018] : Climat en France, les normales sur 30 dernières années.

SOMMAIRE DES ANNEXES

Annexe 1. Formules pour estimer les caractéristiques du sol.....	36
Annexe 2. L'exemple d'utilisation de la grille Excel pour cartographier les résidus	37
Annexe 3. Le formulaire d'observation des états de surface sur le terrain	37
Annexe 4. Résultats d'observation de la quantité des résidus sur la surface	38
Annexe 5. Résultats de la classification de rugosité de la surface	39
Annexe 6. Résultats de classification de la présence de croûtes de battance sur la surface.....	41
Annexe 7. La variation de coefficient de déclin au cours d'une année.....	42
Annexe 8. Les états de surface de la parcelle B au début et à la fin de la campagne, ARAA	42
Annexe 9. Les activités annexes	43

ANNEXE

Annexe 1. Formules pour estimer les caractéristiques du sol

Table 1. Equation summary for soil water characteristic estimates.†

Variable	Equation	R ² /S _e	Eq.
Moisture Regressions			
θ ₁₅₀₀	θ ₁₅₀₀ = 0 _{1500t} + (0.14 × 0 _{1500r} - 0.02)	0.86/0.02	1
	0 _{1500t} = -0.024S + 0.487C + 0.006OM + 0.005(S × OM) - 0.013(C × OM) + 0.068(S × C) + 0.031		
θ ₃₃	θ ₃₃ = 0 _{33t} + [1.283(0 _{33r}) ² - 0.374(0 _{33r}) - 0.015]	0.63/0.05	2
	0 _{33t} = -0.251S + 0.195C + 0.011OM + 0.006(S × OM) - 0.027(C × OM) + 0.452(S × C) + 0.299		
θ _(S-33)	θ _{S-33} = 0 _(S-33t) + (0.6360 _(S-33r) - 0.107)	0.36/0.06	3
	0 _(S-33t) = 0.278S + 0.034C + 0.022OM - 0.018(S × OM) - 0.027(C × OM) - 0.584(S × C) + 0.078		
ψ _e	ψ _e = ψ _{et} + (0.02ψ _{et} ² - 0.113ψ _{et} - 0.70)	0.78/2.9	4
	ψ _{et} = -21.67S - 27.93C - 81.970 _{S-33} + 71.12(S × 0 _{S-33}) + 8.29(C × 0 _{S-33}) + 14.05(S × C) + 27.16		
θ _S	θ _S = 0 ₃₃ + 0 _(S-33) - 0.097S + 0.043	0.29/0.04	5
ρ _N	ρ _N = (1 - 0 _S) ^{2.65}		6
Density Effects			
ρ _{DF}	ρ _{DF} = ρ _N × DF		7
θ _{S-DF}	θ _{S-DF} = 1 - (ρ _{DF} /2.65)		8
θ _{33-DF}	θ _{33-DF} = 0 ₃₃ - 0.2(0 _S - 0 _{S-DF})		9
θ _{(S-33)DF}	θ _{(S-33)DF} = 0 _{S-DF} - 0 _{33-DF}		10
Moisture-Tension			
ψ ₍₁₅₀₀₋₃₃₎	ψ ₀ = A(0) ^{-B}		11
ψ _(33-ψ_e)	ψ ₀ = 33.0 - [(0 - 0 ₃₃)(33.0 - ψ _e)/(0 _S - 0 ₃₃)]		12
θ _(ψ_e-0)	θ = 0 _S		13
A	A = exp(ln33 + Bln0 ₃₃)		14
B	B = [ln(1500) - ln(33)]/[ln(0 ₃₃) - ln(0 ₁₅₀₀)]		15
Moisture-Conductivity			
K _S	K _S = 1930(0 _S - 0 ₃₃) ^(3-λ)		16
K ₀	K ₀ = K _S (0/0 _S) ^{(3+(2/λ))}		17
λ	λ = 1/B		18
Gravel Effects			
R _v	R _v = (αR _w)/[1 - R _w (1 - α)]		19
ρ _B	ρ _B = ρ _N (1 - R _v) + (R _v × 2.65)		20
PAW _B	PAW _B = PAW(1 - R _v)		21
K _b /K _s	K _b /K _s = $\frac{1 - R_w}{[1 - R_w(1 - 3\alpha/2)]}$		22
Salinity Effects			
Ψ _O	Ψ _O = 36EC		23
Ψ _{O0}	Ψ _{O0} = $\frac{0_S}{0}$ (36EC)		24

† All symbols defined in Table 2.

