

Remerciements

Tout à commencé en Septembre 2002, avant de débiter ma maîtrise de Géographie j'ai réalisé un stage au sein du Syndicat Mixte pour le SAGE de la Canche (Pas-de-Calais), en charge des impacts causés par l'érosion de sols cultivés. Le paradoxe de surfaces si importantes aux mains de quelques exploitants m'a marqué, tout comme le fait que des processus de surface puissent générer des conséquences, entre autres, sur la fertilité des sols et la qualité des eaux de surface.

Puis, en maîtrise a eu lieu la rencontre décisive avec Anne-Véronique Auzet qui me suit depuis un septennat, déjà ! Je la remercie pour son soutien tout au long de ces années ainsi que pour ses corrections toujours pertinentes. Merci à elle de m'avoir fourni toutes les conditions pratiques pour que je puisse mener ce travail sans entrave. Je remercie également Christian Bockstaller qui a assuré la codirection de la thèse. Merci à toi, Christian, pour les discussions que nous avons eu à propos de mes données et qui ont permis de mieux structurer ma réflexion.

Je tiens aussi à remercier les personnes qui ont permis de mener ce projet de thèse, et tout particulièrement Sandrine Spaeter et Anne-Véronique Auzet qui ont porté le programme interdisciplinaire GERIHCO (Gestion du Risque et Histoire des Coulées boueuses). Je remercie également les organismes qui ont permis le financement de ma thèse : l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse, au travers de GERIHCO ; ainsi que la Région Alsace. Ce doctorat a été mené au sein de l'Institut de Mécanique des Fluides et Solides (IMFS - UMR 7507 ULP/CNRS) devenu depuis 2009 le Laboratoire en Hydrologie et Géochimie de Strasbourg (Lhyges – UMR 7517 UDS/CNRS).

J'adresse de sincères remerciements aux personnes qui ont accepté de prendre part au jury de thèse dans un calendrier que je sais très chargé. Merci donc aux rapporteurs : Philippe Ackerer, Yves le Bissonnais et Guy Richard ainsi qu'aux examinateurs Philippe Martin et Jean-François Ouvry, qui m'ont souvent conseillés, au travers du programme RDT. Je leur suis sincèrement gré de leur participation et de l'effort accompli en conséquence.

J'adresse de sincères remerciements aux membres de GERIHCO, partager ce travail avec des cette équipe pluridisciplinaire a été un vrai plaisir. Je remercie le personnel de l'ARAA qui a toujours eu un regard intéressé et constructif sur mon travail. Merci en particulier à Rémi Koller, Paul Van Dijk, Marie-Line Burtin, et Joëlle Sauter.

Je remercie également les conseillers des chambres d'Agriculture du Haut et Bas-Rhin : François Alves et Régis Huss. Je remercie sincèrement François, Amélie Fieter, Michel Gendrin ainsi que les stagiaires de la Chambre du Haut-Rhin qui m'ont très souvent prêté main forte lors de la mise en place des parcelles expérimentales ou lors des simulations de pluie. Je remercie également Didier Lasserre et Damien Gaudillat d'ARVALIS pour leur aide ponctuelle.

Je remercie tout particulièrement les exploitants sur les parcelles desquels j'ai réalisé observations de surface et les mesures de ruissellement : François Tischmacher, Gérard Heintz, Alain

Rosenblatt, Patrice Schneider. Merci à eux d'avoir accepté mes contraintes nombreuses. En contrepartie j'ai beaucoup appris à leurs côtés. Promis, si je dois continuer, j'apprendrai à conduire un tracteur pour déplacer la citerne.

Je remercie chaleureusement Pascal Friedman, qui a assuré avec beaucoup de sérieux la réalisation du simulateur de pluie et m'a prêté main forte durant les expérimentations, rendues sérieusement difficiles (...) par les conditions météo.

Je remercie tout spécialement Martine Trautmann pour les analyses de sol qu'elle a réalisé ainsi que pour sa bonne humeur inoxydable sur le terrain comme au labo...

... Transition facile, je remercie toutes les personnes avec qui j'ai partagé ces années de thèse, à commencer par Carine, merci pour ta présence, ton humour et tes précieuses relectures... et oui, « tout ira bien » ! Je salue bien bas également Yannick, Damien [révérence], Aurélie, Jacky... J'adresse également un clin d'œil à tous les enseignants-chercheurs qui animent le labo au moment du café : Patrick, Dominique, Thierry...

J'adresse des remerciements tous particuliers à Bouchra avec qui j'ai effectué ma thèse et je partageais mon bureau et qui enseigne désormais en Syrie.

Je remercie la faculté de géographie pour les deux années en tant qu'ATER qui ont été pour moi mes plus belles années de thèse. J'en profite pour remercier le personnel administratif et technique de la faculté pour leur gentillesse, en particulier, Odile, Francine et Paulette.

Merci enfin à mes parents et à Karine (merci pour tes relectures et ta patience) de leur soutien et de leurs encouragements. Merci à eux de m'avoir encouragé à continuer tout au long de ce périple.

Sommaire

Remerciements	3
Sommaire	7
Introduction générale	11
Chapitre 1 État de surface et formation du ruissellement sur les sols cultivés : bilan des connaissances	17
1. Influence de la surface du sol sur la formation du ruissellement	18
2. Les techniques sans labour, un des outils de la lutte contre le ruissellement	30
3. Les effets du non-labour sur le sol	37
4. Approfondir l'effet de la surface sur la formation du ruissellement	43
Synthèse et objectifs de ce travail	48
Chapitre 2 Sites d'études et méthodes	51
1. Une région affectée par l'érosion	53
2. Présentation des petites régions naturelles étudiées	57
3. Présentation des sites de suivis	63
4. Méthodes de mesures utilisées	66
Conclusion	80
Chapitre 3 Résultats des campagnes d'observation d'états de surface	83
1. Méthode et jeu de données retenus	84
2. A l'état initial, des différences correspondant aux pratiques	87
3. A l'état final, un classement complexe soulignant la dégradation structurale	91
4. Synthèse des observations d'état de surface	94
5. Étude de la variabilité intraparcellaire des états de surface	95
Synthèse et conclusion	100

Chapitre 4 EDS et formation du ruissellement	103
1. Identifier les variables d'EDS pertinentes	106
2. Une baisse du ruissellement et de l'érosion en contexte de non-labour	107
3. Mesures de ruissellement et d'érosion à l'échelle du motif	118
4. Propagation du ruissellement	120
5. Effets de la répartition spatiale des résidus végétaux sur le ruissellement	127
Conclusion	130
Chapitre 5 Mise au point d'un indicateur estimant l'aléa ruissellement	133
1. Quelles connaissances intégrer à l'indicateur ?	135
2. Effet de des résidus végétaux	137
Chapitre 6 Discussion	141
1. L'effet des pratiques sur la réduction du ruissellement et de l'érosion	142
2. Quels facteurs contrôlent la formation du ruissellement ?	144
Conclusion générale	149
Références bibliographiques	155
Liste des tableaux et figures	163
Liste des abréviations	169
Annexes	171
Table des matières	205

Introduction générale

Depuis les années 70, les dégâts liés à l'érosion hydrique des sols cultivés augmentent progressivement (Boardman et Poesen, 2006). Le phénomène est généralisé et concerne de nombreux pays d'Europe de l'Ouest (Royaume-Uni, Belgique, France, Pays-Bas, *etc.*). Les impacts causés par le ruissellement formé sur les terres agricoles sont multiples et affectent les territoires agricoles mais également les secteurs urbanisés situés en aval.

En secteur urbain et péri-urbain, les dégâts sont majoritairement causés par des inondations boueuses¹. Celles-ci résultent de la formation de ruissellement érosif sur les parcelles agricoles situées plus à l'amont dans le bassin versant. En France, l'Institut Français de l'Environnement (IFEN) a entrepris une étude détaillée des demandes de classement en « catastrophe naturelle » des communes touchées par des inondations boueuses (Thorette et Le Bissonnais, 2005). Elle révèle une hausse de leur fréquence depuis 1992 qui ne peut être expliquée uniquement par les précipitations. D'autres facteurs sont également à l'œuvre et concernent :

- les **modifications du paysage et des pratiques agricoles** : la spécialisation des cultures homogénéise le paysage et peut aboutir à l'apparition de vastes surfaces ruisselantes ; la disparition des interfaces (haies et prairies) notamment dans les secteurs de forte pente ou autour des zones urbanisées, réduit les possibilités de stockage et d'infiltration du ruissellement (Auzet, 1987) ;
- la **forte pression péri-urbaine** (comme l'observent Evrard *et al.* (2008) en Belgique) induit un rapprochement des territoires agricoles et urbanisés et facilite ainsi le transfert du ruissellement vers l'aval.

Si les inondations boueuses constituent la conséquence la plus visible du ruissellement généré sur les terres cultivées, les enjeux de **préservation des ressources naturelles, le sol et l'eau**, sont importants. L'Agence Environnementale Européenne (Van-Camp *et al.*, 2004) estime que 12 millions d'hectares sont très dégradés par l'érosion hydrique. Ces secteurs présentent des pertes en sol largement supérieures à 1t/ha/an, valeur admise de formation de sol en Europe tempérée (la fourchette est comprise entre 0,3 t et 1,4 t/ha (Verheijen *et al.*, 2009)). L'appauvrissement induit par l'érosion peut causer, à terme, une diminution de la fertilité des sols.

Le transport des particules et substances par le ruissellement cause également des dégâts de deux types :

- une pollution des nappes phréatiques par les produits phytosanitaires ;

¹ Remarque : Dans ce travail, le terme d'« inondation boueuse » sera retenu pour désigner les écoulements très chargés en sédiments provenant des surfaces cultivées et entraînant des particules de sol. Il correspond au terme « coulée de boue », parfois équivoque, mais retenu dans le questionnaire rempli par les maires lors d'une procédure d'indemnisation au titre « catastrophe naturelle » (Le Bissonnais *et al.*, 2002).

- une eutrophisation des milieux aquatiques en raison de l'augmentation de la teneur en substances nutritives (phosphates). Le transport excessif de sédiments peut également entraîner une turbidité impactant le fonctionnement de l'écosystème (trouble de la photosynthèse, par ex.).

Sur ces secteurs, **la formation du ruissellement est fortement influencée par l'état structural** de la surface. La structure du sol en surface se dégrade sous l'effet des précipitations ce qui se traduit par la formation de différents types morphologiques de croûte de battance qui contrôlent la partition ruissellement/infiltration (Bresson et Boiffin, 1990; Valentin et Bresson, 1992; Le Bissonnais *et al.*, 1995; Léonard et Andrieux, 1998).

Ces travaux ont fait émerger le concept d'**état de la surface du sol** [EDS](Boiffin, 1984; Auzet, 2000). Il désigne l'état hydrique et structural, ainsi que la microtopographie et la couverture éventuelle du sol. Les EDS jouent sur les processus hydrologiques de la surface du sol : **l'interception, l'infiltration, le stockage dans les dépressions ainsi que l'arrachement et le transport des particules de terre**. Leur variabilité spatio-temporelle est un des facteurs permettant d'expliquer la récurrence des dégâts liés au ruissellement dans des secteurs caractérisés par des conditions climatiques et topographiques modérés.

Plusieurs auteurs ont montré les interactions existant entre les pratiques agricoles et la dégradation structurale de la surface (Monnier *et al.*, 1986; Van Dijk *et al.*, 1996; Martin *et al.*, 2004). De ce fait, les EDS présentent une variabilité spatiale et temporelle forte, largement contrôlée par les **interactions entre calendriers climatique et cultural**. En intégrant ces interactions, les EDS constituent des indicateurs permettant de tenir compte de la variabilité spatiale des processus hydrodynamiques de surface (Auzet *et al.*, 2005b) et, de ce fait, sont utilisés dans des démarches expertes afin d'estimer la lame d'eau ruisselée (modèle hydrologique STREAM (Cerdan *et al.*, 2002b).

Cependant, les connaissances acquises sur les mécanismes de formation du ruissellement l'ont été sur des jeux de données concernant des sols labourés (technique dénommée comme « conventionnelle » par la suite). Or, depuis deux décennies, les **Techniques Sans Labour (TSL)** connaissent un certain essor dans plusieurs secteurs cultivés d'Europe (Boiffin et Monnier, 1991). Ces pratiques culturales sont caractérisées par un travail du sol sans retournement et une présence de résidus végétaux en surface (mulch) ; elles visent notamment à réduire le ruissellement et l'érosion (Tebrugge et During, 1999).

Les TSL peuvent constituer un **moyen de lutte contre le ruissellement en amont** car elles jouent sur les processus élémentaires d'infiltration et d'arrachement des particules. Elles sont donc complémentaires des dispositifs implantés en aval tels que les ouvrages de rétention destinés à stocker les écoulements et protéger les zones urbanisées. De tels dispositifs permettent de palier les conséquences de la formation du ruissellement mais ne traitent pas le problème à la source. De plus leur efficacité est fortement liée aux quantités de sédiments transportés qui réduisent le volume disponible pour stocker du ruissellement (Le Bissonnais *et al.*, 2002).

Cependant, l'utilisation des TSL comme moyen de lutte contre le ruissellement n'est pas sans ambiguïté. Certains auteurs (Kwaad *et al.*, 1998; Dabney *et al.*, 2004; Wilson *et al.*, 2004; ADEME, 2007) mentionnent que si la réduction de l'érosion semble être acquise, il n'en est pas de même pour les volumes ruisselés. Or, l'étude de ces pratiques se limite souvent à leur impact sur les propriétés du profil (Tebrugge et During, 1999; Holland, 2004) alors que **leurs effets sur les EDS sont peu ou pas décrits**. Les études portent sur des essais de longue durée (>10 ans) où les effets des TSL sur le profil de sol sont très développés. Ceci induit un manque de connaissances sur l'effet des TSL sur les processus de surface.

Cependant, la connaissance de l'intensité de l'érosion hydrique à l'échelle des parcelles agricoles est difficile à acquérir. De telles connaissances requièrent des dispositifs expérimentaux lourds qui nécessitent souvent un temps de présence sur le terrain. C'est pourquoi l'utilisation d'**indicateurs** peut se substituer aux mesures directes (Girardin *et al.*, 1999). Ces indicateurs peuvent être simples (une seule variable) ou composites (plusieurs variables inter-reliées) et permettent :

- de dresser un diagnostic de l'état du système (en l'occurrence, le ruissellement érosif) ;
- d'aider à la décision en ciblant les secteurs les plus critiques et en évaluant l'impact de modifications, telles que le changement de pratiques agricoles dans notre cas.

Ce travail consistera, dans un premier temps, à observer les EDS en contexte de non-labour et à étudier leur spécificité par rapport au contexte conventionnel. Dans un second temps, il s'agira de mesurer le ruissellement et l'érosion émis par les techniques conventionnelles et de TSL. Ces résultats seront ensuite confrontés aux observations de surface afin d'analyser l'influence des EDS sur le ruissellement.

A partir de ces connaissances, un objectif complémentaire sera la construction d'un indicateur estimant le risque que la surface présente un EDS très ruisselant.

Le **premier chapitre** sera consacré à l'état actuel des connaissances sur les EDS et leur rôle sur la formation du ruissellement. Les processus qui contrôlent la formation du ruissellement sur sols limoneux seront étudiés ainsi que les facteurs naturels et anthropiques qui influencent la variabilité spatio-temporelle des EDS. La seconde partie traitera des TSL et de leurs effets connus sur la surface et le profil du sol.

Le **deuxième** chapitre présentera les collines limoneuses d'Alsace qui constituent notre terrain d'étude. Les facteurs explicatifs de l'occurrence des inondations boueuses seront détaillés ainsi que les sites d'études. Les méthodes d'observation des EDS et de mesure du ruissellement seront ensuite présentées.

Les **troisième et quatrième chapitres** présenteront respectivement les résultats des suivis d'EDS et de ruissellement-érosion.

Le **cinquième chapitre** présentera la construction de l'indicateur de l'aléa ruissellement à partir des résultats fournis par les deux chapitres précédents.

Le **sixième chapitre** analysera de manière critique les résultats d'observation de la surface ainsi que les données de ruissellement, notamment en les comparant avec des données issues de la littérature.

Chapitre 1

État de surface et formation du ruissellement sur les sols cultivés : bilan des connaissances

Ce chapitre vise à identifier les facteurs qui influencent la partition infiltration/ruissellement à la surface du sol. Après un rappel des processus hydrologiques pouvant générer du ruissellement ; l'étude des processus ayant cours à la surface du sol seront étudiés, en s'attachant à les décrire en contexte cultivé. Il s'agit de comprendre pourquoi l'infiltrabilité de la surface peut présenter une variabilité spatio-temporelle importante en relation avec les caractéristiques de la surface. L'accent sera mis sur l'effet des pratiques culturales sur la surface du sol.

Le deuxième volet de ce chapitre sera consacré à l'étude des techniques sans labour (TSL). Celles-ci constituent un moyen de lutte contre l'érosion hydrique des terres cultivées. Nous reviendrons sur les événements et motivations qui ont conduit à l'essor de ces techniques au cours du XX^{ème} siècle. Puis nous détaillerons l'effet des TSL sur vis-à-vis du profil et de la surface du sol et les conséquences sur l'infiltration. L'objectif est de mettre en lumière les effets avérés et connus des TSL sur la formation du ruissellement, mais également les connaissances qui restent à acquérir.

A ce stade du travail, une précision sémantique est nécessaire pour éviter toute confusion dans la suite de ce travail :

- Le *non-labour*, renverra à toute la gamme des itinéraires alternatifs au labour, c'est-à-dire les techniques sans labour ET le semis-direct ;
- Les *Techniques Sans Labour* [TSL] désigneront toutes les pratiques culturales alternatives au labour incluant un travail mécanique du sol pour le fragmenter ;
- Le *semis-direct* [SD] renverra aux pratiques où les seules opérations culturales sont le semis et la récolte.

1. Influence de la surface du sol sur la formation du ruissellement

1.1. Les processus élémentaires

1.1.1. Les différents types de ruissellement

Le ruissellement correspond à la mise en mouvement d'un excès d'eau se formant à la surface du sol suite aux précipitations. On distingue deux types de ruissellement (Ambroise, 1999) : le ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration² (*excess infiltration overland flow*) également appelé **ruissellement hortonien**, ou le **ruissellement sur sol saturé** (*saturated overland flow*).

Le **ruissellement hortonien** intervient lorsque l'intensité des précipitations est supérieure à la capacité d'infiltration du sol (Horton, 1933), on parle alors de « saturation par le haut ». Ce type de ruissellement a été mis en évidence dans des bassins versants faiblement végétalisés, aux climats semi-arides ou arides caractérisés par des **intensités pluviométriques élevées** (>100mm/h en moyenne). Les crues-éclair (*flash-floods*) sont des phénomènes résultant de la formation de ruissellement hortonien. La capacité d'infiltration de l'horizon superficiel peut être réduite par la formation de croûtes de battance (également appelées « organisation pelliculaire de surface » (Cosandey et Robinson, 2000)). Ces croûtes sont la conséquence de la réorganisation de la structure du sol en surface sous l'effet des pluies et de la sédimentation de particules de sol. Ces mécanismes seront décrits plus en détail par la suite (cf. § 1.1.2.2). La formation de ces croûtes de battance permet d'expliquer la présence de ruissellement sous des latitudes tempérées, où les intensités pluviométriques sont plus faibles qu'en climat semi-aride.

Le **ruissellement sur sol saturé**, mis en évidence par Cappus (1960) est observé dans les secteurs où le sol est saturé ou proche de la saturation. La saturation du profil s'effectue « par le bas » en raison de la présence d'une nappe phréatique à proximité de la surface. Les précipitations tombent sur une surface saturée et ne peuvent que ruisseler. Ce ruissellement est fréquemment observé dans les zones hydromorphes, les talwegs et en bordure de cours d'eau. Il est fortement influencé par le **cumul des précipitations** qui provoque un gonflement progressif des nappes, ce qui sature d'autant plus rapidement le profil par le bas. Comme le remarque Ambroise (2004), il s'agit d'un phénomène efficace dans la génération des crues. Les secteurs saturés accompagnent fréquemment les cours d'eau, et le ruissellement ainsi généré contribue directement à l'écoulement de crue.

Le ruissellement peut même se former en l'absence de précipitations, on parle alors d'**exfiltration** (*return flow*, Dunne et Black (1970)). Ce ruissellement correspond généralement aux sources et sourcins présents sur les versants (Ambroise, 1999). Les apports latéraux d'eau souterraine peuvent dépasser le flux maximal qui peut transiter dans le profil. Le profil est alors complètement saturé et le flux en excès s'écoule en surface.

² La **capacité d'infiltration** correspond au flux d'eau maximal pouvant traversant la surface du sol lorsqu'il reçoit une pluie efficace ou s'il est recouvert d'eau. Elle dépend de la texture et de la structure du sol, mais également de la teneur en eau initiale du profil et de la teneur en eau imposée en surface. Le terme « infiltrabilité » est équivalent (Girard *et al.*, 2005).

Ces trois types de ruissellement coexistent dans un bassin versant ainsi qu'à l'échelle de la parcelle agricole. Huang *et al.* (2002) montrent que la part des processus contribuant au ruissellement général de la parcelle varie au cours de l'année. Au printemps et lors de l'été, le ruissellement se forme essentiellement sur l'amont de la parcelle, en raison du développement des croûtes de battance qui limitent l'infiltrabilité de la surface. Au cours de l'hiver, la part de ruissellement fournie par l'aval de la parcelle augmente, car le sol y est saturé si bien que les précipitations ruissellent directement et se dirigent vers l'exutoire.

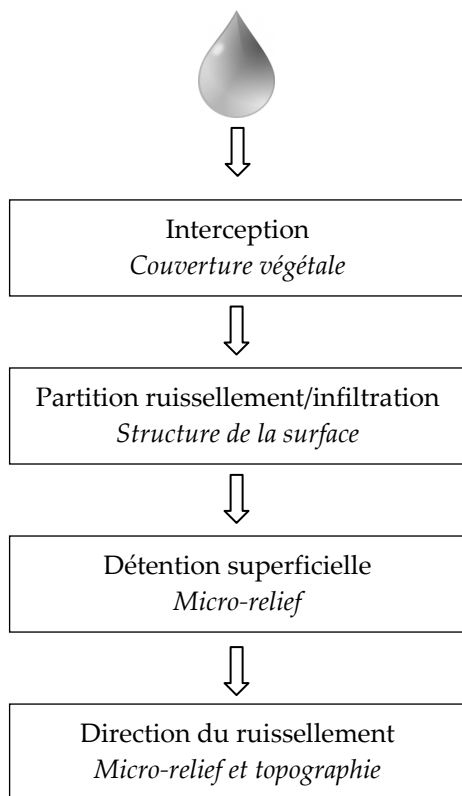
L'importance du ruissellement par saturation et par exfiltration est dépendante de l'extension des zones saturées, elle-même contrôlée par le cumul pluviométrique et la transmissivité du profil. Le ruissellement hortonien est contrôlé par la capacité d'infiltration de l'horizon de surface, elle-même influencée par la structure du sol.

1.1.2. La genèse du ruissellement sur sols cultivés

1.1.2.1. Des précipitations au ruissellement

La formation du ruissellement et sa mise en mouvement passent par plusieurs étapes présentées sur la figure 1.1. Une partie des précipitations est interceptée par la végétation en place. Sur le stock intercepté,

- une fraction sera restituée à l'atmosphère par évaporation. Il s'agit, à proprement parler de l'**interception** (*interception losses*) qui correspond à la part des précipitations n'atteignant pas le sol (Cosandey et Robinson, 2000) ;
- l'autre fraction atteindra la surface de façon différée, par égouttage sur les feuilles (*throughfall*) ou par ruissellement sur les tiges/troncs (*stem flow*).



Une fois l'excès d'eau formé en surface, celui-ci remplit les dépressions formées par le microrelief du sol. Il résulte d'irrégularités aléatoires (mottes, résidus végétaux) et de la rugosité créée par le passage des outils de travail du sol (rugosité orientée). Le volume d'eau pouvant ainsi être stocké correspond à la **détention superficielle**. Lorsque le volume des micro-dépressions est dépassé, il y a transfert de ruissellement. La direction suivie par celui-ci est fonction de la rugosité orientée et de la topographie de la parcelle.

Une fois formé, l'excès d'eau mis en mouvement ruisselle de manière diffuse, sous la forme de filets peu épais et de

Figure 1.1 – Des précipitations au ruissellement

géométrie variée et souvent instable. Il peut également se propager de manière **concentrée** à la faveur des motifs linéaires naturels (talweg) ou anthropiques (fossés). La force tractrice exercée par le ruissellement sur son lit lui permet d'arracher des particules de sol ce qui se traduit par la formation de motifs érosifs tels que les griffures, les rigoles et les ravines.

1.1.2.2. Deux processus à la base du refus à l'infiltration sur sols cultivés

Sur sols limoneux cultivés, deux processus contrôlent la diminution de l'infiltrabilité de la surface : la **dégradation structurale de la surface** et l'**état structural de la subsurface**.

a. La dégradation structurale

La dégradation structurale de la surface du sol, également appelée **battance** regroupe un ensemble de mécanismes qui vont avoir pour effet de fractionner les agrégats du sol (figure 1.2). Ils sont essentiellement dépendant des propriétés des précipitations (énergie) et des sols (texture). Le Bissonnais *et al.* (1995) identifient 4 mécanismes :

- lors de son impact, la pluie libère l'énergie accumulée durant sa chute en cisillant les agrégats. Cette **désagrégation mécanique** voit son efficacité grandir quand le sol est saturé du fait de la diminution de la résistance mécanique des agrégats (Al-Durrah et Bradford, 1982) ;
- lorsque les agrégats sont secs, l'humectation brutale provoque une compression des volumes d'air contenus dans le sol ce qui provoque un **éclatement** des agrégats (Hénin *et al.*, 1958; Emerson, 1967) ;
- les sols argileux sont affectés d'alternances d'humectation et de dessiccation (déterminées par les conditions météorologiques) entraînant une microfissuration des agrégats et préparant le terrain aux autres mécanismes. C'est le **gonflement différentiel** (Le Bissonnais, 1990) ;
- la présence d'ions monovalents (Sodium, Na⁺) et d'ions bivalents (Calcium, Ca²⁺) joue sur les forces d'attraction du sol : c'est la **dispersion physico-chimique**. La présence de sodium tend à favoriser la dispersion, alors que la présence de calcium favorise la stabilité en établissant des ponts entre les particules (Emerson, 1967; Shainberg, 1992). Le rôle de ce mécanisme est important car il joue sur les particules élémentaires, renforçant ainsi les effets des autres mécanismes.

La dégradation structurale exerce un contrôle important de la capacité d'infiltration de la surface qui sera étudié en détail par la suite.

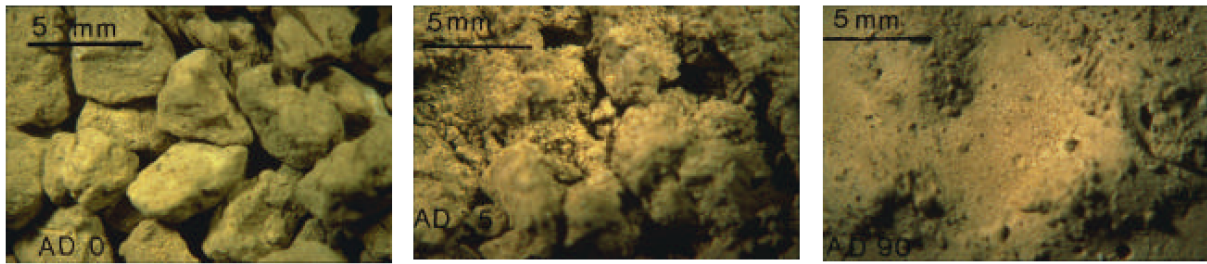


Figure 1.2 – Différentes étapes de la dégradation structurale sur sol limoneux (Le Bissonnais *et al.*, 2002)

b. Le tassement

Le **système poral sous-jacent** exerce également une action sur l'infiltrabilité. Les variations météorologiques, le travail du sol et l'activité biologique créent une porosité structurale. Celle-ci peut être affectée de deux manières.

Le passage des engins agricoles entraîne un **tassement** provoquant une diminution et une réorganisation de la porosité structurale. Richard *et al.* (2001) soulignent qu'en contexte tassé, la manière dont les pores structuraux sont connectés évolue. Le tassement induit une déconnection de certains de pores structuraux ce qui réduit les chemins d'infiltration de l'eau. Cette diminution de la porosité induit de la conductivité hydraulique à saturation (Assouline *et al.*, 1997).

Le tassement est essentiellement localisé sous les traces de roue et son intensité du tassement dépend des caractéristiques des engins (poids, types de train roulant, pression des pneus, etc.) et des conditions hydriques lors du passage. Le passage d'engins en conditions humides aggrave le tassement car la résistance mécanique des agrégats est alors diminuée (Richard *et al.*, 1999; Hamza et Anderson, 2005). Le tassement du profil, en plus du ruissellement, induit des conséquences agronomiques : la réserve utile est moins importante et l'enracinement plus difficile, la disponibilité des fertilisants est également amoindrie (Pagliai *et al.*, 2004).

Le passage répété des outils de travail agricole, notamment la charrue, peut induire la formation d'une **semelle de labour** en profondeur (entre 20 et 30 cm, selon la profondeur du labour). Il s'agit d'une fine couche très compacte qui été lissée par les outils (Tebrugge et During, 1999). Elle est caractérisée par une très faible infiltrabilité qui contraint les exploitants à travailler le sol plus profondément (sous-solage, décompactage) afin de restaurer l'infiltrabilité du profil (Soltner, 2000).

1.2. Les états de surface du sol

1.2.1. Observer la surface pour identifier des types morphogénétiques

Il n'existe pas de définition précise de l'état de surface du sol. Celle-ci varie selon les études et désigne en général **la couverture et l'état des premiers centimètres du sol**. Le terme « d'EDS », fait référence soit aux types de croûtes de surface du sol (Boiffin, 1984; Asseline *et al.*, 1987; Auzet *et al.*, 1990; Casenave et Valentin, 1990); soit à la rugosité, (Boiffin, 1984; Van Dijk *et al.*, 1996); soit à différentes variables de recouvrement de la surface du sol telles que le couvert végétal vivant ou mort (Papy et Boiffin, 1988; Martin, 1999; Roth, 2004) ou la couverture par les pierres (Casenave et Valentin, 1990; Descroix *et al.*, 2000; Li *et al.*, 2000).

A partir de ces différentes contributions, nous proposons la définition suivante : « **L'état de surface du sol** » désigne **l'état structural, hydrique et micro-topographique de la surface**. Il regroupe les éléments suivants :

- **l'ouverture du système poral**, c'est-à-dire les éléments grossiers non-scillés à la matrice du sol (motte, cailloux) préservant l'état structural sous-jacent, la présence de macropores d'origine pédoclimatique (fentes de retrait) ou biologique liée à l'activité de la mésofaune (lombrics) ;
- la **fermeture du système poral** qui est liée à la formation des différents types de croûte, les cailloux enchâssés dans la matrice du sol (Descroix *et al.*, 2000) ;
- la **couverture** du sol par la végétation vivante ou résiduelle ;
- le **microrelief** constitué des irrégularités aléatoires ou orientées par le travail du sol. Selon les études, le microrelief peut-être estimé à l'œil nu ou mesuré par des méthodes de rugosimétrie (Kamphorst *et al.*, 2000) ;
- **l'état hydrique** qui influence la conductivité hydraulique et temps nécessaire à la saturation de l'horizon superficiel. Un sol fortement humide présente un refus à l'infiltration plus rapide, car la porosité est déjà occupée par l'eau.

La prise en compte de ces éléments permet d'**intégrer les différents stades de formation du ruissellement** : interception, refus à l'infiltration, détention superficielle (figure 1.3).

Les travaux menés par Jean Boiffin (Boiffin, 1984; Bresson et Boiffin, 1990) ont consisté à établir des typologies basées sur l'observation de la structure du sol en surface. Les faciès ainsi déterminés correspondent à des **types morphogénétiques** liés à des processus spécifiques qui ont conduit à leur création (figure 1.4) :

- Dans un premier temps, le travail du sol (labour et préparation de semis) conduit à un **faciès fragmentaire initial (F0)** ouvert, poreux et meuble. Il correspond à un sol fraîchement travaillé, où les agrégats sont libres entre eux.

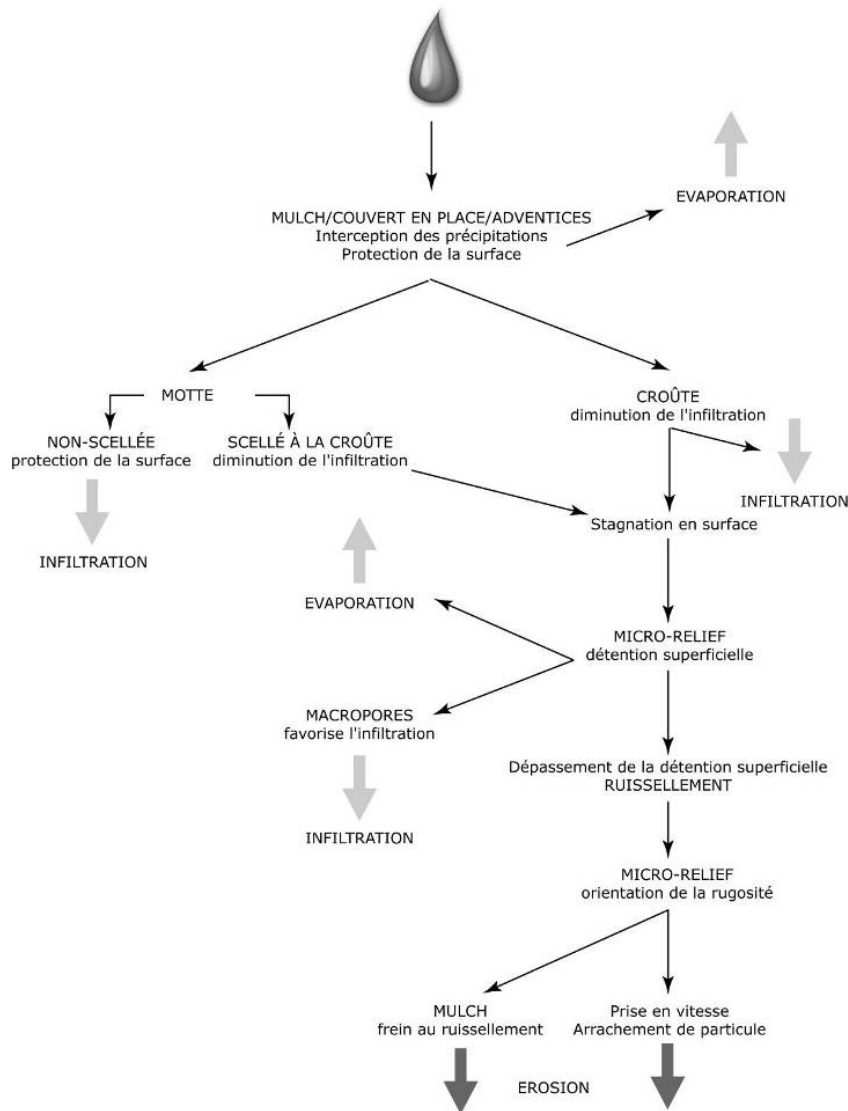


Figure 1.3 – EDS et formation du ruissellement en contexte de sol limoneux cultivé

- Suite aux précipitations intervenant après le semis, les particules détachées par les mécanismes de désagrégation colmatent les interstices de la surface. Elle présente alors un **faciès altéré (F1)** correspondant à la fermeture de la surface du sol par une **croûte structurale** de quelques millimètres d'épaisseur.
- Lorsqu'un excès d'eau se forme en surface, les particules détachées sont transportées par le ruissellement, qui exerce un tri granulométriques en fonction de sa vitesse. Lorsque le flux ralentit, les particules sont déposées aboutissant à la formation de micro-strates quasi-imperméables. La surface présente un alors faciès continu, avec une forte couverture en **croûtes sédimentaires (F2)**.

Les mécanismes de la battance ont été étudié parce que la formation des croûtes pouvait conduire à l'asphyxie des graines en cours de germination, notamment si la croûte est maintenue

humide par les précipitations. Par ailleurs, après une période de dessiccation, le durcissement des croûtes constitue un obstacle à la levée des plantules (Richard et Boiffin, 1990). Ces travaux ont également permis de mettre en évidence la relation entre formation des croûtes de battance et diminution de l'infiltrabilité de la surface, qui sera étudiée par la suite.



Figure 1.4 – Exemple de dégradation de la surface (Photos : R. Armand – 2003)

Photo 1 – pluies cumulées depuis le semis <math>< 5\text{ mm}</math> : la surface présente des agrégats et des mottes libres (facies F0)

Photo 2 – Pluies cumulées depuis le semis : 38 mm. Extension des croûtes structurales (facies F1)

Photo 3 – Pluies cumulées depuis le semis : 65 mm : Développement des croûtes sédimentaires (facies F2)

Photo 4 – Pluies cumulées depuis le semis : 118 mm : Extension complète des croûtes sédimentaires + griffure (facies F2)

Parallèlement à ce travail, mené sur des sols cultivés limoneux, d'autres études ont été réalisées, notamment en **contexte aride et semi-aride** où l'alternance zone nue/zone végétalisée influe considérablement sur la partition ruissellement/infiltration. En contexte sahélien, Casenave et Valentin (1990) ont utilisé le concept de « surface élémentaire ». Celui-ci intègre le couvert végétal, la surface du sol, les horizons superficiels et leurs transformations morphologiques sous l'effet des facteurs climatiques ou anthropiques (culture ou élevage). La typologie ainsi déterminée sépare les différents types selon :

- la culture en place, associée au degré de porosité vésiculaire (porosité prisonnière au sein des croûtes) ;
- l'intensité de l'activité biologique (turricules de vers et/ou placages de termites) ;
- la présence de différents types de croûtes : structurales, d'érosion, de décantation et de dessiccation.

Cette typologie prend en compte les processus suivants :

- l'érosion éolienne et hydrique ;
- la dégradation structurale ;
- les processus de transport et de sédimentation par le ruissellement et le vent ;
- les dynamiques pédologiques (sols gonflants, sols halomorphes sensibles aux croûtes) ;
- l'activité de la mésofaune (termites et lombrics) ;
- les pratiques agricoles (type de culture en place).

En résultant des interactions complexes de processus géomorphologiques et agricoles (point qui sera abordé en détails plus bas), les EDS occupent une situation d'interface. L'utilisation de **démarches typologiques** sur ces données aboutit à l'identification d'**unités spatiales homogènes** du point de vue des dynamiques des EDS. Ces types permettent de représenter la variabilité spatiale de ces processus et d'estimer la réponse hydrologique de la surface suite à des précipitations.

1.2.2. Le rôle des EDS sur le refus à l'infiltration

Dans des contextes très variés, des études ont mesuré les propriétés hydrodynamiques associées à des observations d'EDS et ont montré une relation forte entre types d'EDS et infiltrabilité (tableau 1.1). Dans son travail mené sur des jeux de données issus de 3 milieux différents, Ali (2008) confirme l'intérêt des méthodes typologiques sur l'estimation des capacités d'infiltration de la surface.

Tableau 1.1 – Revue des EDS et caractérisation des propriétés hydrodynamiques

Références	Milieu	Sol (ou formation superficielle)	Méthode de caractérisation	Facteurs jouant sur l'infiltration
(Léonard et Andrieux, 1998)	Vignoble méditerranéen	Sols calcaires	Simulation de pluie	Structure de l'horizon de surface Pratiques culturales
(Roth, 2004)	Savane arborée	Sols sableux	Simulation de pluie	(+) Activité lombricienne (+) Couvert végétal (-) Compaction par les animaux
(Casenave et Valentin, 1990)	Zone sahélienne	variés	Simulation de pluie	(+) Activité biologique (-) Croûtes
(Malet <i>et al.</i> , 2003)	Moyenne montagne	Substrat marneux	Infiltromètre à tension	(+) Orientation de la schistosité (-) Présence de croûtes
(Ali, 2008)	Tempéré cultivé	Limoneux	Simulation de pluie et infiltromètre Beerkan	(+) Résidus végétaux (-) Croûtes
(Vandervaere <i>et al.</i> , 1997)	Zone sahélienne	Sableux	Infiltromètre à tension	(-) Croûtes

Il ressort de l'étude du tableau 1.1 que **les croûtes jouent un rôle considérable sur la formation du ruissellement** (Valentin et Bresson, 1992). Sur sols limoneux, la formation des croûtes structurales réduit l'infiltrabilité de la surface à moins de 5 mm.h⁻¹ pour des sols limoneux à faible teneur en argile (Vandervaere *et al.*, 1998). En présence de croûte sédimentaire, la capacité d'infiltration pour les mêmes sols peut baisser jusqu'à 1 mm.h⁻¹ (Vandervaere *et al.*, 1998). La formation des croûtes se traduit également par une diminution de la rugosité ce qui réduit la détention superficielle de la surface (Kamphorst *et al.*, 2000; Darboux *et al.*, 2002).

1.2.3. Les facteurs en jeu dans la dynamique des EDS

Comme nous l'avons souligné lors de la partie précédente, l'intérêt de l'étude des EDS réside dans leur **dimension intégratrice**. Les EDS sont des indicateurs qui résultent des interactions entre les facteurs naturels et anthropiques. Ils permettent également de prendre en compte l'action de processus complexes, difficiles à étudier rapidement (dégradation structurale, transport de particules par le ruissellement). Deux familles de facteurs jouent sur la dynamique des EDS : les facteurs liés aux conditions du milieu naturel et les facteurs agricoles (figure 1.5).

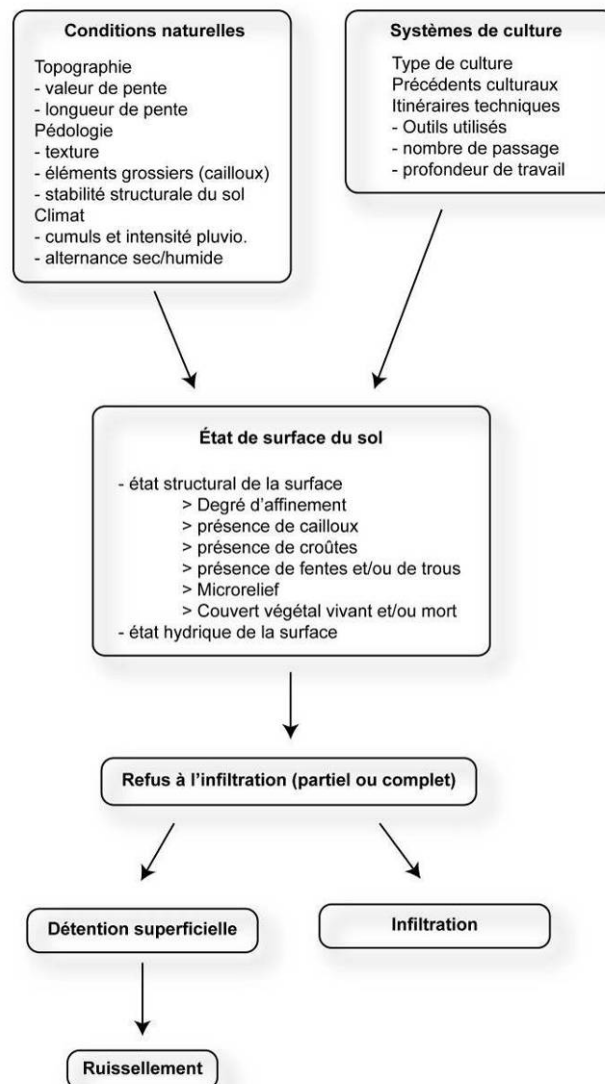


Figure 1.5 - Facteurs en jeu dans l'évolution des EDS

1.2.3.1. Les conditions du milieu naturel

L'évolution des EDS est fonction des **propriétés de la pluie** (qui constitue l'agent de dégradation de la structure en surface) ainsi que de la **stabilité structurale de la surface**.

La rapidité de la dégradation structurale est fonction des **propriétés de la pluie** : le cumul, l'intensité et l'énergie. Sur sols limoneux à faible teneur en argile et en contexte océanique, Papy et Boiffin (1988) estiment que le cumul nécessaire pour observer la formation de croûtes sédimentaires à partir d'un semis est de 60 à 90 mm selon les conditions hydriques (une période de dessiccation prolonge le phénomène). L'intensité et l'énergie des précipitations contrôlent également la vitesse de dégradation structurale de la surface.

La **stabilité structurale** désigne la résistance que le sol oppose à la dégradation de son état structural par l'eau (Hénin *et al.*, 1958). Elle est déterminée par les forces qui lient les particules entre elles. Bronick et Lal (2005) distinguent différents agents influençant la stabilité structurale :

- les **argiles minéralogiques** possèdent des propriétés colloïdales liées à leur structure cristalline qui présente des sites de charge négative. Les minéraux argileux exercent une forte attraction sur les molécules d'eau et sur les cations. Ces molécules et ions sont alors fixés sur les surfaces externes de ces minéraux par un processus d'adsorption (Musy et Soutter, 1991). L'intensité de l'adsorption dépend également de la nature minéralogique des argiles qui conditionne leur surface spécifique. La stabilité structurale est ainsi renforcée en présence d'argiles gonflantes (smectites, montmorillonites) (Bronick et Lal, 2005) ;
- la **matière organique** regroupe différentes composantes : litière, racines, microorganismes, sécrétions biologiques... Le résidu de la décomposition de la matière organique fraîche, c'est-à-dire l'humus, possède des propriétés colloïdales similaires à l'argile (Musy et Soutter, 1991). La matière organique confère également une certaine hydrophobicité aux agrégats, notamment lorsque les sols sont secs (Bronick et Lal, 2005) ;
- l'effet des **cations** dépend de leur valence :
 - o les cations monovalents, le sodium essentiellement (Na^+), ont une action dispersante ;
 - o les cations dont la valence est supérieure à 1, tels que Al^{3+} (milieu acide), Fe^{3+} et Ca^{2+} (milieu carbonaté et neutre), ont une action structurante : ils établissent des ponts entre les colloïdes du sol.

Sur sols limoneux, la stabilité structurale est essentiellement contrôlée par la teneur en **argile** (figure 1.6) et le taux de **matière organique** (tableau 1.2). Selon Monnier et Stengel (1982, in (Auzet, 1987)), en dessous de 25% d'argile, la structure devient instable. Sous le seuil de 15% d'argile, la structure devient très instable, surtout si la teneur en matière organique est faible (<2-3%). Or, un tel seuil est rarement atteint pour les sols de grande culture.

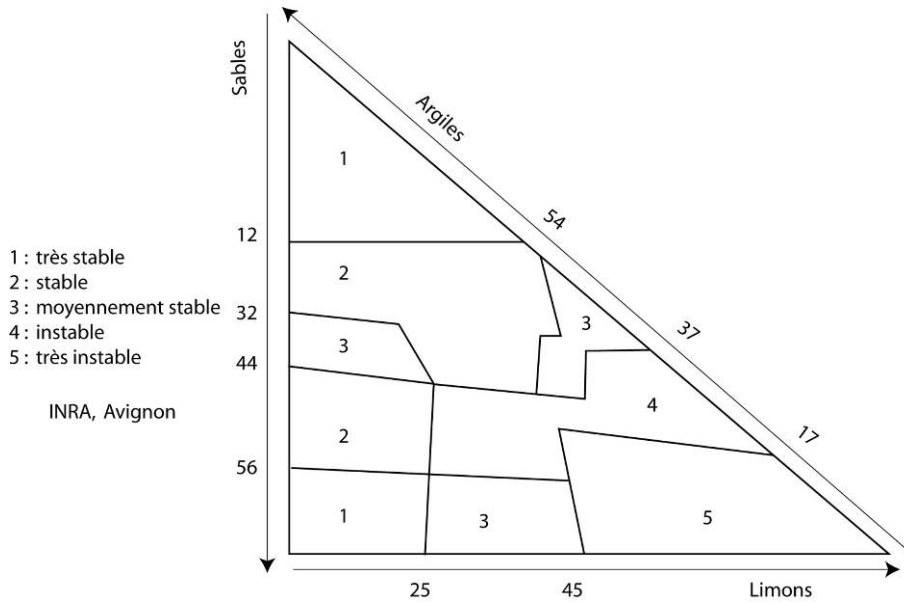


Figure 1.6 – Triangle de stabilité structurale

Tableau 1.2 - Interaction texture/matières organiques sur la stabilité structurale (d'après Monnier et Stengel (1982))

Texture	Teneur argile (%)	Stabilité d'origine texturale et en présence de matières organiques			
		1% MO	2% MO	3% MO	4% MO
SL	8	Stable	Très stable	Très stable	Très stable
L	15	Très instable	Très instable	Instable	passable
LA	25	Instable	Instable	Passable	Passable
AA	50	Stable	Stable	Stable	stable

1.2.3.2. Impacts des techniques culturales

Les études ont fait rapidement le rapprochement entre la fréquence des inondations boueuses et l'état du sol lié aux systèmes de culture. C'est notamment le cas en contexte tempéré où les valeurs d'intensité pluviométrique restent trop faibles pour expliquer le nombre d'inondations (Papy et Douyer, 1991). Les auteurs y soulignent l'influence des opérations culturales sur la création d'EDS potentiellement ruisselants.

En étudiant les inondations catastrophiques ayant touché le Pays de Caux sur la période 1960-1989, Papy et Douyer (1991) cherchent à identifier les facteurs déclenchants. Les précipitations le jour de l'événement (>15 mm) et le cumul de la décade précédente (>90 mm) sont des facteurs nécessaires

mais pas suffisants pour déclencher une inondation. Les auteurs concluent que les systèmes de culture contrôlent partiellement sur les EDS. Ils identifient trois situations pouvant coexister au même moment :

1- Les parcelles ayant été déchaumées présentent peu de risque d'émettre du ruissellement en raison d'une importante rugosité ;

2- Les chantiers de récolte sont des parcelles où le tassement est important en raison des passages répétés des engins. La couverture en traces de roue peut atteindre 80%, ce qui rend les surfaces très ruisselantes ;

3- Les semis de céréales ont une aptitude à infiltrer variant avec la formation des croûtes. Les semis fraîchement réalisés sont considérés comme infiltrants (les agrégats sont libres entre eux). A l'inverse, lorsque la surface est dégradée, elle devient ruisselante.

Les pratiques culturales **contrôlent l'ouverture du système poral** en fragmentant la surface lors des différentes opérations culturales : labour, préparation de semis, binage, déchaumage. Cette fragmentation accroît la porosité de la subsurface ce qui peut se traduire par un accroissement de l'infiltration (Papy et Boiffin, 1988) ainsi que de la rétention superficielle. Si la fragmentation est excessive, l'affinement du travail du sol accélère la dégradation structurale. Un travail plus grossier et plus motteux entraîne une meilleure résistance à la dégradation structurale (Papy et Boiffin, 1988). Les pratiques contrôlent également la **rugosité** et la **détention superficielle**. Papy et Boiffin (1988) associent des valeurs de rugosité en fonction des opérations culturales (tableau 1.3). Le développement des croûtes entraîne une diminution de la rugosité ce qui est confirmé par Ouvry (1989-90) qui observe que la rétention superficielle diminue avec l'encroûtement :

- semis récent à structure motteuse : 3 à 6 mm ;
- semis légèrement encroûté : 1.5 à 3 mm ;
- semis très encroûté : 0 à 1.5 mm.

Tableau 1.3 – Opérations culturales et rugosités observées (d'après Papy et Boiffin (1988))

Rugosité	0-1 cm	1-2 cm	2-5 cm	>5 cm
Situations	Semis recouvert de croûtes sédimentaires Chantier de récolte tassé	Semis frais très affiné Semis battu	Semis motteux peu battu Déchaumage sans résidus	Déchaumage après résidus Labour

En milieu cultivé, la dynamique des EDS est soumise aux actions antagonistes de la dégradation structurale (qui tend à réduire l'infiltrabilité et la rétention superficielle) et des pratiques culturales qui fragmentent le sol (figure 1.4). Le développement du **couvert végétal** est lui rythmé par le calendrier cultural (semis et récolte). Le couvert végétal influence l'interception et varie selon la morphologie et la densité de la culture en place : Lull (1964) mesure des valeurs de l'ordre de 7% pour l'avoine, 16% pour le maïs, 15% pour le soja et 36% pour le blé.

Cependant, les connaissances des conséquences des techniques culturales sur les EDS ont généralement été acquises en contexte conventionnel. La partie suivante a pour vocation de faire le bilan des connaissances concernant l'effet du non-labour sur les propriétés du sol et sur la formation du ruissellement.

2. Les techniques sans labour, un des outils de la lutte contre le ruissellement

2.1. Des pratiques agricoles alternatives au labour

2.1.1. Comment définir les techniques sans labour ?

Les Techniques Sans Labour (TSL) désignent un ensemble de techniques de culture alternatives à l'itinéraire conventionnel basé sur le labour. Leur mise en place vise à **diminuer le nombre d'opérations culturales** composant les itinéraires techniques. Cette dénomination comprend de nombreuses techniques de culture, mais toutes répondent aux critères suivants, énoncés lors du 1^{er} congrès de l'Agriculture Durable à Madrid (2001) :

- la **présence de résidus végétaux** en surface (le « mulch ») correspondant à la culture précédente. Après la récolte, les résidus ne sont donc pas enterrés comme on le constate dans le cas du labour mais laissés en surface ou incorporés à l'horizon de surface ;
- le travail mécanique du sol préserve la **distribution verticale des horizons**, en vue de conserver la matière organique en surface (on parle de « non-inversion tillage »). L'objectif consiste à limiter la dilution de la matière organique sur tout le profil de travail du sol. Il s'agit toujours d'aérer et de fragmenter le sol, sans toutefois le retourner comme on peut le constater dans l'usage du labour ;
- l'importance des **rotations** pour limiter les intrants, essentiellement dans le cas de l'agriculture de conservation.

Il est possible d'identifier deux grands types de techniques au sein du non-labour (tableau 1.4)(ADEME, 2007).

Les TSL (Techniques Sans Labour, à proprement parler) où l'on substitue le recours à la charrue par un autre outil. Le travail du sol se fait alors sur une faible profondeur (<15 cm), c'est le cas des déchaumeurs ; ou à plus grande profondeur (20-40cm) dans le cas des décompacteurs et des pseudo-labours. Par ces techniques, **la distribution des différents horizons reste préservée**. Selon les objectifs de l'exploitant, ces techniques peuvent être réalisées avec du matériel conventionnel (décompacteur, déchaumeur) ou spécialisé. Les premiers essais sont souvent d'ailleurs fréquemment réalisés avec du matériel préexistant dans l'exploitation (ITADA, 2005).

Le **semis-direct** (SD) qui constitue la simplification ultime des itinéraires techniques puisque **les opérations culturales se limitent au semis et à la récolte**. Ce type de technique requiert des équipements spécifiques (semoir notamment) dont la force doit être suffisante pour réaliser un semis à travers les résidus et dans un sol rendu plus compact en l'absence de travail du sol. Cette technique présente également un taux de couverture en résidus très élevé car ces derniers ne sont pas incorporés à l'horizon de surface.

La simplification des itinéraires techniques est présentée sur la figure 1.7. Cette figure n'est pas exhaustive mais permet de constater que la réduction du nombre d'opérations culturales par rapport au labour n'est pas forcément avérée. En effet, dans certains cas, on constate un nombre d'opérations culturales plus important en TSL, comme pour un itinéraire comprenant un décompactage, un déchaumage, une reprise de labour et un semis). Cependant, pour les exploitants, la suppression de certaines opérations culturales visent à diminuer le temps de travail par hectare afin de réaliser des économies de temps et de dépenses liées à l'utilisation du matériel (carburant, usure).

Tableau 1.4 - Synthèse des types de non-labour (d'après la synthèse de l'ADEME (2007))

Typologie	Itinéraire	Exemple d'outils	Profondeur de dilution (cm)
Conventionnel	Labour	Charrue à versoirs	15-40
TSL	Pseudo-labour	Chisel, Charrue Express	15-40
	Décompactage	Décompacteur,	0-15
	Travail superficiel	Déchaumeur	0-15
Semis-direct	Semis-direct	Semoir direct	0

À gauche du tableau : une flèche descendante indique "Simplification croissante des itinéraires techniques".
 À droite du tableau : une flèche descendante indique "Couverture croissante en mulch".

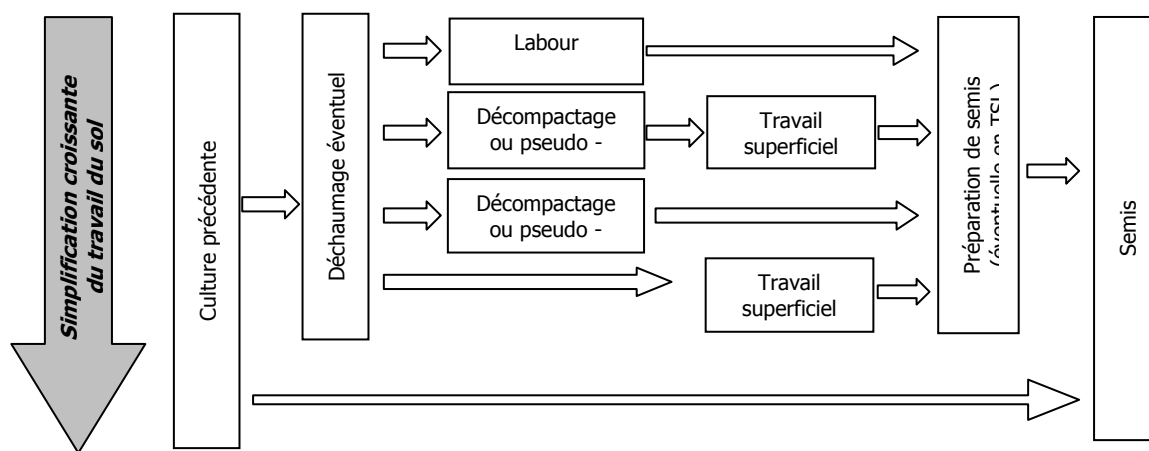


Figure 1.7 - les différentes étapes de la simplification du travail du sol (d'après Soltner (2000))

2.1.2. Historique et objectifs actuels du non-labour

Selon Robert *et al.* (2004), l'utilisation du non-labour a connu un vif essor aux USA après la crise érosive du **Dust Bowl**. Au cours des années 30, les Etats des Grandes Plaines des Etats-Unis ont été touchés par une intense érosion éolienne. Cette crise résulte d'une sécheresse très prononcée qui a frappé ces Etats à partir de 1934 ainsi que d'une mise en culture inconsidérée des prairies naturelles préexistantes. La conjonction de ces deux facteurs a progressivement déstructuré les sols formant des particules facilement mobilisables par les vents. Des tempêtes de sables (de « sol » devrait-on dire) ont alors frappé les Etats côtiers des Etats-Unis dès 1934. La plus impressionnante des tempêtes (les *Black Blizzards*) a frappé l'Est du pays de Chicago à Manhattan en 1934 (Masutti, 2004). Le Dust Bowl n'est pas un simple phénomène géomorphologique, il s'agit d'une crise sociale et économique qui a profondément marqué la conscience du pays (Masutti, 2004).

L'ampleur de cette crise érosive importante déboucha sur le *Soil conservation Act* en 1935 qui institua la création du SCS (*Soil Conservation Service*)³, qui était auparavant une division de l'USDA (*United States Department of Agriculture*). Le SCS recommanda alors le développement de **mesures conservatoires** parmi lesquelles de **nouvelles pratiques culturales** (Helms, 1990). Les objectifs étaient alors agronomiques et visaient essentiellement à enrayer le déclin de la matière organique en surface et lui fournir une protection contre le vent. Les mesures envisagées à l'époque (Helms, 1990) étaient :

- l'adoption des techniques variées de « *conservation tillage* » (*no-till, ridge-till, mulch-till, strip-till*) visant à laisser une couverture végétale en surface afin de protéger le sol contre et d'enrayer la baisse en matières organiques de l'horizon de surface ;
- la mise en place du *contour-tillage* : travail du sol en courbe de niveaux en alternant haies brise-vent ;
- d'augmenter les apports organiques ;
- la reconversion des parcelles trop dégradées en prairie permanente.

Suite à ces recommandations, le non-labour a connu un fort développement aux Etats-Unis qui représentent aujourd'hui le premier pays en termes de surfaces cultivées (42 millions ha en 2003). Ce développement a été d'autant plus important grâce à l'apparition d'herbicides capables de traiter le problème que représentaient les adventices (Sebillote et Meynard, 2004).

Les pays d'Amérique du Sud, touchés par des processus d'érosion hydrique représentent également des surfaces conséquentes : 17 millions d'ha au Brésil, 13 millions d'ha en Argentine. Dans le cas de l'Argentine, l'essor a été notamment encouragé par la mise au point de variétés transgéniques résistantes aux herbicides totaux (Sebillote et Meynard, 2004).

En 2005, l'Europe compte un peu moins de 15 millions d'ha (SOWAP, 2006). On note que dans certains pays (tableau 1.5), une part importante des terres arables est désormais travaillée en non-labour.

³ L'actuel NRCS (*Natural Resources Conservation Service*)

Tableau 1.5 : Surfaces cultivées en TSL et en semis-direct en Europe en 2005 (d'après SOWAP (2006))

Pays	Terres arables cultivées en TSL (%)	Terres arables cultivées en semis direct (%)
Allemagne	21.2	1.7
Belgique	17.2	-
Danemark	10.1	-
Espagne	18.0	4.5
Finlande	52.3	6.8
France	21.1	0.7
Grèce	10.8	7.4
Hongrie	10.9	0.2
Irlande	0.9	-
Italie	7.0	1.0
Portugal	21.1	2.3
Rép. Tchèque	11.0	-
Royaume-Uni	45.6	3.1
Slovaquie	12.6	2.6
Suisse	25.4	2.9
Total	15.4	1.1

En France, un tiers des grandes cultures semées en 2006 l'étaient en non-labour. Le degré d'adoption des NON-LABOUR varie en fonction de la culture (figure 1.8). Ce système a été adopté depuis longtemps pour la culture du blé dur. Dans le cas des autres cultures, le non-labour présente une forte progression (colza et blé tendre notamment). L'adoption est plus limitée dans le cas des betteraves ou du tournesol en raison de difficultés d'enracinement (Chapelle-Barry, 2008).

La **taille de l'exploitation** est un facteur explicatif du degré d'adoption du non-labour. (Chapelle-Barry, 2008) observe que la part des surfaces travaillées en non-labour augmente avec la taille totale de l'exploitation. Le gain de temps et la gestion des pointes de travaux (récolte / semis d'automne), proportionnels à la surface travaillée, sont des éléments qui expliquent cette adoption massive par les grandes exploitations.

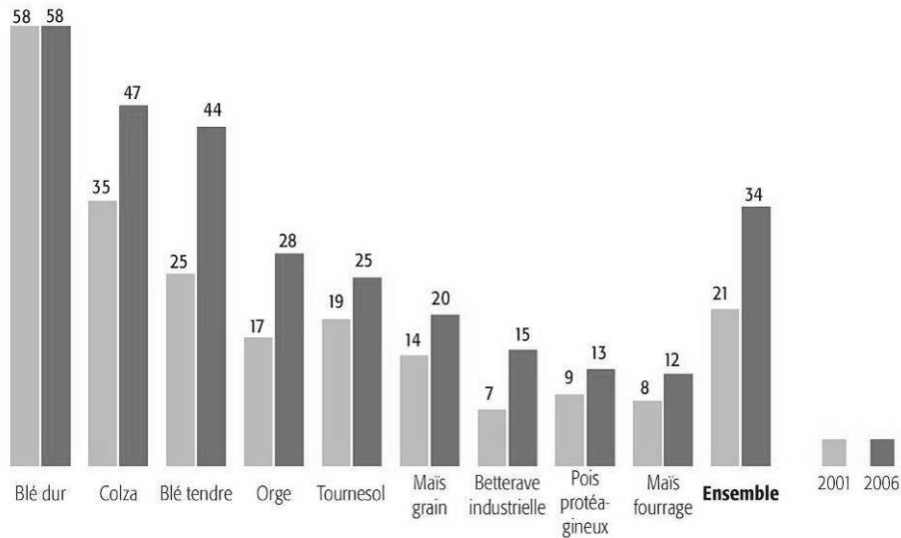


Figure 1.8 - Superficies de grandes cultures (%) semées en non-labour en 2001 et 2006
(source : AGRESTE 2008)

2.1.3. Les motivations du passage en non-labour

Les motivations actuelles qui conduisent au passage en non-labour sont plus variées, comme le montre l'enquête menée par l'ITADA (Institut Transfrontalier d'Application et de Développement Agronomique) portant sur 31 exploitants en 2004 (ITADA, 2005). Le panel enquêté comprend 37 exploitations réparties entre la France et l'Allemagne (21 en Alsace, 16 dans le Bade Württemberg). Ces exploitations, récemment passées en non-labour, sont réparties en quatre systèmes de production : grandes cultures, grandes cultures + cultures spécialisées, bovin-lait et bovin-viande. Certaines exploitations ont volontairement été sélectionnées dans les secteurs de collines limoneuses exposées à des inondations boueuses en raison du ruissellement érosif sur les terres agricoles à l'amont.

Selon cette étude, les **motivations** du passage en non-labour sont essentiellement de deux ordres :

- **agronomiques** : les exploitants souhaitent réduire l'érosion et rehausser le faible taux de matières organiques. Le poids de cette motivation s'explique, entre autres, par l'échantillonnage géographique qui cible des secteurs régulièrement affectés par l'érosion hydrique ;
- **gain de temps** : la diminution du nombre de passages dans les parcelles entraîne une baisse du temps de travail sur les parcelles. Cette économie se traduit différemment selon les systèmes de production :
 - Pour les éleveurs, le temps dégagé permet de consacrer plus de temps aux astreintes quotidiennes (vaches laitières, taurillons, porcs) ;
 - En grandes cultures, l'objectif est d'améliorer la gestion des pointes de travaux qui correspondent à des périodes de temps de travail intense (semis du maïs, récolte du maïs parallèlement au semis de blé, par exemple).

Selon les exploitants, les **effets constatés**, suite au passage en non-labour sont de type :

- **Agronomique** : les exploitants observent une infiltration plus élevée, notamment dans les secteurs à forte hydromorphie. Certains notent des départs de terre moins fréquents et une amélioration du taux de matière-organique en surface.
- **Économique** : la diminution du nombre d'heure de travail sur les parcelles se traduit par une baisse des charges liées à l'utilisation du matériel (main d'œuvre, carburant, usure du matériel), mais aussi une augmentation des coûts liés à l'investissement (dans le cas d'achat de matériel spécifique).
- **Gain de temps** : le gain de temps est reporté sur différents postes selon le profil de l'exploitation : temps libre, temps consacré aux autres activités de l'exploitation (élevage), temps disponible pour l'entreprise. Le gain de temps se vérifie essentiellement dans les exploitations où la surface passée en non-labour est importante et où le nombre de passages reste limité, souvent en raison de l'emploi de matériel spécifique.
- En termes de **rendements**, de nombreux exploitants relatent une diminution de 10% sur les cinq premières années. Après cette période, les rendements deviennent comparables à ceux obtenus en système conventionnel. Cependant, les exploitants travaillant sur des sols à problèmes (battance élevée, stagnation d'eau) observent des rendements supérieurs en non-labour.

La synthèse de plusieurs études analysant les raisons du passage en non-labour réalisée par l'ADEME (2007) aboutit aux mêmes motivations :

- le gain de temps, pour des raisons diverses (diminution de la main d'œuvre, diversification des activités de l'exploitation, temps libre) ;
- la baisse des charges de mécanisation, la réduction du coût du carburant ou l'usure du matériel. Ce facteur est notamment mentionné dans le cas des sols argileux lourds et usants pour le matériel où le labour aboutit à des lits de semence trop grossiers, essentiellement lors des semis d'automne ;
- L'amélioration des propriétés agronomiques du sol : réduction de la battance, augmentation de l'activité biologique et du taux de matière organique de la surface.

2.2. Les effets du non-labour sur le ruissellement et l'érosion

Les synthèses effectuées sur l'effet du non-labour concernant l'érosion sont unanimes : les pertes en sol présentent une grande variabilité, mais la tendance générale est à la baisse (Tebrugge et During, 1999; Holland, 2004; ADEME, 2007). Il semble que la réduction de l'érosion soit un fait acquis en contexte de non-labour.

Tableau 1.6 – Mesures de ruissellement sous pluies naturelles et artificielles

Reference	Technique culturale	Surface (m ²)	Texture	Culture	Type de précipitations	Années de suivis	Lame ruisselée	Lame ruisselée (% par rapport au contexte conventionnel)
(Shipitalo <i>et al.</i> , 2000)	Charrue	<10 000	L	Maïs	Naturelles	4	178.1 mm/an ± 93.4	Ø
	Semis-direct	<10 000	L	Maïs	Naturelles	4	2.2 mm/an ± 2.5	- 98.2
(Quinton et Catt, 2004)	Charrue	875	S	Céréales d'hiver	Naturelles	10	82 mm/an ± 23	Ø
	Déchaumeur	875	S	Céréales d'hiver	Naturelles	10	62 mm/an ± 31	- 24.4
(Kwaad <i>et al.</i> , 1998)	Labour de printemps	175	L	Maïs	Naturelles	2	9.6 mm ± 7.1	Ø
	Semis-direct sous blé	175	L	Maïs	Naturelles	2	13.0 mm ± 13.1	+ 35.4
	Labour d'hiver + semis-direct	175	L	Maïs	Naturelles	2	15.6 mm ± 14.5	+ 6.5
(Meyer <i>et al.</i> , 1999)	Chisel	79	L	Soja	Naturelles	6	256 mm/an	Ø
	Semis-direct	79	L	Soja	Naturelles	6	202 mm/an	- 11.1
(Yu <i>et al.</i> , 2000)	Charrue	150	SL	Roselle	Naturelles	3	8.7 mm/évt. ± 1.3	Ø
	Sous-solage	150	SL	Roselle	Naturelles	3	7.5 mm/évt. ± 1.0	- 13.8
	Semis-direct	150	SL	Roselle	Naturelles	3	3.2 mm /évt. ± 0.4	- 73.3
(Tebrugge et During, 1999)	Charrue	--	L	Blé	Artificielles (1h – 63 mm)		39 mm	Ø
	Semis-direct	--	L	Blé	Artificielles (1h – 63 mm)		24 mm	- 38.5
(Wilson <i>et al.</i> , 2004)	Chisel	40	L	Maïs	Artificielles (1h – 65 mm)		53.2 mm/h (max)	Ø
	Semis-direct	40	L	Maïs	Artificielles (1h – 65 mm)		56.0 mm/h (max)	+ 5.7
	Semis-direct sans résidus	40	L	Maïs	Artificielles (1h – 65 mm)		63.4 mm/h (max)	+ 19.2

En revanche, la variabilité des volumes ruisselés est importante (tableau 1.6). Dans certains cas, les volumes ruisselés sont supérieurs aux mesures réalisées sur les parcelles en témoin labour. Comme le font justement remarquer Kwaad *et al.*(1998), **le non-labour est sans doute plus efficace dans la lutte contre l'érosion que contre le ruissellement**. L'objectif de la partie suivante est de faire le point sur les facteurs qui contrôlent la formation du ruissellement en non-labour.

3. Les effets du non-labour sur le sol

1.1. L'amélioration du taux de matière-organique en surface

Un des principaux reproches qui est fait au labour concerne la dilution de la matière organique sur l'épaisseur de sol travaillé. Cette dilution a pour conséquence de diminuer la teneur en matière organique de la surface (MO). Comme nous l'avons précédemment, l'augmentation de la teneur en MO du sol a été un des premiers objectifs de l'utilisation du non-labour. De nombreux résultats confirment que cet objectif est fréquemment atteint (tableau 1.7). Cependant, il s'agit d'un effet qui ne s'observe que sur des durées longues (Tebrugge et During, 1999) et qui demeure réversible puisque un seul passage de charrue peut entraîner une diminution importante du taux de MO (Rhoton *et al.*, 2002).

Tableau 1.7 – Différences du taux de MO en surface (%) selon les pratiques (classées par ancienneté)

Référence	Période étudiée	Rotations	Texture	Conventionnel	TSL	SD
(Labreuche <i>et al.</i> , 2005)	35 ans	4 types (blé-maïs)	LA	2.0	2.7	3.1
(Mahboudi <i>et al.</i> , 1993)	28 ans	Maïs	LL	1.0	1.5	2.3
(Mahboudi <i>et al.</i> , 1993)	28 ans	Maïs	LL	0.9	1.2	2.7
(Arshad <i>et al.</i> , 1999)	15 ans	Orge	LL	3.3		4.4
(Arshad <i>et al.</i> , 1999)	15 ans	Orge	LS	2.2		2.4
(Rhoton <i>et al.</i> , 2002)	8 ans	Maïs	LL	1.9		3.7
(Tebrugge et During, 1999)	5 ans	Maïs-céréales	LA	0.7		1.1
Armand	3 ans	Maïs	LL	1.56		2.2

1.2. Effet sur la porosité du profil

3.1.1. Effet sur la densité apparente : peu de différences à long terme

La densité apparente constitue une première estimation de la porosité globale du sol. La densité apparente est principalement contrôlée par des facteurs (Strudley *et al.*, 2008) :

- **cultureaux** : le travail du sol fragmente le sol et crée une porosité artificielle. A l'inverse des passages répétés d'engins tassent le sol et peuvent diminuer la porosité, notamment en cas de sol mal ressuyé ;
- **hydrologiques** : l'alternance des cycles d'**humectation-dessiccation** en relation avec la présence d'argiles dans le sol. Les périodes de dessiccation favorisent l'ouverture des fentes
- **biologiques** liés à l'activité de la mésofaune et au développement racinaire.

La question du changement de la densité apparente se pose essentiellement en semis-direct en raison de l'absence complète de travail du sol. De ce fait, la création de la porosité est alors essentiellement d'origine biologique (lombrics, développement racinaire). Les études actuelles mettent en valeur les points suivants :

- A **court terme** (<10 ans), en semis-direct, on constate fréquemment une augmentation de la densité apparente des vingt premiers centimètres (Culley *et al.*, 1987; Rasmussen, 1999; Kay et VandenBygaart, 2002; Lampurlanés et Cantero-Martinez, 2006; Strudley *et al.*, 2008). C'est particulièrement visible sur le tableau 1.8 concernant les essais récents. Selon Kay et VandenBygaart (2002), il s'agit d'une période transitoire, où la création de porosité liée au travail du sol est compensée par l'activité biologique.
- En TSL et semis-direct, il est possible de constater une augmentation de la porosité dans les cinq premiers centimètres du sol. Kay et VandenBygaart (2002) expliquent ce fait par la présence de résidus incorporés au sol et par l'activité induite de la macrofaune.
- A **long terme**, en revanche, il semble que les différences entre système conventionnel et TSL se réduisent. L'absence de travail du sol semble être compensée par l'activité biologique.

Cependant, comme le soulignent Kay et VandenBygaart (2002), il reste difficile d'interpréter les différences de densité, car les données précises d'itinéraires techniques (nombre et conditions, de passage, poids des engins, caractéristiques des trains roulants) sont rarement mentionnées.

Tableau 1.8 – Densités apparentes relevées en contexte de non-labour

Références	Pratiques	Texture	Profondeur (cm)	Densité apparente
(Mahboudi <i>et al.</i> , 1993) 28 ans (monoculture de maïs)	Charrue	L	0- 15	1.31
	Chisel	L	0 -15	1.32
	Semis-direct	L	0- 15	1.34
(Mahboudi <i>et al.</i> , 1993) 28 ans (monoculture de maïs)	Charrue	L	0- 15	1.33
	Chisel	L	0 -15	1.31
	Semis-direct	L	0- 15	1.36
(Anken <i>et al.</i> , 2004) 14 ans - Maïs	Charrue	SL	5- 8	1.31
	Chisel	SL	5- 8	1.24
	Semis-direct	SL	5- 8	1.26
	Charrue	SL	15- 18	1.36
	Chisel	SL	15- 18	1.37
	Semis-direct	SL	15- 18	1.35
	Charrue	SL	25- 28	1.53
	Chisel	SL	25- 28	1.47
(Dabney <i>et al.</i> , 2004) 9 ans - Monoculture de maïs	Chisel	L	5-10	1.47
	Semis-direct	L	5-10	1.50
(Bhattacharyya <i>et al.</i> , 2006) 4 ans – soja-blé-pois	Charrue	SL	0-7.5	1.34
	Charrue	SL	7.5-15	1.35
	Charrue	SL	15 – 22.5	1.39
	Semis-direct	SL	0-7.5	1.35
	Semis-direct	SL	7.5-15	1.35
	Semis-direct	SL	15 – 22.5	1.38
(Culley <i>et al.</i> , 1987) 3 ans – Monoculture de maïs	Charrue	L	0-10	1.23
	Charrue	L	10-20	1.29
	Charrue	L	20-30	1.38
	Semis-direct	L	0-10	1.37
	Semis-direct	L	10-20	1.38
	Semis-direct	L	20-30	1.37
(Armand, 2004) 3 ans – Monoculture de maïs	Charrue	L	0-5	1.13
	Charrue	L	20-25	1.47
	Charrue	L	45-50	1.32
	Déchaumeur	L	0-5	1.16
	Déchaumeur	L	20-25	1.53
	Déchaumeur	L	45-50	1.42
	Semis-direct	L	0-5	1.31
	Semis-direct	L	20-25	1.40
Semis-direct	L	45-50	1.38	

3.1.2. Influence de l'activité biologique sur la porosité

De nombreuses études ont été menées afin de caractériser la porosité en contexte de non labour. Comme le mentionnent Strudley *et al.* (2008), les résultats sont difficiles à interpréter car ils peuvent être bruités par d'autres mécanismes (humectation, dessiccation, tassement), mais les études révèlent des différences significatives qui concernent essentiellement l'horizon labouré.

Pour Tebrugge *et al.* (1999) et Strudley *et al.* (2008), le non-labour est caractérisé par une diminution de la macroporosité qui est, d'ordinaire, créée par le labour. Lipiec *et al.* (2006) estiment que :

- en contexte conventionnel, l'infiltration emprunte les chemins la porosité structurale ;
- en non-labour, l'infiltration s'effectue grâce à la macroporosité d'origine biologique en NL

De nombreuses études concluent à une **population lombricienne** plus importante en non-labour (Tebrugge et During, 1999; Hangen *et al.*, 2002; Anken *et al.*, 2004; Holland, 2004; Wahl *et al.*, 2004; Lipiec *et al.*, 2006; Strudley *et al.*, 2008). Celle-ci est liée à la présence de résidus végétaux en surface ainsi qu'à l'absence de perturbation mécanique du sol. La synthèse bibliographique réalisée par l'ADEME (2007) indique le travail superficiel et le semis-direct multiplient la masse de lombrics de 1,4 à 6. Selon Tebrugge (1999), leur activité est essentiellement perceptible au printemps et en été, en l'absence de froid et de gel qui les chassent vers la profondeur.

En contexte de non-labour les études se focalisent sur la caractérisation de la porosité d'origine biologique. Une de ses particularités réside dans sa continuité, *a fortiori* en semis-direct où l'absence de travail du sol préserve la porosité. Afin d'étudier la **continuité porale**, des infiltrations de traceur coloré sont réalisées pour étudier quelle est la profondeur maximale d'infiltration. Sur sols limoneux, Logsdon *et al.* (1990) constatent sur quatre sites, que le traceur dépasse systématiquement les 35 cm de profondeur en non-labour, alors que ce n'est pas le cas en conventionnel. Selon les auteurs, ces résultats s'expliquent par la rupture de la continuité porale créée par le travail du sol. Hangen *et al.* (2002) et Wahl (2004) sur des secteurs différents obtiennent des résultats proches. :

- en labour, le traceur atteint 50 cm (Hangen *et al.*, 2002) et 80 cm (Wahl *et al.*, 2004) de profondeur,
- en non-labour (déchaumeurs), il atteint 120 cm dans les deux cas.

Ces mêmes études montrent une densité de biopores plus importante en profondeur en non-labour et soulignent l'importance de l'activité lombricienne sur la profondeur d'infiltration. Cependant en contexte conventionnel, il est également envisageable qu'une semelle de labour, même résiduelle, limite l'infiltration en profondeur.

Ces études montrent l'importance de l'activité biologique sur la porosité du profil et son infiltration potentielle. Cependant, les études précisent rarement l'état de la surface, alors que celle-ci peut exercer une action déterminante sur la partition infiltration/ruissellement.

1.3. Impacts sur la surface du sol

La présence de résidus végétaux à la surface du sol constitue la principale différence avec le système conventionnel. Cette couverture végétale va jouer sur différents compartiments hydrologiques.

3.1.3. Effets physiques

Les résidus constituent une **protection physique** de la surface. En interceptant les précipitations, les résidus réduisent l'énergie cinétique des gouttes (CTIC, 2000). L'eau atteint ensuite la surface avec une énergie plus faible ce qui ralentit les mécanismes de désagrégation (Abrahams *et al.*, 1994). Ceci a pour effet de préserver la porosité et biologique ainsi que le microrelief existant en surface et donc ralentit la dégradation structurale de la surface et la formation des croûtes. Findeling (2001) cite Aerrola Tosdado (1996) qui a travaillé sur la lame d'eau interceptée par un paillis de résidus de maïs au Mexique. Celui-ci a établi qu'un paillis de 4.5t/ha (soit un taux de couverture du sol de près de 70%) peut stocker une lame d'eau de 1,7 mm, ce qui reste peu conséquent.

Le mulch **ralentit également la propagation du ruissellement**. Grâce des mesures sous ruissellement artificiel sur des résidus de maïs, (Findeling *et al.*, 2003) a montré que la tortuosité de l'écoulement augmente linéairement avec l'augmentation du taux de résidus. En présence d'un paillis de 4.5 t/ha, le ruissellement adopte un écoulement très sinueux, 40% plus long qu'en l'absence de résidus. Les résidus agissent comme des « micro-barrages » ralentissant le ruissellement. Ce point est validé par Kwaad *et al.* (1998) qui ont calculé les mesures de vitesse d'écoulement du ruissellement à partir des hydrogrammes de crue. Les vitesses mesurées sont sensiblement plus faibles quand le sol est couvert de résidus (taux de couverture : 44% - vitesse : 0.11 m/s) qu'en l'absence de résidus (taux de couverture : 0.6% - vitesse : 0.4 m/s). Cette perte de vitesse diminue l'érosivité du ruissellement et donc la probabilité d'incision de la surface.

3.1.4. Effets chimiques et biologiques

Les résidus végétaux constituent un stock dont la décomposition par les agents biologiques et climatiques va fournir de la **matière organique** à l'horizon de surface. Cette correction du taux de MO en surface constitue un des objectifs principaux du non-labour. Pour de nombreux auteurs, l'enrichissement en MO contribue à **améliorer la stabilité structurale de la surface** (Dao, 1993; Trojan et Linden, 1998; Arshad *et al.*, 1999; Tebrugge et During, 1999; Jalota *et al.*, 2001; Holland, 2004; Pagliai *et al.*, 2004; Lipiec *et al.*, 2006; ADEME, 2007; Blanco-Canqui *et al.*, 2007). L'amélioration de la stabilité structurale se traduit, selon ces études, par l'absence de croûtes ce qui favorise l'infiltration des précipitations.

3.1.5. Conséquences sur l’infiltrabilité de la surface

En contexte de non-labour, **il est difficile de caractériser les propriétés hydrodynamiques de la surface** (Strudley et al., 2008). La présence de résidus complique la réalisation des mesures *in situ*, *a fortiori* si ces derniers sont grossiers, comme dans le cas du maïs grain. Peu d’études précisent comment les auteurs s’accommodent de la présence des résidus, notamment quand ils utilisent un infiltromètre à tension car celui-ci nécessite un bon contact entre la membrane de l’appareil et la surface (généralement séparées par une couche de sable). Lampurlanés et Cantero-Martinez (2006) précisent qu’ils enlèvent les résidus avant l’expérimentation. Ils constatent une infiltration cumulée plus importante en non-labour, mais sans les résidus, quelle est la pertinence de cette mesure ? Trojan et Linden (1998) préfèrent couper les résidus avant de poser l’infiltromètre, cependant ils ne constatent pas de différence d’infiltration à régime constant entre les techniques conventionnelles et TSL.

La majorité des données provient de mesures réalisées en laboratoire sur des échantillons prélevés au cylindre. C’est donc plus la conductivité hydraulique de l’horizon de surface qui est estimée que l’aptitude de la surface à laisser les précipitations s’infiltrer ou pas. Les résultats présentent une grande variabilité de la conductivité hydraulique à saturation (tableau 1.9). La majeure partie des auteurs attribuent **les meilleures valeurs d’infiltrabilité à la stabilité structurale en surface** et au moindre développement des croûtes. (Dao, 1993; Arshad *et al.*, 1999; Tebrugge et During, 1999; Pagliai *et al.*, 2004; Lipiec *et al.*, 2006; Strudley *et al.*, 2008)

Tableau 1.9 – Conductivité hydraulique de l’horizon de surface (perméamètre à charge)

Reference	Technique culturale	Texture	Profondeur (cm)	Ksat (m/s ⁻¹)	Ksat (% par rapport au conventionnel)
(Mahboudi <i>et al.</i> , 1993)	Charrue	L	0-15	2.3 10 ⁻⁶	Ø
	Semis-direct	L	0-15	1.4 10 ⁻⁴	+ 60 770
(Pagliai <i>et al.</i> , 1995)	Charrue	L	0-10	1.6 10 ⁻⁶	Ø
	Déchaumeur	L	0-10	3.1 10 ⁻⁵	+ 1 873
(Bhattacharyya <i>et al.</i> , 2006)	Charrue (2 passages)	SL	0-7.5	4.0 10 ⁻⁶	Ø
	Charrue (1 passage)	SL	0-7.5	4.3 10 ⁻⁶	+ 7
	Semis-direct	SL	0-7.5	4.5 10 ⁻⁶	+ 12
(Culley <i>et al.</i> , 1987)	Charrue	L	0-8	6.1 10 ⁻⁶	Ø
	Semis-direct	L	0-8	4.5 10 ⁻⁶	- 36
(Armand, 2004)	Charrue	L	0-5	3.0 10 ⁻⁶	Ø
	Déchaumeur	L	0-5	2.0 10 ⁻⁶	- 33
	Semis-direct	L	0-5	1.9 10 ⁻⁶	- 37

Le **manque de standardisation** des protocoles d’infiltrométrie, notamment concernant la présence de résidus végétaux, rend difficile la comparaison des résultats. Or certains auteurs se

demandent si les résidus ne constituent pas des voies préférentielles d'infiltration, surtout quand ils sont imbriqués dans le sol (Findeling *et al.*, 2003; Blanco-Canqui *et al.*, 2007). Ainsi, Jalota *et al.* (2001) observent des infiltrations cumulées plus élevées quand les résidus (paille de blé) sont incorporés dans la surface. Findeling (2001) établit une corrélation positive entre la quantité de résidus et l'infiltrabilité de la surface.

Au final, comme le constatent Dabney *et al.* (2004), **les connaissances sur la contribution de la surface du sol à la partition infiltration/ruissellement en contexte de non-labour restent limitées.**

4. Approfondir l'effet de la surface sur la formation du ruissellement

4.1. Ancienneté du non-labour et influence des processus de surface

Comme nous l'avons vu, en contexte de non-labour, l'essentiel des travaux a porté sur les propriétés du **profil** de sol. L'état de la question a montré le rôle essentiel de la macroporosité d'origine biologique racinaire ou lombricienne sur l'amélioration des propriétés hydrodynamiques du sol.

Concernant l'effet de la **surface** sur la formation du ruissellement en NON-LABOUR, les connaissances sont plus limitées (Dabney *et al.*, 2004; Wilson *et al.*, 2004). La couverture en résidus végétaux et l'amélioration de la stabilité structurale sont les deux facteurs les plus mentionnés sur la réduction du ruissellement.

L'étude des processus contrôlant la partition ruissellement/infiltration en non-labour met en lumière les éléments suivants.

L'augmentation de l'infiltrabilité du profil de sol dépend fortement du **facteur temps**. La création d'une porosité d'origine biologique présentant une continuité porale élevée est un processus qui opère sur le long terme. C'est pourquoi, les caractérisations hydrodynamiques sont fréquemment réalisés sur des essais de longue durée (>10-15 ans). Le non-labour place alors l'exploitant dans une logique accumulative où chaque année la porosité biologique augmente si bien que l'infiltrabilité augmente peu à peu.

Or, comme le mentionnent Strudley *et al.* (2008), il existe une **différence de temporalité** entre le développement d'une porosité d'origine biologique le long du profil, qui s'étend sur plusieurs années, et la formation des croûtes en surface qui est un processus rapide, intervenant à l'échelle de la saison. On peut estimer que **la surface joue un rôle majeur sur la réduction du ruissellement lors de cette période transitoire**, car les différences de porosité avec le système conventionnel sont encore limitées. Cette période transitoire se rencontre :

- lors de la transition initiale entre système conventionnel et non-labour ;
- mais également à chaque fois que l'exploitant utilise sa charrue, alors qu'il se trouve en contexte de non-labour, ce qui rompt l'amélioration de la continuité porale et l'enrichissement de la surface du sol en MO (Rhoton *et al.*, 2002).

Or, pour l'exploitant, **il peut-être difficile de maintenir le système non-labour sans retourner le sol de façon ponctuelle**. L'exploitant peut rencontrer des levées d'adventices (en cas de monoculture prolongée) ou des cultures supportant difficilement le non-labour. Comme le montre Chapelle-Barry (2008) sur la période 2001-2006, seules 11 % des surfaces en grandes cultures n'ont jamais été retournées depuis 2001 (fig. 1.9).

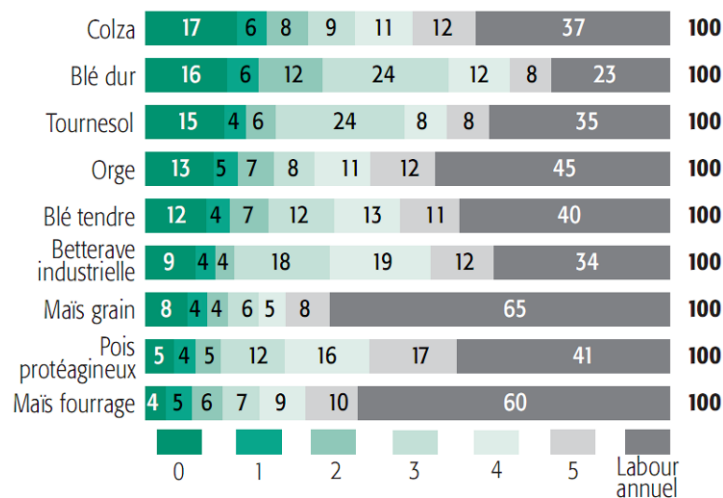


Figure 1.9 - Superficies cultivées en 2006 classées selon le nombre de labour depuis 2001 (Chapelle-Barry, 2008)
 (Lecture : 17% des superficies de colza de 2006 n'ont jamais été labourées entre 2006 et 2001.
 6% ont connu un seul labour. 37% ont été labouré tous les ans)

4.2. Estimer le ruissellement à partir des EDS

En résultant des interactions complexes de processus géomorphologiques et agricoles, les EDS occupent une situation d'interface. Ils constituent des **indicateurs de l'action des processus** difficiles à évaluer tels que la dégradation structurale ou la partition entre infiltration et ruissellement. Comme nous l'avons vu précédemment, Boiffin et Monnier (1985) adoptent une **démarche mécaniste** où le niveau d'encroûtement et l'infiltrabilité de la surface sont reliés. En se basant sur des travaux réalisés dans le Pays de Caux, Cerdan *et al.* (2001b) proposent une table de correspondance (tableau 1.10) qui permet de relier les caractéristiques de surface (encroûtement, couverture végétale et rugosité) et l'infiltrabilité de la surface. Cette table permet de générer la lame d'eau ruisselée et constitue la pièce centrale du modèle STREAM (Sealing and Transfer by Runoff and Erosion related to Agricultural Management).

Tableau 1.10 – Table de correspondance du modèle STREAM (Cerdan et al., 2001b). Valeurs d'infiltrabilité en mm/h

Rugosité	Couvert végétal (%)	Faciès des EDS			
		F0	F11	F12	F2
>10cm	>61	50	50	50	10
	21-60		50	20	
	<20		20		
5-10cm	>61		50	50	
	21-60		50	20	
	<20		20	10	
2-5cm	>61		50	20	10
	21-60				
	<20		20	10	5
1-2cm	>61				
	21-60				
	<20	20	10	5	2
<1cm	>61	50	20	10	5
	21-60	20			
	<20	10	10	5	2

La relation entre EDS et ruissellement peut-être affinée par une **approche statistique**, en utilisant des régressions linéaires multiples. Martin (1997) a étudié l'effet des intercultures sur le ruissellement dans le Pays de Caux sous pluies naturelles. Après deux saisons de suivis, il estime que les variables climatiques et de surface permettent d'expliquer 60% de la variabilité des volumes ruisselés. Il met notamment en évidence les variables suivantes :

- les précipitations cumulées pendant la séquence pluvieuse considérée ;
- le bilan hydrique sur les 3 jours précédant l'épisode ruisselant ;
- la couverture végétale ;
- le tassement ;
- la rugosité de la surface.

En Belgique, Leys *et al.* (2007) ont étudié la production de ruissellement de plusieurs types de TSL sur sols limoneux et sous pluies simulées (intensité de 45 mm/h). L'équation de régression permet d'obtenir un pouvoir explicatif de la variation des volumes ruisselés d'environ 50%. Les variables prises en compte par la régression sont :

- la texture (ratio limons/sables) ;
- l'intensité pluviométrique ;
- l'humidité initiale ;
- l'encroûtement initial ;
- la couverture végétale totale (*i.e.* végétation en place et résidus).

Les observations d'EDS qui ont été collectées sur le terrain permettent également d'estimer la **dynamique temporelle** des EDS. A partir des données de texture, les itinéraires techniques et les

précipitations cumulées, Tribouillard (2004) a construit un indicateur de ruissellement. Il permet d'estimer la hauteur de pluie nécessaire au changement de faciès. Ces faciès étant relié à des capacités d'infiltration (cf. 1.2.2), il devient possible de déduire les lames d'eau ruisselées. Cet indicateur, intégré à l'indicateur agro-environnemental INDIGO (Bockstaller *et al.*, 2008; Bockstaller *et al.*, 2009) n'est pas spatialisé, mais en se basant sur des chroniques pluviométriques, il permet d'estimer les périodes de forte production de ruissellement.

La connaissance des facteurs influençant la dynamique de la dégradation des EDS permet de prévoir l'apparition des faciès ruisselants. C'est le rôle des indicateurs de type *ex-ante*, qui permettent cette expertise (Bockstaller *et al.*, 2008; Sadok *et al.*, 2008).

4.3. Variabilité spatiale des EDS et formation du ruissellement

Nous avons vu que les EDS influencent fortement la partition infiltration/ruissellement. Cependant, **l'organisation spatiale des EDS** joue un rôle tout aussi important sur la quantité de ruissellement qui sera collecté à l'exutoire de la surface considérée. La variabilité spatiale des EDS a notamment été étudiée en milieu aride et semi-aride (Solé-Benet *et al.*, 1997; Puigdefabregas *et al.*, 1999; Cammeraat, 2002; Imeson et Prinsen, 2004). Les EDS de ces versants sont hétérogènes et sont caractérisés par une alternance de zones nues, sur lesquelles les précipitations ruissellent rapidement et de zones couvertes par la végétation où l'infiltration est possible. **Ces études montrent l'importance de la connectivité des surfaces ruisselantes sur les volumes ruisselés**, notamment à l'échelle du bassin versant et du versant (Bracken et Croke, 2007).

Ambroise (1999) introduit la notion de **surfaces actives et de surfaces contributives**. Dans le cas du ruissellement pouvant générer une onde de crue, il est possible d'expliquer cette distinction de la façon suivante :

- les surfaces actives sont celles sur lesquelles se forme le ruissellement (quelque soient les processus) ;
- les surfaces contributives sont les surfaces actives qui sont effectivement reliées au cours d'eau et dont le ruissellement pourra contribuer à l'onde de crue.

En contexte cultivé, le rôle des techniques culturales sur les EDS implique des **variations spatiales importantes entre les parcelles agricoles**. La relation entre EDS et propriétés hydrodynamiques de surface a permis l'utilisation des EDS dans des démarches de type experte : à partir d'unités spatiales présentant un EDS homogène, il s'agit d'estimer le risque de ruissellement ou l'infiltrabilité potentielle. Sur un échantillon de 20 bassins versants, Ludwig *et al.* (1995) ont mené un suivi de l'EDS des parcelles agricoles pendant 3 ans. Ils ont montré la forte relation entre l'extension des surfaces cultivées présentant un faciès F2, marquées par le développement des croûtes sédimentaires, et l'érosion par le ruissellement dans le talweg.

Selon Papy et Boiffin (1988), **la variabilité des EDS constitue un élément important dans la lutte contre le ruissellement érosif**. Les auteurs recommandent d'éviter de former des blocs de parcelles présentant un EDS dégradé qui se traduirait par la formation de surfaces ruisselantes continues. Au contraire, ils préconisent d'introduire une mosaïque associant cultures de printemps et cultures d'hiver afin que les parcelles à l'EDS moins dégradé puissent infiltrer le ruissellement émis par les surfaces situées en amont. Les **intercultures** sont également un moyen d'agir sur l'état structural et le couvert végétal pour limiter le ruissellement sur les chantiers de récolte (Martin, 1999).

Ainsi, dans le bassin versant de Bourville (Pays de Caux), Joannon *et al.* (2006) ont étudié les possibilités de **modification d'assolements** en vue de réduire les volumes ruisselés. La spécificité de cette méthode est qu'elle tient compte des marges de manœuvre agronomiques des exploitants (parcelle favorable à l'implantation, temps d'attente minimum avant implantation, culture précédente potentielle). Un scénario favorisant des assolements de cultures plus favorables à l'infiltration (lin, pommes de terre et pois) a été simulé sous STREAM (Cerdan *et al.*, 2001b). La baisse du ruissellement est comprise entre 4,5 et 10% selon l'épisode pluvieux considéré. Cette méthode pose néanmoins des problèmes d'acceptabilité sociale (les exploitants ne sont pas tous disposés à ce que leurs parcelles reçoivent le ruissellement émis sur des secteurs situés à l'amont) et de temps de collecte des données.

Peu d'études se sont penchées sur la **variabilité intraparcellaire des EDS**, alors qu'en **contexte de cultures annuelles sarclées**, les parcelles présentent une structuration spatiale des EDS, en particulier du microrelief, liée au travail du sol (alternance d'interrangs de ligne de semis et de traces de roue). **Cette structuration doit être prise en compte afin d'estimer correctement l'aptitude d'une parcelle à ruisseler en fonction des EDS** (Helming *et al.*, 2005). Certaines études ont notamment étudié les différences de rugosité et leurs effets sur le parcours du ruissellement au sein des parcelles (Souchère *et al.*, 1998; Takken *et al.*, 2001). Les **traces de roue**, en raison du tassement de la subsurface, sont des secteurs préférentiel de formation du ruissellement (Rauws et Auzet, 1989; Li *et al.*, 2001; Richard *et al.*, 2001; Tullberg *et al.*, 2001; Quinton et Catt, 2004; Hamza et Anderson, 2005).

Des travaux récents montrent que **l'organisation spatiale des EDS à petite échelle (<10 m²)** permet d'expliquer les différences d'infiltrabilité de la surface. Sur des sols limoneux, les travaux menés par Leonard *et al.* (2006) se sont attachés à relier l'infiltrabilité apparente de placettes de 2 m² en fonction des EDS. Ces mêmes auteurs mettent en évidence l'importance du seuil de 50% de couverture par les croûtes sédimentaires. En dessous de ce seuil, la connectivité des croûtes sédimentaires est insuffisante pour que le ruissellement puisse rejoindre le point de collecte : il se réinfiltré dans les zones situées aux environs des croûtes sédimentaires.

Synthèse et objectifs de ce travail

Le non-labour constitue un moyen de lutte contre le ruissellement, les pertes en terre et les impacts hors-sites (les inondations boueuses, notamment). Dans ce cadre, il est crucial d'appréhender les facteurs qui contrôlent la formation du ruissellement pour que l'utilisation du non-labour produise les effets escomptés. Or, la synthèse des connaissances effectuée au cours de cette partie met en valeur les points suivants :

- lors des premières années d'utilisation du non-labour, il semble que les processus de surface soient déterminants sur la partition infiltration/ruissellement. Or les connaissances sur ces processus spécifiques au non-labour restent méconnues, la majorité des études avançant une meilleure stabilité structurale.
- les EDS présentent une **variabilité spatiale** très importante sous l'effet des facteurs naturels et agronomiques. Cette variabilité a été étudiée à différentes échelles (bassin versant, versant et parcelle agricole). Il semble qu'à échelle très locale (<10 m²), les EDS présentent une variabilité spatiale pouvant influencer la connectivité des surfaces ruisselantes (i.e. : les zones présentant un fort développement des croûtes sédimentaires). Deux questions seront particulièrement étudiées
 - o Les EDS présentent-ils une variabilité spatiale structurée par le travail du sol ?
 - o La réduction des volumes ruisselés en contexte de non-labour est-elle liée à la présence de résidus végétaux diminuant la connectivité des surfaces ruisselantes ?

Deux objectifs peuvent être déduits de cette synthèse :

- Un **objectif théorique** qui vise à étudier les EDS particuliers du non-labour et à comprendre quels processus de surface, peuvent expliquer la variation des volumes ruisselés entre les contextes conventionnels et de non-labour ; et ce, en tenant compte de l'éventuelle **variabilité spatiale des EDS à l'échelle intraparcélaire** ;
 - o un objectif complémentaire résidera dans l'intégration de ces connaissances, sous la forme d'un indicateur de l'aléa ruissellement ;
- un **objectif opérationnel** qui consiste à vérifier l'efficacité des TSL sur la réduction du ruissellement.

Chapitre 2

Sites d'études et méthodes

L'état des connaissances actuelles a montré le rôle de la dégradation structurale sur la formation du ruissellement, *a fortiori* dans les secteurs où la texture du sol est limoneuse. La spatialisation des secteurs affectés par l'érosion des sols peut suivre deux approches :

- l'estimation de l'aléa *via* des démarches de modélisation des processus en tenant compte des facteurs influençant le ruissellement et l'érosion : texture, pente, climat, techniques culturales, *etc.* ;
- l'étude des dégâts causés par le ruissellement, notamment ceux occasionnés par les inondations boueuses. Les démarches entreprises par les communes permettent de spatialiser les dégâts. Ce faisant, cette cartographie peut être incomplète, car elle ignore les espaces inhabités où la formation du ruissellement n'occasionne pas de dégâts, mais elle fournit une clé d'entrée intéressante.

Le travail de recensement des inondations boueuses mené par l'IFEN sur la période 1985-2000 (Thorette et Le Bissonnais, 2005) permet d'identifier les régions les plus concernées par le phénomène (figure 2.1). Les densités les plus élevées (>8 inondations/100 km²) sont principalement rencontrées dans des régions au relief et aux précipitations modérés mais où la couverture limoneuse est importante : Haute-Normandie, Pas-de-Calais, Picardie. D'autres régions, caractérisées par des épisodes pluvieux de type méditerranéen sont également présentes (Languedoc- Roussillon).

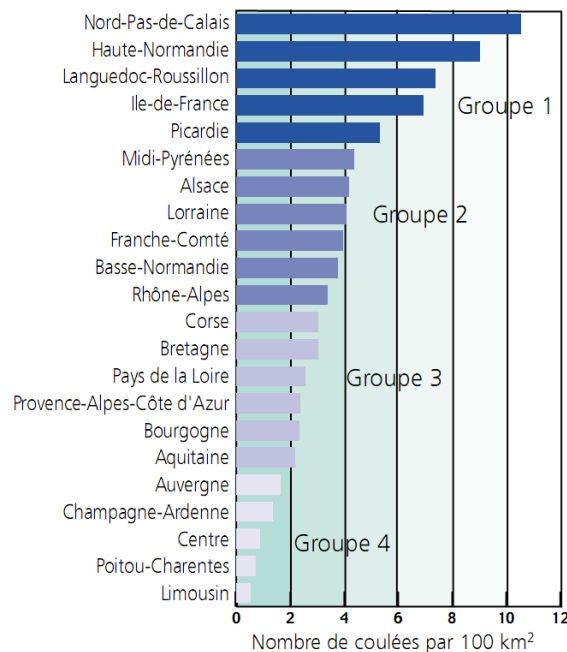


Figure 2.1 – Densité d'inondations boueuses sur la période 1985-2000 (in Thorette et Le Bissonnais, 2005).
Sources des auteurs : MEDD (DPPR), Base Corinte, généralisation IFEN

Dans ce classement, l'Alsace occupe la 6^{ème} position avec environ 4 inondations/100 km². Cette valeur moyenne cache des disparités locales importantes puisque, nous allons le voir, les inondations boueuses sont localisées dans des contextes naturels et agronomiques bien précis.

L'étude des inondations boueuses affectant la région constituera le point de départ de cette partie afin de localiser les secteurs les plus concernés. Ensuite, l'objectif sera de présenter les deux secteurs d'études (l'Outre-Forêt et le Sundgau) dans lesquels sont localisés les sites expérimentaux. Les conditions climatiques et pédologiques des différents sites d'essais ainsi que les itinéraires techniques testés seront ensuite détaillés. Cette partie se terminera par la présentation des méthodes utilisées pour réaliser les observations d'EDS et effectuer les mesures de ruissellement et d'érosion sous pluies naturelles et simulées dont les résultats seront présentés dans les deux prochains chapitres.

1. Une région affectée par l'érosion

1.1. L'étude des dossiers de reconnaissance d'état de catastrophe naturelle

L'**occurrence** des inondations boueuses n'est probablement pas un phénomène récent en Alsace. Lors du démontage d'une maison traditionnelle à Schlierbach (Sundgau), des dépôts boueux ont été constatés sous le plancher actuel ce qui conduit à penser que les inondations boueuses se manifestaient déjà au cours des siècles derniers (F. Tischmacher, communication orale).

Après avoir été touchées par une inondation boueuse, les communes peuvent demander la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle auprès de la commission interministérielle *ad hoc*⁴. Cet état est reconnu en raison de « *l'intensité anormale d'un agent naturel, lorsque les mesures habituelles à prendre pour prévenir ces dommages n'ont pu empêcher leur survenance ou n'ont pu être prises* ». Dans le cas des inondations boueuses, l'avis de l'expert météorologique est déterminant : si la période de retour de l'épisode déclenchant est supérieure à 10 ans, l'état de catastrophe naturelle est reconnu. Ceci ouvre ensuite des possibilités d'indemnisation des victimes auprès de leurs assurances.

Cependant, comme nous l'avons évoqué dans l'introduction générale, cette demande de classement peut prêter à confusion car les communes demandent une reconnaissance au titre « d'inondation et coulée de boue ». Les informations issues de l'étude des dossiers mélangent donc les événements liés aux :

- crues par débordement de cours d'eau et/ou remontée de nappe ;
- crues boueuses liées à la formation de ruissellement sur les surfaces cultivées.

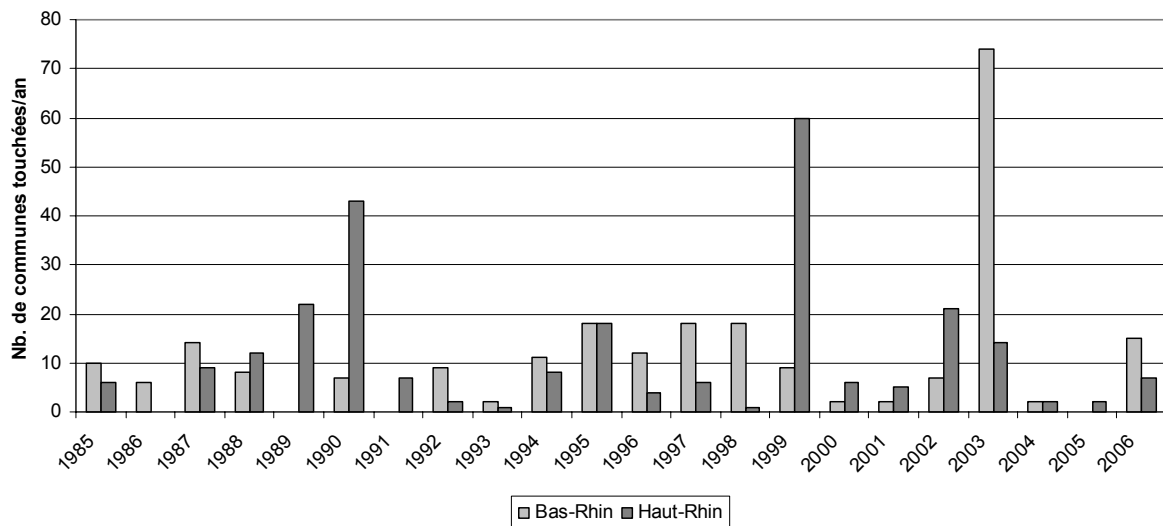


Figure 2.2 – Historique des crues et inondations boueuses dans le Bas-Rhin et le Haut-Rhin (Données Bas-Rhin : Guyonnet (2005) ; Moquet (2005) - Données Haut-Rhin : Heitz (2004))

⁴ Loi 86-600 du 13 juillet 1982 relative à l'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles.

L'analyse des demandes de classement réalisée par Heitz (2004), Guyonnet (2005) et Moquet (2005) fournit des informations sur la répartition temporelle des événements. La figure 2.2 montre trois années où de nombreuses communes ont été touchées :

- 1990 et 1999 sont deux années marquées par les crues du Rhin, notamment dans le Haut-Rhin ;
- 2003 correspond à une année où de fréquents orages ont touché le Bas et le Haut-Rhin.

Afin de séparer les crues liées au débordement des cours d'eau suite à des pluies de longue durée des inondations boueuses liées au ruissellement sur terres cultivées, Moquet (2006) a mis au point une méthode de discrétisation basée sur les critères suivants (*cf.* annexe 1 pour plus de détails) :

- La topographie du secteur (présence de pentes >2%) ;
- l'occupation du sol au moment de l'événement afin de différencier les prairies des surfaces cultivées ;
- la proximité des terres cultivées par rapport aux zones habitées ;
- les caractéristiques de l'épisode pluvieux (durée des précipitations) ;
- l'étude complémentaire du dossier et notamment la description des phénomènes observés.

Cette méthode a été appliquée sur les données fournies par Heitz (2004), Guyonnet (2005) et Moquet (2005) sur la période 1985-2006. Sur les 256 recensements réalisés dans le Haut-Rhin, 162 sont considérés comme étant des inondations boueuses. Les autres recensements sont liés à deux événements de débordement de cours d'eau importants (29 et 32 communes concernées) lors des crues du Rhin de 1990 (crue centennale) et 1999. Ces débordements sont dus, selon le rapport météorologique, à d'intenses fontes de neige. Dans le Bas-Rhin, sur les 244 recensements réalisés, 216 sont assimilés à des inondations boueuses.

Sur la base de ce travail, on constate que les inondations boueuses sont essentiellement situées sur une période comprise entre mai et juillet (figure 2.3) suite à l'occurrence d'orages de printemps liés au climat continental.

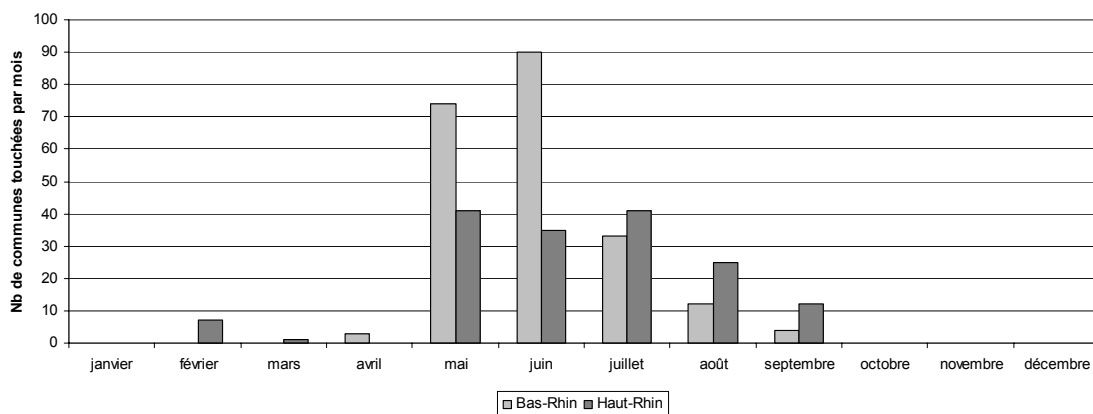


Figure 2.3 - Répartition mensuelle des inondations boueuses dans le Bas-Rhin et le Haut-Rhin (période 1985-2006) en appliquant la méthodologie développée par Moquet (2006).

Données initiales : Bas-Rhin : Guyonnet (2005) ; Moquet (2005) - Données Haut-Rhin : Heitz (2004)

1.2. Les secteurs affectés par les inondations boueuses

En tenant compte de la méthodologie de Moquet (2006), la localisation des communes touchées par les inondations boueuses (figure 2.4a) démontre que seuls certains secteurs sont concernés : les collines limoneuses et les collines sous-vosgiennes.

La comparaison des quatre cartes présentes sur la figure 2.4 permet de faire des corrélations, certes grossières, mais qui donnent des éléments d'explication intéressants.