Table 2. Equation symbol definitions.

Symbol	Definition
A, B	Coefficients of moisture-tension, Eq. [11]
C	Clay, %w
DF	Density adjustment factor (0.9–1.3)
EC	Electrical conductance of a saturated soil extract, dS m ⁻¹ (dS/m = milli-mho cm ⁻¹)
FC	Field Capacity moisture (33 kPa), %v
OM	Organic Matter, %w
PAW	Plant Avail. moisture (33–1500 kPa, matric soil), %v
PAW _B	Plant Avail. moisture (33–1500 kPa, bulk soil), %v
S	Sand, %w
SAT	Saturation moisture (0 kPa), %v
WP	Wilting point moisture (1500 kPa), %v
0 _ψ	Moisture at tension ψ, %v
0 _{1500t}	1500 kPa moisture, first solution, %v
0 ₁₅₀₀	1500 kPa moisture, %v
0 _{33t}	33 kPa moisture, first solution, %v
0 ₃₃	33 kPa moisture, normal density, %v
0 _{33-DF}	33 kPa moisture, adjusted density, %v
0 _{(S-33)t}	SAT-33 kPa moisture, first solution, %v
0 _(S-33)	SAT-33 kPa moisture, normal density, %v
0 _{(S-33)DF}	SAT-33 kPa moisture, adjusted density, %v
0 _S	Saturated moisture (0 kPa), normal density, %v
0 _{S-DF}	Saturated moisture (0 kPa), adjusted density, %v
ψ ₀	Tension at moisture 0, kPa
ψ _{et}	Tension at air entry, first solution, kPa
ψ _e	Tension at air entry (bubbling pressure), kPa
K _S	Saturated conductivity (matric soil), mm h ⁻¹
K _b	Saturated conductivity (bulk soil), mm h ⁻¹
K ₀	Unsaturated conductivity at moisture 0, mm h ⁻¹
ρ _N	Normal density, g cm ⁻³
ρ _B	Bulk soil density (matric plus gravel), g cm ⁻³
ρ _{DF}	Adjusted density, g cm ⁻³
λ	Slope of logarithmic tension-moisture curve
α	Matric soil density/gravel density (2.65) = ρ _B /2.65
R _v	Volume fraction of gravel (decimal), g cm ⁻³
R _w	Weight fraction of gravel (decimal), g g ⁻¹
Ψ _O	Osmotic potential at 0 = 0 _S , kPa
Ψ _{O0}	Osmotic potential at 0 < 0 _S , kPa

factor (DF) with a range of 0.9 to 1.3 was incorporated to estimate values of ρ_{DF}, θ_{S-DF}, θ_{33-DF}, and θ_{(S-33)DF} (Eq. [7]–[10]).

To form a full-range computational scheme, the moisture-tension relationship was represented by three tension segments of 1500–33, 33–ψ_e, and ψ_e–0, kPa. The 1500- to 33-kPa range was estimated by an exponential equation (Eq. [11]) with A and B parameters developed from the logarithmic form using estimated values θ₁₅₀₀ and θ₃₃ (Eq. [14]–[15]). The 33–ψ_e kPa segment was assumed linear (Eq. [12]) based on common experience

Annexe 2. L'exemple d'utilisation de la grille Excel pour cartographier les résidus



Annexe 3. Le formulaire d'observation des états de surface sur le terrain

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

Classifications EDS	
Classe de Boekel (1 à 8)	
Facies (F0, F11, F12, F2)	
Classe de rugosité (R0 à R4)	

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

croûtes		% de la surface totale
Structurales		
Sédimentaires		

Macropores			
Fentes		Longueur moyenne (cm)	Trous Nombre (0, <=5, 5 à 20, >20)
Structure (pas, dispersée, lignes, polygones)	Densité (pas, très faible, faible, moyenne, élevée)		

Microrelief : mesures chaînette (longueur max = cm)					
Sens par rapport au travail du sol	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3	Mesure 4	Mesure 5
	parallèle				
perpendiculaire					