Les **collines sous-vosgiennes** (partie centrale de l'Alsace) sont des reliefs calcaires correspondant au piémont vosgien (figure 2.4b). Elles sont caractérisées par des pentes fortes (>20%) et la culture de la vigne. Ce secteur présentant des conditions naturelles et agricoles sensiblement différentes des collines limoneuses et il ne sera pas étudié dans la suite ce travail.

Les **collines limoneuses** correspondent aux petites régions naturelles⁵ suivantes (figure 2.4c) : l'Outre-Forêt, le Pays de Hanau et le Kochersberg (Bas-Rhin) et le Sundgau (Haut-Rhin). Ces secteurs sont essentiellement cultivés en céréales (figure 2.4c). La culture majoritaire est le maïs grain qui représente 75% des surfaces semées en céréales (Agreste 2007).

L'**intense périurbanisation** explique également la vulnérabilité de certaines communes aux inondations boueuses. Comme le montre la figure 2.4d, les communes situées en périphérie des métropoles alsaciennes sont des secteurs d'installation résidentielle, notamment autour de Strasbourg. Dans une région où la densité de population est le double de la moyenne nationale (env. 220 hab./km² en 2006), il existe une pression foncière forte sur les terrains agricoles situés en limite de commune, car ils constituent des marges d'expansion. Cette extension urbaine sur les terres cultivées constitue sans doute un facteur aggravant dans la vulnérabilité des communes face aux inondations boueuses, par le biais de la suppression des interfaces (prairies et vergers notamment) entre surfaces urbanisées et surfaces cultivées, comme le constate Evrard (2007) en Belgique. La présence de l'Allemagne et de la Suisse induit également la présence d'**emplois transfrontaliers**. En 1999, près de 10% des actifs alsaciens, soit 70 000 personnes, sont des travailleurs frontaliers, mais dans certains cantons du Sundgau et de l'Outre-Forêt, la part des frontaliers atteint 30% (INSEE). Cette périurbanisation résulte de la conjonction de deux dynamiques : i) l'éloignement résidentiel des centres urbains ; ii) l'installation des travailleurs transfrontaliers dans des espaces ruraux.

⁵ Le découpage de l'Alsace en « petites régions naturelles » repose sur le travail effectué par Vogt. *et al* (1986). La carte des formations superficielles sert de point de départ à la délimitation de secteurs caractérisés par l'homogénéité interne de leurs paysages naturels et agricoles (Party, 2003). C'est notamment le découpage retenu dans la réalisation des Guides des Sols d'Alsace. Le découpage reste assez proche des PRA (Petites Régions Agricoles)

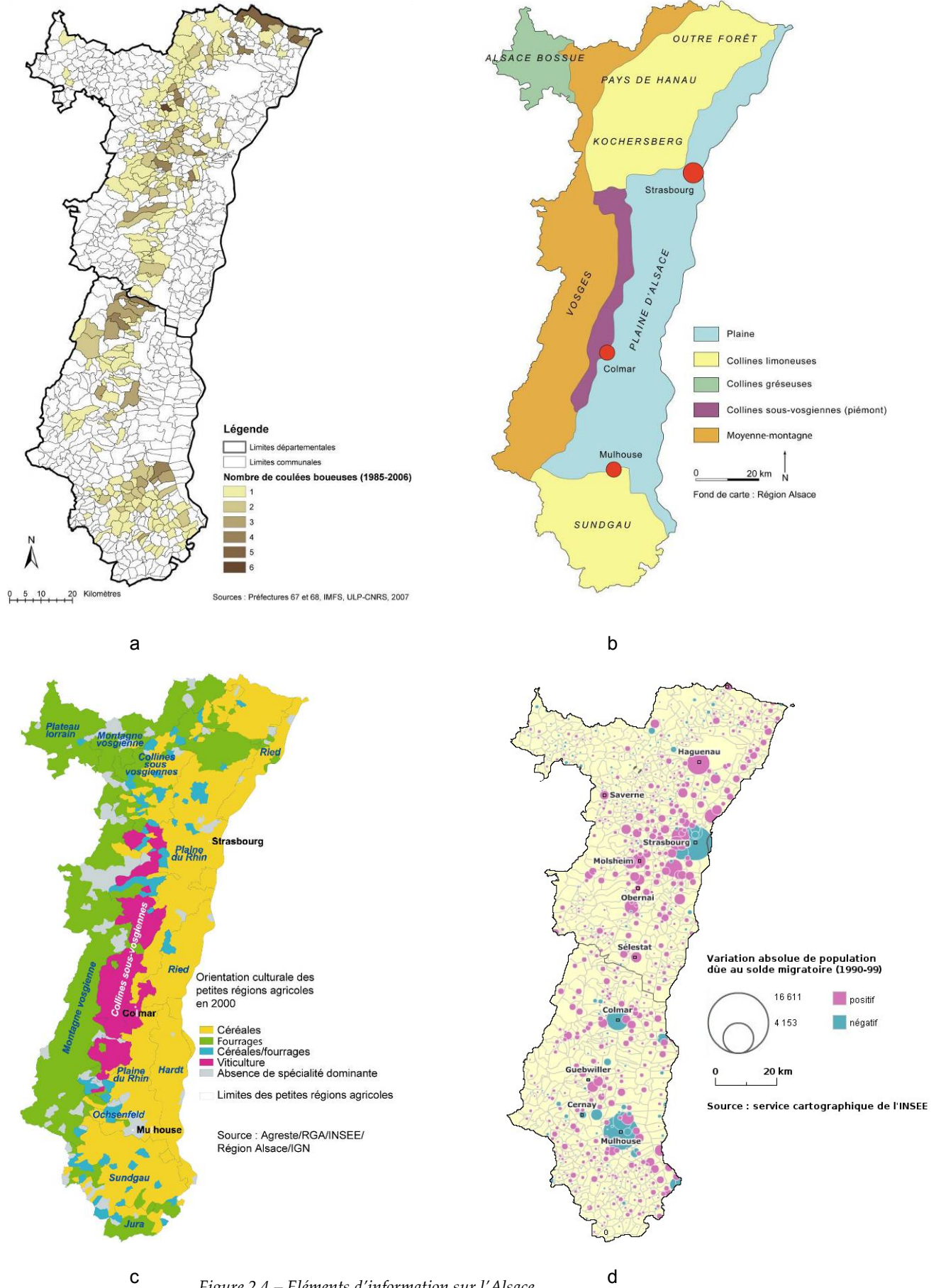


Figure 2.4 – Eléments d'information sur l'Alsace

2. Présentation des petites régions naturelles étudiées

2.1. Géomorphologie : un paysage de collines

Le Sundgau et l'Outre-Forêt correspondent à **deux compartiments de collines** légèrement surélevés par rapport au Fossé Rhénan (figure 2.5). Les altitudes varient entre 300 et 500 mètres alors que l'altitude de la plaine est comprise (du sud au nord) entre 246 m et 106 m. Le contact entre ces secteurs et la plaine se fait par l'intermédiaire des failles rhénanes.

2.1.1. Le Sundgau

Dans le fossé rhénan, le Sundgau constitue un compartiment qui a relativement résisté à l'affaissement du fossé (Vogt, 1992). Le Horst de Mulhouse domine deux secteurs d'effondrement que sont le fossé rhénan et le fossé de Dannemarie. Ce secteur est délimité au nord et à l'est par la plaine du Rhin, au sud par le Jura, et à l'ouest par les Vosges. Il se divise en plusieurs unités (figure 2.5) :

- les collines limoneuses, qui retiendront notre attention,
- le Jura Alsacien, situé complètement au sud, paysage marqué par les affleurements calcaires,
- les vallées de la Largue, de l'Ill et de la Doller.

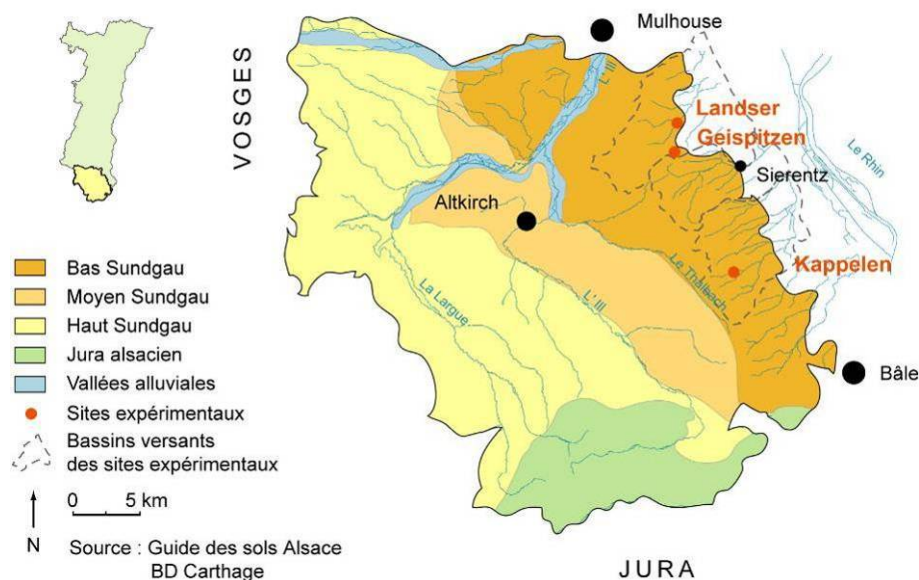


Figure 2.5 – Carte géomorphologique du Sundgau

La géologie récente (Tertiaire) est notamment caractérisée par une couche de cailloutis déposés par le Rhin (-5 à -10 MA) qui accueille fréquemment une nappe phréatique, surmontant une couche de molasse imperméable (-25 MA). Les assises plus anciennes (Secondaire) consistent en une alternance de marnes puis de calcaires durs. Les formations superficielles sont essentiellement composées de **dépôts loessiques quaternaires** dont l'âge varie selon un gradient Ouest-Est :

- à l'ouest, le Haut Sundgau est recouvert par des dépôts lehmifiés anciens, datant du Riss,
- le Moyen Sundgau est recouvert de dépôts rissiens moins décarbonatés,
- le Bas Sundgau est caractérisé par des dépôts wurmiens plus jeunes.

L'épaisseur des dépôts varie entre 10 et 30 mètres (Vogt, 1992) selon leur localisation (en fond de vallon, en sommet de versant). La texture des sols sera présentée en détails lors de l'étude des sites d'études. Le relief y est doux et composé essentiellement de collines (figure 2.6).

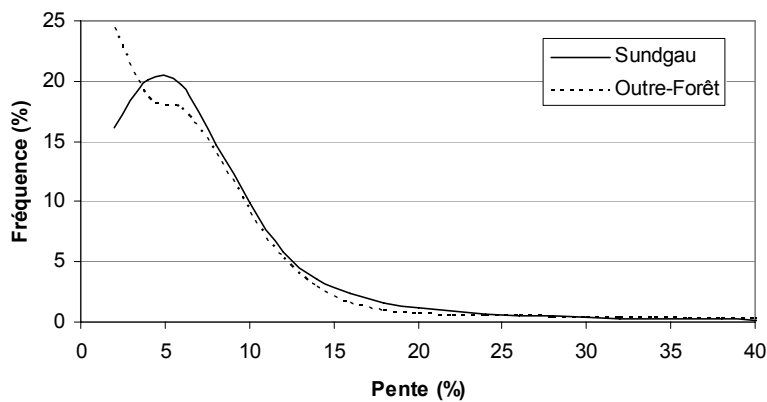


Figure 2.6 - Distribution des pentes pour le Sundgau et l'Outre-Forêt (Paul Van Dijk, ARAA) *MNT*

Les trois sites retenus sont localisés dans le **Bas Sundgau**, précisément sur **la partie la plus orientale**, en léger surplomb par rapport à la Plaine du Rhin. D'une largeur d'environ 15 km, ce territoire est constitué de petits bassins versants agricoles orientés vers l'est. La particularité de ce secteur réside dans **l'infiltration des cours d'eau** drainant les bassins versants des collines dans la Plaine du Rhin. Ces cours d'eau ne rejoignent pas le Rhin et sont en communication directe avec la nappe phréatique des alluvions du Rhin (figure 2.7). Cette configuration favorise le transfert des polluants transportés par les eaux de surface en direction des eaux souterraines (voir carte des pollutions en atrazine annexe 2).

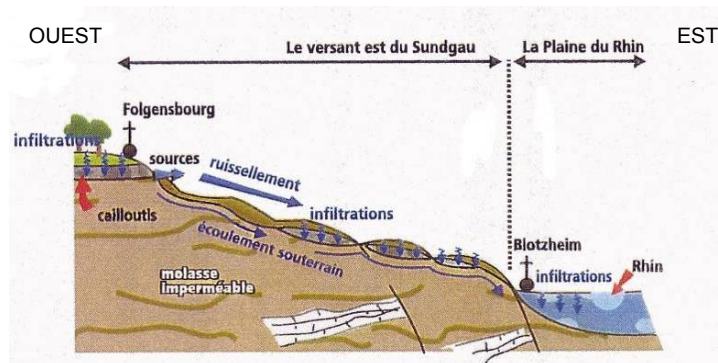


Figure 2.7 – Fonctionnement hydrologique simplifié de la bordure orientale du Sundgau (Party, 2001)

2.1.2. L'Outre-Forêt

Tout comme le Sundgau, il s'agit d'un secteur de collines limoneuses, présentant des caractéristiques topographiques et géomorphologiques très similaires (figure 2.8). Ce secteur est délimité :

- au nord, au sud et à l'est par des secteurs de plaine,
- à l'ouest par le piémont des Vosges gréseuses.

Le contact avec les unités géologiques mitoyennes se fait par les failles rhénanes (plaine du Rhin) et le champ de fracture de Saverne (Von Eller, 1984).

Les altitudes des collines varient de 350 et 500 m. Seules les formations géologiques diffèrent du Sundgau : les plus récentes sont composées de dépôts marno-calcaires (dépôts lacustres) parfois entrecoupés de lits schisteux (dépôts marins) correspondant à l'Ere Tertiaire. Les assises issues du Secondaire consistent en une alternance de marnes, de calcaires et de grès (Party, 2003). Tout comme, le Sundgau, ce secteur est recouvert de loess déposés pendant le Quaternaire.

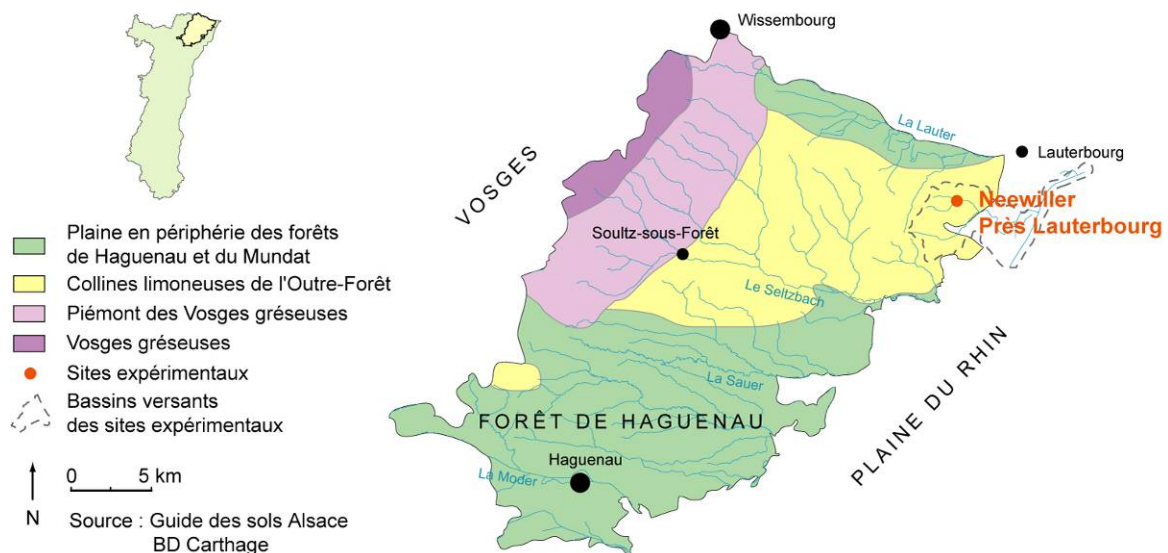


Figure 2.8 – Carte géomorphologique de l'Outre-Forêt

2.2. Un climat marqué par les orages de printemps

Le climat régional est de type **continental à influence océanique**. La continentalité s'exprime par des contrastes saisonniers marqués : l'amplitude thermique annuelle est de 18°C. Les hivers sont prononcés (entre 80 et 100 jours de gel par an) et les étés chauds, sans déficit d'eau important. Les cumuls pluviométriques correspondent à une situation tempérée. Les cumuls annuels des stations de référence proches des sites de mesure (<30 km) sont les suivants (normales 1971-2000) :

- Outre-Forêt, station d'Entzheim : 633 mm,
- Sundgau, Bâle-Mulhouse : 729 mm.

La répartition mensuelle des précipitations montre une relative homogénéité au cours de l'année avec un léger déficit de janvier à avril (figure 2.9).

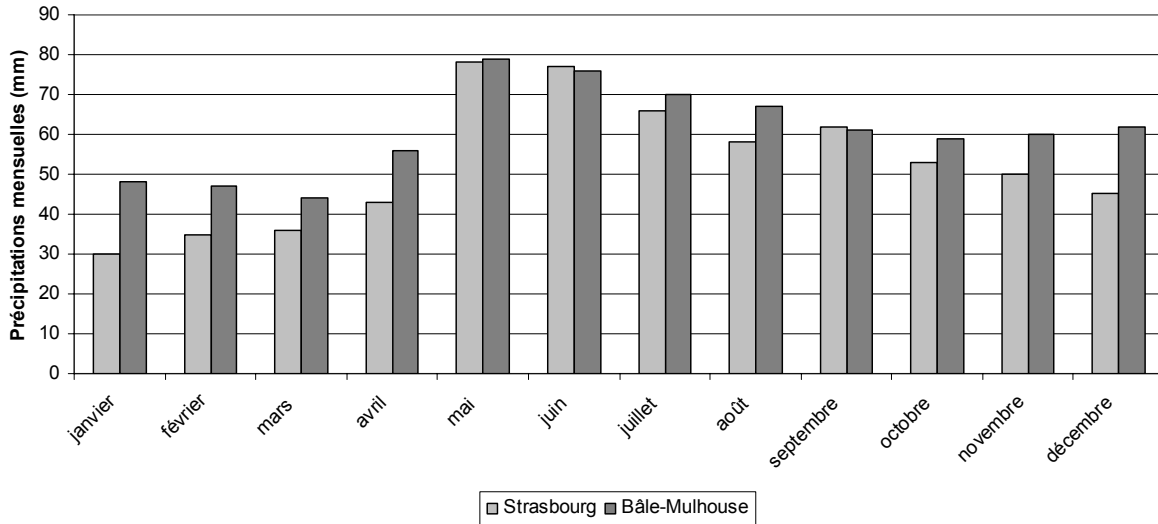


Figure 2.9 – Pluviométrie mensuelle des sites de références du Sundgau et de l'Outre-Forêt (Normales calculées sur la période 1971-2000)

Le caractère continental se traduit également par la présence d'orage au cours de l'année et particulièrement de mai à septembre (figure 2.10). Ces orages constituent les facteurs déclenchants de i) la dégradation structurale de la surface ; ii) la formation du ruissellement et des inondations boueuses. Les intensités mesurées sont en moyenne de 40 mm/h et de 100 mm/h en pointe (Auzet *et al.*, 2005a; Van Dijk *et al.*, 2005).

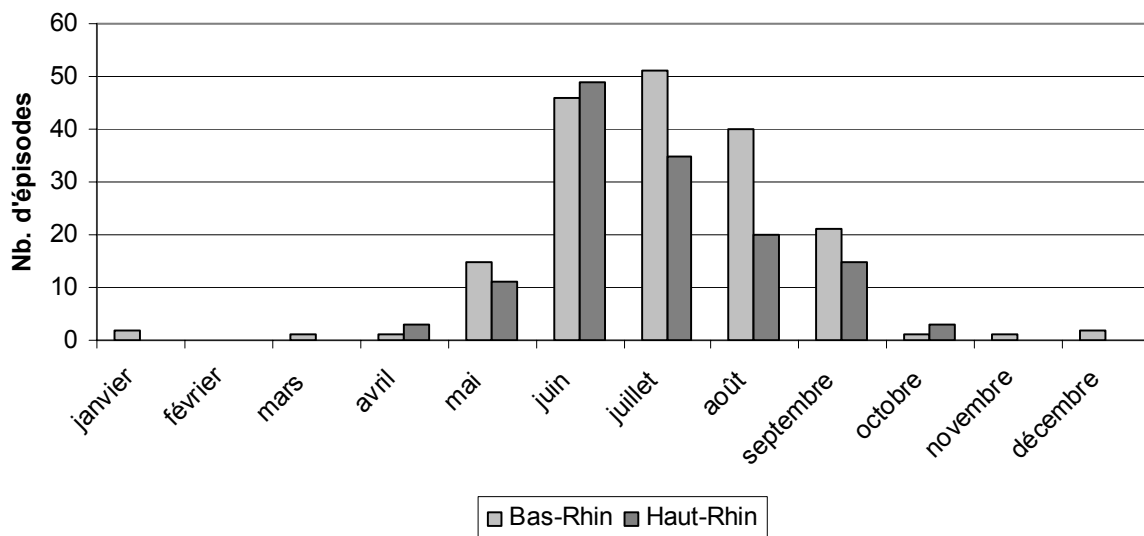


Figure 2.10 – Distribution mensuelle des précipitations supérieures à 15 mm sur une durée d'une heure (source : Météo France pour l'ARAA) Période 1968-2007

2.3. Évolution des paysages agricoles et impacts sur les inondations boueuses

L'occupation du sol des petits bassins versants agricoles s'est trouvée modifiée au cours du siècle dernier. L'exemple de la commune de Rixheim (Sundgau), étudié par Flota (2003), en est tout à fait représentatif (figure 2.11).

Au XIX^{ème} siècle, la commune était entourée d'un cordon de jardins, puis d'une « ceinture verte » composée de prairies et de vergers. Ces secteurs constituaient alors des zones de dépôt des inondations boueuses, protégeant ainsi les habitations.

Suite à la pression périurbaine, le village s'est développé dans des zones délaissées, car perçues jusqu'alors comme des zones de circulation des inondations (fonds de talwegs et exutoires de bassins versants). L'extension des communes s'est alors réalisée sur des zones à risque, soulignant le **manque de prise de conscience** des nouvelles populations face au risque d'inondation boueuse.

La vigne a connu un déclin important avec l'arrivée de machines agricoles plus performantes et à même de cultiver des terrains en pente forte. Enfin, même si la délimitation des parcelles n'apparaît pas sur les cartes, le morcellement des parcelles de vigne suggère un parcellaire très fragmenté en 1890, favorisant une diversification certaine du milieu, constituant autant d'obstacles à la formation et à la concentration du ruissellement. En 1956, l'essentiel du bassin est occupé par les grandes cultures et prairies, impliquant une plus **faible diversité du territoire agricole**.

Plus récemment, les données du Recensement Général Agricole (figure 2.12), montrent la **prévalence du maïs** sur les autres cultures. Cette évolution est liée à différents facteurs :

- Les exploitants ont été encouragés par les primes de la PAC ainsi que le choix de la Région Alsace de se doter des industries de transformation adaptées (les industries agroalimentaires sont le deuxième employeur régional (21 800 emplois en 2006) ;
- Le climat chaud et suffisamment humide permet la culture du maïs sans irrigation dans les secteurs de collines limoneuses. Party (2001) estime la réserve utile des sols à 160 mm à 200mm pour un enracinement jusqu'à 100 cm.

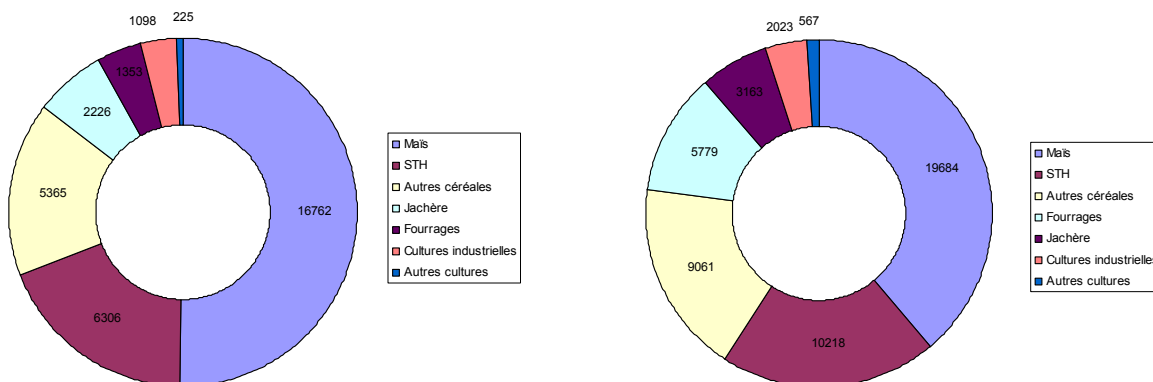


Figure 2.12 — Occupation des terres agricoles (valeurs exprimées en hectares) – Agreste 2000 (gauche : Outre-Forêt, droite : Sundgau)

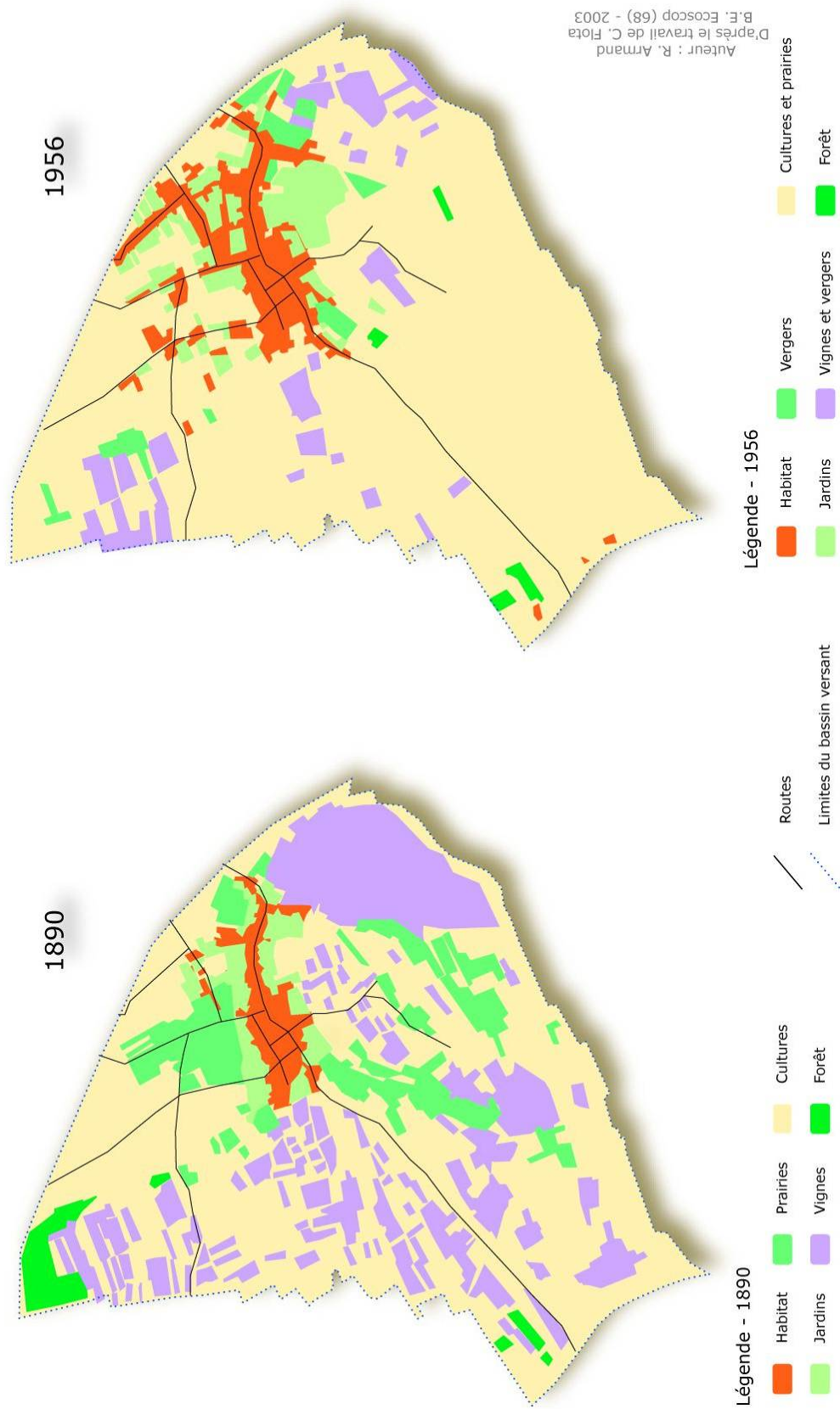


Figure 2.11 — Les mutations de l'occupation du sol dans les bassins versants agricoles
L'exemple de Rixheim (Haut-Rhin)

2.4. Synthèse des facteurs impliqués dans la formation du ruissellement

En Alsace, la formation du ruissellement sur les terres cultivées est un phénomène se manifestant essentiellement au printemps. Ce phénomène résulte de plusieurs facteurs résumés sur la figure 2.13 :

- des sols développés sur des formations loessiques et sensibles à la battance ;
- une période orageuse s'étendant de mai à juillet ;
- une orientation des cultures axée sur les cultures de printemps, essentiellement la monoculture de maïs, laissant les sols à nu lors de la période orageuse.

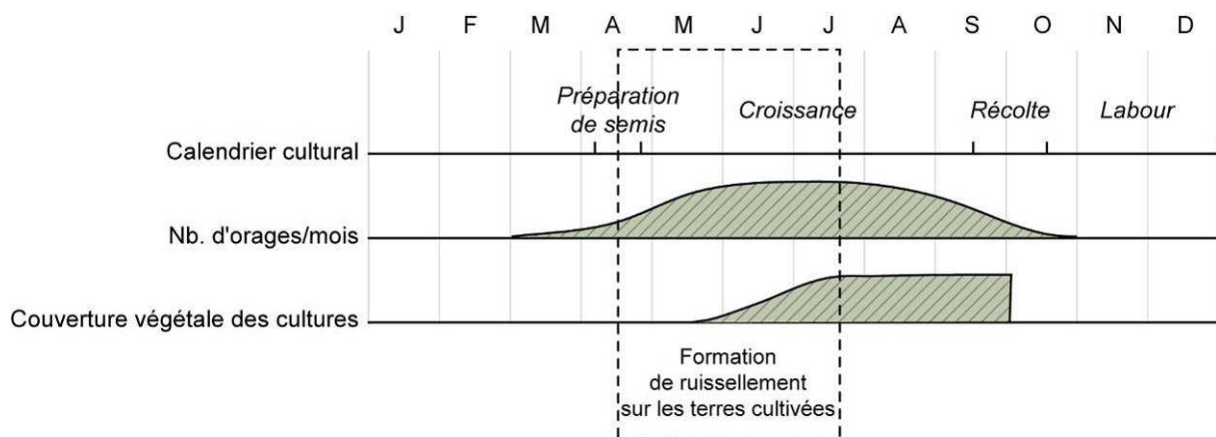


Figure 2.13 – Synthèse des facteurs entrant en jeu dans la formation du ruissellement sur les secteurs d'études

Notre travail se focalisera donc sur cette période à risque.

3. Présentation des sites de suivis

3.1. Choix des sites

Les suivis ont été réalisés sur **quatre sites** (tableau 2.1) répartis dans des secteurs de **collines limoneuses**. Trois sites sont situés dans le Sundgau et sont distants de moins de 10 km : Kappelen, Landser et Geispitzen. Le quatrième site est situé dans l'Outre-Forêt (Bas-Rhin), il est localisé à Neewiller-Près-Lauterbourg. Il s'agit de sites d'essais TSL gérés par les Chambres d'Agriculture départementales (Landser, Kappelen et Neewiller-Près-Lauterbourg) et par l'institut technique ARVALIS⁶ (Geispitzen). Ces sites visent à étudier les performances économiques (rendement, levée), sanitaires et environnementales (transfert de substances actives par ruissellement) de parcelles en **monoculture de maïs grain (sans recours à l'irrigation)**. L'utilisation des TSL sur ces sites reste relativement récente (moins de cinq ans lors des mesures). Les trois sites des Chambres d'Agriculture

⁶ Ex Institut Technique des Céréales et des Fourrages

sont conçus selon le même concept : une parcelle, mise à disposition par un exploitant, est divisée en plusieurs bandes travaillée avec des techniques culturales différentes. Ces sites présentent l'avantage de réunir un nombre important de pratiques culturales sur une surface réduite avec pour conséquence une faible variation texturale intra-site. Les suivis réalisés dans le cadre de ce travail (observation d'EDS et mesure de ruissellement) sont donc complémentaires aux objectifs initiaux de ces sites.

Le site de **Geispitzen** est un site pilote géré par ARVALIS. Il est composé de 3 parcelles de 2,5 ha présentant une pente de 4-6%. Les parcelles sont toutes équipées de dispositifs de mesure du débit à l'exutoire de parcelle et d'un préleveur automatique en vue d'analyses telles que la concentration en matières en suspension et en phytosanitaires. Trois modalités sont testées chaque année :

- un témoin travaillé en système conventionnel (labour),
- une parcelle travaillée en système conventionnel équipée d'une bande enherbée en pied de parcelle,
- une parcelle travaillée en TSL sans bande enherbée.

Ces sites ont également été concernés par des **inondations boueuses** causées par des orages :

- Landser a connu un épisode important en mai 2001. Un orage (lame d'eau : 32mm, durée : 20 minutes) s'est abattu sur le bassin versant en amont de la commune. Les dépôts de terre mesurés dans les parcelles (dimensions des motifs d'érosion linéaire) atteignaient 35t/ha (Van Dijk *et al.*, 2005).
- Neewiller-Près-Lauterbourg a été touché à 5 reprises sur la période 1993-2005. A ce titre, il s'agit d'une des communes les plus affectées par les inondations boueuses dans le Bas-Rhin (Auzet *et al.*, 2005a).
- Kappelen a été touché par un épisode violent en mai 2003 (lame précipitée : 51mm, durée : 40 mn environ).

3.2. Caractéristiques pédologiques et agronomiques des sites

Malgré leur éloignement (150 km environ), ces sites présentent des similitudes sur les plans géomorphologiques, pédologiques et agricoles. Les différents sols des sites se sont développés sur des **loess datant du Würm**. Ces sols sont caractérisés par une texture de surface limoneuse (>75%) relativement constante sur l'ensemble des sites (tableau 2.1). Selon (Party, 2001; Party, 2003), il s'agit de sols bruns calcaires sur loess.

En revanche, la teneur en argile varie selon les sites. Les valeurs les plus faibles sont constatées à Landser et Neewiller (10% environ), ce qui diminue la stabilité structurale de ces sols. Les teneurs sont plus élevées à Geispitzen (18%) et à Kappelen (27%). Kappelen avait été retenu⁷ par la Chambre d'Agriculture du Haut-Rhin en raison de la présence des deux types de sols les plus courants du secteur : les « limons blancs » pauvres en argiles (12%), et les « limons bruns » plus stables (27%

⁷ Suite à la présence de chrysomèle durant la saison 2003, qui interdisait la culture de maïs pendant 3 ans, la plate-forme d'essai de la CA68 a été déplacée à Landser.

argiles). Les teneurs en matières organiques sont également faibles (< 3%). Ces caractéristiques classent ces sols dans la classe 5 de stabilité structurale (INRA Avignon), c'est-à-dire dans les **sols très instables** (limons >45% ; argiles <17%).

Les sols sont assez **profonds** (100-150 cm) et **drainants** (Party, 2001; Party, 2003). Aucun signe d'hydromorphie n'a été constaté dans les fosses réalisées dans le cadre des mesures de ruissellement. Leur réserve utile est importante (160-200 mm pour un enracinement de 80 à 100 cm) et permet la culture du maïs sans recourir à l'irrigation. Cependant, Party (2001) souligne que la réserve utile peut connaître des difficultés de recharge suite au développement des croûtes de battance.

Tableau 2.1 – Caractéristiques pédologiques et agronomiques des sites d'études

		Kappelen	Geispitzen	Landser	Neewiller
Géographie	Altitude (m)	307	305	270	155
	Surface en amont (ha)	225	41	450	150
	Surface du BV (ha)	5240	6500	6500	2300
	Cours d'eau	Altebach	Weiherbachgraben	Weiherbachgraben	Kabach
Caractéristiques de la parcelle d'essai*	Surface (ha)	4	3 x 2,5	5,5	2
	Pente (%)	4	4-6	6-8	6-8
	Argiles (% moy. et σ)	12-27**	15,8 (5,1)	11,7 (4,2)	10,3 (2,0)
	Limons (% moy. et σ)	62-82	75,7 (3,4)	76,2 (3,3)	74,7 (3,7)
	Sables (% moy. et σ)	3-5	8,5 (5,1)	11,9 (3,7)	15,0 (4,1)
	Matière organique	1,1-2,2	1,5 (1,0)	2,1 (0,1)	2,0 (0,4)
Caractéristiques agronomiques	Nb. pratiques testées	8	2	8	7
	Date début TSL	2001	2002	2002	2002
	Exploitant	GAEC du Talmatt	D. Schneider	F. Tischmacher	G. Heintz
	Organisme	CA68	ARVALIS	CA68	CA67

* Les données granulométriques et de MO concernent l'horizon 0-5 cm.

**Seules deux analyses réalisées par la Chambre d'Agriculture du Haut-Rhin sont disponibles

L'ensemble des sites est cultivé en monoculture de maïs grain. Le travail du sol et le semis se font dans le sens de la pente. Les résidus de culture sont constitués des cannes de maïs qui font l'objet d'un broyage spécifique, à l'exception de Neewiller et de Landser (dans le cadre d'un essai ponctuel sur l'effet du broyage des résidus sur la concentration en mycotoxines). Dans chaque site, le témoin est un labour d'hiver complété par une reprise de semis dans les deux semaines précédant le semis. Ce dernier intervient entre le 20 avril et le 5 mai. La gamme des pratiques testées est importante et comprend différents types de TSL (pseudo-labour, travail de surface, décompactage) ainsi que du semis-direct (tableau 2.2).

Tableau 2.2 – Les pratiques culturales retenues

Site	Outil utilisé	Classif. ADEME	Prof. (cm)	Période de passage	Outil reprise
Neewiller	Charrue	Labour	20	janvier	vibroculteur
	Déchaumeur	Travail de surface	15	avril	aucun
	Décompacteur (2005)	Décompactage	25	avril	aucun
	Semis direct	Semis-direct	0	semis	aucun
Landser	Charrue	Labour	30	novembre-décembre	vibroculteur
	Charrue (2005)	Labour	30	avril	vibrocult. + herse rotative
	Charrue Express Perrein	Pseudo-labour	25	novembre-décembre	vibroculteur
	Cover-crop + décompacteur	Décompactage	40	février-mars	vibroculteur
Geispitzen	Charrue	Labour	30	décembre-janvier	vibroculteur
	Chisel	Pseudo-labour	20	décembre-février	vibroculteur
Kappelen	Charrue	Labour	25	décembre-janvier	vibroculteur
	Labour de printemps	Labour	25	mars	vibroculteur
	Semis direct sous blé	Semis direct	0	semis	aucun
	Chisel	Pseudo-labour	20	décembre-janvier	vibroculteur
	Charrue express perrein	Pseudo-labour	20	décembre-janvier	vibroculteur
	Semis direct sous blé	Semis direct	0	semis	aucun
	Disc-o-mulch	Travail de surface	10	avril	herse rotative
	Ameublisseur	Décompactage	40	avril	herse rotative

L'ensemble de ces sites fournit des situations agronomiques variées qui seront exploitées différemment en fonction des objectifs présentés lors de la première partie.

4. Méthodes de mesures utilisées

4.1. L'observation des états de surface du sol

4.1.1. Echantillonnage temporel et spatial

Les relevés sont basés sur une observation exhaustive et répétée de la surface dans une période où la dynamique des EDS influence fortement la formation du ruissellement et de l'érosion. Les placettes de suivis sont sélectionnées après le semis, qui constitue l'**état initial** (fin avril, début mai). Les relevés sont ensuite effectués, tous les 20 à 30 mm de pluies cumulées jusqu'à la couverture complète du sol par la végétation en juillet (**état final**). A ce stade, la couverture végétale intercepte les précipitations et diminue l'énergie des gouttes, ce qui a pour effet de stabiliser l'état structural et microtopographique.

Afin de tenir compte de la **structuration spatiale** des EDS par le travail du sol, les relevés sont réalisés sur une surface réduite (40 cm de largeur et 60 cm de long) permettant d'isoler l'EDS des différents motifs : les interrangs, lignes de semis et traces de roue⁸ (figure 2.14). Sur chaque motif, deux placettes d'observations sont définies pour évaluer la variabilité des EDS. En résumé, sur chaque technique culturale étudiée, 6 placettes d'observations d'EDS sont ainsi relevées.

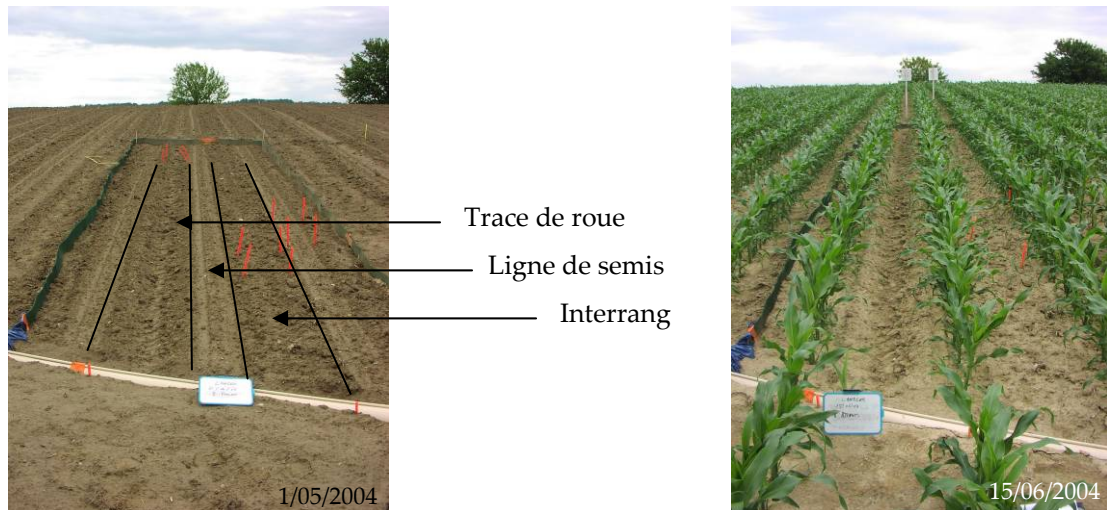


Figure 2.14 – Identification des lignes de semis, traces de roue et interrangs sur la même parcelle expérimentale (Landser) (les piquets rouges correspondent aux placettes de suivi d'EDS)

Les relevés sont ensuite consignés dans une base de données sous Access regroupant également les propriétés physiques et agronomiques des différents sites de mesures.

Le jeu de données sur lequel portent les observations d'EDS est indiqué dans le tableau 2.3. Les jeux de données 2003 et 2004 sont issus de travail de maîtrise et de DESS (Armand (2003; 2004)). Ils sont complétés par les données acquises en 2005 et en 2007.

⁸ Précision apportée suite à la soutenance : la distinction entre trace de roue et interrang nécessite deux approfondissements.

- i) le semis va créer deux unités spatiales : les « lignes de semis » (ou rangs) séparés par les « interrangs ». Parmi ces derniers, certains seront tassés par le passage des engins et d'autres non (notamment en fonction de la largeur du semoir utilisé). De manière rigoureuse, il faudrait distinguer les interrangs affectés – ou non – par une trace de roue.
- ii) L'origine des traces de roue varie selon l'itinéraire technique considéré. En labour et non-labour, les traces de roue résultent du semis, car les traces plus anciennes (chantier de récolte) ont été effacées par le travail du sol. En semis-direct, en l'absence de travail du sol, les traces de roue résultent de la récolte précédente ET du semis. Cependant, dans le cadre des suivis d'EDS en contexte de semis-direct, ces derniers ont été réalisés sur les traces de roue associées aux lignes de semis de l'année en cours. Par ailleurs, les traces de roue sélectionnées n'étaient pas concernées par les passages de pulvérisateurs au cours de la croissance du maïs.

Tableau 2.3 – Jeu de données d'observation d'EDS

Site	Année de suivi	Pratiques suivies*	Nb suivis / motif et / pratique	Nb. observation/saison	Nb. observations
Geispitzen	2003	2 conv. – 1 TSL	3 suivis par motif	4	108
	2007	1 conv. – 1 TSL	15 suivis par motif	5	450
Landser	2004	1 conv. – 2 TSL	2 suivis par motif	5	90
	2005	2 conv. – 2 TSL	2 suivis par motif	5	120
Neewiller	2004	1 conv. – 1 TSL – 1 SD	2 suivis par motif	4	72
	2005	1 conv – 2 TSL – 1 SD	2 suivis par motif	5	120
Kappelen	2003	2 conv – 4 TSL – 2 SD	2 suivis par motif	6	192

* conv. : Technique conventionnelle (Labour) ; TSL : Technique Sans Labour ; SD : semis-direct

Les relevés effectués de 2003 à 2005 sont basés sur deux répétitions par motif et par pratique. Afin de vérifier si deux répétitions suffisent à intégrer la variabilité des EDS et donc de **valider les relevés antérieurs**, une campagne de terrain spécifique a été organisée lors du printemps 2007 sur le site de Geispitzen. L'objectif consistait à **multiplier le nombre de placettes d'observation d'EDS** afin d'avoir une meilleure appréhension de la variabilité des EDS. Les relevés ont porté sur deux parcelles, une en labour et une en TSL (chisel). Sur chacune, 45 placettes de suivis d'EDS ont été sélectionnées selon la répartition suivante (figure 2.15) :

- 3 transects ont été définis, à une distance de 50 m des limites des parcelles, notamment au niveau des fourrières en raison du passage répété des engins. Les transects étaient séparés d'une quinzaine de mètres ;
- sur chaque transect, 5 emplacements distants chacun de 15 m ont été retenus. Sur chaque emplacement, trois suivis d'EDS ont été réalisés (un sur chaque motif cultural).

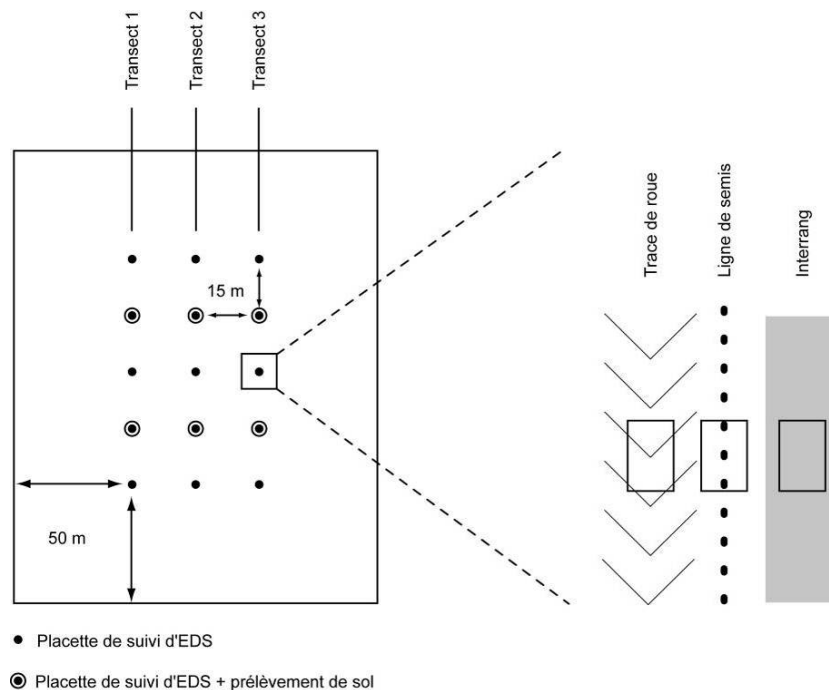


Figure 2.15 – Organisation des relevés d'EDS (campagne 2007)

Nous avons choisi de ne pas retenir la parcelle TSL du site d'ARVALIS car celle-ci présentait cette année un taux de résidus faible (<20%) et surtout une taille des résidus très fine. Le choix s'est reporté sur une parcelle très proche de la parcelle témoin (300 mètres de distance), ce qui permet de limiter les variations des conditions physiques (sols et climat).

4.1.2. Quels sont les descripteurs relevés ?

Le protocole de mesure s'inspire de celui développé dans le cadre du projet de recherches RIDES (Ruissellement, Infiltration et Dynamiques des Etats de Surface ; Auzet (2000)). Les descripteurs relevés sont présentés dans le tableau (2.3) ainsi que la fiche de relevé (fig. 2.16). La marge d'erreur présentée dans le tableau 2.4 est une estimation issue des relevés effectués en commun dans le cadre du doctorat de Bouchra Ali (Ali, 2008). Il s'agit donc de la marge d'erreur intra-observateur.

Tableau 2.4 : Variables relevées lors des suivis d'EDS

Descripteur	Unité de mesure	Marge d'erreur (\pm)	Indicateur de	Détermination
Couverture par les mottes diam. [2 – 20mm[Taux de couverture (%)	5 %	Dégradation structurale	Visuelle
Scellement des mottes diam. [2 – 20mm[Oui/non	-	Dégradation structurale	Visuelle
Couverture par les mottes (diam. > 20mm)	Taux de couverture (%)	5 %	Dégradation structurale	Visuelle
Scellement des mottes (diam. > 20 mm)	Oui/non	-	Dégradation structurale	Visuelle
Diamètre du plus petit élément non scellé	mm	1-5	Dégradation structurale	Visuelle
Scellement des mottes	Oui/non		Dégradation structurale	Visuelle
Croûte structurale	Taux de couverture (%)	5 %	Dégradation structurale	Visuelle + sondage à proximité
Croûte sédimentaire	Taux de couverture (%)	5 %	Présence de ruissellement	Visuelle + sondage à proximité
Résidus végétaux	Taux de couverture (%)	5 %	Interception, infiltration	Visuelle
Végétation en place	Taux de couverture (%)	5 %	Interception	Visuelle
	hauteur (cm)	5-10 cm (selon la hauteur)	Interception	Mesure au mètre
	stade foliaire	0	Interception	Comptage

Hauteur des seuils à franchir moyenne et max. dans le sens du ruissellement	mm	1-10 mm (selon le micro-relief)	Détention superficielle	Visuelle et règle graduée
Hauteur des seuils à franchir moyenne et max. perpendiculairement au ruissellement	mm	1-10 mm (selon le micro-relief)	Détention superficielle	Visuelle et règle graduée
Fentes - Longueur	mm		Infiltration	Mesure au mètre
Fentes largeur moyenne et max.	mm	1 mm	Infiltration	Mesure au mètre
Macropores biologiques	Nombre	1-10 (selon le nombre)	Infiltration	Visuelle

Les descripteurs sont les suivants :

Mottes : les mottes résultent de l'interaction des caractéristiques pédologiques, de l'itinéraire technique retenu (présence d'outils animés, vitesse de rotation) et de l'action du climat (fractionnement des mottes par le gel au cours de l'hiver). Les limites granulométriques retenues permettent de différencier un EDS très fin (diamètre des mottes <2 cm) d'un EDS beaucoup plus grossier (diamètre > 2cm). La présence important de mottes grossières est un facteur ralentissant la fermeture de la surface.

Scellement des mottes et diamètre mini non scellé : les mottes protègent la surface de l'action de la pluie, notamment si leur diamètre est important. La base constitue ainsi une zone préférentielle d'infiltration. Au fil des précipitations, la base de la motte fusionne avec la croûte environnante réduisant ainsi l'infiltration : la motte est dite *scellée*. Sa désagrégation témoigne de différents mécanismes provoquant la séparation des agrégats (splash, éclatement, etc.).

Croûtes structurales : elles sont la conséquence de la dégradation des agrégats par la pluie sous l'action de différents mécanismes (*cf.* chapitre 1). L'identification est visuelle et complétée par des sondages réalisés à proximité de la placette. Dans le cas d'une croûte structurale, on peut observer des agrégats complets directement sous la croûte.

NB : Dans le cas des TSL, il est difficile de savoir quelle est la nature de la surface sous les résidus végétaux. C'est pourquoi la quantification des zones couvertes par les croûtes n'intègre pas les zones couvertes par les résidus végétaux. Exemple : si une placette est couverte par 30% de résidus de végétaux et qu'une croûte structurale s'est formée sur les zones nues, l'extension des croûtes sédimentaires sera évaluée à 70%. Il en va de même pour l'estimation de la couverture de surface des croûtes sédimentaires.

Croûtes sédimentaires : ce type de croûte succède aux croûtes structurales. Il est la conséquence de la sédimentation de particules au fond des flaques ou de dépôts laissés par le

ruissellement. Ces particules peuvent avoir été arrachées par le ruissellement plus en amont, ou détachées par le splash. Afin de déterminer la nature de la croûte, des sondages sont effectués autour de la placette. L'objectif est de repérer des petits litages de sédiments attestant du dépôt en présence de flaques.

Végétation vivante et résidus végétaux : la couverture par la végétation en place est déterminée en se plaçant directement au-dessus de la placette. La hauteur est également mesurée ainsi que le nombre de feuilles déjà développée.

Hauteur des seuils à franchir : la hauteur des seuils à franchir (HSF) est une estimation visuelle des micro-dénivellations que doit franchir le ruissellement, soit dans le sens d'écoulement du ruissellement (dans notre cas, la pente ; toutes les cultures ayant été travaillées et semées dans le sens de la pente), soit perpendiculairement à son sens d'écoulement. En contexte de TSL, la HSF tient également compte de la présence de résidus végétaux.

Il n'a pas été retenu d'utiliser des dispositifs de mesure de la rugosité (rugosimètre à aiguilles) en raison de la lourdeur des manipulations (les relevés d'EDS étaient effectués seuls). De plus, ce type de dispositif n'est pas adapté aux gammes de rugosité rencontrées (5cm maximum, <2cm en moyenne), conséquence des préparations de semis qui affinent la surface.

Macropores : ils constituent des espaces d'infiltration préférentiels, notamment quand la surface est encroûtée ou au niveau du contact avec le collet. Les *fentes* résultent des périodes de dessiccation. Leur espacement est mesuré afin d'apprécier la densité de la fragmentation. La largeur moyenne et maximale est mesurée au double-décimètre. Les *trous* traduisent l'intensité de l'activité biologique (lombrics). Leur densité est évaluée en faisant un compte total du nombre de trous à ± 2 trous.

4.2. Mesure des précipitations

Le site de Geispitzen dispose d'un pluviomètre électronique géré par ARVALIS. Il dispose d'une précision de 1/10^{ème} de millimètre et enregistre les intensités maximales au pas de temps 6 minutes. Les sites de Landser et de Neewiller étaient équipés de pluviographes mécaniques d'une précision de 1/10^{ème} de millimètre. Le dépouillement effectué à partir des diagrammes permet de calculer l'intensité moyenne de l'épisode pluvieux.

Sur ces trois sites, un pluviomètre totalisateur était également installé afin de vérifier les données recueillies sur les pluviographes ou pluviomètres électroniques et de pallier leurs éventuelles défaillances.

Le site de Kappelen était équipé uniquement d'un pluviomètre totalisateur. Les données d'intensité ne sont donc pas disponibles sur ce site.

Localisation de la microparcelle :

Observateur :

Code microparcelle :

Date :

Conditions hydriques : sec/humide

Sol

mottes	% de la surface totale	scellement : oui - non
[2mm - 2 cm[
≥ 2 cm		
Ø de la plus petite motte non encore scellée :		

Croûtes

	% de la surface totale	distribution/microtopographie
Structurales :		
Transitoires :		
Sédimentaires :		

Végétation

% couverture totale :

→ Dont % couvert par végétaux vivants :

hauteur : cm - nb feuilles :

→ Dont % couvert par les résidus :

contact avec le sol (scellé ou non) :

→ Dont % couvert par les adventices

Ligne de semis : incision au niveau du collet : Oui - Non

Microrelief

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

Hauteur des seuils à franchir dans la direction du ruissellement : médiane :..... max:.....

Profondeur du motif (mm) :

Hauteur des seuils à franchir perpendiculairement : médiane:..... max:.....

Flaques potentielles : diamètre médian :..... hauteur médiane....