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

Hauteur moyenne de la rugosité orientée : cm

Végétation			
Nom de la culture :	Résidus de culture :		
Couverture (%)	Broyés (a/n), couchés (a/n)		
Hauteur (cm)	Couverture (%)		
Nombre de feuilles	Soellé ? (oui/non)		

% couverture adventices :

% couverture totale (culture + adventices + résidus) :

Ligne de semis : incision au niveau du collet (Oui/Non) :

Annexes formulaire EDS

Facies

F0 : état initial conféré par le travail du sol ;
 F11 : présence des croûtes structurales ;
 F12 : croûtes sédimentaires uniquement dans les dépressions, le restant avec croûtes structurales ;
 F2 : croûtes sédimentaires généralisées à toute la surface du sol

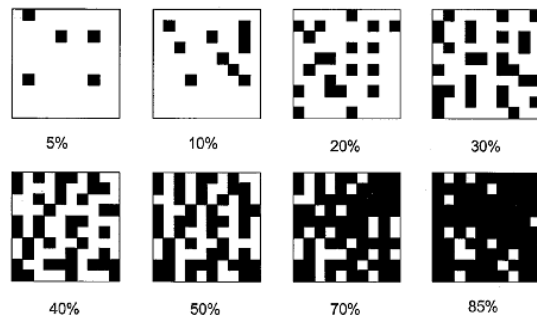
Rugosité

Rugosité : il faut mesurer l'écart de côte d'altitude entre le fond des dépressions et leur point de débordement. Le tableau ci-dessous permet de déterminer la classe de rugosité (R0 à R4).

Table 2
Soil surface roughness evaluation: difference in the heights of the deepest part of microdepressions and the lowest point of their divide (from Ludwig et al., 1995)

Grade	Roughness index (cm)	Typical agricultural situation
R0	0-1	Strongly crusted sown fields, harvested fields with intense compacting
R1	1-2	Sown fields with fine loosened or moderately crusted seedbeds
R2	2-5	Recently sown fields with a cloddy surface, crusted tilled fields without residues
R3	5-10	Snubble-ploughed fields and recently sown fields with a very cloddy surface
R4	> 10	Ploughed fields

Aide à l'estimation des couvertures (%)



Annexe 4. Résultats d'observation de la quantité des résidus sur la surface

	INTERRANG					RANG					TRACES DE ROUE				
	27_04_07	18_05_07	31_05_07	05_06_07	29_06_07	27_04_07	18_05_07	31_05_07	05_06_07	29_06_07	27_04_07	18_05_07	31_05_07	05_06_07	29_06_07
1	11	19	16	18	7	6	10	5	4	-	15	16	20	15	7
2	9	25	14	12	10	5	8	2	-	-	13	15	24	18	10
3	9	16	16	15	13	13	12	6	8	-	11	17	24	17	6
4	10	16	12	14	9	6	6	3	3	-	8	15	15	12	10
5	8	12	15	11	0	7	11	4	-	-	8	11	-	-	-
1	15	20	22	18	7	5	9	5	2	-	10	11	11	9	5
2	19	25	23	21	12	14	13	10	6	-	8	10	8	7	4
3	13	20	16	14	13	11	14	10	8	-	13	19	16	15	8
4	21	30	25	-	22	7	9	7	8	-	14	20	16	16	10
5	19	30	28	28	29	9	14	7	9	-	18	23	24	22	17
1	21	29	24	23	20	11	14	8	5	-	13	17	14	11	7
2	13	22	17	16	9	8	10	9	5	-	12	16	15	12	13
3	11	13	12	12	12	16	23	20	13	-	11	15	13	13	11
4	10	16	15	15	8	8	13	10	7	-	9	10	10	11	5
5	13	18	16	17	14	10	14	9	10	-	8	12	11	10	7
MOY	13,46666667	20,73333333	18,06666667	16,71428571	12,33333333	9,06666667	12	7,66666667	6,769230769	-	11,4	15,5	15,78571429	13,42857143	8,571428571

	Interrang	Rang	Trace roue
	23_05_08	23_05_08	23_05_08
1	17	11	23
2	14	10	8
3	16		
4	16		
MOY	15,75	10,5	15,5

	Interrang		Rang	Trace roue
	23_04_09	28_05_09	23_04_09	23_04_09
1	18	16	16	16
2		21		
MOY	18	18,5	16	16

	Rang		Interrang	
	18_05_10	11_06_10	18_05_10	11_06_10
1	16	10	18	23
2	20	12	18	25
3	19	15		51
MOY	18,33333333	12,33333333	18	33

	26_04_11	09_06_11	20_06_11	14_10_11
1	11	20	18	12
2	9	16	23	9
3	24	21	19	-
MOY	14,66666667	19	20	10,5

	23_01_12	11_06_12
1	29	21
1*	33	
2	30	18
2*	34	
MOY	31,5	19,5

	CH	CM GUY	CH GUY	BH
	23_04_13	23_04_13	23_04_13	23_04_13
1	15	13	3	99
1*	8	10	7	72
2	16	9	8	99
2*	13	11	8	78
MOY	13	10,75	6,5	87

	Parcelle C	Parcelle B
	09_11_15	09_11_15
1	19	47
2	24	56
3	13	98
4	12	36
5	21	27
6	21	81
7	18	89
8	11	98
MOY	17,375	66,5

	Parcelle C	Parcelle B
	22_03_16	22_03_16
1	50	45
2	11	69
3	12	99
4	20	36
5	27	
6	34	
7	12	
8	11	
MOY	22,125	62,25

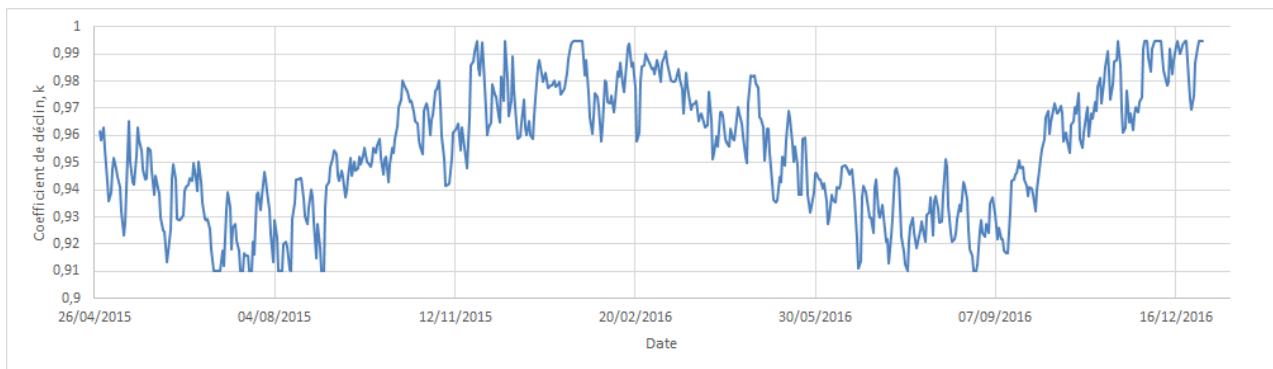
Classification de rugosité du sol (* - présence de trace d'écoulement)																															
A 2010		HP				MP				BP				C 2010		HP				MP				BP							
		R0	R1	R2	R3	R0	R1	R2	R3	R0	R1	R2	R3			R0	R1	R2	R3	R0	R1	R2	R3	R0	R1	R2	R3				
		0-1 cm	1-2 cm	2-5 cm	5-10 cm	0-1 cm	1-2 cm	2-5 cm	5-10 cm	0-1 cm	1-2 cm	2-5 cm	5-10 cm			0-1 cm	1-2 cm	2-5 cm	5-10 cm	0-1 cm	1-2 cm	2-5 cm	5-10 cm	0-1 cm	1-2 cm	2-5 cm	5-10 cm				
LS	3/5	♦				♦				-	-	-	-	LS	3/5	♦					♦			♦	♦						
	18/5	♦				♦				♦					18/5	♦					♦			♦	♦						
	11/6	♦				♦				♦					11/6	♦					♦			♦	♦						
IRG	3/5			♦				♦				♦		IRG	3/5							♦				♦				♦	
	18/5		♦					♦				♦			18/5		♦					♦		-	-	-	-				
	11/6		♦					♦				♦			11/6	♦						♦				♦					
A 2011	26/4		♦				♦				♦			C 2011	26/4			♦				♦				♦				♦	
	9/6	♦				♦					♦				9/6	♦					♦			♦	♦						
	20/6	♦*				♦*				-	-	-	-		20/6	♦					♦			♦	♦						
	14/10	♦				♦				-	-	-	-		14/10	♦					♦			-	-	-	-				
A 2012	23/1			♦					♦					C 2012	23/1			♦				♦				♦					
	19/6	♦				♦					♦				19/6	♦					♦					♦					
A 2013	23/4			♦					♦					C 2013	23/4			♦				♦				♦					
A 2015	9/11			♦					♦					C 2015	9/11	♦					♦					♦					
A 2016	22/3			♦										C 2016	22/3	♦					♦					♦					
	22/3			♦											22/3	♦					♦					♦					