Macropores

FENTES (oui – non)	Densité et espacement	Distribution/microtopographie
Larg. moy. :	Larg. Max :	Long. des fentes de largeur > 1 cm :
TROUS (oui – non)	Densité et espacement	Distribution/microtopographie

Remarque :

Figure 2.16 – Fiche de description des EDS

4.3. Collecte de ruissellement sous pluies naturelles

4.3.1. Conception des parcelles expérimentales de collecte de ruissellement

Les parcelles expérimentales sont complémentaires des relevés d'EDS. Il s'agit de mener des observations d'EDS à l'intérieur de ces parcelles tout en collectant le ruissellement et l'érosion émis sur une surface délimitée. Les parcelles ont été installées sur les sites de Landser et Neewiller en 2004 et 2005⁹. Les techniques culturales étudiées correspondent à celles indiquées dans le tableau 2.4.

Ces parcelles expérimentales sont inspirées de celles utilisées par la Chambre d'Agriculture de Seine-Maritime. L'objectif est d'isoler une portion de la parcelle et de collecter le ruissellement émis sous pluies naturelles (figure 2.17). Les dimensions de la parcelle expérimentale sont un compromis entre plusieurs impératifs :

- la longueur de pente doit être suffisante pour intégrer l'ensemble des processus érosifs,
- la structuration spatiale liée au travail du sol doit être respectée ;
- la cuve enterrée ne peut excéder les 200 litres (pour des raisons techniques) ;

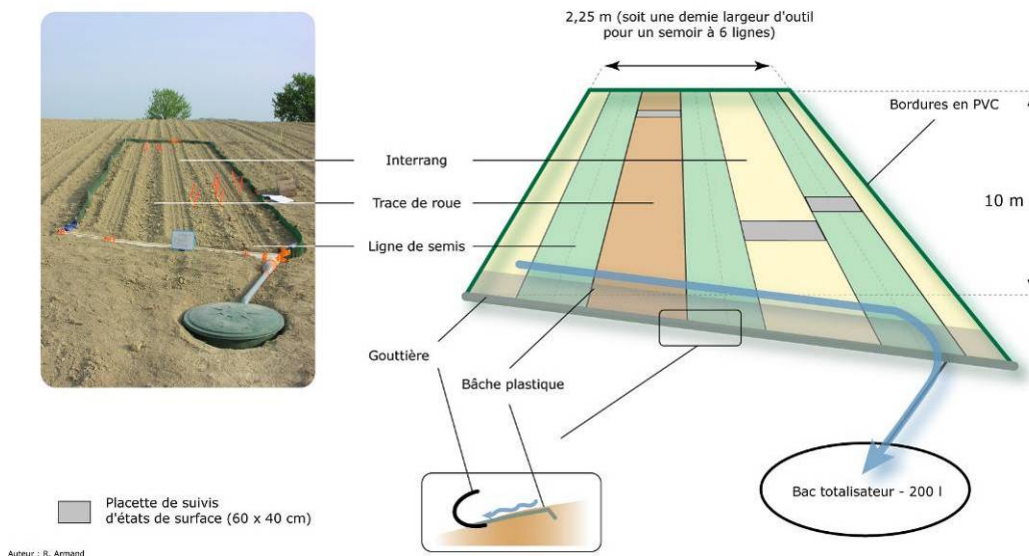


Figure 2.17 – Parcelle expérimentale de mesure du ruissellement

Les parcelles expérimentales mesurent 10 mètres de long, distance suffisante selon Le Bissonnais (1998) et Chaplot et Le Bissonnais (2000) pour intégrer l'ensemble des processus érosifs (érosion concentrée notamment). La largeur des parcelles correspond à une demi-largeur d'outil soit 2.25 m. Les semoirs utilisés étant de type 6 rangs, **les parcelles expérimentales présentent la même**

⁹ Initialement, le site de Geispitzen devait être équipé de 6 parcelles expérimentales en 2006. Cependant, la présence importante d'eau en subsurface (sans trace visible d'hydromorphie lors de l'ouverture des fosses) a contraint à l'abandon du site. Le ruissellement remplissait la fosse où se situe la cuve. La cuve avait alors tendance à flotter et présentait une contre-pente empêchant ainsi la collecte du ruissellement.

proposition de surface que la parcelle dans son ensemble : soit 2 interrangs (largeur mesurée = 50 cm), 3 lignes de semis (largeur mesurée = 25 cm) et 1 trace de roue (largeur mesurée = 50 cm). De la sorte, la proportion de surface occupée par chaque motif correspond à :

- 33%, pour les lignes de semis ;
- 44% pour les interrangs ;
- 22% pour les traces de roue.

Pour tenir compte de la variabilité des volumes ruisselés et érodés, **les pratiques culturales étudiées sont équipées de deux parcelles expérimentales**. Sur chaque parcelle expérimentale, trois relevés d'EDS sont effectués (un par motif cultural).

Le ruissellement est collecté dans une gouttière qui achemine l'eau vers une cuve enterrée de 200 litres. Afin d'éviter l'infiltration devant la gouttière, un film plastique d'une cinquantaine de centimètres de large est fixé à l'intérieur de la gouttière et est enterré dans la zone située en amont de la gouttière. La face ouverture de la gouttière est orientée de telle manière à regarder l'amont de la parcelle. Malgré ces précautions, le ruissellement formé dans la gouttière peut induire une erreur de 1.6% de la mesure (la gouttière présente une surface de 0.35 m²).

Les parcelles expérimentales sont installées après le semis sur des emplacements ne gênant pas les traitements par pulvérisation et épandage d'azote. Ceci signifie que les traces de roue ne seront pas tassées par le passage des engins pendant la croissance du maïs. Les placettes sont démontées durant le mois de Juillet, quand la couverture de la végétation est maximale.

Application du dispositif à l'échelle du motif

En 2005, des parcelles expérimentales de collecte du ruissellement de surface restreinte (50 cm de large sur 10m de long) complétaient le dispositif précédent (figure 2.18). Il s'agissait d'associer l'observation des EDS et le ruissellement généré à l'échelle des motifs (interrang, ligne de semis et trace de roue). Ces mesures ont été effectuées sur le site de Landser sur deux pratiques culturales : le labour et la charrue Perrein (TSL).



Figure 2.18 – Mesure de ruissellement à l'échelle du motif

La mesure est réalisée sous pluies naturelles, le ruissellement est collecté puis dirigé vers une cuve enterrée (80 l). A la différence des parcelles expérimentales de 22 m², seul l'amont de la parcelle de mesure était délimité par une bordure en PVC. Les flancs des parcelles ont été laissés libres car l'implantation d'une bordure aurait considérablement modifié la structure du sol. Ceci aurait pu conduire à des erreurs de mesure car la largeur de mesure aurait été très restreinte (75 cm). A l'aval des parcelles, une butée en terre était recouverte d'une bâche plastique afin de canaliser le ruissellement vers la cuve de collecte.

Néanmoins, ces mesures ont été abandonnées suite à des problèmes techniques : le dispositif canalisant le ruissellement vers la cuve était trop fragile et de nombreuses fuites ont été constatées. Un seul épisode a été enregistré correctement (aucune trace de fuite de ruissellement).

4.3.2. Protocole d'échantillonnage du ruissellement

En raison des volumes ruisselés importants (200 litres au maximum), seule une quantité du ruissellement sera prélevée en vue de réaliser la pesée des matières en suspension (MES) au laboratoire.

La mesure de la lame d'eau ruisselée est réalisée en champ grâce à des cuves et des allonges graduées. Le prélèvement des MES varie en fonction du volume ruisselé. Si le volume n'excède pas 20 litres, la totalité est prélevée puis analysée au laboratoire. Si le volume ruisselé est plus important, seule une partie du ruissellement est prélevée, à hauteur de 20 litres pour une gamme de 20 à 100 litres de ruissellement ; 40 litres pour une gamme de 100 litres à 200 litres de ruissellement. Dans les deux cas, le ruissellement est brassé dans la cuve de collecte pour mettre les sédiments en suspension. Immédiatement après le brassage, la moitié du volume est prélevée et versée dans la cuve graduée. Ensuite, 20 litres sont prélevés en plusieurs fois, en brassant systématiquement avant le prélèvement. Puis la mesure est répétée sur la seconde moitié du ruissellement présent dans la cuve de collecte.

Les échantillons sont ensuite mis à décanter en présence de chlorure de calcium (CaCl₂) afin de provoquer la floculation des MES. L'eau claire est aspirée et la boue résiduelle mise à l'étuve à 105°C pendant 48h avant de procéder à la pesée.

4.4. Propagation du ruissellement

4.4.1. Protocole expérimental

Les dispositifs précédents permettent d'étudier comment l'état de la surface peut jouer sur la formation du ruissellement. Pour compléter ces informations, on cherche à observer de quelle manière les EDS influencent la propagation du ruissellement une fois qu'il s'est formé. Cette information est importante, notamment à l'échelle du motif cultural car elle permet de nuancer les résultats acquis grâce aux dispositifs précédents. L'objectif de ce dispositif est d'étudier si certains motifs ont une

aptitude à propager le ruissellement plus importante que d'autres, en raison de caractéristiques d'EDS particulières. De telles conclusions permettraient d'identifier des motifs ayant un rôle de collecte et d'acheminement du ruissellement vers l'aval.

Le dispositif est identique à celui utilisé dans le cadre du programme européen SOWAP¹⁰. Ce dispositif simule le cas d'un ruissellement déjà formé qui se propage. La distance parcourue est ensuite mesurée : une distance courte indiquant un parcours discontinu et une réinfiltration rapide ; une distance plus longue, un EDS continu et à l'infiltrabilité limitée. La distance parcourue dépend donc de **l'infiltrabilité de la surface mais également du microrelief** qui peut ralentir et/ou stocker le ruissellement. Ce dispositif ne peut fournir des valeurs absolues de propriétés hydrodynamiques (infiltrabilité, par ex.), mais **permet de comparer des situations différentes** (ici, des pratiques culturales). Ces mesures ont été réalisées lors du printemps 2007, sur deux parcelles : un témoin en labour conventionnel et une parcelle travaillée en chisel (TSL de type pseudo-labour).

Le ruissellement est obtenu grâce à une lame d'eau déversée à flux constant (60 litres en 30 minutes) sur une surface sèche d'une largeur de 50 cm ce qui correspond à une lame d'eau ruisselée de 120 mm. Il s'agit d'une valeur élevée destinée à mettre en valeur les différences d'EDS. Le ruissellement est généré par une rampe maintenue à l'horizontale et équipée de 4 trous (figure 2.19). Pour éviter que les filets d'eau ne tombent directement sur la surface et ne creusent le sol (ce qui fausserait la mesure) l'eau est déversée sur une lame en inox. Le débit est vérifié toutes les cinq minutes sur les deux trous situés aux extrémités et est ajusté en conséquence. La mesure prend fin après 30 minutes (figure 2.20).

Les expérimentations ont été réalisées à 3 stades pluviométriques (en pluies cumulées depuis le semis) :

- 0 mm : il s'agit de l'état correspondant au semis, aucune pluies n'ayant dégradé la surface ;
- 67 mm : à ce stade les croûtes structurales sont bien développées ;
- 120 mm : ce stade est caractérisé par la formation localisée de croûtes sédimentaires. Dans l'idéal, nous souhaitons retarder cette mesure en vue d'obtenir des croûtes sédimentaires plus étendues. Cependant, la croissance du maïs rendait difficile les manutentions dans la parcelle et les expérimentations ont été réalisées à ce stade pluviométrique.

Trois répétitions ont été effectuées par motif cultural. Pour ce faire, une fois la pluviométrie désirée atteinte, les surfaces ont été bâchées de manière à conserver les EDS stables en attendant de réaliser les expérimentations. Dans le cas des expérimentations menées au stade 0 mm, seules deux répétitions ont été réalisées, un orage ayant soulevé une partie des bâches et dégradé la surface.

¹⁰ Soil and Water Protection. (SOWAP, 2006)

Avant de procéder au déversement proprement dit, une observation d'état de surface est réalisée. A cette occasion, le nombre de variables relevées a été réduit afin de diminuer le temps d'observation. Les variables utilisées étaient :

- la couverture par les mottes supérieures à 2 cm ;
- l'extension des croûtes structurales et sédimentaires ;
- la couverture par la végétation en place et les résidus végétaux ;
- la hauteur moyenne des seuils à franchir dans la direction du ruissellement ;

Un prélèvement de surface (0-5 cm) est ensuite effectué pour déterminer l'humidité initiale a par la méthode gravimétrique. L'échantillon est prélevé à la pelle à main puis pesé immédiatement grâce à une balance de terrain. L'échantillon est ensuite pesé après un passage de 48h à l'étuve (105°C).



Figure 2.19 – Dispositif générant la lame d'eau ruisselée



Figure 2.20 – Mesure de la distance parcourue par le ruissellement

4.5. Effet des résidus végétaux sur le ruissellement

La simulation de pluie (figure 2.21) a été retenue afin d'étudier l'effet de variabilité spatiale des EDS sur les volumes ruisselés à petite échelle (<1 m²). Il s'agit de reproduire le même épisode pluvieux sur des placettes où le taux de couverture de surface par les résidus végétaux est identique (30%), mais qui diffèrent par leur organisation spatiale et la taille des résidus. La démarche est de type topologique et vise à vérifier **si les résidus végétaux sont des zones d'infiltration préférentielle**. Les simulations ont été réalisées à un stade dégradé par les précipitations (109 mm depuis le semis) quand les placettes présentent un fort développement des croûtes structurales. Les surfaces sélectionnées ont été bâchées au préalable pour que l'ensemble des placettes aient reçu des précipitations identiques avant les simulations.

Nous souhaitons également réaliser des simulations sur des surfaces présentant des croûtes sédimentaires, *i.e.* les surfaces supposées être les plus ruisselantes. Mais la lourdeur du dispositif de simulation, les conditions météorologiques, et la croissance du maïs ont considérablement réduit les périodes propices aux expérimentations. Nous avons été contraints de nous focaliser sur des conditions de surface marquées par les croûtes structurales.

Pour ce faire, des placettes de 0.5 m² (0,5m de largeur x 1m de longueur) ont été sélectionnées sur les interrangs du site de Landser au printemps 2006 et 5 types de répartition des résidus ont été testées (figure 2.22). Pour chaque répartition, deux répétitions ont été réalisées. Afin de tester l'effet de la **taille des résidus** sur le ruissellement, la comparaison portait des placettes où le broyage des résidus était réalisé « sous bec » lors de la récolte (résidus grossier) et des placettes où les résidus avaient fait l'objet d'un broyage spécifique après récolte ce qui provoque leur fragmentation. Les **variations de répartition des résidus** ont été obtenues sans déplacer les résidus (ce qui aurait modifié leur imbrication avec la surface), mais en sélectionnant des placettes où l'organisation des résidus correspondait aux répartitions à tester.



Figure 2.21- Placette de mesure du ruissellement et simulateur de pluie

Le simulateur de pluie utilisé est identique à celui de l'équipe du LTHE à Grenoble. Il est composé d'une buse fixe (Spraying System ¼ HH SQ) située à 3 mètres de hauteur et d'un système de bâches évitant la dérive due au vent. Le simulateur a été réglé afin de produire une pluie de 35 mm/h pendant 30 minutes. La taille des placettes (0.5 m²) a été choisie pour conserver une répartition de la pluie la plus homogène possible sur la surface expérimentale. Le ruissellement était mesuré toutes les deux minutes puis échantillonné à hauteur de 125 ml pour quantifier les MES en laboratoire. Compte-tenu de la faible surface des placettes, les valeurs érodées ne sont qu'indicatives.

	Pratique culturales	Broyage spécifique	Distribution du mulch
1	Labour	Non	absence
2	Charrue Express Perrein	Non	aléatoire
3	Charrue Express Perrein	Oui	aléatoire
4	Sous soleuse Lely ¹¹	Oui	à l'amont
5	Sous soleuse Lely	Oui	à l'aval

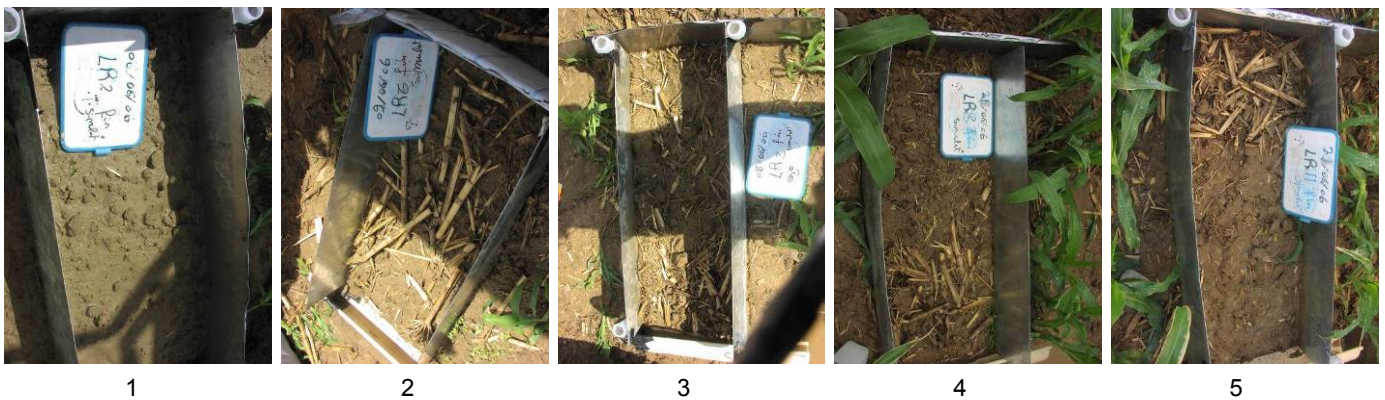


Figure 2.22 – Répartitions des résidus testées dans le cadre des simulations de pluie (photos prises après la simulation)

¹¹ Pour des raisons de places disponibles sur les parcelles d'essais, il n'était pas possible de tester les répartitions 4 et 5 sur la modalité travaillée avec la charrue Perrein express.

Conclusion

En Alsace, le ruissellement généré sur les terres cultivées est un processus survenant essentiellement au printemps. Les secteurs affectés sont des collines limoneuses où la majorité de l'espace agricole est occupé par les cultures de printemps, et parmi celles-ci, la monoculture de maïs. Le ruissellement résulte d'orages se formation de la mi-avril à la fin du mois de juillet et dont les précipitations tombent sur un sol sensible à la battance et pas ou peu couvert par la végétation en place. Les conditions pédologiques et climatiques favorisent la formation du ruissellement, mais ses impacts sont amplifiés par les modifications qu'ont connu les espaces agricoles ainsi que la forte poussée périurbaine. Ces secteurs sont, avec le piémont vosgien, fréquemment touchés par des inondations boueuses au cours du printemps.

Quatre sites d'études ont été sélectionnés dans ces secteurs de collines limoneuses. Chacun regroupe un panel de techniques culturales variées et associe technique conventionnelle, TSL et semis-direct.

Les états de surface seront relevés par observation depuis le semis jusqu'à la couverture complète par la végétation en place (mi-juillet). Pour chaque technique culturale, 6 placettes d'observation de surface ont été sélectionnées : 2 sur l'interrang, 2 sur la ligne de semis et 2 sur la trace de roue.

Ces observations d'EDS sont couplées à des mesures de ruissellement et d'érosion sous pluies naturelles et simulées. Quatre types d'expérimentations sont présents :

- des parcelles expérimentales de 22m² sous pluies naturelles pour analyser la relation EDS/ruissellement ;
- des parcelles expérimentales de collecte du ruissellement à l'échelle du motif complètent le dispositif précédent ;
- des mesures de propagation du ruissellement à l'échelle du motif ;
- des simulations de pluies à échelle locale (0.5 m²) pour étudier l'effet de la répartition spatiale des résidus végétaux sur les volumes ruisselés.

Le chapitre suivant présentera les résultats issus des observations de surface.

Chapitre 3

Résultats des campagnes d'observation d'états de surface

Le chapitre précédent a mis en évidence le rôle de la surface sur la formation du ruissellement, notamment en contexte limoneux où les croûtes de battance diminuent l'infiltrabilité de manière importante. La surface peut être appréhendée par le biais des **états de surface du sol (EDS) qui désignent l'état structural, microtopographique et hydrique du sol** résultant des interactions entre sol, climat et pratiques culturales. Ils constituent des facteurs explicatifs essentiels de la formation du ruissellement (interception, diminution de l'infiltrabilité, rétention superficielle).

De nombreuses études ont cherché à préciser le lien entre pratiques culturales, climat et sol (Boiffin et Papy, 1988; Bresson et Boiffin, 1990; Martin, 1997; Cerdan *et al.*, 2002a). Ces études ont permis d'utiliser les EDS à des fins prédictives (modélisation à base d'expert, comme dans le modèle STREAM (Cerdan *et al.*, 2002b) mais elles portent essentiellement sur les pratiques agricoles conventionnelles.

Ces constatations ont conduit à réaliser des suivis d'EDS sur des sites d'essais réunissant un panel varié de pratiques comportant labour, Techniques Sans Labour (TSL) et semis-direct. Ces sites sont localisés dans des secteurs de collines limoneuses d'Alsace concernés par une érosion des terres agricoles survenant à la suite d'orages de printemps (*cf.* chapitre 2).

Les suivis menés sur ces sites visent à répondre aux problématiques suivantes :

► **Quelles sont les spécificités des états de surface en contexte de TSL ?**

La majorité des études analysant la relation entre non-labour et ruissellement s'intéresse essentiellement aux propriétés du profil de sol et à leur impact sur l'infiltrabilité. A l'inverse, l'état de la surface est rarement renseigné en non-labour, alors qu'au cours des premières années d'utilisation des TSL, la surface joue un rôle prépondérant sur l'infiltration des pluies. L'observation de la surface en non-labour permettra d'étudier de quelle manière l'EDS peut jouer sur la formation du ruissellement. Cette approche sera complétée au cours de la partie suivante qui présente les mesures de ruissellement sous pluies naturelles.

► **Existe-t-il une variabilité spatiale intraparcellaire des états de surface ?**

Les observations d'EDS sont réalisées sur des parcelles cultivées en monoculture de maïs grain. Les cultures sarclées, comme le maïs, présentent une structuration par le travail du sol en trois grands « motifs » : les interrangs, lignes de semis et trace de roue. La question est de savoir si la variabilité des EDS au sein de ces motifs est inférieure à la variabilité entre les motifs et de déduire si certains motifs présentent un EDS plus apte à ruisseler.

1. Méthode et jeu de données retenus

1.1. Identifier des types d'EDS en utilisant la classification hiérarchique ascendante

Le jeu de données est constitué de nombreuses observations d'EDS recueillies au cours des années 2003, 2004 et 2005. L'objectif est de regrouper les individus (*i.e.* les placettes d'observation de la surface) en fonction de la proximité de leur EDS. Dans cette optique la classification hiérarchique ascendante est retenue car elle permet de **regrouper les individus en fonction de leur similarité**. Il s'agit d'une démarche statistique de nature typologique qui est fréquemment utilisée pour dégager des groupes présentant des caractéristiques homogènes au sein d'une masse de données. Elle a, par ailleurs, été souvent retenue pour l'étude des EDS (Malet *et al.*, 2003; Roth, 2004; Ali, 2008).

1.1.1. Le principe de la classification hiérarchique ascendante

La classification hiérarchique ascendante (CHA) procède par itérations et consiste à agréger les individus en fonction de leur similarité. Cette dernière résulte d'un calcul de **distance entre les différents individus** à regrouper. Dans un premier temps, l'algorithme élabore une matrice des distances entre tous les individus et agrège les deux individus présentant la distance la plus proche pour constituer ainsi un premier ensemble. Dans un second temps, une nouvelle matrice des distances est calculée, le centre gravité du groupe constitué précédemment permettant de calculer sa distance avec les autres individus. Le cycle d'itérations cesse à $n-1$ individus. Lors de la dernière étape, tous les individus sont inclus dans un seul et même groupe.

Les classifications divergent en fonction du type de distance entre les individus et de la méthode d'agrégation utilisées. Dans notre cas, c'est la distance euclidienne et la méthode de Ward (ou méthode de perte minimale d'inertie) qui ont été retenues. Cette méthode d'agrégation, basée sur la variance, cherche à optimiser l'agrégation des individus selon des critères liés à des calculs d'inertie (moyenne du carré des écarts des individus par rapport au centre de gravité du groupe). Elle consiste à choisir à chaque étape **le regroupement de classes tel que l'augmentation de l'inertie intragroupe, soit minimum**. Ainsi, cette méthode offre l'avantage de maximiser la variance intergroupe et de minimiser la variance intragroupe (Lebart *et al.*, 2006).

Les résultats de la classification sont présentés sous forme de dendrogramme. L'observateur détermine le seuil de coupure de l'arbre présentant le meilleur compromis entre nombre de groupe et la distance de Ward : plus celle-ci est élevée, plus la variance intragroupe augmente et plus l'interprétation des regroupements effectués est difficile.

1.1.2. Application au jeu de données

Le jeu de données comporte 1 152 observations. Cependant, il paraît difficile d'opérer la classification sur la totalité du jeu de données (tableau 3.1) car les individus sont présents autant de fois qu'il y a eu de tournées d'observation. Ces derniers sont présents autant de fois qu'il y a eu de tournée d'observation. On se propose donc d'étudier **les deux stades d'EDS les plus opposés** : la *stade initial*, correspondant au semis, et la *stade final* correspondant à l'état le plus dégradé par les précipitations. Le stade initial est supposé très infiltrant (car le travail du sol a fragmenté la surface) et le stade final est supposé très ruisselant en raison de la dégradation structurale. Cette approche permettra de tenir compte des modifications d'EDS qui surviennent au cours de la « période à risque » que constitue le printemps en Alsace.

Dans les deux cas, la CHA sera appliquée sur un jeu de données comportant 143 individus. Le regroupement opéré par la classification, sur la base des EDS, sera comparé au regroupement *a priori* correspondant aux trois types de pratiques (labour, TSL et semis-direct).

Tableau 3.1 – Jeu de données d'observation d'EDS

Site	Année de suivi	Pratiques suivies	Nb suivis / motif et / pratique	Nb. relevées/saison	Nb. observations
Geispitzen	2003	2 conv. – 1 TSL	3 suivis par motif	4	108
	2007	1 conv. – 1 TSL	15 suivis par motif	5	450
Landser	2004	1 conv. – 2 TSL	2 suivis par motif	5	90
	2005	2 conv. – 2 TSL	2 suivis par motif	5	120
Neewiller	2004	1 conv. – 1 TSL – 1 SD	2 suivis par motif	4	72
	2005	1 conv. – 2 TSL – 1 SD	2 suivis par motif	5	120
Kappelen	2003	2 conv. – 4 TSL – 2 SD	2 suivis par motif	6	192

* conv. : Technique conventionnelle (Labour) ; TSL : Technique Sans Labour ; SD : semis-direct

Les variables utilisées dans la CHA sont celles qui sont fréquemment mentionnées dans la littérature, notamment dans la typologie utilisée par Cerdan (2002). Il s'agit de variables faciles à acquérir et qui jouent sur les étapes de formation du ruissellement :

- l'extension des **croûtes structurales et sédimentaires**, qui influe fortement sur la réduction de l'infiltrabilité ;
- la **hauteur moyenne des seuils franchir** (HSF) dans la direction de l'écoulement, qui constitue un indicateur du microrelief et de la détention superficielle de la surface ;
- en contexte de non-labour, la **couverture de surface par les résidus végétaux**, qui joue sur l'interception des précipitations ainsi que l'acheminement du ruissellement vers l'aval ;
- la couverture par **les mottes dont le diamètre est supérieur à 2 cm**, qui permet d'estimer l'affinement réalisé par le travail du sol.

1.2. Caractéristiques pluviométriques des années de suivis

Les cumuls pluviométriques entre le semis et le 15 juillet (date à laquelle le développement du maïs est à son terme) sont compris entre 103.5 et 146.5 mm (tableau 3.2). L'année 2003 a été marquée par une sécheresse importante en juin (figure 3.1). Cette sécheresse a été précédée sur Kappelen d'un épisode violent qui a provoqué des dégâts sur une dizaine de communes aux alentours. En l'absence d'enregistrement en continu des précipitations seule la lame d'eau précipitée est connue (50 mm, sur une durée estimée à ± 45 min).

Les années 2004 et 2005 sont conformes aux moyennes, seul le mois de mai 2004 présente un déficit de précipitation sur Neewiller.

Tableau 3.2 – Cumuls pluviométriques depuis le semis au 15 juillet sur les sites d'observations d'EDS

Site	Cumul (mm)
Kappelen - 2003	146,5
Geispitzen - 2003	115,5
Landser - 2004	143,3
Neewiller - 2004	103,5
Landser - 2005	118,4
Neewiller - 2005	106,9

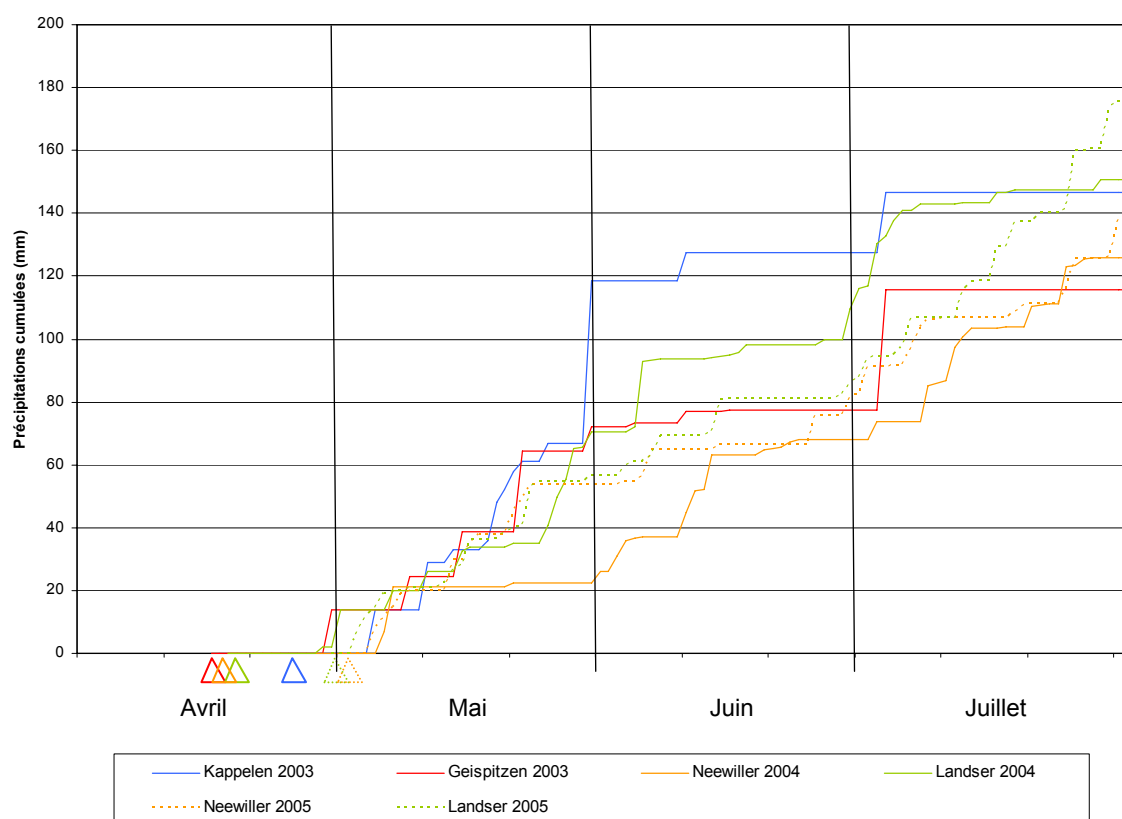


Figure 3.1 – Précipitations cumulées depuis le semis (les triangles indiquent le semis)

1.3. Le cas des TSL : quelle typologie de pratiques retenir ?

L'état de l'art a précisé les différences existant entre les techniques conventionnelles basées sur le labour, les TSL et le semis-direct. Cependant, il existe une grande variété de techniques culturales au sein des TSL. Cette variété s'observe également dans le jeu de données d'observation d'EDS (tableau 3.3). Afin de faciliter les traitements statistiques à venir, la question était savoir s'il fallait opter :

- pour une typologie détaillée, *i.e.* celle utilisée par l'ADEME (2007) qui distingue travail de surface, décompactage et pseudo-labour ;
- une typologie plus simple regroupant toutes les modalités de TSL dans un seul bloc.

Tableau 3.3 – Modalités en TSL disponibles dans le jeu de données d'EDS

Site	Outil utilisé	Classif. ADEME
Neewiller	Déchaumeur	Travail de surface
	Décompacteur (2005)	Décompactage
Landser	Charrue Express Perrein	Pseudo-labour
	Cover-crop + décompacteur	Décompactage
Geispitzen	Chisel	Pseudo-labour
Kappelen	Chisel	Pseudo-labour
	Charrue express perrein	Pseudo-labour
	Disc-o-mulch	Travail de surface
	Ameublisseur	Décompactage

A cette fin, des comparaisons de moyennes (test de Student) ont été réalisées sur les observations réalisées en début de suivi (l'état initial). L'objectif était d'étudier si les EDS des trois populations (travail de surface, décompactage et pseudo-labour) présentaient des différences significatives. Cependant, afin de tenir compte de l'effet du travail du sol sur la surface, **trois jeux de comparaisons ont été effectués afin de différencier l'EDS des interrangs, lignes de semis et traces de roue**. Ces comparaisons portent sur les variables déterminées précédemment (couverture de surface par les croûtes structurales, les mottes >2cm, les résidus végétaux ainsi que la hauteur moyenne des seuils à franchir dans le sens de l'écoulement).

Les résultats des tests t (annexe 3) n'indiquent pas de différence significative (à $p < 0.05$) entre les trois populations de TSL. Aussi, dans la suite de ce travail, **les pratiques culturales seront séparées en trois ensembles : labour, TSL et semis-direct**.

2. A l'état initial, des différences correspondant aux pratiques

A partir des regroupements effectués par la classification (figure 3.2), il est possible de distinguer 3 groupes.

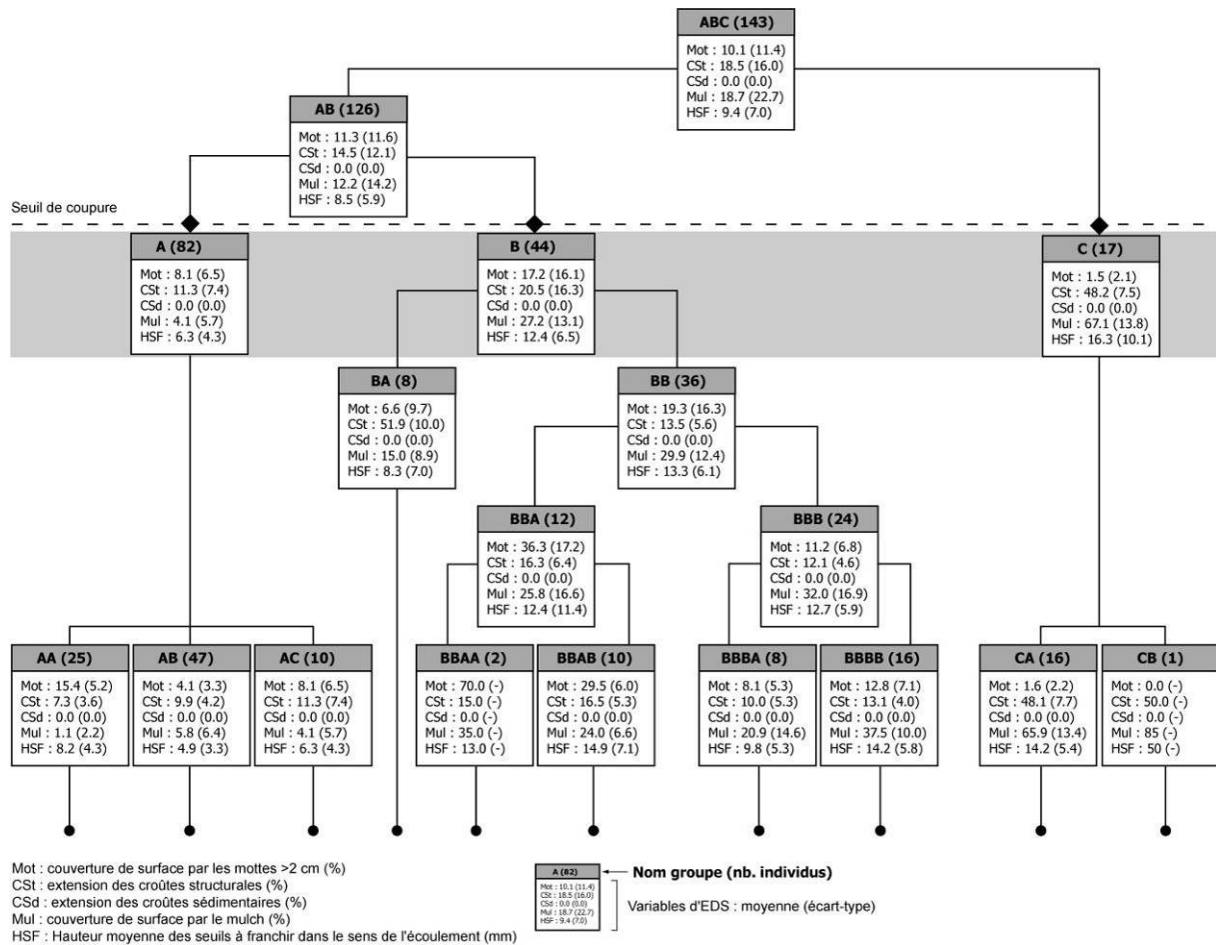


Figure 3.2 – Arbre de classification issu de la CHA sur les EDS initiaux

Le **Groupe A** est le groupe comportant le plus grand nombre d'individus (82). Ces derniers sont caractérisés dans le tableau 3.4 et peuvent être résumés par :

- une quasi-absence des résidus végétaux (< 5%) ;
- un microrelief très faible (<6,3 mm) ;
- un très faible développement des croûtes structurales ;

Ce groupe réunit des individus appartenant à des parcelles travaillées en labour et en TSL (tableau 3.4). Dans le cas du labour, il s'agit indifféremment de lignes de semis, trace de roue et interrang. En revanche, dans le cas des TSL, il s'agit essentiellement de lignes de semis (22 individus sur les 29 en TSL).

Le **Groupe B** est composé de 44 individus présentant les caractéristiques suivantes :

- une couverture en mulch moyenne (27%) mais très variable ($\sigma=13.1$),
- un développement des croûtes structurales très faible (inférieur à 20,5%),
- un microrelief moins élevé que le groupe C (12.4 mm),
- une couverture en motte la plus importante des 3 groupes (17.2%).

Les individus présents dans ce groupe sont majoritairement (38/44) issus de parcelles travaillées en TSL (tableau 3.5). Les observations sont essentiellement réalisées sur des interrangs (25/44) et des traces de roue (13/44).

Le **groupe C** est le dernier à être agrégé. En fonction de la méthode d'agrégation retenue (cf. 1.1.1 de ce chapitre), ceci suggère que les 17 individus qui le composent présentent des caractéristiques très différentes des 2 groupes précédents. Cette hypothèse est confirmée par les caractéristiques suivantes :

- une forte couverture en mulch (67% en moyenne),
- des croûtes structurales déjà en place (environ 50%), alors que le semis vient d'être réalisé,
- la HSF la plus élevée (16 mm),
- une quasi-absence de mottes >2 cm.

Ce groupe est constitué intégralement d'individus travaillés en semis direct (tableau 3.4).

Tableau 3.4 – Caractéristiques des variables d'EDS des 3 groupes définis par la CHA (état initial)

		Groupe A	Groupe B	Groupe C
N		82	44	17
Mottes > 2 cm (%)	Moyenne	8,1	17,2	1,5
	Ecart-type	6,5	16,1	2,1
	Minimum	0,0	0,0	0,0
	Maximum	30,0	80,0	5,0
Croûtes structurales (%)	Moyenne	11,3	20,5	48,2
	Ecart-type	7,4	16,3	7,5
	Minimum	0,0	5,0	35,0
	Maximum	35,0	70,0	60,0
Croûtes sédimentaires (%)	Moyenne	0,0	0,0	0,0
	Ecart-type	0,0	0,0	0,0
	Minimum	0,0	0,0	0,0
	Maximum	0,0	0,0	0,0
Couverture mulch (%)	Moyenne	4,1	27,2	67,1
	Ecart-type	5,7	13,1	13,8
	Minimum	0,0	0,0	40,0
	Maximum	20,0	60,0	90,0
Hauteur seuil à franchir (mm)	Moyenne	6,3	12,4	16,3
	Ecart-type	4,3	6,5	10,1
	Minimum	0,0	3,0	5,0
	Maximum	20,0	25,0	50,0

Tableau 3.5 – Composition des groupes définis par la CHA (état initial)

Groupe A

	Interrang	Ligne de semis	Trace de roue	Total
Labour	19	19	15	53
TSL	2	22	5	29
Semis direct	0	0	0	0
Total	21	41	20	82

Groupe B

	Interrang	Ligne de semis	Trace de roue	Total
Labour	1	1	1	3
TSL	23	3	12	38
Semis direct	1	2	0	3
Total	25	6	13	44

Groupe C

	Interrang	Ligne de semis	Trace de roue	Total
Labour	0	0	0	0
TSL	0	0	0	0
Semis direct	7	6	4	17
Total	7	6	4	17

Le semis-direct est le groupe qui se détache en premier (groupe C), car il présente un EDS singulièrement différent des contextes conventionnels et TSL. Les caractéristiques de surface sont particulières en raison de l'**absence de travail du sol**, les seules opérations culturales étant le semis et la récolte. Ainsi, on note la présence de croûtes structurales alors qu'aucune pluie n'est survenue depuis le semis. Cette croûte est le résultat d'une dégradation structurale de la surface antérieure au semis, c'est-à-dire un héritage des saisons précédentes. L'absence de travail explique également l'absence de mottes, qui se forment suite au travail du sol et se dégradent sous l'effet des agents climatiques (l'alternance gel/dégel en période hivernale, puis les précipitations). On note enfin l'absence de différenciation entre les trois motifs culturaux : en semis direct, les interrangs, lignes de semis et traces de roue sont tous classés dans ce groupe.

Les groupes A et B se distinguent essentiellement sur la couverture en mulch, bien plus importante dans le groupe B. Ce groupe réunit principalement des interrangs et des traces de roue cultivées en TSL. Le fait que les lignes de semis travaillées en TSL soient rattachées au groupe A s'explique par leur faible microrelief et de la quasi absence de couverture en résidus végétaux. A la différence du semis-direct où les résidus sont scellés à la croûte lors de l'état initial ; en TSL, le mulch est libre à la surface. Il peut être écarté de la ligne de semis par les chasses débris situés en tête du semoir lors du semis.

Enfin, on n'observe pas de croûte sédimentaire dans aucun des trois groupes, ce qui, dans le cas des techniques conventionnelles et TSL est lié au travail récent du sol et à l'absence de pluies depuis le semis. Dans le cas du semis-direct, ceci indiquerait une absence de ruissellement au cours des saisons antérieures.

La classification élaborée à partir des EDS initiaux se rapproche de la typologie ADEME puisqu'elle détermine 3 groupes basés sur les 3 types de pratiques culturales. On observe notamment la gradation de la couverture en mulch entre les types de pratiques. Cependant, la classification introduit une nuance puisqu'elle associe les lignes de semis en TSL avec les placettes travaillées en conventionnel car elles présentent des caractéristiques d'EDS similaires.

3. A l'état final, un classement complexe soulignant la dégradation structurale

A partir des regroupements effectués par la CHA, il est possible de définir quatre groupes (figure 3.3 et tableau 3.6).

Le groupe A présente une extension des croûtes sédimentaires restreinte (30%). La couverture par le mulch atteint à peine 6% en moyenne. Le microrelief est faible (1,8 mm en moyenne). En termes de composition, ce groupe est assez hétérogène : il comprend des placettes en labour et en TSL, tous motifs confondus (tableau 3.7).

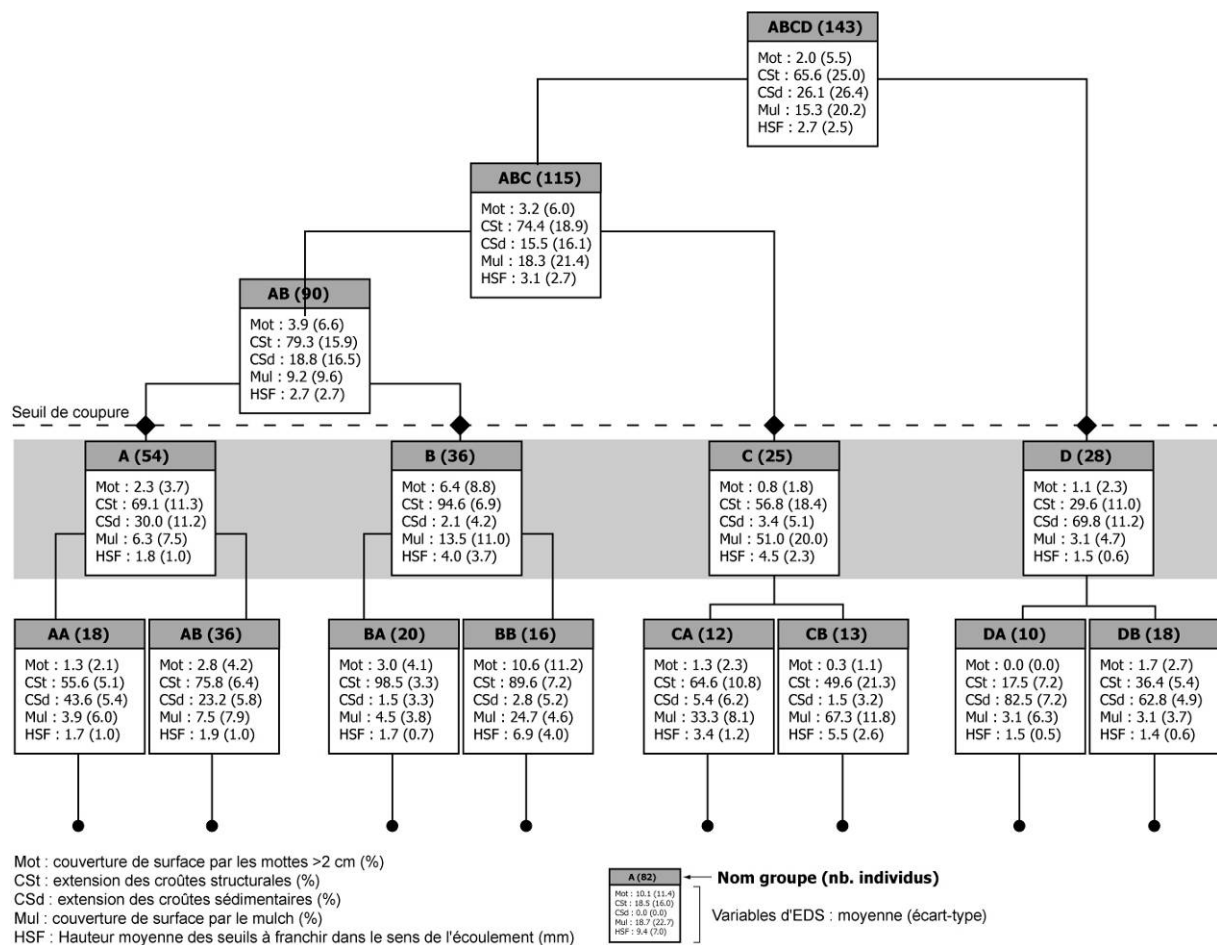


Figure 3.3 – Arbre de classification issu de la CHA sur les EDS finaux

Le **groupe B** présente un développement des croûtes structurales complet (proche de 100%). La couverture en résidus végétaux est peu importante (13% en moyenne). Les valeurs de microrelief sont proches de celles du groupe D (4.0 mm), sans doute parce que son estimation tient compte des résidus végétaux et que ces deux groupes présentent une couverture de mulch. Ce groupe est essentiellement composé de placettes travaillées en TSL.

Le **groupe C** est le deuxième groupe détaché par la CHA. Il présente une quasi-absence des croûtes sédimentaires et un développement moyen des croûtes structurales (50%). La couverture en mulch est très élevée (>50%). Ce groupe, présentant l'état de dégradation structurale le moins avancé, est majoritairement constitué de placettes en semis-direct (tous motifs confondus) et de placettes en TSL (interrangs et traces de roue).

Le **groupe D** est le premier à être détaché par la CHA. Le développement des croûtes sédimentaires y est le plus important (70% en moyenne), le microrelief est nul (<2mm). Ces surfaces sont nues (<5% de résidus végétaux). Ce groupe est composé de placettes travaillées en labour et en TSL (tableau 3.6), notamment des lignes de semis et des traces de roue. Ces placettes **présentent le faciès le plus dégradé** et l'aptitude à ruisseler la plus importante. La présence de croûtes sédimentaires suggère en outre la formation de ruissellement depuis l'état initial. Il constitue un groupe complètement opposé au groupe C.

Tableau 3.6 – Variables d'EDS des 4 groupes d'EDS définis par la CHA (état final)

		Groupe A	Groupe B	Groupe C	Groupe D
N		54	36	25	28
Mottes > 2 cm (%)	Moyenne	2,3	6,4	0,8	1,1
	Ecart-type	3,7	8,8	1,8	2,3
	Minimum	0,0	0,0	0,0	0,0
	Maximum	15,0	40,0	5,0	9,0
Croûtes structurales (%)	Moyenne	69,1	94,6	56,8	29,6
	Ecart-type	11,3	6,9	18,4	11,0
	Minimum	50,0	80,0	15,0	0,0
	Maximum	90,0	100,0	85,0	45,0
Croûtes sédimentaires (%)	Moyenne	30,0	2,1	3,4	69,8
	Ecart-type	11,2	4,2	5,1	11,2
	Minimum	10,0	0,0	0,0	55,0
	Maximum	50,0	15,0	15,0	100,0
Couverture mulch (%)	Moyenne	6,3	13,5	51,0	3,1
	Ecart-type	7,5	11,0	20,0	4,7
	Minimum	0,0	0,0	25,0	0,0
	Maximum	25,0	30,0	85,0	20,0
Hauteur seuil à franchir (mm)	Moyenne	1,8	4,0	4,5	1,5
	Ecart-type	1,0	3,7	2,3	0,6
	Minimum	1,0	1,0	2,0	1,0
	Maximum	5,0	15,0	10,0	3,0

Tableau 3.7 – Composition des groupes définis par la CHA (état final)

Groupe A

	Interrang	Ligne de semis	Trace de roue	Somme
Labour	13	6	10	29
TSL	7	8	9	24
Semis direct	0	1	0	1
Somme	20	15	19	54

Groupe B

	Interrang	Ligne de semis	Trace de roue	Somme
Labour	5	4	1	10
TSL	12	7	4	23
Semis direct	2	1	0	3
Somme	19	12	5	36

Groupe C

	Interrang	Ligne de semis	Trace de roue	Somme
Labour	0	0	0	0
TSL	6	0	3	9
Semis direct	6	6	4	16
Somme	12	6	7	25

Groupe D

	Interrang	Ligne de semis	Trace de roue	Somme
Labour	2	10	5	17
TSL	0	10	1	11
Semis direct	0	0	0	0
Somme	2	20	6	28

Au sein des contextes conventionnels et TSL, **les lignes de semis présentent peu de différences. Ce sont les motifs les plus dégradés** : le microrelief est quasi nul, l'extension des croûtes sédimentaires est élevée. De ce fait, ils présentent l'aptitude au ruissellement la plus importante ce qui est souligné par la présence de croûtes sédimentaires qui traduisent la circulation de ruissellement ou la formation de flaques. On peut donc supposer que les lignes de semis seraient des secteurs préférentiels de circulation du ruissellement

En revanche, les différences d'EDS entre contextes conventionnel et TSL sont plus marquées sur les traces de roue et les interrangs. La couverture en mulch et microrelief plus élevés en TSL expliquent la séparation entre le groupe A (interrangs en labour) et le groupe B (interrangs en TSL).

Le **semis-direct est la pratique présentant l'EDS le moins dégradé** : faible développement des croûtes structurales, absence de croûtes sédimentaires, microrelief le plus élevé des 4 groupes ; et ce, alors même que l'état initial est encroûté. Cela s'explique sans doute par la couverture en mulch très importante tout au long des suivis. A l'image de l'état initial, on n'observe pas de distinction entre les trois motifs culturaux.

intéressant de constater que **l'EDS de ces individus évolue peu entre l'état initial et l'état final**. Cela souligne que les placettes en semis-direct ont peu été dégradées par les pluies. Le reste des individus composant le groupe C final, provient du groupe B initial, c'est-à-dire, des placettes travaillées en TSL.

A l'inverse, le groupe final D (le plus dégradé) est majoritairement (25/28) composé de placettes en provenance du groupe initial A qui présente des caractéristiques qui le rendent très sensible à la battance : une absence de résidus végétaux, de mottes et un microrelief très faible (6.3 mm). Dans le cas des lignes de semis, cet état initial s'explique par les passages d'outils liés au semis. Le sol est affiné afin de préparer un lit de semence favorable à la levée des plantules, c'est-à-dire un sol suffisamment fragmenté afin d'obtenir un bon contact entre le sol et la graine. Les chasse-débris en tête du semoir ont pour rôle d'écartier les éléments grossiers pouvant constituer un obstacle à la levée. C'est pourquoi l'EDS initial en TSL comporte si peu de mottes et de mulch. Néanmoins, seuls 1/3 des individus du groupe initial A sont classés dans le groupe final D, ce qui souligne que d'autres facteurs jouant sur la dégradation doivent également être pris en compte.

Les individus composant les groupes finaux A et B sont issus des groupes initiaux A et B. Il devient ici difficile, en l'absence d'autres facteurs, d'interpréter les trajectoires des EDS. Ce point sera abordé au cours du chapitre 5, lors de la création de l'indicateur de ruissellement.

5. Étude de la variabilité intraparcellaire des états de surface

5.1. Consolider les résultats précédents

Les résultats précédents mettent en évidence l'existence d'une variabilité intraparcellaire des EDS liée au travail du sol. Il apparaît que certains motifs liés au travail du sol, notamment les lignes de semis, présentent une aptitude au ruissellement importante. Cependant, le jeu de données sur lequel portent les analyses précédentes présente un biais important : sur l'ensemble des sites, seules deux observations par pratique et par motif ont été réalisées (3 dans le cas de Geispitzen en 2003). Ce faible nombre de répétitions est insuffisant pour estimer la variabilité spatiale des EDS à l'échelle du motif.

Afin de valider les résultats précédents et de pouvoir échafauder des hypothèses en termes de fonctionnement hydrologique de la surface, il fallait **s'assurer que la variabilité des EDS est plus importante entre les différents motifs qu'au sein d'un motif**. Pour ce faire, la campagne d'observations d'EDS menée en 2007 sur le site de Geispitzen visait à réaliser un nombre important de répétitions (15 par motifs et par pratique) sur une parcelle travaillée en conventionnel et une autre travaillée en TSL (chisel). Chaque parcelle était donc équipée de 45 placettes d'observation de surface.

L'objectif est de comparer sur chaque parcelle 3 populations : les interrangs, traces de roue et lignes de semis. Ces comparaisons porteront sur les variables retenues précédemment à savoir :

- l'extension des croûtes structurales et sédimentaires ;
- la hauteur moyenne des seuils franchir (HSF) dans la direction de l'écoulement ;
- en contexte de non-labour, la couverture de surface par les résidus végétaux ;
- la couverture par les mottes dont le diamètre est supérieur à 2 cm.

La méthode retenue dans cette étude sera une étude de la dispersion des données, puis une analyse la de variance (ANOVA). Les observations de surface ont été réalisées au cours du printemps 2007. Lors de cette période, les précipitations ont été beaucoup plus importantes que la normale (figure 3.5). Au 15 juillet, les précipitations cumulées depuis le semis dépassent les 300 mm, ce qui est largement supérieur aux précipitations enregistrés de 2003 à 2005 sur la même période (146 mm au maximum à Kappelen en 2003).

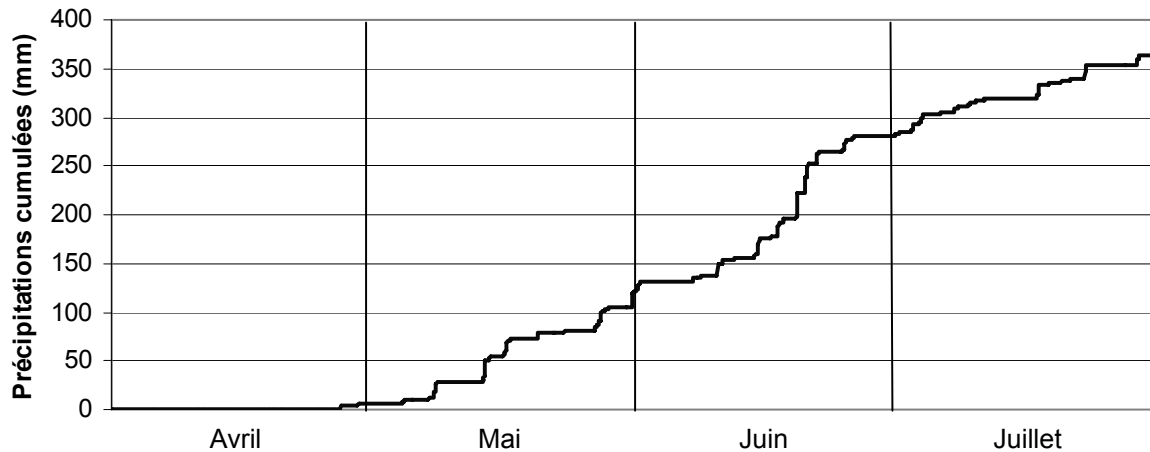


Figure 3.5 – Précipitations cumulées depuis le semis (site de Geispitzen – 2007).

5.2. Résultats

Les résultats des suivis d'EDS (figure 3.6) sont présentés ici variable par variable.

Croûte structurale

Le développement de ce type de croûte est très rapide. L'état initial est caractérisé par une quasi absence en raison des précipitations nulles. L'extension est complète dès le deuxième relevé. Une décroissance est observée à partir du 4^{ème} relevé. Celle-ci s'explique par le développement en parallèle des croûtes sédimentaires au détriment des croûtes structurales. Cette décroissance, concerne essentiellement les lignes de semis, quelque soit la technique culturale. En contexte de labour, on note une cette faible décroissance sur les interrangs et les traces de roue.

Croûte sédimentaire

Logiquement, le développement des croûtes sédimentaires présente une évolution inverse à celle des croûtes structurales. Le développement est tardif (à partir du 4^{ème} relevé) et concerne principalement les lignes de semis : l'extension est complète lors du dernier relevé. En labour, on observe également un développement sur les interrangs (20%) et les traces de roue (40%).

Hauteur des seuils à franchir dans la direction de l'écoulement

De manière globale, la HSF présente une décroissance liée à la dégradation structurale. Dans les deux contextes cultivés, les lignes de semis présentent la HSF la plus faible (<5 mm), et ce dès l'état initial. En labour, les interrangs présentent une HSF un peu plus élevée que les traces de roue. En TSL, on remarque peu de différences entre ces deux motifs.

Couverture par les mottes >2cm

Dans les deux contextes, la couverture est très importante (>50%). On observe une tendance à la diminution, liée à la dégradation structurale. En TSL, les interrangs et traces de roue possèdent une couverture similaire alors qu'en labour la couverture des traces de roue est nettement inférieure. Dans les deux contextes, la couverture des lignes de semis est très faible (<10%). Alors que l'écart-type des trois variables précédentes est limité, la couverture par les mottes est la variable présentant la variabilité intra-motif la plus élevée.

Couverture en mulch

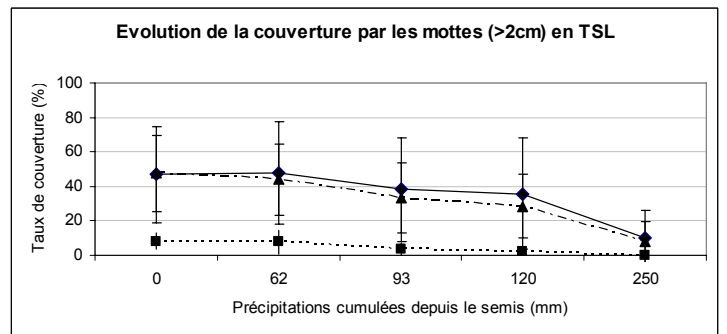
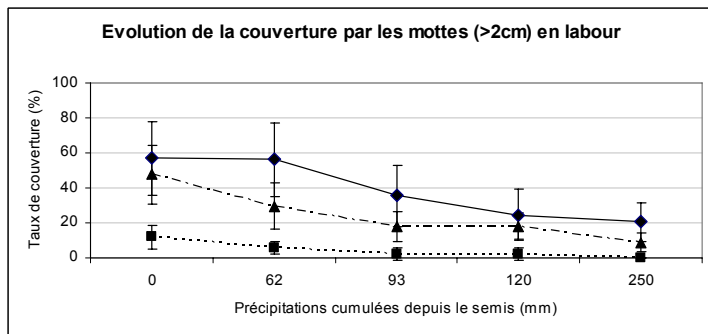
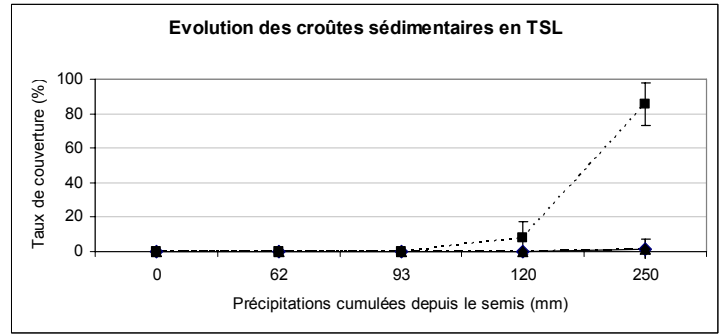
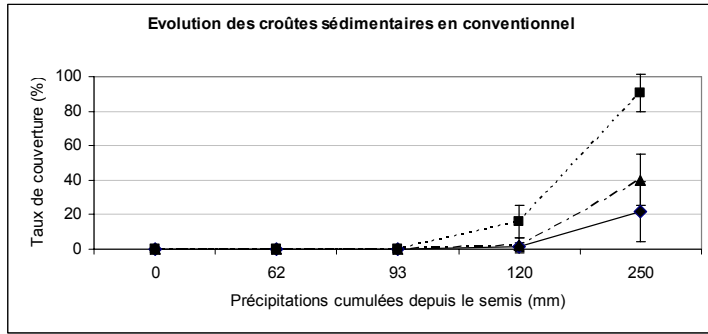
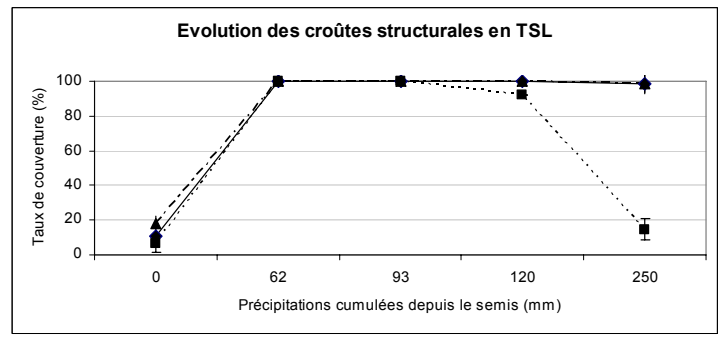
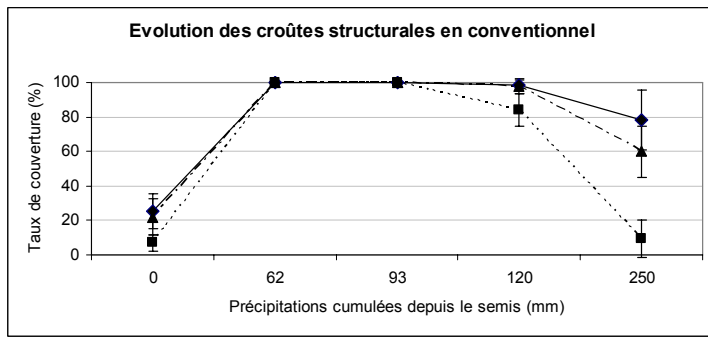
Le labour est caractérisé par l'absence de résidus végétaux. En TSL, on constate une légère diminution de la couverture au fil des précipitations, sans doute en raison de la dégradation d'origine biologique. Les lignes de semis présentent une très faible couverture en résidus végétaux (5%) alors que les traces de roue et interrangs présentent une couverture similaire (entre 20 et 25%) avec une gamme de variabilité relativement importante.

Afin, de confirmer les tendances décrites ci-dessus, une analyse de la variance (ANOVA) a été réalisée pour étudier les différences entre les 3 populations (interrangs, lignes de semis et traces de roue) sur les mêmes variables. Dans certains cas les comparaisons sont impossibles, notamment quand l'ensemble des placettes ne présente pas de variation, c'est-à-dire dans les cas suivants :

- extension complète (100%) des croûtes structurales,
- absence de croûtes sédimentaires au début des suivis,
- absence de résidus végétaux en contexte conventionnel.

Les résultats de l'ANOVA (annexe 4) confirment l'étude des graphiques précédents : pour chaque technique culturale, **les motifs présentent des différences d'EDS significatives**, même dans le cas des variables présentant une variabilité intra-motif importante (HSF et couverture en mottes).

Cependant, l'ANOVA compare les moyennes des 3 populations (interrang, ligne de semis et trace de roue) et ne permet de tirer que des conclusions générales. Elle ne permet pas de déceler des cas d'égalité des moyennes entre deux populations distinctes (ligne de semis et trace de roue par exemple). Dans cette optique, on se propose d'utiliser le test Post Hoc LSD (Least Significant Difference). Il s'agit de test de Student réalisés *a posteriori*, dans le cas où l'hypothèse de non-différence (H0) est rejetée. Ce test convient spécifiquement aux analyses ne comparant que 3 populations (Howell, 1998), ce qui est notre cas.



- ◆— Interrang
- Ligne de semis
- -▲- - Trace de roue

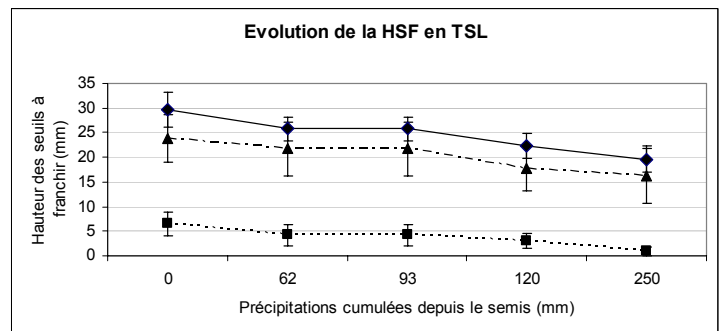
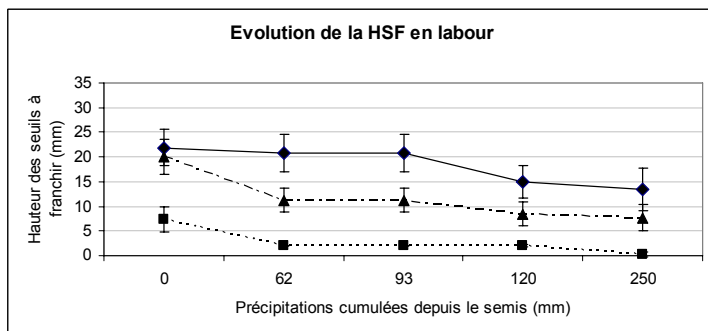
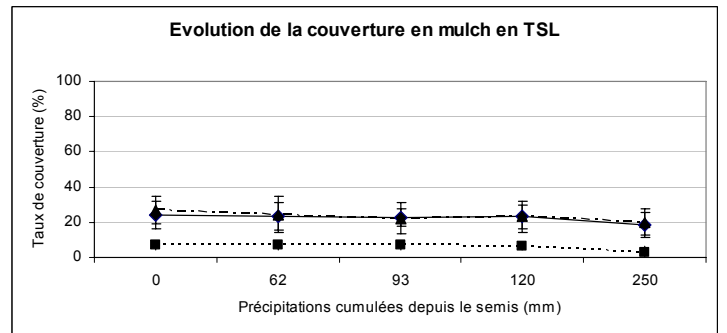


Figure 3.6 – Suivis des EDS de la campagne 2007

Les résultats du test LSD (annexe 5) montrent qu'il existe des différences d'EDS significatives dans les comparaisons traces de roue/ligne de semis et les comparaisons interrang/ligne de semis. En revanche, **il y a peu de différences significatives d'EDS entre interrang et trace de roue**, ce qui confirme ce qui avait été entrevu lors de l'étude de la figure 3.6. C'est notamment le cas en contexte de TSL : à l'exception de la hauteur des seuils à franchir, le seuil de signification est dépassé pour chacune des variables ce qui traduit de trop faibles différences d'EDS. En contexte conventionnel, le seuil de signification est dépassé dans quelques cas : HSF et couverture par les mottes à l'état initial, extension des croûtes sédimentaires au stade 120 mm.

Cette similarité entre les EDS des interrangs et trace de roue paraît cohérente puisque la trace de roue est un interrang ayant subi un tassement suite au passage des engins. Il paraît normal que certaines variables, peu sensibles au tassement, présentent alors peu de différences (couverture en mulch par exemple).

Synthèse et conclusion

L'étude des EDS en contexte de non-labour vise à répondre aux objectifs suivants :

► Quelles sont les spécificités des états de surface en contexte de TSL ?

Lors du semis, les trois types de techniques culturales créent des EDS spécifiques. A ce stade, c'est la couverture en mulch qui constitue le meilleur critère de discrimination : les trois groupes déterminés par la classification correspondent aux trois types de pratiques. La seule exception concerne les lignes de semis en TSL, où le couvert en résidus végétaux est quasi nul et qui sont classées parmi les placettes travaillées en labour.

Lors de l'état final le classement est plus détaillé et souligne :

- La **très forte dégradation structurale des lignes de semis**, en labour et en TSL, expliquée par une faible présence de mulch, et un affinement initial important (micro-relief et couverture en motte très faible). Il s'agit du motif présentant les caractéristiques de surface les plus aptes à ruisseler : peu d'interception, extension élevée des croûtes sédimentaires et microrelief minime.
- La dégradation moins importante des interrangs et traces de roue en labour et *a fortiori* en TSL, contexte où l'on n'observe pas ou peu de développement des croûtes sédimentaires.
- Une absence apparente de dégradation en semis-direct. C'est la seule pratique présentant une absence de croûte sédimentaire. De plus, en raison de l'absence d'action mécanique (travail du sol ou préparation de semis), le semis-direct est la seule pratique ne présentant pas de différence d'EDS entre les différents motifs.

Ces suivis indiquent que les EDS en contexte conventionnel présentent des traces de circulation du ruissellement (formation de croûte sédimentaire), et notamment les lignes de semis. A l'inverse, les EDS en contexte de TSL et, *a fortiori*, de semis-direct semblent moins propices au ruissellement. **Les différences d'EDS entre les techniques sont donc maximales sur les interrangs et les traces de roue.**

► Existe-t-il une variabilité spatiale intraparcellaire des états de surface ?

Le travail du sol en contexte de plantes sarclées. L'étude réalisée à Geispitzen en 2007 montre qu'en contexte conventionnel et de TSL, les interrangs, traces de roue et lignes de semis présentent des EDS spécifiques tout au cours des suivis (de l'état initial à l'état final). Cependant, les différences sont beaucoup plus importantes entre le groupe interrang-trace de roue et les lignes de semis. Cette distinction en trois motifs a donc été validée et permet de conforter les observations de surfaces acquises lors des années précédentes.

Chapitre 4

EDS et formation du ruissellement

Le chapitre précédent a montré l'effet des techniques culturales sur les états de surface (EDS). Ainsi, il existe des différences d'EDS très nettes entre les techniques, notamment en fin de saison, quand la surface a été battue par les précipitations printanières. Les états de surface des parcelles travaillées en TSL sont moins dégradés : leur microrelief est plus élevé et ils présentent peu de croûtes sédimentaires. Au contraire, c'est en contexte conventionnel que l'on observe le développement le plus important des croûtes sédimentaires, témoins de la formation d'un excès d'eau en surface sous forme de flaques ou de ruissellement. Ces résultats permettent d'avancer l'hypothèse que les TSL produisent moins de ruissellement qu'en technique conventionnelle.

Les résultats précédents ont également mis en évidence l'existence d'une **organisation intraparcellaire** des EDS, structurée par le travail du sol. Les lignes de semis sont fréquemment plus dégradées, aussi bien en contexte conventionnel qu'en TSL (sauf en semis-direct). Au contraire, **les différences d'EDS entre les techniques sont maximales sur les interrangs et les traces de roue**. Ces différences peuvent avoir des conséquences sur le fonctionnement hydrologique de la parcelle puisque, en fonction de leur EDS, certains motifs pourraient plus contribuer au ruissellement que d'autres.

L'objectif de cette partie est de compléter les informations issues des observations de surface grâce à des expérimentations réalisées sous pluies naturelles et artificielles. Il s'agit d'**acquérir des connaissances sur les processus de formation et de propagation du ruissellement** en fonction des états de surface du sol. Cette étude sera réalisée en abordant l'effet des techniques sans labour sous deux approches : théorique et opérationnelle.

► Approche théorique : appréhender les processus hydrologiques affectant la surface à l'échelle locale

L'objectif est de mieux comprendre comment les EDS influencent les volumes ruisselés et érodés, particulièrement en contexte de non-labour, en tenant compte de différents processus hydrologiques existants à la surface du sol. Le ruissellement collecté peut, en effet, être causé par une surface peu infiltrante mais également par une surface ne freinant pas le ruissellement lors de son transfert. Ces expérimentations permettront notamment d'identifier notamment si certains motifs contribuent plus aux volumes ruisselés que d'autres.

Les expérimentations menées ici visent à étudier le rôle des EDS face aux processus suivants :

- Les expérimentations à l'échelle de 22 m² sous pluies naturelles constituent le jeu de données le plus conséquent. Il permet d'étudier la **formation** du ruissellement sur une

- surface qui tient compte de l'organisation intraparcellaire des EDS mise en évidence lors du chapitre précédent.
- La **propagation** du ruissellement en fonction des propriétés d'EDS est mise en évidence en déversant de l'eau à flux constant à l'échelle du motif, ceci afin de mesurer la distance parcourue par le ruissellement ;
- La simulation de pluie permet d'analyser l'effet de la répartition spatiale des résidus végétaux à échelle locale (m²) sur les processus de **réinfiltration**.

► **Approche opérationnelle : quantifier les performances des TSL sur la réduction supposée du couple ruissellement-érosion**

L'état de l'art a montré que si l'effet des TSL sur la réduction de l'érosion est avéré, l'effet sur la production de ruissellement est plus ambigu. Dans certains cas, la lame d'eau ruisselée peut être supérieure aux mesures sur les témoins en labour. Il s'agit ici d'utiliser des parcelles de mesures de ruissellement sous pluies naturelles, en associant des observations régulières d'EDS afin de comparer les volumes ruisselés et érodés en fonction des techniques.

Ce chapitre présentera tout d'abord la démarche retenue afin d'étudier la relation entre EDS et ruissellement. Puis, nous exposerons les résultats obtenus sur les parcelles de 20 m² sous pluies naturelles. Ils seront ensuite comparés aux résultats obtenus à l'échelle du motif, également acquis sous pluies naturelles. Ces résultats, portant sur la formation du ruissellement seront ensuite mis en perspective avec les mesures de propagation du ruissellement. Nous aboutirons à l'étude de l'influence des résidus végétaux sur la formation et la réinfiltration du ruissellement sous pluies simulées

1. Identifier les variables d'EDS pertinentes

Cette section vise à explorer les relations entre EDS et ruissellement. Dans un premier temps, les caractéristiques d'EDS précédant les expérimentations seront présentées. Puis, nous exposerons les résultats obtenus grâce aux expérimentations. Enfin, ces observations d'EDS seront mises en relation avec les données de ruissellement, afin d'identifier **quelles sont les variables d'EDS qui expliquent le mieux la variation des volumes ruisselés**.

Afin de répondre à cet objectif, c'est la régression multiple linéaire qui sera utilisée. Celle-ci vise à estimer les valeurs d'une variable dépendante en fonction d'un ensemble de variables descriptives. Cette méthode suppose une relation linéaire entre les variables et se décompose dans l'équation suivante :

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_px_p + \varepsilon(x)$$

où : y est la variable dépendante [variable ruissellement] ;

$x_1 ; x_2 \dots x_p$ sont les variables explicatives [variables d'EDS] ;

$b_0 ; b_1 \dots b_p$ sont des paramètres à estimer.

ε correspond à la part d'informations qui n'est pas traduite par la régression.

Comme le souligne Howell (1998), l'augmentation du nombre de variables, et donc de paramètres b_p pris en compte dans la régression, s'accompagne d'une amélioration des performances explicatives sur l'échantillon. En revanche, la qualité du modèle ainsi élaboré se dégrade sur des données nouvelles en raison d'une variance exagérée des estimations des valeurs prédites. Les valeurs de ces paramètres perdent toute signification, là encore en raison de leur grande variance.

L'objectif de cette partie est d'identifier les **combinaisons de variables d'EDS** qui expliquent le mieux la variabilité des volumes ruisselés. De ce fait, nous avons opté pour une variante de la régression multiple : la **régression pas à pas ascendante**. Cette méthode procède par itération et vise à obtenir le meilleur « modèle », c'est-à-dire le meilleur compromis entre nombre de variables explicatives et valeur du coefficient de détermination.

La première étape (« pas zéro »), consiste à réaliser une régression unidimensionnelle avec chacune des variables explicatives. Puis, lors de la première itération, le modèle intègre la variable explicative la plus significativement liée à la variable dépendante lors de l'analyse unidimensionnelle. On ajoute ensuite la variable restante la plus associée à la variable dépendante et ainsi de suite. Cet ajout se fait en vérifiant que les variables introduites contribuent de façon significative (à $p < 0,05$) à l'explication globale fournie par la régression (Huguier et Flahault, 2003).

Avant d'appliquer cette méthode, les corrélations entre chaque variable d'état de surface seront étudiées afin de mettre en évidence des relations d'association ou d'opposition. Le premier jeu de données sur lequel sera utilisée cette méthode est celui regroupant les mesures de ruissellement sous pluies naturelles acquis grâce aux parcelles expérimentales de 22 m².

2. Une baisse du ruissellement et de l'érosion en contexte de non-labour

Cette partie présente les résultats obtenus sur les parcelles de mesure de 22 m² sous pluies naturelles. Au total 9 épisodes ont provoqué du ruissellement sur les deux saisons 2004-2005, répartis comme suit :

- 3 épisodes sur le site de Landser en 2005 ;
- 3 épisodes chaque saison sur le site de Neewiller en 2004 et 2005.

En 2004, aucun épisode pluvieux n'a provoqué la formation de ruissellement sur le site de Landser.

Dans un premier temps, les données de ruissellement et d'érosion seront étudiées année par année. Ces données seront comparées aux observations d'EDS ayant été effectuées avant l'épisode ruisselant. Pour des questions de lisibilité, les données d'EDS sont indiquées dans l'annexe XX.

NB : la période entre le dernier relevé d'EDS et l'épisode ruisselant pouvant parfois atteindre 1 mois, il existe un biais concernant la couverture par la végétation en place. En effet, durant cet intervalle, le maïs poursuit sa croissance et les observations d'EDS risquent de sous-estimer la couverture végétale réelle au moment de l'épisode orageux. Ainsi, si l'intervalle séparant l'observation d'EDS et l'épisode ruisselant dépasse 2 semaines, la couverture végétale (*cf.* annexe 7) correspond à celle du suivi faisant suite à l'épisode ruisselant (tableau 1.1). Ce cas de figure s'est présenté 3 fois (tableau 4.1) et les corrections ainsi apportées sont intégrées dans l'annexe 7.

Tableau 4.1 – Corrections apportées à la couverture végétale en place

Site	Date du dernier relevé d'EDS	Date de l'épisode ruisselant	Date du relevé d'EDS suivant
Landser	16/6/2005	12/7/2005	13/7/2005
Neewiller	18/5/2004	13/6/2004	21/6/2004
Neewiller	17/6/2004	11/7/2004	16/7/2004

2.1. Mesures de ruissellement sur le site de Neewiller en 2004

Le site a connu 3 épisodes ayant provoqué la formation de ruissellement (figure 4.1). Ces épisodes présentent des caractéristiques proches : la lame d'eau précipitée est comprise entre 6.6 et 8 mm ; l'intensité moyenne de l'épisode s'étend de 32 à 42 mm/h. Il s'agit donc d'épisodes brefs et localisés, pouvant se répéter plusieurs fois au cours de la saison.

Malgré des lames d'eau précipitées assez faibles, les coefficients de ruissellement obtenus en labour atteignent 50% lors des premiers et deuxièmes épisodes pluvieux. On constate la forte différence du coefficient de ruissellement entre les parcelles témoin en labour et les autres parcelles en non-labour. Le ruissellement est divisé par 5 en non-labour, aussi bien en TSL qu'en semis-direct.

Les pertes en terre suivent également la même tendance : celles-ci atteignent entre 4 et 5t/ha en conventionnel, lors du premier épisode ; alors qu'en TSL et en semis-direct, les pertes en terre sont réduites d'un facteur 10, quel que soit l'épisode. En contexte conventionnel, les pertes en terre sont

moins importantes lors des derniers épisodes ruisselants, probablement en raison des modifications que connaissent les EDS qui vont être étudiées à présent.

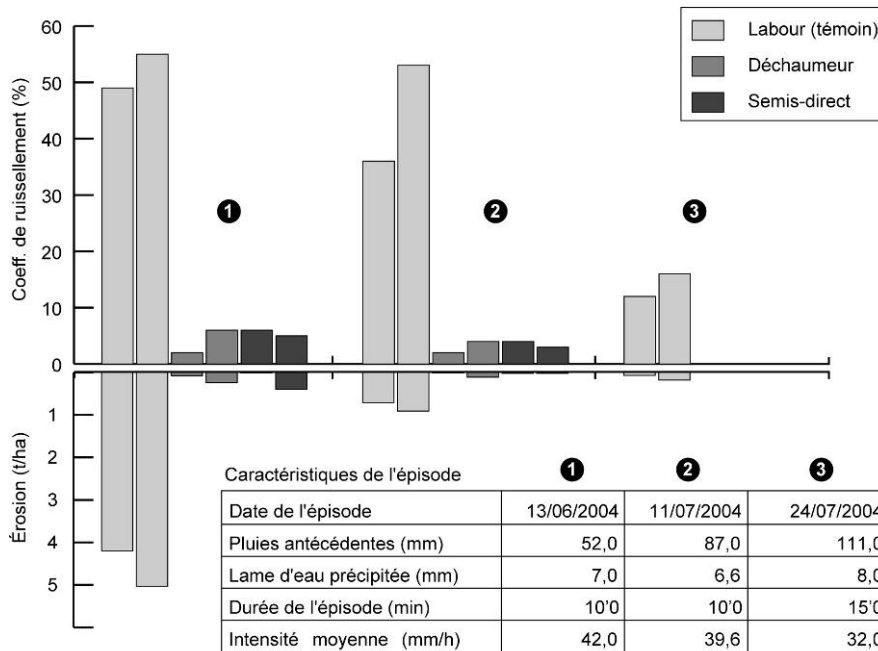


Figure 4.1 – Ruissellement et pertes en terre sur le site de Neewiller sur la saison 2004

Lors du **premier épisode**, la couverture végétale est peu développée : seules les lignes de semis sont protégées par la végétation en place (40-60% de couverture), les interrangs et traces de roue sont directement exposés aux précipitations. Cet épisode survient sur une surface où l'extension des croûtes structurales est importante, notamment en conventionnel où la totalité de la surface est complètement couverte. Le développement des croûtes structurales est plus limité (60-80%) dans le cas de la modalité déchaumeur, et sous la barre des 50% en semis-direct. En revanche, les observations ne font pas état de croûtes sédimentaires, ce qui indique l'absence de transport de sédiments par le ruissellement ou de dépôts dans les flaques.

La hauteur des seuils à franchir dans la direction de l'écoulement est relativement proche entre le labour et le déchaumeur (<5 mm sur les interrangs et les lignes de semis). A l'inverse, la HSF est beaucoup plus importante dans le cas du semis-direct (10-35 mm). L'état général est relativement fin, la couverture par les mottes supérieures à 2 cm ne dépassant pas 10%.

Les parcelles travaillées en non-labour présentent un couvert en résidus important : 30% et 10% respectivement sur les interrangs-traces de roue et les lignes de semis. En semis-direct, la couverture de surface dépasse les 50%. Ces valeurs ne connaîtront pas de variations sur la saison de suivis. La macroporosité est peu développée : il n'y a pas de fentes et très peu de trous, et ce tout au long des suivis.

Les différences d'EDS portent essentiellement sur le microrelief et la présence de résidus végétaux et sont sans doute celles qui contribuent à diminuer la formation du ruissellement. Les valeurs élevées d'érosion mesurées lors de cet épisode peuvent être expliquées par la présence de fragments libres présents sur la surface du sol (petites mottes ou agrégats détachées par le splash, par exemple) qui sont facilement transportés par le ruissellement.

Les EDS précédant le **deuxième épisode** ruisselant sont caractérisés par la présence de **croûtes sédimentaires en contexte conventionnel** (30-40% environ). La formation de ces croûtes résulte de l'épisode ruisselant précédent. La couverture des croûtes sédimentaires est plus rare et localisée dans le cas du déchaumeur (<15%) et inexistante en semis-direct. L'impact de ce type de croûte sur la réduction de l'infiltrabilité de la surface est important et contribue certainement aux importants volumes ruisselés. Comparé au relevé précédent, le microrelief est quasiment lisse en conventionnel et dans le cas de la modalité déchaumeur (HSF <2 mm) notamment sur les lignes de semis et les interrangs. La capacité de rétention superficielle est ainsi réduite par rapport aux valeurs mesurées en semis-direct (HSF comprise entre 10 et 15 mm).

Le développement d'une couverture végétale (la plante dépasse 2 mètres) importante constitue la différence principale avec le relevé précédent. Cet élément permet sans doute d'expliquer les faibles de valeurs d'érosion en contexte conventionnel car les précipitations sont interceptées par la végétation en place. Elles atteignent la surface avec une énergie cinétique réduite, ce qui diminue l'érosivité des précipitations.

Les conditions d'EDS évoluent peu à l'approche du **troisième épisode**, si bien que les remarques effectuées sur les EDS précédant le deuxième épisode sont toujours valables.

2.2. Mesures de ruissellement sur le site de Neewiller en 2005

Lors de la saison de suivis 2005, trois épisodes orageux ont également produit du ruissellement (figure 4.2). Ces épisodes sont comparables à ceux enregistrés lors de l'année précédente : la lame d'eau est relativement faible (entre 5.8 et 7.8 mm) et les intensités moyennes sont situées dans une gamme similaire (de 27.20 à 46.80 mm/h).

Les coefficients de ruissellement sont nettement plus élevés en labour : ils dépassent 30% sur l'ensemble des mesures et atteignent jusqu'à 80%. Au sein des modalités en TSL, les coefficients sont plus élevés au sein de la modalité déchaumeur (30% max) qu'au sein de la modalité décompacteur et semis-direct (<10%).

En contexte conventionnel, les pertes en terre sont plus importantes lors du premier épisode (entre 5 et 6 tonnes par hectare). Cependant, à la différence de la saison 2004, lors des deux derniers épisodes, on note également des pertes en terre comprises entre 2 et 3 t/ha. En TSL et semis-direct, les pertes en terre sont faibles (<1t/ha).

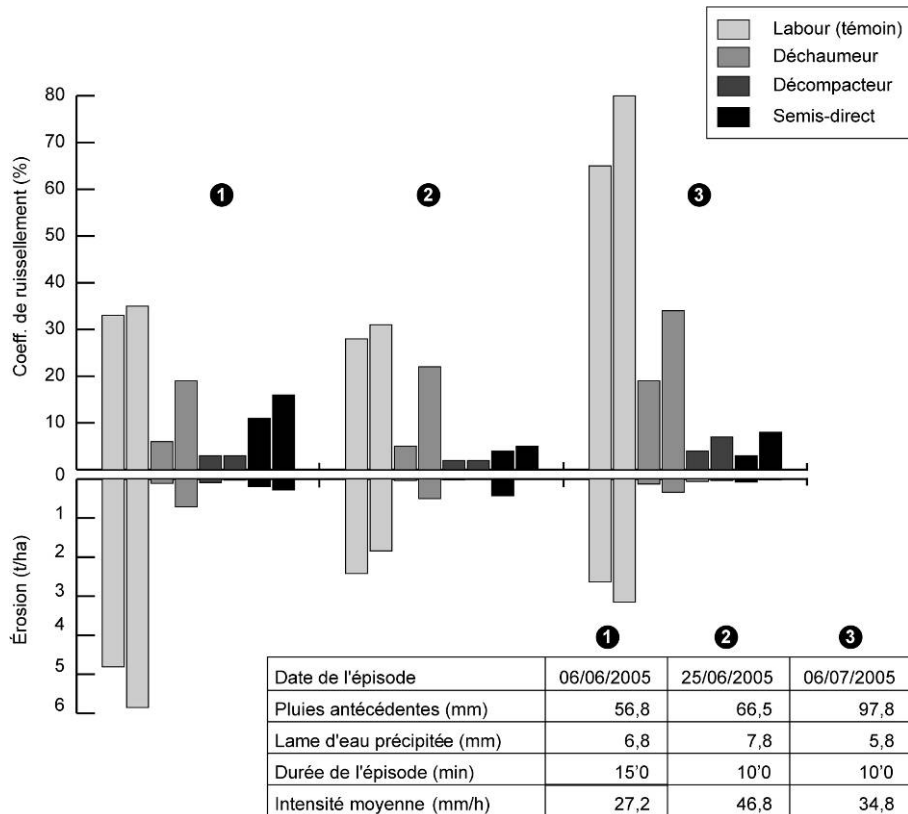


Figure 4.2 – Ruissellement et pertes en terre sur le site de Neewiller sur la saison 2005

Les caractéristiques initiales d'EDS sont proches de celles relevées en 2004. Lors du **premier épisode** (6 juin 2005), l'EDS est peu grossier : les mottes supérieures à 2 cm ne couvrent pas plus de 20% de la surface, quelle que soit la technique culturale. La couverture végétale est encore peu développée (<20%) et ne concerne que les lignes de semis.

Les différences d'EDS portent essentiellement sur la hauteur moyenne des seuils à franchir et la couverture en résidus végétaux. On peut distinguer deux groupes :

- Les modalités labour et déchaumeur sont caractérisées par un microrelief faible (<5 mm), *a fortiori* sur les lignes de semis rendues quasiment lisses par le développement des croûtes sédimentaires. Celles-ci couvrent entre 20 et 30% de surface, ce qui indique que du ruissellement s'est produit, sans doute de manière localisée, avant ce premier épisode ruisselant. La couverture en résidus sur la modalité déchaumeur ne dépasse pas 10%.
- En revanche, sur les modalités décompacteur et semis-direct, le microrelief est plus conséquent. La HSF moyenne est comprise entre 10 et 15 mm sur les interrangs et les traces de roue et entre 2 et 5 mm sur les lignes de semis. La couverture en résidus dépasse les 30% sur les deux modalités.

Lors du **deuxième épisode et troisième épisode**, Les différences d'EDS sont assez faibles entre les parcelles en labour et celles en déchaumeur. Leur surface est caractérisée par la formation de croûtes sédimentaires, notamment (30 à 40%). A l'inverse, on n'observe peu de croûtes sédimentaires

sur la modalité décompacteur (20%, uniquement sur les lignes de semis). Le semis direct est marqué par l'absence de croûtes sédimentaires.

On observe une variabilité importante des volumes ruisselés dans le cas de la modalité déchaumeur. Cependant, les EDS des parcelles expérimentales ne permettent pas de différence pouvant expliquer de telles variations.

2.3. Mesures de ruissellement sur le site de Landser en 2005

Le site a été touché par trois épisodes pluvieux sur la période de suivis (figure 4.3). Ces épisodes présentent des caractéristiques identiques de celles précédemment détaillés sur le site de Neewiller. Les intensités sont comprises entre 20,8 et 33,9 mm/h et les lames d'eau précipitées s'étendent de 5,2 à 11,3 mm. Encore une fois, il s'agit de « petits » épisodes caractérisés par une intensité élevée et une lame précipitée assez faible.

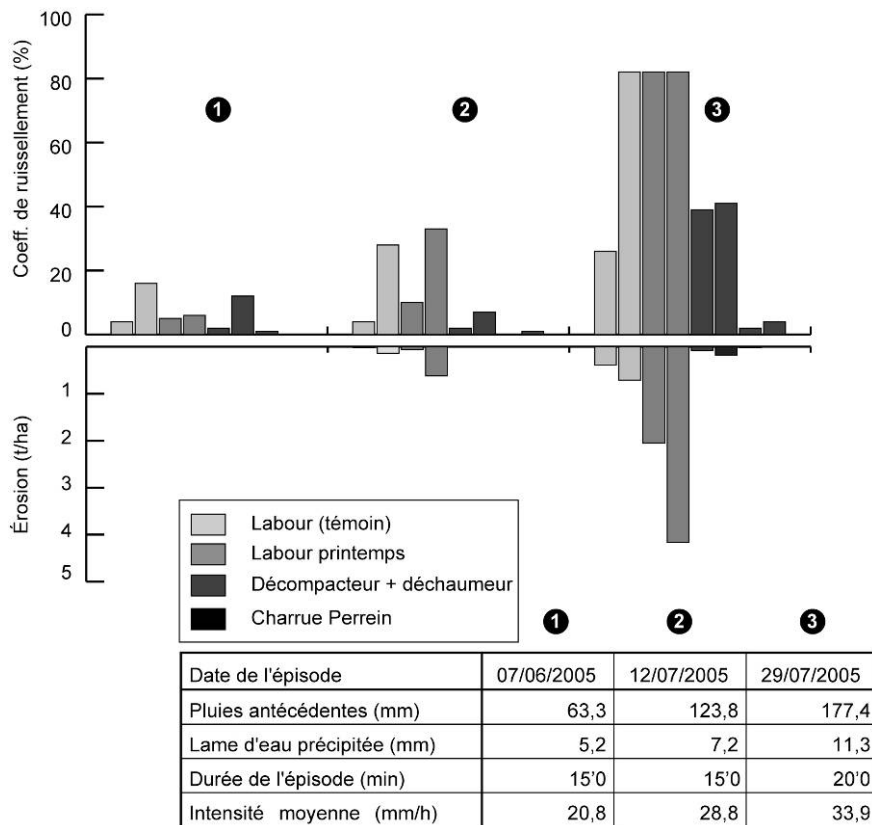


Figure 4.3 – Ruissellement et pertes en terre sur le site de Landser sur la saison 2005

Le premier épisode a déclenché des lames ruisselées très faibles. Ces écoulements étaient clairs et aucune perte en terre n'a été enregistrée. Lors du deuxième épisode, les coefficients de ruissellement atteignent les 30% en labour mais il existe de fortes disparités entre les répétitions. En TSL, le ruissellement reste faible (<10%) et l'érosion est inexistante.

Le troisième épisode a provoqué le débordement des cuves sur 3 modalités, ce qui explique des coefficients de ruissellement identiques (82%). Cependant, ces données doivent être nuancées, car un épisode a pu contribuer au volume stocké dans la cuve : le 16 juillet, le site a été touché par un épisode d'une lame précipitée de 4.2 mm et d'une intensité moyenne de 25.2 mm/h. Si du ruissellement a été émis lors de cet épisode, ceci contribuerait à réduire le coefficient de ruissellement. C'est au cours de ce troisième épisode que les pertes en terre sont les plus importantes. Celles-ci atteignent notamment 4t/ha en labour de printemps alors qu'elles ne dépassent pas 1 t/ha en labour d'hiver. En TSL, le coefficient de ruissellement atteint 40% au sein de la modalité décompacteur et ne dépasse pas 10% dans le cas de la charrue Perrein. Les pertes en terre sont quasiment absentes en TSL.

2.4. Analyse statistique de la relation entre états de surface et ruissellement

L'objectif est désormais d'étudier comment les caractéristiques des EDS et de l'épisode pluvieux influencent le ruissellement. Pour ce faire, une régression multiple ascendante sera utilisée. Les neuf épisodes ruisselants détaillés ci-dessus constituent notre jeu de données. Pour chaque parcelle expérimentale, et donc pour chaque lame ruisselée, 3 observations d'EDS sont disponibles : une sur l'interrang, une sur la ligne de semis et une sur les traces de roue.

Trois jeux de données peuvent donc être mis en relation avec les volumes ruisselés. C'est pourquoi trois régressions multiples ascendantes seront réalisées afin d'observer si un jeu de données explique mieux la variabilité des volumes ruisselés que les deux autres. **Une telle relation permettrait d'identifier des motifs susceptibles de contribuer à la formation du ruissellement.** Les variables utilisées dans ces régressions multiples sont :

Variable dépendante : le volume de ruissellement collecté après l'épisode pluvieux;

Variabiles explicatives :

- Couverture par les mottes < 2mm et >2 mm ;
- Diamètre minimum des agrégats non-scellés ;
- Extension des croûtes structurales et sédimentaires ;
- Couverture par la végétation en place et par les résidus végétaux ;
- HSF moyenne et maximale dans le sens d'écoulement du ruissellement ;
- HSF moyenne et maximale perpendiculaire au sens d'écoulement du ruissellement ;
- Diamètre et profondeur des flaques potentielles ;
- Longueur des fentes dont la largeur est supérieure à 1cm ;
- Largeur moyenne et maximale des fentes ;
- Nombres de trous d'origine biologique ;
- Intensité moyenne et lame précipitée des épisodes pluvieux ayant produit du ruissellement.

La régression a écarté la variable *longueur des fentes dont la largeur est supérieure à 1cm* en raison de trop faibles variations. Les corrélations entre les variables d'EDS, détaillées dans le tableau 4.2, sont présentées ci-dessous.

Les **corrélations positives** concernent essentiellement des associations de variables relatives au microrelief :

- Les 4 variables décrivant la *HSF* sont corrélées entre elles ainsi qu'avec le *diamètre et la profondeur des flaques potentielles* ;
- La relation entre surface couverte par les *mottes supérieures à 2cm* et la *HSF moyenne* paraît cohérente. Une surface très grossièrement affinée a tendance à présenter un microrelief plus important.
- La relation entre *HSF moyenne* et la *couverture en résidus* s'explique par le fait que l'estimation de la *HSF* tient compte de la présence de résidus

Les **corrélations négatives** opposent les *croûtes sédimentaires* à des variables qui pourraient freiner leur formation :

- La relation entre les quatre variables de *HSF* et les *croûtes sédimentaire* nécessite deux remarques. Elle peut traduire le fait qu'une surface rugueuse nécessite des précipitations suffisantes pour séparer les agrégats et voir se former du ruissellement et les croûtes qui en résultent. Elle souligne également une évidence: les croûtes sont caractérisées par leur structure (présence de litages) et également par leur absence de microrelief.
- La relation entre la *couverture par les résidus végétaux* et les *croûtes sédimentaires* ne constitue pas une surprise. Les résultats fournis par la CHA réalisée au cours du chapitre 3 montraient l'opposition nette entre ces deux variables. Les résidus constituent un frein à l'écoulement et peuvent exercer un effet de microbarrage limitant la coalescence du ruissellement.

Tableau 4.2 – Corrélations entre les variables d'EDS (les valeurs >|0,4| sont en gras)

	Couverture par les mottes			Extension des croûtes		Couverture végétale		Hauteur des seuils à franchir				Flaques potentielles		Fentes		Trous	
	Diamètre <2mm	Diamètre >2mm	Diam. mini. non scellé	Structurales	Sédimentaires	Vivante	Résidus	Dir. écou. moy.	Dir. écou. max.	Perp. écou. moy.	Perp. écou. max.	Diamètre	Profondeur	Largeur moy.	Largeur max.	Nombre	
Couverture par les mottes	Diamètre <2mm	1,00	0,28	0,20	-0,38	-0,29	-0,13	-0,11	0,19	0,12	-0,03	0,13	0,02	0,12	-0,10	-0,07	-0,14
	Diamètre >2mm	0,28	1,00	-0,06	-0,01	-0,12	-0,27	-0,18	0,39	0,08	-0,02	0,05	0,10	0,08	-0,11	-0,11	0,07
	Diam. mini. non scellé	0,20	-0,06	1,00	-0,07	-0,19	-0,18	0,01	-0,01	0,26	-0,11	0,31	0,31	0,30	-0,11	-0,04	0,11
Extension des croûtes	Structurales	-0,38	-0,01	-0,07	1,00	-0,12	0,10	-0,37	-0,34	-0,27	-0,22	-0,26	-0,03	-0,10	0,17	0,10	0,20
	Sédimentaires	-0,29	-0,12	-0,19	-0,12	1,00	0,25	-0,49	-0,46	-0,45	-0,39	-0,43	-0,21	-0,24	0,09	0,09	-0,16
Couverture végétale	Vivante	-0,13	-0,27	-0,18	0,10	0,25	1,00	-0,17	-0,33	-0,22	-0,15	-0,07	-0,26	-0,23	0,25	0,32	-0,21
	Résidus	-0,11	-0,18	0,01	-0,37	-0,49	-0,17	1,00	0,56	0,65	0,64	0,58	0,33	0,34	-0,22	-0,15	0,08
Hauteur des seuils à franchir	Dir. écoulement moy.	0,19	0,39	-0,01	-0,34	-0,46	-0,33	0,56	1,00	0,76	0,73	0,66	0,45	0,49	-0,19	-0,13	0,10
	Dir. écoulement max.	0,12	0,08	0,26	-0,27	-0,45	-0,22	0,65	0,76	1,00	0,84	0,83	0,61	0,71	-0,19	-0,11	-0,03
	Perp. écoulement moy.	-0,03	-0,02	-0,11	-0,22	-0,39	-0,15	0,64	0,73	0,84	1,00	0,75	0,53	0,61	-0,12	-0,07	-0,01
	Perp. écoulement max.	0,13	0,05	0,31	-0,26	-0,43	-0,07	0,58	0,66	0,83	0,75	1,00	0,40	0,48	-0,17	-0,10	-0,09
Flaques potentielles	Diamètre	0,02	0,10	0,31	-0,03	-0,21	-0,26	0,33	0,45	0,61	0,53	0,40	1,00	0,87	-0,11	-0,07	0,03
	Profondeur	0,12	0,08	0,30	-0,10	-0,24	-0,23	0,34	0,49	0,71	0,61	0,48	0,87	1,00	-0,12	-0,08	-0,03
Fentes	Largeur moy.	-0,10	-0,11	-0,11	0,17	0,09	0,25	-0,22	-0,19	-0,19	-0,12	-0,17	-0,11	-0,12	1,00	0,88	-0,10
	Largeur max.	-0,07	-0,11	-0,04	0,10	0,09	0,32	-0,15	-0,13	-0,11	-0,07	-0,10	-0,07	-0,08	0,88	1,00	-0,10
Trous	Nombre	-0,14	0,07	0,11	0,20	-0,16	-0,21	0,08	0,10	-0,03	-0,01	-0,09	0,03	-0,03	-0,10	-0,10	1,00

Les résultats de la régression multiple ascendante sont indiqués dans le tableau 4.3. De manière globale, la *lame d'eau précipitée* et les *croûtes sédimentaires* sont les variables qui sont le plus souvent sélectionnées. Les EDS des interrangs et des traces de roue présentent tous deux une explication de la variance des volumes ruisselés proche de 50%. On notera que dans le cas des traces de roue, la prise en compte des macropores d'origine biologique permet d'améliorer la puissance explicative du modèle. Les EDS relevés sur les lignes de semis ne permettent que d'expliquer 42% de la variance des volumes ruisselés.

Tableau 4.3 - Résultats de la régression multiple ascendante sur les 3 jeux de données d'EDS

Interrangs		
Etape	Variables introduites	R²
1	Lame d'eau précipitée	0,299
2	Lame d'eau précipitée Croûtes sédimentaires	0,494
Lignes de semis		
Etape	Variables introduites	R²
1	Lame d'eau précipitée	0,297
2	Lame d'eau précipitée Croûtes sédimentaires	0,392
3	Lame d'eau précipitée Croûtes sédimentaires Diamètre mini non scellé	0,420
Traces de roue		
Etape	Variables introduites	R²
1	Lame d'eau précipitée	0,299
2	Lame d'eau précipitée Couverture par résidus	0,442
3	Lame d'eau précipitée Couverture par résidus Nombre de trous	0,505

Le cas de la ligne de semis est intéressant. Au cours des descriptions d'EDS précédant les épisodes ruisselants, nous avons mis en évidence que la ligne de semis présente une aptitude importante à la formation du ruissellement :

- L'infiltrabilité est réduite par la présence massive de croûtes, notamment sédimentaires ;
- La détention superficielle est pratiquement inexistante car le microrelief dépasse rarement les 2 mm ;
- Il y a peu de possibilités de frein à l'écoulement en raison de la faible présence d'obstacle (couverture par les mottes et les résidus <10%).

C'est ce qu'on pourrait appeler le « **paradoxe de la ligne de semis** » : elle présente une forte aptitude au ruissellement, mais possède une puissance explicative faible concernant la variabilité du ruissellement. Ce paradoxe s'explique par le fait que **la ligne de semis présente un EDS similaire aussi bien en contexte conventionnel qu'en non-labour** ; à l'exception du semis-direct où la couverture en résidus atteint largement les 30%.

Ce point fait écho aux résultats du chapitre précédent lors de l'étude des EDS au stade final, où la dégradation par les précipitations étaient au maximum (*cf.* chapitre 3 §3). Les EDS relevées lignes de semis travaillées en contexte conventionnel et de TSL avait été classées dans le groupe présentation la dégradation de surface la plus importante, caractérisée par une extension des croûtes sédimentaires supérieure à 50% et une HSF moyenne inférieure à 2 mm.

2.5. Synthèse : caractéristiques des épisodes déclenchants et performances des TSL

Les mesures effectuées en 2004 et 2005 montrent une réduction nette du ruissellement et de l'érosion, aussi bien en TSL et *a fortiori* en semis direct. Le ruissellement est réduit d'un facteur 2 à 5 selon les épisodes, et l'érosion d'un facteur 10. Hormis sur le site de Landser, les valeurs de ruissellement et de pertes en terre présentent peu de variations entre les couples de parcelles expérimentales. Cependant, les résultats présentés ci-dessus demandent quelques précisions et nuances.

► Les épisodes pluvieux déclenchants

La régression met en évidence le rôle premier de la lame ruisselée. Les épisodes ayant déclenché la formation de ruissellement possèdent des **caractéristiques très similaires** (tableau 4.4). Il s'agit d'épisodes brefs (<1/4 h), à la lame d'eau faible (7,3 mm) mais à l'intensité élevée (34,3 mm/h en moyenne, avec un minimum de 20,8 mm/h). Il s'agit d'épisodes représentatifs des conditions alsaciennes, c'est-à-dire des épisodes courts et localisés pouvant survenir plusieurs fois par an. A titre de comparaison, sur une durée identique (15 minutes) un épisode quinquennal présente une lame précipitée de 12.9 mm (station de St-Louis, Sundgau) ou de 15.8 mm (station de Strasbourg-Entzheim)¹². Ces épisodes surviennent sur des conditions initiales relativement sèches.

Ces constats permettent d'**expliquer l'absence d'événement ruisselant sur le site de Landser** en 2004. Sur la période de suivis, seuls deux épisodes présentent une intensité supérieure à 10 mm/h :

- le 5 juillet 2005 (lame d'eau : 4.3 mm, intensité moyenne : 17.2 mm/h) ;
- le 8 juillet 2005 (lame d'eau : 4 mm, intensité moyenne : 24 mm/h).

La lame d'eau de ces épisodes est plus faible que celle enregistrée lors des épisodes du tableau 4.1. Il est possible que cette faible quantité de pluie soit d'une part interceptée par la végétation en place (quasiment à terme en juillet) et d'autre part retenue par le sol lors des processus d'imbibition et de détention superficielle.

¹² Les calculs sont réalisés sur la période 1968-2005 (Météo-France).

Tableau 4.4 – Caractéristiques des épisodes pluvieux ayant provoqué du ruissellement

	Site	Date	Précip. antérieures 48h (mm)	Lame précipitée (mm)	Durée (mn)	Intensité moyenne (mm/h)
2004	Neewiller	13/06/2004	7,3	7	10	42
	Neewiller	11/07/2004	1,4	6,6	10	39,6
	Neewiller	24/07/2004	0,2	8	15	32
2005	Neewiller	06/06/2005	2,2	6,8	15	27,2
	Landser	07/06/2005	2,4	5,2	15	20,8
	Neewiller	25/06/2005	0,0	7,8	10	46,8
	Neewiller	06/07/2005	0,4	5,9	10	34,8
	Landser	12/07/2005	lacune	7,2	15	32
	Landser	29/07/2005	0,2	11,3	20	33,9
	Moyenne			7,3	13,3	34,3
	Ecart-type			1,7	3,5	7,8

Si l'intensité de ces épisodes suffit à créer du ruissellement localement, la lame d'eau précipitée reste faible comparée aux épisodes ayant provoqué des inondations boueuses. Le rapport météorologique joint aux demandes de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle estime les propriétés de l'épisode pluvieux. Ces données sont peu précises, les communes étant rarement équipées de pluviomètres de référence. Les estimations faites à partir de données Radar ou des mesures sur place font état de lames d'eau précipitées comprises entre 30 et 60 mm sur une heure (Heitz, 2004; Guyonnet, 2005). **Les épisodes ruisselants mesurés sur le terrain ne sont donc pas complètement représentatifs de ceux qui déclenchent des inondations boueuses.**

Par ailleurs, l'intensité fournie par les pluviographes mécaniques utilisés reste une mesure moyennée sur la durée de l'épisode pluvieux. Ces dispositifs ne permettent pas de caractériser finement les intensités maximales survenant au cours d'un épisode pluvieux (intensité maximale au pas de temps 6 minutes, par exemple). Plus encore que pour les lames d'eau ruisselées, les intensités maximales des épisodes ayant provoqué des inondations boueuses sont très rarement disponibles mais font souvent état de valeurs atteignant 100 mm/h (Guyonnet, 2005; Van Dijk *et al.*, 2005).

► La relation entre état de surface et ruissellement

L'**extension des croûtes sédimentaires** est la variable d'EDS expliquant le plus les variations des volumes ruisselés. L'**influence des résidus végétaux sur la réduction du ruissellement** est très nette. La réduction est d'autant plus importante quand la couverture par les résidus dépasse les 30%. En revanche une couverture de 10-15% peut amener à des coefficients de ruissellement proches des situations conventionnelles.

Le **coefficient de ruissellement ne diminue pas avec l'évolution du couvert végétal**. Quand la plante dépasse les 2 mètres (à partir du mois de juillet), elle couvre la surface. Or, la structure de la plante fait que les précipitations interceptées ruissellent sur les feuilles et sont canalisées vers la tige de

la plante. Le couvert végétal, quand il atteint son terme, **stabilise la dégradation structurale** car les pluies atteignent le sol avec une énergie cinétique considérablement réduite. Cependant, si les coefficients de ruissellement présentent des valeurs identiques entre les épisodes où le sol est à nu ou au contraire complètement couvert, nous ne disposons pas des données concernant le **débit** de collecte du ruissellement. Or cette information est capitale pour déterminer le risque de formation d'une inondation boueuse.

Concernant le fonctionnement hydrologique à l'échelle de la parcelle expérimentale de 22 m², la régression indique que les meilleures explications de variance des volumes ruisselés sont obtenues en utilisant les EDS des interrangs et des traces de roue. Cependant, ce sont les lignes de semis qui présentent les caractéristiques d'EDS les plus aptes à ruisseler, aussi bien en contexte conventionnel que TSL (hors semis-direct). On peut donc en conclure que **les lignes de semis fournissent un « fond de ruissellement » qui est au commun aux pratiques et que c'est l'EDS des interrangs et des traces de roue qui conditionne la variation des volumes ruisselés.**

L'objectif de la partie suivante est de confirmer cette hypothèse en réalisant, toujours sous pluies naturelles, des mesures de ruissellement centrées à l'échelle du motif.

3. Mesures de ruissellement et d'érosion à l'échelle du motif

Des mesures de ruissellement à l'échelle du motif ont également été réalisées sur le site de Landser en 2005. Celles-ci visaient à compléter les informations fournies par les parcelles expérimentales de 22 m² afin d'identifier si certains motifs contribuaient plus au volume ruisselé que d'autres. Cependant, en raison de difficultés techniques (*cf.* chapitre 2 § 4.2), seules les données faisant suite à l'épisode orageux du 12 juillet 2005 sont disponibles. Il s'agit d'un épisode d'une lame d'eau précipitée de 7,2 mm et d'une intensité moyenne de 28,8 mm/h. Cet épisode est survenu après 123,8 mm de précipitations cumulées depuis le semis.

La surface est caractérisée par un aspect relativement lisse (tableau 4.5) : il n'y a quasiment plus de mottes supérieures à 2 cm, la HSF est très faible en TSL et nulle en labour. Les croûtes structurales sont bien développées et la formation antérieure de ruissellement a provoqué la formation de croûtes sédimentaires sur les lignes de semis et les traces de roue. La végétation dépasse les 2 mètres de hauteur et couvre une partie importante de la surface, notamment les lignes de semis.