Annexe 6. Résultats de classification de la présence de croûtes de battance sur la surface

A 2007		Présence de croûtes de battance sur la surface (*-trace d'écoulement)																																					
		INTERRANG												LIGNES DE SEMIS												TRACES DE ROUE													
		I				II				III				I				II				III				I				II				III					
		F0	F11	F12	F2	F0	F11	F12	F2	F0	F11	F12	F2	F0	F11	F12	F2	F0	F11	F12	F2	F0	F11	F12	F2	F0	F11	F12	F2	F0	F11	F12	F2	F0	F11	F12	F2		
1	27/4	♦				♦				♦				♦				♦				♦				♦				♦				♦					
	18/5	♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦				
	31/5	♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦				
	5/6			♦				♦					♦				♦				♦				♦				♦				♦				♦		
	29/6			♦				♦					♦				♦				♦				♦				♦				♦				♦		
2	27/4	-	-	-	-	♦				♦				♦				♦				♦				♦				♦				♦					
	18/5	♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦				
	31/5	♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦				
	5/6	-	-	-	-	♦				♦				♦				♦				♦				♦				♦				♦				♦	
	29/6			♦				♦					♦				♦				♦				♦				♦				♦				♦		
3	27/4	♦				♦				♦				♦				♦				♦				♦				♦				♦				♦	
	18/5	♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦				
	31/5	♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦				
	5/6					♦				♦				♦				♦				♦				♦				♦				♦				♦	
	29/6			♦				♦					♦				♦				♦				♦				♦				♦				♦		
4	27/4	♦				♦				♦				♦				♦				♦				♦				♦				♦				♦	
	18/5	♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦				
	31/5	♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦				
	5/6					♦				♦				♦				♦				♦				♦				♦				♦				♦	
	29/6			♦				♦					♦				♦				♦				♦				♦				♦				♦		
5	27/4	♦				♦				♦				♦				♦				♦				♦				♦				♦				♦	
	18/5	♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦				
	31/5	♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦				
	5/6					♦				♦				♦				♦				♦				♦				♦				♦				♦	
	29/6			♦				♦					♦				♦				♦				♦				♦				♦				♦		