De manière synthétique, hormis la présence de résidus et une HSF légèrement plus élevée, les EDS sont assez proches au sein des deux techniques culturales.

Tableau 4.5 – Etats de surface précédant l'épisode du 12 juillet 2005

Technique culturale	Motif	Couvert mottes >2cm (%)	Croûte structurale (%)	Croûte sédimentaire (%)	Couvert végétation (%)*	Couvert mulch (%)	HSF moy. dir. écoulement (mm)
Labour	Interrang	0,0	90,0	0,0	40,0	0,0	1,0
	Ligne de semis	0,0	35,0	27,5	80,0	0,0	1,0
	Trace de roue	0,0	55,0	45,0	50,0	0,0	1,0
TSL	Interrang	7,5	82,5	5,0	50,0	25,0	4,5
	Ligne de semis	0,0	40,0	0,0	90,0	17,5	2,5
	Trace de roue	0,0	70,0	30,0	50,0	15,0	3,0

* Le relevé d'EDS précédant cet épisode orageux date du 16 juin 2005 (pcum=81 mm). Pour tenir compte de la croissance de la végétation, la valeur de couverture par la végétation est celle mesurée le lendemain de l'épisode.

Les résultats (tableau 4.6) indiquent que les coefficients de ruissellement sont inférieurs dans le cas de la modalité TSL. Cependant, il existe des tendances similaires entre les deux techniques de cultures :

- Le coefficient de ruissellement est quasi nul sur les interrangs ;
- Les coefficients les plus élevés sont observés sur les lignes de semis ;
- Les coefficients de ruissellement présentent une situation intermédiaire sur les traces de roue.

Les valeurs d'érosion sont très faibles et ne dépassent pas 0,04 t/ha. Elles correspondent aux valeurs enregistrées sur les parcelles expérimentales de 22 m² mitoyennes.

Tableau. 4.6 - Mesures de ruissellement et d'érosion à l'échelle du motif (épisode du 12 juillet 2005)

Coefficient de ruissellement (%)			
Technique culturale	Motif	Min	Max
Labour	Interrang	<1	<1
	Ligne de semis	11	15
	Trace de roue	6	7
Charrue Express Perrein	Interrang	0	0
	Ligne de semis	3	11
	Trace de roue	2	5

Erosion (t/ha)			
Technique culturale	Motif	Min	Max
Labour	Interrang	0,02	0,02
	Ligne de semis	0,03	0,04
	Trace de roue	0,01	0,01
Charrue Express Perrein	Interrang	0	0
	Ligne de semis	< 0,01	< 0,01
	Trace de roue	<0,01	0,02

C'est sur les lignes de semis et traces de roue, qui présentent l'extension la plus importante des croûtes sédimentaires, que les volumes ruisselés sont les plus élevés. Ceci souligne le rôle de la croûte sédimentaire sur la réduction de l'infiltrabilité de la surface. Cependant, on note que malgré des extensions de croûtes sédimentaires et un microrelief identique entre ligne de semis et traces de

roue, les coefficients de ruissellement sont supérieurs au sein des lignes de semis. Cette différence s'explique sans doute par l'important développement de la végétation qui intercepte et canalise les précipitations vers les pieds du maïs.

Ces résultats posent deux questions :

- A la différence des lignes de semis et des traces de roue, les interrangs ne sont pas un motif en dépression pouvant « canaliser » facilement le ruissellement. Ainsi, il est fortement possible que le ruissellement généré par les interrangs soit collecté par les lignes de semis mitoyennes. C'est sans doute ce qui pourrait expliquer l'absence de ruissellement sur les interrangs.
- Dans l'éventualité où tout le ruissellement est généré et collecté par le même motif, il est possible qu'une partie du ruissellement soit freiné en surface et ne puisse pas atteindre le point de collecte. La longueur contribuant au ruissellement collecté dans les cuves serait donc plus faible que les 10 mètres de longueur du dispositif expérimental. Cet aspect contribuerait à fausser les coefficients de ruissellement présentés dans le tableau 4.6.

C'est l'objectif des expérimentations suivantes qui visent à étudier l'aptitude des EDS à propager le ruissellement vers l'aval.

4. Propagation du ruissellement

Les résultats précédents montrent de quelle manière les EDS influencent la **formation** d'une lame d'eau ruisselée. Cependant, ils ne permettent pas de mettre en évidence le rôle des EDS sur la **propagation** du ruissellement vers l'aval. L'objectif est ici d'étudier ce que devient le ruissellement après sa formation et d'observer dans quelle mesure les EDS contribuent à freiner ou, au contraire, à favoriser le transfert de ruissellement vers l'aval. Cette information sur les processus est importante car, elle permet :

- de relativiser les résultats obtenus sur les parcelles expérimentales de 22 m² : certains motifs collectent-ils le ruissellement ?
- de mieux comprendre les volumes ruisselés en TSL : les volumes ruisselés sont-ils plus faibles car le ruissellement est freiné et stocké lors de son parcours vers l'aval ?

Cette partie présente les résultats obtenus lors des mesures de propagation du ruissellement. Pour mémoire, le protocole consiste à réaliser au préalable une observation de surface, puis un **déversement artificiel de ruissellement** à l'échelle du motif. Après 30 minutes de déversement, la distance parcourue par le ruissellement est mesurée. Ces expérimentations ont été opérées à 3 stades pluviométriques distincts (0 mm, 67 mm et 120 mm) et sur 2 techniques culturales (labour et TSL (ici, un chisel)).

Les résultats seront présentés au fil des différents stades pluviométriques. Dans un premier temps, les EDS précédant l'expérimentation seront détaillés avant d'analyser leur effet sur les distances parcourues par le ruissellement. Dans un deuxième temps, la régression multiple sera utilisée pour observer dans quelle mesure la variabilité des EDS explique la variabilité des distances parcourues

4.1. Résultats

4.1.1. Premier stade pluviométrique (0 mm)

Les premières observations (tableau 4.7) ont été réalisées sur des parcelles présentant une structure de la surface très fragmentée : la couverture en croûte structurale n'est que partielle (<30%). L'état de surface est également très grossier : les interrangs et les traces de roue sont couverts de mottes supérieures à 2 cm (le taux de couverture est compris entre 40 et 50%), à la différence des lignes de semis où la couverture par ces mottes ne dépasse pas 10%. La couverture par la végétation en place est faible (15%) et ne concerne que les lignes de semis. En modalité TSL, la couverture par les résidus végétaux atteint 20 à 30% sur les interrangs et trace de roue, et environ 10% sur les lignes de semis.

Ces résultats coïncident avec des conclusions effectuées lors du chapitre précédent, à savoir, de fortes différences d'EDS entre les lignes de semis et le groupe interrang-trace de roue. La ligne présente un aspect sensiblement moins grossier et moins couvert par les résidus végétaux.

Les mesures ont été réalisées sur des sols secs en surface : l'humidité initiale est comprise entre 3 et 10%.

Tableau 4.7 – Etats de surface et humidité initiale (moyennes des 2 répétitions) au stade 0 mm

Technique culturale	Motif	Couvert mottes >2cm (%)	Croûte structurale (%)	Croûte sédimentaire (%)	Couvert végétation (%)	Couvert mulch (%)	HSF moy. dir. écoulement (mm)	Humidité initiale (%)
Labour	Interrang	45,0	32,5	0,0	0,0	0,0	20,0	5,8
	Ligne de semis	10,0	22,5	0,0	15,5	0,0	10,0	11,5
	Trace de roue	55,0	22,5	0,0	0,0	0,0	15,0	10,8
TSL	Interrang	45,0	40,0	0,0	0,0	30,0	30,0	3,2
	Ligne de semis	10,0	20,0	0,0	17,5	12,5	5,0	4,1
	Trace de roue	35,0	25,0	0,0	0,0	25	20,0	10,7

En contexte conventionnel, la distance parcourue par le ruissellement est inférieure à un mètre, quel que soit le motif considéré (figure 4.4). Il n'existe pas de différence importante entre les trois types de motifs. Ces faibles distances parcourues sont sans doute à mettre en rapport avec une surface fragmentée et donc très infiltrante.

En contexte de TSL, les distances sont plus importantes sur les lignes de semis (3.5 m environ), sans doute en raison de la valeur de HSF la plus faible (5 mm). Comme dans le cas du labour, les

distances mesurées sur les interrangs sont très faibles (<0,5 m). La distance atteint 1,5 m sur les traces de roue, malgré une couverture par les mottes et les résidus importante et un microrelief non négligeable (20 mm).

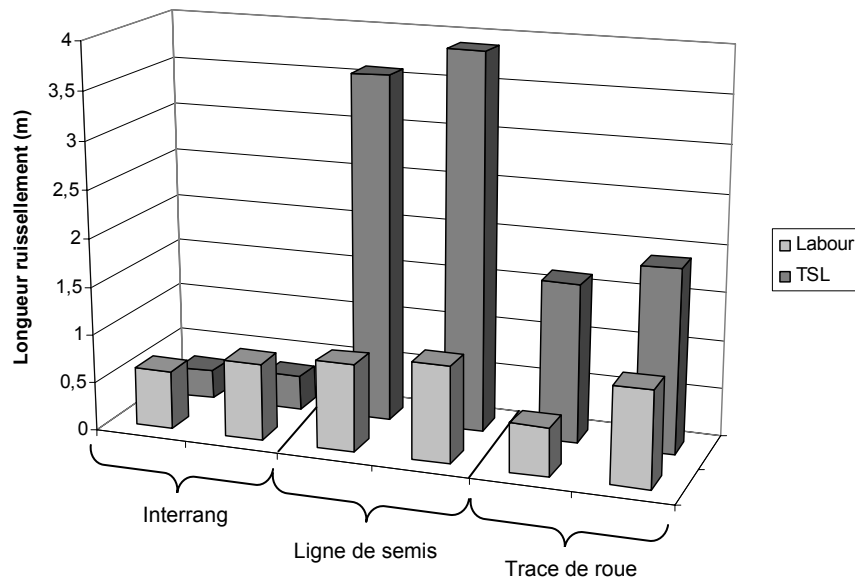


Figure 4.4- Distance parcourue par le ruissellement (m) au stade 0 mm

4.1.2. Deuxième stade pluviométrique (67 mm)

Ce stade est caractérisé par la **présence massive de croûtes structurales** : l'extension de ce type de croûte atteint 100% (tableau 4.8). On observe très localement la formation de croûte sédimentaire sur les lignes de semis en contexte conventionnel. La croissance du maïs reste localisée sur les lignes de semis (couverture de surface comprise entre 10 et 20%). En TSL, la couverture par les résidus est similaire à celle relevée au stade 0 mm. Conséquence de la dégradation structurale, la couverture par les mottes supérieures à 2 cm et la HSF connaissent une diminution par rapport au relevé précédent, sans toutefois modifier la distinction entre les lignes de semis et le groupe interrang-trace de roue.

Les gammes d'humidité initiales sont proches de la première mesure (de 3 à 10%).

Tableau 4.8 – Etats de surface et humidité initiale (valeurs moyennes et écart-type des 3 répétitions) au stade 67 mm

Technique culturale	Motif	Couvert mottes >2cm (%)		Croûte structurale (%)		Croûte sédimentaire (%)		Couvert végétation (%)		Couvert mulch (%)		HSF moy. direction écoulement (mm)		Humidité initiale (%)	
		\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
Labour	Interrang	33,3	5,8	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	15,0	0,0	7,2*	-
	Ligne de semis	0,0	0,0	100,0	0,0	1,7	2,9	21,7	10,4	0,0	0,0	5,0	0,0	4,0*	-
	Trace de roue	18,3	10,4	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	15,0	0,0	10,1	1,0
TSL	Interrang	36,7	15,3	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	35,0	0,0	23,3	2,9	3,4	5,9
	Ligne de semis	10,0	10,0	100,0	0,0	0,0	0,0	11,7	2,9	10,0	0,6	3,0	1,7	10,8	0,5
	Trace de roue	16,7	11,5	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	23,3	0,0	15,0	5,0	8,1	7,2

* Une seule mesure est disponible suite à des problèmes techniques

De manière générale, les distances parcourues par le ruissellement (figure 4.5) sont plus importantes que celles mesurées précédemment. Cependant, à la différence de l'état initial, les distances sont assez similaires entre les deux techniques de cultures :

- les distances les plus importantes sont mesurées sur les lignes de semis où le ruissellement parcourt jusqu'à 4,5 mètres de distance ; ce qui s'explique sans doute par l'absence d'obstacles (pas de mottes, et peu de résidus végétaux) et un microrelief quasi nul ($HSF < 3$ mm).
- les valeurs les plus faibles sont relevées sur les interrangs ;
- sur les traces de roue, le ruissellement parcourt une distance correspondant au double des valeurs mesurées sur les interrangs.

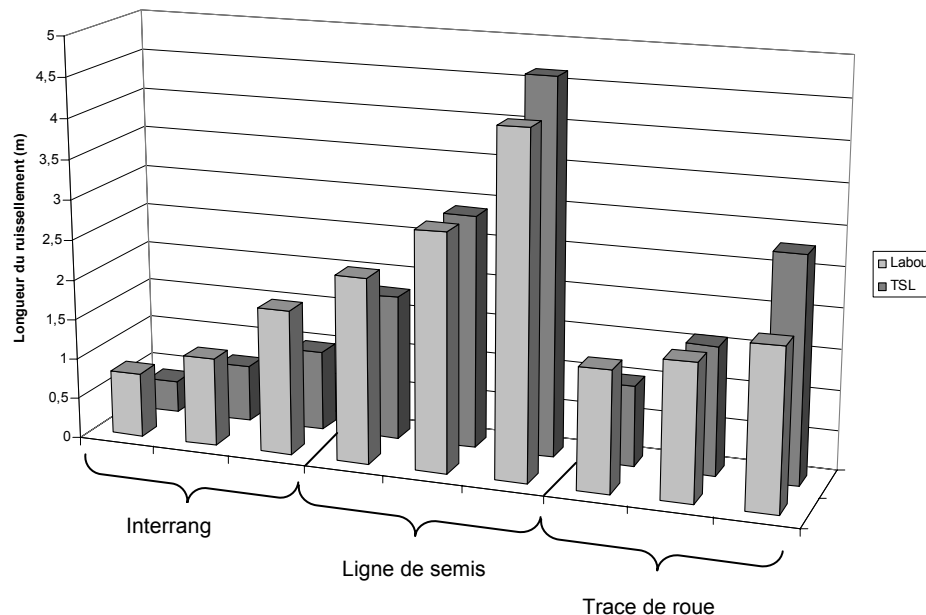


Figure 4.5 - Distance parcourue par le ruissellement (m) au stade 67 mm

4.1.3. Troisième stade pluviométrique (120 mm)

La surface présente une **extension des croûtes sédimentaires** (tableau 4.9), témoin de la formation de ruissellement. Celles-ci sont essentiellement localisées sur les lignes de semis. L'action de la dégradation structurale se poursuit : en comparaison de la première série de mesures, la couverture par les mottes supérieures à 2 cm a été divisée par 3 (<15% sur les interrangs et traces de roue) et le microrelief a diminué d'un tiers à un demi. La couverture par les résidus végétaux reste stable.

Les conditions initiales sont plus humides que les précédentes, l'humidité pondérale étant comprise entre 12 et 20%. Cette humidité plus importante pourrait induire des distances plus longues que précédemment, car une partie de la porosité que remplit le ruissellement est déjà occupée par de l'eau.

Tableau 4.9 – Etats de surface et humidité initiale (valeurs moyennes et écart-type des 3 répétitions) au stade 120 mm

Technique culturale	Motif	Couvert mottes >2cm (%)		Croûte structurale (%)		Croûte sédimentaire (%)		Couvert végétation (%)		Couvert mulch (%)		HSF moy. dir. écoulement (mm)		Humidité initiale (%)	
		\bar{X}	σ	\bar{X}	σ	\bar{X}	σ	\bar{X}	σ	\bar{X}	σ	\bar{X}	σ	\bar{X}	σ
Labour	Interrang	13,3	2,9	98,3	2,9	1,7	2,9	5,0	0,0	0,0	0,0	13,3	2,9	12,1	3,7
	Ligne de semis	0,0	0,0	66,7	5,8	33,3	5,8	50,0	26,5	0,0	0,0	2,0	0,0	14,7	3,9
	Trace de roue	11,7	7,6	100,0	0,0	0,0	0,0	5,0	5,0	0,0	0,0	10,0	0,0	13,4	0,9
TSL	Interrang	15,0	5,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	36,7	0,0	20,0	5,0	17,9	1,8
	Ligne de semis	6,7	5,8	66,7	11,5	33,3	11,5	33,3	23,1	5,0	0,0	3,0	1,7	18,6	2,5
	Trace de roue	8,3	2,9	96,7	5,8	3,3	5,8	3,3	5,8	35,0	6,4	18,3	7,6	20,6	2,7

Les résultats (figure 4.6) indiquent que :

- les valeurs les plus faibles (<1 m) sont, encore une fois, relevées sur les interrangs, aussi bien en contexte conventionnel qu'en TSL ;
- les distances sont légèrement supérieures (<2 m) sur les traces de roue ;
- les distances les plus importantes sont enregistrées sur les lignes de semis où le ruissellement parcourt plus de 10 mètres. A la différence des relevés différents, les distances les plus importantes sont mesurées en contexte conventionnel, où les valeurs sont environ deux fois supérieures à celles mesurées en contexte de TSL.

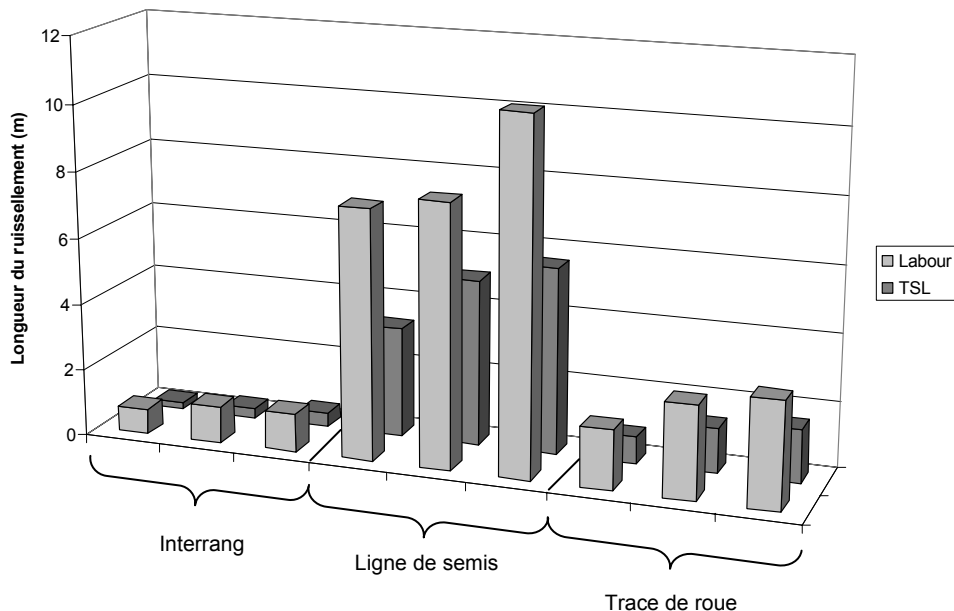


Figure 4.6 - Distance parcourue par le ruissellement (m) au stade 120 mm

4.2. Quelles variables d'EDS influencent la distance parcourue par le ruissellement ?

Une régression multiple ascendante a été appliquée à l'ensemble du jeu de données. L'objectif est d'étudier dans quelle mesure les variables d'EDS qui ont été collectées avant les expérimentations expliquent les variations de la distance parcourue.

La variable dépendante est la distance parcourue par le ruissellement ;

Les variables explicatives utilisées sont :

- La couverture par les mottes supérieures à 2 cm ;
- L'extension des croûtes structurales et sédimentaires ;
- La couverture par la végétation en place et les résidus végétaux ;
- La hauteur moyenne des seuils à franchir dans la direction du ruissellement ;
- Les teneurs en eau pondérale initiales.

Il existe des corrélations importantes entre les différentes variables d'EDS (tableau 4.10) et qui sont détaillées ci-dessous.

Corrélations positives

- La relation entre surface couverte par les mottes supérieures à 2cm et la HSF moyenne paraît cohérente. Une surface très grossièrement affinée a tendance à présenter un microrelief plus important.
- La relation entre HSF moyenne et la couverture en résidus s'explique par le fait que l'estimation de la HSF tient compte de la présence de résidus.
- En revanche le fait que la corrélation entre croûtes sédimentaires et couverture végétale en place soit positive peut surprendre en raison du rôle protecteur joué par le couvert végétal. Elle est liée au fait qu'au début des suivis, la couverture végétale est quasiment égale à zéro et qu'à ce stade, la surface est fragmentée et ne présente donc pas de croûte sédimentaire. En revanche, en fin de suivi, quand la couverture végétale est à son maximum sur la période, les croûtes sédimentaires se sont formées au cours des épisodes pluvieux précédents. C'est pourquoi l'analyse estime que le développement de la couverture végétale favorise la formation de croûtes sédimentaires.

Corrélations négatives

- La relation entre *HSF moyenne* et *croûtes sédimentaires* nécessite deux remarques. Elle peut traduire le fait qu'une surface rugueuse nécessite des précipitations suffisantes pour voir se former du ruissellement et les croûtes qui en résultent. Elle souligne une évidence également : les croûtes sont caractérisées par leur structure (présence de litages) et également par leur absence de microrelief.
- La relation entre HSF et couverture végétale paraît elle aussi surprenante. En effet, la protection assurée par la végétation en place est censée limiter la dégradation structurale

et par là-même, la diminution du microrelief. L'explication est la même que dans le cas de la relation entre croûtes sédimentaires et couverture par la végétation.

Tableau 4.10 : Corrélations entre les différentes variables d'EDS (les valeurs en gras sont $>|0,4|$)

	Couverture par les mottes > 2cm	Croûtes structurales	Croûtes sédimentaires	Couvert végétation	Couvert résidus	HSF moyenne direction écoulement
Couverture par les mottes > 2cm	1,00	-0,32	-0,35	-0,49	0,21	0,67
Croûtes structurales	-0,32	1,00	-0,13	-0,09	0,16	-0,04
Croûtes sédimentaires	-0,35	-0,13	1,00	0,71	-0,24	-0,53
Couvert végétation	-0,49	-0,09	0,71	1,00	-0,29	-0,65
Couvert résidus	0,21	0,16	-0,24	-0,29	1,00	0,51
HSF moyenne direction écoulement	0,67	-0,04	-0,53	-0,65	0,51	1,00

La régression ascendante (tableau 4.11) indique que deux variables offrent le meilleur compromis entre puissance explicative de la régression et nombre de variables. Il s'agit des *croûtes sédimentaires* et de la *hauteur moyenne des seuils à franchir dans la direction du ruissellement*. Avec l'appui de ces deux variables, il est possible de prendre en compte 72% de la variance des longueurs de ruissellement.

Tableau 4.11 – Résultats de la régression multiple ascendante

Etapes	Variable introduite	R ²
1	Croûtes sédimentaires	0,612
2	Croûtes sédimentaires HSF moyenne dans la direction de l'écoulement	0,720

4.3. Synthèse : le rôle des lignes de semis dans la propagation du ruissellement

Les résultats précédents montrent l'**aptitude importante de la ligne de semis à laisser circuler le ruissellement**. Les distances parcourues par le ruissellement y sont nettement supérieures et augmentent au fil de la dégradation structurale (figure 4.7). La **diminution du microrelief et le développement des croûtes sédimentaires** sont les deux variables qui expliquent le mieux la distance parcourue par le ruissellement. Ces variables font coïncider une très faible infiltrabilité et une détention superficielle quasi-nulle. Comme cela avait montré lors du chapitre précédent, les lignes de semis présentent un EDS fin et peu couvert par les résidus végétaux, et ce, depuis le semis, ce qui les rend très sensibles à la dégradation structurale.

Les variations observées entre technique conventionnelle et TSL interviennent lors du stade le plus dégradé par les précipitations où les distances mesurées en labour sont le double de celles mesurées en TSL.

En revanche, la dégradation structurale a peu d'effet sur les distances parcourues sur les interrangs et les traces de roue, aussi bien en contexte conventionnel qu'en TSL. Ceci s'explique sans doute par un microrelief prononcé (l'état de surface était particulièrement grossier et motteux en début de suivi) ce qui accroît la possibilité de stockage du ruissellement en surface, ralentit considérablement la désagrégation structurale et donc permet à la surface de conserver une infiltrabilité importante.

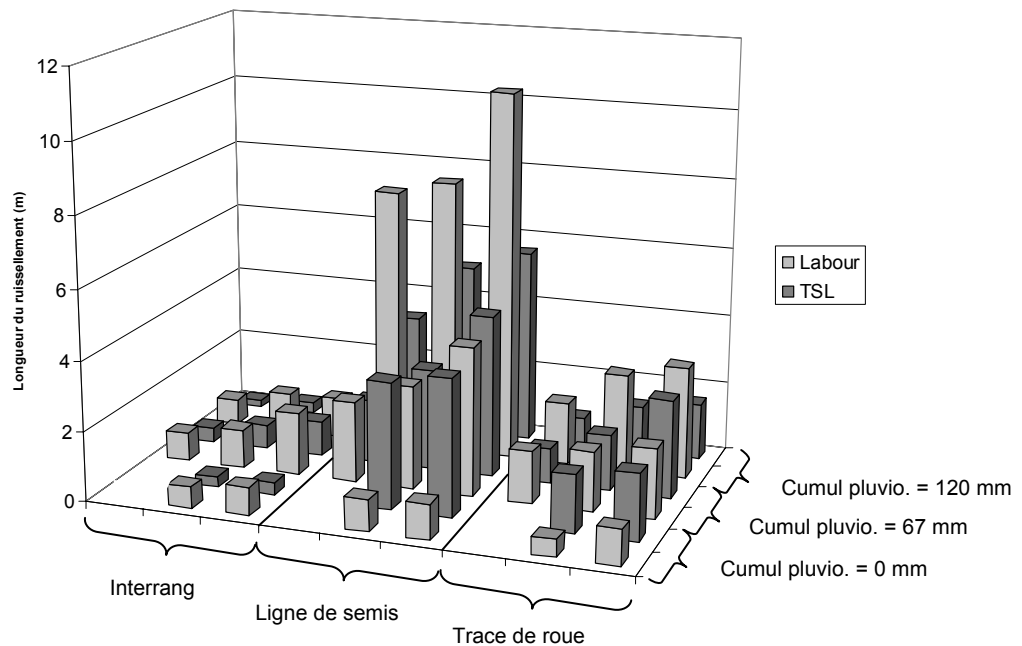


Figure 4.7 – Synthèse : distance parcourue par le ruissellement (m) au cours des 3 stades pluviométriques

5. Effets de la répartition spatiale des résidus végétaux sur le ruissellement

La simulation de pluie a été utilisée pour tester cinq répartitions des résidus végétaux, en maintenant une couverture de surface équivalente (30%). Les simulations ont été réalisées sur des placettes ayant reçues 109 mm de précipitations cumulées depuis le semis. Ces précipitations ont provoqué la formation de croûtes structurales sur l'ensemble des placettes (tableau 4.12). En revanche, on constate une absence de croûtes sédimentaires. La dégradation structurale est également marquée par une faible couverture par les mottes supérieures à 2 cm. La surface est plus lisse en labour (HSF = 2 mm) et plus importante en TSL (5-8 mm).

L'humidité pondérale est comprise entre 6 et 11%, c'est-à-dire un état initial relativement sec et on constate peu de variations entre les techniques culturales. Les placettes sont également caractérisées par une absence de fentes en surface.

Tableau 4.12 – Moyennes des observations d'EDS et humidité gravimétrique avant simulation

	Couvert mottes >2cm (%)	Diamètre mini. non scellé (mm)	Croûte structurale (%)	Couvert mulch (%)	HSF moy. dir. écoulement (mm)	Nb. macropores	Humidité initiale (%)
Témoin labour	2,5	0,0	100,0	2,0	2,0	1,0	9,2
Broyage sous bec + spécifique	7,5	6,0	80,0	30,0	5,0	5,0	9,6
Broyage sous bec	10,0	2,0	65,0	42,5	6,0	9,0	11,6
Résidus en aval	15,0	2,0	40,0	32,5	5,0	4,0	6,7
Résidus en amont	7,5	3,0	60,0	30,0	8,0	5,0	9,6

Les résultats (figure 4.8) indiquent une diminution importante du coefficient de ruissellement entre les placettes travaillées en labour et celles travaillées en TSL. Cette différence peut s'expliquer par les différences de couverture en résidus végétaux entre les techniques conventionnelles et non-labour. Cependant, au sein des différentes modalités TSL, il n'existe pas de différences de coefficient de ruissellement. En labour, le ruissellement est intervenu après 1'30, en TSL, au bout de 4 à 5 minutes.

Nous attendions notamment des différences importantes sur les modalités où les résidus sont placés sur le haut ou le bas de la placette. Ces modalités avaient été mises en place afin de tester si le mulch constitue des zones de réinfiltration du ruissellement émis par des zones nues situées en amont. Ainsi, la placette où les résidus sont placés vers le haut était supposés ruisseler de façon plus importante, car les 2/3 aval de la placette étaient nus et présentaient un développement des croûtes structurales. A l'inverse, la placette où les résidus étaient situés sur le 1/3 aval était censée peu ruisseler en raison du captage du ruissellement par les résidus.

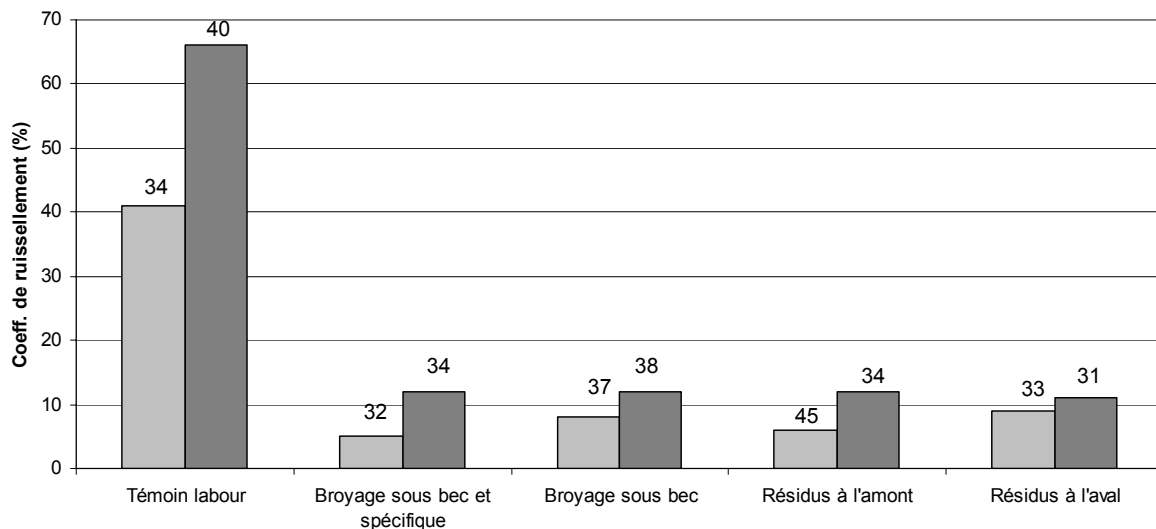


Figure 4.8 – Coefficients de ruissellement obtenus lors des simulations de pluie (les valeurs au-dessus des barres indiquent l'intensité obtenue (mm/h) ; pour mémoire, l'intensité espérée était de 35 mm/h)

Les seules différences d'EDS entre les parcelles en labour et en TSL, hormis la présence des résidus végétaux, sont, dans le cas des TSL, une HSF un peu plus élevée et quelques macropores d'origine biologique. Ces différences sont peu importantes et permettent difficilement d'expliquer de telles différences dans les coefficients de ruissellement. Le début de la phase ruisselante étant intervenu après quelques minutes, il est exclu que ces différences soient liées au fait que le ruissellement n'ait été généré uniquement en fin d'expérimentation, en raison d'une détention superficielle importante.

Les causes de ces différences sont probablement liées aux propriétés hydrodynamiques de la surface, qui pourrait être plus infiltrante en contexte de TSL. Cependant, le fait qu'aucun ruissellement n'ait été généré sur les zones non couvertes par les résidus en TSL suggère que les propriétés hydrodynamiques de la croûte, qualifiée de « structurale », soient différentes de celles habituellement mesurée en contexte conventionnel.

Conclusion

L'association d'observations de surface et de mesures de ruissellement sous pluies naturelles et artificielles permet de répondre aux objectifs suivants :

► Approche fondamentale : mieux appréhender le fonctionnement hydrologique de la surface

Les expérimentations présentées ci-dessus sont complémentaires : elles visent à mettre en relief des processus qui influencent la quantité de ruissellement collecté dans les cuves. Ces processus concernent la formation du ruissellement, sa réinfiltration potentielle et la distance qu'il peut parcourir. Ces mesures permettent de construire un schéma du fonctionnement hydrologique des parcelles expérimentales de 22 m².

Les résultats obtenus montrent que les **lignes de semis jouent un rôle central sur la formation et la collecte du ruissellement**. Ce rôle est effectif en contexte conventionnel et de TSL. La formation des croûtes sédimentaires y est rapide. Ces croûtes ont pour effet de réduire l'infiltrabilité de la surface ce qui facilite la formation de ruissellement. Elles expliquent également les distances que le ruissellement peut parcourir une fois formé en raison d'un microrelief inexistant. **Il existe donc un volume ruisselé qui est généré préférentiellement sur les lignes de semis et que l'on peut supposer proche en contexte conventionnel et de TSL.**

Ce « fond de ruissellement », à lui seul, n'est pas capable d'expliquer les variations des volumes ruisselés collectés sur le terrain. **Ces différences de ruissellement sont imputables à l'EDS des interrangs et traces de roue.** Les variables d'EDS déterminants la production de ruissellement sont notamment la présence de croûtes sédimentaire, un faible microrelief et une faible couverture en résidus végétaux. Cependant, les distances parcourues par le ruissellement sur ces motifs restent faibles et le rôle des lignes de semis sur la collecte du ruissellement semble être déterminant.

En semis-direct, comme l'avaient montré les résultats présentés au cours du chapitre 3, il n'existe pas d'organisation intraparcellaire des EDS liée au travail du sol. La couverture en résidus végétaux est importante (>50%) sur les trois types de motifs.

► Approche opérationnelle : mesurer les performances des TSL sur la réduction du couple ruissellement-érosion

Les mesures de ruissellement sous pluies naturelles ont mis en évidence l'intérêt des techniques sans labour sur la réduction du ruissellement et de l'érosion. Le ruissellement est réduit d'un facteur deux à cinq et l'érosion d'un facteur cinq à dix (figure 4.9). Ces gammes de réduction indiquent que l'effet des TSL n'est pas homogène. La couverture en résidus végétaux est un élément déterminant en vue de diminuer la production de ruissellement. La réduction ne devient qu'effective que lorsqu'un seuil de 30% de résidus est atteint.

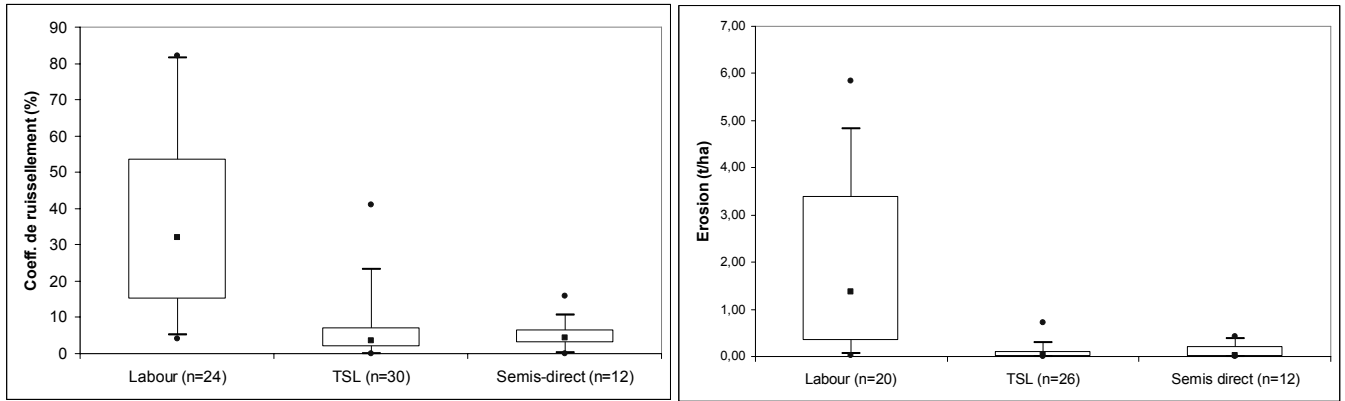


Figure 4.9 – Dispersion des coefficients de ruissellement et des pertes en terres mesurés sur les parcelles expérimentales

Cependant, ces réductions du ruissellement et de l'érosion doivent être nuancées. Ces résultats ont été obtenus suite à des épisodes pluvieux aux caractéristiques similaires mais cependant éloignées des orages pouvant déclencher des inondations boueuses. Les épisodes enregistrés sur les sites expérimentaux présentent des intensités élevées, comprises entre 30 et 40 mm/h, alors que les lames précipitées ne dépassent pas 10 mm. Par ailleurs, la surface de mesure reste limitée (22 m²), et n'est que partiellement représentative des processus hydrologiques existants à l'échelle d'une parcelle agricole complète.

Les informations fournies restent néanmoins intéressantes afin de comparer les techniques entre elles.

Chapitre 5

Mise au point d'un indicateur estimant l'aléa ruissellement

La connaissance des facteurs qui contrôlent l'apparition des croûtes sédimentaires est cruciale. Elle permet d'estimer *a priori* l'aléa d'érosion hydrique liée aux processus de surface. Basées sur ces connaissances, des méthodes existent afin d'évaluer cet aléa érosif, et ce, à des échelles variées :

- à l'échelle départementale (maille de 50m de côté), Le Bissonnais *et al.* (2004) ont mis au point une méthode typologique fondée sur l'occupation du sol, la sensibilité à la battance, de l'érodibilité, de la topographie et l'agressivité des précipitations. L'aléa érosif est ensuite classé en 5 classes ;
- à l'échelle de la parcelle, les travaux de Mosimann et Rüttimann (1996) se basent sur l'USLE (Universal Soil Loss Equation). Cet indicateur permet à un acteur de terrain (gestionnaire de bassin-versant, par exemple) d'attribuer un score correspondant à la probabilité de formation de ruissellement érosif. La méthode prend notamment en compte les techniques de cultures et les auteurs mentionnent qu'en cas de « travail minimal du sol appliqué à l'ensemble de la parcelle, le facteur de risque lié aux pratiques culturales est considérablement réduit ».
- à l'échelle de la parcelle, les travaux de Tribouillard (2004) estiment la quantité de pluie nécessaire à la généralisation des croûtes structurales, puis la généralisation des croûtes sédimentaires (figure 5.1). Il s'agit d'une méthode de type experte qui utilise les données d'observations de surface acquises par Ludwig (1992) dans des bassins versant limoneux du nord de la France. Cet indicateur est intégré à l'indicateur agro-environnemental INDIGO (Bockstaller *et al.*, 2008; Bockstaller *et al.*, 2009) destiné à étudier la durabilité des exploitations agricoles.

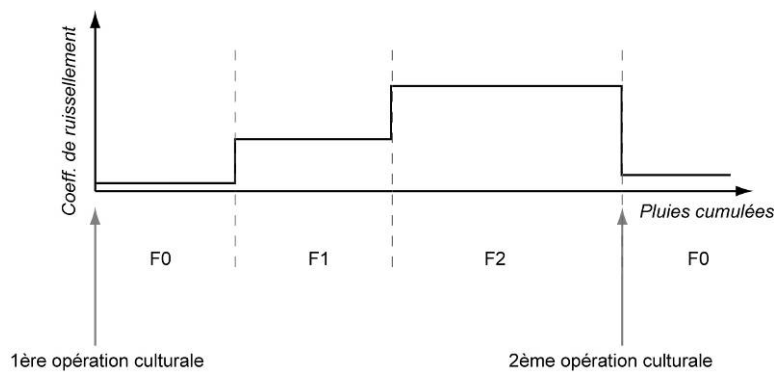


Figure 5.1 – Fonctionnement simplifié de l'indicateur de ruissellement d'INDIGO (Tribouillard, 2004)

Notre travail s'inspirera de cette dernière approche qui offre l'avantage d'estimer la dynamique temporelle des EDS. L'objectif est, à partir des données d'EDS et de ruissellement présentées dans les chapitres 3 et 4 de construire un indicateur estimant les quantités de précipitations nécessaires au développement des croûtes sédimentaires.

1. Quelles connaissances intégrer à l'indicateur ?

Les résultats issus des observations de surface et des mesures de ruissellement présentées au cours des chapitres 3 et 4 permettent de tirer les conclusions suivantes :

- les lignes de semis présentent un EDS proche en contextes conventionnels et de TSL. Il y a donc peu d'intérêt à estimer leur vitesse de dégradation puisque leur contribution au ruissellement global sera sans doute similaire, quelque soit les techniques culturales (en dehors du semis-direct) ;
- en revanche, les interrangs et des traces de roue présentent un EDS souvent similaire. Ces deux motifs expliquent 50% de la variabilité des volumes ruisselés que les lignes de semis (*cf.* chapitre 4). Les interrangs représentant environ 45% d'une parcelle et les traces de roue, 22% ; **l'étude des interrangs paraît plus pertinente** ;
- les croûtes sédimentaires exercent une influence forte sur la quantité de ruissellement généré par la surface du sol. L'analyse des EDS précédant les épisodes ruisselant (figure 5.2, qui reprend les données présentées dans le chapitre 4 §2, *i.e.* les résultats obtenus grâce aux parcelles expérimentales de 22 m²) montre que **les coefficients de ruissellement augmentent significativement quand l'extension des croûtes sédimentaires dépasse 30%** ;

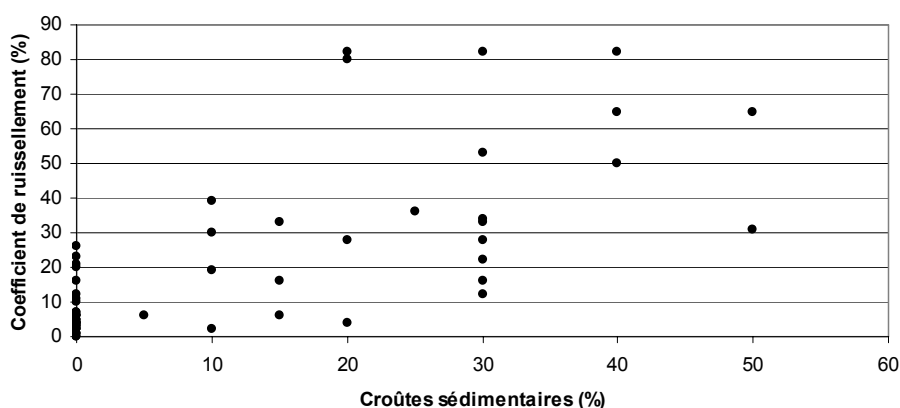


Figure 5.2 – Dispersion des coefficients de ruissellement en fonction des croûtes sédimentaires

- Les résultats du chapitre 4 montrent que plus le taux de couverture en résidus augmente, moins les volumes ruisselés sont importants. C'est pourquoi, **les croûtes sédimentaires, qui témoignent de la formation de ruissellement sont corrélées négativement à la couverture en résidus végétaux** (figure 5.3). Passé un seuil de 30%, les résidus végétaux limitent fortement l'extension des croûtes sédimentaires.

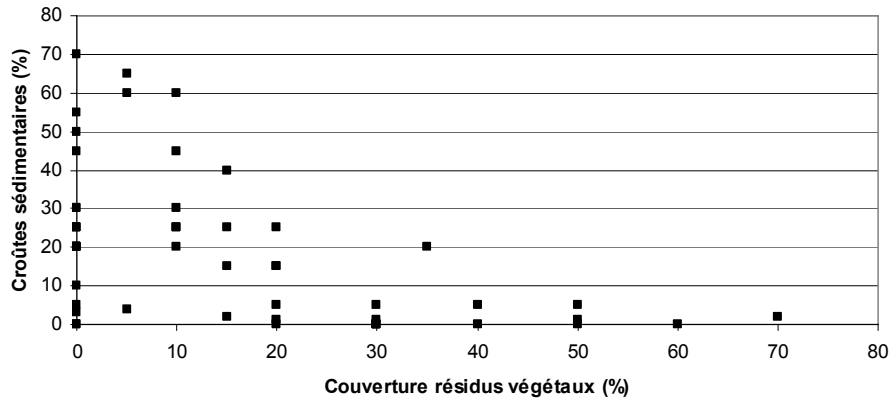


Figure 5.3 – Couverture par les résidus en fonction des croûtes sédimentaires (jeu de données utilisé dans le chapitre 3)

Le principe de l'indicateur sera le même que celui mis au point par Tribouillard (2004). **L'objectif sera d'estimer quel est le cumul de pluie nécessaire pour atteindre le seuil de 30% de surfaces couvertes par les croûtes sédimentaires.** Il s'agit donc d'un outil de type *ex-ante* (Bockstaller *et al.*, 2008; Sadok *et al.*, 2008; Bockstaller *et al.*, 2009) qui permet d'évaluer *a priori* la probabilité d'obtenir du ruissellement à partir de l'EDS observé. Son utilisation est destinée à un public d'experts tels que les conseillers agricoles. Ce type d'indicateur suppose que la dynamique de l'EDS est fonction de :

- des caractéristiques de son EDS initial ;
- des propriétés des pluies dégradant la structure du sol en surface, ce qui se traduit par la présence des croûtes structurales puis sédimentaires.

Nous ne retiendrons pas l'estimation du développement des croûtes structurales pour deux raisons :

- le développement des croûtes structurale est très rapide (<20 mm de pluies cumulées) et l'extension de ce type de croûte ne présente pas de différences entre les différentes techniques culturales. Estimer le cumul de précipitations nécessaire à leur formation serait donc peut intéressant ;
- les régressions multiples réalisées lors du chapitre 4 n'ont pas mis en évidence l'influence de ce type de croûte sur les volumes ruisselés.

La relation entre pluies cumulées et croûtes sédimentaires semble faible : la figure 5.4 montre une **grande variété de situations** On note que certaines placettes présentent un développement des croûtes sédimentaires précoce (à environ 30mm de pluies cumulées). Sur d'autres placettes le développement est plus tardif et nécessite 100 mm de pluies cumulées. Cette dispersion importante des données sous-entend l'intervention d'**autres facteurs** qui doivent pris en compte pour améliorer l'estimation du cumul pluviométrique pour observer la formation de croûtes sédimentaires.

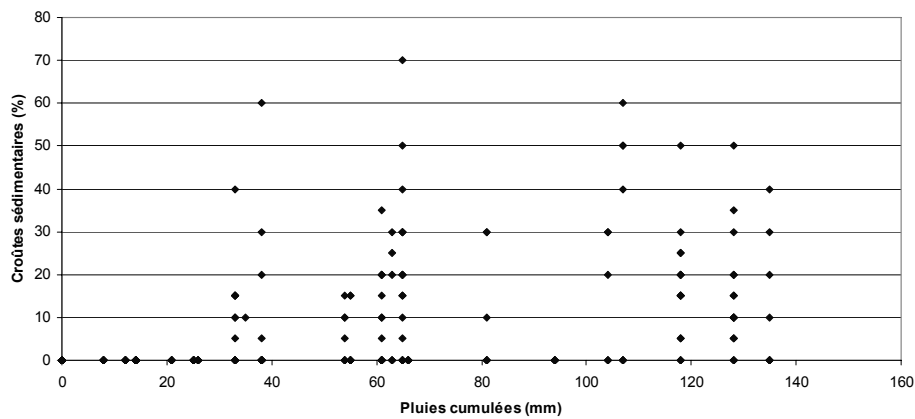


Figure 5.4 – Extension des croûtes sédimentaires en fonction des pluies cumulées

2. Effet de des résidus végétaux

Suite aux résultats du chapitre 4 (cf. § 2), 5 seuils de couverture par les résidus végétaux ont été définis :

- les placettes en labour, caractérisées par l'absence de résidus végétaux ;
- les placettes en TSL, où la couverture en résidus est comprise entre :
 - o 0 et 15 % : c'est fréquemment le cas des déchaumeurs (Landser et Neewiller en 2005) où la couverture en résidus est relativement faible. Les mesures de ruissellement sous pluies naturelles (chapitre 4) montrent que, en contexte de TSL, c'est sur ce type de modalité que les volumes ruisselés sont les plus importants ;
 - o 15 à 30 % :
 - o >30 % qui est un seuil souvent retenu dans la littérature (CTIC, 2000), mais qui correspond également au seuil mis en évidence par la figure 5.3.
- les placettes en semis direct, technique culturale bien spécifique, où la couverture par les résidus dépasse les 50%.

La prise en compte des résidus végétaux (figure 5.3) montre que ces derniers exercent un effet à la fois sur le **cumul de pluie nécessaire à la formation** des croûtes sédimentaires et sur leur extension.

Les placettes en labour présentent un développement précoce des croûtes sédimentaires. Les premières valeurs élevée de croûte sédimentaire (>30% de surface couverte) sont observées dès 35 mm de précipitations cumulées.

Quand la couverture en résidus est inférieure à 15%, on observe un net développement des croûtes sédimentaires (entre 30 et 40% de couverture de la surface totale). Par rapport au labour, les

placettes atteignent ce seuil avec un décalage de 30 mm soit à environ 65 mm de précipitations cumulées.

Quand la couverture par les résidus est comprise entre 15 et 30%, il faut attendre environ 120 mm de précipitations cumulées depuis le semis. Dans ce cas, l'extension des croûtes sédimentaires reste inférieure à 40%.

Au-delà de 30% de couverture par les résidus végétaux, la surface couverte par les croûtes sédimentaires ne dépasse pas 20%. C'est particulièrement visible dans le cas du semis-direct caractérisé par l'absence de croûtes sédimentaires.

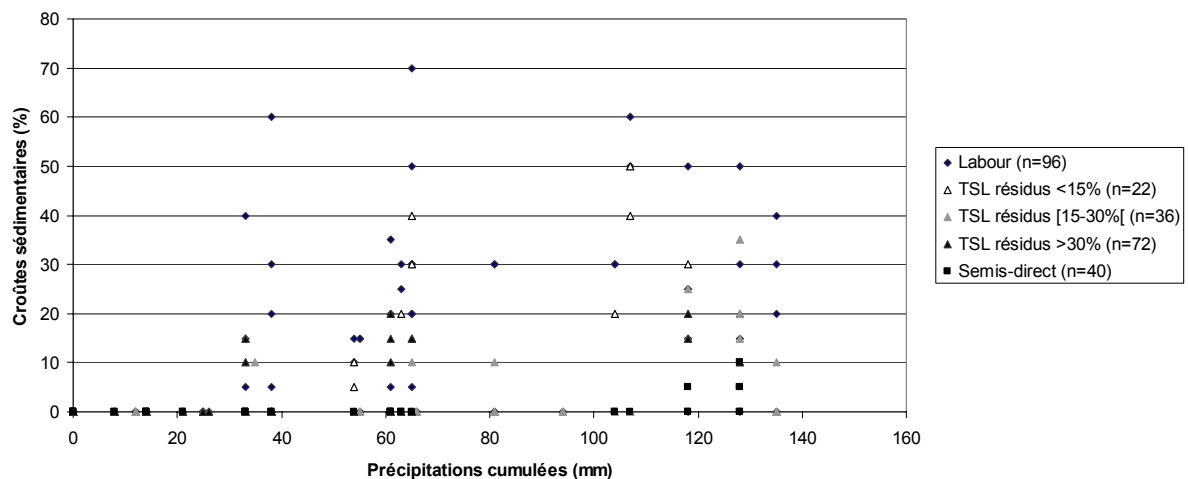


Figure 5.5 – Extension des croûtes sédimentaires en fonction des pluies cumulées et des résidus végétaux

Ces informations permettent construire l'arbre de décision de la figure 5.6. Par manque de temps, cet indicateur est, pour le moment, un indicateur simple car basé sur une seule variable. Cependant, une partie de la variabilité présente au sein de la figure 5.6 montre que d'autres facteurs restent à prendre en compte et parmi eux :

- **l'intensité des précipitations** qui joue un rôle fondamental sur la formation du ruissellement. Le chapitre 4 (§2) a mis en évidence que sous un seuil de 20 mm/h, il n'y a pas de formation de ruissellement et donc absence de croûtes sédimentaires. Ce qui signifie que car le cumul de pluie est un facteur nécessaire mais pas suffisant.
- **l'affinement initial du travail** du sol peut accélérer la dégradation structurale de la surface. Au contraire, une surface très grossière nécessite plus de pluies pour être dégradée.

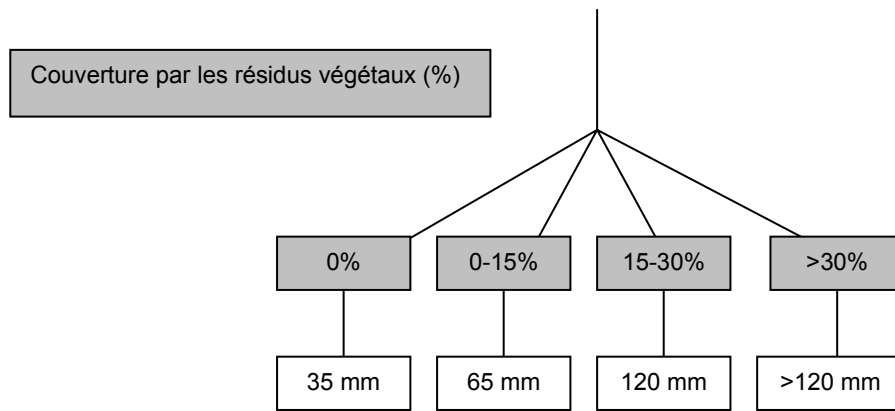


Figure 5.6 – Cumuls de pluie nécessaire pour atteindre 30% de couverture par les croûtes sédimentaires

Chapitre 6

Discussion

Ce travail est ciblé sur les relations entre surface du sol et ruissellement. Il se place dans le prolongement des travaux menés depuis Jean Boiffin (1984), complétés par la suite par des études soulignant la grande variabilité spatio-temporelle des états de surface du sol (EDS), particulièrement sous l'effet des pratiques agricoles (Auzet *et al.*, 1995; Wainwright, 1996; Cerdan *et al.*, 2002a; Martin *et al.*, 2004; Le Bissonnais *et al.*, 2005).

L'originalité de ce travail se situe à différents points :

- une faible ancienneté des techniques culturales étudiées (< 5 ans, lors des observations). Les conclusions du chapitre 1 ont d'ailleurs mis en évidence que, lors des premières années d'utilisation des TSL, la partition ruissellement/infiltration semble essentiellement influencée par les caractéristiques de la surface ;
- une analyse à une échelle de mesure intraparcellaire. Celle-ci tient compte de la présence d'une organisation spatiale liée au travail du sol. Les relevés sont réalisés sur les trois motifs qui composent cette organisation : les interrangs, lignes de semis et traces de roue ;
- des observations détaillées d'EDS réalisées sur 3 saisons de suivis. Il a été choisi d'évaluer finement l'extension des différents types de croûtes, ainsi que le microrelief sans passer par l'utilisation de faciès (Cerdan *et al.*, 2002b).

De manière générale, ce travail confirme l'effet des états de surface du sol (EDS) sur la production de ruissellement. Les EDS et les caractéristiques des épisodes pluvieux permettent d'expliquer environ 50% de la variance des volumes ruisselés. La présence de croûtes sédimentaires, fréquemment rencontrées en contexte conventionnel, apparaît être un facteur déterminant sur la production de ruissellement.

Cette partie apportera un regard critique sur les résultats analysés lors des chapitres 3 et 4. Il s'agit de mettre en perspectives les données de ruissellement et d'érosion au regard d'autres travaux réalisés dans des études similaires.

1. L'effet des pratiques sur la réduction du ruissellement et de l'érosion

1.1. Une réduction du ruissellement et de l'érosion confirmée

Le premier chapitre a montré que l'effet des TSL est avéré sur la réduction de l'érosion (Tebrugge et During, 1999; Holland, 2004; ADEME, 2007). En revanche, la réduction du ruissellement est moins marquée en contexte de TSL (selon la synthèse réalisée par l'ADEME (ADEME, 2007)). Dans certains cas, les volumes ruisselés sont égaux voire supérieurs à ceux mesurés en labour.

Les résultats issus des expérimentations sous pluies naturelles montrent une **réduction nette du ruissellement et de l'érosion**. Selon les épisodes, la réduction de l'érosion s'effectue selon un facteur 5 à 10 ; celle du ruissellement, selon un facteur 2 à 5. Ces résultats conduisent à plusieurs remarques.

Ces données ont été acquises suites à des **épisodes pluvieux similaires**, en termes d'intensité, de lame d'eau précipitée, et de précipitations antécédentes. Ces mesures font suite à des **épisodes de faible ampleur** : la lame précipitée est inférieure à 10 mm et l'intensité moyenne ne dépasse pas 40 mm/h. Il ne s'agit pas d'épisodes à même de pouvoir déclencher une inondation boueuse, *i.e.* dont l'intensité maximale peut atteindre 100 mm/h et la lame d'eau précipitée 30 mm (Auzet *et al.*, 2005a; Guyonnet, 2005; Van Dijk *et al.*, 2005).

A ce titre, il est intéressant de noter la **faible variabilité de la réponse hydrologique de la surface**. La variabilité des volumes ruisselés est relativement faible entre les couples de parcelles expérimentales. Seules deux modalités présentent une variabilité importante (différence de 400%) entre les couples de parcelles expérimentales :

- Neewiller 2005 : modalité déchaumeur ;
- Landser 2005 : modalité labour de printemps.

Dans ces deux cas, ni la variabilité des EDS (*cf.* chapitre 4), ni les variations texturales (les différences du taux d'argile ne dépassent pas 2%) ne permettent d'expliquer les variations. Les dysfonctionnements des dispositifs (pas de trace de fuite ou de stagnation d'eau) et les variations météorologiques (faibles à cette échelle) sont exclus. Cela souligne l'occurrence de processus qui ne sont pas pris en compte par les observations d'EDS.

1.2. Transférer ces valeurs à une autre échelle

Le **choix de l'échelle de mesure** implique des conséquences importantes sur l'interprétation des données collectées. Comme le montre Lecomte (1999), une échelle restreinte (m²) permet de maîtriser les différents facteurs qui influencent la formation du ruissellement. Les variables relatives à la texture, la météorologie, la pente, les techniques culturales, *etc.* subissent peu de variations à cette échelle. En revanche, travailler sur une surface aussi restreinte réduit le nombre de processus liés à la

complexité des bassins versants (rupture de pente, occupations du sol, variations texturales, présence de fossés d'écoulement, *etc.*)(Bloschl et Sivapalan, 1995). C'est pourquoi, il est nécessaire d'étudier les données fournies par les parcelles expérimentales de manière critique afin de répondre à cette question : **quels processus expliquent les volumes ruisselés et les pertes en terre ?**

Les **coefficients de ruissellement** mesurés en contexte conventionnel sont souvent considérables : ils peuvent atteindre 50%. Il s'agit de valeurs comparables à celles mesurées par Cerdan *et al* (2001) ou Evrard *et al.* (2008) obtenus sur des placettes de simulations. Comme le montrent Le Bissonnais *et al.* (1998), les coefficients de ruissellement varient peu entre 1 et 20 m². Cependant, le saut d'échelle entre la parcelle expérimentale de 22m² et la parcelle agricole dans sa totalité (un ou plusieurs hectares) est plus délicat. Selon Le Bissonnais *et al.* (1998), la présence d'éléments recréant de l'infiltrabilité (fentes, pores) où l'augmentation de la hauteur de lame ruisselée permettant le contact avec des éléments poreux (mottes) sont des facteurs qui expliquent la diminution du coefficient de ruissellement avec l'accroissement de la surface considérée. Sous pluies naturelles, les mêmes auteurs observent que les coefficients de ruissellement sont diminués de moitié en passant de 20 à 500 m². **Il faut se garder d'appliquer les coefficients de ruissellement mesurés à la parcelle agricole dans son ensemble.**

A l'échelle des parcelles expérimentales de 22 m², il est possible que le coefficient de ruissellement ne soit pas homogène. Les résultats présentés dans le chapitre 4 (§ 3) vont dans ce sens : les lignes de semis présentent les coefficients de ruissellement les plus élevés. Cependant, ces mesures restent limitées à un seul épisode pluvieux. Sous pluies simulées, Evrard *et al.* (2008) mesurent des coefficients de ruissellement très élevés (90%) sur les lignes de semis. Il est donc envisageable que le ruissellement mesuré sur les parcelles de 22 m² soit en grande partie alimenté par les lignes de semis. Ces travaux corroborent les résultats du chapitre 4 qui montrent que les lignes de semis fournissent sans doute un « fond de ruissellement » commun aux techniques conventionnelles et aux TSL (hors semis-direct).

Les **valeurs de pertes en terre** mesurées sur les parcelles expérimentales de 22m² sont :

- comprises entre 3 et 5t/ha/événement en technique conventionnelle ;
- inférieures à 1t/ha/événement en TSL.

Selon les données européennes synthétisées par Verheijen *et al.* (2009), la vitesse de formation des sols est comprise entre 0,3 et 1,4 t ha/an. Ces valeurs peuvent être considérées comme les pertes en terre annuelles tolérables. Ces indications montrent les pertes en sols mesurées en labour sont supérieures aux pertes tolérables. En revanche, en contexte de TSL, il semble que les pertes en sol soient proches de la limite supérieure.

A l'intérieur des parcelles expérimentales, les pertes en sol sont sans doute le fait de processus de type *interrill* (Kinnell, 2005). Les pertes en sol maximales sont enregistrées lors des premiers épisodes, et concernent sans doute des particules détachées au préalable par le splash, *i.e.* des particules détachées et facilement mobilisables. Lors des épisodes suivants, les pertes en sol sont généralement plus faibles (environ 2t/ha en conventionnel). La vitesse de l'écoulement est sans doute

insuffisante pour arracher les particules de sol réorganisées sous formes de croûtes (Chaplot et Le Bissonnais, 2000).

Après les neuf épisodes ayant provoqué du ruissellement, aucune trace d'érosion linéaire n'a été constatée (griffure ou rigole). Pour comparaison, suite à l'orage ayant frappé la commune de Landser en 2001 (Van Dijk *et al.*, 2005), où l'intensité maximale a atteint 100 mm/h, les pertes en terre mesurées sur le terrain ont atteint 35 t/ha. Cette valeur est issue du dimensionnement réalisé *in situ* sur les griffures et rigoles.

Comme dans le cas du ruissellement, la question est de savoir si les valeurs de pertes en terre mesurées sont extrapolables à l'échelle de la parcelle agricole. Il s'agit alors d'estimer la **distance de transport** des particules par le ruissellement. Il paraît peu probable que les 5t/ha/événement mesurées à l'échelle d'une parcelle de 20m² correspondent à la valeur de pertes en terre globales de la parcelle agricole dans son ensemble. Grâce à des suivis menés sur des parcelles expérimentales du même, Parsons *et al.* (2006) montrent que les particules transportées par ce type d'épisode pluvieux parcourent une distance de 7 mètres environ. A l'échelle de la parcelle agricole, les pertes en terre induites par les épisodes ayant produit du ruissellement, sont certainement moins élevées que les valeurs mesurées au sein des parcelles expérimentales.

2. Quels facteurs contrôlent la formation du ruissellement ?

2.1. L'effet des résidus végétaux

Les résultats issus de l'observation des EDS (chapitre 4) confirment le **rôle déterminant de la couverture en résidus végétaux sur la réduction du ruissellement**. Les réductions du ruissellement les plus faibles sont observées dans les cas où la couverture de surface est inférieure à 10% (réduction d'un facteur 2 à 3). En revanche, quand la couverture en résidus dépasse les 30%, la réduction du ruissellement est beaucoup plus importante (facteur 5).

Ces résultats confirment les travaux de Dabney *et al.* (1998), de Wilson *et al.* (2004) et de Kwaad *et al.* (1998) qui ont réalisé des essais sur des TSL sans résidus et mis en évidence des volumes ruisselés nettement supérieurs en contexte de non-labour sans résidus. Kwaad *et al.* (1998) obtiennent même des réductions du ruissellement et de l'érosion sur une modalité travaillée en conventionnel sur laquelle des résidus sont répandus après le semis. **La présence des résidus végétaux sur la surface fait donc partie des conditions nécessaires pour que le ruissellement diminue en TSL**. Ce point doit être souligné, car les résidus végétaux sont désormais perçus comme une matière première pour élaborer des agrocarburants (Lal, 2005). Le développement de ces derniers ne peut donc pas se faire au détriment des premiers.

Cependant, **les observations d'EDS et mesures *in situ* ne permettent pas de dire comment le mulch agit sur la production du ruissellement**. Les simulations de pluie visaient à mettre en évidence

des processus de connectivité des zones produisant du ruissellement. Ces expérimentations, réalisées sur des parcelles présentant un développement des croûtes structurales, supposaient que :

- en conventionnel, la surface soit homogène et nue, caractérisée par une infiltrabilité très limitée (comprise entre 5 et 10 mm/h) ;
- en TSL, la surface soit composée d'un assemblage :
 - o de zones nues, et donc encroûtées et potentiellement ruisselantes ;
 - o de zones couvertes par les résidus où l'état structural de la surface soit préservé et présentant une infiltrabilité potentiellement similaire d'un sol travaillé (environ 40 mm/h).

Cette expérimentation s'inspirait de deux catégories de travaux :

- menés en contexte aride ou semi-aride et à l'échelle du versant (Solé-Benet *et al.*, 1997; Puigdefabregas *et al.*, 1999; Imeson et Prinsen, 2004; Mueller *et al.*, 2007). Ces études ont mis en évidence le rôle de la végétation (sous laquelle l'infiltrabilité est plus élevée) sur la connectivité des zones ruisselantes. Les zones végétalisées sont considérées comme des zones de réinfiltration du ruissellement. Ceci a pour conséquence de déconnecter complètement ou partiellement les zones ruisselantes situées en amont. Même si ces travaux ont été réalisés sur de grandes échelles (versant) et dans des contextes marqués par des intensités pluviométriques violentes (>70 mm/h) et des sols à forte couverture pierreuse ; **ils fournissent des indications sur les processus influençant devenir du ruissellement après sa formation.**
- Réalisés sous nos latitudes et sur des sols limoneux, les travaux menés par Leonard *et al.* (2006) se sont attachés à relier l'infiltrabilité apparente de placettes de 2 m² en fonction des EDS. Ces mêmes auteurs mettent en évidence l'importance du seuil de 50% de couverture par les croûtes sédimentaires. En dessous de ce seuil, la connectivité des croûtes sédimentaires est insuffisante pour que le ruissellement puisse rejoindre le point de collecte : il se réinfiltré dans les zones situées aux environs des croûtes sédimentaires. Il est intéressant de constater que Vansteelant *et al.* (1997), sur des sols situés à proximité du Lac Léman, constate que le ruissellement augmente de manière significative quand la couverture par les croûtes sédimentaires atteint 40%.

L'hypothèse était que la diminution du ruissellement mesurée en contexte de TSL était liée à une connectivité moindre des zones ruisselantes qui empêchait le ruissellement d'atteindre le point de collecte. Cette réduction de connectivité est liée à la présence du mulch. En d'autres termes, toutes les zones nues étaient actives en termes de production de ruissellement, mais seules celles qui étaient connectées au dispositif de collecte contribuaient aux volumes ruisselés. Cette hypothèse n'a pas été confirmée, car les différentes organisations spatiales des résidus végétaux étudiées au chapitre 4 (§5) n'ont pas mis en évidence de différence de ruissellement. En contrepartie, ces expérimentations fournissent des indications sur la relation EDS/ruissellement.

2.2. Relativiser l'effet de la croûte structurale

Les **croûtes structurales** se développent très rapidement. En moins de 20 mm de pluies cumulées depuis le semis, la couverture par ce type de croûte peut-être complète. La régression multiple ascendante effectuée et présentée au cours du chapitre 4 (§ 2) n'a pas retenu les croûtes structurales comme une variable expliquant les variations de volumes ruisselés de manière significative. Notre analyse met en avant le fait que les croûtes structurales se développent massivement au sein des contextes conventionnels. **Elles présentent de ce fait un caractère ubiquiste¹³**, à la différence des croûtes sédimentaires qui restent, elles, très localisées.

Il existe des différences importantes des valeurs d'infiltrabilité attribuées à la croûte structurale. Certains auteurs estiment que la conductivité hydraulique à saturation est inférieure à 10 mm/h (Vandervaere *et al.*, 1997; Cerdan *et al.*, 2001a; Ali, 2008). **Il faut sans doute relativiser cette valeur.** Si elle était avérée, en raison du caractère ubiquiste des croûtes structurales, les volumes ruisselés seraient sans doute considérables. En revanche les travaux de Leonard *et al.* (2006) et Evrard *et al.* (2008) indiquent que l'infiltrabilité des croûtes structurales est sans doute importante. Sous simulation de pluie, Evrard *et al.* (2008) mesurent des taux d'infiltration proches des 40 mm/h.

Ces différences peuvent être attribuées aux méthodes de dépouillement des données, mais de telles différences s'expliquent sans doute par **l'état structural de la subsurface**, comme l'ont montré Léonard et Andrieux (1998) en contexte viticole. Cette hypothèse permettrait d'expliquer pourquoi des EDS similaires peuvent induire des volumes de ruissellement différents.

C'est sans doute ce qui a été observé lors des simulations de pluies présentées au chapitre 5. Il est probable que l'infiltrabilité de la croûte structurale en TSL soit supérieure à celle existant en contexte conventionnel. Ceci permettrait d'expliquer pourquoi les coefficients de ruissellement dépassent les 50% en conventionnel et restent inférieures à 10% dans le cas de la modalité TSL où les 2/3 aval de placettes sont dépourvus de résidus végétaux.

L'étude de la subsurface permettrait également d'approfondir les connaissances disponibles sur le semis-direct. L'absence de travail du sol augmente la densité apparente (chapitre 1 § 3.2.1) et les coupes réalisées sur l'horizon superficiel montrent des différences importantes entre TSL et semi-direct :

- en TSL et en conventionnel : la croûte structurale est très fine (quelques millimètres) et elle correspond à la réorganisation des agrégats sous l'effet des précipitations. Sous la croûte la structure est fragmentée.
- en semis-direct, sous la croûte structurale, la structure apparaît très compacte et massive. A la différence des techniques conventionnelles et de TSL, la croûte structurale n'est plus rompue par le travail du sol et soumise à l'action des éléments.

¹³ Lors de la soutenance, il a été évoqué le cas du semis-direct caractérisé dans les suivis d'EDS (chapitre 3) par la présence de croûtes structurales et l'absence de croûte sédimentaire. En l'absence de travail du sol, il est possible que les croûtes structurales observées sur le terrain soient d'anciennes croûtes sédimentaires ayant évolué vers un nouveau type de croûtes sous l'effet de différents processus.

L'étude de la subsurface permettrait également d'intégrer le **tassement** pouvant survenir et qui ne peut être prise en compte par les observations de surface. Les résultats du chapitre 3 ont montré les faibles différences d'EDS entre les interrangs et les traces de roue. Or le rôle des traces de roue sur la génération du ruissellement est bien connu (Li *et al.*, 2001; Richard *et al.*, 2001; Quinton et Catt, 2004; Li *et al.*, in press). Sa prise en compte permettrait d'améliorer l'estimation de la lame ruisselée, en plus des caractéristiques de l'épisode pluvieux et des EDS (Martin, 1999).

Conclusion générale

L'objectif de ce travail consistait à étudier l'effet des techniques culturales sans labour (TSL) sur les états de surface du sol (EDS) ainsi que leurs conséquences sur la formation du ruissellement. Cette étude se justifie pleinement car le rôle des EDS sur la réduction de l'infiltrabilité de la surface et de la rétention superficielle est désormais reconnu en contexte cultural conventionnel. A ce titre, le rôle des EDS est fréquemment utilisé à des fins de modélisation. En revanche, en contexte de techniques sans labour (TSL), ces informations restent peu disponibles car les investigations sont généralement menées sur le profil de sol. Or, il semble que, lors des premières années d'utilisation des TSL, les processus affectant la surface influencent le plus la partition ruissellement/infiltration.

Cette étude cherchait à répondre à deux objectifs :

- Un **objectif théorique** qui vise à comprendre quels processus, contrôlés par les EDS, peuvent expliquer la variation des volumes ruisselés entre différents contextes (conventionnels et TSL). Il s'agissait notamment d'étudier l'effet de la **variabilité spatiale des EDS à l'échelle intraparcellaire** sur le ruissellement. Cette variabilité spatiale peut prendre une forme organisée, c'est le cas de l'alternance entre trois motifs (interrangs, lignes de semis et traces de roue) créée par le travail du sol. En contexte de TSL, cette variabilité prend un caractère aléatoire lié à la présence de résidus végétaux à la surface du sol. A partir de ces observations, un objectif secondaire a été défini. Il consiste à traduire la connaissance de ces processus sous la forme d'un indicateur estimant l'aléa ruissellement.
- un **objectif opérationnel** qui consiste à vérifier l'efficacité des TSL sur la réduction du ruissellement ;

Les données principales sont issues de campagnes d'observations de surface qui ont été réalisées régulièrement, depuis la période du semis et jusqu'à la couverture complète de la surface du sol par la végétation en place. La spécificité de ce travail a été de prendre en compte l'organisation spatiale des EDS induite par le travail du sol. Ainsi, pour chaque technique culturale étudiée, les EDS respectifs des interrangs, lignes de semis et traces de roue ont été analysés.

Ces observations ont été complétées par des mesures de ruissellement et de pertes en terre réalisées sous pluies naturelles et simulées. Ces expérimentations sont complémentaires et visaient à mettre en évidence les processus de formation et de propagation du ruissellement.

Ces observations et expérimentations ont été réalisées dans deux secteurs de collines limoneuses alsaciennes, régulièrement affectés par des inondations boueuses. Dans ces secteurs, l'érosion hydrique des sols cultivés survient essentiellement au printemps en raison de la faible couverture végétale des sols (les cultures de printemps sont majoritaires) et de l'occurrence d'épisodes orageux caractérisés par des intensités pluviométriques élevées.

Les résultats des observations de surface montrent notamment que **la variabilité d'EDS, entre les techniques de travail du sol, est maximale sur les interrangs et les traces de roue**. Ces deux motifs présentent des caractéristiques de surface souvent similaires, aussi bien en contexte conventionnel que de TSL. En revanche, au sein de ces deux contextes, les lignes de semis présentent un état de surface souvent proche. **Les lignes de semis sont généralement le motif présentant la dégradation de surface la plus avancée** : le microrelief est inexistant et l'extension des croûtes sédimentaires est importante. Ceci résulte d'un EDS initial (correspondant au semis) peu grossier et faiblement couvert par les résidus végétaux (dans le cas des TSL).

Les résultats mettent en évidence l'exception que constitue le semis-direct et cela pour plusieurs raisons :

- les observations de surface n'ont pas révélée d'évolution de la surface sur la période étudiée ;
- on n'observe que très rarement la formation de croûtes sédimentaires, témoin de la formation du ruissellement (cependant, il est probable que ces croûtes se soient formées lors de la transition conventionnel/semis-direct, puis aient évolué différemment par la suite) ;
- en l'absence de travail du sol, il n'existe pas de différences d'EDS entre les différents motifs.

Les résultats issus des expérimentations sous pluies naturelles montrent une **réduction nette du ruissellement et de l'érosion**. Selon les épisodes, la réduction de l'érosion s'effectue selon un facteur 5 à 10 ; et celle du ruissellement, selon un facteur 2 à 5. Cependant, le **domaine de validité** de ces résultats demeure restreint car ces derniers ont été obtenus suite à des épisodes pluvieux de faible ampleur (lame d'eau inférieure à 10 mm) qui ne correspondent pas aux épisodes déclenchant des inondations boueuses. De plus, l'échelle de mesure (22 m²) ne permet pas d'appréhender l'ensemble des processus hydrologiques de surface existants à l'échelle de la parcelle agricole. C'est pourquoi les coefficients de ruissellements sont si importants (50% par exemple) et largement supérieurs à ceux qui peuvent être mesurés à l'échelle de la parcelle agricole. L'absence de rotation des cultures dans les parcelles d'essais et son effet sur les EDS (notamment concernant les résidus végétaux) limite également l'application de ces résultats dans le fonctionnement des exploitations agricoles.

L'étude des EDS précédant les épisodes pluvieux révèle que les interrangs et les traces de roue sont les motifs qui expliquent le mieux (50%) les variations des volumes ruisselés aussi bien en contexte conventionnel que de TSL. En revanche, l'EDS des lignes de semis est rôle joue un rôle prépondérant sur la propagation du ruissellement : c'est sur ce motif que le ruissellement parcourt les distances plus importantes. Dans les deux cas, l'extension des **croûtes sédimentaires** est la variable la plus discriminante.

L'étude des caractéristiques d'EDS et des épisodes orageux ayant provoqué du ruissellement révèle également que :

- la couverture par la végétation en place ne diminue pas le coefficient de ruissellement. Sous maïs, l'interception est faible et la structure de la plante redirige les précipitations vers la tige ;
- En contexte de TSL, la couverture en **résidus végétaux** permet de limiter le développement des croûtes sédimentaires, notamment dès que la valeur seuil de 30% est dépassée. En TSL, les volumes ruisselés les plus importants sont mesurés quand la couverture en résidus végétaux est inférieure à 10% ;
- les résultats des simulations de pluie visaient à mettre en évidence des phénomènes de **faible connectivité** des zones ruisselantes à échelle locale (m²) liée à la présence des résidus végétaux pouvant expliquer les faibles volumes ruisselés en TSL. Les résultats ne permettent pas de valider une telle hypothèse, les volumes ruisselés ayant été trop faibles, sans doute en raison d'une intensité pluviométrique (35 mm/h) inférieure à l'infiltrabilité de la surface ;
- il existe un seuil d'intensité pluviométrique moyenne (20 mm/h) sous lequel il n'y a pas formation de ruissellement.

L'**indicateur** développé à l'issue de ce travail intègre ces connaissances. Il fonctionne à l'échelle de la parcelle et permet d'estimer les quantités des précipitations nécessaires pour observer la formation de croûtes sédimentaires. L'estimation se base les caractéristiques initiales de la surface (résidus végétaux, couverture par les mottes >2cm) et sur le cumul de précipitations depuis le semis. Il souligne l'importance de la prise en compte de l'intensité des précipitations sur la dynamique temporelle des EDS.

Perspectives

Ce travail confirme l'influence des EDS sur la formation du ruissellement, des pistes de recherches permettraient toutefois d'approfondir certains résultats.

D'un point de vue théorique, les perspectives portent sur des éléments qui améliorent l'explication des volumes ruisselés. Les EDS et la lame précipitée n'expliquent que 50% de la variation des volumes ruisselés ce qui laisse penser que d'autres facteurs entrent également en jeu. L'**état structural de la subsurface** est sans doute déterminant et permettrait d'expliquer des différences de volumes ruisselés obtenus sur des EDS similaires. C'est notamment le cas des surfaces caractérisées par une extension complète des croûtes structurales.

Enfin, alors que les résidus végétaux jouent un rôle déterminant sur la réduction du ruissellement, les processus induits par leur présence restent peu connus. Il serait intéressant d'investiguer l'**effet des résidus sur l'infiltration en surface**, notamment l'imbrication des résidus par rapport à la croûte en place.

D'un point de vue opérationnel, les perspectives sont les suivantes :

- un des objectifs de ce travail était de comparer des différences d'EDS sur des sols aux textures semblables (argiles <15%). Or dans le contexte alsacien, il existe des secteurs où les sols limoneux présentent une **teneur en argile de l'horizon de surface plus importante** pouvant atteindre 30%. Une telle teneur sous-entend une stabilité structurale plus importante. Pourtant, de tels secteurs (Ettendorf, dans les collines de Brumath, au nord de Strasbourg, par ex.) sont concernés par des inondations boueuses fréquentes. Des observations d'EDS associées à des collectes de ruissellement sous pluies naturelles seraient pertinentes et pourraient être comparées aux données de ruissellement acquises dans ce travail.

Une autre perspective serait de mener des simulations de pluie où les caractéristiques de l'épisode simulé se rapprocheraient de celles des **épisodes déclenchant des inondations boueuses** (*i.e.* intensité maximale >100 mm/h et lame précipitée >30 mm). L'objectif sera alors de vérifier si la réduction du ruissellement, telle qu'elle a été mesurée dans ce travail, est conservée suite à des épisodes de plus grande ampleur.

Références bibliographiques

- Abrahams, A.D., Parsons, A.J. and Wainwright, J.**, 1994. Resistance to overland flow on semiarid grassland and shrubland hillslopes, Walnut Gulch, Southern Arizona. *Journal of Hydrology*, 156: 431-446.
- ADEME**, 2007. Évaluation des impacts environnementaux des Techniques Culturelles Sans Labour (TCSL) en France, 390 p.
- Aerrola Tosdado, J.**, 1996. Etude et modélisation de l'effet des paillis sur le bilan hydrique - Le cas du semis direct sous paillis au Mexique. Mémoire de DEA, CIRAD - Montpellier. 82 pp.
- Al-Durrah, M.M. and Bradford, J.M.**, 1982. The mechanism of raindrop splash on soil surface. *soil Science Society of America Journal*, 46: 1086-1090.
- Ali, B.**, 2008. Typologie fonctionnelle des états de surface du sol (EDS) pour l'extrapolation des propriétés hydro-érosives. Thèse de doctorat, IMFS, ULP (Strasbourg). 206 pp.
- Ambroise, B.**, 1999. La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant - Processus, Facteurs, Modèles - . *H*G*A* Bucarest, 200p p.
- Ambroise, B.**, 2004. Variable "active" versus "contributive" areas or periods: a necessary distinction. *Hydrological Processes*, 18: 1149-1155.
- Anken, T. et al.**, 2004. Long-term tillage system effects under moist cool conditions in Switzerland. *Soil & Tillage Research*, 78(2): 171-183.
- Armand, R.**, 2003. Risque de ruissellement des terres agricoles et techniques culturales simplifiées: évaluation par les états de surface du sol. Application au suivi d'essais dans le Sundgau alsacien. Mémoire de maîtrise, Geography, ULP (Strasbourg). 75p pp.
- Armand, R.**, 2004. Observation, appréciation et quantification du ruissellement appliquées aux parcelles cultivées en techniques culturales sans labour (TCSL). Mémoire de DESS, EOST, ULP (Strasbourg). 89 pp.
- Arshad, M.A., Franzluebbbers, A.J. and Azooz, R.H.**, 1999. Components of surface soil structure under conventionnal and no-tillage in northwestern Canada. *Soil & Tillage Research*, 53: 41-47.
- Asseline, J., Mtimet, A., Pontanier, R. and Clery, J.**, 1987. Une méthode de caractérisation, en zone aride et semi-aride, des états de surfaces élémentaires (1 m²) soumis à des averses contrôlées. *Gouttes et Splash*, 4(1): 13-18.
- Assouline, S., Tavares-Filho, J. and Tessier, D.**, 1997. Effect of compaction on soil physical and hydraulic properties: experimental results and modeling. *soil Science Society of America Journal*, 61: 390-398.
- Auzet, A.V.**, 1987. L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture: aspects agronomiques. Ministères de l'Environnement et de l'Agriculture, CEREG-Strasbourg, 60 p.
- Auzet, A.V.**, 2000. Ruissellement, érosion et conditions de surface des sols à l'échelle de versants et petits bassins versants. Mémoire de HDR, CEREG, ULP (Strasbourg). 79+ann pp.
- Auzet, A.V., Boiffin, J. and Ludwig, B.**, 1995. Concentrated flow erosion in cultivated catchments: influence of soil surface state. *Earth Surface Processes and Landforms*, 20: 759-767.
- Auzet, A.V., Boiffin, J., Papy, F., Maucorps, J. and Ouvry, J.F.**, 1990. An approach to the assessment of erosion forms and erosion risk on agricultural land in the northern Paris Basin, France. In: J. Boardman, I.D.L. Foster and J.A. Dearing (Eds.), *Soil Erosion on agricultural land*. Wiley, pp. 383-400.
- Auzet, A.V., Heitz, C., Armand, R., Guyonnet, J. and Moquet, J.S.**, 2005a. Les "coulées de boue" dans le Bas-Rhin: analyse à partir des dossiers de demande de reconnaissance de l'atats de catastrophe naturelle. IMFS - DIREN Alsace, Strasbourg, 28 p.
- Auzet, A.V., van Dijk, P. and Kirkby, M.J.**, 2005b. Surface characterisation for soil erosion forecasting. *Catena*, 62(2-3): 77-78.
- Bhattacharyya, R., Prakash, V., Kundu, S. and Gupta, H.S.**, 2006. Effect of tillage and crop rotations on pore size distribution and soil hydraulic conductivity in sandy clay loam soil of the Indian Himalayas. *Soil & Tillage Research*, 86(2): 129-140.
- Blanco-Canqui, H., Lal, R., Post, W.M., Izaurralde, R.C. and Shipitalo, M.J.**, 2007. Soil hydraulic properties influenced by corn stover removal from no-till corn in Ohio. *Soil & Tillage Research*, 92(1-2): 144.
- Bloschl, G. and Sivapalan, M.**, 1995. Scale Issues In Hydrological Modeling - A Review. *Hydrological Processes*, 9(3-4): 251-290.

- Boardman, J. and Poesen, J.**, 2006. Soil erosion in Europe. Wiley, 872 p.
- Bockstaller, C. et al.**, 2009. Comparison of methods to assess the sustainability of agricultural systems. A review. *Agronomy For Sustainable Development*, 29(1): 223-235.
- Bockstaller, C. et al.**, 2008. Agri-environmental indicators to assess cropping and farming systems. A review. *Agronomy For Sustainable Development*, 28(1): 139-149.
- Boiffin, J.**, 1984. La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse de doctorat, Sciences agronomiques, INA Paris-Grignon. 423 pp.
- Boiffin, J. and Monnier, G.**, 1985. Infiltration rate as affected by soil surface crusting caused by rainfall, International symposium on the assessment of soil surface sealing and crusting, Ghent, pp. 91-98.
- Boiffin, J. and Monnier, G.**, 1991. Simplification du travail du sol et érosion hydrique. *Perspectives agricoles*, 162: 24-30.
- Boiffin, J. and Papy, F.**, 1988. Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. I. Analyse des conditions de déclenchement de l'érosion. *Agronomie*, 8(8): 663-673.
- Bracken, L.J. and Croke, J.**, 2007. The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems. *Hydrological Processes*, 21(13): 1749-1763.
- Bresson, L.M. and Boiffin, J.**, 1990. Morphological characterisation of soil crust development stages on an experimental fields. *Geoderma*, 47: 301-325.
- Bronick, C.J. and Lal, R.**, 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124(1-2): 3-22.
- Cammeraat, L.H.**, 2002. A review of two strongly contrasting geomorphological systems within the context of scale. *Earth Surface Processes And Landforms*, 27(11): 1201-1222.
- Cappus, P.**, 1960. Bassin expérimental d'Alrance - étude des lois de l'écoulement - application au calcul et à la prévision des débits. *La Houille blanche*, N°A: 493-520.
- Casenave, A. and Valentin, C.**, 1990. Les états de surface de la zone sahélienne: influence sur l'infiltration. Ed. de l'ORSTOM, 229 p.
- Cerdan, O., Le Bissonnais, Y., Souchère, V., Martin, P. and Lecomte, V.**, 2001a. Sediment concentration in interrill flow: interactions between soil surface conditions, vegetation and rainfall. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27: 193-205.
- Cerdan, O., Le Bissonnais, Y., Souchère, V., Martin, P. and Lecomte, V.**, 2002a. Sediment concentration in interrill flow: interactions between soil surface conditions, vegetation and rainfall. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27: 193-205.
- Cerdan, O., Souchère, V., Lecomte, V., Couturier, A. and Le Bissonnais, Y.**, 2001b. Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based model: Sealing and Transfer by Runoff and Eorion related to Agricultural Management. *Catena*, 46: 189-205.
- Cerdan, O., Souchère, V., Lecomte, V., Couturier, A. and Le Bissonnais, Y.**, 2002b. Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based model: Sealing and Transfer by Runoff and Eorion related to Agricultural Management. *Catena*, 46: 189-205.
- Chapelle-Barry, C.**, 2008. Dans le sillon du non-labour. *Agreste-Primeur*, 207: 4.
- Chaplot, V. and Le Bissonnais, Y.**, 2000. Field measurements of interrill erosion under different slopes and plot sizes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25: 145-153.
- Cosandey, C. and Robinson, M.**, 2000. Hydrologie continentale. Armand Collin, 360 p.
- CTIC**, 2000. Conservation tillage systems and management. MWPS-45, 270 p.
- Culley, J.L.B., Larson, W.E. and Randall, G.W.**, 1987. Physical properties of a typic Haplaquoll under conventional and no-tillage. *Soil Science Society of America Journal*, 51: 1587-1593.
- Dabney, S.M., Wilson, G.V., McGregor, K.C. and Foster, G.R.**, 2004. History, residue, and tillage effects on erosion of loessial soil. *Transactions of the ASAE*, 47(3): 767-775.
- Dao, T.H.**, 1993. Tillage and winter wheat residue mangement effects on water infiltration and storage. *Soil Science Society of America Journal*, 57: 1586-1595.
- Darboux, F., Gascuel-Oudou, C. and Davy, P.**, 2002. Effects of surface water storage by soil roughness on overland-flow generation. *Earth Surface Processes And Landforms*, 27(3): 223-233.
- Descroix, L., Viramontes, D., Vauclin, M., Gonzales Barrios, J.L. and Esteves, M.**, 2000. Influence of soils surface features and vegetation on runoff and erosion in the Western Sierra Madre (Durango, Northwest Mexico). *Catena*, 43: 115-135.
- Dunne, T. and Black, R.**, 1970. An experiment investigation of runoff production in permeable soils. *Water Resources Research*, 6(2): 478-490.

- Emerson, W.W.**, 1967. A classification of soil aggregates based on their coherence in water. *Australian Journal of Soil Research*, 5: 47-57.
- Evrard, O., Persoons, E., Vandaele, K. and van Wesemael, B.**, 2007. Effectiveness of erosion mitigation measures to prevent muddy floods: A case study in the Belgian loam belt. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 118(1-4): 149-158.
- Evrard, O., Vandaele, K., Bielders, C. and van Wesemael, B.**, 2008. Seasonal evolution of runoff generation on agricultural land in the Belgian loess belt and implications for muddy flood triggering. *Earth Surface Processes And Landforms*, 33(8): 1285-1301.
- Findeling, A.**, 2001. Etude et modélisation de certains effets du semis-direct avec paillis de résidus sur les bilans hydrique, thermique et azoté d'une culture de maïs pluvial au Mexique. Thèse de Doctorat de l'ENGREF, Montpellier. 357+annexes pp.
- Findeling, A., Ruy, S. and Scopel, E.**, 2003. Modeling the effects of a partial residue mulch on runoff using a physically based approach. *Journal Of Hydrology*, 275(1-2): 49-66.
- Flota, C.**, 2003. Prévention de l'érosion des sols et des coulées boueuses dans la commune de Rixheim, Bureau d'études Ecoscop, 106 p.
- Girard, J.C., Walter, C., Rémy, J.C., Berthelin, J. and Morel, J.L.**, 2005. Sols et environnement. Dunod (Sciences Sup Coll.), 832 p.
- Girardin, P., Bockstaller, C. and Van der Werf, H.**, 1999. Indicators: Tools to evaluate the environmental impacts of farming systems. *Journal Of Sustainable Agriculture*, 13(4): 5-21.
- Guyonnet, J.**, 2005. Recensement, caractérisation et cartographie des coulées boueuses dans le Bas-Rhin. MST "eaux, sols, pollutions", EOST, ULP (Strasbourg). 86 pp.
- Hamza, M.A. and Anderson, W.K.**, 2005. Soil compaction in cropping systems - A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil & Tillage Research*, 82(2): 121-145.
- Hangen, E., Buczko, U., Bens, O., Brunotte, J. and Huttli, R.F.**, 2002. Infiltration patterns into two soils under conventional and conservation tillage: influence of the spatial distribution of plant root structures and soil animal activity. *Soil & Tillage Research*, 63(3-4): 181-186.
- Heitz, C.**, 2004. Analyse des demandes d'indemnisation de catastrophe naturelle liées à des coulées de boue et caractérisation des bassins versants amont (Sundgau, Alsace). Mémoire de Maîtrise, Geography, ULP (Strasbourg). 90 pp.
- Helming, K., Auzet, A.V. and Favis-Mortlock, D.**, 2005. Soil erosion patterns: evolution, spatio-temporal dynamics and connectivity. *Earth Surface Processes And Landforms*, 30(2): 131-132.
- Helms, D.**, 1990. Conserving the Plains: the Soil Conservation Service in the Great Plains. *Agricultural History*, 64(2): 58-73.
- Hénin, S., Monnier, G. and Combeau, A.**, 1958. Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Annales Agronomiques*, 9: 73-92.
- Holland, J.M.**, 2004. The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe: reviewing the evidence. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 103: 1-25.
- Horton, R.E.**, 1933. The role of infiltration in the hydrological cycle. *Transactions of American Geophysical Union*, 14: 446-460.
- Howell, D.C.**, 1998. Méthodes statistiques en sciences humaines. De Boeck, 821 p.
- Huang, C., Gascuel-Oudou, C. and Cross-Cayot, S.**, 2002. Hillslope topographic and hydrologic effects on overland flow and erosion. *Catena*, 46: 177-188.
- Huguier, M. and Flahault, A.**, 2003. Biostatistiques au quotidien. Elsevier - Masson, 206 p.
- Imeson, A.C. and Prinsen, H.A.M.**, 2004. Vegetation patterns as biological indicators for identifying runoff and sediment source and sink areas for semi-arid landscapes in Spain. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 104(2): 333-342.
- ITADA**, 2005. Rapport final du projet 1: Etablissement et validation d'un référentiel régional sur le travail simplifié dans le Rhin supérieur, 234p p.
- Jalota, S.K., Khera, R. and Chahal, S.S.**, 2001. Straw management and tillage effects on soil water storage under field conditions. *Soil Use And Management*, 17(4): 282-287.
- Joannon, A., Souchere, V., Martin, P. and Papy, F.**, 2006. Reducing runoff by managing crop location at the catchment level, considering agronomic constraints at farm level. *Land Degradation & Development*, 17(5): 467-478.

- Kamphorst, E.C. et al.**, 2000. Predicting depressional storage from soil surface roughness. *Soil Science Society of America Journal*, 64: 1749-1758.
- Kay, B.D. and VandenBygaart, A.J.**, 2002. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil & Tillage Research*, 66(2): 107-118.
- Kinnell, P.I.A.**, 2005. Raindrop-impact-induced erosion processes and prediction: a review. *Hydrological Processes*, 19: 2815-2844.
- Kwaad, F.J.P.M., Van der Zijp, M. and Van Dijk, P.M.**, 1998. Soil conservation and maize cropping systems on sloping loess soils in the Netherlands. *Soil & Tillage Research*, 46: 13-21.
- Labreuche, J., Couture, D. and Bodet, J.M.**, 2005. Essai travail du sol longue durée de Boigneville: 35 ans d'enseignements, Communiqué de presse ARVALIS, pp. 2.
- Lal, R.**, 2005. World crop residues production and implications of its use as a biofuel. *Environment International*, 31(4): 575-584.
- Lampurlanés, J. and Cantero-Martinez, C.**, 2006. Hydraulic conductivity, residue cover and soil surface roughness under different tillage systems in semiarid conditions. *Soil & Tillage Research*, 85: 13-26.
- Le Bissonnais, Y.**, 1990. Experimental study and modelling of soil surface crusting processes. *Catena supplement*, 17: 13-28.
- Le Bissonnais, Y. et al.**, 1998. Crusting, runoff and sheet erosion on silty loamy soils at various scales and upscaling from m² to small catchments. *Soil & Tillage Research*.
- Le Bissonnais, Y. et al.**, 2005. Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion. *Catena*, 62: 111-124.
- Le Bissonnais, Y., Dubreuil, N., Daroussin, J. and Gorce, M.**, 2004. Modélisation et cartographie de l'aléa d'érosion des sols à l'échelle régionale.
- Le Bissonnais, Y., Renaux, B. and Delouche, H.**, 1995. Interactions between soils properties and moisture content in crust formation, runoff and interrill erosion from tilled loess soils. *Catena*, 25: 33-46.
- Le Bissonnais, Y., Thorette, J. and Daroussin, J.**, 2002. L'érosion hydrique des sols en France, IFEN - INRA, 106 p.
- Lebart, L., Piron, M. and Morineau, A.**, 2006. Statistique exploratoire multidimensionnelle. Dunod, 464 p.
- Lecomte, V.**, 1999. Transferts de produits phytosanitaires par le ruissellement et l'érosion de la parcelle au bassin versant. Thèse de l'ENGREF - spécialité Sciences de l'Eau. 213 p. + annexes. pp.
- Leonard, J., Ancelin, O., Ludwig, B. and Richard, G.**, 2006. Analysis of the dynamics of soil infiltrability of agricultural soils from continuous rainfall-runoff measurements on small plots. *Journal Of Hydrology*, 326(1-4): 122-134.
- Léonard, J. and Andrieux, P.**, 1998. Infiltration characteristics of soils in Mediterranean vineyards in Southern France. *Catena*, 32: 209-223.
- Leys, A., Govers, G., Gillijns, K. and Poesen, J.**, 2007. Conservation tillage on loamy soils: explaining the variability in interrill runoff and erosion reduction. *European Journal of Soil Science*, 58(6): 1425-1436.
- Li, X.Y., Gong, J.D., Gao, Q.Z. and Wei, X.H.**, 2000. Rainfall interception loss by pebble mulch in the semiarid region of China. *Journal Of Hydrology*, 228(3-4): 165-173.
- Li, Y.X., Tullberg, J.N. and Freebairn, D.M.**, 2001. Traffic and residue cover effects on infiltration. *Australian Journal Of Soil Research*, 39(2): 239-247.
- Li, Y.X., Tullberg, J.N. and Freebairn, D.M.**, in press. Wheel traffic and tillage effects on runoff and crop yields. *Soil & Tillage Research*.
- Lipiec, J., Kus, J., Slowinska-Jurkiewicz, A. and Nosalewicz, A.**, 2006. Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. *Soil & Tillage Research*, 89(2): 210-220.
- Logsdon, S.D., Allmaras, R.R., Wu, L., Swan, J.B. and Randall, G.W.**, 1990. Macroporosity and its relation to saturated hydraulic conductivity under different tillage practices. *Soil Science Society of America Journal*, 54: 1096-1101.
- Ludwig, B.**, 1992. L'érosion par ruissellement concentré des terres cultivées du nord du Bassin Parisien: analyse de la variabilité des symptômes d'érosion à l'échelle du bassin versant élémentaire. Thèse de Géographie, Université Louis Pasteur. 201 p + ann. pp.
- Ludwig, B., Boiffin, J., Chadoeuf, J. and Auzet, A.V.**, 1995. Hydrological structure and erosion damage caused by concentrated flow in cultivated catchments. *Catena*, 25(1-4): 227-252.
- Lull, H.**, 1964. Ecological and silvicultural aspects. In: V. Chow (Ed.), *Handbook of applied hydrology*. McGraw-Hill (NY).

- Mahboudi, A.A., Lal, R. and Faussey, N.R.**, 1993. Twenty-eight years of tillage effects on two soils in Ohio. *Soil Science Society of America Journal*, 57: 506-512.
- Malet, J.P. et al.**, 2003. Soil surface characteristics influence on infiltration in black marls: application to the Super-Sauze earthflow (southern Alps, France). *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(5): 547-564.
- Martin, P.**, 1997. Pratiques culturales, ruissellement et érosion diffuse sur les plateaux limoneux du Nord-Ouest de l'Europe: application aux intercultures du Pays de Caux. Thèse de doctorat, Agronomie, INA-PG (Paris). 184 pp.
- Martin, P.**, 1999. Reducing flood risk from sediment-laden agricultural runoff using intercrop management techniques in northern France. *Soil & Tillage Research*, 52: 233-245.
- Martin, P., Joannon, A., Souchère, V. and Papy, F.**, 2004. Management of soil surface characteristics for soil and water conservation: the case of a silty loam region (Pays de Caux, France). *Earth Surface Processes and Landforms*, 29: 1105-1115.
- Masutti, C.**, 2004. Le Dust Bowl, la politique de conservation des ressources et les écologues aux Etats-Unis dans les années 1930. Epistémologie, histoire des sciences et des techniques, ULP (Strasbourg). 428 pp.
- Meyer, L.D., Dabney, S.M., Murphree, C.E., Harmon, W.C. and Grissinger, E.H.**, 1999. Crop production systems to control erosion and reduce runoff from upland silty soils. *Transactions of the ASAE*, 42(6): 1645-1652.
- Monnier, G., Boiffin, J. and Papy, F.**, 1986. Réflexions sur l'érosion hydrique en conditions climatiques et topographiques modérées. Cas des systèmes de grande culture de l'Europe de l'Ouest. *Cahiers de l'ORSTOM*, 22: 123-131.
- Monnier, G. and Stengel, P.**, 1982. La composition granulométrique des sols: un moyen de prévoir leur fertilité physique. *Bulletin technique d'information*, 370/372: 503-512.
- Moquet, J.S.**, 2005. Recensement, caractérisation et cartographie des coulées boueuses dans le Bas-Rhin. MST "Eaux, sols, pollution", EOST, ULP (Strasbourg). 70 pp.
- Moquet, J.S.**, 2006. Mise au pont d'une méthode de discrétisation des événements provoqués par une coulée boueuse associée à du ruissellement érosif. Application aux bases de données des demandes de déclaration Cat-Nat liées aux coulées boueuses en Alsace, IMFS, 7 p.
- Mosimann, T. and Rüttimann, M.**, 1996. Erosion: clé d'appréciation du risque. Service romand de vulgarisation agricole, 27 p.
- Mueller, E.N., Wainwright, J. and Parsons, A.J.**, 2007. The impact of connectivity on the modelling of overland flow within semi-arid shrubland environments. *Water Resources Research*, 43: 13.
- Musy, A. and Soutter, M.**, 1991. Physique du sol. Presses universitaires et polytechniques romandes, 335 p.
- Ouvry, J.F.**, 1989-90. Effet des techniques culturales sur la susceptibilité des terrains à l'érosion par ruissellement concentré - Expérience du pays de Caux (France). *Cahiers de l'ORSTOM*, 25(1-2): 157-169.
- Pagliai, M., Raglione, M., Panini, T., Maletta, M. and La Marca, M.**, 1995. The structure of two alluvial soils in Italy after 10 years of conventional and minimum tillage. *Soil & Tillage Research*, 34: 209-223.
- Pagliai, M., Vignozzi, N. and Pellegrini, S.**, 2004. Soil structure and the effect of management practices. *Soil & Tillage Research*, 79(2): 131-143.
- Papy, F. and Boiffin, J.**, 1988. Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. II. Evaluation des possibilités de maîtrise du phénomène dans les exploitations agricoles. *Agronomie*, 8(9): 745-756.
- Papy, F. and Douyer, C.**, 1991. Influence des états de surface du territoire agricole sur le déclenchement des inondations catastrophiques. *Agronomie*, 11: 201-215.
- Parsons, A.J., Brazier, R.E., Wainwright, J. and Powell, D.M.**, 2006. Scale relationships in hillslope runoff and erosion. *Earth Surface Processes And Landforms*, 31(11): 1384-1393.
- Party, J.-P.**, 2001. Guide des sols d'Alsace - Petite région naturelle N°11: Sundgau et Jura Alsacien. Région Alsace, 235 p.
- Party, J.-P.**, 2003. Guide des sols d'Alsace - Petite région naturelle N°1: Outre-Forêt. Région Alsace, 246 p.
- Puigdefabregas, J., Sole, A., Gutierrez, L., del Barrio, G. and Boer, M.**, 1999. Scales and processes of water and sediment redistribution in drylands: results from the Rambla Honda field site in Southeast Spain. *Earth-Science Reviews*, 48(1-2): 39-70.

- Quinton, J.N. and Catt, J.A.**, 2004. The effects of minimal tillage and contour cultivation on surface runoff, soil loss and crop yield in the long-term Woburn Erosion Reference Experiment on sandy soil at Woburn, England. *Soil Use And Management*, 20(3): 343-349.
- Rasmussen, K.J.**, 1999. Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality: A Scandinavian review. *Soil & Tillage Research*, 53(1): 3-14.
- Rauws, G. and Auzet, A.V.**, 1989. Laboratory Experiment on the Effects of Simulated Tractor Wheeling on Linear Soil Erosion. *Soil & Tillage Research*, 13: 75-81.
- Rhoton, F.E., Shipitalo, M.J. and Lindbo, D.L.**, 2002. Runoff and soil loss from midwestern and southeastern US silt loam soils as affected by tillage practice and soil organic matter content. *Soil & Tillage Research*, 66: 1-11.
- Richard, G. and Boiffin, J.**, 1990. Effet de l'effet structural du lit de semences sur la germination et la levée des cultures, La structure de la surface et son évolution. Les colloques de l'INRA, Laon, pp. 111-136.
- Richard, G., Boizard, H., Roger-Estrade, J., Boiffin, J. and Guerif, J.**, 1999. Field study of soil compaction due to traffic in northern France: pore space and morphological analysis of the compacted zones. *Soil & Tillage Research*, 51(1-2): 151-160.
- Richard, G., Cousin, I., Sillon, J.F., Bruand, A. and Guerif, J.**, 2001. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. *European Journal Of Soil Science*, 52(1): 49-58.
- Robert, M., Capillon, A. and Raunet, M.**, 2004. Les techniques culturales sans labour: historique et enjeux, Colloque "Techniques culturales sans labour. Impacts économiques et enjeux". CORPEN, Paris, pp. 81.
- Roth, C.**, 2004. A framework relating soil surface condition to infiltration and sediment nutrient mobilization in graze rangelands of northeastern Queensland, Australia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29: 1093-1104.
- Sadok, W. et al.**, 2008. Ex ante assessment of the sustainability of alternative cropping systems: implications for using multi-criteria decision-aid methods. A review. *Agronomy For Sustainable Development*, 28(1): 163-174.
- Sebillote, M. and Meynard, J.M.**, 2004. Enjeux agronomiques, économiques et environnementaux des TSL, Techniques Culturales sans Labour: impacts économiques et environnementaux. CORPEN, Paris, pp. 14.
- Shainberg, I.**, 1992. Chemical and mineralogical components of crusting. In: M.E. Summer and B.A. Stewaart (Eds.), *Advance in Soil Science. Soil crusting: physical and chemical processes*, pp. 33-54.
- Shipitalo, M.J., Dick, W.A. and Edwards, W.M.**, 2000. Conservation tillage and macropore factors that affect water movement and the fate of chemicals. *Soil & Tillage Research*, 53(3-4): 167-183.
- Solé-Benet, A. et al.**, 1997. Influences of micro-relief patterns and plant cover on runoff related processes in badlands from Tabernas (SE Spain). *Catena*, 31: 23-38.
- Soltner, D.**, 2000. Les bases de la production végétale. Tome 1 - Le sol et son amélioration. Sciences et Techniques Agricoles, 472 p.
- Souchère, V., King, D., Daroussin, J., Papy, F. and Capillon, A.**, 1998. Effects of tillage on runoff directions: consequences on runoff contributing area within agricultural catchments. *Journal of Hydrology*, 206: 256-267.
- SOWAP**, 2006. Conservation agriculture in Europe. An approach to sustainable crop production by protecting soil and water? 110 p.
- Strudley, M.W., Green, T.R. and Ascough, J.C.**, 2008. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. *Soil & Tillage Research*, 99(1): 4-48.
- Takken, I., Govers, G., Steegen, A., Nachtergaele, J. and Guérf, G.**, 2001. The prediction of runoff flow directions on tilled fields. *Journal of Hydrology*, 248: 1-13.
- Tebrugge, F. and During, R.A.**, 1999. Reducing tillage intensity - a review of results from a long-term study in Germany. *Soil & Tillage Research*, 53(1): 15-28.
- Thorette, J. and Le Bissonnais, Y.**, 2005. L'érosion des sols, un phénomène à surveiller, IFEN, 4 p.
- Tribouillard, C.**, 2004. Construction et validation d'un indicateur "ruissellement" (Iru) basé sur un modèle dans le cadre de la méthode INDIGO.

- Trojan, M.D. and Linden, D.R.**, 1998. Macroporosity and hydraulic properties of earthworm-affected soils as influenced by tillage and residue management. *Soil Science Society Of America Journal*, 62(6): 1687-1692.
- Tullberg, J.N., Ziebarth, P.J. and Li, Y.X.**, 2001. Tillage and traffic effects on runoff. *Australian Journal Of Soil Research*, 39(2): 249-257.
- Valentin, C. and Bresson, L.M.**, 1992. Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. *Geoderma*, 55: 225-245.
- Van-Camp, L. et al.**, 2004. Reports of the Technical Working Groups Established under the Thematic Strategy for Soil Protection. Volume II: Erosion, European Environment Agency, 192 p.
- Van Dijk, P., Van der Zijp, M. and Kwaad, F.J.P.M.**, 1996. Soil erodibility parameters under various cropping systems of maize. *Hydrological Processes*, 10(8): 1061-1067.
- Van Dijk, P.M., Auzet, A.V. and Lemmel, M.**, 2005. Rapid assessment of field erosion and sediment transport pathways in cultivated catchments after heavy rainfall events. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30: 169-182.
- Vandervaere, J.P., Peugeot, C., Vauclin, M., Jaramillo, R.A. and Lebel, T.**, 1997. Estimating hydraulic conductivity of crusted soils using disc infiltrometers and minitensiometers. *Journal Of Hydrology*, 189(1-4): 203-223.
- Vandervaere, J.P. et al.**, 1998. Prediction of crust-induced surface runoff with disc infiltrometer data. *Soil Science*, 163(1): 9-21.
- Vansteelant, J.Y., Trevisan, D., Perron, L., Dorioz, J.M. and Roybin, D.**, 1997. Frequency of runoff in the cropped area of the French basin of Lac Lemman. *Agronomie*, 17(2): 65-82.
- Verheijen, F.G.A., Jones, R.J.A., Rickson, R.J. and Smith, C.J.**, 2009. Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. *Earth-Science Reviews*, 94(1-4): 23.
- Vogt, H.**, 1992. Le relief en Alsace. Étude géomorphologique du rebord sud-occidental du Fossé Rhénan. Ed. Oberlin, 239 p.
- Vogt, H., Mettauer, H. and Pautrat, C.**, 1986. Carte des formations superficielles d'Alsace.
- Von Eller, J.-P.**, 1984. Vosges-Alsace. Guides Géologiques Régionaux. Masson, 182 p.
- Wahl, N.A., Bens, O., Buczko, U., Hangen, E. and Huttl, R.F.**, 2004. Effects of conventional and conservation tillage on soil hydraulic properties of a silty-loamy soil. *Physics And Chemistry Of The Earth*, 29(11-12): 821-829.
- Wainwright, J.**, 1996. Infiltration, runoff and erosion characteristics of agricultural land in extreme storm events, SE France. *Catena*, 26: 47-67.
- Wilson, G.V., Dabney, S.M., McGregor, K.C. and Barkoll, B.D.**, 2004. Tillage and residue effects on runoff and erosion dynamics. *Transactions of the ASAE*, 47(1): 119-128.
- Yu, B., Sombatpanit, S., Rose, C.W., Ciesiolka, C.A.A. and Coughlan, K.J.**, 2000. Characteristics and modeling of runoff hydrographs for different tillage treatments. *Soil Science Society Of America Journal*, 64(5): 1763-1770.