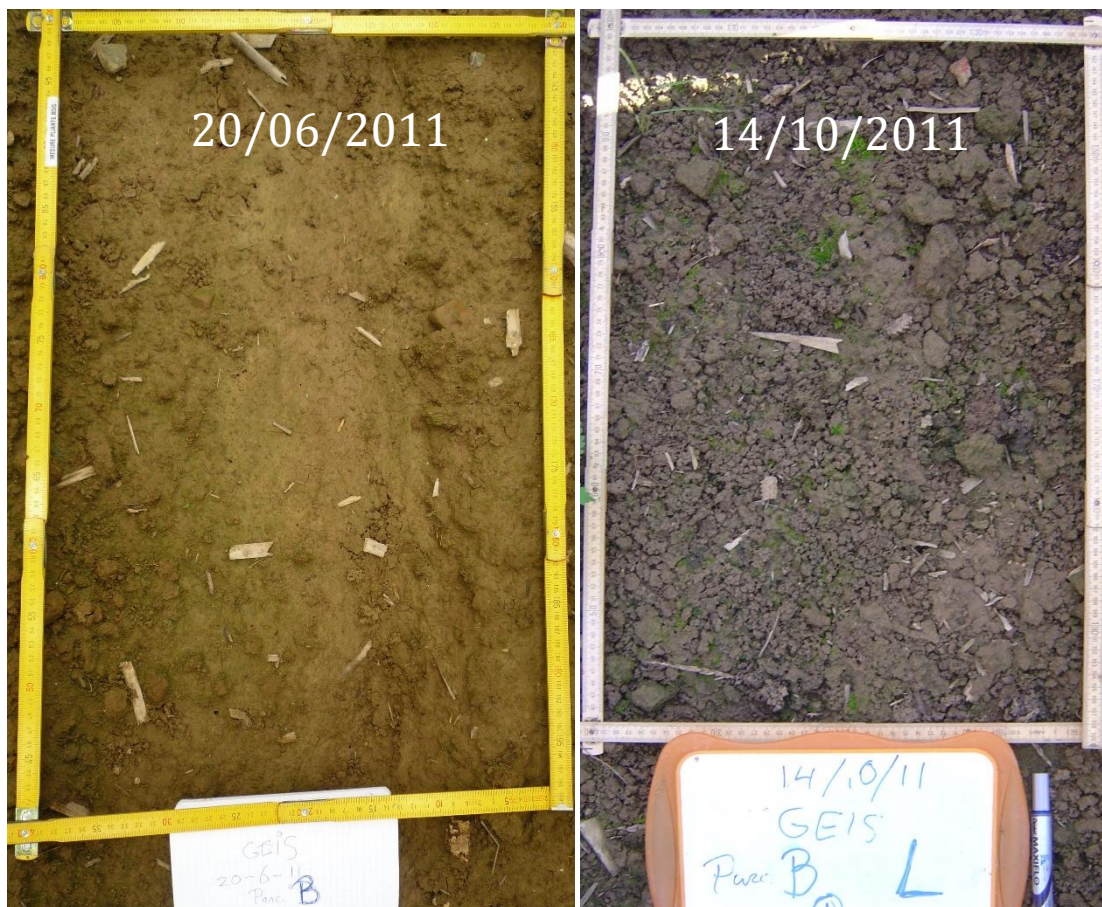
A 2010		Présence de croûtes de battance sur la surface															
		HIP				MP				BP							
		F0	F11	F12	F2	F0	F11	F12	F2	F0	F11	F12	F2				
LS	3/5	♦				♦				♦				-	-	-	-
	18/5	♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦		
	11/6	♦				♦				♦				♦	♦		
IRG	3/5	♦				♦				♦				♦	♦		
	18/5	♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦		
	11/6	♦				♦				♦				♦	♦		
A 2011	26/4	♦				♦				♦				♦	♦		
	9/6		♦							♦				♦	♦		
	20/6			♦						♦				♦	♦		
	14/10	♦	♦			♦				♦				♦	♦		
A 2012	23/1	♦				♦				♦				♦	♦		
	19/6					♦				♦				♦	♦		
A 2013	23/4	♦				♦				♦				♦	♦		
A 2015	9/11	♦				♦				♦				♦	♦		
A 2016	22/3	♦				♦				♦				♦	♦		
	22/3	♦				♦				♦				♦	♦		
C 2010	3/5	♦				♦				♦				♦	♦		
	18/5	♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦		
	11/6	♦				♦				♦				♦	♦		
	3/5	♦				♦				♦				♦	♦		
C 2011	18/5	♦	♦			♦	♦			♦	♦			♦	♦		
	11/6	♦				♦				♦				♦	♦		
	26/4	♦				♦				♦				♦	♦		
	9/6		♦							♦				♦	♦		
C 2012	20/6			♦						♦				♦	♦		
	14/10	♦	♦			♦				♦				♦	♦		
	23/1					♦				♦				♦	♦		
	19/6					♦				♦				♦	♦		
C 2013	23/4	♦				♦				♦				♦	♦		
C 2015	9/11	♦				♦				♦				♦	♦		
C 2016	22/3					♦				♦				♦	♦		
	22/3					♦				♦				♦	♦		

Annexe 7. La variation de coefficient de déclin au cours d'une année



Annexe 8. Les états de surface de la parcelle B au début et à la fin de la campagne, ARAA

La photo gauche présente une trace d'écoulement suite aux premières événements pluviométriques. La surface est lisse sans résidus, l'état favorable pour les écoulements. La photo droite est faite à la fin de la campagne sur la même parcelle, la rugosité de la surface est plus importante suite à la forte activité de vers de terre, la porosité du sol est également élevée comme conséquence de la création de chemin de lombriciens.