Liste des tableaux et figures

Tableau 1.1 – Revue des EDS et caractérisation des propriétés hydrodynamiques _____	25
Tableau 1.2 - Interaction texture/matières organiques sur la stabilité structurale _____	28
Tableau 1.3 – Opérations culturales et rugosités observées (d’après Papy et Boiffin (1988)) _____	29
Tableau 1.4 - Synthèse des types de non-labour (d’après la synthèse de l’ADEME (2007)) _____	31
Tableau 1.5 - Surfaces cultivées en TSL et en semis-direct en Europe en 2005 (d’après SOWAP (2006))	33
Tableau 1.6 – Mesures de ruissellement sous pluies naturelles et artificielles _____	36
Tableau 1.7 – Différences du taux de MO en surface (%) selon les pratiques (classées par ancienneté)	37
Tableau 1.8 – Densités apparentes relevées en contexte de non-labour _____	39
Tableau 1.9 – Conductivité hydraulique de l’horizon de surface (perméamètre à charge) _____	42
Tableau 1.10 – Table de correspondance du modèle STREAM (Cerdan et al., 2001b). Valeurs d’infiltrabilité en mm/h _____	45
Tableau 2.1 – Caractéristiques pédologiques et agronomiques des sites d’études _____	65
Tableau 2.2 – Les pratiques culturales retenues _____	66
Tableau 2.3 – Jeu de données d’observation d’EDS _____	68
Tableau 2.4 - Variables relevées lors des suivis d’EDS _____	69
Tableau 3.1 – Jeu de données d’observation d’EDS _____	85
Tableau 3.2 – Cumuls pluviométriques depuis le semis au 15 juillet sur les sites d’observations d’EDS _____	86
Tableau 3.3 – Modalités en TSL disponibles dans le jeu de données d’EDS _____	87
Tableau 3.4 – Caractéristiques des variables d’EDS des 3 groupes définis par la CHA (état initial) __	89
Tableau 3.5 – Composition des groupes définis par la CHA (état initial) _____	90
Tableau 3.6 – Variables d’EDS des 4 groupes d’EDS définis par la CHA (état final) _____	92
Tableau 3.7 – Composition des groupes définis par la CHA (état final) _____	93
Tableau 3.8 - Affectation des individus des groupes initiaux dans les groupes finaux _____	94

Tableau 4.1 – Corrections apportées à la couverture végétale en place _____	107
Tableau 4.2 – Corrélations entre les variables d’EDS (les valeurs $> 0,4 $ sont en gras) _____	114
Tableau 4.3 - Résultats de la régression multiple ascendante sur les 3 jeux de données d’EDS _____	115
Tableau 4.4 – Caractéristiques des épisodes pluvieux ayant provoqué du ruissellement _____	117
Tableau 4.5 – Etats de surface précédant l’épisode du 12 juillet 2005 _____	119
Tableau. 4.6 - Mesures de ruissellement et d’érosion à l’échelle du motif (épisode du 12 juillet 2005)	119
Tableau 4.7 – Etats de surface et humidité initiale (moyennes des 2 répétitions) au stade 0 mm ____	121
Tableau 4.8 – Etats de surface et humidité initiale (valeurs moyennes et écart-type des 3 répétitions) au stade 67 mm _____	122
Tableau 4.9 – Etats de surface et humidité initiale (valeurs moyennes et écart-type des 3 répétitions) au stade 120 mm _____	124
Tableau 4.10 - Corrélations entre les différentes variables d’EDS (les valeurs en gras sont $> 0,4 $)__	126
Tableau 4.11 – Résultats de la régression multiple ascendante _____	126
Tableau 4.12 – Moyennes des observations d’EDS et humidité gravimétrique avant simulation ____	128

Liste des figures

Figure 1.1 – Des précipitations au ruissellement _____	19
Figure 1.2 – Différentes étapes de la dégradation structurale sur sol limoneux (Le Bissonnais et al., 2002) _____	21
Figure 1.3 – EDS et formation du ruissellement en contexte de sol limoneux cultivé _____	23
Figure 1.4 – Exemple de dégradation de la surface (Photos : R. Armand – 2003) _____	24
Figure 1.5 - Facteurs en jeu dans l'évolution des EDS _____	19
Figure 1.6 – Triangle de stabilité structurale _____	28
Figure 1.7 - les différentes étapes de la simplification du travail du sol (d'après Soltner (2000)) _____	31
Figure 1.8 - Superficies de grandes cultures (%) semées en non-labour en 2001 et 2006 _____	34
Figure 1.9 - Superficies cultivées en 2006 classées selon le nombre de labour depuis 2001 (Chapelle-Barry, 2008) _____	44
Figure 2.1 – Densité d'inondations boueuses sur la période 1985-2000 (in Thorette et Le Bissonnais, 2005). Sources des auteurs : MEDD (DPPR), Base Corinte, généralisation IFEN _____	51
Figure 2.2 – Historique des crues et inondations boueuses dans le Bas-Rhin et le Haut-Rhin _____	53
Figure 2.3 - Répartition mensuelle des inondations boueuses dans le Bas-Rhin et le Haut-Rhin (période 1985-2006) _____	54
Figure 2.4 – Eléments d'information sur l'Alsace _____	56
Figure 2.5 – Carte géomorphologique du Sundgau _____	57
Figure 2.6 - Distribution des pentes pour le Sundgau et l'Outre-Forêt (Paul Van Dijk, ARAA) _____	58
Figure 2.7 – Fonctionnement hydrologique simplifié de la bordure orientale du Sundgau (Party, 2001) _____	58
Figure 2.8 – Carte géomorphologique de l'Outre-Forêt _____	59
Figure 2.9 – Pluviométrie mensuelle des sites de références du Sundgau et de l'Outre-Forêt _____	60
Figure 2.10 – Distribution mensuelle des précipitations supérieures à 15 mm sur une durée d'une heure (source : Météo France pour l'ARAA) Période 1968-2007 _____	60
Figure 2.12 – Occupation des terres agricoles (valeurs exprimées en hectares) – Agreste 2000 _____	61
Figure 2.11 – Les mutations de l'occupation du sol dans les bassins versants agricoles L'exemple de Rixheim (Haut-Rhin) _____	62

Figure 2.13 – Synthèse des facteurs entrant en jeu dans la formation du ruissellement sur les secteurs d'études _____	63
Figure 2.14 – Identification des lignes de semis, traces de roue et interrangs sur la même parcelle expérimentale (Landser) _____	67
Figure 2.15 – Organisation des relevés d'EDS (campagne 2007) _____	68
Figure 2.16 – Fiche de description des EDS _____	72
Figure 2.17 – Parcelle expérimentale de mesure du ruissellement _____	73
Figure 2.18 – Mesure de ruissellement à l'échelle du motif _____	74
Figure 2.19 – Dispositif générant la lame d'eau ruisselée _____	77
Figure 2.20 – Mesure de la distance parcourue par le ruissellement _____	77
Figure 2.21- Placette de mesure du ruissellement et simulateur de pluie _____	78
Figure 2.22 – Repartitions des résidus testées dans le cadre des simulations de pluie (photos prises après la simulation) _____	79
Figure 3.1 – Précipitations cumulées depuis le semis (les triangles indiquent le semis) _____	86
Figure 3.2 – Arbre de classification issu de la CHA sur les EDS initiaux _____	88
Figure 3.3 – Arbre de classification issu de la CHA sur les EDS finaux _____	91
Figure 3.4 – Composition simplifiée des 4 groupes définis par la CHA (stade final) _____	94
Figure 3.5 – Précipitations cumulées depuis le semis (site de Geispitzen – 2007). _____	96
Figure 3.6 – Suivis des EDS de la campagne 2007 _____	98
Figure 4.1 – Ruissellement et pertes en terre sur le site de Neewiller sur la saison 2004 _____	108
Figure 4.2 – Ruissellement et pertes en terre sur le site de Neewiller sur la saison 2005 _____	110
Figure 4.3 – Ruissellement et pertes en terre sur le site de Landser sur la saison 2005 _____	111
Figure 4.4- Distance parcourue par le ruissellement (m) au stade 0 mm _____	122
Figure 4.5 - Distance parcourue par le ruissellement (m) au stade 67 mm _____	123
Figure 4.6 - Distance parcourue par le ruissellement (m) au stade 120 mm _____	124
Figure 4.7 – Synthèse : distance parcourue par le ruissellement (m) au cours des 3 stades pluviométriques _____	127

Figure 4.8 – Coefficients de ruissellement obtenus lors des simulations de pluie _____	128
Figure 4.9 – Dispersion des coefficients de ruissellement et des pertes en terres mesurés sur les parcelles expérimentales _____	131
Figure 5.1 – Fonctionnement simplifié de l'indicateur de ruissellement d'INDIGO (Tribouillard, 2004) _____	133
Figure 5.2 – Dispersion des coefficients de ruissellement en fonction des croûtes sédimentaires ____	135
Figure 5.3 – Couverture par les résidus en fonction des croûtes sédimentaires _____	136
Figure 5.4 – Extension des croûtes sédimentaires en fonction des pluies cumulées_____	137
Figure 5.5 – Extension des croûtes sédimentaires en fonction des pluies cumulées et des résidus végétaux _____	138
Figure 5.6 – Cumuls de pluie nécessaire pour atteindre 30% de couverture par les croûtes sédimentaires _____	125

Liste des abréviations

Abréviation	Signification
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
ARAA	Association pour la Relance Agronomique en Alsace
CHA	Classification Hiérarchique Ascendante
EDS	Etat de surface du sol
HSF	Hauteur des Seuls à Franchir
IFEN	Institut Français sur l'Environnement
ITADA	Institut Transfrontalier d'Application et de Développement Agronomique
MES	Matières en Suspension
MO	Matière Organique
PAC	Politique Agricole Commune
STH	Surface Toujours en Herbe
TSL	Techniques culturales Sans Labour
USLE	Universal Soil Loss Equation

Annexes

Annexe 1 - Mise au point d'une méthode de discrétisation des événements provoqués par une coulée boueuse associée à du ruissellement érosif _____	173
Annexe 2 – Concentration en atrazine des eaux souterraines en 2003 _____	181
Annexe 3 – Différences d'état de surface entre les trois types de TSL : Résultats des tests t _____	183
Annexe 4 - étude de la variabilité intraparcellaire des EDS : résultats de l'analyse de variance ____	187
Annexe 5 – Résultats des tests LSD _____	189
Annexe 6 - Méthodes de calculs des volumes ruisselés et érodés _____	193
Annexe 7 - Caractéristiques des états de surface précédant les épisodes ruisselants _____	195

Signalement bibliographique ajouté par :

l'UNIVERSITÉ DE STRASBOURG
Service Commun de la Documentation

**Application aux bases de données des demandes de déclaration CAT NAT liées
aux coulées boueuses en Alsace**

MOQUET Jean Sébastien

Institut de mécanique des fluides et des solides (IMFS) 2007

Annexe 1 : p. 173-179

La publication présentée ici dans la thèse est soumise à des droits détenus par un tiers.

La version imprimée de cette thèse peut être consultée à la bibliothèque ou dans un autre établissement via une demande de prêt entre bibliothèques (PEB) auprès de nos services :

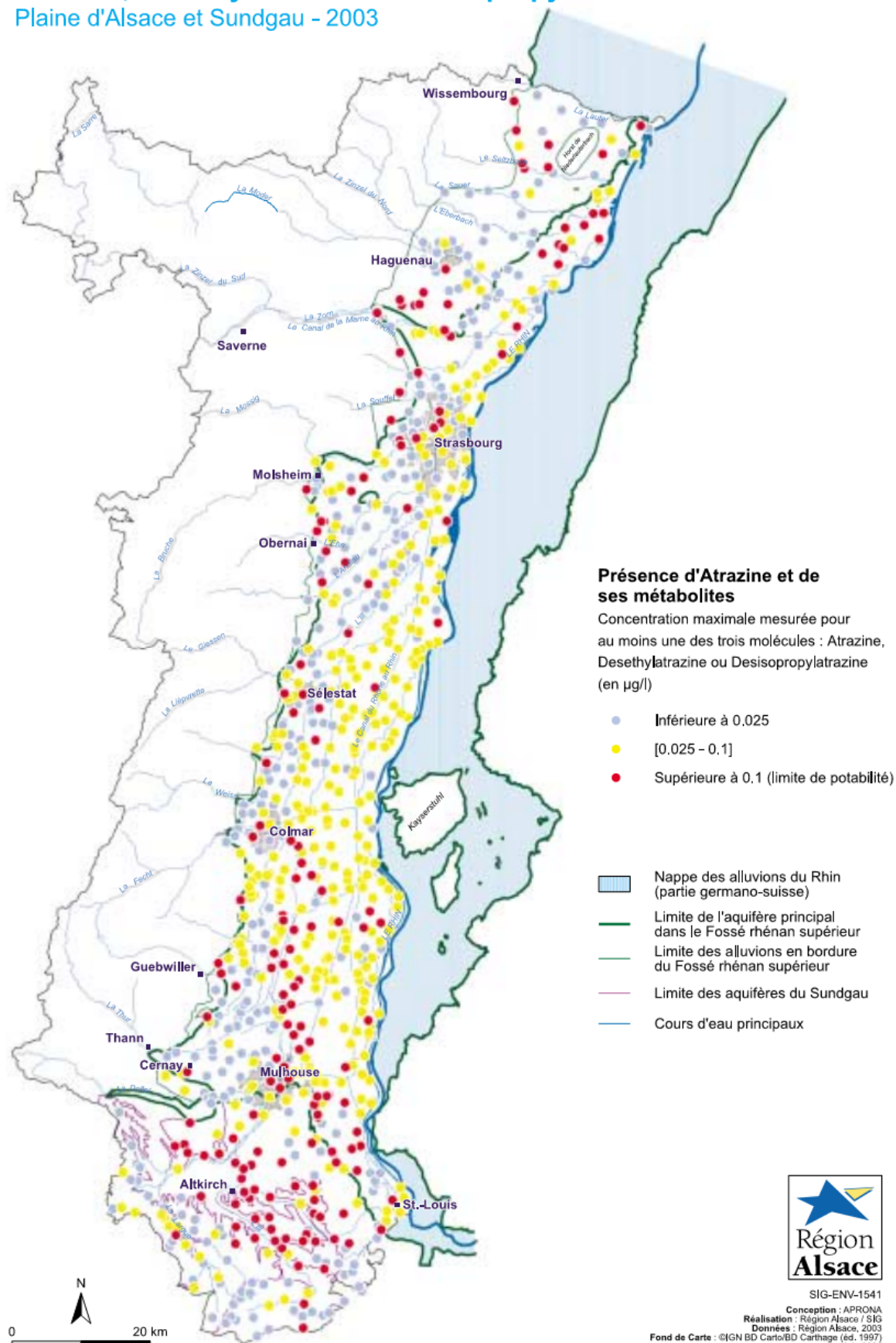
<http://scd.unistra.fr/services/peb/>

Annexe 2 – Concentration en atrazine des eaux souterraines en 2003

Inventaire de la qualité des eaux souterraines dans le Fossé rhénan supérieur

Atrazine, Desethylatrazine et Desisopropylatrazine

Plaine d'Alsace et Sundgau - 2003



Annexe 3 – Différences d'état de surface entre les trois types de TSL : Résultats des tests t

Test F pour les EDS initiaux relevés sur les interrangs

Couverture de surface par les mottes > 2cm

	Surface	Pseudo-labour	Décompactage
Surface		0,04	0,04
Pseudo-labour			0,76
Décompactage			

Extension des croûtes structurales

	Surface	Pseudo-labour	Décompactage
Surface		0,01	0,07
Pseudo-labour			0,51
Décompactage			

Couverture de surface par les résidus végétaux

	Surface	Pseudo-labour	Décompactage
Surface		0,30	0,75
Pseudo-labour			0,13
Décompactage			

Hauteur moyenne des seuils à franchir dans le sens d'écoulement

	Surface	Pseudo-labour	Décompactage
Surface		0,24	0,35
Pseudo-labour			0,80
Décompactage			

Test F pour les EDS initiaux relevés sur les lignes de semis

Couverture de surface par les mottes > 2cm

	Surface	Pseudo-labour	Décompactage
Surface		0,86	0,57
Pseudo-labour			0,33
Décompactage			

Extension des croûtes structurales

	Surface	Pseudo-labour	Décompactage
Surface		0,02	0,02
Pseudo-labour			0,85
Décompactage			

Couverture de surface par les résidus végétaux

	Surface	Pseudo-labour	Décompactage
Surface		0,794	0,50
Pseudo-labour			0,60
Décompactage			

Hauteur moyenne des seuils à franchir dans le sens d'écoulement

	Surface	Pseudo-labour	Décompactage
Surface		0,13	0,25
Pseudo-labour			0,01
Décompactage			

Test F obtenus pour les EDS initiaux observés sur trace de roue

Couverture de surface par les mottes > 2cm

	Surface	Pseudo-labour	Décompactage
Surface		0,27	0,87
Pseudo-labour			0,30
Décompactage			

Extension des croûtes structurales

	Surface	Pseudo-labour	Décompactage
Surface		0,08	0,76
Pseudo-labour			0,01
Décompactage			

Couverture de surface par les résidus végétaux

	Surface	Pseudo-labour	Décompactage
Surface		0,62	0,65
Pseudo-labour			0,97
Décompactage			

Hauteur moyenne des seuils à franchir dans le sens d'écoulement

	Surface	Pseudo-labour	Décompactage
Surface		0,37	0,50
Pseudo-labour			0,77
Décompactage			

Annexe 4 : étude de la variabilité intraparcellaire des EDS : résultats de l'analyse de variance

Variables	P. cum (mm)	Labour	TSL
Mottes > 2 cm	0	0,000	0,000
	62	0,000	0,000
	93	0,000	0,000
	120	0,000	0,000
	250	0,000	0,014
Croûtes structurales	0	0,000	0,000
	62	-	-
	93	-	-
	120	0,000	0,001
	250	0,000	0,000
Croûtes sédimentaires	0	-	-
	62	-	-
	93	-	-
	120	0,000	0,001
	250	0,000	0,000
HSF médiane	0	0,000	0,000
	62	0,000	0,000
	93	0,000	0,000
	120	0,000	0,000
	250	0,000	0,000
Couverture en résidus	0	-	0,000
	62	-	0,000
	93	-	0,000
	120	-	0,000
	250	-	0,000

Seuil de signification : $P=0.05$

Annexe 5 – Résultats des tests LSD

En gras figure les valeurs $p > 0,05$.

Couverture par les mottes

P. Cum. (mm)	Motif	Labour		TSL	
		Ligne de semis	Trace de roue	Ligne de semis	Trace de roue
0	Interrang	0,000	0,069	0,000	0,483
	Ligne de semis		0,000		0,000
62	Interrang	0,000	0,000	0,000	0,444
	Ligne de semis		0,000		0,000
93	Interrang	0,000	0,000	0,000	0,321
	Ligne de semis		0,000		0,000
120	Interrang	0,000	0,038	0,000	0,335
	Ligne de semis		0,000		0,001
250	Interrang	0,000	0,000	0,004	0,214
	Ligne de semis		0,003		0,077

Couverture par les croûtes structurales

P. Cum. (mm)	Motif	Labour		TSL	
		Ligne de semis	Trace de roue	Ligne de semis	Trace de roue
0	Interrang	0,000	0,069	0,000	0,000
	Ligne de semis		0,000		0,000
62	Interrang	-	-	-	-
	Ligne de semis		-		-
93	Interrang	-	-	-	-
	Ligne de semis		-		-
120	Interrang	0,000	0,038	0,001	1,000
	Ligne de semis		0,000		0,001
250	Interrang	0,000	0,000	0,000	0,670
	Ligne de semis		0,003		0,000

Couverture par les croûtes sédimentaires

P. Cum. (mm)	Motif	Labour		TSL	
		Ligne de semis	Trace de roue	Ligne de semis	Trace de roue
0	Interrang	-	-	-	-
	Ligne de semis		-		-
62	Interrang	-	-	-	-
	Ligne de semis		-		-
93	Interrang	-	-	-	-
	Ligne de semis		-		-
120	Interrang	0,000	0,467	0,001	1,000
	Ligne de semis		0,000		0,001
250	Interrang	0,000	0,002	0,000	0,670
	Ligne de semis		0,000		0,000

Hauteur moyenne des seuils à franchir dans la direction du ruissellement (mm)

P. Cum. (mm)	Motif	Labour		TSL	
		Ligne de semis	Trace de roue	Ligne de semis	Trace de roue
0	Interrang	0,000	0,174	0,000	0,001
	Ligne de semis		0,000		0,000
62	Interrang	0,000	0,000	0,000	0,009
	Ligne de semis		0,000		0,000
93	Interrang	0,000	0,000	0,000	0,009
	Ligne de semis		0,000		0,000
120	Interrang	0,000	0,000	0,000	0,000
	Ligne de semis		0,000		0,000
250	Interrang	0,000	0,000	0,000	0,038
	Ligne de semis		0,000		0,000

Couverture par les résidus végétaux

P. Cum. (mm)	Motif	TSL	
		Ligne de semis	Trace de roue
0	Interrang	0,000	0,582
	Ligne de semis		0,000
62	Interrang	0,000	0,553
	Ligne de semis		0,000
93	Interrang	0,000	0,309
	Ligne de semis		0,000
120	Interrang	0,000	0,482
	Ligne de semis		0,000
250	Interrang	0,000	0,883
	Ligne de semis		0,000

Annexe 6 - Méthodes de calculs des volumes ruisselés et érodés

$$\text{Lame d'eau ruisselée (mm)} = V / S$$

La lame ruisselée est calculée en ramenant le volume d'eau ruisselé contenu dans la cuve de collecte (V, exprimé en litres) à la surface de la parcelle expérimentale S (ici, 22.25 m²)

$$\text{Coefficient de ruissellement (\%)} = R/P \times 100$$

Le coefficient de ruissellement correspond au ratio entre lame ruisselée, R, exprimée en mm ; et la lame précipitée P, exprimée en mm ; de l'épisode ayant déclenché le ruissellement.

$$\text{Concentration en MES (g/l)} = M/V$$

La concentration en matières en suspension correspond au rapport entre la masse des matières en suspension M, exprimée en gramme ; et le volume ruisselé V, exprimé en litres.

$$\text{Erosion généralisée (t/ha)} = M \times (10\,000/S)$$

L'érosion généralisée correspond à la masse des MES collectées (M, exprimée en tonnes) sur la parcelle expérimentale (S étant la surface expérimentale du dispositif exprimée en mètres carré, ici 22.25 m²) rapportée à l'échelle d'un hectare.

Annexe 7 : Caractéristiques des états de surface précédant les épisodes ruisselants

Site : Neewiller

Date de l'épisode pluvieux : 13 juin 2004

Lame d'eau précipitée : 7.0 mm

Intensité moyenne : 42.0 mm/h

Précipitations cumulées depuis le semis : 52.0 mm

Date du relevé d'EDS : 18 mai 2004

Précipitations cumulées depuis le semis : 21 mm

Technique culturale	Parcelle expérimentale	Motif	Mottes <2cm (%)	Mottes >2cm (%)	Diamètre mini non scellé (mm)	Croûtes struct. (%)	Croûtes séd. (%)	Couvert. vég. (%)	Couvert. résidus (%)	Hsf. moy. direction écoulement (mm)	Hsf. max. direction écoulement (mm)	Hsf. moy. perpendiculaire écoulement (mm)	Hsf. max. perpendiculaire écoulement (mm)	Diamètre flaqué (mm)	Prof. flaques (mm)	Densité fentes	Nb. trous
Labour	Amont	Interrang	20	10	30	90	0	5	5	2	2	1	5	0	0	Abs.	0
		Ligne de semis	25	5	30	85	0	65	5	3	5	3	20	0	0	Abs.	0
		Trace de roue	20	10	35	90	0	0	0	10	30	10	30	100	30	Abs.	0
	Aval	Interrang	20	5	15	95	0	10	5	2	3	2	2	0	0	Abs.	0
		Ligne de semis	60	5	20	95	0	40	0	3	5	3	15	0	0	Abs.	0
		Trace de roue	35	10	25	90	0	0	5	5	22	5	20	70	20	Abs.	0
Déchaumeur	Amont	Interrang	5	0	50	95	0	0	15	5	22	2	10	100	15	Abs.	18
		Ligne de semis	70	5	2	65	0	40	20	5	15	5	20	0	0	Abs.	0
		Trace de roue	5	5	10	65	0	0	35	15	30	13	25	100	20	Abs.	0
	Aval	Interrang	5	5	30	65	0	0	35	5	20	5	20	70	15	Abs.	0
		Ligne de semis	40	0	5	80	0	55	10	2	5	2	12	0	0	Abs.	0
		Trace de roue	0	10	40	70	0	0	30	15	25	15	20	100	20	Abs.	0
Semis-direct	Amont	Interrang	5	0	0	40	0	0	60	5	15	4	17	70	20	Abs.	7
		Ligne de semis	15	0	0	45	0	60	60	10	30	10	25	50	20	Abs.	0
		Trace de roue	0	0	0	20	0	0	80	20	30	25	35	90	30	Abs.	9
	Aval	Interrang	5	0	0	40	0	0	50	15	20	15	20	100	20	Abs.	0
		Ligne de semis	15	0	0	60	0	20	45	10	20	15	25	0	0	Abs.	0
		Trace de roue	5	0	0	20	0	0	80	35	50	30	40	100	30	Abs.	0

Site : Neewiller

Date de l'épisode pluvieux : 11 juillet 2004

Lame d'eau précipitée : 6.6 mm

Intensité moyenne : 39.6 mm/h

Précipitations cumulées depuis le semis : 87.0 mm

Date du relevé d'EDS : 17 juin 2004

Précipitations cumulées depuis le semis : 63 mm

Technique culturale		Motif	Mottes <2cm (%)	Mottes >2cm (%)	Diamètre mini non scellé (mm)	Croûtes struct. (%)	Croûtes séd. (%)	Couvert. vég. (%)	Couvert. résidus (%)	Hsf. moy. direction écoulement (mm)	Hsf. max. direction écoulement (mm)	Hsf. moy. perpendiculaire écoulement (mm)	Hsf. max. perpendiculaire écoulement (mm)	Diamètre flaque (mm)	Prof. flaques (mm)	Densité fentes	Nb. trous
Labour	Amont	Interrang	0	10	0	75	25	25	0	1	2	1	4	0	0	Abs.	0
		Ligne de semis	0	5	0	60	40	100	0	1	2	1	5	0	0	Abs.	0
		Trace de roue	0	10	0	85	15	20	0	2	5	2	10	0	0	Abs.	0
	Aval	Interrang	0	5	0	70	30	20	5	1	2	1	2	0	0	Abs.	0
		Ligne de semis	0	5	0	40	60	100	0	1	2	1	25	0	0	Abs.	0
		Trace de roue	0	5	0	60	40	20	5	1	2	2	12	0	0	Abs.	0
Déchaumeur	Amont	Interrang	0	0	0	80	20	10	15	2	10	2	12	0	0	Abs.	0
		Ligne de semis	0	0	0	85	10	70	10	2	5	2	7	0	0	Abs.	0
		Trace de roue	0	5	0	70	0	0	30	15	25	15	30	0	0	Abs.	25
	Aval	Interrang	0	0	0	75	0	20	35	5	10	7	12	0	0	Abs.	0
		Ligne de semis	0	0	0	90	0	40	10	2	5	3	5	0	0	Abs.	0
		Trace de roue	0	5	0	70	0	20	35	10	20	7	50	0	0	Abs.	0
Semis-direct	Amont	Interrang	0	0	0	50	0	20	50	5	15	5	20	0	0	Abs.	0
		Ligne de semis	0	0	0	40	0	85	55	10	25	10	25	0	0	Abs.	0
		Trace de roue	0	0	0	15	0	15	80	15	25	18	30	120	10	Abs.	0
	Aval	Interrang	0	0	0	55	0	15	50	10	10	5	12	0	0	Abs.	0
		Ligne de semis	0	0	0	60	0	60	45	4	12	7	18	0	0	Abs.	0
		Trace de roue	0	0	0	25	0	20	80	10	20	15	22	80	10	Abs.	0

Site : Neewiller

Date de l'épisode pluvieux : 24 juillet 2004

Lame d'eau précipitée : 8.0 mm

Intensité moyenne : 32.0 mm/h

Précipitations cumulées depuis le semis : 111.0 mm

Date du relevé d'EDS : 16 juillet 2004

Précipitations cumulées depuis le semis : 104 mm

Technique culturale	Parcelle expérimentale	Motif	Mottes <2cm (%)	Mottes >2cm (%)	Diamètre mini non scellé (mm)	Croûtes struct. (%)	Croûtes séd. (%)	Couvert. vég. (%)	Couvert. résidus (%)	Hsf. moy. direction écoulement (mm)	Hsf. max. direction écoulement (mm)	Hsf. moy. perpendiculaire écoulement (mm)	Hsf. max. perpendiculaire écoulement (mm)	Diamètre flaque (mm)	Prof. flaques (mm)	Densité fentes	Nb. trous
Labour	Amont	Interrang	0	0	0	70	30	25	0	1	2	1	2	0	0	Abs.	0
		Ligne de semis	0	5	0	60	40	100	0	1	2	1	2	0	0	Abs.	0
		Trace de roue	10	10	0	85	15	20	0	2	10	1	10	0	0	Abs.	0
	Aval	Interrang	10	5	0	70	30	20	5	1	2	1	2	0	0	Abs.	3
		Ligne de semis	5	5	0	40	60	100	0	1	5	1	2	0	0	Abs.	4
		Trace de roue	0	5	0	50	50	20	5	1	2	1	2	0	0	Abs.	0
Déchaumeur	Amont	Interrang	0	0	0	60	20	10	15	2	8	5	15	0	0	Abs.	0
		Ligne de semis	0	0	0	80	10	70	15	1	5	2	8	0	0	Abs.	0
		Trace de roue	0	0	0	65	0	0	25	5	12	5	20	0	0	Abs.	0
	Aval	Interrang	0	0	0	80	0	20	25	4	7	5	8	0	0	Abs.	0
		Ligne de semis	0	0	0	100	0	40	10	2	4	2	10	0	0	Abs.	17
		Trace de roue	0	5	0	70	0	20	30	5	10	5	15	0	0	Abs.	0
Semis-direct	Amont	Interrang	0	0	0	60	0	20	45	3	5	3	10	0	0	Abs.	0
		Ligne de semis	0	0	0	60	0	85	55	3	5	3	10	0	0	Abs.	0
		Trace de roue	0	0	0	15	0	15	85	5	15	5	15	0	0	Abs.	0
	Aval	Interrang	0	0	0	55	0	15	50	10	15	3	20	0	0	Abs.	0
		Ligne de semis	0	0	0	65	0	60	40	3	10	5	25	0	0	Abs.	0
		Trace de roue	0	0	0	25	0	20	85	10	20	10	30	0	0	Abs.	0

Site : Neewiller

Date de l'épisode pluvieux : 6 juin 2005

Lame d'eau précipitée : 6.8 mm

Intensité moyenne : 27.2 mm/h

Précipitations cumulées depuis le semis : 56.8 mm

Date du relevé d'EDS : 25 mai 2005

Précipitations cumulées depuis le semis : 54 mm

Technique culturale	Parcelle expérimentale	Motif	Mottes <2cm (%)	Mottes >2cm (%)	Diamètre mini non scellé (mm)	Croûtes struct. (%)	Croûtes séd. (%)	Couvert. vég. (%)	Couvert. résidus (%)	Hsf. moy. direction écoulement (mm)	Hsf. max. direction écoulement (mm)	Hsf. moy. perpendiculaire écoulement (mm)	Hsf. max. perpendiculaire écoulement (mm)	Diamètre flaque (mm)	Prof. flaques (mm)	Densité fentes	Nb. trous
Labour	Amont	Interrang	0	10	0	90	10	0	0	3	10	4	15	40	5	faible	4
		Ligne de semis	0	0	0	70	30	5	0	1	2	4	5	0	0	faible	5
		Trace de roue	10	15	1	80	20	0	0	2	7	2	2	40	5		0
	Aval	Interrang	0	5	0	85	15	0	0	3	7	2	10	25	3		2
		Ligne de semis	0	5	0	20	80	5	0	1	1	3	7	0	0		0
		Trace de roue	5	10	7	70	30	0	0	1	4	1	2	35	5		3
Déchaumeur	Amont	Interrang	0	5	0	90	10	0	5	3	7	3	8	40	5		0
		Ligne de semis	0	0	0	80	20	5	10	1	2	1	5	0	0		9
		Trace de roue	0	15	0	100	0	0	10	10	5	3	5	0	0		14
	Aval	Interrang	0	5	0	95	5	0	10	3	8	3	15	50	5		5
		Ligne de semis	10	10	0	85	15	5	10	1	2	3	5	0	0		13
		Trace de roue	20	10	1	90	10	0	10	5	5	2	5	0	0		16
Décompacteur	Amont	Interrang	0	0	0	40	0	0	50	10	15	10	15	45	10		9
		Ligne de semis	0	0	0	85	15	5	15	2	5	4	10	0	0		3
		Trace de roue	0	10	0	60	0	0	30	10	10	7	12	30	5		3
	Aval	Interrang	0	0	0	50	0	0	60	8	10	8	12	40	3		11
		Ligne de semis	0	0	0	85	15	5	15	2	10	8	10	0	0	faible	4
		Trace de roue	0	5	0	30	0	0	40	10	15	10	20	35	5		6
Semis-direct	Amont	Interrang	0	25	0	95	0	0	20	15	15	8	20	60	10		12
		Ligne de semis	0	0	0	100	0	0	5	2	3	6	15	0	0	faible	6
		Trace de roue	0	0	0	80	0	0	30	5	15	5	20	0	0		5
	Aval	Interrang	0	5	0	60	0	0	40	15	20	15	20	30	10		3
		Ligne de semis	0	0	0	90	10	0	15	4	10	7	15	0	0		5
		Trace de roue	0	0	0	50	0	0	70	7	15	7	10	60	3		3

Site : Neewiller

Date de l'épisode pluvieux : 25 juin 2005

Lame d'eau précipitée : 7.8 mm

Intensité moyenne : 46.8 mm/h

Précipitations cumulées depuis le semis : 66.5 mm

Date du relevé d'EDS : 13 juin 2005

Précipitations cumulées depuis le semis : 65 mm

Technique culturale		Parcelle expérimentale	Motif	Mottes <2cm (%)	Mottes >2cm (%)	Diamètre mini non scellé (mm)	Croûtes struct. (%)	Croûtes séd. (%)	Couvert. vég. (%)	Couvert. résidus (%)	Hsf. moy. direction écoulement (mm)	Hsf. max. direction écoulement (mm)	Hsf. moy. perpendiculaire écoulement (mm)	Hsf. max. perpendiculaire écoulement (mm)	Diamètre flaques (mm)	Prof. flaques (mm)	Densité fentes	Nb. trous
Labour	Amont	Interrang	0	5	0	80	20	0	0	1	2	1	2	0	0	faible	2	
		Ligne de semis	0	0	0	70	30	40	0	1	1	2	5	0	0		0	
		Trace de roue	0	5	0	60	40	0	0	1	1	1	1	0	0		3	
	Aval	Interrang	0	0	0	50	50	0	0	1	2	1	2	0	0	faible	5	
		Ligne de semis	0	5	0	20	80	30	0	1	1	1	1	0	0		0	
		Trace de roue	0	5	0	70	30	0	0	1	1	1	1	0	0		7	
Déchaumeur	Amont	Interrang	0	5	0	70	30	0	5	1	2	1	2	0	0	faible	1	
		Ligne de semis	0	0	0	70	30	30	5	1	2	2	5	0	0		6	
		Trace de roue	0	5	0	80	20	0	5	5	5	2	5	0	0		7	
	Aval	Interrang	0	0	0	60	40	0	5	2	2	2	2	40	5	faible	4	
		Ligne de semis	0	5	0	70	30	20	10	1	2	1	2	0	0		0	
		Trace de roue	0	10	0	80	20	0	5	3	2	1	2	0	0		14	
Décompacteur	Amont	Interrang	0	0	0	50	0	0	50	4	5	5	6	0	0		18	
		Ligne de semis	0	0	0	80	20	5	15	2	4	2	5	0	0		3	
		Trace de roue	0	5	0	90	10	0	30	8	5	3	5	35	5		6	
	Aval	Interrang	0	0	0	30	0	0	60	4	10	4	10	0	0		0	
		Ligne de semis	0	0	0	85	15	15	10	2	3	3	5	0	0	faible	5	
		Trace de roue	0	5	0	60	0	0	30	5	6	3	15	0	0		16	
Semis-direct	Amont	Interrang	5	5	0	100	0	0	20	7	10	5	12	40	5		4	
		Ligne de semis	0	0	0	100	0	20	5	1	2	3	10	0	0		4	
		Trace de roue	0	0	0	70	0	0	30	5	5	3	5	0	0		6	
	Aval	Interrang	5	0	0	90	0	0	30	8	12	7	12	30	5		9	
		Ligne de semis	0	0	0	90	10	10	10	2	5	3	5	0	0		0	
		Trace de roue	0	0	0	50	0	0	70	5	10	5	10	0	0		15	

Site : Neewiller

Date de l'épisode pluvieux : 6 juillet 2005

Lame d'eau précipitée : 5.8 mm

Intensité moyenne : 34.8 mm/h

Précipitations cumulées depuis le semis : 97.8 mm

Date du relevé d'EDS : 13 juin 2005

Précipitations cumulées depuis le semis : 65 mm

Technique culturale		Parcelle expérimentale	Motif	Mottes <2cm (%)	Mottes >2cm (%)	Diamètre mini non scellé (mm)	Croûtes struct. (%)	Croûtes séd. (%)	Couvert. vég. (%)	Couvert. résidus (%)	Hsf. moy. direction écoulement (mm)	Hsf. max. direction écoulement (mm)	Hsf. moy. perpendiculaire écoulement (mm)	Hsf. max. perpendiculaire écoulement (mm)	Diamètre flaques (mm)	Prof. flaques (mm)	Densité fentes	Nb. trous
Labour	Amont	Interrang	0	5	0	80	20	0	0	1	2	1	2	0	0	faible	2	
		Ligne de semis	0	0	0	70	30	40	0	1	1	2	5	0	0		0	
		Trace de roue	0	5	0	60	40	0	0	1	1	1	1	0	0		3	
	Aval	Interrang	0	0	0	50	50	0	0	1	2	1	2	0	0	faible	5	
		Ligne de semis	0	5	0	20	80	30	0	1	1	1	1	0	0		0	
		Trace de roue	0	5	0	70	30	0	0	1	1	1	1	0	0		7	
Déchaumeur	Amont	Interrang	0	5	0	70	30	0	5	1	2	1	2	0	0	faible	1	
		Ligne de semis	0	0	0	70	30	30	5	1	2	2	5	0	0		6	
		Trace de roue	0	5	0	80	20	0	5	5	5	2	5	0	0		7	
	Aval	Interrang	0	0	0	60	40	0	5	2	2	2	2	40	5	faible	4	
		Ligne de semis	0	5	0	70	30	20	10	1	2	1	2	0	0		0	
		Trace de roue	0	10	0	80	20	0	5	3	2	1	2	0	0		14	
Décompacteur	Amont	Interrang	0	0	0	50	0	0	50	4	5	5	6	0	0		18	
		Ligne de semis	0	0	0	80	20	5	15	2	4	2	5	0	0		3	
		Trace de roue	0	5	0	90	10	0	30	8	5	3	5	35	5		6	
	Aval	Interrang	0	0	0	30	0	0	60	4	10	4	10	0	0		0	
		Ligne de semis	0	0	0	85	15	15	10	2	3	3	5	0	0	faible	5	
		Trace de roue	0	5	0	60	0	0	30	5	6	3	15	0	0		16	
Semis-direct	Amont	Interrang	5	5	0	100	0	0	20	7	10	5	12	40	5		4	
		Ligne de semis	0	0	0	100	0	20	5	1	2	3	10	0	0		4	
		Trace de roue	0	0	0	70	0	0	30	5	5	3	5	0	0		6	
	Aval	Interrang	5	0	0	90	0	0	30	8	12	7	12	30	5		9	
		Ligne de semis	0	0	0	90	10	10	10	2	5	3	5	0	0		0	
		Trace de roue	0	0	0	50	0	0	70	5	10	5	10	0	0		15	

Site : Landser

Date de l'épisode pluvieux : 7 juin 2005

Lame d'eau précipitée : 5.2 mm

Intensité moyenne : 20.8 mm/h

Précipitations cumulées depuis le semis : 63.3 mm

Date du relevé d'EDS : 26 avril 2005

Précipitations cumulées depuis le semis : 55 mm

Technique culturale	Parcelle expérimentale	Motif	Mottes <2cm (%)	Mottes >2cm (%)	Diamètre mini non scellé (mm)	Croûtes struct. (%)	Croûtes séd. (%)	Couvert. vég. (%)	Couvert. résidus (%)	Hsf. moy. direction écoulement (mm)	Hsf. max. direction écoulement (mm)	Hsf. moy. perpendiculaire écoulement (mm)	Hsf. max. perpendiculaire écoulement (mm)	Diamètre flaque (mm)	Prof. flaques (mm)	Densité fentes	Nb. trous
Labour d'hiver	Amont	Interrang	0	15	0	85	15	0	0	5	7	3	12	35	3		11
		Ligne de semis	0	0	0	80	20	5	0	1	2	7	10	0	0	faible	0
		Trace de roue	5	5	0	40	50	0	0	3	10	3	12	40	3		0
	Aval	Interrang	5	5	0	95	0	0	0	4	7	2	10	30	5	faible	14
		Ligne de semis	0	0	0	80	20	5	0	1	2	3	5	0	0	moyen	0
		Trace de roue	5	0	0	60	40	0	0	5	10	5	10	40	5	faible	5
Labour de printemps	Amont	Interrang	0	15	0	85	15	0	0	10	5	3	15	0	0	faible	3
		Ligne de semis	0	0	0	90	10	5	0	1	2	4	6	0	0	faible	3
		Trace de roue	5	0	0	80	20	0	0	1	5	1	5	0	0		0
	Aval	Interrang	0	10	0	100	0	0	0	7	5	3	5	0	0	faible	2
		Ligne de semis	0	0	0	100	0	5	0	1	2	4	5	0	0	faible	5
		Trace de roue	5	5	0	85	15	0	0	2	5	2	5	40	3		0
Décompacteur + déchaum.	Amont	Interrang	5	5	0	100	0	0	30	10	5	4	10	35	3		22
		Ligne de semis	0	0	0	80	20	5	10	2	4	8	12	30	3		5
		Trace de roue	0	10	0	70	30	0	20	2	5	1	5	0	0		6
	Aval	Interrang	5	20	0	100	0	0	20	20	12	7	15	55	5		12
		Ligne de semis	0	0	0	85	15	5	10	2	4	4	10	0	0	faible	9
		Trace de roue	0	0	0	50	50	0	10	5	5	2	5	35	3		0
Charrue Perrein	Amont	Interrang	5	20	0	100	0	0	20	20	12	9	12	30	5		5
		Ligne de semis	5	5	0	100	0	5	5	2	3	4	5	0	0		11
		Trace de roue	0	0	0	85	15	0	30	7	10	8	12	40	5		2
	Aval	Interrang	0	15	0	100	0	0	10	10	5	3	5	0	0		13
		Ligne de semis	0	0	0	95	5	5	5	1	3	3	5	0	0	faible	15
		Trace de roue	0	5	0	90	10	0	15	5	12	8	15	40	5		6

Site : Landser

Date de l'épisode pluvieux : 12 juillet 2005

Lame d'eau précipitée : 7.2 mm

Intensité moyenne : 20.8 mm/h

Précipitations cumulées depuis le semis : 123.8 mm

Date du relevé d'EDS : 16 juin 2005

Précipitations cumulées depuis le semis : 81 mm

Technique culturale	Parcelle expérimentale	Motif	Mottes <2cm (%)	Mottes >2cm (%)	Diamètre mini non scellé (mm)	Croûtes struct. (%)	Croûtes séd. (%)	Couvert. vég. (%)	Couvert. résidus (%)	Hsf. moy. direction écoulement (mm)	Hsf. max. direction écoulement (mm)	Hsf. moy. perpendiculaire écoulement (mm)	Hsf. max. perpendiculaire écoulement (mm)	Diamètre flaque (mm)	Prof. flaques (mm)	Densité fentes	Nb. trous
Labour d'hiver	Amont	Interrang	0	5	0	70	30	30	0	2	3	2	3	50	2		2
		Ligne de semis	0	0	0	80	20	80	0	1	1	5	10	0	0	faible	0
		Trace de roue	0	5	0	45	50	20	0	3	10	3	10	0	0		3
	Aval	Interrang	0	0	0	100	0	20	0	3	5	3	5	0	0		26
		Ligne de semis	0	0	0	80	20	60	0	1	2	3	5	0	0	faible	0
		Trace de roue	0	0	0	60	40	30	0	4	10	4	10	0	0	faible	6
Labour de printemps	Amont	Interrang	0	15	0	70	30	20	0	7	5	2	10	0	0		2
		Ligne de semis	0	0	0	80	20	80	0	1	2	4	6	0	0		0
		Trace de roue	0	0	0	80	20	30	0	1	5	1	2	0	0		5
	Aval	Interrang	0	10	0	100	0	20	0	2	4	2	10	50	2	faible	3
		Ligne de semis	0	0	0	80	20	70	0	1	2	3	5	0	0	faible	0
		Trace de roue	0	0	0	70	30	40	0	2	5	3	10	50	2		6
Décompacteur + déchaum.	Amont	Interrang	0	5	0	100	0	20	30	5	6	4	10	0	0		18
		Ligne de semis	0	0	0	80	20	60	10	2	5	5	10	0	0		6
		Trace de roue	0	10	0	40	60	20	15	2	3	1	2	0	0		14
	Aval	Interrang	0	15	0	90	10	20	20	15	15	5	15	40	4		24
		Ligne de semis	0	0	0	70	30	50	10	2	4	5	10	0	0	faible	0
		Trace de roue	0	0	0	50	50	20	10	5	4	1	5	30	3		16
Charrue Perrein	Amont	Interrang	0	15	0	100	0	20	20	15	10	4	15	40	5		2
		Ligne de semis	10	0	0	90	10	60	5	3	4	3	5	0	0	faible	4
		Trace de roue	0	0	0	80	20	20	25	5	7	3	10	40	3		16
	Aval	Interrang	0	15	0	100	0	20	10	3	5	3	5	0	0		16
		Ligne de semis	0	0	0	95	5	60	5	1	2	2	4	0	0	faible	3
		Trace de roue	0	0	0	85	15	20	15	5	5	3	5	30	5		23

Site : Landser

Date de l'épisode pluvieux : 29 juillet 2005

Lame d'eau précipitée : 11.3 mm

Intensité moyenne : 33.9 mm/h

Précipitations cumulées depuis le semis : 177.4 mm

Date du relevé d'EDS : 13 juillet 2005

Précipitations cumulées depuis le semis : 135 mm

Technique culturale		Parcelle expérimentale	Motif	Mottes <2cm (%)	Mottes >2cm (%)	Diamètre mini non scellé (mm)	Croûtes struct. (%)	Croûtes séd. (%)	Couvert. vég. (%)	Couvert. résidus (%)	Hsf. moy. direction écoulement (mm)	Hsf. max. direction écoulement (mm)	Hsf. moy. perpendiculaire écoulement (mm)	Hsf. max. perpendiculaire écoulement (mm)	Diamètre flaque (mm)	Prof. flaques (mm)	Densité fentes	Nb. trous	
Labour d'hiver	Amont	Interrang	0	5	0	70	30	30	0	1	3	1	3	0	0			3	
		Ligne de semis	0	0	0	75	25	80	0	1	2	7	10	0	0			0	
		Trace de roue	0	0	0	45	55	20	0	2	10	5	15	0	0			5	
	Aval	Interrang	0	0	0	100	0	20	0	2	5	2	5	0	0				0
		Ligne de semis	0	0	0	80	20	60	0	1	1	3	7	0	0				0
		Trace de roue	0	0	0	60	40	30	0	1	2	3	20	0	0				0
Labour de printemps	Amont	Interrang	0	0	0	60	40	20	0	3	5	2	10	0	0				5
		Ligne de semis	0	0	0	80	20	80	0	1	2	5	10	0	0				0
		Trace de roue	0	0	0	60	40	30	0	1	3	5	15	0	0				0
	Aval	Interrang	0	10	0	80	20	20	0	1	5	1	10	0	0				0
		Ligne de semis	0	0	0	60	40	70	0	1	2	2	5	0	0				0
		Trace de roue	0	0	0	70	30	40	0	2	10	5	10	0	0				0
Décompacteur + déchaum.	Amont	Interrang	0	5	0	100	0	20	20	3	5	3	5	0	0				4
		Ligne de semis	0	0	0	100	0	60	10	1	2	3	5	0	0				22
		Trace de roue	0	5	0	40	60	20	10	2	2	1	2	0	0				3
	Aval	Interrang	0	5	0	90	10	20	20	10	12	7	15	0	0				5
		Ligne de semis	0	0	0	70	30	50	10	1	3	3	5	0	0				3
		Trace de roue	0	0	0	50	50	20	10	5	5	3	5	0	0				4
Charrue Perrein	Amont	Interrang	10	5	0	100	0	20	20	15	12	7	15	50	5				3
		Ligne de semis	0	0	0	70	30	60	5	1	2	5	7	0	0				16
		Trace de roue	0	0	0	70	30	20	25	3	12	7	15	0	0				7
	Aval	Interrang	0	5	0	100	0	20	10	3	7	5	10	0	0				10
		Ligne de semis	0	0	0	90	10	60	5	1	3	2	5	0	0				3
		Trace de roue	0	0	0	70	30	20	15	5	10	5	15	0	0				16

Remerciements	3
Sommaire	7
Introduction générale	11
Chapitre 1 État de surface et formation du ruissellement sur les sols cultivés : bilan des connaissances	17
1. Influence de la surface du sol sur la formation du ruissellement	18
1.1. Les processus élémentaires	18
1.1.1. Les différents types de ruissellement	18
1.1.2. La genèse du ruissellement sur sols cultivés	19
1.1.2.1. Des précipitations au ruissellement	19
1.1.2.2. Deux processus à la base du refus à l'infiltration sur sols cultivés	20
1.2. Les états de surface du sol	22
1.2.1. Observer la surface pour identifier des types morphogénétiques	22
1.2.2. Le rôle des EDS sur le refus à l'infiltration	25
1.2.3. Les facteurs en jeu dans la dynamique des EDS	26
1.2.3.1. Les conditions du milieu naturel	27
1.2.3.2. Impacts des techniques culturales	28
2. Les techniques sans labour, un des outils de la lutte contre le ruissellement	30
2.1. Des pratiques agricoles alternatives au labour	30
2.1.1. Comment définir les techniques sans labour ?	30
2.1.2. Historique et objectifs actuels du non-labour	32
2.1.3. Les motivations du passage en non-labour	34
2.2. Les effets du non-labour sur le ruissellement et l'érosion	35
3. Les effets du non-labour sur le sol	37
1.1. L'amélioration du taux de matière-organique en surface	37
1.2. Effet sur la porosité du profil	37
3.1.1. Effet sur la densité apparente : peu de différences à long terme	37
3.1.2. Influence de l'activité biologique sur la porosité	40
1.3. Impacts sur la surface du sol	41
3.1.3. Effets physiques	41
3.1.4. Effets chimiques et biologiques	41
3.1.5. Conséquences sur l'infiltrabilité de la surface	42
4. Approfondir l'effet de la surface sur la formation du ruissellement	43
4.1. Ancienneté du non-labour et influence des processus de surface	43
4.2. Estimer le ruissellement à partir des EDS	44
4.3. Variabilité spatiale des EDS et formation du ruissellement	46
Synthèse et objectifs de ce travail	48

Chapitre 2 Sites d'études et méthodes	51
1. Une région affectée par l'érosion	53
1.1. L'étude des dossiers de reconnaissance d'état de catastrophe naturelle	53
1.2. Les secteurs affectés par les inondations boueuses	55
2. Présentation des petites régions naturelles étudiées	57
2.1. Géomorphologie : un paysage de collines	57
2.1.1. Le Sundgau	57
2.1.2. L'Outre-Forêt	59
2.2. Un climat marqué par les orages de printemps	59
2.3. Évolution des paysages agricoles et impacts sur les inondations boueuses	61
2.4. Synthèse des facteurs impliqués dans la formation du ruissellement	63
3. Présentation des sites de suivis	63
3.1. Choix des sites	63
3.2. Caractéristiques pédologiques et agronomiques des sites	64
4. Méthodes de mesures utilisées	66
4.1. L'observation des états de surface du sol	66
4.1.1. Echantillonnage temporel et spatial	66
4.1.2. Quels sont les descripteurs relevés ?	69
4.2. Mesure des précipitations	71
4.3. Collecte de ruissellement sous pluies naturelles	73
4.3.1. Conception des parcelles expérimentales de collecte de ruissellement	73
<i>Application du dispositif à l'échelle du motif</i>	74
4.3.2. Protocole d'échantillonnage du ruissellement	75
4.4. Propagation du ruissellement	75
4.4.1. Protocole expérimental	75
4.5. Effet des résidus végétaux sur le ruissellement	78
Conclusion	80
Chapitre 3 Résultats des campagnes d'observation d'états de surface	83
1. Méthode et jeu de données retenus	84
1.1. Identifier des types d'EDS en utilisant la classification hiérarchique ascendante	84
1.1.1. Le principe de la classification hiérarchique ascendante	84
1.1.2. Application au jeu de données	85
1.2. Caractéristiques pluviométriques des années de suivis	86
1.3. Le cas des TSL : quelle typologie de pratiques retenir ?	87
2. A l'état initial, des différences correspondant aux pratiques	87
3. A l'état final, un classement complexe soulignant la dégradation structurale	91
4. Synthèse des observations d'état de surface	94

5.	Étude de la variabilité intraparcellaire des états de surface _____	95
5.1.	Consolider les résultats précédents _____	95
5.2.	Résultats _____	96
	Synthèse et conclusion _____	100
 Chapitre 4 EDS et formation du ruissellement _____		103
1.	Identifier les variables d'EDS pertinentes _____	106
2.	Une baisse du ruissellement et de l'érosion en contexte de non-labour _____	107
2.1.	Mesures de ruissellement sur le site de Neewiller en 2004 _____	107
2.2.	Mesures de ruissellement sur le site de Neewiller en 2005 _____	109
2.3.	Mesures de ruissellement sur le site de Landser en 2005 _____	111
2.4.	Analyse statistique de la relation entre états de surface et ruissellement _____	112
2.5.	Synthèse : caractéristiques des épisodes déclenchants et performances des TSL _____	116
3.	Mesures de ruissellement et d'érosion à l'échelle du motif _____	118
4.	Propagation du ruissellement _____	120
4.1.	Résultats _____	121
4.1.1.	Premier stade pluviométrique (0 mm) _____	121
4.1.2.	Deuxième stade pluviométrique (67 mm) _____	122
4.1.3.	Troisième stade pluviométrique (120 mm) _____	123
4.2.	Quelles variables d'EDS influencent la distance parcourue par le ruissellement ? _____	125
4.3.	Synthèse : le rôle des lignes de semis dans la propagation du ruissellement _____	126
5.	Effets de la répartition spatiale des résidus végétaux sur le ruissellement _____	127
	Conclusion _____	130
 Chapitre 5 Mise au point d'un indicateur estimant l'aléa ruissellement _____		133
1.	Quelles connaissances intégrer à l'indicateur ? _____	135
2.	Effet de des résidus végétaux _____	137
 Chapitre 6 Discussion _____		141
1.	L'effet des pratiques sur la réduction du ruissellement et de l'érosion _____	142

1.1.	Une réduction du ruissellement et de l'érosion confirmée _____	142
1.2.	Transférer ces valeurs à une autre échelle _____	142
2.	Quels facteurs contrôlent la formation du ruissellement ? _____	144
2.1.	L'effet des résidus végétaux _____	144
2.2.	Relativiser l'effet de la croûte structurale _____	146
 Conclusion générale _____		149
 Références bibliographiques _____		155
Liste des tableaux et figures _____		163
Liste des abréviations _____		169
 Annexes _____		171
 Table des matières _____		205

Étude des états de surface du sol et de leur dynamique pour différentes pratiques de travail du sol. Mise au point d'un indicateur de ruissellement.

Ce travail s'intéresse à l'érosion hydrique observée dans les secteurs de collines limoneuses d'Alsace. Il aborde le cas spécifique de la monoculture de maïs grain, dont l'état de surface (EDS) influence fortement la formation du ruissellement au cours du printemps, en raison de la formation de croûtes de battance.

L'objectif de ce travail est d'étudier les états de surface entre différents itinéraires techniques : technique conventionnelle (basée sur le labour), techniques sans labour et semis-direct et de mettre en évidence des différences pouvant expliquer des variations des volumes ruisselés et des pertes en terre. Pour ce faire, des observations de surface ont été réalisées en tenant compte de l'organisation spatiale des EDS créée par le travail du sol. Ces observations ont été complétées par des mesures *in situ* de ruissellement et de pertes en terre sous pluies naturelles et artificielles.

Les principaux résultats indiquent une diminution du ruissellement et de l'érosion en non-labour et en semis-direct. Les observations de surface montrent que, entre pratiques culturales, les différences d'EDS portent essentiellement sur les interrangs. Ces résultats ont été synthétisés sous la forme d'un indicateur estimant le cumul de précipitations nécessaires pour observer l'apparition d'EDS ruisselants.

Mots clés : sol, érosion, pratiques culturales, hydrologie, ruissellement, indicateur, maïs, techniques sans labour

Soil surface characteristics and their related dynamics for different tillage treatments. Conception of a runoff indicator.

This study concerns water erosion occurring on loamy hills of Alsace (France). It focuses on continuous grain corn, whose surface state characteristics (SSC) strongly influences runoff formation during spring.

Our goal is to study the differences of surface state characteristics amongst different tillage treatments: conventional technique (based on plough use), no-tillage techniques and direct-drilling and their potential effects on runoff and sediments amounts. The SSC's spatial variability created by tillage has been particularly investigated. *In situ* measurements of runoff and erosion have been carried out under natural and artificial rainfalls to complete surface observations.

Main results indicate a decrease in runoff and erosion in no-till and direct-drilling treatments. Most of SSC differences between tillage treatments were observed on interrows. Based on SSC and runoff measurements, an indicator estimating the cumulated rainfall amounts required to observed runoff generation was built.

Keywords: soil, erosion, agricultural practices, hydrology, runoff, indicator, corn, conservation tillage.