Annexe 9. Les activités annexes

L'intégration dans le milieu professionnel ce n'est pas seulement le "remplissage" de tâches définies mais aussi l'élargissement des horizons et la découverte du travail des collègues. Pendant mon stage j'ai pu participer aux observations similaires aux celles utilisées dans le travail. Les observations des états de surface sur les parcelles de Schwindratzheim et Geudertheim ont été effectuées dans le cadre d'un projet de la Chambre d'Agriculture d'Alsace. À la suite des nombreux orages tombés en Alsace cette année, plusieurs secteurs ont été endommagés par les coulées de boue dont deux dispositifs du travail de la CAA/CRAGE. Ces missions m'ont permis de voir en réalité à quoi correspondent les données sur lesquelles j'ai travaillé pendant mon stage.

En plus j'étais engagée dans diverses activités de l'association telles que :

- des tournées d'observations du sol et la description du sol par sondage tarière (observation) ;
- des descriptions de profils culturaux du sol (assistance) ;
- la participation au séminaire " Inventaire, Gestion et Conservation des Sols (IGCS)" ;
- la contribution au salon "Agriculture de demain" (préparation d'un poster, cf. figure ci-dessous)



Pourquoi et comment décrire les états de surface ?

Observer la surface du sol pour évaluer sa résistance à la dégradation par la pluie en fonction de différentes techniques du travail de sol

Rugosité de surface

- Estimation visuelle
- Utilisation de la chaînette



Couverture par des résidus



- Utilisation de grille sur tableur
- Utilisation de la chaînette
- Estimation visuelle

Analyse d'activité biologique et lombrics dans la terre



Formulaire d'observation

Suivi des microparcelles - Description des EDS					
Localisation :	Observateur :				
Code microparcelle :	Date :				
Conditions hydriques : sec/humide	Pente (%) :				
Classifications EDS					
Classe de Bodeg (1 à 8)					
Facès (P0, P11, P12, P13)					
Classe de rugosité (00 à 04)					
motus % de la surface totale					
0mm - 2 cm	scellément : oui / non				
2,2 cm					
croûtes % de la surface totale					
Structurales					
Sédimentaires					
Macropores					
Fentes	Densité	Largeur moyenne (cm)	Trous		
Structure (pas de sens, lignes, polygones)			Nombre (0 -> 5 à 20 -> 40)		
Micronellif : mesures chaînette (longueur max : cm)					
Sens par rapport au travail du sol	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3	Mesure 4	Mesure 5
parallèle					
perpendiculaire					
Direction principale du ruissellement éventuel : pente, travail du sol, autre :					
Hauteur moyenne de la rugosité orientée : cm					
Végétation					
Nom de la culture			Méthode de culture		
Couverture (%)			Broyés (0/1) : oui/non (0/1)		
Hauteur (cm)			Couverture (%)		
Nombre de feuilles			Scale 7 (oui/non)		
% couverture adhésives :					
% couverture totale (culture + adhésives + résidus) :					
Ligne de semis : incision au niveau du collect (Oui/Non) :					

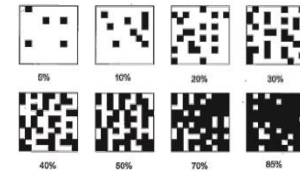
Croûtes de battance

(glaçage de structure ou par sédimentation)

- Estimation visuelle



Aide à l'estimation visuelle



Stabilité structurale

- Analyse de teneur en matière organique
- Analyse de résistance à l'arrachement (scissomètre)



Une structure du sol influencé par le travail du sol

Les états de surface du sol déterminent l'entrée de l'eau et de l'air dans le sol et influencent ainsi le comportement agronomique de la parcelle. La dynamique des états de surface témoigne de la résistance du sol à la dégradation par la pluie. **Agir sur les états de surface est la clé pour limiter le ruissellement.**

